

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет математики и информатики  
Кафедра Информационных и управляющих систем  
Направление подготовки 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника  
Направленность (профиль) образовательной программы Автоматизированные  
системы обработки информации и управления

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ А.В. Бушманов  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Комбинированное управление неаффинным объектом по выходу в  
схеме с фильтр-корректором

Исполнитель

студент группы 553 об

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

П.И. Иваненко

Руководитель

профессор,  
доктор техн. наук

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Е.Л. Еремин

Консультант

по безопасности и  
экологичности  
доцент, канд. техн. наук

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

А.Б. Булгаков

Нормоконтроль

инженер кафедры

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

В.Н. Адаменко

Благовещенск 2019

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет математики и информатики  
Кафедра информационных и управляющих систем

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ А.В. Бушманов  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г.

**З А Д А Н И Е**

К бакалаврской работе студента Иваненко Павла Игоревича.

1. Тема бакалаврской работы: Комбинированное управление неаффинным объектом по выходу в схеме с фильтр-корректором

(утверждено приказом от 15.04.2019 № 847-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы .06.2019

3. Исходные данные к бакалаврской работе: техническое задание.

4. Содержание бакалаврской работы: исследование предметной области, синтез робастных систем управления, разработка математического и алгоритмического обеспечения комбинированных неаффинных систем управления в схеме с фильтр-корректором, разработка программного обеспечения, безопасность и экологичность.

5. Перечень материалов приложения: техническое задание, структурные Simulink-схемы, листинг программы.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: по безопасности и экологичности – А.Б. Булгаков, доцент, канд. техн. наук.

7. Дата выдачи задания: 15.04.2019

Руководитель бакалаврской работы: Еремин Евгений Леонидович, профессор, доктор. техн. наук.

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ П.И. Иваненко

## РЕФЕРАТ

Курсовая работа содержит 82 с., 18 рисунков, 2 таблицы, 32 источника.

Неаффинная нелинейная система, гиперустойчивость, робастное управление, моделирование, синтез, эталонная модель, фильтр-корректор,  $L$ -диссипативность.

В данной работе исследовались неаффинные нелинейные системы управления динамическими объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности. Целью работы являлась разработка алгоритмов для робастных неаффинных систем, а также разработка программного обеспечения для моделирования работы и исследуемых систем.

Основу методологии исследований составляют теория гиперустойчивости и концепция положительности динамических систем, а также условия  $L$ -диссипативности. Для решения поставленных задач в работе использовались общие методы математического моделирования; теории автоматического управления, робастных систем.

С помощью критерия гиперустойчивости был предложен аналитический способ синтеза, комбинированного закона управления для класса неаффинных по управлению одноканальных нелинейных систем. Также была разработана программа, позволяющая осуществлять имитационное моделирование исследуемых систем, выводить графики динамических процессов и изменять параметры основного контура управления в программной среде Matlab.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1. Исследование предметной области	8
2. Метод синтеза робастных систем управления	15
2.1 Теория гиперустойчивости в решении задач синтеза робастных систем управления	15
2.2 Этапы синтеза робастных систем управления по критерию гиперустойчивости	18
3. Разработка математического и алгоритмического обеспечения комбинированных неаффинных систем управления по выходу с фильтр-корректором	23
3.1 Синтез комбинированных робастных систем неаффинных по управлению	23
3.1.1 Постановка задачи	23
3.1.2 Синтез непрерывных алгоритмов настройки	26
3.2 Реализация фильтр-корректора	37
3.3 Моделирование нелинейных систем неаффинных по управлению	41
4 Разработка программного обеспечения	46
4.1 Описание среды разработки	46
4.2 Описание структуры системы имитационного моделирования	50
4.3 Руководство пользователя	52
5 Безопасность и экологичность	56
5.1 Безопасность	56
5.1.1 Требование к помещениям	57
5.1.2 Требование организации рабочего места	59
5.1.3 Безопасность при работе с ПЭВМ	63

5.2 Экологичность	65
5.3 ЧС	67
5.3.1 Пожарная безопасность при работе с ПЭВМ	67
5.3.2 Меры пожарной безопасности на рабочих местах	68
5.3.3 Инструктаж действий при пожаре	70
5.4 Комплекс физических упражнений при работе за компьютером	71
Заключение	73
Библиографический список	74
Приложение А	77

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ИНП – интегральное неравенство Попова.

ЛСЧ – линейная стационарная часть.

ННЧ – нелинейная нестационарная часть.

ОУ – объект управления.

ПЭВМ – персональная электронная вычислительная машина.

ЧС – чрезвычайная ситуация.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой современной теории автоматического управления является задача управления нелинейными динамическими объектами. В настоящее время большое количество результатов, полученные в этой области, относятся к нелинейным системам аффинным (или линейным) по управлению. Тем не менее в определенных прикладных задачах, например, связанных с управлением химическим реактором, подводными и летательными аппаратами и т.д., встречаются математические модели нелинейных систем, уравнения которых являются нелинейными по управлению, т.е. неаффинными.

В настоящее время, при разработке систем автоматического управления технологическими объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности, обширно используются методы, у которых основной контур управления построен на основе применения нейронных сетей или использования аппарата нечеткой логики. Но также есть и другие, в том числе и аналитические, подходы к синтезу систем неаффинных по управлению. За последнее время достаточно широко распространились методы робастного управления динамическими объектами, в которых желаемая динамика выхода объекта управления задается с помощью явной или неявной эталонной моделью. При этом целенаправленное использование нелинейностей в законе управления позволяет применить особые механизмы подавления факторов неопределенности и нестационарности объекта управления.

Задача разработки систем управления имеет свою специфику, связанную с наличием нелинейностей, разнообразием структур робастных регуляторов. Поэтому важным этапом проектирования является моделирование.

Основная тенденция при автоматизации этого этапа состоит в передаче машине большей части рутинных операций, связанных с составлением и отладкой программ цифрового моделирования. На этапе моделирования находит

свое применение и метод непрерывных моделей, позволяющий сократить время счета, заменив систему ее непрерывной моделью, а также оценить возникающую при этом погрешность.

В данной работе уделено внимание применению критерия гиперустойчивости и условий  $L$ -диссипативности для аналитического синтеза комбинированных алгоритмов для неаффинных нелинейных систем с одним входом и одним выходом. Показано, что, используя методику синтеза, разработанную для аффинных по управлению систем, можно найти решение задач стабилизации и слежения и для определенного класса одноканальных нелинейных неаффинных по управлению систем, обеспечивая их функционирование с заданным качеством.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения систем комбинированного робастного управления нестационарными динамическими неаффинными объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности.



# 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Структура сложной системы определяется типами моделей каждой из ее подсистем, а также характером отношений между ними. Таким образом, всё многообразие типов математических моделей можно классифицировать по следующим основным признакам:

- статические ( $y(t) = F(u(t))$ ) и динамические ( $y(t) = F(\{u(s), t \geq s\})$ );
- дискретные ( $U, Y, T$  – конечные (счетные) множества) и непрерывные ( $U, Y, T$  – континуумы (прямые, отрезки, тела в многомерных пространствах));
- детерминированные и стохастические нечеткие;
- сосредоточенные (конечные (алгебраические или трансцендентные) уравнения, разностные уравнения, обыкновенные дифференциальные уравнения) и распределенные (уравнения с запаздывающим аргументом, в частных производных, интегральные уравнения);
- линейные и нелинейные;
- стационарные, а также нестационарные.

Системы бывают статическим и динамическим. Статической системой являются та система автоматического регулирования, в которой ошибка регулирования рвется к константе с входным воздействием, стремящемся к определенному устойчивому значению. Что значит, что статическая система не обеспечивает стабильности управляемого параметра с переменной нагрузкой. В такой системе изменение из одного состояния в другое, происходит резкими скачками, и после система довольно долго сохраняет данное состояние.

Динамической системой является система автоматического регулирования, в которой переход с первого состояния в другое происходит не быстрым скачком, а по истечению некоторого времени, то есть процессы перехода можно наблюдать и описать.

Система может быть дискретной или непрерывной по входам, по выходам и по времени, то есть в зависимости от того, являются дискретными или

непрерывными, множества  $U$ ,  $Y$ ,  $T$ .

Под дискретным следует понимать конечное или счетное множество, а под непрерывным – множество объектов, для которых моделью служат – отрезок, луч или прямая линия. Если система имеет несколько входов и выходов, то соответствующие множества  $U$ ,  $Y$  лежат в многомерных пространствах.

Система может быть линейной или нелинейной. В линейных системах процессы описываются при помощи линейных дифференциальных уравнений. В нелинейных системах процессы описываются уравнениями, содержащими какие-либо нелинейности.

По виду параметров система может быть стационарная и нестационарная. Система является стационарной, если ее выходная реакция не зависит от того, в который момент времени приходит входной сигнал. Стационарная система — это система с постоянными во времени параметрами. Если свойства системы не являются инвариантными относительно выбора начала отсчета времени, то эту систему называют нестационарной (системой с переменными во времени параметрами или параметрической системой).

Рассмотрим объект управления (ОУ), на динамику которого влияют возмущения  $\varphi = \varphi(t)$  и управляющие воздействия  $u = u(t)$ , непосредственному измерению доступен только выход объекта  $y = y(t)$  (рисунок 1.1).

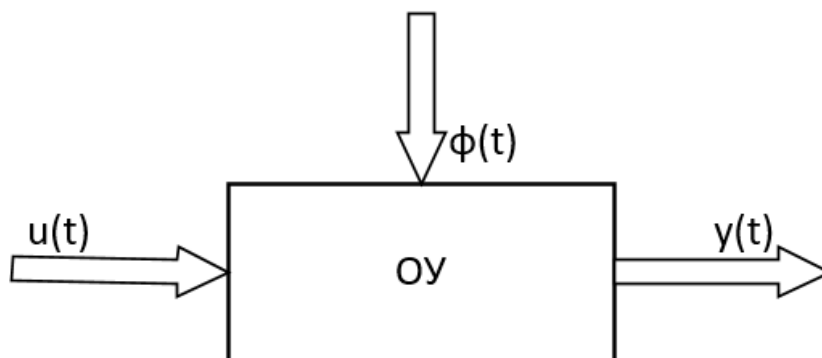


Рисунок 1.1 – Объект управления

Динамика объекта зависит от ряда неизвестных параметров  $\xi$ . Также задано множество  $\Xi$  возможных значений  $\xi$ , которое определяет класс допу-

стимых объектов. Кроме того, задана цель управления, определяющая желаемое поведение объекта. Требуется определить явный вид закона управления, использующий измеряемые величины и не зависящий от  $\xi \in \Xi$ , таким образом, чтобы для любого  $\xi \in \Xi$ , любых начальных условий  $x(0)$  и внешних возмущений  $\varphi(t)$  обеспечивалось достижение заданной цели управления в соответствии с рисунком 1.2.

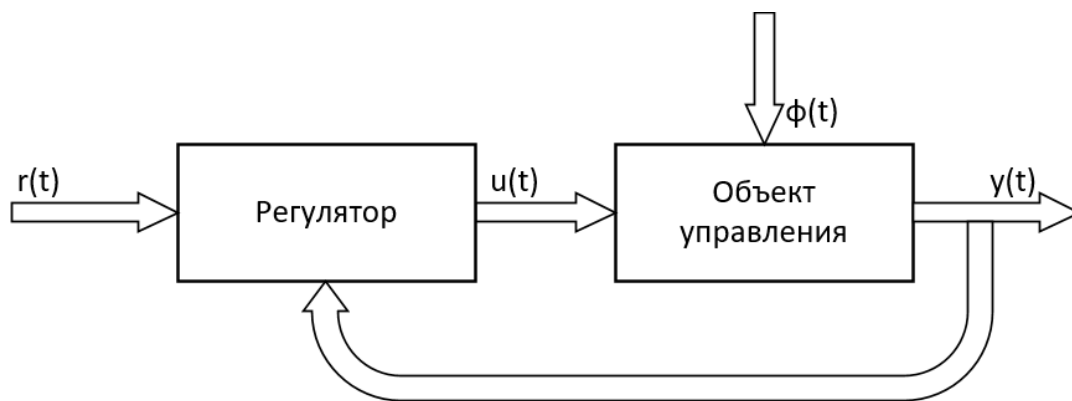


Рисунок 1.2 – Объект управления в контуре с робастным регулятором

С начала можно изучить объект для определения неизвестных параметров, а далее, одним из общих методов определить алгоритм управления на основании полученной информации. Данная стратегия управления требует много дополнительного времени, необходимого для изучения объекта, что приведет к задержке в принятии решений. К тому же, поэтапную стратегию нельзя применить в нестационарных условиях при проведении экспериментов, т.к. во время процесса управления параметры объекта и среды могут изменяться.

Данная задача захватывает традиционные задачи управления. В данном случае параметры объекта  $\xi$  считаются известными, сказать по-другому, множество доступных объектов  $\Xi$  состоит из одного элемента. Рассматривая задачи робастного управления выясняется, что класс  $\Xi$  содержит «множество» объектов, и цель управления должна достигаться в условиях неопределенности. Тем не менее четкой границы между робастными и неробастными задачами формально нет, т.к. традиционные решения часто оказываются «гру-

быми», «нечувствительными» к отклонению параметров объекта от известных значений.

«Принцип работы робастного регулятора основан на компенсации ограниченных помех и параметрической неопределенности. При робастном подходе сохраняются выходные переменные системы и сигналы ошибки в заданных допустимых пределах несмотря на наличие неопределенностей в контуре управления. Неопределенности могут принимать любые формы, однако наиболее существенными являются шумы, нелинейности и неточности в знании передаточной функции объекта управления.» [5].

В рассматриваемом объекте управления непосредственному измерению недоступны переменные состояния объекта  $x(t)$ . Для достижения цели управления необходимо решить задачу получения информации о переменных состояния объекта. Для этого необходимо последовательно на выход объекта подключить так называемый фильтр-корректор (рисунок 1.3). В такой ситуации сначала решается задача об гиперустойчивости объекта, а затем соответствующая задача о ее диссипативности.

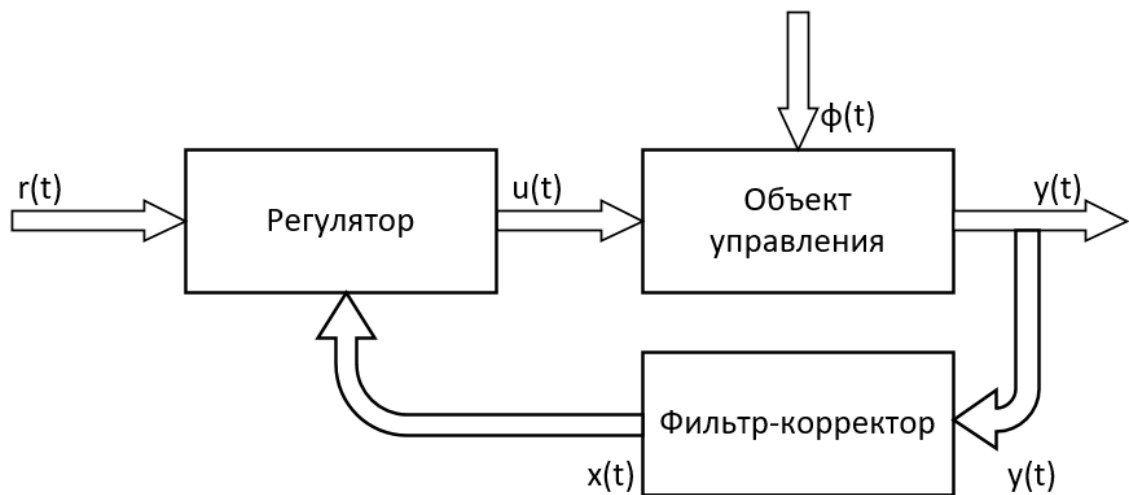


Рисунок 1.3 – Объект управления в контуре с регулятором и фильтр-корректором

Система будет считаться диссипативной по Левинсону, или  $L$ -диссипативной, если все ее траектории входят с течением времени в неко-

торое ограниченное множество и остаются в нем при  $t \rightarrow \infty$ .

Подключением фильтра-корректора является реализация структурного возмущения с помощью динамического блока, имеющего передаточную функцию:

$$W_*(s) = \frac{1}{(T_*s + 1)^n}, \quad (1.1)$$

где  $T_*$  – постоянная времени;

$n > 0$  – целое число.

На рисунке 1.4 изображен вводимый на вход объекта управления блок структурного возмущения. Аналогичный результат получается и при введении его на выход объекта управления [29].

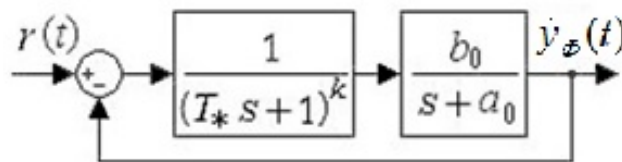


Рисунок 1.4 – Реализованный блок структурного возмущения.

Требуется определить условие выбора величины параметра  $T_*$  в зависимости от значений заданных параметров  $a_0$ ,  $b_0$  и целого числа  $n$  таким образом, чтобы обеспечивалась  $L$ -диссипативность системы, т.е. выполнялось предельное неравенство:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - y_\phi(t)) \leq e_0^2, \quad (1.2)$$

где  $e_0$  – некоторая константа,  $y(t)$  – выход объекта без фильтра-корректора,  $y_\phi(t)$  – выход объекта с фильтр-корректором.

Условие  $L$ -диссипативности системы [25]

При  $n \geq 3$ :

Если  $T_* > 0$ , тогда выполнение неравенства

$$AT_*^2 + BT_* + 2C \geq 0, \quad (1.3)$$

где  $A = a_0^2 n(n-1)C - a_0(n-2)4$ ,  $n \geq 3$ ;

$B = a_0(3n-1)C - 3$ ,  $n \geq 3$ ;

$C = 1.395((n-1)(a_0 + b_0))^{-1}$ ,  $n \geq 3$ .

Достаточно для гурвицевости полинома:

$$D(s) = (T_*s + 1)^n (s + a_0) + b_0, \quad (1.4)$$

и  $L$ -диссипативности системы.

При  $n = 2$ :

Для гурвицевости полинома (2.5) и  $L$ -диссипативности системы необходимо и достаточно чтобы выполнялись неравенства:

$$T_* > 0, \quad 2a_0^2 T_*^2 + (4a_0 - b_0)T_* + 2 \geq 0, \quad (1.5)$$

При  $n = 1$ :

Для гурвицевости полинома (2.5) и  $L$ -диссипативности системы необходимо и достаточно чтобы выполнялось неравенство:

$$T_* > 0. \quad (1.6)$$

## 2 СИНТЕЗ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

### 2.1 Теория гиперустойчивости в решении задач синтеза робастных систем управления

Для нелинейных систем управления исследование устойчивости может основываться на относительно новых в теории системы понятиях, в частности, таких как положительность и гиперустойчивость, объединенных в единый метод рамками критерия гиперустойчивости [31], [32].

