

**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 09.04.04. – Программная инженерия  
Направленность (профиль) образовательной программы Управление разра-  
боткой программного обеспечения

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ А.В. Бушманов

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему: Разработка прикладного программного обеспечения для систем де-  
централизованного комбинированного управления многосвязными струк-  
турно неопределенными объектами

Исполнитель

студент группы 157-ом

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

С.А. Смирнова

Руководитель

доцент, канд. техн. наук.

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

А.В. Бушманов

Руководитель магистерской  
программы

профессор, доктор техн. наук.

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

И.Е. Еремин

Нормоконтроль

доцент, канд. техн. наук.

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Л.В. Никифорова

Рецензент

канд. техн. наук.

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Д.С. Щербань

Благовещенск, 2023

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

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

### ЗАДАНИЕ

К магистерской диссертации студента Смирновой Софьи Александровны

1. Тема магистерской диссертации: Разработка прикладного программного обеспечения для систем децентрализованного комбинированного управления многосвязными структурно неопределенными объектами

(Утверждена приказом от 21.02.2023 № 442-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 20.06.2023

3. Исходные данные к магистерской диссертации: отчет о прохождении преддипломной практики, научные публикации.

4. Содержание магистерской диссертации: описание предметной области исследования, структурный синтез непрерывной и гибридной системы децентрализованного комбинированного управления, параметрический синтез децентрализованных систем на основе генетического алгоритма, имитационное моделирование, разработка прикладного программного обеспечения.

5. Перечень материалов приложения: условия L-диссипативности видоизмененной и исходной систем управления, Simulink-схема системы для имитационного моделирования.

6. Рецензент магистерской диссертации:

7. Дата выдачи задания: 30.01.2023

Руководитель магистерской работы: Е.Л. Еремин профессор, д-р техн. наук.

Задание принял к исполнению: 30.01.2023 \_\_\_\_\_ Смирнова С.А.

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 101 с., 39 рисунков, 2 таблицы, 2 приложения, 41 источник.

МНОГОСВЯЗНЫЙ ОБЪЕКТ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ, ЗАДАЮЩИЙ И ВЫХОДНОЙ ФИЛЬТР-КОРРЕКТОРЫ, НЕЯВНАЯ ЭТАЛОННАЯ МОДЕЛЬ, НЕПРЕРЫВНОЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ КОМБИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ, КРИТЕРИЙ ГИПЕРУСТОЙЧИВОСТИ, УСЛОВИЯ L-ДИССИПАТИВНОСТИ, ДИСКРЕТНОЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ КОМБИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ, МЕТОД НЕПРЕРЫВНЫХ МОДЕЛЕЙ, ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ.

Цель работы – разработка прикладного программного обеспечения для непрерывных и гибридных систем децентрализованного адаптивно-робастного управления многосвязными и многорежимными объектами.

Исследования проводятся на основе: теории гиперустойчивости и условий L-диссипативности, метода непрерывных моделей, теории адаптивно-робастных систем управления, генетического алгоритм оптимизации.

В работе проведен структурный и параметрический синтез систем непрерывного и гибридного децентрализованного комбинированного управления. Для которых, с целью проведения имитационного моделирования, разработано прикладное программного обеспечение в среде Matlab (с использованием пакета Simulink).

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Проблемы управления многосвязными объектами с переключениями	10
1.1 Современные проблемы управления многосвязными объектами с переключениями	10
1.2 Критерий гиперустойчивости в задаче синтеза непрерывной системы управления	16
1.3 Метод непрерывных моделей в задаче синтеза гибридной системы управления	19
1.4 Адаптивно-робастное структура регулятора в задаче управления априорно неопределенным многорежимным объектом	21
2 Структурный синтез децентрализованной комбинированной системы управления	23
2.1 Математическое описание системы управления	23
2.2 Постановка задачи синтеза непрерывной системы управления	31
2.3 Синтез непрерывного децентрализованного комбинированного регулятора	32
2.4 Пример имитационного моделирования непрерывной системы управления	37
2.5 Постановка задачи синтеза гибридной системы управления	41
2.6 Проектирование гибридной децентрализованной системы комбинированного управления	42
2.7 Пример имитационного моделирования гибридной системы управления	44
3 Параметрический синтез децентрализованной системы управления	47
3.1 Описание принципа работы генетического алгоритма оптимизации	47
3.2 Генетический алгоритм в задаче параметрического синтеза децентрализованных комбинированных систем управления	51
3.3 Пример имитационного моделирования	55

4 Matlab-приложение для имитационного моделирования	60
4.1 Анализ среды разработки Matlab-Simulink	60
4.2 Описание программного продукта	62
4.3 Этапы практической разработки Matlab-приложения	65
4.4 Разработка Simulink-модели системы управления	73
4.5 Тестирование программного продукта	79
Заключение	87
Библиографические ссылки	88
Библиографический список	92
Приложение А Условия L-диссипативности видоизмененной и исходной систем управления	97
Приложение Б Simulink-модели систем управления	100

## НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей магистерской диссертации использованы ссылки на следующие стандарты и нормативные документы:

ГОСТ 19.001 – 77 Единая система программной документации. Общие положения

ГОСТ 2.104 – 06 Единая система конструкторской документации. Основные надписи

ГОСТ 2.105 – 19 ЕСКД Общие требования к текстовым документам

ГОСТ 2.111 – 13 ЕСКД Нормоконтроль

ГОСТ 2.701 – 08 ЕСКД Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению

ГОСТ 3.1105 – 11 ЕСКД Формы и правила оформления документов общего назначения

ГОСТ 7.05 – 08 Система стандартов по библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления

ГОСТ 8.417 – 02 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- ОУ – объект управления;
- МОУ – многосвязный объект управления;
- ВОУ – видоизмененный объект управления;
- ПОУ – подсистема объекта управления;
- ФК – фильтр-корректор;
- ВФК – выходной фильтр-корректор;
- ЗФК – задающий фильтр-корректор;
- БСВ – блок структурного возмущения;
- НЭМ – неявная эталонная модель;
- ЛСЧ – линейная стационарная часть;
- ННЧ – нелинейная нестационарная часть;
- ГА – генетический алгоритм.

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность исследования.* На современном этапе развития техники наблюдается большое разнообразие сложных управляемых объектов в проектируемых системах управления. Такими являются, к примеру, необитаемые подводные аппараты, позволяющие исследовать и осваивать Мировой океан без непосредственного присутствия человека в опасной подводной зоне; авиационные газотурбинные двигатели, служащие в качестве агрегата силовой установки для самолетов, вертолетов, крылатых ракет; манипуляционные роботы, выполняющие функции человеческой руки, улучшают условия труда работников в таких сферах, как автомобильная промышленность, электротехника и электроника, строительство, медицина и фармацевтика.

Приведенные выше в качестве примеров современные объекты управления за счет присущих им характеристик: многосвязности, многорежимности, параметрической нестационарности, априорной неопределенности, действия внешних воздействий, требуют построения таких систем, которые способны обеспечить не только их работоспособность, но и высокую эффективность работы, при относительно простой структуре управляющих алгоритмов.

В силу указанных обстоятельств, задача проектирования эффективной системы управления многосвязным и многорежимным объектом, функционирующим в условиях априорной неопределенности, актуальна и востребована.

*Цель исследования.* Синтез непрерывных и построение гибридных децентрализованных комбинированных систем управления для многосвязного объекта с переключениями.

*Задачи исследования:*

- синтез непрерывного алгоритма комбинированного управления;
- построение гибридной системы комбинированного управления;
- параметрический синтез гибридной и непрерывной системы децентрализованного управления;

– разработка прикладного программного обеспечения для проведения имитационного моделирования систем децентрализованного комбинированного управления.

*Методы исследования.* Общие методы теории устойчивости, теория адаптивных и робастных систем управления, теория гиперустойчивости и условия L-диссипативности, метод непрерывных моделей, ГА оптимизации.

*Научная новизна работы.* Синтезирован децентрализованный комбинированный алгоритм управления сложными многосвязными объектами с переключениями на основе критерия гиперустойчивости В.М. Попова.

*Практическая ценность полученных результатов.* Разработанный децентрализованный комбинированный регулятор за счет своей универсальности, высоких показателей качества, а также несложной структуры, может применяться при проектировании автоматических систем многосвязных и много-режимных объектов в условиях априорной неопределенности. Значимость исследования также подтверждается участием в научных конференциях и научными публикациями.

*Апробация результатов работы.* Результаты исследований докладывались и обсуждались на XXX и XXXI научной конференции АмГУ «День науки», г. Благовещенск, 2021 – 2022; XXIII региональной научно-практической конференции «Молодёжь XXI века: шаг в будущее», г. Благовещенск, 2022; на IV, V, VI Международном научно-техническом форуме «Современные технологии в науке и образовании» на конференции «Современные технологии в науке и образовании. Вычислительная техника и автоматизированные системы», г. Рязань, 2021 – 2023.

*Публикации и личный вклад автора.* Результаты исследования отражены в 8 научных публикаций, три из которых опубликованы в издании ВАК.

## 1 ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ

В данной главе описывается предметная область проводимого исследования.

В первом разделе описываются современные проблемы при управлении многосвязными и многорежимными объектами, функционирующими в условиях параметрической и структурной неопределенности.

Во втором разделе описывается методика структурного синтеза непрерывной системы управления в рамках критерия гиперустойчивости.

В третьем разделе описывается метод непрерывных моделей для проектирования гибридной системы управления.

В четвертом, заключительном разделе данной главы, описывается комбинированный подход управления для рассматриваемого объекта.

### **1.1 Современные проблемы управления многосвязными объектами с переключениями**

Современный этап развития техники характеризуется постоянным повышением разнообразия и сложности управляемых объектов в проектируемых системах управления. Среди всего многообразия, особое место занимает класс многосвязных объектов управления (МОУ), рассматривающийся в ряде научных исследований [1 – 4]. Для данного класса объектов характерно наличие множества входных управляющих сигналов, которые воздействуют на несколько выходных регулируемых величин. Примером такого объекта, может стать прямоточный пылеугольный котел, представленный в работе [5], входными величинами которого выступают расход топлива и питательной воды, оказывающие влияние на такие выходные величины, как мощность и температура среды в поперечном сечении котла.

При анализе и синтезе МОУ целесообразно представить его в виде совокупности слабосвязанных подсистем, взаимодействующих друг с другом через естественные перекрестные связи для достижения общей цели, или же и

вовсе независимых частей. В таком случае для каждой локальной подсистемы многосвязного объекта можно рассмотреть отдельный локальный контур управления, задающее воздействие, а также возмущение, тем самым применяя децентрализованный подход построения систем. Среди преимуществ данного подхода можно выделить следующие:

- локальные цели представляются более простыми, нежели глобальная цель управления, что приводит к формированию относительно несложных алгоритмов управления и более простым средствам их достижения;
- поскольку локальные системы являются относительно самостоятельными – слабосвязными или вообще независимыми, возрастает их устойчивость к локальным и кратковременным отказам, а также сбоям в целом;
- для достижения локальных целей в управлении не требуется знание полной информации о моделях, состоянии всего ОУ.

Помимо многосвязности, большинству современных систем управления технологическими процессами присущи такие характеристики, как априорная неопределенность, переключаемость, параметрическая нестационарность.

Характеристики подсистем многосвязного объекта могут быть изначально неизвестны или становиться неизвестными в процессе его функционирования из-за разных режимов работы системы, износа оборудования, загрязнения, нестабильности характеристик используемого сырья, а также неполных или вовсе отсутствующих сведений о внешних воздействиях среды и задающем возмущении. Все это приводит к тому, что определить параметры (параметрическая неопределенность), а иногда и структуру (структурная неопределенность) такого объекта становится невозможным.

Так, к примеру, на необитаемые подводные аппараты действуют изменяющиеся и трудно идентифицируемые гидродинамические и гидростатические силы и моменты, зависящие от режимов его движения, поэтому, зачастую, на этапе формирования его математической модели удастся получить сведения лишь о граничных значениях ее коэффициентов [6]. Построение системы управления с помощью традиционных методов классической теории

управления в таком случае становится неэффективным или же и вовсе неосуществимым.

Следующей характеристикой, часто встречающейся и вызывающей значительные проблемы в управлении технологическими процессами, выступает – переключаемость [7 – 9] (в работе также можно встретить название «много-режимность»). Ее можно наблюдать, к примеру, в такой области, как автомобилестроение – уравнение модели трансмиссии автомобиля может изменяться в случае задания определенных значений его скоростей. Также, переключаемость можно наблюдать в системе кондиционирования воздуха, которая меняет свою динамику при определенной температуре среды, т.е. может переходить от охлаждения к нагреву или же, наоборот – от нагрева к охлаждению. Как видно из приведенных примеров для объектов с переключениями характерно изменять свой режим функционирования в произвольный или заданный момент времени. Переключения могут происходить под влиянием изменений во внешней окружающей среде или подсистеме, отказов и ремонтах. Каждая рассматриваемая подсистема МОУ может осуществлять множество таких переключений во время своей работы. Поэтому для дальнейшей работы с такой подсистемой будет правильно представить ее математическую модель, как систему обыкновенных дифференциальных уравнений с ограниченным количеством интервалов времени (ограниченным количеством переключений). По окончании одного из таких временных интервалов могут измениться как параметры подсистемы, так и ее структура, что значительно усложняет процесс проектирования систем управления.

Такая характеристика, как параметрическая нестационарность присуща любому реальному техническому объекту. Объект считается нестационарным, если его параметры изменяются во времени. Такие изменения обычно вызваны действием внешних возмущений или износом оборудования. К примеру, при движении в водной среде изменяются массово-инерционные характеристики необитаемых подводных аппаратов из-за моментов инерции жидкости и влияния присоединенных масс.

В связи с вышеописанным, многосвязный нестационарный объект управления с переключениями, действующий в условиях структурно-параметрической неопределенности не имеет точно описанной математической модели. В силу априорной неопределенности некоторые параметры объекта и даже его структура могут быть неизвестны, а остальные – известные параметры могут подвергаться резким или плавным изменениям в произвольные моменты времени в процессе функционирования из-за наличия переключений и параметрической нестационарности. По этой причине для анализа и синтеза систем управления наиболее эффективными выступают адаптивный и робастный подходы управления, не требующие полной и исчерпывающей информации об объекте регулирования, условиях и режимах его функционирования.

Значительный вклад в развитие адаптивных систем управления внести отечественные и зарубежные ученые: Красовский Н.Н., Пугачев В.С., Растринин Л.А., Беллман Р., Калман Р. и многие другие. Адаптивное управление представляет собой совокупность методов теории управления, которые позволяют синтезировать системы управления, имеющие возможность изменять свои параметры или структуру в зависимости от изменения состояния объекта [7, 10].

Интенсивное развитие в последние годы получил второй подход управления – робастный [8, 11 – 13]. Целью робастного («грубого») управления является синтез такой универсальной модели регулятора, которая бы обеспечивала требуемое управление при любых возможных сочетаниях параметров модели объекта. Параметры и структура робастной системы в процессе эксплуатации остаются постоянными, что положительно сказывается на процессе их синтеза и наладки (она становится проще и дешевле).

В настоящее время особое внимание уделяется системам, совместно использующим разные подходы управления. Они получили название комбинированных систем управления [14, 15].

В теории автоматического управления уделяется особое внимание подходу адаптивного, робастного и комбинированного управления по выходу, при котором допускается, что переменные состояния МОУ по каким-либо

причинам не могут быть измерены. Интерес к управлению по выходу обусловлен тем, что при нем можно уменьшить затраты на проектирование различных датчиков и дальнейшую их разработку, которые, во-первых, увеличивают размерность рассматриваемой математической модели системы управления, а, во-вторых, приводят к ошибкам в измерении, связанным с погрешностями в их работе.

Важную роль при построении описанных выше систем управления играет использование в них эталонной модели. Использование эталонной модели в системе управления позволяет определить желаемое поведение исследуемого контура управления при заданной входной информации.

Выделяют несколько видов реализации эталонных моделей. Первый вид – явная эталонная модель, представляется в системе управление как реальное динамическое звено, описывающее желаемое поведение объекта управления. Следующий вид явно-неявной эталонной модели также представляется в виде реального звена, но описывающая его передаточная функция имеет порядок меньший или равный порядку объекта управления. Третьим видом выступает НЭМ, она не имеет своей реализации в виде какого-либо физического блока, но, описываясь как эталонное уравнение связи между регулируемыми переменными МОУ и их производными, определяет требуемую динамику регулируемой системы управления в квазиустановившемся режиме. Последний вид эталонной модели за счет отсутствия явной реализации значительно упрощает структуру системы управления.

Решение задач синтеза систем управления с использованием эталонных моделей может осуществляться на основе: метода Ляпунова, градиентных методов или критерия гиперустойчивости. Среди перечисленных методов стоит выделить критерий гиперустойчивости, который является одним из эффективных методов синтеза сложных систем управления. Критерий гиперустойчивости, разработанный Поповым в 70-х годах прошлого столетия, формулирует

необходимые и достаточные условия устойчивости нелинейных систем управления, а также дает возможность синтезировать разнообразные законы регулирования [16].

В связи с тем, что на рассматриваемые динамические объекты оказывают воздействия внешние возмущения, присутствует нестационарность параметров, структурно-параметрическая неопределенность и переключаемость, относительный порядок их передаточных функций может стать больше единицы. Поэтому, чтобы построить непрерывную систему управления в рамках критерия гиперустойчивости, необходимо модифицировать основной контур управления с помощью, например, наблюдателей, фильтр-корректоров, компенсаторов [2, 17, 18] и т.д.

Однако синтезированные с помощью критерия гиперустойчивости непрерывные алгоритмы управления не могут быть реализованы на основе средств современной цифровой электроники. Так, к примеру, цифровые микроконтроллеры выполняют квантование по уровню и времени поступающих на них сигналов, что может привести к ухудшению работы системы или даже потере устойчивости.

Одним из методов, позволяющих реализовать дискретную структуру регулятора выступает метод непрерывных моделей [19], основанный на методике усреднения, предложенной М. Н. Боголюбовым и Ю.А. Митропольским. Его особенность заключается в том, что он тесно связан с теорией непрерывных систем. С его помощью можно преобразовать синтезированную ранее устойчивую непрерывную систему управления в гибридную, вводя достаточно маленький шаг дискретизации. Гибридная система управления включает в себя непрерывный объект управления и дискретное управляющее устройство.

После завершения обзора основных проблем управления многосвязными нестационарными объектами с переключениями можно приступить к

описанию эффективного, хорошо зарекомендовавшего себя метода синтеза алгоритмов управления для данного класса объектов – критерия гиперустойчивости.

## **1.2 Критерий гиперустойчивости в задаче синтеза непрерывной системы управления**

Для многосвязного и многорежимного объекта можно провести структурный синтез алгоритмов управления на основе критерия гиперустойчивости.

В. М. Попов в начале 60-х годов ввел понятие «гиперустойчивость» в теорию систем управления. Объединив понятие «гиперустойчивости» с понятием «положительность систем», он сформулировал критерий гиперустойчивости. В дальнейшем развитием данной концепции занимались такие ученые, как: Landau I. D. – румынский ученый, который исследовал адаптивные системы с эталонной моделью с помощью критерия гиперустойчивости [30]; Якубович В. А. – советский ученый показал, что критерий гиперустойчивости формирует достаточные и необходимые условия устойчивости нелинейной системы в целом [20]; Вукобратович М. – сербский ученый и Еремин Е. Л. – российский ученый в своих исследованиях развивают концепцию гиперустойчивости и положительности при синтезе алгоритмов управления [21, 22].

Критерий гиперустойчивости позволяет определить условия устойчивости системы и синтезировать структуру регулятора (адаптивного, робастного, комбинированного). Применение данного критерия основано на выполнении нескольких этапов синтеза.

*Первый этап.* На начальном этапе необходимо представить математическую модель системы управления в виде отклонения состояний НЭМ и ОУ следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{de(t)}{dt} &= Ae(t) + B\mu(t), \quad v(t) = C^T e(t); \\ q(t) &= F(v(t), t), \quad -q(t) = \mu(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где  $e(t)$  – вектор рассогласования переменных состояния эталона и ОУ;

$A$  – стационарная матрица;

$B, C$  – постоянные вектора;

$\mu(t), v(t)$  – скалярное управление и выход;

$F(v(t), t)$  – нелинейный функционал, и выделить в ней нелинейную нестационарную часть (ННЧ) и линейную стационарную часть (ЛСЧ). В соответствии с системой (1) ЛСЧ описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{de(t)}{dt} &= Ae(t) + B\mu(t), \\ v(t) &= C^T e(t), \end{aligned} \quad (2)$$

а ННЧ описывается уравнениями:

$$q(t) = F(v(t), t), \quad -q(t) = \mu(t). \quad (3)$$

Структурную схему получившейся на данном этапе системы можно представить на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема системы управления при исследовании на гиперустойчивость

*Второй этап.* После выделения в системе управления ННЧ и ЛСЧ, необходимо обеспечить выполнение двух условий положительности. Порядок выполнения этих условий может быть разным, так как они представляют собой взаимно независимые задачи.

На данном этапе выполним первое условие – положительность ЛСЧ (2):

$$\operatorname{Re}(W_{\text{ЛСЧ}}(j\omega)) > 0, \forall \omega \geq 0, \quad (4)$$

где  $W_{\text{ЛСЧ}}(j\omega)$  – частотный аналог передаточной функции ЛСЧ, который в пространстве состояний принимает следующий вид:

$$W_{\text{ЛСЧ}}(s) = C^T (Es - A)^{-1} B, \quad (5)$$

где  $E$  – единичная матрица соответствующего размера, имеет относительный порядок больший или равный единице.

*Третий этап.* На третьем этапе решается задача положительности интегрального неравенства Попова (ИНП), которого можно представить в виде неравенства:

$$h(0, t) = -\int_0^t v(v)\mu(v)dv > -(h_0)^2 = \text{const}, \forall t > 0 \quad (6)$$

где  $h_0$  – набор положительных констант;

$\mu(t), v(t)$  – регулируемое управление и выход, и именно здесь формируется явный вид алгоритма управления.

Полученный на данном этапе алгоритм будет обеспечивать желаемое качество работы ОУ.

*Четвертый этап.* В силу выполнения неравенств (4) и (6), можно утверждать, что система гиперустойчива. Однако, стоит учесть один момент: если синтез рассматриваемой системы проводился в предположении того, что внешние возмущения отсутствуют, для обеспечения устойчивости исходной системы, необходимо, чтобы они были затухающими или ограниченными по величине.

Если рассматривать нестрого минимально фазовые объекты управления, относительная степень передаточных функций которых больше единицы,

можно столкнуться с данной проблемой. Для систем с относительным порядком, превышающим единицу, в данной работе предлагается использовать малоинерционные звенья (подробно данный аспект будет описан во второй главе данной работы). Чтобы данные системы были диссипативными необходимо правильно подобрать значения постоянных времени ее дополнительных звеньев – фильтр-корректоров [2, 23].

Выполнив основные этапы критерия гиперустойчивости, можно завершить этап аналитического конструирования непрерывного регулятора и приступить к реализации его дискретного вида.

### **1.3 Метод непрерывных моделей в задаче синтеза гибридной системы управления**

В настоящее время наблюдается развитие именно цифровых алгоритмов управления. Это обусловлено рядом преимуществ цифровой электроники: высокая надежность и отказоустойчивость; возможность реализации сложных алгоритмов управления (логических, адаптивных, комбинированных и т.д.); гибкость и простота перестройки управления; использование стандартной аппаратуры; более дешевые и малогабаритные регуляторы.

Различают два вида систем управления с цифровым регулятором. Первый вид – дискретная система управления, в которой все блоки являются дискретными и описываются с помощью разностных уравнений. Второй вид – гибридная система управления, в ней ОУ функционирует во времени непрерывно, зато измерение его выходных сигналов, а также подача управляющих воздействий – дискретно. Следовательно, и математическая модель гибридной системы отличается от дискретной, ведь имеет уже вид дифференциально-разностных уравнений. С учетом того, что почти все объекты управления такие, как подводные лодки, электродвигатели, самолеты являются непрерывными, гибридные системы на практике более распространены, чем дискретные.

Построение гибридной системы управления, можно на основе метода непрерывных моделей, или его еще называют метод усреднения. Как отмечалось ранее, особенностью данного метода является его близость к хорошо разработанным методам анализа и синтеза непрерывных систем управления.

Метод непрерывных основан на методике усреднения, которая была предложена советскими учеными – М.Н. Боголюбовым и Ю.А. Митропольским. На его основе построение гибридной системы управления происходит в несколько этапов:

*1 этап.* Необходимо рассмотреть математическое описание непрерывной модели управления.

*2 этап.* Определить явный вид алгоритмов управления обеспечивающих устойчивость непрерывной системы. В нашем случае алгоритм управления целесообразно синтезировать на основе критерия гиперустойчивости.

*3 этап.* Осуществить переход от ранее синтезированной непрерывной системы управления к непрерывно-дискретной путем дискретизации контура управления.

*4 этап.* Выбрать шаг дискретизации для гибридной системы управления на этапе имитационного моделирования.

При выборе шага необходимо учесть два противоречивых факта.

Первый – слишком маленький шаг дискретизации ограничивает допустимую сложность алгоритмов. К тому же малый шаг дискретизации при решении некоторых задач (к примеру, задач оптимизации) может потребовать значительных вычислительных ресурсов и времени выполнения.

Второй факт – увеличение шага дискретизации приводит к ухудшению качества работы системы.

На основании этого разработчику систем управления необходимо выбрать максимально возможное значение шага дискретизации, при котором отклонение характеристик функционирования гибридной и непрерывной системы будет незначительным.

В результате выполнения всех описанных выше этапов можно получить устойчивую гибридную систему управления априорно неопределенным МОУ с переключениями.

#### **1.4 Адаптивно-робастное структура регулятора в задаче управления априорно неопределенным многорежимным объектом**

Широкое применение многосвязных и многорежимных нестационарных объектов управления в области робототехники, энергетики, автомобилестроения и т.д. приводит к необходимости разработки для них наиболее эффективных алгоритмов управления с относительно несложной структурой. Среди наиболее известных в настоящее время подходов управления для сложных объектов стоит выделить системы адаптивного и робастного регулирования.

Исследования в области разработки адаптивного подхода управления начались в 50-х годах прошлого века. Первые попытки применения данного подхода для построения автопилотов новых самолетов закончились неудачей, из-за значительного и быстрого изменения их характеристик в процессе полета. Однако большие успехи в данном направлении все же были достигнуты в конце прошлого века за счет большого вклада советских (Красовский Н.Н., Пугачев В.С., Летов А.М. и многие другие) и зарубежных ученых (Беллман Р., Атанс М., Бьюси Р., Калман Р. и т.д.).

Адаптивные алгоритмы управления способны автоматически определять необходимый закон управления посредством анализа текущего состояния объекта, именно поэтому их еще иногда называют «самонастраивающимися», «самоприспосабливающимися». Таким образом данные системы восполняют нехватку априорной информации об исследуемом ОУ в ходе его функционирования. Несмотря на сложность своей технической реализации за счет присутствия интегральной настройки, в настоящее время методы адаптивного регулирования нашли широкое практическое применение в управлении такими сложными объектами, как самолеты, ракеты, энергетические установки, роботы.

В последние годы широкое распространение также получили и робастные алгоритмы регулирования. Развитие данной области связано с трудами таких ученых, как Бобцов А.А., Никифоров В.О., Шашихин В.Н., Цыкунов А.М., Еремин Е.Л., Фуртат И.Б., Фрадков А.Л. и многими другими.

Робастные (их еще называют «грубые») алгоритмы используют в своем контуре управления статический регулятор. Они не требуют значительных временных затрат на настройку параметров и за счет своей «грубости» способны сохранять свою работоспособность в условиях нестационарности. Робастные алгоритмы обеспечивают приемлемое качество работы системы при наличии параметрических, структурных неопределенностей у ОУ.

В данной работе предлагается использовать комбинированный подход, представляющий собой комбинацию одновременно используемых адаптивной и робастной частей.

Как уже отмечалось ранее, для многосвязного объекта наиболее подходящим является децентрализованный принцип управления. Поэтому основной целью магистерской работы является синтез адаптивно-робастного регулятора для каждой подсистемы многосвязного объекта с переключениями на основе критерия гиперустойчивости и условий L-диссипативности.

#### *Выводы по главе.*

В первом разделе данной главы были описаны современные проблемы управления многосвязными и многорежимными нестационарными объектами управления, функционирующими в условиях параметрически-структурной неопределенности.

Во втором разделе описана методика синтеза системы управления на основе критерия гиперустойчивости Попова В. М.

В третьем разделе описан метод непрерывных моделей, позволяющий разработать гибридную систему управления.

В заключительном разделе изложены адаптивные и робастные методы построения систем регулирования, а также предложен комбинированный метод управления для рассматриваемого класса объектов.

## 2 СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В первой части данной главы синтезируется непрерывная система децентрализованного адаптивно-робастного управления многосвязным нестационарным объектом с переключениями. Синтез проходит в рамках критерия гиперустойчивости и условий L-диссипативности. Для синтезированной непрерывной системы проводится вычислительный эксперимент. Во второй части главы синтезированная непрерывная система управления преобразуется в гибридную с помощью метода непрерывных моделей. Приводятся результаты вычислительного эксперимента гибридной системы управления.