В рамках этого метода все системы управления преобразовывались к структуре систем управления с нелинейной обратной связью в соответствии с рисунком 2.1 [30].

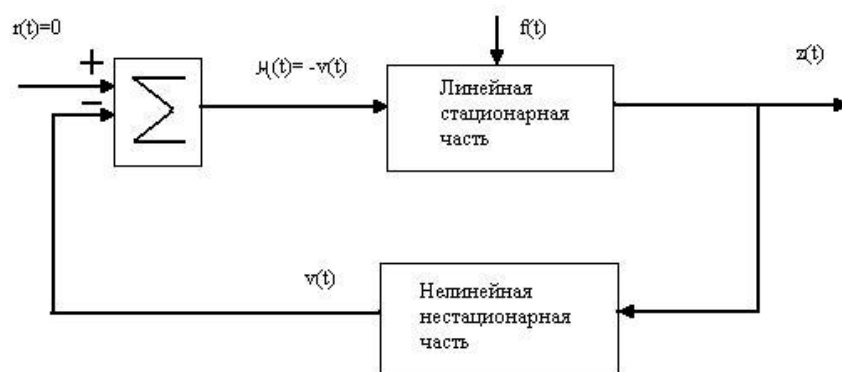


Рисунок 2.1 – Структура нелинейной системы управления

Метод синтеза по критерию гиперустойчивости состоит из следующих этапов:

- представление исходной системы в эквивалентной форме в соответствии с рисунком 2.1, в виде линейного стационарного блока прямой цепи и нелинейного нестационарного блока обратной связи;
- разрешение интегрального неравенства В.М. Попова;
- обеспечение строгой положительности передаточной матрицы линейной части системы;
- проверка выполнения целевых условий и свойств робастности системы в заданном классе  $\Xi$ .

Рассмотрим замкнутую систему управления в соответствии с рисунком

2.1 с внешним возмущением,  $f(t) \in H_2(0; \infty)$ , где  $H_2(0; \infty)$  – пространство суммируемых с квадратом ограниченных функций. Будем полагать, что линейная часть системы описывается уравнением состояния и уравнением выхода:

$$\frac{de(t)}{dt} = Ae(t) + B\mu(t), \quad z(t) = g^T L^T e(t), \quad (2.1)$$

а описание нелинейной части системы определено уравнением обратной связи вида:

$$\mu(t) = -F(z(t)), \quad (2.2)$$

где  $e(t), z(t), \mu(t)$  – соответственно  $n$ -мерный вектор состояния и  $m$ -мерные векторы выхода и управления,  $m < n$ ;

$F(z(t))$  – векторный функционал;

$A, B$ , и  $L$  – постоянные матрицы соответствующего размера.

Пара  $(A, B)$  полностью управляема, пара  $(L, A)$  полностью наблюдаема.

Для системы (2.1), (2.2) введем так называемую присоединенную систему, т.е. дополним математическое описание рассматриваемой системы следующим интегралом:

$$h(0, t) = \int_0^t F^T(z(s))z(s)ds = -\int_0^t \mu^T(s)z(s)ds \quad (2.3)$$

Присоединенная система (2.1) – (2.3) называется гиперустойчивой, если найдутся такие положительные константы  $\delta_0, \delta_1, h_0, h_1$ , что любое решение системы (2.1) – (2.3) будет удовлетворять соотношению:

$$\|e(t)\| < \delta_0 + \delta_1 \|e_0(t)\|, \quad \forall t > 0 \quad (2.4)$$

а также будет выполняться интегральное неравенство Попова (ИНП):

$$h(0, t) = -\int_0^t \mu^T(s)z(s)ds > -h_0 - h_1 \sup_{t_0 \leq s \leq t} \|e(s)\|, \quad \forall t \geq 0, \quad (2.5)$$



где  $\sup_{t_0 \leq s \leq t} \|e(s)\|$  – максимальное значение евклидовой нормы  $\|e(s)\|$ .

ИНП вида (2.5) при значении  $h_1 = 0$  может быть и более простым:

$$h(0, t) = -\int_{t_0}^t \mu(s)z(s)ds \geq -h_0 = const, \forall t \geq 0, \quad (2.6)$$

Присоединенная система будет гиперустойчива, если вместе с условиями (2.5) или (2.6) будет выполнено соотношение  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ .

Если для присоединенной системы (2.1) – (2.3) показана ее гиперустойчивость, то гиперустойчивой является и система (2.1), (2.2). Помимо того, если получены некоторые условия гиперустойчивости для системы (2.1) – (2.3), то эти же условия будут определять и гиперустойчивость системы (2.1), (2.2). Для определения гиперустойчивости системы (2.1), (2.2) ее нелинейная нестационарная часть должна удовлетворять интегральному неравенству Попова (2.5) или (2.6). Если это требование выполнено, то гиперустойчивость системы будет зависеть только от свойств ее линейной стационарной части.

Для гиперустойчивости системы (2.1), (2.2) при выполнении ИНП вида (2.5) или (2.6) необходимо и достаточно, чтобы передаточная функция линейной стационарной части системы, т.е.

$$W(s) = g^T L^T (sE - A)^+ B, \quad (2.7)$$

была бы положительно вещественной матрицей, где  $E$  – единичная матрица;  $(sE - A)^+$  – обозначение присоединенной матрицы к матрице  $(sE - A)$ .

Для асимптотической гиперустойчивости передаточная функция должна быть строго положительной вещественной матрицей[20].

Функция  $W(s)$  является положительно вещественной, если выполняются следующие условия:

- $W(s)$  – вещественная для всех вещественных  $s$ ;
- $W(s)$  не имеет полюсов в полуплоскостях  $Re[s] > 0$ ;

- возможные полюсы  $W(s)$  на оси  $Re[s]=0$  являются различными, а все остальные нулевыми;

- для  $s=j\omega$ , не являющихся полюсом, выполняется частотное условие:

$$\operatorname{Re}[W(j\omega)] \geq 0, \forall \omega \quad (2.8)$$

В случае строгой положительности полюсы на оси  $Re[s]=0$  отсутствуют.

Рассматриваемый критерий о гиперустойчивости позволяет рассмотреть вопрос устойчивости всей нелинейной нестационарной системы (2.1), (2.2), в виде вытекающий из свойств составных частей этой системы, а точнее: условия положительности, требуемого к ЛСЧ системы, а также удовлетворение условия ИНП, рассматриваемого относительно ее нелинейной нестационарной части (ННЧ). Можно сказать, что цель гиперустойчивости системы управления меняется двумя независимыми задачами, обычно называемыми проблемами положительности, полное удовлетворение задач которых по отдельности в разы упрощает процесс синтеза [18].

## 2.2 Этапы синтеза робастных систем управления по критерию гиперустойчивости

Рассмотрим нестационарный скалярный объект управления с одним входом и одним выходом, динамические свойства которого описываются уравнениями:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + f(t), \quad y(t) = L^T x(t), \quad z(t) = g^T(t)y(t), \quad (2.9)$$

где  $x(t) \in R^n$  – вектор переменных состояния;

$u(t) \in R$  – вектор управления;

$y(t) \in R$  – вектор выхода;

$\xi$  – вектор неизвестных параметров  $\xi \in \Xi$ ;

$\Xi$  – известное множество возможных значений вектора  $\xi$ ;

$A, B, L$  – некоторые постоянные матрицы соответствующего размера, зависящие от вектора неизвестных параметров  $\xi$ ;

$A(t)$  – нестационарная матрица состояния;

$B(t)$  – нестационарный вектор управления;

$L(t)$  – матрица выхода соответствующей размерности;

$f(t) \in H_2(0; \infty)$  – вектор внешних возмущений;

$H_2(0; \infty)$  – пространство суммируемых с квадратом ограниченных функций;

$z(t) \in R$  – обобщенный выход объекта, сформированный с помощью линейного нестационарного компенсатора  $g$ ;

$g^T = [g_1, g_2, \dots, g_m]$  – вектор постоянных коэффициентов, значения элементов подлежат выбору.

Функционирование объекта (2.9), протекает в условиях априорной неопределенности его параметров, которая определена в виде соотношений:

$$A(t) = A_\xi(t), \quad B(t) = B_\xi(t), \quad f(t) = f_\xi(t), \quad \xi \in \Xi, \quad (2.10)$$

К объекту присоединим регулятор структуру, которого зададим в виде:

$$u(t) = u(x(t), x_M(t), r(t)), \quad (2.11)$$

где  $x_M(t) \in R^n$  – вектор переменных состояния эталона.

В этом случае задача управления нестационарным априорно неопределенным динамическим объектом может быть сформулирована следующим образом:

Для объекта (2.9) требуется определить закон управления (2.10), не содержащий неопределенностей и обеспечивающий ограниченность всех сигналов в замкнутой системе, при любых начальных условиях и внешних возмущениях, удовлетворяющих условию:

$$\int_0^\infty \|f_\xi(t)\|^2 dt < \infty, \quad \forall \xi \in \Xi, \quad (2.12)$$

ИЛИ

$$\|f_\xi(t)\| < f_0^2 = const, \forall \xi \in \Xi, \quad (2.13)$$

таким образом, чтобы имело место выполнение предельного целевого неравенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t, \xi) \leq \Delta_0 = const, \forall \xi \in \Xi, \quad (2.14)$$

где  $e(t)$  – ошибка рассогласования между выходом эталона и объекта.

*Первый этап.* Для получения эквивалентного математического описания системы (2.9), (2.11) используются уравнения объекта управления, явной эталонной модели и робастного регулятора, относительно которых и определяются соответствующие уравнения ЛСЧ и ННЧ эквивалентной системы.

Введем в рассмотрение следующие переменные:  $e(t) = x_M - x(t)$ ,  $v(t) = z_M - z(t)$ . Запишем следующее эквивалентное математическое описание исходной системы в виде:

$$\begin{aligned} \frac{de(t)}{dt} &= A_M e(t) + B_M \mu(t), \quad v(t) = g^T(t) L^T e(t), \\ \mu(t) &= r(t) - \alpha^T(t) y(t) - (1 + \rho(t)) u(t) - f_n(t), \end{aligned} \quad (2.15)$$

где  $v(t) \in R$  – обобщенный вектор эквивалентной системы;  $r(t)$  – входное воздействие.

*Второй этап.* Данный этап характеризуется решением ИНП, которое представляет собой выражение:

$$h(0, t) = -\int_0^t \mu(s) v(s) ds \geq h_0 = const < 0, \forall t \geq 0 \quad (2.16)$$

записанное относительно ННЧ эквивалентной системы (2.15).

Для удобства синтеза запишем ИНП в виде суммы интегральных слагаемых  $h(0, t) = h_1(0, t) + h_2(0, t) + h_3(0, t)$ , которые в силу ННЧ (2.15) примут вид:

$$h_1(0, t) = -\int_0^t [r(s) - f_n(s)]v(s)ds \geq h_0 = \text{const} < 0, \forall t \geq 0 \quad (2.17)$$

$$h_2(0, t) = \int_0^t \alpha^T(s)y(s)v(s)ds \geq h_0 = \text{const} < 0, \forall t \geq 0 \quad (2.18)$$

$$h_3(0, t) = \int_0^t (1 + \rho(s))u(s)v(s)ds \geq h_0 = \text{const} < 0, \forall t \geq 0 \quad (2.19)$$

Просуммировав интегральные оценки в результате получим выражение не противоречащее (2.16). Итак, решение ИНП ведет нас к синтезу явного вида робастных алгоритмов управления системы (2.11).

*Третий этап.* На третьем этапе синтеза, необходимо удовлетворить условия положительности линейной части исходной системы управления. Типовой подход к решению данной задачи состоит в обеспечении свойств вещественности и строгой положительности передаточной функции линейной части, которую рассчитывают из первых двух уравнений системы (2.9), (2.11) в виде:

$$W(j\omega) = g^T L^T [j\omega E - A_M]^{-1} B_M = \frac{g^T L^T [j\omega E - A_M]^+ B_M}{\det[j\omega E - A_M]}, \quad (2.20)$$

где  $[j\omega E - A_M]^+$  – присоединенная матрица;

$E$  – единичная матрица.

Условия положительности линейной стационарной части:

$$\text{Re}[W(j\omega)] > 0, \forall \omega(-\infty; \infty) \quad (2.21)$$

Для получения  $W(j\omega)$  с показанными свойствами, необходимо и достаточно вектор  $g$  подобрать так, чтобы в условиях априорной неопределенности (2.10) полином  $g^T L^T [j\omega E - A_M]^+ B_M$  был бы гурвицевым степени  $(N-1)$  с положительными коэффициентами. При этом может получиться так, что выборка вектора  $g$ , который удовлетворял бы заданным условиям при каждом произволь-

ном наборе параметров  $\xi \in \Xi$ , причём с одинаковым комплектом значений элементов вектора  $g$ , по любым причинам будет невозможен. Другими словами, решение задачи разработки робастных систем в таких случаях, не может основываться на процессе априорного выбора вектора  $g$  и требует применения других подходов к проблеме обеспечения свойств положительности линейной части системы управления.

*Четвертый этап.* Из выполнения интегрального неравенства Попова (2.16) и условий положительности линейной части (2.21) для эквивалентной системы (2.15), следует считать согласно критерию гиперустойчивости В.М. Попова, что синтезированный алгоритм управления (2.11) будет обеспечивать гиперустойчивость системы управления (2.15), а, следовательно, и гиперустойчивость исходной системы (2.9), функционирующей в условиях неопределенности и наличии внешних возмущений. Следовательно, в данной системе при любых начальных условиях и любом заданном уровне априорной неопределенности (2.10) будет иметь место выполнение целевого условия (2.14). Таким образом, в результате достижения сформулированных целей управления при  $\xi \in \Xi$ , решение задачи синтеза системы управления можно считать завершенной [24].

Отметим, что при синтезе алгоритмов управления (2.11), используя иные интегральные оценки, его можно модифицировать и получить другие законы управления. В данной работе используется метод синтеза по критерию гиперустойчивости. Данный метод является более гибким и позволяет получать различные модификации алгоритмов, используя один и тот же математический аппарат.

### 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ НЕАФФИННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО ВЫХОДУ С ФИЛЬТР-КОРЕКТОРОМ

Решение задач синтеза будем осуществлять, выделяя соответствующие этапы синтеза робастных систем управления, основываясь на методике построения робастных систем управления с явной эталонной моделью по критерию гиперустойчивости.

#### 3.1 Синтез комбинированных систем неаффинных по управлению

##### 3.1.1 Постановка задачи

Рассмотрим модель неаффинной по управлению нелинейной системы с одним входом и одним выходом, динамика которого описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + B(f(x(t), u(t)) + \psi(t)), \quad y(t) = x_1(t), \quad (3.1)$$

где  $x(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T \in R^n$  – вектор переменных состояния;

$u(t) \in R$  и  $y(t) \in R$  – скалярные соответственно управляющее воздействие и регулируемый выход;

$\psi(t) \in R$  – внешнее возмущение;

$A$  – нильпотентная матрица;

$B = [0, \dots, 0, 1]^T$  – вектор;

$f(x(t), u(t))$  – гладкая нелинейная функция.

Допускается, что для системы (3.1) выполнены следующие предположения:

- возмущение  $\psi(t)$  ограничено по величине

$$|\psi(t)| \leq \varepsilon_{01}, \quad (3.2)$$

где  $\varepsilon_{01}$  – известная константа.

- функция  $\partial f(x(t), u(t)) / \partial u(t)$  – знакоопределенная и ограниченная  $\forall (x(t), u(t)) \in \Omega_x \times R$ , без потери общности будем полагать, что  $\partial f(x(t), u(t)) / \partial u(t) > 0$ ;

- функция  $f(x(t), u(t))$  представима в виде суммы функций:

$$f(x(t), u(t)) = f_1(x(t)) + f_2(x(t), u(t)) \cdot u(t) + f_3(x(t), u(t)), \quad (3.3)$$

где  $f_1(x(t))$  и  $f_2(x(t), u(t))$ ,  $f_3(x(t), u(t))$  – соответственно известная функция и неизвестные функции, удовлетворяющие неравенствам:

$$f_2(x(t), u(t)) \geq \varepsilon_{02} = \text{const} > 0, \quad |f_3(x(t), u(t))| \leq \varepsilon_{03} = \text{const} \quad (3.4)$$

где  $\varepsilon_{02}, \varepsilon_{03}$  – известные константы.

- непосредственному измерению доступен только выход  $y(t)$ ;

- относительный порядок системы равен  $n$ .

Желаемая динамика в системе (3.1) формируется за счет эталонной модели:

$$\frac{dx_M(t)}{dt} = A_M x_M(t) + B_M r(t), \quad y_M(t) = x_{M1}(t), \quad (3.5)$$

где  $x_M(t) = [x_{M1}(t), \dots, x_{Mn}(t)]^T \in R^n$  – вектор переменных состояния эталона;

$y_M(t) \in R$  – выход эталона;

$r(t) \in R$  – задающее воздействие;

$A_M$  – гурвицева матрица;

$a_M = [a_{M0}, \dots, a_{M(n-1)}]^T$ ,  $B_M = b_M a_{M0} = [0, \dots, 0, b_M a_{M0}]^T$  – постоянные векторы;

$b_M, a_{M0}, \dots, a_{M(n-1)}$  – положительные коэффициенты.

Передаточная функция эталонной модели (3.5) имеет вид:

$$W_{y_M}(s) = \frac{y_M(s)}{r(s)} = L^T (sE - A_M)^{-1} B_M = \frac{a_{M0} b_M}{a_M(s)}, \quad (3.6)$$



где полином  $a_M(s) = s^n + a_{M(n-1)}s^{n-1} + \dots + a_{M1}s + a_{M0}$  имеет желаемое распределение корней;

$s$  – комплексная переменная;

$L = [1, 0, \dots, 0]^T$  – вектор.

*Первый этап.* Представление исходной системы в эквивалентной форме.

Эквивалентную модель системы (3.1), добавляя в правую часть уравнения состояния слагаемых ( $\pm A_M x(t)$ ):

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + B(f(x(t), u(t)) + \psi(t)) \pm A_M x(t) = \\ &= A_M x(t) + (A - A_M)x(t) + B(f(x(t), u(t)) + \psi(t)) = \\ &= A_M x(t) + Ba_M^T x(t) + B(f(x(t), u(t)) + \psi(t)) = \\ &= A_M x(t) + B(a_M^T x(t) + f(x(t), u(t)) + \psi(t)) = \\ &= A_M x(t) + B_M \cdot \frac{1}{b_M a_{M0}} (a_M^T x(t) + f(x(t), u(t)) + \psi(t)) \end{aligned} \quad (3.7)$$

таким образом, представим в виде нелинейной системы первого типа:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A_M x(t) + B_M \mathcal{G}(t), \quad y(t) = x_1(t), \quad (3.8)$$

$$\mathcal{G}(t) = \frac{1}{b_M a_{M0}} (a_M^T x(t) + f_1(x(t)) + f_2(x(t), u(t)) \cdot u(t) + f_3(x(t), u(t)) + \psi(t)), \quad (3.9)$$

где уравнения (3.8) и (3.9) описывают ее линейную и нелинейную части;  $\mathcal{G}(t)$  – соответствующее входное воздействие.

Требуется синтезировать явный вид комбинированного закона управления

$$u(t) = u_{II}(x(t), x_M(t), r(t)) + u_{II}(x(t), x_M(t), r(t)), \quad (3.10)$$

где  $u_{II}$  – пропорциональная часть;

$u_{II}$  – интегральная часть.

Таким образом, чтобы в системе (3.1), (3.3), (3.5), (3.10) или (3.5), (3.8) – (3.10), независимо от начальных условий  $x(0)$ , априорно неизвестных функций

$f_2(x(t), u(t))$ ,  $f_3(x(t), u(t))$  и внешних возмущений  $\psi(x, t)$ , обеспечивалось достижение требуемой точности слежения регулируемого выхода  $y(t)$  за эталонным сигналом  $y_M(t)$  согласно целевому условию, заданному в виде:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_M(t) - y(t)| \leq \sigma, \quad \sigma = \text{const} > 0 \quad (3.11)$$

Надлежит отметить, что при технической реализации закона управления (3.10) нужно иметь доступ к переменным состояниям  $x(t)$ , а так как в системе (3.5), (3.8) – (3.10), непосредственному измерению доступен только выход  $y(t)$ , будем при синтезе контура управления применять оценки переменных состояний  $x(t)$ . Построение системы управления произведем в два этапа. На первом этапе, считая, что все переменные состояния  $x(t)$  измеримы, синтезируем явный вид искомого закона управления. Вторым этапом, заменяя в законе управления переменные состояния  $x(t)$  на их оценки, определим условия, при выполнении которых построенная система управления будет являться  $L$ -диссипативной и сохранит робастность [10].

### 3.1.2 Синтез непрерывных алгоритмов настройки

Синтез алгоритма управления для системы (3.5), (3.8) – (3.10) произведем на основе критерия гиперустойчивости, в соответствии с которым для гиперустойчивости любой нелинейной системы первого типа необходимо разрешить так называемые “две проблемы положительности”, обеспечивая:

Для *линейной части* системы

$$\text{Re} W(j\omega) > 0, \quad \forall \omega, \quad (3.12)$$

где  $W(j\omega)$  – ее частотная передаточная функция.

Для *нелинейной части* системы

$$\eta(0, t) = -\int_0^t \mu(s) \nu(s) ds > -h_0 = \text{const}, \quad \forall t > 0, \quad (3.13)$$

где  $\mu(s), \nu(s)$  – соответствующий вход и выход системы.

*Второй этап.* Выполнение частотного неравенства.

Так как передаточные функции эталонной модели (3.5) и линейной части системы (3.8) – (3.10) имеют относительный порядок  $n > 1$ , то понятно, что выполнить требование (3.12) не представляется возможным. В связи с этим введем в рассмотрение дополнительные выходные сигналы  $z_M$  и  $z$ , для которых соответствующие передаточные функции будут иметь относительный порядок  $n = 1$ , и удовлетворять неравенству (3.12).

В результате эквивалентной модификации параллельной эталонной модели (3.5) будем описывать ее уравнениями:

$$\frac{dx_M(t)}{dt} = A_M x_M(t) + B_M r(t), \quad z_M(t) = g^T x_M(t), \quad (3.14)$$

где  $z_M(t) \in R$  – дополнительный выход эталонной модели.

Передаточная функция такого эталона

$$W_{z_M}(s) = \frac{z_M(s)}{r(s)} = g^T (sE - A_M)^{-1} B_M = \frac{a_{M0} b_M g_{n-1} g(s)}{a_M(s)}, \quad (3.15)$$

где  $g(s) = s^{n-1} + \frac{g^{n-2}}{g^{n-1}} s^{n-2} + \dots + \frac{g^2}{g^{n-1}} s^2 + \frac{g^1}{g^{n-1}} s^1 + \frac{1}{g^{n-1}}$  – гурвицев полином с положительными коэффициентами должна удовлетворять частотному требованию  $\operatorname{Re} W_{z_M}(j\omega) > 0$ , для всех  $\omega$ . Для этого достаточно, например, значения коэффициентов  $g_i, i = 1, \dots, n-1$  задать таким образом, чтобы корни полинома  $g(s)$  последовательно чередовались с корнями полинома  $a_M(s)$ . Или же, задавая значения коэффициентов  $g_i$  из условия:

$$a_M(s) = s^n + a_{M(n-1)} s^{n-1} + \dots + a_{M1} s + a_{M0} = (s + a_*) g(s), \quad (3.16)$$

где  $a_* = a_{M0} g_{(n-1)}$  – любой корень полинома  $a_M(s)$ , передаточную функцию (3.14) записать в виде апериодического звена первого порядка

$$W_{z_M}(s) = \frac{z_M(s)}{r(s)} = \frac{a_* b_M}{s + a_*}, \quad (3.17)$$

для которого выполнение требования (3.12) оказывается тривиальным.

Как уже отмечалось, на первом этапе синтеза предполагается, что в системе (3.8) – (3.10) переменные состояния доступны измерению. Следовательно, математическое описание ее линейной части можно модифицировать и, подобно (3.14), уравнение (3.8) записать следующим образом:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A_M x(t) + B_M g(t), \quad z(t) = g^T x(t), \quad (3.18)$$

где  $z(t) \in R$  – дополнительный выход системы, при этом передаточная функция линейной части системы (3.9), (3.10), (3.18) также будет иметь вид (3.15).

Если отклонения между переменными состояниями системы (3.9), (3.10), (3.18) и эталона (3.14) определить в виде  $e(t) = x_M(t) - x(t)$ ,

$$\begin{aligned} \frac{de(t)}{dt} &= \frac{dx_M(t)}{dt} - \frac{dx(t)}{dt} = A_M x_M(t) + B_M r(t) - A_M x(t) - \\ &- \frac{B_M}{b_M a_{M0}} (a_M^T x(t) + f_1(x(t)) + f_2(x(t), u(t)) \cdot u(t) + f_3(x(t), u(t)) + \psi(t)) = \\ &= A_M e(t) - \frac{B_M}{b_M a_{M0}} (a_M^T x(t) + f_1(x(t)) + f_2(x(t), u(t)) \cdot u(t) + f_3(x(t), u(t)) + \\ &+ \psi(t) - r(t)) = A_M e(t) + \frac{B_M}{b_M a_{M0}} (r(t) - a_M^T x(t) - \\ &- f_1(x(t)) - f_2(x(t), u(t)) \cdot u(t) - f_3(x(t), u(t)) - \psi(t)), \\ z_M(t) - z(t) &= g^T x_M(t) - g^T x(t) = g^T (x_M(t) - x(t)) = g^T e(t), \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$(3.20)$$

то динамическую модель неаффинной по управлению нелинейной системы с одним входом и одним выходом можно будет описать уравнениями:

$$\frac{de(t)}{dt} = A_M e(t) + B_M \mu(t), \quad v(t) = z_M(t) - z(t) = g^T e(t), \quad (3.21)$$

$$\mu(t) = \frac{1}{a_{M0} b_M} (r(t) - a_M^T x(t) - f_1(x(t)) - f_2(x(t), u(t)) \cdot u(t) - f_3(x(t), u(t)) - \psi(t)), \quad (3.22)$$

где  $\mu(t) \in R$  и  $\nu(t) \in R$  – соответственно выход и управление.

*Третий этап.* Выполнение интегрального неравенства.

Для синтеза явного вида пропорционального закона управления (3.10) запишем левую часть интегрального неравенства (3.13) с учетом (3.22), в виде:

$$\eta_{II}(0, t) = \frac{1}{a_{M0}b_M} \int_0^t [a_M^T x(t) + f_1(x(t)) + f_2(x(t), u(t)) \cdot u_{II}(t) + f_3(x(t), u(t)) + \psi(t) - r(t)] \nu(t) ds, \quad (3.23)$$

и, полагая, что

$$u = \sum_{j=1}^3 u_{jII}, \quad (3.24)$$

рассмотрим следующий интеграл:

$$\begin{aligned} \eta_{II}(0, t) &= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) u_{1II}(s) \nu(s) ds + \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s))) \nu(s) ds \right) + \\ &+ \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) u_{2II}(s) \nu(s) ds - \int_0^t r(s) \nu(s) ds \right) + \\ &+ \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) u_{3II}(s) \nu(s) ds + \int_0^t (f_3(x(t), u(t)) + \psi(t)) \nu(s) ds \right) = \\ &= \sum_{j=1}^3 \eta_{jII}(0, t), \end{aligned} \quad (3.25)$$

Учитывая ограничения (3.4), преобразуем интегральную составляющую  $\eta_{1II}(0, t)$ , для синтеза пропорциональной части, к виду:

$$\begin{aligned}
\eta_{1II}(0,t) &= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s),u(s))u_{1II}(s)v(s)ds + \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \right) \pm \\
&\pm \frac{1}{a_{M0}b_M} \int_0^t f_2(x(s),u(s))h_{11}(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))^2 v^2(s)ds = \\
&= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s),u(s))u_{1II}(s)v(s) - f_2(x(s),u(s))h_{11}(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))^2 v^2(s)ds + \right. \\
&+ h_{11} \int_0^t f_2(x(s),u(s))(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))^2 v^2(s)ds + \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \left. \right) = \\
&= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s),u(s))[u_{1II}(s) - h_{11}(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))^2 v(s)]v(s)ds + \right. \\
&+ h_{11} \int_0^t f_2(x(s),u(s))(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)^2 ds + \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \left. \right) \geq \\
&\geq \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t [u_{1II}(s) - h_{11}(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))^2 v(s)]v(s)ds + \right. \\
&+ h_{11}\varepsilon_{02} \left( \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \right)^2 + \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \left. \right) \pm \frac{1}{4h_{11}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} \\
&\geq \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t [u_{1II}(s) - h_{11}(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))^2 v(s)]v(s)ds + \right. \\
&+ h_{11}\varepsilon_{02} \left( \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \right)^2 + \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds + \frac{1}{4h_{11}\varepsilon_{02}} \left. \right) - \\
&- \frac{1}{4h_{11}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} \geq -\frac{1}{4h_{11}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M}
\end{aligned} \tag{3.26}$$

где  $h_{11} = const > 0$  – некоторый коэффициент.

Тогда, задавая переменную  $u_{1II}(t)$  уравнением

$$u_{1II}(t) = h_{11}(a_M^T x(t) + f_1(x(t)))^2 v(t), \tag{3.27}$$

получим оценку

$$\eta_{1II}(0,t) \geq -\frac{1}{4h_{11}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} = const, \quad \forall t > 0. \tag{3.28}$$

В частности, если  $f_1(x) = \sum_{k=1}^{\theta} f_{1k}(x)$ , где  $\theta$  – число нелинейных функций, то

уравнение (3.27), можно получить и в следующем виде:

$$u_{1\Pi}(t) = h_{10}(a_M^T x(t))^2 v(t) + \sum_{k=1}^{\theta} h_{1k} f_{1k}^2(x) v(t), \quad (3.29)$$

где  $h_{1k} = \text{const} > 0$ ,  $k = 0, 1, \dots, \theta$  – некоторые коэффициенты.

Если интегральные составляющие  $\eta_{2\Pi}(0, t)$  и  $\eta_{3\Pi}(0, t)$ , подобно предыдущему, преобразовать и представить в виде:

$$\begin{aligned} \eta_{2\Pi}(0, t) &= \frac{1}{a_{M0} b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) u_{2\Pi}(s) v(s) ds - \int_0^t r(s) v(s) ds \right) \pm \frac{1}{a_{M0} b_M} \int_0^t f_2(x(s), u(s)) h_{12} r^2(s) v^2(s) ds = \\ &= \frac{1}{a_{M0} b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) u_{2\Pi}(s) v(s) ds - \int_0^t f_2(x(s), u(s)) h_{12} r^2(s) v^2(s) ds + \right. \\ &+ h_{12} \int_0^t f_2(x(s), u(s)) r^2(s) v^2(s) ds - \left. \int_0^t r(s) v(s) ds \right) = \frac{1}{a_{M0} b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) [u_{2\Pi}(s) - h_{12} r^2(s) v(s)] v(s) ds + \right. \\ &+ \left. h_{12} \int_0^t f_2(x(s), u(s)) (r(s) v(s))^2 ds - \int_0^t r(s) v(s) ds \right) \geq \\ &\geq \frac{1}{a_{M0} b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t [u_{2\Pi}(s) - h_{12} r^2(s) v(s)] v(s) ds + h_{12} \varepsilon_{02} \left( \int_0^t r(s) v(s) ds \right)^2 - \int_0^t r(s) v(s) ds \right) \pm \frac{1}{4h_{12} \varepsilon_{02} a_{M0} b_M} \geq \\ &\geq \frac{1}{a_{M0} b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t [u_{2\Pi}(s) - h_{12} r^2(s) v(s)] v(s) ds + h_{12} \varepsilon_{02} \left( \int_0^t r(s) v(s) ds \right)^2 - \int_0^t r(s) v(s) ds + \frac{1}{4h_{12} \varepsilon_{02}} \right) - \\ &- \frac{1}{4h_{12} \varepsilon_{02} a_{M0} b_M} \geq - \frac{1}{4h_{12} \varepsilon_{02} a_{M0} b_M} \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned}
\eta_{3\Pi}(0, t) &= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s))u_{3\Pi}(s)v(s)ds + \int_0^t (f_3(x(t), u(t)) + \psi(t))v(s)ds \right) \pm \\
&\pm \frac{1}{a_{M0}b_M} \int_0^t f_2(x(s), u(s))h_{13}v^2(s)ds = \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s))u_{3\Pi}(s)v(s)ds - \int_0^t f_2(x(s), u(s))h_{13}v^2(s)ds + \right. \\
&+ h_{13} \int_0^t f_2(x(s), u(s))v^2(s)ds + \int_0^t (f_3(x(t), u(t)) + \psi(t))v(s)ds \left. \right) = \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s))[u_{3\Pi}(s) - h_{13}v(s)]v(s)ds + \right. \\
&+ h_{13} \int_0^t f_2(x(s), u(s))v^2(s)ds + \int_0^t (f_3(x(t), u(t)) + \psi(t))v(s)ds \left. \right) \geq \\
&\geq \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t [u_{3\Pi}(s) - h_{13}v(s)]v(s)ds + h_{13}\varepsilon_{02} \left( \int_0^t v(s)ds \right)^2 + (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03}) \left| \int_0^t v(s)ds \right| \right) \pm \frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{4h_{13}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} \geq \\
&\geq \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t [u_{3\Pi}(s) - h_{13}v(s)]v(s)ds + h_{13}\varepsilon_{02} \left( \int_0^t v(s)ds \right)^2 + (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03}) \left| \int_0^t v(s)ds \right| + \frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{4h_{13}\varepsilon_{02}} \right) - \\
&- \frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{4h_{13}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} \geq - \frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{4h_{13}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M}
\end{aligned} \tag{3.31}$$

где  $h_{12}, h_{13} = const > 0$  – некоторые коэффициенты, то определив переменные  $u_{2\Pi}(t)$  и  $u_{3\Pi}(t)$  уравнениями:

$$u_{2\Pi}(t) = h_{12}r^2(t)v(t), \quad u_{3\Pi}(t) = h_{13}v(t), \tag{3.32}$$

получим оценки

$$\eta_{2\Pi}(0, t) \geq - \frac{1}{4h_{12}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} = const, \quad \eta_{3\Pi}(0, t) \geq - \frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{4h_{13}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} = const, \quad \forall t > 0. \tag{3.33}$$

В результате явный вид пропорционального закона управления (3.10), в соответствии с уравнениями (3.24), (3.27), (3.32), можно синтезировать в следующем виде:

$$u_{\Pi}(t) = h_{11}(a_M^T x(t) + f_1(x(t)))^2 v(t) + h_{12}r^2(t)v(t) + h_{13}v(t). \tag{3.34}$$

При этом из соотношений (3.25), (3.28) и (3.33) следует, что будет выполнено интегральное неравенство (3.13), поскольку:

$$\eta_{\Pi}(0, t) \geq - \frac{1}{4\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} \left( \frac{1}{h_{11}} + \frac{1}{h_{12}} + \frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{h_{13}} \right) = const, \quad \forall t > 0. \tag{3.35}$$



Для синтеза явного вида интегрального закона управления (3.10) запишем левую часть интегрального неравенства (3.13) с учетом (3.22), в виде:

$$\eta_H(0,t) = \frac{1}{a_{M0}b_M} \int_0^t [a_M^T x(t) + f_1(x(t)) + f_2(x(t),u(t)) \cdot u_H(t) + f_3(x(t),u(t)) + \psi(t) - r(t)] v(t) ds, \quad (3.36)$$

и, полагая, что

$$u = \sum_{j=1}^3 u_{jH}, \quad (3.37)$$

рассмотрим следующий интеграл:

$$\begin{aligned} \eta_H(0,t) &= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s),u(s)) u_{1H}(s) v(s) ds + \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s))) v(s) ds \right) + \\ &+ \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s),u(s)) u_{2H}(s) v(s) ds - \int_0^t r(s) v(s) ds \right) + \\ &+ \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s),u(s)) u_{3H}(s) v(s) ds + \int_0^t (f_3(x(t),u(t)) + \psi(t)) v(s) ds \right) = \\ &= \sum_{j=1}^3 \eta_{jH}(0,t), \end{aligned} \quad (3.38)$$