### 2.1 Математическое описание системы управления

Рассмотрим математическое описание децентрализованной комбинированной системы управления многосвязным и многорежимным нестационарным объектом, действующим в условиях структурно параметрической неопределенности.

Пусть математическая модель МОУ представляет собой  $l$  – взаимосвязанных подсистем, в каждой из которых на промежутках времени  $0 = t_0 < t_{1_i} < \dots < t_{K_i}$  ( $i = \overline{1, l}$ ) происходят переключения. Такую модель можно описать составными системами уравнений в пространстве состояний вида [4, 24]:

$$\begin{aligned} \frac{dx_i^{(k)}(t)}{dt} &= A_i^{(k)} x_i^{(k)}(t) + \\ &+ B_i^{(k)} \left( 1 + \beta_i^{(k)}(t) \right) \left( \left( C_{0i}^{(k)} \right)^T x_i^{(k)}(t) + u_i^{(k)}(t) + f_i^{(k)}(t) + Y_i^{(k)}(t) \right), \quad (7) \\ y_i^{(k)}(t) &= \left( C_{0i}^{(k)} \right)^T x_i^{(k)}(t), \quad x_{0i} = x_i^{(k)}(0), \\ Y_i^{(k)}(t) &= \sum_{j=1}^l \varphi_{ji} \left( y_j^{(k)}(t) \right), \end{aligned}$$

где  $k_i = \overline{1, K_i}$  – ограниченное количество временных интервалов

$T_{k_i} = (t_{k_i} - t_{k_i-1})$  для  $i$ -й ПОУ;

$$A_i^{(k)} = \begin{pmatrix} a_{1i}^{(k)} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_{2i}^{(k)} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{ni}^{(k)} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} - \text{матрицы размерностью } n_i \times n_i;$$

$$B_i^{(k)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & b_{0i}^{(k)} & \dots & b_{(m_i)i}^{(k)} \end{bmatrix}^T - \text{стационарные вектора } n_i \times 1;$$

$\beta_i^{(k)}(t)$  – скалярные временные функции;

$$C_{0i}^{(k)} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T - \text{векторы выхода } n_i \times 1;$$

$f_i^{(k)}(t)$  – сигнал внешних возмущений;

$\varphi_{ji}(y_j^{(k)}(t)) \in R$  – сигнал перекрестной связи, оказывающий воздействие на  $i$  –

ю ПОУ со стороны  $j$  – й;

$$x_i^{(k)}(t) = \begin{bmatrix} x_{1i}^{(k)}(t) & x_{2i}^{(k)}(t) & \dots & x_{(n_i)i}^{(k)}(t) \end{bmatrix}^T - \text{вектор переменных состояния ПОУ};$$

$u_i^{(k)}(t)$  и  $y_i^{(k)}(t)$  – скалярное управляющее воздействие и выход каждой ПОУ.

Для многосвязного объекта (7) можно дополнительно выделить входной сигнал следующего вида:

$$\mathcal{G}_i^{(k)}(t) = \left(1 + \beta_i^{(k)}(t)\right) \left( u_i^{(k)}(t) + f_i^{(k)}(t) + Y_i^{(k)}(t) + \left(C_{0i}^{(k)}\right)^T \tilde{x}_i^{(k)}(t) \right), \quad (8)$$

тогда его передаточные функции опишутся линейными уравнениями:

$$y_i^{(k)}(s) = W_{ПΟΥi}(s) \mathcal{G}_i^{(k)}(s) = \frac{b_i^{(k)}(s)}{a_i^{(k)}(s)} \mathcal{G}_i^{(k)}(s), \quad (9)$$

где  $s$  – комплексная переменная;

$W_{ПΟΥi}(s)$  – передаточные функции ПОУ;

$b_i^{(k)}(s) = b_{0i}^{(k)} s^{m_i^{(k)}} + b_{1i}^{(k)} s^{m_i^{(k)}-1} + \dots + b_{m_i^{(k)}}^{(k)}$  – гурвицевы полиномы, имеющие порядок  $m_i^{(k)}$ ;

$a_i^{(k)}(s) = s^{n_i} + a_{1i}^{(k)} s^{n_i-1} + \dots + a_{n_i}^{(k)}$  – полиномы с произвольным расположением корней порядка  $n_i$ .

Предполагается, что рассматриваемый МОУ с переключениями (7) функционирует при условии выполнения ряда допущений.

**Допущение 1.** Неизвестные скалярные функции  $\beta_i^{(k)}(t)$ ,  $\varphi_{ji}(y_i^{(k)}(t))$  и  $f_i^{(k)}(t)$  ограничены.

Нестационарные параметры многосвязного объекта удовлетворяют следующим условиям:

$$0 < \underline{\beta}_i^{(k)} \leq \beta_i^{(k)}(t) \leq \bar{\beta}_i^{(k)}, \quad (10)$$

где  $\underline{\beta}_i^{(k)}$ ,  $\bar{\beta}_i^{(k)}$  – известные значения нижней и верхней границы функции  $\beta_i^{(k)}(t)$ .

Выходные значения нелинейных перекрестных связей удовлетворяют неравенству вида:

$$\begin{aligned} \varphi_{ji}(y_i^{(k)}(t)) &\leq \varphi_{ji}^+ = \text{const} > 0, \\ \forall y_i^{(k)}(t) \neq 0, \varphi_{ji}(0) &= 0, j = 1, 2, \dots, l; \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\varphi_{ji}^+$  – известные числовые значения.

Сигнал внешнего возмущения удовлетворяет следующему условию:

$$\left| f_i^{(k)}(t) \right| \leq f_i^+ = \text{const}, \forall t \geq 0, \quad (12)$$

где  $f_i^+$  – известные числа.

**Допущение 2.** Числитель передаточной функции ПОУ (9) имеет значения степени равное  $m_i^{(k)}$ , которое на различных рассматриваемых временных интервалах  $T_{k_i}$  может принимать значения из следующего диапазона  $0 \leq m_{0i} \leq m_i^{(k)} \leq n_i - 1$  с известными величинами  $m_{0i}$  и  $n_i$ .

На основании этого значения относительных степеней  $W_{ПОУ_i}(p)$  станут удовлетворять неравенству  $\rho_i^{(k)} = (\deg a_i^{(k)}(s) - \deg b_i^{(k)}(s)) = (n_i - m_i^{(k)}) \geq 1$ , причем  $\rho_i^+ = (n_i - m_{0i})$  – максимум относительной степени  $i$ -й локальной подсистемы МОУ.

**Допущение 3.** Непосредственному измерению доступны только локальные выходные сигналы многосвязного объекта  $y_i^{(k)}(t)$ .

Как следует из **Допущения 2**, значения относительных степеней  $\rho_i^{(k)} \in [1; \rho_i^+]$ . Поэтому в основной контур системы с целью придания ей желаемых свойств требуется добавить на выходе каждой ПОУ дополнительные блоки – ВФК [2, 14, 23] следующего вида:

$$y_{\phi i}^{(k)}(s) = W_{ВФК i}(s) y_i^{(k)}(s) = \frac{\mathcal{G}_i(s)}{\mathcal{G}_{*i}(s)} y_i^{(k)}(s) = \left( \frac{T_i s + 1}{T_{*i} s + 1} \right)^{\rho_i^+ - 1} y_i^{(k)}(s), \quad (13)$$

где  $y_{\phi i}^{(k)}(s)$  и  $y_i^{(k)}(s)$  – сигналы выхода и входа фильтр-корректора;

$W_{ВФК i}(s)$  – передаточные функции ВФК;

$\mathcal{G}_i(s)$ ,  $\mathcal{G}_{*i}(s)$  – гурвицевы полиномы;

$T_{*i}$  и  $T_i$  – значения постоянных времени, причем  $T_{*i}$  имеет малую величину [25];

$s$  – комплексная переменная.

Структурная схема исследуемой системы (в работе встречается, как «исходная» система) в таком случае примет вид, представленный на рисунке 2, где КР – контур регулирования для ПОУ.

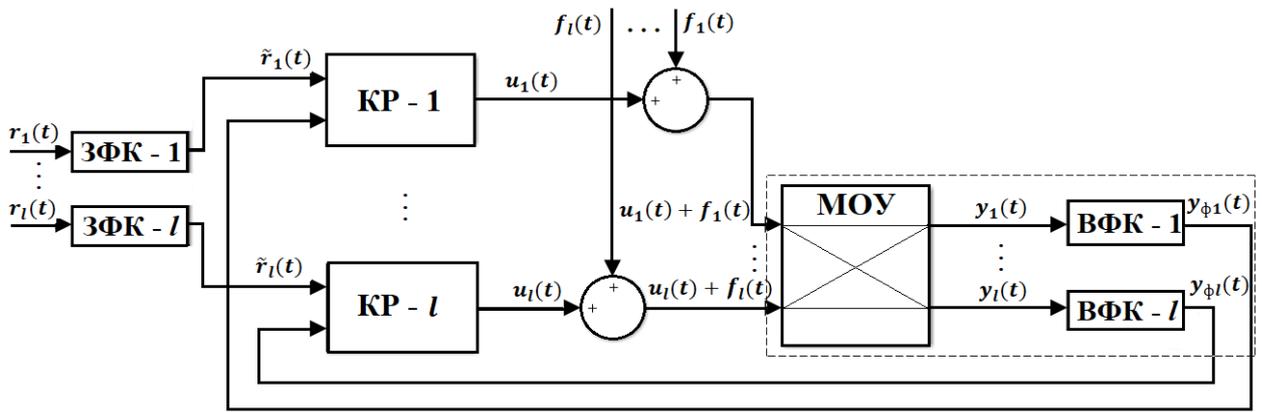


Рисунок 2 – Структурная схема исходной системы управления

В результате такого присоединения происходит расширение пространства переменных состояний подсистем объекта, что приводит к формированию новых математических моделей – видоизмененной ПОУ и БСВ:

$$\begin{aligned}
 y_{\phi i}^{(k)}(s) &= \frac{b_i^{(k)}(s)}{a_i^{(k)}(s)} \cdot \left( \frac{T_i s + 1}{T_{*i} s + 1} \right)^{n_i - m_{0i} - 1} \cdot \mathcal{G}_i^{(k)}(s) = \\
 &= \frac{\tilde{b}_i^{(k)}(s)}{\tilde{a}_i^{(k)}(s)} \cdot \frac{1}{(T_{*i} s + 1)^{n_i - m_i^{(k)} - 1}} \mathcal{G}_i^{(k)}(s) = \\
 &= \tilde{W}_i^{(k)}(s) \cdot W_{iBCB}^{(k)}(s) \cdot \mathcal{G}_i^{(k)}(s),
 \end{aligned} \tag{14}$$

где  $\tilde{W}_i^{(k)}(s)$ ,  $W_{iBCB}^{(k)}(s)$  – передаточные функции видоизмененной ПОУ и БСВ;

$\tilde{b}_i^{(k)}(s) = b_i^{(k)}(s)(T_i s + 1)^{n_i - m_{0i} - 1}$  и  $\tilde{a}_i^{(k)}(s) = a_i^{(k)}(s)(T_{*i} s + 1)^{m_i^{(k)} - m_{0i}}$  – полиномы со следующими значениями степеней  $deg \tilde{b}_i^{(k)}(s) = n_i + m_i^{(k)} - m_{0i} - 1$ ,  $deg \tilde{a}_i^{(k)}(s) = n_i + m_i^{(k)} - m_{0i}$ , из которых становится понятно, что значения относительной степени ВМОУ принимает фиксированное значение и становится равным  $\rho_i^{(k)} = 1$ .

Новая структурная схема, которая учитывает преобразования (14), будет иметь вид, представленный на рисунке 3.

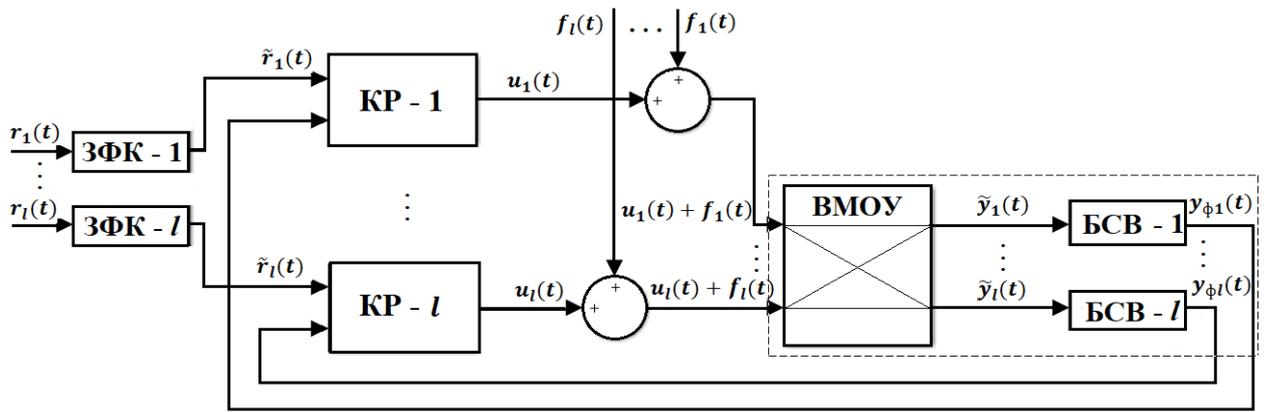


Рисунок 3 – Структурная схема видоизмененной системы управления

Рассмотрим упрощенную систему управления (см. рисунок 4), за счет выбора малой величины  $T_{*i}$  передаточные функции БСВ будем считать единичными:

$$\tilde{y}_i^{(k)}(s) = \frac{\tilde{b}_i^{(k)}(s)}{\tilde{a}_i^{(k)}(s)} \cdot \frac{1}{(T_{*i}s + 1)^{n_i - m_i^{(k)} - 1}} \cdot \mathcal{G}_i^{(k)}(s) \cong \frac{\tilde{b}_i^{(k)}(s)}{\tilde{a}_i^{(k)}(s)} \cdot \mathcal{G}_i^{(k)}(s), \quad (15)$$

где  $\tilde{y}_i^{(k)}(s)$  – сигнал выхода ВПОУ.

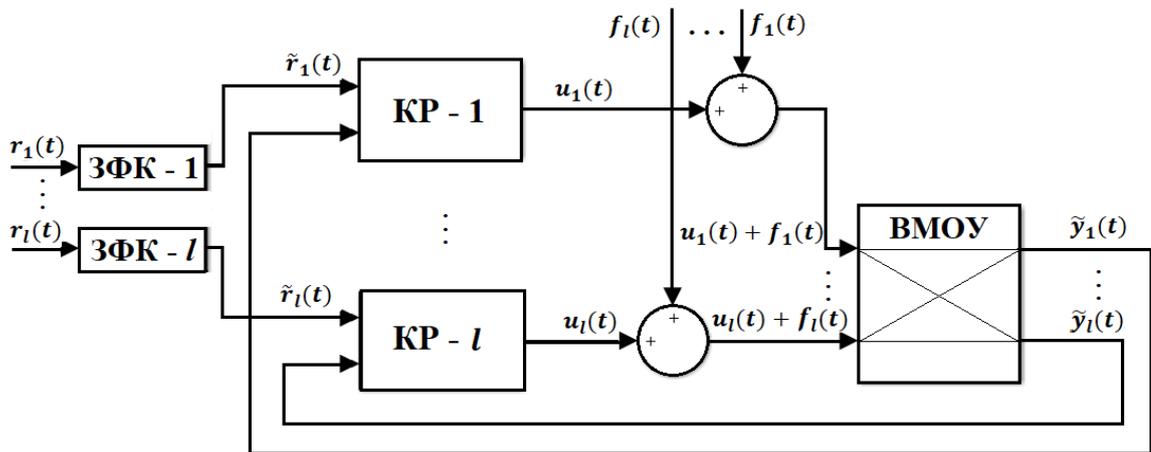


Рисунок 4 – Структурная схема упрощенной системы управления

Если теперь представить данные упрощенной подсистемы в пространстве состояний, получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned}\frac{d\tilde{x}_i^{(k)}(t)}{dt} &= \tilde{A}_i^{(k)}\tilde{x}_i^{(k)}(t) + \tilde{B}_i^{(k)}\mathcal{G}_i^{(k)}(t), \\ \tilde{y}_i^{(k)}(t) &= \left(\tilde{C}_{0i}^{(k)}\right)^T \tilde{x}_i^{(k)}(t), \quad \tilde{x}_{0i} = \tilde{x}_i^{(k)}(0),\end{aligned}\tag{16}$$

где  $\tilde{A}_i^{(k)} = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{1i}^{(k)} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \tilde{a}_{2i}^{(k)} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{a}_{(\rho_i^+ + m_i^{(k)})i}^{(k)} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$  – матрицы следующей размерности

$$(\rho_i^+ + m_i^{(k)}) \times (\rho_i^+ + m_i^{(k)});$$

$\tilde{B}_i^{(k)} = \begin{bmatrix} \tilde{b}_{0i}^{(k)} & \tilde{b}_{1i}^{(k)} & \dots & \tilde{b}_{(\rho_i^+ + m_i^{(k)} - 1)i}^{(k)} \end{bmatrix}^T$  – стационарные вектора размерности

$$(\rho_i^+ + m_i^{(k)}) \times 1;$$

$\tilde{C}_{0i}^{(k)} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$  – вектора выхода размера  $(\rho_i^+ + m_i^{(k)}) \times 1$ ;

$\tilde{x}_i^{(k)}(t) = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{1i}^{(k)}(t) & \tilde{x}_{2i}^{(k)}(t) & \dots & \tilde{x}_{(\rho_i^+ + m_i^{(k)})i}^{(k)}(t) \end{bmatrix}^T$  и  $\tilde{y}_i^{(k)}(t)$  – векторы переменных

состояния и скалярные выходы видоизмененных ПОУ.

Для отслеживания желаемой динамики выходов МОУ вводятся ЗФК, аналогичные ВФК (13):

$$\tilde{r}_i(s) = W_{3\Phi Ki}(s)r_i(s) = \frac{\mathcal{G}_i(s)}{\mathcal{G}_{*i}(s)}r_i(s),\tag{17}$$

где  $W_{3\Phi Ki}(s)$  – передаточные функции ЗФК;

$\mathcal{G}(s)$  и  $\mathcal{G}_*(s)$  – гурвицевы полиномы. С их помощью образуются сигналы  $\tilde{r}_i(t)$ ,

которые совпадают с выходами ВФК (13)  $\tilde{r}_i(t) \cong y_{\phi i}^{(k)}(t)$ , что позволяет эффек-

тивно отслеживать выходы  $y_i^{(k)}(t)$  ПОУ задающими сигналами  $r_i(t)$ , другими

словами, удовлетворять условию  $y_i^{(k)}(t) \cong r_i(t)$ .

Выходные переменные НЭМ, с учетом выражения (17), можно представить в операторном виде [1, 2, 23]:

$$\tilde{y}_{mi}^{(k)}(t) = \frac{\chi_{*i}^{(k)}}{p + \chi_{*i}^{(k)}} \tilde{r}_i(t) = \frac{1}{\left(\chi_{*i}^{(k)}\right)^{-1} p + 1} \tilde{r}_i(t), \quad (18)$$

из которого следует, что в силу задания значений коэффициентов  $\chi_{*i}^{(k)} \gg 1$  или  $\left(\chi_{*i}^{(k)}\right)^{-1} \cong 0$ , возможно выполнение равенств:

$$\tilde{y}_{mi}^{(k)}(t) \cong \tilde{r}_i(t). \quad (19)$$

Отметим, что в данном случае целесообразно для последовательного соединения ПОУ и ВФК, вместо представленного выше выражения (18) использовать выражение следующего вида:

$$\begin{aligned} y_{mi}^{(k)}(t) &= \frac{\chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_i^{(k)}(p)}{\left(p + \chi_{*i}^{(k)}\right) \tilde{b}_i^{(k)}(p)} \tilde{r}_i(t) \cong \frac{\tilde{\chi}_{*i}^{(k)} \tilde{b}_i^{(k)}(p)}{\tilde{a}_i^{(k)}(p) + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_i^{(k)}(p)} \tilde{r}_i(t) = \\ &= \frac{\tilde{\chi}_{*i}^{(k)} \tilde{b}_i^{(k)}(p)}{\tilde{a}_{*i}^{(k)}(p)} \tilde{r}_i(t), \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\tilde{\chi}_{*i}^{(k)} = \chi_{*i}^{(k)} \left( \tilde{b}_i^{(k)} \left( \rho_i^+ + m_i^{(k)} \right)_{i-1} \right)^{-1}$ ;

$$\tilde{a}_{*i}^{(k)}(p) = p^{\left(\rho_i^+ + m_i^{(k)}\right)_i} + \left( \tilde{a}_{\left(\rho_i^+ + m_i^{(k)}\right)_i}^{(k)} + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_{\left(\rho_i^+ + m_i^{(k)}\right)_i}^{(k)} \right) p^{\left(\rho_i^+ + m_i^{(k)}\right)_{i-1}} + \dots + \tilde{a}_{1i}^{(k)} + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_{0i}^{(k)}.$$

Тогда описание НЭМ (20), с учетом полученного расширенного пространства состояний (16) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{x}_{mi}^{(k)}(t)}{dt} &= \tilde{A}_{mi}^{(k)} \tilde{x}_{mi}^{(k)}(t) + \tilde{\chi}_{*i}^{(k)} \tilde{B}_i^{(k)} \tilde{r}_i(t), \\ \tilde{y}_{mi}^{(k)}(t) &= \left( \tilde{C}_{0i}^{(k)} \right)^T \tilde{x}_{mi}^{(k)}(t), \end{aligned} \quad (21)$$

где  $\tilde{x}_{mi}^{(k)}(t) = \left[ \tilde{x}_{1mi}^{(k)}(t) \quad \tilde{x}_{2mi}^{(k)}(t) \quad \dots \quad \tilde{x}_{(\rho_i^+ + m_i^{(k)})mi}^{(k)}(t) \right]^T$  – переменные состояния

неявного эталона;

$\tilde{A}_{mi}^{(k)} = \tilde{A}_i^{(k)} + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{B}_i^{(k)} \left( \tilde{C}_{0i}^{(k)} \right)^T$  – матрицы состояний НЭМ;

$\chi_{*i}^{(k)}, \tilde{\chi}_{*i}^{(k)} = const \gg 0$  – достаточно большие числа;

$\tilde{y}_{mi}^{(k)}(t)$  – скалярные выходы неявного эталона.

## 2.2 Постановка задачи синтеза непрерывной системы управления

После математического описания модели МОУ (7) и преобразования ее к видоизмененной форме (13), а также определения НЭМ (21) необходимо сформулировать цели управления: вспомогательную и основную.

*Вспомогательная цель управления.*

Для каждой локальной подсистемы ВОУ (13) требуется провести синтез закона управления  $u_i^{(k)}(t) = u\left(\tilde{y}_i^{(k)}(t), \tilde{r}_i(t)\right)$ , такого, чтобы при задании любых начальных условий, наличия параметрической нестационарности (10) и переключений, действия перекрестных связей (11) на подсистемы и внешних помех (12), а также управления по выходу (**Допущение 3**), было гарантировано (при  $t \rightarrow \infty$ ) выполнение следующих неравенств:

$$\left| \tilde{y}_{mi}^{(k)}(t) - \tilde{y}_i^{(k)}(t) \right| \cong \left| \tilde{r}_i(t) - \tilde{y}_i^{(k)}(t) \right| \leq \tilde{\delta}_{0i} = const, \quad (22)$$

где  $\tilde{y}_{mi}^{(k)}(t)$  – выходы НЭМ (21);

$\tilde{y}_i^{(k)}(t)$  – выходы видоизмененного МОУ (16);

$\tilde{r}_i(t)$  – видоизмененное задающее воздействие (17);

$\tilde{\delta}_{0i}$  – ограниченные величины.

*Основная цель управления.*

Основная цель управления, представленная неравенством вида:

$$\left| r_i(t) - y_i^{(k)}(t) \right| \leq \delta_{0i} = \text{const}, \text{ при } t \rightarrow \infty, \quad (23)$$

где  $\delta_{0i}$  – максимально допустимая ошибка, которая состоит в качественной отработке задающих сигналов  $r_i(t)$ , будет реализована за счет выполнения описанных выше соотношений (19) и (22), а также эквивалентности фильтр-корректоров: задающего (17) и выходного (13).

### 2.3 Синтез непрерывного децентрализованного комбинированного регулятора

Пусть для каждой локальной ПОУ (7) синтез адаптивно-робастных законов регулирования будет осуществляться в рамках критерия гиперустойчивости, тогда, следуя методике, подробно описанной в разделе 1.2 данной работы, выполним несколько этапов синтеза.

*Первый этап.* Согласно описанию первого этапа критерия, необходимо ввести сигнал рассогласования  $e_i^{(k)}(t) = \tilde{x}_{mi}^k(t) - \tilde{x}_i^k(t)$  переменных состояния ВОУ (16) и НЭМ (21) в виде ЛСЧ:

$$\begin{aligned} \frac{de_i^{(k)}(t)}{dt} &= \frac{d\tilde{x}_{mi}^{(k)}(t)}{dt} - \frac{d\tilde{x}_i^{(k)}(t)}{dt} = \tilde{A}_{mi}^{(k)} e_i^{(k)}(t) + \tilde{B}_i^{(k)} \mu_i^{(k)}(t), \\ v_i^{(k)}(t) &= \tilde{y}_{mi}^{(k)}(t) - \tilde{y}_i^{(k)}(t) = \left( \tilde{C}_{0i}^{(k)} \right)^T e_i^{(k)}(t), \end{aligned} \quad (24)$$

и ННЧ:

$$\begin{aligned} \mu_i^{(k)}(t) &= \tilde{\chi}_{*i}^{(k)} \tilde{r}_i^{(k)}(t) + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{y}_i^{(k)}(t) - \\ &\quad - \left( 1 + \beta_i^{(k)}(t) \right) \left( u_i^{(k)}(t) + f_i^{(k)}(t) + Y_i^{(k)}(t) + \tilde{y}_i^{(k)}(t) \right), \end{aligned} \quad (25)$$

где  $\mu_i^{(k)}(t)$  – видоизмененные управления;

$v_i^{(k)}(t)$  – видоизмененные выходы.

*Второй этап.* На следующем этапе синтеза необходимо обеспечить выполнение положительности ЛСЧ (24):

$$\operatorname{Re}\left(W_{\text{ЛСЧ}i}^{(k)}(j\omega)\right) > 0, \forall \omega \geq 0. \quad (26)$$

Если записать явный вид передаточной функции ЛСЧ:

$$W_{\text{ЛСЧ}i}^{(k)}(s) = \left(\tilde{C}_{0i}^{(k)}\right)^T \left(sE - \tilde{A}_{mi}^{(k)}\right)^{-1} \tilde{B}_i^{(k)} = \frac{1}{\left(\chi_{*i}^{(k)}\right)^{-1} s + 1}; \quad (27)$$

где  $\chi_{*i}^{(k)} = \text{const} \gg 0$  – достаточно большие числа, то получим выражение, аналогичное апериодическому звену первого порядка, действительная часть которого, в силу выполнения цепочки несложных преобразований, будет удовлетворять условию (26) при  $\forall \omega \geq 0$ :

$$\operatorname{Re}\left(\frac{1}{\left(\chi_{*i}^{(k)}\right)^{-1} j\omega + 1}\right) = \operatorname{Re}\left(\frac{\left(\chi_{*i}^{(k)}\right)^{-1} j\omega - 1}{-\left(\chi_{*i}^{(k)}\right)^{-2} \omega^2 - 1}\right) = \frac{1}{\left(\chi_{*i}^{(k)}\right)^{-2} \omega^2 + 1} > 0. \quad (28)$$

*Третий этап.* На данном этапе синтеза необходимо обеспечить выполнение положительности интегрального неравенства В.М. Попова (6):

$$h_i^{(k)}(0, t) = -\int_0^t \mu_i^{(k)}(v) \nu_i^{(k)}(v) dv > -\left(h_{0i}^{(k)}\right)^2 = \text{const}, t > 0, i = 1, \dots, l. \quad (29)$$

Для решения данного неравенства рассмотрим закон управления

$u_i^{(k)}(t) = \sum_{j=1}^3 u_{ji}^{(k)}(t)$  и представим интеграл (29) следующим образом:

$$h_i^{(k)}(0, t) = \sum_{j=1}^3 h_{ji}^{(k)}(0, t), \quad (30)$$

для которого будут иметь место выражения:

$$\begin{aligned}
h_{1i}^{(k)}(0,t) &= -\int_0^t \left( \tilde{\chi}_{*i}^{(k)} \tilde{r}_i^{(k)}(v) - \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) u_{1i}^{(k)}(v) \right) v_i^{(k)}(v) dv; \\
h_{2i}^{(k)}(0,t) &= -\int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) \left( -u_{2i}^{(k)}(v) - f_i^{(k)}(v) - Y_i^{(k)}(v) \right) v_i^{(k)}(v) dv; \\
h_{3i}^{(k)}(0,t) &= -\int_0^t \left( \chi_{*i}^{(k)} \tilde{y}_i^{(k)}(v) - \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) \left( u_{3i}^{(k)}(v) + \tilde{y}_i^{(k)}(v) \right) \right) v_i^{(k)}(v) dv.
\end{aligned} \tag{31}$$

Рассмотрим каждое равенство (31) по отдельности. Пусть управление  $u_{1i}^{(k)}(t)$  сформируется в виде:

$$u_{1i}^{(k)}(t) = h_{11i} \tilde{r}_i(t) \int_0^t \tilde{r}_i(v) v_i^{(k)}(v) dv + h_{12i} (\tilde{r}_i(t))^2 v_i^{(k)}(t), \tag{32}$$

тогда оценка интеграла (31) представится в виде:

$$\begin{aligned}
h_{1i}^{(k)}(0,t) &= -\int_0^t \left( \tilde{\chi}_{*i}^{(k)} \tilde{r}_i(v) - \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) u_{1i}^{(k)}(v) \right) v_i^{(k)}(v) dv = \\
&= -\tilde{\chi}_{*i}^{(k)} \int_0^t \tilde{r}_i(v) v_i^{(k)}(v) dv + h_{12i} \int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) \left( \tilde{r}_i(v) v_i^{(k)}(v) \right)^2 dv + \\
&+ h_{11i} \int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) \tilde{r}_i(v) v_i^{(k)}(v) \int_0^v \tilde{r}_i(\theta) v_i^{(k)}(\theta) d\theta dv \geq \\
&\geq \frac{h_{11i} \left(1 + \underline{\beta}_i^{(k)}\right)}{2} \left( \int_0^t \tilde{r}_i(v) v_i^{(k)}(v) dv \right)^2 - \tilde{\chi}_{*i}^{(k)} \int_0^t \tilde{r}_i(v) v_i^{(k)}(v) dv \pm \\
&\pm \frac{\left(\tilde{\chi}_{*i}^{(k)}\right)^2}{2h_{11i} \left(1 + \underline{\beta}_i^{(k)}\right)} \geq -\frac{\left(\tilde{\chi}_{*i}^{(k)}\right)^2}{2h_{11i} \left(1 + \underline{\beta}_i^{(k)}\right)} = const, t > 0,
\end{aligned} \tag{33}$$

где  $h_{11i}, h_{12i} = const > 0$ .