Учитывая ограничения (3.4), преобразуем интегральную составляющую  $\eta_{1H}(0,t)$ , для синтеза интегральной части, к виду:

$$\begin{aligned}
\eta_{1H}(0,t) &= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s),u(s))u_{1H}(s)v(s)ds + \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \right) \pm \\
&\pm \frac{1}{a_{M0}b_M} \int_0^t f_2(x(s),u(s))h_{21}(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s) \int_0^s (a_M^T x(v) + f_1(x(v)))v(v)dv ds = \\
&= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s),u(s))u_{1H}(s)v(s) - f_2(x(s),u(s))h_{21}(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s) \int_0^s (a_M^T x(v) + f_1(x(v)))v(v)dv ds + \right. \\
&+ h_{21} \int_0^t f_2(x(s),u(s))(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s) \int_0^s (a_M^T x(v) + f_1(x(v)))v(v)dv ds + \left. \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \right) = \\
&= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s),u(s)) \left[ u_{1H}(s) - h_{21}(a_M^T x(s) + f_1(x(s))) \int_0^s (a_M^T x(v) + f_1(x(v)))v(v)dv \right] v(s)ds + \right. \\
&+ h_{21} \int_0^t f_2(x(s),u(s))(a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s) \int_0^s (a_M^T x(v) + f_1(x(v)))v(v)dv ds + \left. \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \right) \geq \tag{3.39} \\
&\geq \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t \left[ u_{1H}(s) - h_{21}(a_M^T x(s) + f_1(x(s))) \int_0^s (a_M^T x(v) + f_1(x(v)))v(v)dv \right] v(s)ds + \right. \\
&+ \left. \frac{h_{21}\varepsilon_{02}}{2} \left( \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \right)^2 + \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \right) \pm \frac{1}{2h_{21}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} \geq \\
&\geq \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t \left[ u_{1H}(s) - h_{21}(a_M^T x(s) + f_1(x(s))) \int_0^s (a_M^T x(v) + f_1(x(v)))v(v)dv \right] v(s)ds + \right. \\
&+ \left. \frac{h_{21}\varepsilon_{02}}{2} \left( \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \right)^2 + \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds + \frac{1}{2h_{21}\varepsilon_{02}} \right) - \\
&- \frac{1}{2h_{21}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} \geq - \frac{1}{2h_{21}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M}
\end{aligned}$$

где  $h_{21} = const > 0$  – некоторый коэффициент. Тогда, задавая переменную  $u_{1H}(t)$  уравнением

$$u_{1H}(t) = h_{21}(a_M^T x(t) + f_1(x(t))) \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds \tag{3.40}$$

получим оценку

$$\eta_{1H}(0,t) \geq - \frac{1}{4h_{21}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} = const, \quad \forall t > 0. \tag{3.41}$$

Если интегральные составляющие  $\eta_{2H}(0,t)$  и  $\eta_{3H}(0,t)$ , подобно предыдущему, преобразовать и представить в виде:

$$\begin{aligned}
\eta_{2H}(0, t) &= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) u_{2H}(s) v(s) ds - \int_0^t r(s) v(s) ds \right) \pm \\
&\pm \frac{1}{a_{M0}b_M} \int_0^t f_2(x(s), u(s)) h_{22} r(s) v(s) \int_0^s r(v) v(v) dv ds = \\
&= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) u_{2H}(s) v(s) - f_2(x(s), u(s)) h_{22} r(s) v(s) \int_0^s r(v) v(v) dv ds + \right. \\
&\left. + h_{22} \int_0^t f_2(x(s), u(s)) r(s) v(s) \int_0^s r(v) v(v) dv ds - \int_0^t r(s) v(s) ds \right) = \\
&= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) \left[ u_{2H}(s) - h_{22} r(s) \int_0^s r(v) v(v) dv \right] v(s) ds + h_{22} \int_0^t f_2(x(s), u(s)) r(s) v(s) \int_0^s r(v) v(v) dv ds - \right. \\
&\left. - \int_0^t r(s) v(s) ds \right) \geq \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t \left[ u_{2H}(s) - h_{22} r(s) \int_0^s r(v) v(v) dv \right] v(s) ds + \frac{h_{22} \varepsilon_{02}}{2} \left( \int_0^t r(s) v(s) ds \right)^2 - \int_0^t r(s) v(s) ds \right) \pm \\
&\pm \frac{1}{2h_{22} \varepsilon_{02} a_{M0} b_M} \geq \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t \left[ u_{2H}(s) - h_{22} r(s) \int_0^s r(v) v(v) dv \right] v(s) ds + \right. \\
&\left. + \frac{h_{22} \varepsilon_{02}}{2} \left( \int_0^t r(s) v(s) ds \right)^2 - \int_0^t r(s) v(s) ds + \frac{1}{2h_{22} \varepsilon_{02}} \right) - \frac{1}{2h_{22} \varepsilon_{02} a_{M0} b_M} \geq \\
&\geq -\frac{1}{2h_{22} \varepsilon_{02} a_{M0} b_M}
\end{aligned} \tag{3.42}$$

$$\begin{aligned}
\eta_{3H}(0, t) &= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) u_{3H}(s) v(s) ds + \int_0^t (f_3(x(t), u(t)) + \psi(t)) v(s) ds \right) \pm \\
&\pm \frac{1}{a_{M0}b_M} \int_0^t f_2(x(s), u(s)) h_{23} v(s) \int_0^s v(v) dv ds = \\
&= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) u_{3H}(s) v(s) - f_2(x(s), u(s)) h_{23} v(s) \int_0^s v(v) dv ds + \right. \\
&\left. + h_{23} \int_0^t f_2(x(s), u(s)) v(s) \int_0^s v(v) dv ds + \int_0^t (f_3(x(t), u(t)) + \psi(t)) v(s) ds \right) = \\
&= \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \int_0^t f_2(x(s), u(s)) \left[ u_{3H}(s) - h_{23} r(s) \int_0^s r(v) v(v) dv \right] v(s) ds + h_{23} \int_0^t f_2(x(s), u(s)) v(s) \int_0^s v(v) dv ds + \right. \\
&\left. + \int_0^t (f_3(x(t), u(t)) + \psi(t)) v(s) ds \right) \geq \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t \left[ u_{3H}(s) - h_{23} r(s) \int_0^s r(v) v(v) dv \right] v(s) ds + \right. \\
&\left. + \frac{h_{23} \varepsilon_{02}}{2} \left( \int_0^t v(s) ds \right)^2 + (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03}) \left| \int_0^t v(s) ds \right| \right) \pm \frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{2h_{23} \varepsilon_{02} a_{M0} b_M} \geq \frac{1}{a_{M0}b_M} \left( \varepsilon_{02} \int_0^t \left[ u_{3H}(s) - h_{23} \int_0^s v(v) dv \right] v(s) ds + \right. \\
&\left. + \frac{h_{23} \varepsilon_{02}}{2} \left( \int_0^t v(s) ds \right)^2 + (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03}) \left| \int_0^t v(s) ds \right| + \frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{2h_{23} \varepsilon_{02}} \right) - \frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{2h_{23} \varepsilon_{02} a_{M0} b_M} \geq \\
&\geq -\frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{2h_{23} \varepsilon_{02} a_{M0} b_M}
\end{aligned} \tag{3.43}$$

где  $h_{22}, h_{23} = const > 0$  – некоторые коэффициенты, то определив переменные  $u_{2H}(t)$

и  $u_{3H}(t)$  уравнениями

$$u_{2H}(t) = h_{22}r(t) \int_0^t r(s)v(s)ds, \quad u_{3H}(t) = h_{23} \int_0^t v(s)ds, \quad (3.44)$$

получим оценки

$$\eta_{2H}(0, t) \geq -\frac{1}{4h_{22}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} = const, \quad \eta_{3H}(0, t) \geq -\frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{4h_{23}\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} = const, \quad \forall t > 0. \quad (3.45)$$

В результате явный вид интегрального закона управления (3.10), в соответствии с уравнениями (3.37), (3.40), (3.44), можно синтезировать в следующем виде:

$$u_H(t) = h_{21}(a_M^T x(t) + f_1(x(t))) \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds + h_{22}r(t) \int_0^t r(s)v(s)ds + h_{23} \int_0^t v(s)ds \quad (3.46)$$

При этом из соотношений (3.38), (3.41) и (3.44) следует, что будет выполнено интегральное неравенство (3.13), поскольку:

$$\eta_H(0, t) \geq -\frac{1}{4\varepsilon_{02}a_{M0}b_M} \left( \frac{1}{h_{21}} + \frac{1}{h_{22}} + \frac{(\varepsilon_{01} + \varepsilon_{03})^2}{h_{23}} \right) = const, \quad \forall t > 0. \quad (3.47)$$

Для синтеза явного вида комбинированного закона управления (3.10) достаточно сложить уже синтезированные пропорциональный (3.34) и интегральный (3.46) законы управления. В результате явный вид пропорционально-интегрального закона управления запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_{HH}(t) = u_H(t) + u_{IH}(t) = & h_{11}(a_M^T x(t) + f_1(x(t)))^2 v(t) + \\ & + h_{21}(a_M^T x(t) + f_1(x(t))) \int_0^t (a_M^T x(s) + f_1(x(s)))v(s)ds + \\ & + h_{12}r^2(t)v(t) + h_{22}r(t) \int_0^t r(s)v(s)ds + h_{13}v(t) + h_{23} \int_0^t v(s)ds \end{aligned} \quad (3.48)$$

*Четвертый этап.* Проверка выполнений целевых условий.

Из соотношений (3.35) и (3.47) следует, что будет выполнено интегральное неравенство (3.13), таким образом, математические модели систем:

(3.21), (3.22), (3.34);

(3.9), (3.14), (3.18), (3.34);

(3.21), (3.22), (3.46);

(3.9), (3.14), (3.18), (3.46);

(3.21), (3.22), (3.48) и (3.9), (3.14), (3.18), (3.48); удовлетворяют требованиям частотного и интегрального неравенств (3.12), (3.13) и указанные системы являются гиперустойчивыми, что гарантирует выполнение предельного соотношения

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_M(t) - x(t)\| \leq \sigma_e, \quad \sigma_e = const > 0, \quad (3.49)$$

и, как следствие, учитывая  $x_{M1}(t) = y_M(t)$  и  $x_1(t) = y(t)$ , — достижение поставленной цели управления (3.11).

### **3.2 Реализация фильтр-корректора**

На этапе синтеза закона управления было показано, предполагая, что доступны все переменные состояния измерения, что нелинейная неаффинная по управлению система (3.9), (3.18), используя нелинейный закон управления (3.34), (3.46) или (3.48) может быть линеаризована обратной связью и, описываясь уравнениями линейного эталона (3.14), являться гиперустойчивой.

Вернувшись к первичной системе (3.1), где непосредственному измерению доступен только выход  $y(t) = x_1(t)$ , то появляется задача технической реализации законов управления (3.34), (3.46) и (3.48), решение которой определено связано с получением оценок переменных состояния  $x(t)$ . С этой целью, используем введение в исходную систему фильтр-корректора, который подключим на выход линейной части системы (3.8) и опишем уравнениями

$$\frac{dx_\phi(t)}{dt} = A_\phi x_\phi(t) + B y(t), \quad z_\phi(t) = q_\phi^T x_\phi(t) + D_\phi y(t), \quad (3.50)$$

где  $z_\phi(t) \in R$  и  $x_\phi(t) = [x_{\phi 1}(t), \dots, x_{\phi(n-1)}(t)]^T \in R^{n-1}$  – соответственно скалярный выход и вектор состояния фильтра.

Здесь элементы матрицы состояния  $A_\phi$ , вектора выхода  $q_\phi$  и матрицы обхода  $D_\phi$ , заданы так, что передаточная функция фильтра имеет вид:

$$W_{z_\phi}(s) = \frac{z_\phi(s)}{y(s)} = q^T (sE_{n-1} - A_\phi)^{-1} B + D_\phi = \frac{g_{n-1}g(s)}{(Ts + 1)^{n-1}}, \quad (3.51)$$

где  $T$  – малая постоянная времени.

Так как линейной части системы (3.8) соответствует передаточная функция:

$$W_y(s) = \frac{y(s)}{g(s)} = L^T (sE - A_M)^{-1} B_M = \frac{a_{M0}b_M}{a_M(s)}, \quad (3.52)$$

то передаточная функция последовательного соединения линейной части (3.8) и фильтра (3.51) будет иметь вид:

$$W_{z_\phi}(s) = \frac{z_\phi(s)}{g(s)} = \frac{a_{M0}b_M}{a_M(s)} \cdot \frac{g_{n-1}g(s)}{(Ts + 1)^{n-1}}, \quad (3.53)$$

или описываться эквивалентной передаточной функцией

$$W_{z_\phi}(s) = \frac{z_\phi(s)}{g(s)} = \frac{a_{M0}b_M g_{n-1}g(s)}{a_M(s)} \cdot \frac{1}{(Ts + 1)^{n-1}}. \quad (3.54)$$

Сравнив вид передаточной функции (3.15), (3.54), видны следующие различия – их отличает только блок с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{1}{(Ts + 1)^{n-1}} \quad (3.55)$$

он называется блок структурного возмущения.

Если из блока (3.54) временно убрать блок возмущения (3.38), то при этом модель системы (3.8), (3.9), (3.54) в самом деле оказывается эквивалент-

ной модели системы (3.9), (3.18). Следовательно, системы (3.8), (3.9), (3.14), (3.34), (3.54) как и система (3.9), (3.14), (3.18), (3.34), будет гиперустойчивой и в установившемся режиме описываться линейными уравнениями [11, 12]. Такой же результат будет для систем с законом управления (3.46) и (3.48).

Анализируя установившейся режим в системе (3.8), (3.9), (3.14), (3.34), (3.37), можно обнаружить, что возвращение в эту систему блока (3.55) практически означает переход к системе (3.8), (3.9), (3.14), (3.34), (3.50). При условии, что величина  $T$  меньше любого из следующих значений

$$T_1 = \frac{0.93}{(n-2)a_{M1}}, \quad T_2 = \frac{0.465a_{M1}}{(n-1)a_{M2}}, \quad (3.56)$$

то система (3.8), (3.9), (3.14), (3.34), (3.50), утрачивая свойство гиперустойчивости, остается  $L$ -диссипативной и робастной в заданном классе, сохраняя работоспособность с требуемым качеством управления. Так как система (3.8), (3.9), (3.14), (3.34), (3.50) содержит оценки переменных  $x(t)$ , закон управления (3.34) получит следующий вид:

$$u_{\Pi}(t) = h_{11}(a_M^T \tilde{x}(t) + f_1(\tilde{x}(t)))^2 v(t) + h_{21} r^2(t) v(t) + h_{31} v(t) \quad (3.57)$$

где  $\tilde{x}(t) = [x_{\phi_1}(t), \dots, x_{\phi_{(n-1)}}(t), \dot{x}_{\phi_{(n-1)}}(t)]^T$  – оценки переменных состояния  $x(t)$ .

Закон робастного управления, синтезированный для системы (3.8), (3.9), (3.14), (3.50), (3.57), учитывая эквивалентность математических моделей (3.1), (3.3) и (3.8), (3.9), применим и для исходной неаффинной по управлению нелинейной системой с одним входом и одним выходом (3.1), (3.3), (3.14), (3.50), (3.57).

Анализируя установившейся режим в системе (3.8), (3.9), (3.14), (3.46), (3.37), можно обнаружить, что возвращение в эту систему блока (3.55) практически означает переход к системе (3.8), (3.9), (3.14), (3.46), (3.50). Если величина  $T$  меньше любого из следующих значений (3.56), то система (3.8), (3.9), (3.14), (3.46), (3.50), теряя свойство гиперустойчивости, остается  $L$ -

диссипативной и робастной в заданном классе, сохраняя работоспособность с требуемым качеством управления. Поскольку система (3.8), (3.9), (3.14), (3.46), (3.50) содержит оценки переменных  $x(t)$ , закон управления (3.46) получит следующий вид:

$$u_{II}(t) = h_{12}(a_M^T \tilde{x}(t) + f_1(\tilde{x}(t))) \int_0^t (a_M^T \tilde{x}(s) + f_1(\tilde{x}(s))) v(s) ds + h_{22} r(t) \int_0^t r(s) v(s) ds + h_{32} \int_0^t v(s) ds \quad (3.58)$$

Закон робастного управления, синтезированный для системы (3.8), (3.9), (3.14), (3.50), (3.58), учитывая эквивалентность математических моделей (3.1), (3.3) и (3.8), (3.9), применим и для исходной неаффинной по управлению нелинейной системой с одним входом и одним выходом (3.1), (3.3), (3.14), (3.50), (3.58).

Анализируя установившейся режим в системе (3.8), (3.9), (3.14), (3.48), (3.37), можно обнаружить, что возвращение в эту систему блока (3.55) практически значит переход к системе (3.8), (3.9), (3.14), (3.48), (3.50). Если величина  $T$  меньше любого из следующих значений (3.56), то система (3.8), (3.9), (3.14), (3.48), (3.50), теряя свойство гиперустойчивости, остается  $L$ -диссипативной и робастной в заданном классе, сохраняя работоспособность с требуемым качеством управления. Поскольку система (3.8), (3.9), (3.14), (3.48), (3.50) содержит оценки переменных  $x(t)$ , закон управления (3.48) получит вид:

$$u_{III}(t) = h_{11}(a_M^T \tilde{x}(t) + f_1(\tilde{x}(t)))^2 v(t) + h_{12}(a_M^T \tilde{x}(t) + f_1(\tilde{x}(t))) \int_0^t (a_M^T \tilde{x}(s) + f_1(\tilde{x}(s))) v(s) ds + \quad (3.59)$$

$$+ h_{21} r^2(t) v(t) + h_{22} r(t) \int_0^t r(s) v(s) ds + h_{31} v(t) + h_{32} \int_0^t v(s) ds$$

Закон робастного управления, синтезированный для системы (3.8), (3.9), (3.14), (3.50), (3.59), учитывая эквивалентность математических моделей (3.1), (3.3) и (3.8), (3.9), применим и для исходной неаффинной по управлению нелинейной системой с одним входом и одним выходом (3.1), (3.3), (3.14), (3.50), (3.59).



### 3.3 Моделирование нелинейных систем неаффинных по управлению

Основная цель, которая ставится при моделировании синтезированных в настоящей главе систем робастного управления, заключается в проверке работоспособности этих систем в условиях априорной неопределенности.

При моделировании систем комбинированного неаффинного управления по выходу с фильтр-корректором исследуются системы, которые описываются уравнениями вида: (3.8), (3.9), (3.10), (3.14), (3.50), (3.57); (3.8), (3.9), (3.10), (3.14), (3.50), (3.58) и (3.8), (3.9), (3.10), (3.14), (3.50), (3.59).

Если к выходу неаффинного нелинейного объекта (3.8), (3.9), описываемому уравнениями [9]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -\omega^2 x_1(t) - 0.02(\omega + x_1^2(t)) + u^3 + (x_1^2(t) + x_2^2(t))\sigma(u) + \tanh(0.2u) + d, \\ y(t) &= x_1(t), \quad x_1(0) = 0.1, \quad x_2(0) = 0.2, \end{aligned} \quad (3.60)$$

где  $\omega = 0.4\pi$ ;

$$\sigma(u) = (1 - e^{-u}) / (1 + e^{-u});$$

$$d = 0.2;$$

$r(t) = 0.1(\sin(2t) - \cos(t))$  – задающее воздействие, желаемая динамика которого задана эталонной моделью (3.14):

$$\begin{aligned} \dot{x}_{M1}(t) &= x_{M2}(t), \\ \dot{x}_{M2}(t) &= -2000x_{M1}(t) - 1002x_{M2}(t) + 2000r(t), \\ y_M(t) &= x_{M1}(t), \quad z_M(t) = x_{M1}(t) + 0.5x_{M2}(t), \quad x_1(0) = x_2(0) = 0, \end{aligned} \quad (3.61)$$

подключить фильтр-корректор (3.50) вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\phi 1}(t) &= -5000x_{\phi 1}(t) + 5000y(t), \\ z_{\phi}(t) &= x_{\phi 1}(t) + 0.5\dot{x}_{\phi 1}(t), \end{aligned} \quad (3.62)$$

то пропорциональный закон управления (3.57):

$$\begin{aligned} u_{II}(t) &= h_{11} \left[ 2000x_{\phi 1}(t) + 1002\dot{x}_{\phi 1}(t) - \omega^2 x_{\phi 1}(t) - 0.02(\omega + x_{\phi 1}^2(t)) + x_{\phi 1}^2(t) + \dot{x}_{\phi 1}^2(t) \right] (z_M(t) - z_{\phi}(t)) + \\ & h_{12}r^2(t)(z_M(t) - z_{\phi}(t)) + h_{13}(z_M(t) - z_{\phi}(t)) \end{aligned} \quad (3.63)$$

обеспечит рассматриваемому объекту требуемое поведение, что подтверждают результаты вычислительного эксперимента для робастной системы управления (3.60) – (3.63), представленные на рисунке 1 и 2.

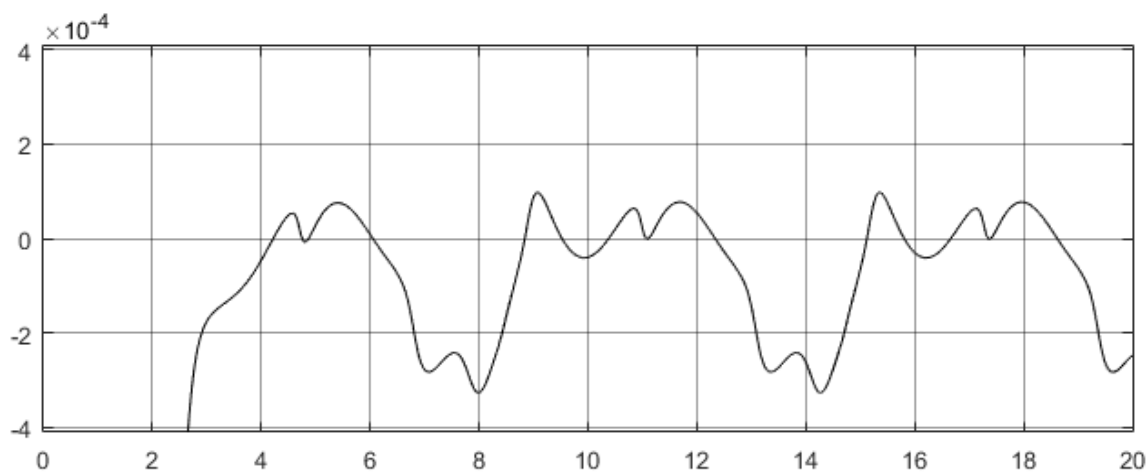


Рисунок 1 – Ошибка рассогласования  $e(t)$

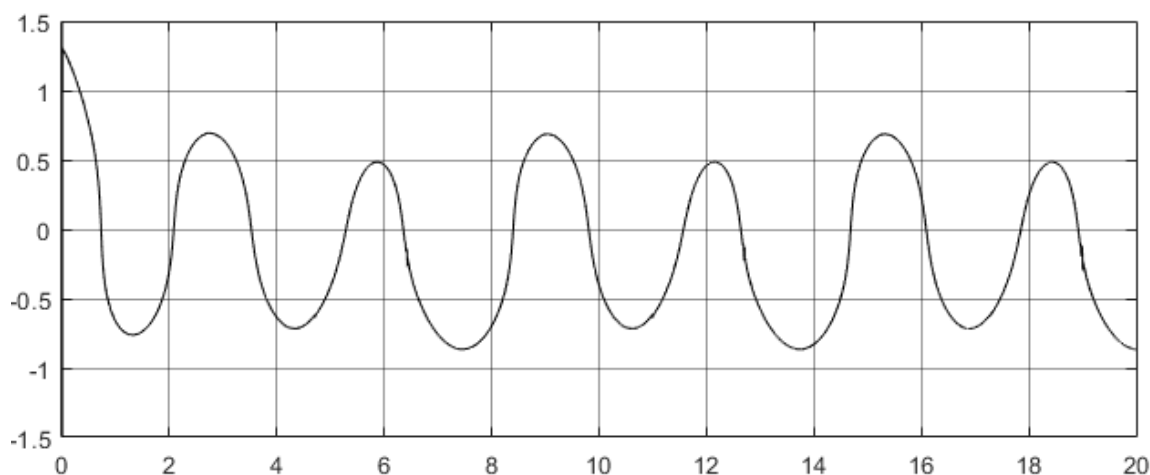


Рисунок 2 – Динамический процесс закона управления  $u(t)$

Интегральный закон управления (3.58):

$$\begin{aligned}
 u_H(t) = & h_{21} [2000x_{\phi_1}(t) + 1002\dot{x}_{\phi_1}^2(t) - \omega^2 x_{\phi_1}(t) - 0.02(\omega + x_{\phi_1}^2(t)) + x_{\phi_1}^2(t) + \dot{x}_{\phi_1}^2(t)] \\
 & \int_0^t 2000x_{\phi_1}(s) + 1002\dot{x}_{\phi_1}^2(s) - \omega^2 x_{\phi_1}(s) - 0.02(\omega + x_{\phi_1}^2(s)) + x_{\phi_1}^2(s) + \dot{x}_{\phi_1}^2(s)(z_M(s) - z_{\phi}(s)) ds + \\
 & + h_{22}r(t) \int_0^t r(s)(z_M(s) - z_{\phi}(s)) ds + h_{23} \int_0^t (z_M(s) - z_{\phi}(s))
 \end{aligned} \tag{3.64}$$

обеспечит рассматриваемому объекту требуемое поведение с меньшей ошибкой рассогласования по сравнению с пропорциональным законом управления, что подтверждают результаты вычислительного эксперимента для робастной системы управления (3.60) – (3.62), (3.64), представленные на рисунке 3 и 4.

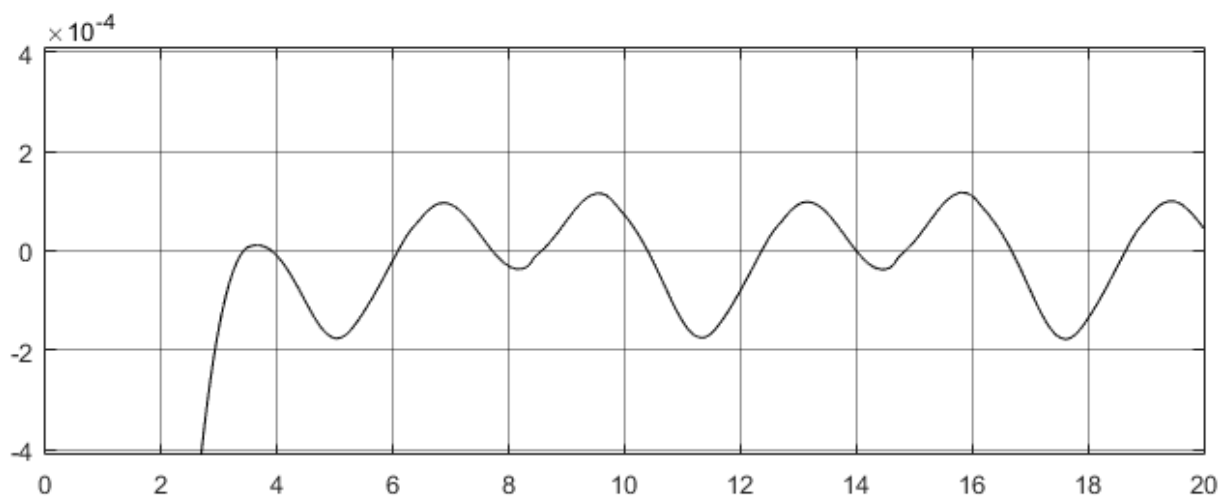


Рисунок 3 – Ошибка рассогласования  $e(t)$

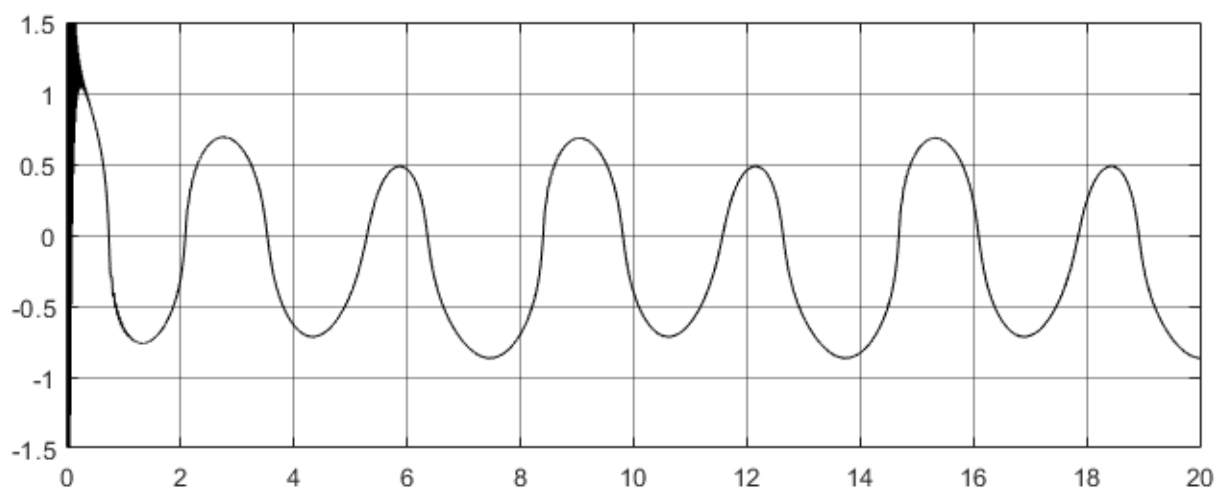


Рисунок 4 – Динамический процесс закона управления  $u(t)$

Комбинированный закон управления (3.59):

$$\begin{aligned}
 u_{III}(t) = & h_{11} [2000x_{\phi_1}(t) + 1002\dot{x}_{\phi_1}^2(t) - \omega^2 x_{\phi_1}(t) - 0.02(\omega + x_{\phi_1}^2(t)) + x_{\phi_1}^2(t) + \dot{x}_{\phi_1}^2(t)] (z_M(t) - z_{\phi}(t)) + \\
 & h_{21} [2000x_{\phi_1}(t) + 1002\dot{x}_{\phi_1}^2(t) - \omega^2 x_{\phi_1}(t) - 0.02(\omega + x_{\phi_1}^2(t)) + x_{\phi_1}^2(t) + \dot{x}_{\phi_1}^2(t)] \\
 & \int_0^t 2000x_{\phi_1}(s) + 1002\dot{x}_{\phi_1}^2(s) - \omega^2 x_{\phi_1}(s) - 0.02(\omega + x_{\phi_1}^2(s)) + x_{\phi_1}^2(s) + \dot{x}_{\phi_1}^2(s) (z_M(s) - z_{\phi}(s)) ds + \\
 & + h_{12} r^2(t) (z_M(t) - z_{\phi}(t)) + h_{22} r(t) \int_0^t r(s) (z_M(s) - z_{\phi}(s)) ds + h_{13} (z_M(t) - z_{\phi}(t)) + h_{23} \int_0^t (z_M(s) - z_{\phi}(s)) ds
 \end{aligned} \tag{3.65}$$

обеспечит рассматриваемому объекту требуемое поведение с наименьшей ошибкой рассогласования по сравнению с предыдущими законами управления, что подтверждают результаты вычислительного эксперимента для комбинированной системы управления (3.60) – (3.62), (3.65), представленные на рисунке 5 и 6.

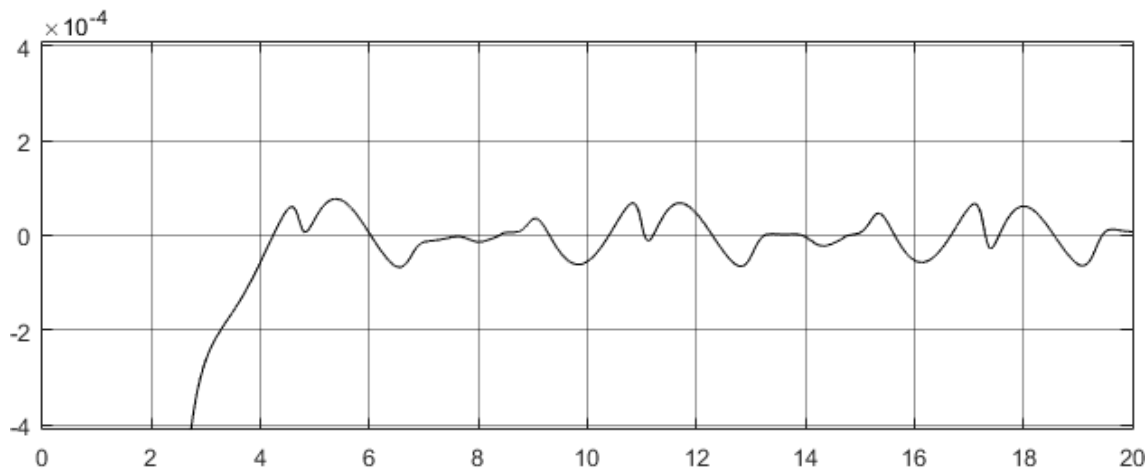


Рисунок 5 – Ошибка рассогласования  $e(t)$

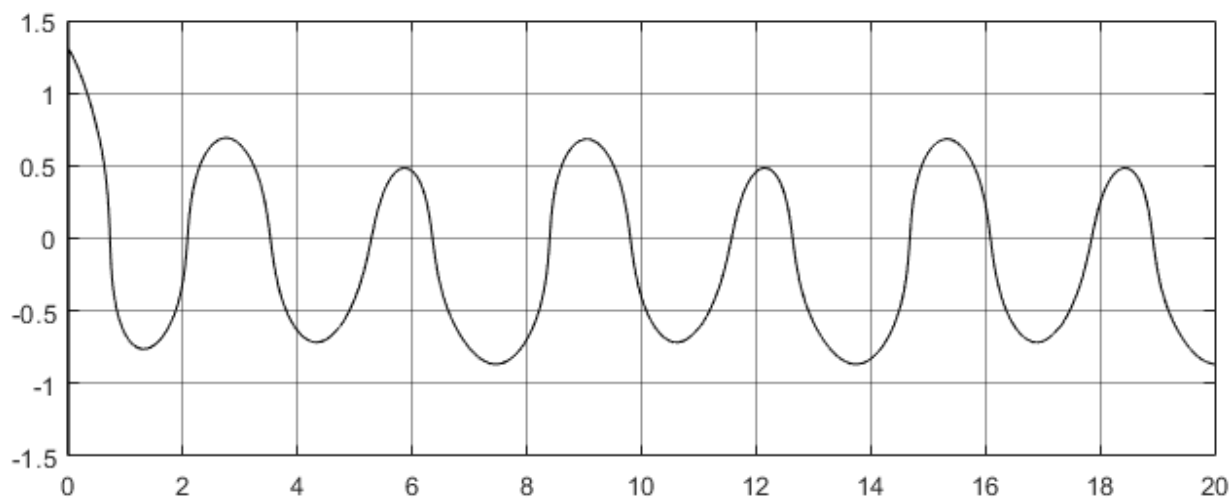


Рисунок 6 – Динамический процесс закона управления  $u(t)$

Как показывают результаты имитационного моделирования синтезированных систем управления (3.60) – (3.63); (3.60) – (3.62), (3.64) и (3.60) – (3.62), (3.65), в первоначальные моменты времени в этих системах происходит отработка рассогласования, вызванного разными начальными условиями объ-

екта управления и эталонной модели, а через несколько секунд ошибка рассогласования не превышает величину 0.04 % у системы с пропорциональным законом управления, 0.02 % у системы с интегральным законом управления и наилучший результат показала система с комбинированным законом управления, ошибка которой не превышает величину 0.01 %.

## 4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ НЕАФФИННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО ВЫХОДУ С ФИЛЬТР-КОРЕКТОРОМ

В качестве среды реализации программного обеспечения выбор пал на математический пакет Simulink/Matlab 9.3. Для разработки графического интерфейса пользователя использовался инструмент GUIDE.

### 4.1 Описание среды разработки

Matlab по – это высокоуровневый язык и интерактивная среда программирования, численных расчетов и визуализации результатов. С помощью MATLAB можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения [25]. Matlab пользуются огромное количество инженеров и научных работников, он может работать на большинстве современных операционных систем, в том числе на Linux, Mac OS, Solaris и Microsoft Windows. В Matlab 9.3 входит JIT компилятор, который обеспечивает более быстрое выполнение программ. Разработчики Matlab считают, что это делает их продукт мощнейшей альтернативой кодированию на C в области технических вычислений.

В функции Matlab входит вычисления, визуализация и программирования в среде, где задачи и решения выражаются в форме, близкой к математической.

В целом Matlab – это:

- математические вычисления;
- создание алгоритмов;
- моделирование;
- анализ, исследования и визуализация данных;
- инженерная и научная графика;
- создание приложений, в том числе с графическим интерфейсом.

Matlab – это интерактивная среда, где главным элементом данных явля-

ется массив. Что позволяет решать различные задачи, которые тесно связаны с техническими вычислениями, в особенности те задачи, в которых используются матрицы и вектора, во много раз быстрее, чем при разработке программ с использованием «скалярных» языков программирования.

Слово Matlab расшифровывается как матричная лаборатория. Matlab был специально разработан для легкого доступа к библиотекам систем алгебраических уравнений Linpack и Eispack, которые предоставляют современные программные средства для матричных вычислений.

Matlab формировался в течении нескольких лет, адаптируясь к различным пользователям. В университетской среде он был стандартным инструментом для работы в разных областях математики, машиностроения и науки. В промышленности Matlab является инструментом для высокопродуктивных исследований, разработок и анализа данных [2].

В Matlab особая роль предназначена для специализированных групп программ, называемых toolboxes. Они имеют огромное значение для многих пользователей Matlab, т.к. дают возможность изучать и применять специальные методы. Toolboxes – это всесторонний сборник функций Matlab (М-файлов), который позволяет решать частные классы задач. Toolboxes используют для обработки сигналов, систем контроля, нейронных сетей, нечеткой логики, моделирования и т.д.