Также если сформировать управляющее воздействие  $u_{2i}^{(k)}(t)$  следующим образом:

$$u_{2i}^{(k)}(t) = h_{21i} \int_0^t v_i^{(k)}(v) dv + h_{22i} v_i^{(k)}(t) \tag{34}$$

для второго интеграла (31) можно получить такие оценки:

$$\begin{aligned}
h_{2i}^{(k)}(0,t) &= \int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) \left(u_{2i}^{(k)}(v) + f_i^{(k)}(v) + Y_i^{(k)}(v)\right) v_i^{(k)}(v) dv = \\
&= h_{21i} \int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) v_i^{(k)}(v) \int_0^v v_i^{(k)}(\theta) d\theta dv + \\
&+ h_{22i} \int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) \left(v_i^{(k)}(v)\right)^2 dv + \int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) f_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v) dv \\
&+ \int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) Y_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v) dv \geq \frac{h_{21i} \left(1 + \underline{\beta}_i^{(k)}\right)}{2} \left(\int_0^t v_i^{(k)}(v) dv\right)^2 - \\
&- \left(f_i^+ + \sum_{i \neq j, j=1}^l \varphi_{ji}^+\right) \left(1 + \bar{\beta}_i^{(k)}\right) \left|\int_0^t v_i^{(k)}(v) dv\right| \pm \\
&\pm \frac{\left(\left(f_i^+ + \sum_{i \neq j, j=1}^l \varphi_{ji}^+\right) \left(1 + \bar{\beta}_i^{(k)}\right)\right)^2}{2h_{21i} \left(1 + \underline{\beta}_i^{(k)}\right)} \geq - \frac{\left(\left(f_i^+ + \sum_{i \neq j, j=1}^l \varphi_{ji}^+\right) \left(1 + \bar{\beta}_i^{(k)}\right)\right)^2}{2h_{21i} \left(1 + \underline{\beta}_i^{(k)}\right)} = \\
&= \text{const}, t > 0,
\end{aligned} \tag{35}$$

где  $h_{21i}, h_{22i} = \text{const} > 0$ .

При задании управления  $u_{3i}^{(k)}(t)$  с помощью уравнения:

$$u_{3i}^{(k)}(t) = h_{31i} \tilde{y}_i^{(k)}(t) \int_0^t \tilde{y}_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v) dv + h_{32i} \left(\tilde{y}_i^{(k)}(t)\right)^2 v_i^{(k)}(t), \tag{36}$$

интегралы  $h_{3i}^{(k)}(0,t)$  (31) будут иметь оценку вида:

$$\begin{aligned}
h_{3i}^{(k)}(0,t) &= \int_0^t \left(-\chi_{*i}^{(k)} \tilde{y}_i^{(k)}(v) + \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) \left(u_{3i}^{(k)}(v) + \tilde{y}_i^{(k)}(v)\right)\right) v_i^{(k)}(v) dv = \\
&= -\int_0^t \chi_{*i}^{(k)} \tilde{y}_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v) dv + \int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) \tilde{y}_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v) dv + \\
&+ h_{31i} \int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) \tilde{y}_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v) \int_0^v \tilde{y}_i^{(k)}(\theta) v_i^{(k)}(\theta) d\theta dv + \\
&+ h_{32i} \int_0^t \left(1 + \beta_i^{(k)}(v)\right) \left(\tilde{y}_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v)\right)^2 dv \geq \\
&\geq \frac{h_{31i} \left(1 + \underline{\beta}_i^{(k)}\right)}{2} \left(\int_0^t \tilde{y}_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v) dv\right)^2 - \\
&- \left(\chi_{*i}^{(k)} + \left(1 + \bar{\beta}_i^{(k)}\right)\right) \left|\int_0^t \tilde{y}_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v) dv\right| \pm \\
&\pm \frac{\left(\chi_{*i}^{(k)} + \left(1 + \bar{\beta}_i^{(k)}\right)\right)^2}{2h_{31i} \left(1 + \underline{\beta}_i^{(k)}\right)} \geq - \frac{\left(\chi_{*i}^{(k)} + \left(1 + \bar{\beta}_i^{(k)}\right)\right)^2}{2h_{31i} \left(1 + \underline{\beta}_i^{(k)}\right)} = \text{const}, t > 0,
\end{aligned} \tag{37}$$

где  $h_{31i}, h_{32i} = \text{const} > 0$ .

Следовательно, в результате формирования оценок (33), (35), (37), имеет место выполнение неравенства Попова (29):

$$\begin{aligned} \left(h_{0i}^{(k)}\right)^2 &= \frac{\left(\tilde{\chi}_{*i}^{(k)}\right)^2}{2h_{1i}\left(1+\underline{\beta}_i^{(k)}\right)} + \frac{\left(\left(f_i^+ + \sum_{i \neq j, j=1}^l \varphi_{ji}^+\right)\left(1+\bar{\beta}_i^{(k)}\right)\right)^2}{2h_{2i}\left(1+\underline{\beta}_i^{(k)}\right)} + \\ &+ \frac{\left(\chi_{*i}^{(k)} + \left(1+\bar{\beta}_i^{(k)}\right)\right)^2}{2h_{3i}\left(1+\underline{\beta}_i^{(k)}\right)} = const > 0. \end{aligned} \quad (38)$$

Тогда децентрализованный комбинированный закон регулирования, запишется в виде следующего равенства:

$$\begin{aligned} u_i^{(k)}(t) &= \sum_{j=1}^3 u_{ji}^{(k)}(t) = h_{1i} \tilde{r}_i(t) \int_0^t \tilde{r}_i(v) v_i^{(k)}(v) dv + h_{12i} \left(\tilde{r}_i(t)\right)^2 v_i^{(k)}(t) + \\ &+ h_{21i} \int_0^t v_i^{(k)}(v) dv + h_{22i} v_i^{(k)}(t) + h_{31i} \tilde{y}_{i\text{sat}}^{(k)}(t) \int_0^t \tilde{y}_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v) dv \\ &+ h_{32i} \left(\tilde{y}_{i\text{sat}}^{(k)}(t)\right)^2 v_i^{(k)}(t), \end{aligned} \quad (39)$$

$$v_i^{(k)}(t) = \tilde{r}_i(t) - \tilde{y}_{i\text{sat}}^{(k)}(t),$$

$$\tilde{y}_{i\text{sat}}^{(k)}(t) = \text{sat}\left(\tilde{y}_i^{(k)}(t)\right) = \begin{cases} -\Delta_i & \text{при } \tilde{y}_i^{(k)}(t) \leq -\Delta_i \\ \tilde{y}_i^{(k)}(t) & \text{при } \left|\tilde{y}_i^{(k)}(t)\right| < \Delta_i \\ \Delta_i & \text{при } \tilde{y}_i^{(k)}(t) \geq \Delta_i \end{cases}.$$

где  $h_{1i}, h_{12i}, h_{21i}, h_{22i}, h_{31i}, h_{32i} = const > 0$ . Так как ВФК представляет собой форсирующее звено, на его выходе, учитывая малую величину постоянной времени и наличие ненулевых начальных условий, возникают значительные пиковые выбросы. Для ослабления их влияния на динамику системы, для выходных сигналов  $\tilde{y}_i^{(k)}(t)$  вводится нелинейность типа «насыщение» [26].

В силу выполнения неравенств (26), (29) на основе критерия гиперустойчивости можно утверждать, что система (24), (25) является гиперустойчивой. Помимо этого, в случае задания малых значений  $T_{*i}$ , согласно Приложению А, закон также гарантирует свойство  $L$  – диссипативности, как исходной (14), так и видоизмененной системы (16) [23].

## 2.4 Пример имитационного моделирования непрерывной системы управления

Для проведения вычислительного эксперимента рассмотрим трехсвязный объект управления с переключениями [4] (Simulink-модель представлена на рисунке Б.1).

*Первая подсистема.* В первой ПОУ (7) происходит одно переключение в момент времени  $t = 40$ с, при этом изменению подлежат как ее параметры, так и структура:

$$\begin{aligned}
 &0 \leq t < 40: \\
 &A_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1.7 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4.4 \\ 1 \end{pmatrix}, \beta_1^{(1)}(t) = 2 + 1.5 \sin(2t); \\
 &40 \leq t \leq 80: \\
 &A_1^{(2)} = \begin{pmatrix} -0.7 & 1 & 0 \\ 2.5 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B_1^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}, \beta_1^{(2)}(t) = 1 - 0.5 \cos^2(2t).
 \end{aligned} \tag{40}$$

На подсистему оказывает негативное влияние сигнал перекрестной связи (11), действующий со стороны 2-й и 3-й подсистем, а также сигнал внешнего задающего воздействия (12):

$$\begin{aligned}
 &Y_1^{(k)}(t) = 2.3 \sin(y_2^{(k)}(t)) + 0.4 \sin(0.3 y_3^{(k)}(t)), \\
 &f_1^{(1)}(t) = 0.6(\cos^2(0.8t) - 1), f_1^{(2)}(t) = 0.6 \cos(0.1t) \sin(0.2t).
 \end{aligned} \tag{41}$$

Желаемая динамика выхода 1-й подсистемы задается в виде сигнала:

$$r_1(t) = 0.25 \sin(0.25t) - 0.65 \sin(0.2t) - 0.1 \sin(0.1t). \tag{42}$$

*Вторая подсистема.* Во второй ПОУ переключение происходит один раз, но в другой момент времени  $t = 50$ с. Аналогично 1-й подсистеме, изменению подлежат как ее параметры, так и структура:

$$\begin{aligned}
0 \leq t < 50: \\
A_2^{(1)} &= \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}, B_2^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2.2 \end{pmatrix}, \beta_2^{(1)}(t) = 1.5 + 0.5 \sin(t); \\
50 \leq t \leq 80: \\
A_2^{(2)} &= \begin{pmatrix} 0.5 & 1 \\ 1.5 & 0 \end{pmatrix}, (B_2^{(2)})^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.5 \end{pmatrix}, \beta_2^{(2)}(t) = 1.2 - 0.8 \cos^2(t).
\end{aligned} \tag{43}$$

На вторую подсистему оказывает влияние сигнал перекрестной связи, действующий со стороны 2-й и 3-й подсистем, а также внешнее возмущение:

$$\begin{aligned}
Y_2^{(k)}(t) &= 1.1 \sin(y_1^{(k)}(t)) + 0.4 \sin(0.3 y_3^{(k)}(t)); \\
f_2^{(1)}(t) &= 0.4 \cos(0.3t) \sin(0.08t), f_2^{(2)}(t) = 0.1 \sin(0.15t).
\end{aligned} \tag{44}$$

Сигнал задающего воздействия для 2-й подсистемы МОУ:

$$r_2(t) = 0.5 \sin(0.3t) + 0.2 \sin(0.1t). \tag{45}$$

*Третья подсистема.* В третьей ПОУ происходит переключение в момент времени  $t = 30c$ . Переключение приводит к параметрически-структурным изменениям:

$$\begin{aligned}
0 \leq t < 30: \\
A_3^{(1)} &= \begin{pmatrix} 0.2 & 1 & 0 \\ -1.2 & 0 & 1 \\ 1.2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B_3^{(1)} = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 1 \\ 0.5 \end{pmatrix}, \beta_3^{(1)}(t) = 3 + 2.3 \sin(t); \\
30 \leq t \leq 80: \\
A_3^{(2)} &= \begin{pmatrix} 0.3 & 1 & 0 \\ -0.2 & 0 & 1 \\ 2.2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B_3^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.4 \\ 2 \end{pmatrix}, \beta_3^{(2)}(t) = 2 - 1.2 \cos^2(2t);
\end{aligned} \tag{46}$$

На третью подсистему оказывает влияние 1-я и 2-я подсистем, а также внешнее возмущение:

$$\begin{aligned}
Y_3^{(k)}(t) &= 2.3 \sin(y_2^{(k)}(t)) + 1.1 \sin(y_1^{(k)}(t)); \\
f_3^{(1)}(t) &= 0.8 \sin^2(0.2t), f_3^{(2)}(t) = 0.8 \sin(0.3t) - \cos(0.2t).
\end{aligned} \tag{47}$$

Сигнал задающего воздействия для данной подсистемы МОУ:

$$r_3(t) = 0.8\sin(0.1t) - 0.4\sin(0.2t). \quad (48)$$

Передаточные функции ЗФК (17) и ВФК (1) для представленных подсистем примут вид:

$$\begin{aligned} W_{3\Phi K1} = W_{B\Phi K1} &= \left( \frac{0.1s + 1}{0.005s + 1} \right)^2, \\ W_{3\Phi K2} = W_{B\Phi K2} &= \frac{0.1s + 1}{0.005s + 1}, \\ W_{3\Phi K3} = W_{B\Phi K3} &= \frac{0.1s + 1}{0.005s + 1}, \end{aligned} \quad (49)$$

а параметры адаптивно-робастного регулятора в результате эвристического подбора будут иметь значения:

$$\begin{aligned} h_{11(1)} &= 1200, h_{12(1)} = 40, h_{21(1)} = 100, h_{22(1)} = 350, \\ h_{31(1)} &= 500, h_{32(1)} = 30, \Delta_1 = 10; \\ h_{11(2)} &= 900, h_{12(2)} = 50, h_{21(2)} = 300, h_{22(2)} = 100, \\ h_{31(2)} &= 500, h_{32(2)} = 30, \Delta_2 = 10; \\ h_{11(3)} &= 700, h_{12(3)} = 50, h_{21(3)} = 150, h_{22(3)} = 40, \\ h_{31(3)} &= 500, h_{32(3)} = 50, \Delta_3 = 10. \end{aligned} \quad (50)$$

Результатом проведения имитационного моделирования системы (40) – (50) являются вывод ее динамических характеристик.