Система Matlab делится на пять основных частей:

*Язык Matlab.* Является математическим языком где используются математические операторы и функции чаще всего матрицы и массивы, также интеграция с другими языками объектно-ориентированного программирования. Это дает возможность и прописывать легкие черновые тестовые программы, и разрабатывать большие и достаточно сложные программные продукты.

*Среда Matlab.* Это сборник специальных инструментов и функций, с которыми работает пользователь или Matlab программист. В сборник входят инструменты для управления переменными в workspace Matlab, вводом, выво-

дом, редактированием и обработкой данных, а также отладкой М-файлов и приложений Matlab.

*Графика.* Графическая система Matlab, состоящая из команд позволяющих визуализировать данные двумерном и трехмерном пространстве. Также команды позволяют обрабатывать простые изображения и анимации. Также с помощью этих команд можно производить тонкую настройку изображений и графиков начиная от смены цвета и заканчивая толщиной линий и количеством пикселей. Эти возможности можно применять для разработки графических интерфейсов Matlab приложений.

*Математическая библиотека.* Сборник различных математических функций производящий вычисления простых алгоритмов и функций таких как вычисление синуса, косинуса и тангенса, до более сложных функций, таких как быстрое преобразование Фурье, обращение матриц, нахождение собственных значений.

*Интерфейс.* Это библиотека, с помощью которой можно писать программы на Си и Фортране, с теми, которые могут интегрироваться с Matlab. Библиотека включает в себя инструменты для вызова программ из Matlab, пользуясь Matlab как особым вычислительным инструментом и для чтения и записи mat-файлов.

Simulink – это специальная интерактивная система, она предназначена для анализа, проектирования и моделирования широкого класса динамических систем. Simulink предоставляет пользователю особый графический интерфейс для сборки моделей из стандартных блоков с помощью простого соединения блоков с помощью мыши. Широкая библиотека блоков позволяет моделировать системы с высокой скоростью, при этом не используя ни единой строчки кода. Simulink работает с линейными, нелинейными, непрерывными, дискретными, многомерными системами [25].

Основные средства для анализа и моделирования:

- широкая библиотека блоков для создания линейных и нелинейных,



дискретных и непрерывных, одноканальных и многоканальных моделей;

- иерархическая структура моделей с неограниченной вложенностью;
- скалярные и векторные связи;
- средство для создания пользовательских блоков и библиотек;
- интерактивное моделирование с «живым» отображением на экране;
- семь методов интегрирования с фиксированным и переменным шагом;
- линеаризация;
- моделирование Монте-Карло;
- определение точек равновесия;
- различные способы вывода на экран и библиотека входных сигналов.

Интерактивная разработка моделей. В Simulink входит большая библиотека блоков, с помощью которой можно легко создавать модели. Достаточно просто переносить элементы из библиотеки на страницу новой модели и соединять блоки с помощью мыши. Сгруппировав блоки в подсистемы, можно создать иерархические модели. Ограничений на число блоков и связей в модели нет [2].

«Живое» моделирование. Блок-диаграммы Simulink обеспечивают интерактивную среду для моделирования нелинейных систем. Есть возможность выполнять моделирование при помощи меню или используя командную строку. Результаты моделирования будут отображаться в процессе работы. При помощи Simulink есть возможность менять параметры модели даже в момент выполнения моделирование.

Blocksets – это особое дополнение к Simulink, которое обеспечивает библиотеку блоков для специальных приложений, к которым относится связь, обработка сигналов, энергетические системы.

Real-Time Workshop – это программа, позволяющая генерировать C код прямо из блоков диаграмм и выполнять их на разных системах реального времени.

## 4.2 Описание структуры системы имитационного моделирования

Разработанная программа может быть использована при решении задач управления в условиях априорной неопределённости для класса неаффинных систем управления, в которых оценки объекта управления получают с помощью фильтра-корректора. Она позволяет моделировать процессы, протекающие в системах как с пропорциональным робастным законом управления, так и с интегральным робастным, а также с комбинированным законом управления.

Программа имитационного моделирования позволяет: изменять параметры регулятора; изменять время моделирования; выводить Simulink-схемы, а также получать результаты моделирования в виде графиков. Одним из преимуществ написанной программы является понятный интерфейс, наглядность и простота работы.

В качестве инструментального средства разработки используется математический пакет Matlab 9.3, с помощью которого осуществляется как имитационное моделирование, так и все необходимые математические расчеты.

Разработанный программный продукт представляет собой пакет программ, объединенных в единый каталог NeaffinSystem.

Рассмотрим все файлы из каталога NeaffinSystem.

*Neaffin.fig* и *Neaffin.m* – файлы графического интерфейса, содержащие программный код, предназначенный для вывода на экран главного окна программы, содержащего набор кнопок, необходимых для работы с неаффинными системами управления. Имеются в виду неаффинные системы управления с пропорциональным, интегральным и комбинированным законом управления;

*NeaffinV2.mdl* – структурная Simulink-схема неаффинной нелинейной системы с пропорциональным законом управления, при помощи которой осуществляется имитационное моделирование системы;

*NeaffinV3.mdl* – структурная Simulink-схема неаффинной нелинейной

системы с интегральным законом управления, при помощи которой осуществляется имитационное моделирование системы;

*NeaffinV3.mdl* – структурная Simulink-схема неаффинной нелинейной системы с комбинированным законом управления, при помощи которой осуществляется имитационное моделирование системы.

Файл, с расширением \*.fig, содержит информацию о расположении элементов управления программой в области выводимого на экран графического окна. Файл, имеющий расширение \*.m, содержит программный код, включающий обработчики событий, генерируемых при использовании каждого из имеющихся элементов управления (нажатие кнопки, изменение значения в поле ввода, выбор элемента меню и т.п.).

В данной выпускной квалификационной работе рассматриваются вопросы разработки неаффинных систем управления с комбинированным регулятором, что позволяет в рассматриваемых системах повысить качество функционирования при постоянно действующих возмущениях и наличии неопределенности. Для имитационного моделирования неаффинных систем разработана программа, которая включает модели пропорционального, интегрального и комбинированного управления.

Для синтеза робастных алгоритмов регулятора применялся метод гиперустойчивости. Основная идея метода заключается в том, что система преобразуется к структуре систем управления с нелинейной обратной связью.

Данная программа предоставляет следующие возможности:

- просмотр Simulink-моделей неаффинных систем управления;
- изменение параметров регулятора и времени моделирования;
- выбор системы управления;
- получение результатов в виде графиков и изменение масштаба графиков;
- просмотр следующих графиков: ошибка рассогласования, выход объекта, процесс настройки управления.)

### 4.3 Руководство пользователя

Чтобы приступить к работе с разработанной системой имитационного моделирования, необходимо скопировать каталог NeaffinSystem в рабочую папку среды Matlab (по умолчанию – `c:\matlab\work\NeaffinSystem`). После этого необходимо установить директорию в качестве рабочей папки, воспользовавшись кнопкой с изображенным на ней многоточием, расположенной в верхней части рабочего окна среды Matlab.

После того как осуществлен выбор текущей директории, для запуска программы имитационного моделирования необходимо из окна выбранной текущей директории (Current Directory) двойным щелчком левой кнопки мыши запустить файл «Neaffin.fig». Можно также воспользоваться другим способом запуска программы – прописать в рабочей строке Matlab имя файла – «Neaffin».

После запуска программы на экране монитора появится главное окно программы, представленное на рисунке 4.1.

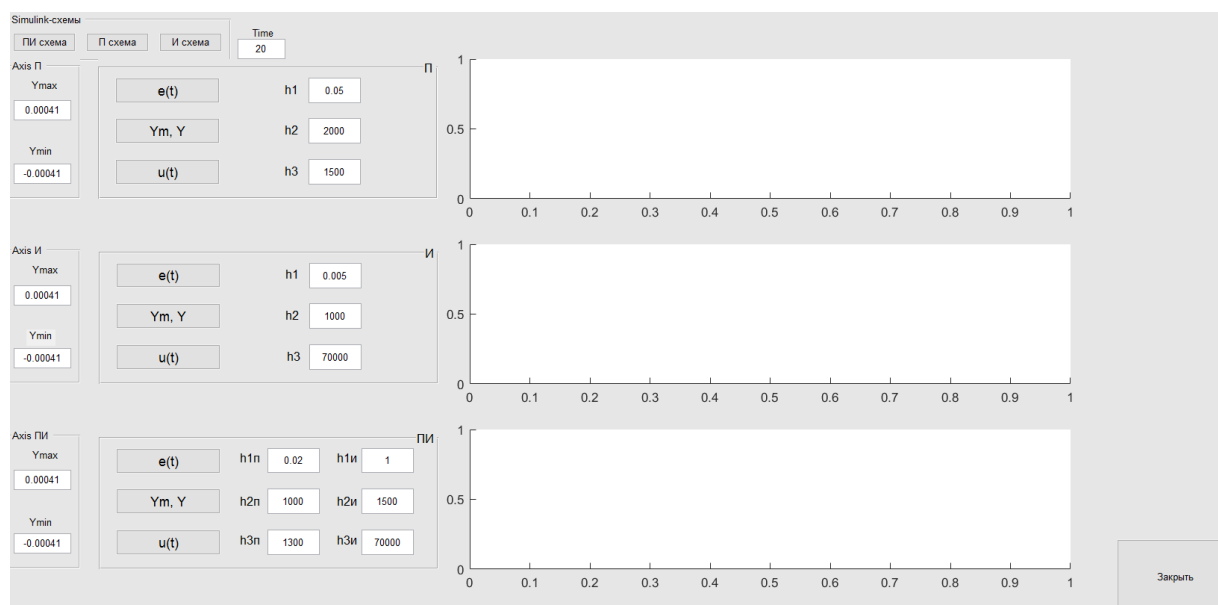


Рисунок 4.1 – Главное окно программы

Как видно из приведенного рисунка, главное окно программы содержит все необходимые действия, с помощью которых производится работа с программой. Рассмотрим подробнее все возможности данной программы с приве-

дением соответствующих рисунков.

Данная программа предоставляет возможность работать со следующими неаффинными системами управления: с пропорциональным управлением, с интегральным управлением, с комбинированным (пропорционально-интегральным) управлением.

Панель «Simulink-схемы» предоставляет возможность пользователю просмотреть Simulink-схемы исследуемых систем (рисунок 4.2). Также, при объективной необходимости, пользователь может внести новые изменения в структуру разработанных Simulink-схем.

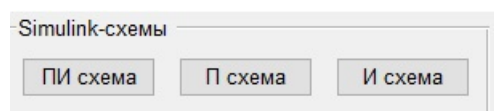


Рисунок 4.2 – Панель «Simulink-схемы»

Панели «Axis» предоставляет возможность масштабирования отображаемых характеристик исследуемой системы. Для задания масштаба отображенных временных характеристик необходимо вводить для каждой системы свои минимальные и максимальные параметры (рисунок 4.3), затем нажать левой кнопкой мыши по кнопке вывода интересующего графика. После того как клавиша мыши будет отпущена, масштаб графика будет установлен в соответствии с указанными параметрами этого графика.



Рисунок 4.3 – Панель параметров масштабирования графиков

Для вывода графиков неаффинных систем пользователю необходимо воспользоваться одной из следующих кнопок:  $e(t)$  – вывод графика ошибки

рассогласования;  $Y_m$ ,  $Y$  – вывод графика выхода системы и эталонной модели;  $u(t)$  – вывод графика динамического процесса управления; расположенные слева от экранов вывода графиков (рисунок 4.1). По нажатию кнопки запускается процесс непосредственного моделирования рассматриваемой системы.

В процессе просмотра результатов имитационного моделирования пользователь может осуществлять выбор отображаемой временной характеристики системы, расположенных в верхней части программы (рисунок 4.4), посредством задания в поле Time нужного времени и далее повторного нажатия на кнопку вывода требуемого графика.

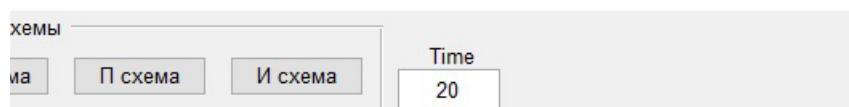


Рисунок 4.4 – поле «Time»

В процессе работы с системой управления с целью получения и улучшения временных характеристик параметры регулятора могут изменяться. В случае изменения этих параметров для просмотра новых результатов имитационного моделирования системы необходимо повторно нажать на кнопку требуемого графика. Поля параметров регулятора расположены в панелях своих систем слева от графиков (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Поля параметров регуляторов.

Для закрытия главного окна программы необходимо нажать кнопку «Закрыть», расположенную в правой нижней части окна (рисунок 4.1).

В результате имитационного моделирования, используя разработанный

программный продукт, были получены графики, представленные на рисунках 4.6 и 4.7. На этих графиках были выведены ошибки рассогласования, процесс настройки управления и выход объекта и эталона.

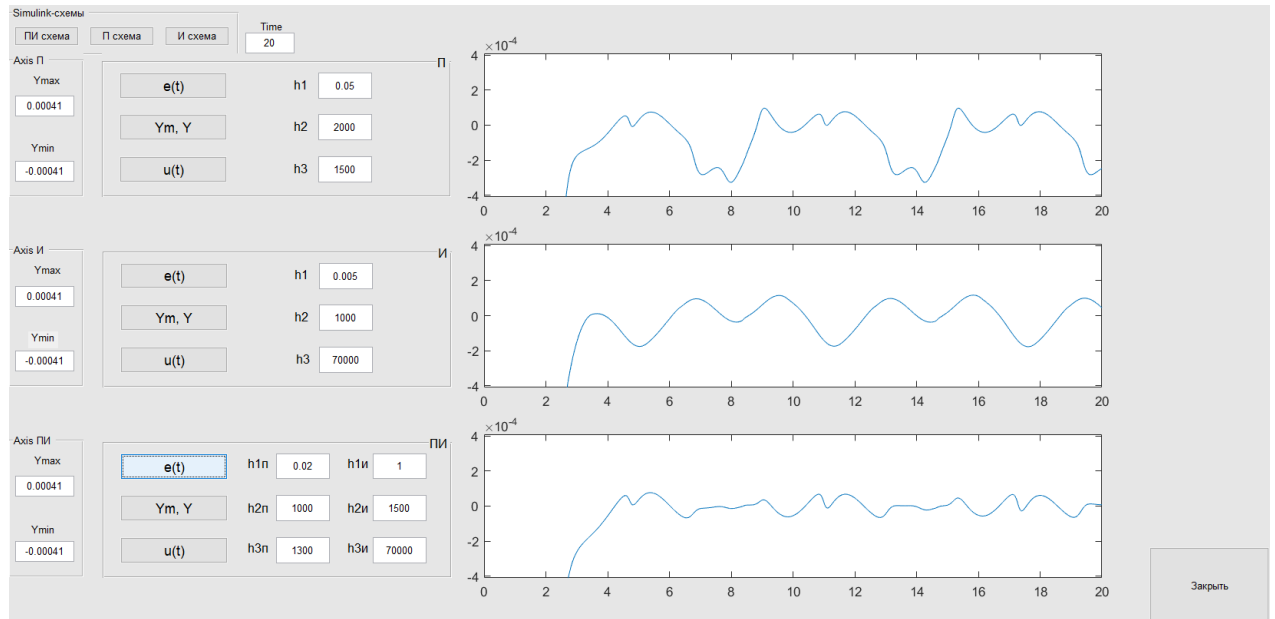


Рисунок 4.6 – Результаты имитационного моделирования вывод ошибки рассогласования

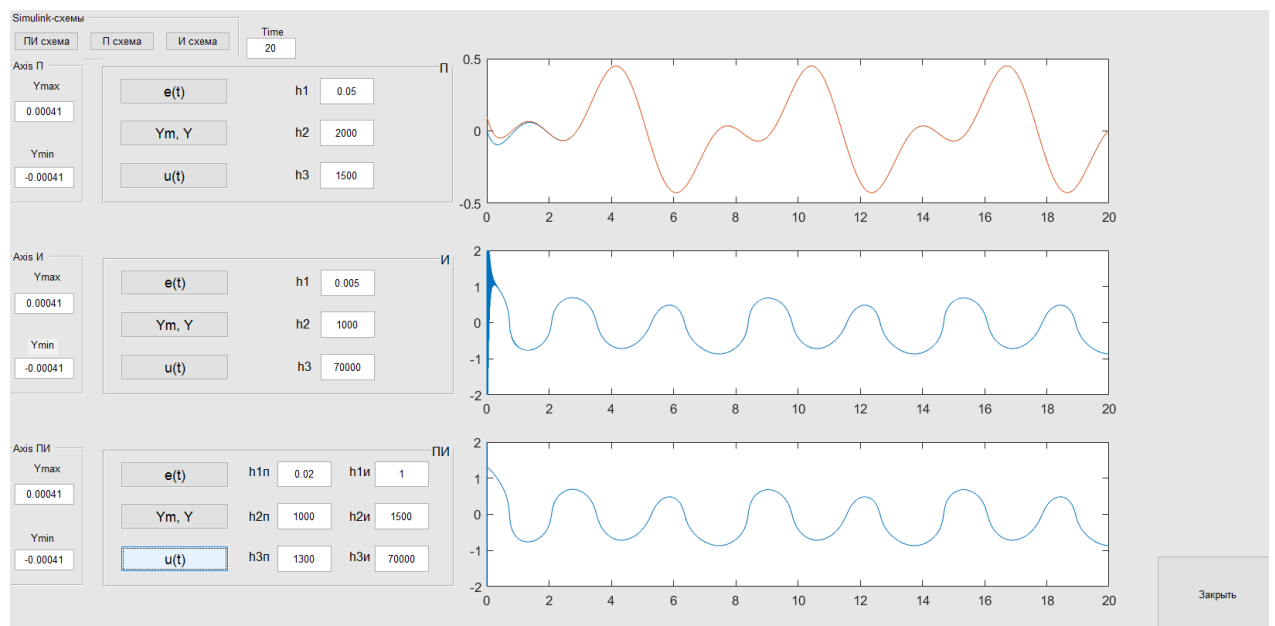


Рисунок 4.7 – Результаты имитационного моделирования вывод выхода объекта и динамика регулятора.

## 5 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ

С развитием научно-технического прогресса значимую роль играет возможность безопасного выполнения людьми своих трудовых обязанностей. В связи с этим была создана и развивается наука о безопасности и экологичности труда.

Рабочее место должно предусматривать меры защиты от вероятных воздействия опасных и вредных факторов производства. Степени данных факторов не должны превышать предельных значений, указанных в правовых, технических и санитарно-технических нормах. Данные нормативные документы принуждают к созданию на рабочем месте условий труда, при выполнении которых действия опасных и вредных факторов на работающих устранено совсем или находится на допустимых границах.

### 5.1 Безопасность

Для упрощения трудовой деятельности и повышения продуктивности люди чаще всего используют персональные компьютеры. Компьютер может совершать выполнение в одно время большое количество задач в сравнении с человеком.