Так на рисунке 5 показаны сигналы выходов подсистем МОУ  $y_i^{(k)}(t)$  и задающих воздействий  $r_i(t)$ , а также ошибка рассогласования  $y_i^{(k)}(t) - r_i(t)$ , которая в установившемся режиме не превышает величины 0.005, и только в моменты переключений имеет всплески. А на рисунке 6 – управляющие воздействия  $u_i^{(k)}(t)$ , внешние возмущения  $f_i^{(k)}(t)$  и выходы перекрестных связей  $Y_i(t)$  ПОУ.

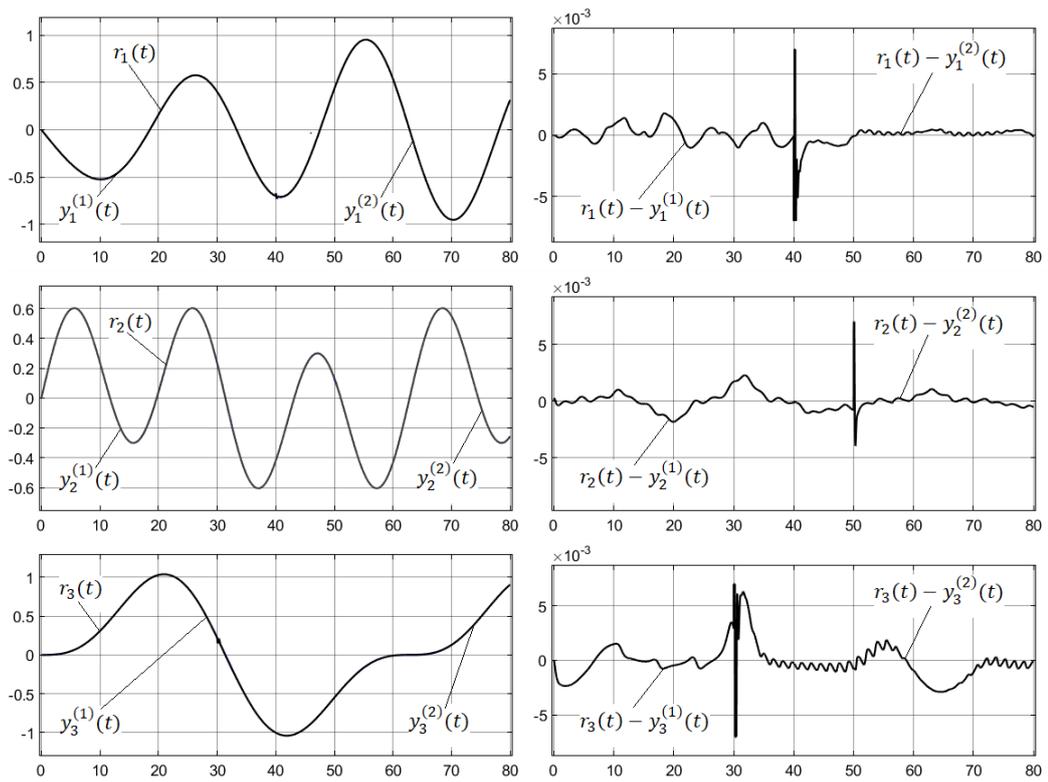


Рисунок 5 – Динамика выходов и задающих воздействий, ошибка регулирования отдельных подсистем

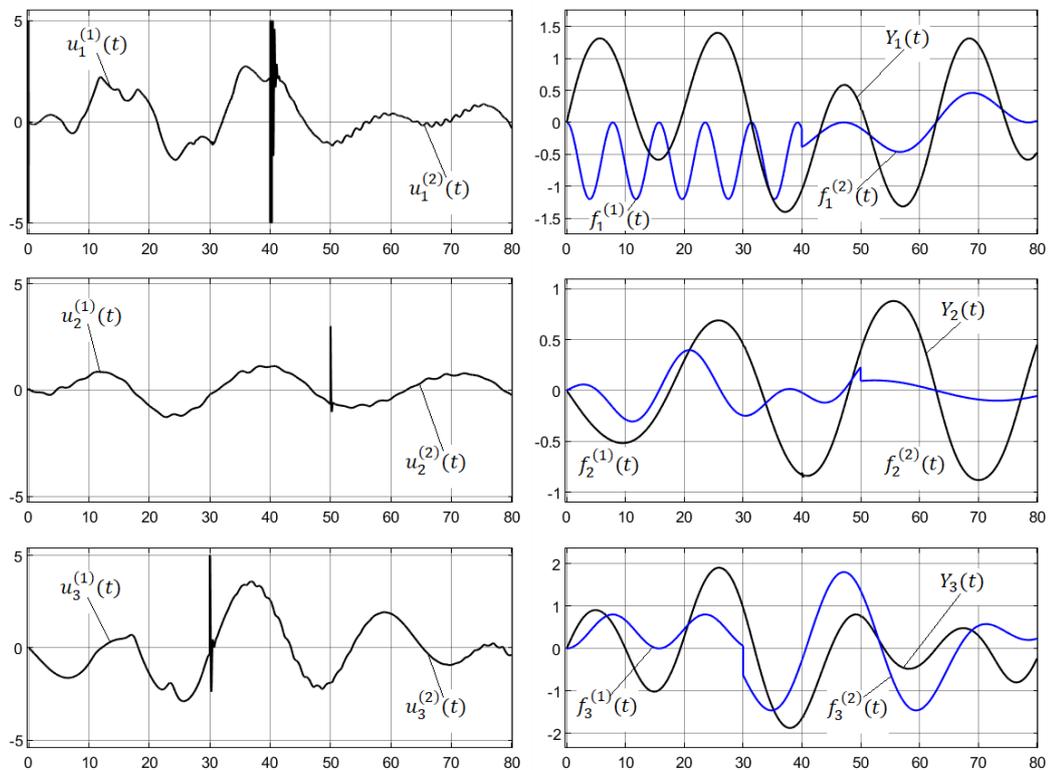


Рисунок 6 – Локальные сигналы управления, возмущения и перекрестные связи

Таким образом, в результате проведения имитационного моделирования для непрерывной системы децентрализованного адаптивно-робастного управления трехсвязным объектом с переключениями была показана достаточно высокая точность обработки задающих сигналов.

## 2.5 Постановка задачи синтеза гибридной системы управления

После этапа описания математической модели объекта управления (7) и синтеза непрерывного децентрализованного регулятора (39), можно задать вспомогательную и основную цель управления уже для гибридной системы.

Для этого представим дискретные аналоги непрерывных сигналов системы управления следующим образом:

$$\begin{aligned} y_i^{(k)}(t) &= y_i^{(k)}(t_n) = y_{i,n}^{(k)}, y_{\phi i}^{(k)}(t) = y_{\phi i}^{(k)}(t_n) = y_{\phi i,n}^{(k)}, \\ \tilde{y}_i^{(k)}(t) &= \tilde{y}_i^{(k)}(t_n) = \tilde{y}_{i,n}^{(k)}, \tilde{y}_{mi}^{(k)}(t) = \tilde{y}_{mi}^{(k)}(t_n) = \tilde{y}_{mi,n}^{(k)}, \\ r_i(t) &= r_i(t_n) = r_{i,n}, \tilde{r}_i(t) = \tilde{r}_i(t_n) = \tilde{r}_{i,n}, u_i^{(k)}(t) = u_i^{(k)}(t_n) = u_{i,n}^{(k)}, \end{aligned} \quad (51)$$

где  $t_n = n\lambda$  – дискретное время;

$n = 1, 2, 3, \dots$  – номер шага;

$\lambda$  – период дискретизации.

Для многосвязного объекта (7), функционирующего в условиях действия структурно-параметрической неопределенности, необходимо синтезировать дискретный закон управления  $u_{i,n}^{(k)} = u(\tilde{y}_{i,n}^{(k)}, \tilde{r}_{i,n})$ , такой, чтобы при любых начальных условиях, измерении выхода  $y_{i,n}^{(k)}$  ПОУ, наличии перекрестных связей и переключений, а также ограниченных внешних помех, было возможно при  $n \rightarrow \infty$  выполнение неравенств – *вспомогательной цели*:

$$\left| \tilde{y}_{mi,n}^{(k)} - \tilde{y}_{i,n}^{(k)} \right| \cong \left| \tilde{r}_{i,n} - \tilde{y}_{i,n}^{(k)} \right| \leq \tilde{\delta}_{0i,n} = const, \quad (52)$$

где  $\tilde{y}_{mi,n}^{(k)}$  – дискретные сигналы выходов НЭМ (21);

$\tilde{y}_{i,n}^{(k)}$  – дискретные выходы видоизмененного МОУ (16);

$\tilde{r}_{i,n}$  – дискретные сигналы видоизмененного задающего воздействия (17);

$\tilde{\delta}_{0i,n}$  – ограниченные величины.

Тогда в силу соотношений (52) и эквивалентности фильтр-корректоров (13), (17) будет возможно выполнение *основной цели*:

$$\left| r_{i,n} - y_{i,n}^{(k)} \right| \leq \delta_{0i,n} = \text{const} > 0, \text{ при } n \rightarrow \infty, \quad (53)$$

где  $y_{i,n}^{(k)}$  – дискретные выходы МОУ (7);

$r_{i,n}$  – дискретные сигналы задающего воздействия;

$\delta_{0i,n}$  – максимально допустимая ошибка.

## 2.6 Проектирование гибридной децентрализованной системы комбинированного управления

Осуществить переход от описанной выше непрерывной системы управления (7), (13), (17), (21), (39) к дискретно-непрерывной можно с помощью метода непрерывных моделей [19].

После, как в предыдущем разделе была выполнена дискретизация непрерывных сигналов системы (51), в соответствии с методом непрерывных моделей, дискретно-непрерывную систему можно записать следующим образом:

- непрерывный объект управления (7);
- цифровые выходной и задающий фильтр-корректоры: для получения дискретных передаточных функций фильтр-корректоров (13), (17) используем метод Эйлера (заменяем  $s$  на  $\frac{z-1}{\lambda z}$ ):

$$W_{B\Phi Ki}(z) = W_{3\Phi Ki}(z) = \frac{\left( \frac{T_i \left( \frac{z-1}{\lambda z} \right) + 1}{T_{*i} \left( \frac{z-1}{\lambda z} \right) + 1} \right)^{\rho_i^+ - 1}}{\left( \frac{(T_i - \lambda)z - T_i}{(T_{*i} - \lambda)z - T_{*i}} \right)^{\rho_i^+ - 1}}, \quad (54)$$

где  $W_{B\Phi Ki}(z)$  и  $W_{3\Phi Ki}(z)$  – дискретные передаточные функции ВФК и ЗФК;

$T_{*i}$  и  $T_i$  – постоянные времени;

$\lambda$  – период дискретизации;

$\rho_i^+ = (n_i - m_{0i})$  – максимально возможное значение относительной степени ПОУ;

– дискретная НЭМ:

$$\tilde{x}_{mi,n+1}^{(k)} = \tilde{A}_{mi,n}^{(k)} \tilde{x}_{mi,n}^{(k)} + \tilde{\chi}_{*i,n}^{(k)} \tilde{B}_{i,n}^{(k)} \tilde{r}_{i,n}, \quad \tilde{y}_{mi,n}^{(k)} = \left( \tilde{C}_{0i,n}^{(k)} \right)^T \tilde{x}_{mi,n}^{(k)}, \quad (55)$$

где  $\tilde{x}_{mi,n}^{(k)}$  – векторы переменных состояния дискретной НЭМ;

$\tilde{A}_{mi,n}^{(k)}$  – эталонные матрицы состояний;

$\tilde{\chi}_{*i,n}^{(k)}, \tilde{\chi}_{i,n}^{(k)} = const \gg 0$ ;

$\tilde{y}_{mi,n}^{(k)}$  – выходы эталонной модели;

– дискретный регулятор: представим децентрализованный комбинированный регулятор (39) в дискретном виде:

$$\begin{aligned} u_{i,n}^{(k)} = & h_{11i,n} \tilde{r}_{i,n} \left( \tilde{r}_{i,n-1} v_{i,n-1}^{(k)} + \lambda \tilde{r}_{i,n} v_{i,n}^{(k)} \right) + h_{12i,n} \left( \tilde{r}_{i,n} \right)^2 v_{i,n}^{(k)} + \\ & + h_{21i,n} \left( v_{i,n-1}^{(k)} + \lambda v_{i,n}^{(k)} \right) + h_{22i,n} v_{i,n}^{(k)} + \\ & + h_{31i,n} \tilde{y}_{i sat,n}^{(k)} \left( \tilde{y}_{i sat,n-1}^{(k)} v_{i,n-1}^{(k)} + \lambda \tilde{y}_{i sat,n}^{(k)} v_{i,n}^{(k)} \right) + \\ & + h_{32i,n} \left( \tilde{y}_{i sat,n}^{(k)} \right)^2 v_{i,n}^{(k)}, \end{aligned} \quad (56)$$

$$v_{i,n}^{(k)} = \tilde{r}_{i,n} - \tilde{y}_{i sat,n}^{(k)},$$

$$\tilde{y}_{i sat,n}^{(k)} = sat \left( \tilde{y}_{i,n}^{(k)} \right) = \begin{cases} -\Delta_i & \text{при } \tilde{y}_{i,n}^{(k)} \leq -\Delta_i \\ \tilde{y}_{i,n}^{(k)} & \text{при } \left| \tilde{y}_{i,n}^{(k)} \right| < \Delta_i \\ \Delta_i & \text{при } \tilde{y}_{i,n}^{(k)} \geq \Delta_i \end{cases},$$

где  $h_{11i,n}, h_{12i,n}, h_{21i,n}, h_{22i,n}, h_{31i,n}, h_{32i,n} = const > 0$ ;

$\tilde{y}_{i,n}^{(k)}$  – дискретные выходы видоизмененного МОУ (16);

$\tilde{r}_{i,n}$  – дискретные сигналы видоизмененного задающего воздействия (17);

$n = 1, 2, 3, \dots$  – номер шага дискретизации.

Таким образом, на основе метода непрерывной модели разработана гибридная система управления (7), (54 – 56), сохраняющая свойства гиперустойчивости и диссипативности при правильно заданной величине шага дискретизации (см. раздел 1.3).

## 2.7 Пример имитационного моделирования гибридной системы управления

В данном разделе проведем вычислительный эксперимент с гибридной системой децентрализованного комбинированного управления. Преобразуем рассмотренную ранее непрерывную систему управления (40) – (50) в гибридную. Согласно методу непрерывных моделей, описание ПОУ (40), (43), (46) останется неизменным, а вот остальные сигналы примут вид:

- цифровые ЗФК и ВФК

$$W_{ЗФК1}(z) = W_{ВФК1}(z) = \left( \frac{(0.1 - \lambda)z - 0.1}{(0.005 - \lambda)z - 0.005} \right)^2, \quad (57)$$

$$W_{ЗФК2,3}(z) = W_{ВФК2,3}(z) = \frac{(0.1 - \lambda)z - 0.1}{(0.005 - \lambda)z - 0.005};$$

- дискретные сигналы задающего воздействия:

$$\begin{aligned} r_1(t_n) &= 0.25 \sin(0.25t_n) - 0.65 \sin(0.2t_n) - 0.1 \sin(0.1t_n), \\ r_2(t_n) &= 0.5 \sin(0.3t_n) + 0.2 \sin(0.1t_n), \\ r_3(t_n) &= 0.8 \sin(0.1t_n) - 0.4 \sin(0.2t_n); \end{aligned} \quad (58)$$

- дискретные сигналы возмущения:

$$\begin{aligned} f_1^{(1)}(t_n) &= 0.6(\cos^2(0.8t_n) - 1), f_1^{(2)}(t_n) = 0.6 \cos(0.1t_n) \sin(0.2t_n); \\ f_2^{(1)}(t_n) &= 0.4 \cos(0.3t_n) \sin(0.08t_n), f_2^{(2)}(t_n) = 0.1 \sin(0.15t_n); \\ f_3^{(1)}(t_n) &= 0.8 \sin^2(0.2t_n), f_3^{(2)}(t_n) = 0.8 \sin(0.3t_n) - \cos(0.2t_n). \end{aligned} \quad (59)$$

Введем для гибридной системы шаг дискретизации  $\lambda = 0.000137$ , тогда ее динамические характеристики при подобранных эвристическим путем параметров регулятора (50) примут вид, представленный на рисунках 7, 8.

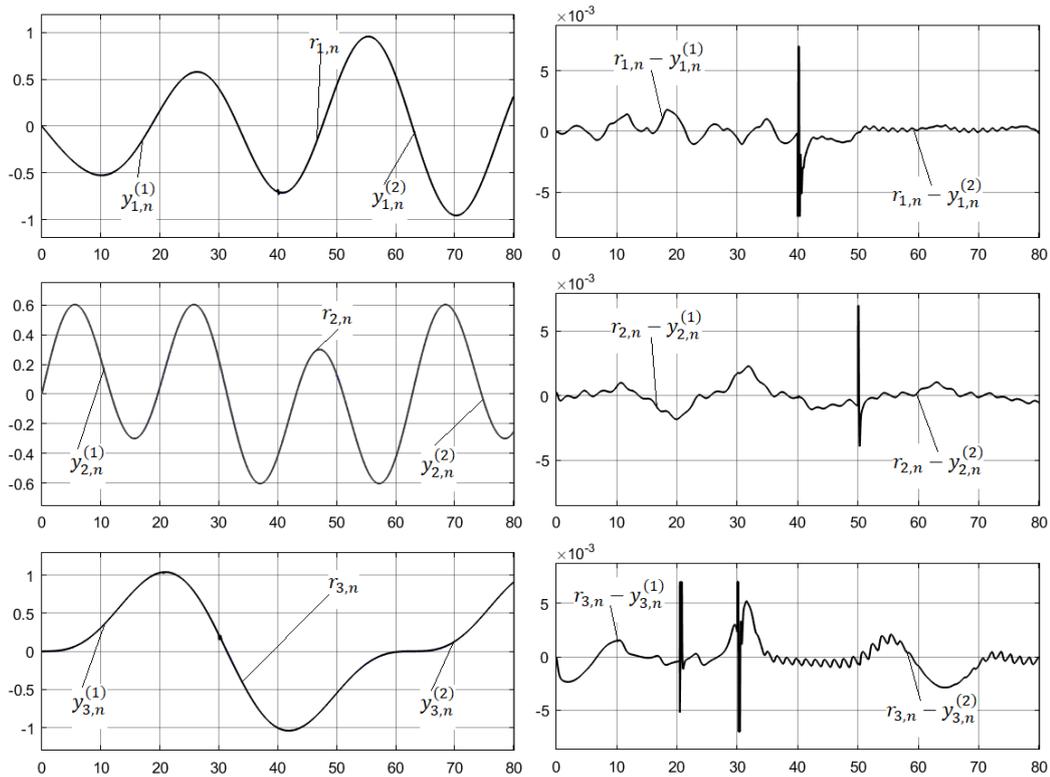


Рисунок 7 – Динамика задающих воздействий, выходных сигналов и отклонений сепаратных подсистем гибридной системы

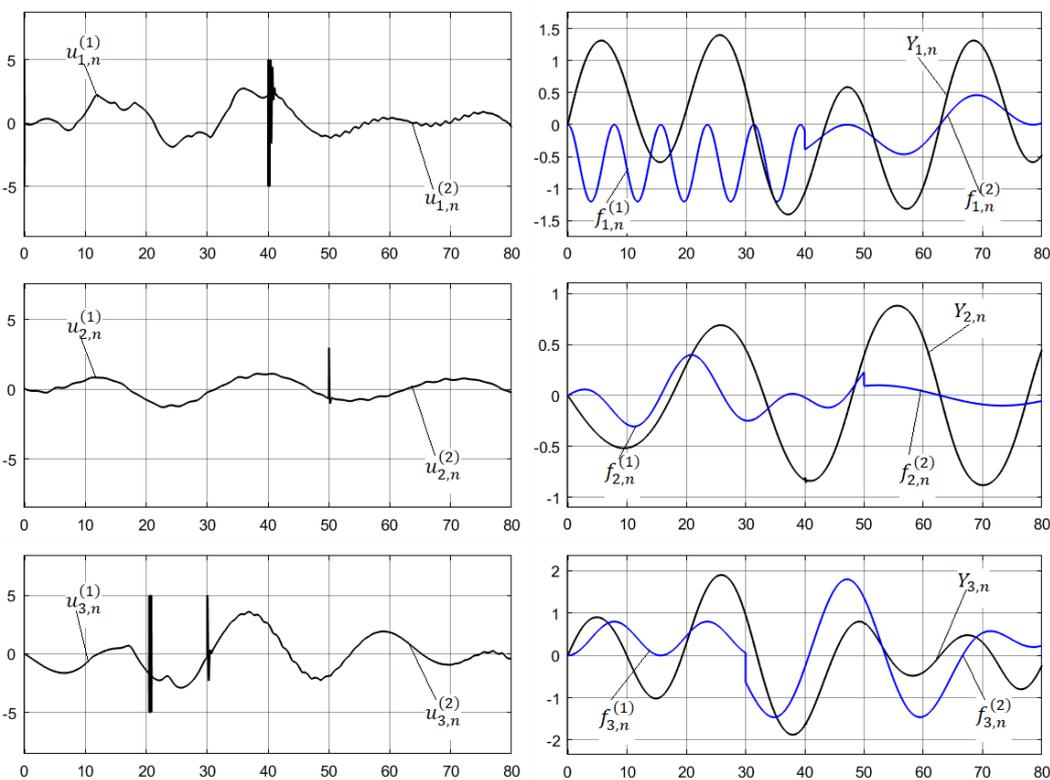


Рисунок 8 – Динамика управляющих воздействий, возмущений и перекрестных связей гибридной системы

Ошибка рассогласования при заданном значении шага дискретизации достаточно мала 0.005, что свидетельствует о достаточно точной работе спроектированной гибридной системы управления. Однако, дальнейшее увеличение шага дискретизации приводит к значительным ухудшениям в работе системы, и в конечном итоге делает ее неустойчивой.

Таким образом, разработанная гибридная система децентрализованного комбинированного управления имеет высокое качество работы в случае задания достаточно малого шага дискретизации.

*Выводы по главе.*

Во второй главе описана математическая модель многосвязного нестационарного объекта с переключениями, функционирующего в условиях параметрической и структурной неопределенности.

В рамках критерия гиперустойчивости и условий L-диссипативности синтезирована непрерывная система децентрализованного комбинированного управления, которая по результатам проведения вычислительного эксперимента показала высокое качество функционирования.

Синтезированная непрерывная система управления была преобразована в непрерывно-дискретную (гибридную) с помощью метода непрерывных моделей. Гибридная система в вычислительном эксперименте также показала высокое качество управления при задании достаточно малого шага дискретизации.

### 3 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В данной главе осуществляется подбор параметров для разработанной во второй главе структуры децентрализованного комбинированного регулятора.

В первом разделе рассматриваются различные подходы для осуществления параметрического синтеза, среди которых выделяется генетический алгоритм оптимизации. Во втором разделе описывается, каким образом генетический алгоритм оптимизации осуществляет поиск параметров регулятора. В третьем, заключительном, разделе данной главы проводится вычислительный эксперимент с генетическим алгоритмом оптимизации.

#### **3.1 Описание принципа работы генетического алгоритма оптимизации**

Во второй главе данной работы для многосвязного и многорежимного объекта удалось синтезировать структуру децентрализованного комбинированного регулятора в рамках критерия гиперустойчивости и условий L-диссипативности. Однако, чтобы синтезированная система управления была не просто работоспособной, но и имела высокое качество управления, необходимо выбрать правильные значения параметров ее регулятора.

В большинстве работ [1, 3, 4, 18, 27] подбор параметров регулятора осуществлялся эвристическим методом поиска, на основе которого разработчик проводил ряд вычислительных экспериментов, пока не получал «удовлетворительное» качество работы системы. Такой метод имеет две существенные проблемы. Первая – значительные временные затраты на проведение математического моделирования. Вторая проблема – большая вероятность нахождения псевдооптимального решения.

Максимальная точность и эффективность работы системы будет достигнута только при решении данных проблем, поэтому имеет место рассмотреть другие подходы параметрического синтеза.

В настоящее время выделяют достаточно большое количество методов оптимизации. Среди них можно выделить два класса: методы, направленные на нахождение локального экстремума, и методы, позволяющие определить глобальный экстремум.

Первый класс включает: метод Розенброка, метод поиска по симплексу, метод Хука-Дживса, метод координатного спуска, процедура Кифера–Вольфовица и др. В случае рассмотрения многомерных и мультимодальных задач данные методы сталкиваются с проблемой преждевременной сходимости – нахождение локального экстремума вместо глобального.

Второй класс – методы глобальной оптимизации подразделяются на детерминированные и стохастические. Детерминированные методы используются, когда исходная информация о задаче оптимизации определена однозначно. К ним относятся: метод множителей Лагранжа, методы градиентного поиска – алгоритм Гомори (еще называют метод отсекающих плоскостей), метод ветвей и границ. Они могут определить глобальное решение задачи посредством поиска на всем допустимом множестве, однако с повышением размерности задачи приводят к значительным и неоправданным временным затратам. Стохастические алгоритмы позволяют уйти от проблем детерминированных методов. В основу данных алгоритмов заложена итерационная процедура приближения к точке предполагаемого оптимума. К числу стохастических методов относятся: оптимальные алгоритмы; алгоритмы, моделирующие биологические и физические процессы – метод виртуальных частиц, алгоритм имитации отжига, метод роя частиц, генетические алгоритмы. В данной работе предлагается провести параметрический синтез адаптивно-робастного регулятора, используя стохастический метод глобальной оптимизации – генетический алгоритм (ГА).

В 1975 году Джоном Холландом был предложен алгоритм, основанный на изучении эволюции и происхождении видов Ч. Дарвина, который получил название «Репродуктивный план Холланда» [28]. Его идею в дальнейшем раз-

вили ученики: Кеннет Де Йонг и Дэвид Голдберг – и именно алгоритм Голберга получил название «генетический алгоритм» оптимизации. ГА успешно применяется в таких областях, как физика, экономика и технические науки, благодаря следующим своим достоинствам:

- ГА в процессе своей работы использует только данные о допустимых значениях параметров и целевой функции, что делает его достаточно универсальным средством оптимизации для широкого класса задач;

- ГА просты в реализации;

- ГА позволяют преодолеть опасность попадания в локальный экстремум;

- ГА имеет устойчивость к динамическим изменениям.

Данный алгоритм оптимизации не гарантирует, что найденное решение будет оптимальным, но он выберет одно из лучших решений, которое возможно получить за заданное время.

ГА – алгоритм оптимизации, сочетающий в себе механизм генетического наследования и естественного отбора. При описании принципа его работы сохраняется биологическая терминология, поэтому стоит ввести определение нескольких основных понятий:

- особь – пробное решение, записанное в двоичном виде;

- ген – каждая позиция (или бит) особи;

- популяция – набор особей;

- приспособленность – критерий или функция, экстремум которой необходимо найти.

Итак, основываясь на вышеописанной терминологии можно представить 4 основных этапа работы ГА.

1 этап – определение начальной популяции особей.

Начальная популяция состоит из заданного количества особей, для которых набор генов был сгенерирован случайным образом.

2 этап – вычисление функции приспособленности.

Для каждой сгенерированной на предыдущем этапе особи ставится в соответствие значение оценки качества, или функции приспособленности. Именно эти значения помогают понять, какая из рассматриваемых особей наиболее приспособленная.

3 этап – генерация наиболее приспособленных особей.

Здесь можно выделить 4 основных операции:

- катаклизм;
- скрещивание;
- мутация;
- селекция.

Операция «катаклизм» проводит проверку популяции на неоднородность. Она запускается в том случае, когда возникает большая вероятность попадания полученного решения в зону локального экстремума.

Операция «скрещивания», или ее еще называют «кроссовер» – обмен генами между двумя случайными особями с формированием нового поколения.

Операция «мутация»: производится после операции скрещивания с целью избежать появления единственного генотипа – локального минимума. На данном этапе формируется заданное число мутантов в популяции, образующихся по средствам операции мутации.