Хоть с первого взгляда может показаться, что человек, работающий за ПК не устаёт, в действительности это не так. Есть разные последствия от продолжительной работы за компьютером. Для таких случаев даже придумали свое наименование, которое звучит как «компьютерные болезни». Примером таких болезней может послужить туннельный синдром, который появляется из-за сдавливания срединного нерва в там, где он проходит сквозь запястный канал под поперечной связкой запястья. При этом синдроме чувствуется боль и покалывание в области кисти, также может наблюдаться опухание кисти и запястья, онемение указательного и среднего пальцев. Чтобы избежать этих болезней, были придуманы определенные правила и нормы.

Данная глава посвящена вопросам безопасности жизнедеятельности со-



трудников, которые буду использовать готовый программный продукт на предприятии. Ориентируясь на санитарно-эпидемиологические нормы необходимо определить гигиенические требования для рабочего места, способы безопасной утилизации кабелей, расходуемых элементов оргтехники и бумаги, а также меры, позволяющие предотвратить чрезвычайные ситуации.

#### 5.1.1 Требование к помещениям

##### *Освещение*

Правильно разработанное и введенное в эксплуатацию производственное освещение повышает качество условия зрительной деятельности, понижает утомляемость, содействует повышению производительности труда, хорошо действует на производственную среду, совершая положительное психологическое воздействие на сотрудника, повышается безопасность труда и снижается риск травматизма.

Нехватка освещения является причиной напряженной работы зрительных органов, снижения внимания, наступления преждевременной утомленности. Слишком яркое освещение ослепляет сотрудников, раздражает и вызывает резь в глазах. Неверное направление лучей света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, что дезориентирует сотрудников. Данные причины фигурируют в несчастных случаях или профзаболеваниях произошедших на предприятиях из-за несоблюдения норм освещенности. Поэтому расчет освещенности так важен.

Источниками искусственного освещения часто являются люминесцентные лампы типа ЛБ или ДРЛ. Они могут попарно объединиться в светильник, который обязан находится над рабочими поверхностями равномерно.

Требования по поводу освещения в помещениях, в которых стоят компьютеры, следующие: во время выполнения зрительных работ высочайшей точности общая освещенность в помещении должна составлять около 300лк, а комбинированная примерно 750лк; Такие же требования во время выполнения работ средней точности, 200лк общего освещения и 300лк комбинированного.

Помимо этого, радиус всего поля зрения обязан быть освещен достаточно равномерно – это является главным гигиеническим требованием. Другими словами, уровень освещения помещения и яркость монитора компьютера обязаны быть примерно одинаковыми, т.к. слишком яркий свет в области периферийного зрения сильно повышает напряженность глаз и, в следствие этого, быстро доводит их до утомляемости.

#### *Параметры микроклимата*

Параметры микроклимата имеют возможность изменяться в широких пределах, в то время как важным требованием жизнедеятельности человека есть поддержание постоянной температуры тела с помощью терморегуляции, т.е. умения организма изменять отдачу тепла в окружающую среду. Принцип нормирования микроклимата называется настройка оптимальных условий для теплообмена тела человека с внешней средой.

Электронная вычислительная техника производит огромные тепловыделения, что неизбежно приводит к повышению температуры и, также приводит к снижению относительной влажности в помещении. В помещениях, в которых стоят компьютеры, следует соблюдать определенные параметры микроклимата. В санитарных нормах СН-245-71 заданы величины параметров микроклимата, являющимися комфортными. Данные нормы зависят от времени года, нрава трудового процесса и характера производственного помещения или рабочего места (см. табл. 5.1).

Размер помещений, в которых находятся сотрудники вычислительных центров, не должен быть меньше чем  $19,5\text{м}^3$ /сотрудника учитывая максимальное число одновременно работающих людей в смену. Нормы кондиционирования свежего воздуха в помещениях с ЭВМ, приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.1 Параметры микроклимата в помещениях с ЭВМ

Время года	Параметры микроклимата в помещении	Данные
Зима	Температура воздуха в помещении	22...24°C
	Относительная влажность	40...60%
	Скорость движения воздуха	до 0,1 м/с
Лето	Температура воздуха в помещении	23...25°C
	Относительная влажность	40...60%
	Скорость движения воздуха	0,1...0,2 м/с

Таблица 5.2 Нормы кондиционирования свежего воздуха в помещениях с ЭФМ

Характеристика помещения	Объем расхода подаваемого в помещение свежего воздуха, м <sup>3</sup> /на одного человека в час
Объем до 20м <sup>3</sup> на сотрудника	Не менее 30
20...40м <sup>3</sup> на сотрудника	Не менее 20
Больше 40м <sup>3</sup> на сотрудника	Естественная вентиляция

Организационные методы (проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), и технические средства (вентиляция, кондиционирование воздуха, отопительная система), обеспечивают комфортные условия работы на предприятии [19].

На предприятии отдел имеет два вида помещений:

- рабочее помещение, которое подразумевает под собой основное;
- серверная комната, которая подразумевает под собой технологическое помещение со специально созданными и поддерживаемыми условиями для размещения и функционирования серверного и телекоммуникационного оборудования.

### 5.1.2 Требование организации рабочего места

Важной задачей эргономического проектирования в сфере вычислительной техники относится организация рабочих мест, оборудованных терминалами [13].

Рабочее место и размещение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Огромное значение имеет и характер работы. Особенно, при проектировании рабочего места программиста. Должны быть выполнены следующие основные условия: оптимальное расположение оборудования, входящего в окружение рабочего места и достаточное рабочее пространство, позволяющее совершать все нужные движения и перемещения.

К эргономическому проектированию терминальных рабочих мест, например, относятся: настройка высоты рабочих поверхностей, выделение области для ног, рекомендации к расположению документов на рабочем месте (наличие подставки или лотка для документов, возможность расположения документов в удобном для сотрудника месте, расстояние от глаз пользователя до экрана и т.д.), регулировка кресла.

Площадь каждого рабочего места должна составлять не менее 4,5 кв.м. Рабочие места должны предусматривать размещения на них ПК, а также удобства работы за ними.

Высота рабочей поверхности стола для пользователей без возможности регулирования должна составлять 725 мм. Модульными размерами рабочей поверхности стола для ПЭВМ, на основании которых должны рассчитываться конструктивные размеры, следует считать: ширину 800, 1000, 1200 и 1400 мм, глубину 800 и 1000 мм при нерегулируемой его высоте, равной 725 мм.

Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм.

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах (400-550) мм и углам наклона вперед до 15° и назад до 5°;

- высоту опорной поверхности спинки ( $300\pm 20$ ) мм, ширину - не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости - 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах  $\pm 30^\circ$ ;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах (260-400) мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной – (50-70) мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах ( $230\pm 30$ ) мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах (350-500) мм.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии (100-300) мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

Для комфортной работы стол должен удовлетворять следующим требованиям:

- высоту стола необходимо выбрать с учетом возможности сидеть свободно, в удобной позе, при необходимости опираясь на подлокотники;
- нижняя часть стола должна быть сконструирована таким образом, чтобы программист мог удобно сидеть и не был вынужден поджимать ноги;
- поверхность стола должна иметь свойства, исключающие появление бликов в поле зрения программиста;
- конструкция стола должна предусматривать наличие выдвижных ящиков (не менее 3 для хранения документации, листингов, канцелярских принадлежностей).
- высота рабочей поверхности рекомендуется в пределах 680-760мм.

Высота поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть около 650мм.

Нужно предусматривать при организации возможность разного разме-

щения документов: сбоку от терминала, по центру стола и т.п. Помимо этого, в случаях, когда у терминала низкое качество изображения, например видны мелькания, расстояние от глаз до монитора делают больше (примерно 700мм), чем расстояние от глаза до документа (300-450мм). Вообще при высоком качестве изображения на терминале расстояние от глаз пользователя до монитора, документа и клавиатуры может быть одинаковым.

Значительное внимание также выделяется правильной рабочей позе пользователя. При неправильной рабочей позе возможны появления болей в мышцах, суставах и сухожилиях. Требования к рабочей позе пользователя терминала следующие:

- голова не должна быть наклонена более чем на  $20^{\circ}$ ,
- плечи - расслаблены,
- локти должны быть под углом  $80^{\circ} \dots 100^{\circ}$ ,
- предплечья и кисти рук должны быть в горизонтальном положении.

#### *Рабочее помещение*

Этот вид помещения на предприятии довольно просторный. В помещении расположены 3-5 рабочих мест, каждое место имеет по ПК соответственно.

Температура в помещении держится в промежутке 23-25 градусов по Цельсию. Микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они дают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают возможности для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах.

Естественное освещение поступает через оконные проемы, расположенные напротив входа. Окна оборудованы регулируемыми устройствами вида жалюзи. Световые лучи падают на экраны мониторов, что не является

рекомендованным санитарно-эпидемиологическими нормами. Искусственное освещение в помещении производится с помощью системы общего освещения. Освещение поверхности стола должна быть 300-500 люкс, при этом освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана.

Вентиляция помещения должна соответствовать следующим требованиям:

- обеспечение притока свежего воздуха;
- удаление или фильтрация отработанного воздуха;
- минимальный уровень шума;
- доступность в управлении.

#### *Серверная комната*

В сравнении с рабочим помещением, данная комната не предусматривает продолжительной работы персонала в ней.

К этому помещению имеется ряд требований:

- рекомендуемая температура в помещении  $(18 - 27)^{\circ}\text{C}$ , для этого необходимо кондиционирование воздуха;
- влажность воздуха в серверной должна быть в пределах от 20% до 80% без конденсации влаги;
- давление в серверной должно превышать давление в соседних помещениях;
- уровень освещения должен составлять не менее 500 люкс, измеренном на высоте 1 метр в горизонтальной плоскости;
- уровень электромагнитного излучения не должны превышать 3 В/м во всех диапазонах частот.

#### 5.1.3 Безопасность при работе с ПЭВМ

Во время использования средств вычислительной техники и периферийных оборудований каждый работник должен:

Осмотреть рабочее место и убедиться:

- в устойчивости положения оборудования на рабочем столе;

- в отсутствии видимых повреждений оборудования;
- в исправности и целостности питающих и соединительных кабелей разъемов и штепсельных соединений, защитного заземления.

Подготовить ПЭВМ к работе и провести следующие действия:

- протереть мягкой салфеткой поверхность экрана монитора;
- отрегулировать высоту рабочей поверхности стола в пределах (680-800) мм (при отсутствии регулировки высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм);
- расположить клавиатуру на поверхности стола на расстоянии (100-300) мм от края, обращённого к специалисту (руководителю), или на специальной регулируемой по высоте рабочей, отдельной от основной, столешницы;
- расположить экран видеомонитора на расстоянии (600-700) см от глаз, но не ближе 500 мм с учётом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов так, чтобы уровень глаз при вертикально расположенном экране видеомонитора приходился на центр или  $2/3$  высоты экрана (линия взора должна быть перпендикулярна центру экрана, и оптимальное ее отклонение от перпендикуляра, проходящего через центр экрана в вертикальной плоскости не должно превышать  $\pm 10$  градусов);
- убедиться в отсутствии бликов на экране видеомонитора, встречного светового потока;
- отрегулировать, с учётом роста, подъёмно-поворотный стул (кресло) по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья;
- отрегулировать положение подставки для ног (в случае ее использования);
- включить оборудование в электрическую сеть, соблюдая следующую последовательность: стабилизатор напряжения (если он используется), блок бесперебойного питания, периферийные устройства (принтер, видеомони-



тор, сканер и другие устройства), системный блок;

- соблюдать оптимальное расстояние от экрана видеомонитора до глаз и поддерживать рациональную рабочую позу и оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы;

- отключить ПЭВМ, периферийные устройства от электросети при обнаружении неисправности, внезапном снятии напряжения сети;

- периодически прерывать работу за экраном видеомонитора на регламентированные перерывы, которые устанавливаются для обеспечения работоспособности и сохранения здоровья, или заменять другой работой с целью сокращения рабочей нагрузки у экрана.

Не допускается касаться экрана монитора, прикасаться к задней панели системного блока при включенном питании, допускать попадание влаги на поверхность системного блока, монитора, рабочую поверхность клавиатуры, принтеров и других устройств, производить самостоятельное вскрытие и ремонт оборудования.

Во всех случаях поражения человека электрическим током немедленно вызывают врача. До приезда врача необходимо, не теряя времени, начать оказывать первую помощь пострадавшему.

Выполнение условий устанавливающих оптимальную организацию рабочего места администратора предоставляет возможность создания безопасных условий труда на рабочем месте, позволяет сохранить хорошую работоспособность во время рабочего дня, повышает производительность труда программиста, что будет способствовать быстрой разработке и отладке программного обеспечения.

## **5.2 Экологичность**

Любой предмет обладает своим сроком жизни: у кого он больше, у кого он меньше. В конце срока жизни часто старый, уже не нужный предмет выбрасывается на свалку и замещается похожим. Но для предприятия есть

определенные ограничения. Согласно Федеральному закону №89 «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 (ред. от 25.12.2018) отдел не имеет право самостоятельно утилизировать отходы.

В основном отходами отдела являются: бумага, оргтехника, компьютер, кабели, обмотки и т.д. Бумагу необходимо собирать в выделенном для этого месте, предварительно измельченную при помощи такого устройства, как, например, шредер.

Утилизация отходов электронного оборудования, компьютеров и оргтехники является поэтапным процессом. Сложная структура отходов определяет проведение на первом этапе разбора и сортировки составляющих на вторсырье и компоненты, направляемые на обезвреживание.

Как указано в действующем законодательстве, организации должны вести учет драгоценных металлов во всех видах, типах и состояниях, в том числе и драгоценные металлы, входящие в состав покупных комплектующих компонентов, изделий, приборов, инструментов и оборудования. В ином случае на организацию могут быть наложены штрафные санкции.

Отработанная оргтехника является отходом 4 класса опасности. Наибольшую опасность для окружающей среды и здоровья человека представляет тонер, находящийся в картриджах лазерных принтеров.

Тонер — «это соединение полимеров, углерода, оксида железа, неорганических добавок». Состав тонера разнообразен, он может содержать канцерогенные вещества. По уровню вредности здоровью человека он может быть сравним с угольной пылью. Действует на органы дыхания, вызывает раздражение слизистой оболочки глаз, носоглотки, раздражение кожи.

В процессе обращения с отработанной оргтехникой запрещается:

- накапливать отходы вблизи открытых источников огня и нагретых поверхностей;
- выбрасывать их в мусорные контейнеры, закапывать в землю, сжигать.

## 5.3 ЧС

### 5.3.1 Пожарная безопасность при работе с ПЭВМ

В наши дни компьютеры перестали считать редкостью. Их используют на множествах предприятий. И необходимо понимать, что эксплуатация компьютерной техники может вызвать опасность в виде различного вида возгораний, поэтому пожарная безопасность при работе с компьютерной техникой очень важна.

В компьютерах имеется высокая плотность размещения микросхем. В те моменты, когда электрический ток идет по проводникам и компонентам выделяется тепло, что в условиях высокой плотности приводит к перегреву. Надежная работа осуществляется в определенных интервалах температуры, влажности и при заданных электрических параметрах.

Размещение в непосредственной близости друг к другу соединительных проводов и коммуникационных кабелей также может вызвать опасность. Ток, который проходит по ним, выделяет значительное тепло. В проводах может возникнуть процессы их оголения или оплавления изоляции, что в будущем может привести к короткому замыканию. Для избегания этого используют системы кондиционирования и вентиляции воздуха. Данные методы обеспечивают подачу кислорода, помогающего быстро распространять огонь, поэтому эти системы относятся к условиям дополнительной пожарной опасности в помещениях.

Электроустановки запитываются с помощью кабельных линий, которые являются наиболее пожароопасным местом. К источникам возгорания относятся электрические искры и дуги. Из-за своей разветвленности и труднодоступности кабельные линии являются местами появления и развития пожара. Для того чтобы снизить воспламеняемость и возможность распространять пламя, кабели покрывают защитными покрытиями от огня.

Пожарная безопасность при работе с компьютером предусматривает бережность при ремонтных, профилактических и обслуживающих работ,

поскольку во время данных работ использование разных смазочных материалов, легковоспламеняющихся жидкостей, временных электропроводок весьма опасно, как и пайка и чистка отдельных узлов и деталей.

Чтобы избежать дополнительной пожарной опасности требуется соблюдать меры пожарной профилактики. Прокладка всех типов кабелей в металлических наполненных газом трубах хороший вариант для предотвращения воспламенения.

Для машинных залов прокладывание кабельных линий проходит под технологическими съемными полами, для которых материалом становятся негорючие или слабо горючие материалы.

Монтаж пожарных кранов в коридорах, на площадках лестничных клеток и у входов помогает защите помещений от возгораний.

### 5.3.2 Меры пожарной безопасности на рабочих местах

На дверях необходимо обозначить категории пожарной и взрывопожарной опасности, и класс зоны по правилам устройства электроустановок. Определение категории производится расчетом.

Противопожарные системы и установки (средства пожарной автоматики, системы противопожарного водоснабжения, противопожарные двери, прочие защитные устройства в противопожарных стенах, перекрытиях и т.п.) помещений обязаны постоянно находиться в рабочем состоянии. Использование этих систем не по назначению запрещено.

Внешние пожарные лестницы и ограждения на крышах здания должны находиться в исправном состоянии и не меньше двух раз в год проходить испытания на прочность с оформлением актов.

В офисах, на видных местах, необходимы быть повешены таблички с номером вызова пожарной охраны 01.

Каждый день, после окончания работы, помещения нужно тщательно осматривать, рабочие места – убирать, электрооборудование и электросети – отключить (исключение только оборудование, которое должно работать круг-

лосуточно по функциональному назначению и (или) предусмотрено требованиями инструкции по эксплуатации).

В здании необходимо повесить на видных местах поэтажные планы эвакуации людей в случае пожара, а также предусмотреть системы оповещения людей о пожаре. К плану эвакуации людей при пожаре в дополнение должна быть разработана инструкция, определяющая действия персонала для быстрой и безопасной эвакуации людей.

Запрещается:

- курить в не отведенных для этой цели местах. Разрешается курить только в специально предназначенных для этого местах, которые оборудованы урнами для окурков с водой;

- проводить изменения объемно-планировочных решений, после которых ухудшаются условия безопасной эвакуации людей, ограничивается возможность доступа к огнетушителям, пожарным кранам и другим средствам пожарной безопасности или уменьшается зона действия автоматических систем противопожарной защиты;

- применить вентиляционные камеры и прочие технические помещения для организации производственных участков, мастерских, а также хранения продукции, оборудования, мебели и других вещей;

- под напряжением чистить от пыли и загрязнения электрооборудования;

- проверять работоспособность электрооборудования в непредназначенных для эксплуатации помещениях с токопроводящими полами, сырых, не позволяющих заземлить доступные металлические части;

- закрывать запасные эвакуационные выходы, люки. Ключи должны храниться в легкодоступном месте;

- использовать вещества с неисследованными показателями их пожаро и взрывоопасности или не имеющие сертификатов и хранить их вместе с другими материалами и веществами;

- использовать первичные средства пожаротушения и пожарный инвен-

тарь для хозяйственных и других нужд, не связанных с тушением пожара.

### 5.3.3 Инструктаж действий при пожаре

При обнаружении пожара или его признаков и возникновении других чрезвычайных ситуаций, каждый сотрудник, обязан немедленно:

- доложить об этом в городскую пожарную охрану по телефону «01» или «112» и диспетчерскую службу организации с рабочего или мобильного телефона. При этом нужно сообщить точный адрес и название места возникновения пожара, вероятную возможность угрозы людям, а также другие сведения, необходимые диспетчеру пожарной охраны. Помимо того, следует назвать себя и свой номер телефона, с которого производится сообщение о пожаре.

- немедленно сообщить о пожаре или его признаках сотрудникам, находящимся поблизости и принять необходимые меры для эвакуации всех сотрудников из здания. Оповестить о пожаре руководителей и должностных лиц.

- по возможности, используя средства пожаротушения, погасить очаг пожара. К тушению необходимо приступать только в случае, если отсутствуют угрозы для жизни и здоровья и есть возможность в случае необходимости покинуть опасную зону. [3]

Какое из сказанных выше действий является первым, должен определить в каждом конкретном случае сам человек обнаруживший пожар.

Находящийся на месте пожара руководитель или другое должностное лицо, обязано:

- убедиться, что все эвакуационные выходы из здания открыты.

- продублировать сообщение о появлении пожара в пожарную охрану по телефону «01» или «112».

- организовать эвакуацию людей, применяя все имеющиеся силы и средства.

- при надобности совершить отключение электроэнергии, выключить имеющиеся системы общеобменной вентиляции, совершить другие мероприятия, способствующие предотвращению роста пожара и развития задымления

помещений.

- прервать все работы, не связанные с тушением пожара.
- назначить для встречи пожарных лиц, знающих подъездные пути к зданию, нахождение пожарных гидрантов и план помещений.
- до приезда пожарных руководить тушением пожара.
- при необходимости вызвать скорую медицинскую помощь или нужные аварийные службы.
- сообщить о случившемся вышестоящему руководству.

После прибытия на место пожарной охраны необходимо уведомить их об очаге пожара, имеющихся сведений о нахождении людей в опасной зоне и в здании, о предпринятых мерах по устранении пожара и эвакуации. Кроме того, необходимо сообщить о конструктивных и технологических особенностях здания и наличии опасных факторов.

#### **5.4 Комплекс физических упражнений при работе за компьютером**

*Упражнения для улучшения кровообращения в мозговой области.*

- исходное положение на стуле, руки свесить, расслабиться. Медленно наклоните голову назад. Считаем до трех, медленно. Затем занимаем исходное положение. Затем медленно наклоняем голову вперед. Считаем до трех и возвращаемся в исходное положение.

- исходное положение, сидя на стуле, руки на поясе. Делаем все как в первом упражнении, но голову наклоняем сначала к левому плечу, потом к правому.

- можно сидя или стоя. Левую руку заносим за голову и тянемся к правому плечу, поворачиваем голову на лево. Считаем до трех и проделываем все то же самое, но с правой рукой и голову поворачиваем на право.

Каждое упражнение следует проделывать от 3 до 6 раз.

*Упражнения для снятия усталости с кистей рук и плечевого пояса.*

- упражнение можно выполнять как сидя, так и стоя. Левую руку вытягиваем вперед, правую поднимаем вверх. Меняем положения рук, поочередно.

Темп выполнения средний.

- положение стоя. Руки тыльной стороной кисти прижать к поясу. Свести локти вместе голову наклонить вперед. Локти развести в стороны и пытаться свести за спиной, голову соответственно наклонить назад.

- выполнять сидя на стуле. Поднять руки вверх сжимать и разжимать поочередно кисти рук.

Каждое упражнение выполнять от 3 до 6 раз. После выполнения упражнений расслабить руки и встряхнуть несколько раз.

*Упражнения для снятия напряжения с туловища.*

- исходное положение, стоя, руки за голову, ноги чуть шире плеч. Поворачивать таз влево и вправо. Плечевой пояс должен быть неподвижен.

- положение аналогично первому упражнению. Тазом делаем круговые вращения почасовой стрелки и против часовой стрелки, поочередно.

- стойка – ноги врозь. Наклоняемся вперед, правая рука скользит по ногам вниз, а левая вдоль тела поднимается вверх. Далее проделываем то же самое, но меняем положение рук.

Каждое упражнение выполняем от 3 до 6 раз. После выполнения комплекса встряхиваем руки и расслабляемся.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были получены теоретические результаты, позволяющие решать важную научно-техническую задачу – построение систем комбинированного неаффинного управления. Полученные результаты основаны на единой методологической основе – применении критерия гиперустойчивости.

Предложен аналитический способ синтеза, комбинированного закона для класса неаффинных по управлению нелинейных систем с одним входом и одним выходом, основанный на применении критерия гиперустойчивости и условий L-диссипативности, позволяющий с помощью линеаризации нелинейной обратной связью при постоянно действующих возмущениях и наличии неопределенности, обеспечить в рассматриваемых системах желаемое качество функционирования.

Рассмотренный в данной работе подход к синтезу, позволяет разработать алгоритмы управления для одного класса неаффинных по управлению нелинейных систем у которых доступен к измерению только выход объекта управления, функционирование которого происходит в условиях априорной неопределенности. Как показали результаты моделирования, выполненные с применением разработанной системы имитационного моделирования, синтезированная комбинированная система обладает высоким качеством управления, и она превосходит показатели качества функционирования систем того же класса с законом пропорционального и интегрального управления.

Разработанная система имитационного моделирования позволяет осуществлять моделирование систем, редактирование параметров регулятора и времени моделирования, получать результаты в графической форме, а также осуществлять масштабирование графиков. Достоинствами разработанной системы является простота управления и открытость к модификации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александровский, Н. М. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами / Н. М. Александровский, С. В. Егоров, Р. Е. Кузин. – М. : Энергия, 1973. – 272 с.
2. Андриевский, Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. / Б. Р. Андриевский. – СПб. : Наука, 1999. – 121 с.
3. Беляков, Г. И. Пожарная безопасность: учебное пособие для вузов / Г. И. Беляков. – М. : Издательство Юрайт, 2018. – 143 с.
4. Горяченко, В. Д. Методы исследования устойчивости ядерных реакторов / В. Д. Горяченко. – М. : Атомиздат, 1977. – 296 с.
5. Дубовцев, В. А. Безопасность жизнедеятельности. Учебное пособие для дипломников / В. А. Дубовцев. – Киров : КирПИ, 1992. – 128 с.
6. Дудченко, Л. Н. Регулирование частоты и активной мощности в энергосистеме / Л. Н. Дудченко. – Благовещенск: АмГУ, 1997. – 56 с.
7. Дьяков, В. П. Справочник по применению системы PC Matlab. Серия: Работа с ПК / В. П. Дьяков. – М. : Физматлит, 2016. – 112 с.
8. Емельянов, С. В. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности / С. В. Емельянов, С. Л. Коровин. – М. : Наука, 1997. – 352 с.
9. Еремин Е. Л. Робастная система управления аффинным объектом в схеме с двумя эталонными моделями / Е. Л. Еремин, Л. В. Чепак. – Благовещенск : Информатика и системы управления, 2014. – № 3(41). – 121-129 с.
10. Еремин Е. Л. Робастное управление для одного класса неаффинных нелинейных SISO систем / Е. Л. Еремин. – Благовещенск : Информатика и системы управления, – 2015. – №3(45). – 89-100 с.
11. Еремин Е. Л. L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. I / Е. Л. Еремин. – Благовещенск : Информатика и системы управления, – 2006. – № 2(12). – 94-101 с.

12. Еремин Е. Л. L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. II / Е. Л. Еремин. – Благовещенск : Информатика и системы управления, – 2007. – № 1(13). – 130-139 с.

13. Зинченко В. П. Основы эргономики / В. П. Зинченко. – М. : МГУ, 2015. – 179 с.

14. Колмановский В. Б. Устойчивости и периодические режимы регулируемых систем с последействием / В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. – М. : Наука, 1981. – 448 с.

15. Красовский Н. Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения / Н. Н. Красовский. – М. : Физматгиз, 1959. – 220 с.

16. Кузнецов В. П. Линейные непрерывные системы / В. П. Кузнецов. – М. : Наука, 1995. – 131 с.

17. Лурье А. И. К теории устойчивости регулируемых систем / А. И. Лурье, В. Н. Постников. – М. : Прикладная математика и механика, 1994. – № 8. – 246-248 с.

18. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности / М. В. Мееров. – М. : Наука, 2003. – 220 с.

19. Мотузко Ф. Я. Охрана труда / Ф. Я. Мотузко. – М. : Высшая школа, 2012. – 336 с.

20. Неймарк Ю. И. Динамические системы и управляемые процессы / Ю. И. Неймарк. – М. : Наука, 1978. – 336 с.

21. Петров Б. Н. Применение беспойсковых самонастраивающихся систем для управления химико-технологическими процессами / Б. Н. Петров, В. В. Кафаров, В. Ю. Рутковский, В. Л. Перов, И. Б. Ядыкин. – М. : Измерение, контроль, автоматизация, 1979. – №3 (19). – 46-54 с.

22. Плетнев Г. П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций / Г. П. Плетнев. – М. : Энергия, 1995. – 350 с.

23. Полушин И. Г. Частотный критерий L – диссипативности нелинейных систем. / И. Г. Полушин. – СПб. : СПбГЭТУ, 2004. – Вып. 519. – 37-41 с.

24. Попов В. М. Гиперустойчивость автоматических систем / В. М. Попов. – М. : Наука, 1970. – 456 с.
25. Потемкин В. Г. Система MATLAB 5 для студентов / В. Г. Потемкин, П. И. Рудаков. – 2-е изд., исправленное и дополненное – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 448 с.
26. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М. : Наука, 2009. – 712 с.
27. Стернинсон Л. Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах / Л. Д. Стернинсон. – М. : Энергия, 1975. – 216 с.
28. Фомин В. Н. Адаптивное управление динамическими объектами / В. Н. Фомин, А. Л. Фрадков, В. А. Якубович. – М. : Наука, 1981. – 448 с.
29. Фрадков А. Л. Полушин И.Г. Квазидиссипативность и L – диссипативность нелинейных систем / А. Л. Фрадков, И. Г. Полушин. – М. : ДАН, 1998. – №. 3. Т. 362. – 319-322 с.
30. Юркевич В. Д. Синтез нелинейных нестационарных систем управления с разнотемповыми процессами / В. Д. Юркевич. – СПб. : Наука, 2000. – 118 с.
31. Якубович В. А. Абсолютная неустойчивость нелинейных систем управления / В. А. Якубович. – М. : Автоматика и телемеханика, 1970. – № 12.1. – 14 с.
32. Якубович В. А. Методы теории абсолютной устойчивости. Методы исследования нелинейных систем автоматического управления / В. А. Якубович, Р. А. Нелепина. М. : Наука, 1975. – 74-180 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Техническое задание

### **1 Общие сведения**

#### 1.1 Полное наименование системы

Комбинированное управление неаффинным объектом по выходу в схеме с фильтр-корректором.

1.2 Наименование предприятий разработчика и заказчика подсистемы и их реквизиты

Разработчик: студент 553 группы Факультета Математики и Информатики Амурского Государственного Университета Иваненко Павел Игоревич.

Заказчик: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Амурский Государственный Университет».

Сокращенное наименование заказчика: ГОУ ВПО «АмГУ».

Фактический адрес: 675027, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21.

#### 1.3 Перечень документов, на основании которых создается система

Система разрабатывается на основании приказа об аттестации студента, входящей в состав итоговой государственной аттестации выпускника, и соответствует основной образовательной программе высшего, профессионального образования.

#### 1.4 Плановые сроки начала и окончания работы по созданию системы

Срок начала работ: 13.03.2019 г.

Срок окончания работ: 17.06.2019 г.

### **2 Назначение и цели создания системы**

Одной из основных проблем в теории автоматического управления является управление динамическими объектами в условиях априорной неопределенности, т.е. отсутствия полных сведений относительно параметров объекта управления, а также возмущающих и задающих воздействий.

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

### Техническое задание

Развитие вычислительной техники дает все новые возможности для минимизации данной проблемы.

Назначение создания комбинированных неаффинных систем управления состоит в управлении динамическими непрерывными объектами с минимальным уровнем ошибки, функционирующими в условиях априорной неопределенности.

Основной задачей анализа комбинированных систем является определение их устойчивости, показателей качества, протекания переходных, а также точности установившихся процессов. Следовательно, цель создания системы состоит в обеспечении устойчивости функционирования объекта управления, что является необходимым условием надежной работоспособности системы управления.

### **3 Характеристика объекта автоматизации**

В обобщенном виде постановка задачи синтеза комбинированных алгоритмов управления неаффинными системами с явной эталонной моделью для объектов управления с недоступными переменными состояния выглядит следующим образом.

Пусть уравнение объекта управления описывается в виде:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + B(f(x(t), u(t)) + \psi(t)), \quad y(t) = x_1(t),$$

$$f(x(t), u(t)) = f_1(x(t)) + f_2(x(t), u(t)) \cdot u(t) + f_3(x(t), u(t)),$$

$$f_2(x(t), u(t)) \geq \varepsilon_{02} = \text{const} > 0, \quad |f_3(x(t), u(t))| \leq \varepsilon_{03} = \text{const},$$

где  $\psi(t) \in R$  – внешнее возмущение;

$f(x(t), u(t))$  – гладкая нелинейная функция;

$\varepsilon_{02}, \varepsilon_{03}$  – известные константы.

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

### Техническое задание

Функция  $\partial f(x(t), u(t)) / \partial u(t)$  – знакоопределенная и ограниченная  $\forall (x(t), u(t)) \in \Omega_x \times R$ , без потери общности полагаем, что  $\partial f(x(t), u(t)) / \partial u(t) > 0$ . Самому измерению доступен только выход  $y(t)$ . Относительный порядок системы равен  $n$ .

Вне зависимости от начальных условий  $x(0)$ , априорно неизвестных функций  $f_2(x(t), u(t))$ ,  $f_3(x(t), u(t))$  и внешних возмущений  $\psi(x, t)$ , достигается требуемая точность слежения регулируемого выхода  $y(t)$  за эталонным сигналом  $y_M(t)$  соответственно целевому условию, заданному в виде:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_M(t) - y(t)| \leq \sigma, \quad \sigma = \text{const} > 0.$$

Необходимо синтезировать комбинированный алгоритм управления

$$u(t) = u_{II}(x(t), x_M(t), r(t)) + u_{II}(x(t), x_M(t), r(t)),$$

где  $u_{II}$  – пропорциональная часть;

$u_{II}$  – интегральная часть.

Возмущающее воздействие является постоянно действующим и ограниченным по величине:

$$|\varphi(t)| \leq \varepsilon_{01},$$

где  $\varepsilon_{01}$  – известная константа.

Для осуществления синтеза данной комбинированной системы производится последовательное подключение фильтр-корректора на выход системы. Это позволяет получать информацию о переменных состояния объекта управления т.е. получение их оценок.

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

### Техническое задание

#### **4 Требования к системе**

##### 4.1 Требования к системе в целом

Необходимо чтобы система удовлетворяла требованиям:

- выполнение имитационного моделирования неаффинных систем с пропорциональным алгоритмом управления;
- выполнение имитационного моделирования неаффинных систем с интегральным алгоритмом управлением;
- выполнение имитационного моделирования неаффинных систем с комбинированным алгоритмом управлением;
- отображение результатов имитационного моделирования систем;
- возможность изменения параметров регулятора систем;
- иметь понятный и доступный интерфейс пользователя, наглядность и простоту работы;
- обеспечивать необходимую скорость и качество работы.

##### 4.1.1 Требования к эргономике

Программный продукт должен ориентироваться на пользователя, который владеет навыком работы в операционной системе Windows. Интерфейс программы должен быть понятен и разработан с учётом группировки элементов по смысловым признакам. Нужно, чтобы интерфейс требовал от пользователя минимальное количество действий, а вся введённая информация должна контролироваться. Результатом будет являться маловероятность введения недопустимых данных.

Расположение рабочих мест, где будет установлен данный программный продукт, должно соответствовать всем принятым нормам и правилам. Соблюдая эти требования будет минимизировано негативное воздействие на организм пользователя со стороны системы.



## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

### Техническое задание

#### 4.1.2 Требования к эксплуатации

Эксплуатация системы требует от пользователя умение работать в среде Windows. Конечный пользователь должен иметь знания, соответствующие предметной области. Простой и понятный пользовательский интерфейс облегчает выполнение работы.

#### 4.1.3 Требования к защите от влияния внешних воздействий

Аппаратные средства системы должны обладать радиоэлектронной защитой. Недопустимо превышение показателей уровня радиопомех, производимых аппаратными системами во время работы, а также в моменты включения и выключения, утвержденных Государственной комиссией по радиочастотам. Требуется защита систем комплекса от внешних воздействий (скачков электрического напряжения, физических воздействий, излучения и т.д.).

#### 4.1.4 Требования к составу и параметрам технических средств

Для надежной эксплуатации системы необходимо использовать сервер с установленной на нём операционной системой Microsoft Windows 2003 Server. Независимость сервера от возможных перебоев с питанием обеспечивает блок бесперебойного питания и сетевой фильтр.

Для компьютеров установлены следующие минимальные требования:

- процессор Pentium 200 MHz;
- оперативная память: 32 Мбайт;
- устройства ввода информации: клавиатура, мышь;
- монитор: поддерживающий разрешение 800×600;
- операционная система Microsoft Windows 98/ME/2000/XP.

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

### Техническое задание

#### 4.2 Требования к видам обеспечения

##### 4.2.1 Требования к математическому обеспечению

При разработке системы необходимо использовать совокупность математических методов, включающих:

- критерий гиперустойчивости А.В. Попова;
- концепция положительности динамических систем;
- метод синтеза алгоритмов робастных систем управления с явной эталонной моделью.

##### 4.2.2 Требования к программному обеспечению

Требуется разработать программный продукт для имитационного моделирования комбинированных неаффинных систем управления.

В качестве инструментального средства разработки требуется использовать математический пакет MatLab 9.6, при помощи которого будет производиться как имитационное моделирование, так и все необходимые математические расчеты.

Программа имитационного моделирования должна выполнять следующие, стоящие перед ней задачи: изменение параметров регулятора; изменение времени моделирования; отображение результатов моделирования в виде графиков, а также возможность изменения масштабов графиков.