Операция «селекция» представляет собой отбор наиболее приспособленных особей из популяции на основе полученных значений их функций приспособленности.

4 этап – отбор наиболее приспособленной особи.

Среди результирующей популяции, полученной на третьем этапе, выделяется особь с наименьшим значением функции приспособленности.

Генетически алгоритм оптимизации носит итерационный характер. Остановка работы алгоритма происходит за счет достижения одного из условий:

- найдено оптимальное решение;
- пройдено заданное число поколений.

Таким образом, после рассмотрения основных принципов работы ГА, можно перейти к задаче оптимизации для синтезированных ранее во второй главе дискретных и непрерывных регуляторов.

### **3.2 Генетический алгоритм в задаче параметрического синтеза децентрализованных комбинированных систем управления**

ГА оптимизации позволяет решить задачу параметрического синтеза систем непрерывного и гибридного децентрализованного комбинированного управления [29, 30]. Для этого необходимо понять взаимосвязь между терминологией, принципами алгоритма и постановкой задачи поиска параметров регуляторов:

- особь – набор параметров децентрализованного комбинированного регулятора. Параметры представляются в двоичной или десятичной форме в зависимости от текущего этапа. Так на этапе применения генетических операции особь представляется в двоичной (битовой) форме (конкатенация двоичных представлений коэффициентов регулятора), а при вычислении функции приспособленности – в десятичной форме. Наборы коэффициентов генерируются в заданных разработчиком пределах;

- оценить качество работы системы и, соответственно, задать фенотип каждой особи (т.е. сопоставить каждой особи числовое значение), можно с помощью обобщенного критерия систем автоматического управления (САУ):

$$I = \int_0^t (e_i^T(\zeta) \cdot Q \cdot e_i(\zeta) + u_i^T(\zeta) \cdot R \cdot u_i(\zeta)) d\zeta, \quad (60)$$

где  $i$  – номер подсистемы МОУ;

$Q = Q^T > 0$ ,  $R = R^T > 0$  – положительно определенные матрицы соответствующего размера;

$e_i(t)$  – ошибка рассогласования выходов ПОУ и задающих воздействий;

$u_i(t)$  – локальные контуры управления, который позволяет обеспечить энергоэффективное функционирование системы при сохранении ее быстродействия;

- остановить работу алгоритма можно двумя способами: во-первых, задав параметр – максимальное число поколений, во-вторых, задать минимального значение функции приспособленности;

- вычислить значение функции приспособленности для полученных особей можно с помощью проведения имитационного моделирования. Для этого в S-модель (рисунок Б.2) добавляется блок оценки параметров (см. рисунок 9, где представлен пример для трехсвязного объекта), математическая запись которого представлена в формуле (60).

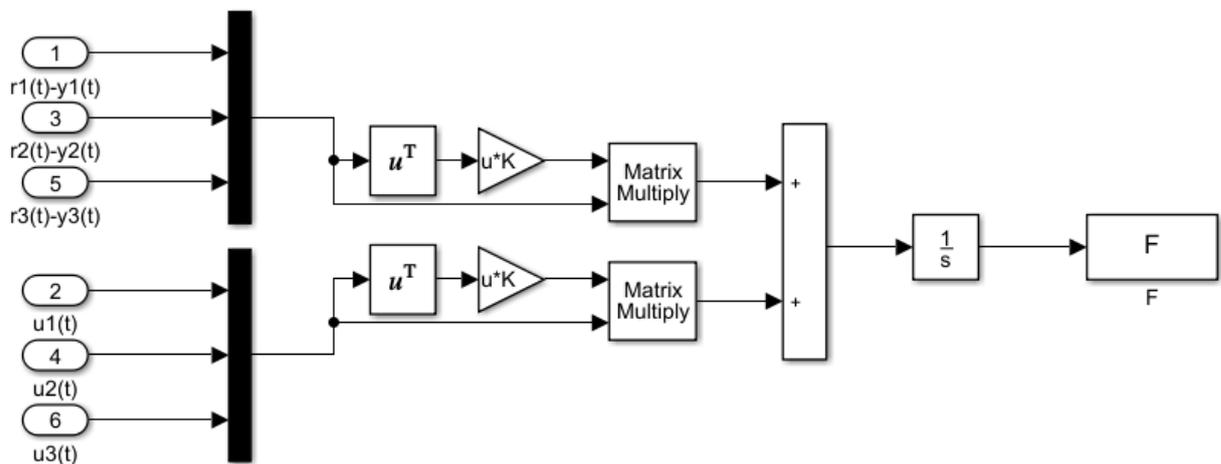


Рисунок 9 – Схема блока оценки

Таким образом, для работы ГА оптимизации необходимо:

- Matlab-файл с кодом [30], реализующим логику работы ГА и передающим коэффициенты регулятора в Simulink-модель системы управления;
- Simulink-модель вычисляет значение функции приспособленности по полученным параметрам регулятора и отправляет результат в программный код ГА.

Более подробно, реализация алгоритма для поиска параметров децентрализованного комбинированного регулятора на основе представленной выше информации опишется следующим образом.

*Первый этап* – формирование начальной популяции особей.

Начальная популяция формируется на основе нескольких входных параметров, контролируемых непосредственно разработчиком перед запуском программного кода ГА:

- количество оптимизируемых переменных:  $Nk = l \cdot 6$ , причем  $l$  – количество подсистем МОУ;
- величина битовой последовательности для каждого коэффициента:  $Nb$ ;
- минимальные и максимальные значения коэффициентов регулятора:  $K_{\min}, K_{\max}$ ;
- количество особей в популяции:  $N$ .

В итоге формируются  $N$  случайных особей, представляющих собой битовые последовательности длины  $Nk \cdot Nb$ . Для каждого набора коэффициентов ставится в соответствие функция приспособленности (60), получаемая в процессе имитационного моделирования системы.

*Второй этап* – применение генетических операторов.

Операция «катаклизм» уничтожает все особи, кроме наиболее приспособленной, а на место утраченных особей формирует новые. Данная операция осуществляется в двух случаях: во-первых, если наступил максимальный период катаклизма –  $A_{ct}$ , во-вторых, если значение неоднородности ряда ниже заданной переменной  $L_{ct}$ .

На этапе операций «скрещивания» выделяются две особи из популяции, отличающиеся друг от друга более чем на два бита, и случайным образом определяется кодовый участок для обмена. В результате обмена образуются две новые особи, унаследовавшие гены от обоих родителей. Новые особи-потомки добавляются в общую популяцию. Количество скрещиваний определяется значением параметра –  $Ns$ .

На этапе операции «мутация» для произвольно выбранной особи с заданной вероятностью  $I_m$  происходит замена каждого бита генотипа и формирование новой особи, которая, как и в операции скрещивания, помещается в

конец начальной популяции. Количество мутации в популяции определяется параметром –  $Nm$ .

На этапе операции «селекция» происходит отбор наиболее приспособленных и уникальных особей. Если существуют идентичные особи, то они заменяются на случайные.

Второй этап заканчивается при прохождении всех поколений  $Cycles$  или при достижении одной из особей значения функции приспособленности, меньшее, чем пороговое значение  $J$ .

*Третий этап* – выбор наиболее приспособленной особи.

Среди результирующего поколения методом сортировки по значению функции приспособленности выбирается финальный вектор коэффициентов регулятора  $K$ .

Вышеописанный принцип работы генетического алгоритма оптимизации может быть представлен схематично на рисунке 10.

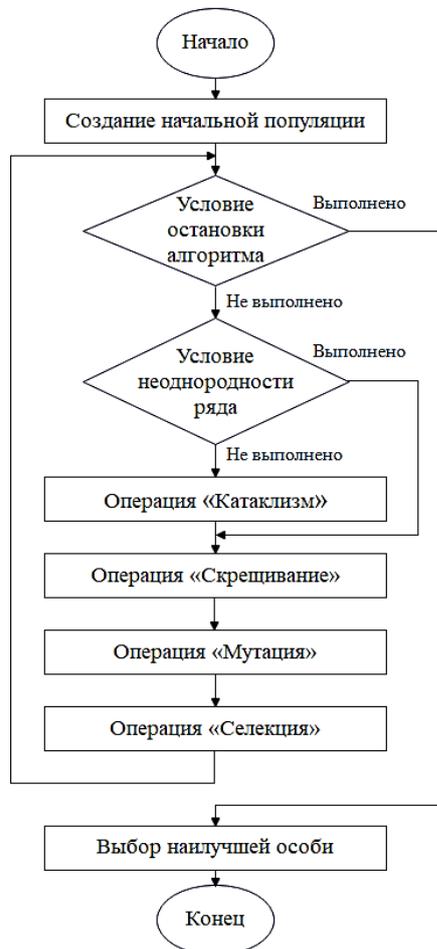


Рисунок 10 – Схема реализации ГА

Таким образом, при выполнении всех этапов ГА оптимизации можно определить оптимальные параметры синтезированного ранее децентрализованного комбинированного регулятора.

### 3.3 Пример имитационного моделирования

На данном этапе работы для непрерывной системы управления (40) – (50) осуществим подбор значений параметров разработанных непрерывных контуров управления (39) с помощью ГА. Сравним результаты работы эвристического метода поиска (смотрим раздел 2.4) и генетического подхода параметрической оптимизации. После чего, вводя шаг дискретизации, выполним моделирование гибридной системы управления с оптимальными параметрами регулятора.

Для поиска параметров регулятора с использованием генетического метода, необходимо задать перечень его основных параметров, как показано в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры генетического алгоритма

<i>№</i>	<i>Наименование параметра ГА</i>	<i>Значение параметра ГА</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1	Общее количество оптимизируемых переменных	$Nk = 18$
2	Максимальные значения переменных закона управления	$K_{max} = \begin{bmatrix} 500; 3000; 500; 3000; \\ 2000; 600; 500; 3000; \\ 500; 3000; 2000; 600; \\ 500; 3000; 500; 3000; \\ 2000; 600 \end{bmatrix}$
3	Минимальные значения переменных закона управления	$K_{min} = \begin{bmatrix} 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; \\ 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1 \end{bmatrix}$
4	Длина переменных в битах	$Nb = 12$
5	Количество поколений	$Cycles = 30$
6	Количество лучших особей в популяции	$N = 30$
7	Параметры матриц обобщенного критерия качества САУ	$Q = \begin{pmatrix} 20 & 20 & 30 \\ 20 & 50 & 10 \\ 30 & 10 & 50 \end{pmatrix}, R = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}$

Большая часть из представленных параметров напрямую зависит от количества рассматриваемых контуров управления. Остальные параметры (в

данном случае представлены лишь два наиболее важных: количество поколений и лучших особей) не зависят от типа рассматриваемых систем и связаны лишь со спецификой работы алгоритма.

По результатам запуска алгоритма оптимизации получаем следующие коэффициенты децентрализованного комбинированного регулятора (39):

$$\begin{aligned}
 h_{11(1)} &= 135.7207, h_{12(1)} = 7.5786, h_{21(1)} = 422.6736, \\
 h_{22(1)} &= 309.6680, h_{31(1)} = 710.4802, h_{32(1)} = 354.1741; \\
 h_{11(2)} &= 2591.4, h_{12(2)} = 223.4546, h_{21(2)} = 1666.7, \\
 h_{22(2)} &= 580.6963, h_{31(2)} = 1770.7, h_{32(2)} = 282.1748; \\
 h_{11(3)} &= 1054.6, h_{12(3)} = 311.9004, h_{21(3)} = 1847.2, \\
 h_{22(3)} &= 80.2622, h_{31(3)} = 2456.02, h_{32(3)} = 81.4053.
 \end{aligned}
 \tag{61}$$

Сравним динамические характеристики непрерывных систем управления с параметрами, подобранными эвристическим путем и с помощью ГА. Результаты полученных ошибок рассогласования представим на рисунке 11.

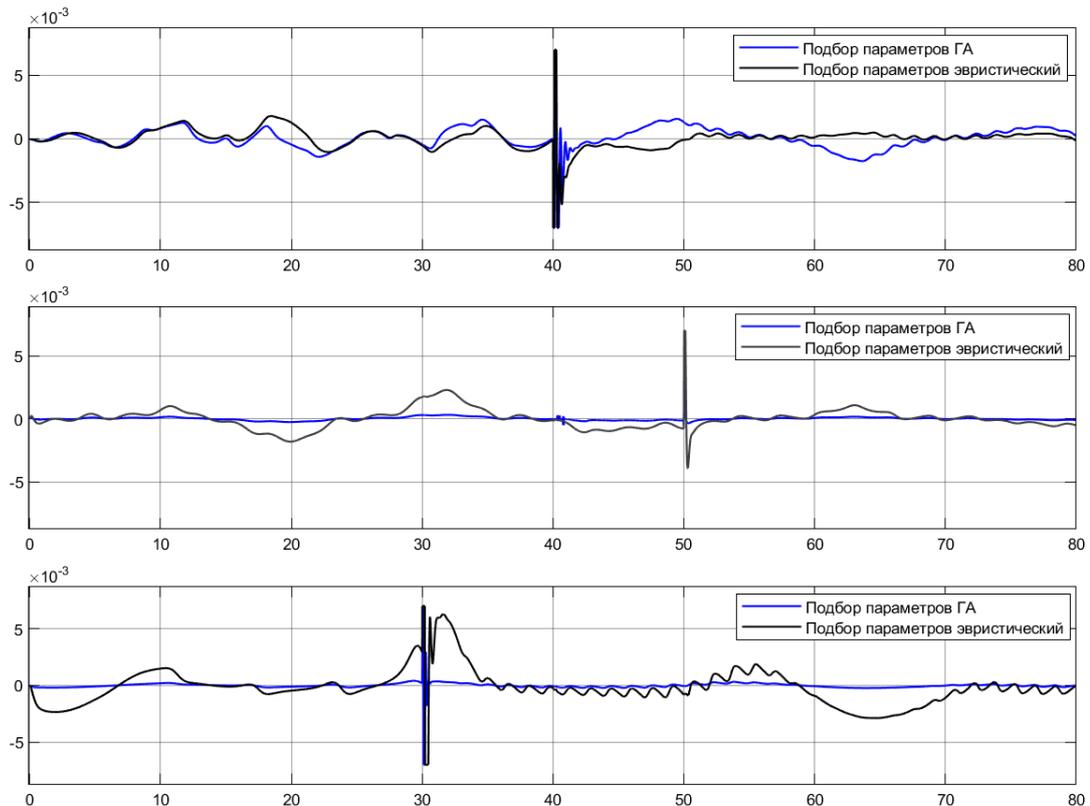


Рисунок 11 – Ошибки рассогласования, полученные в результате работы ГА и эвристического метода поиска

На рисунке 12 представлено сравнение управляющих воздействий, сформированных при использовании ГА оптимизации и метода эвристического поиска.

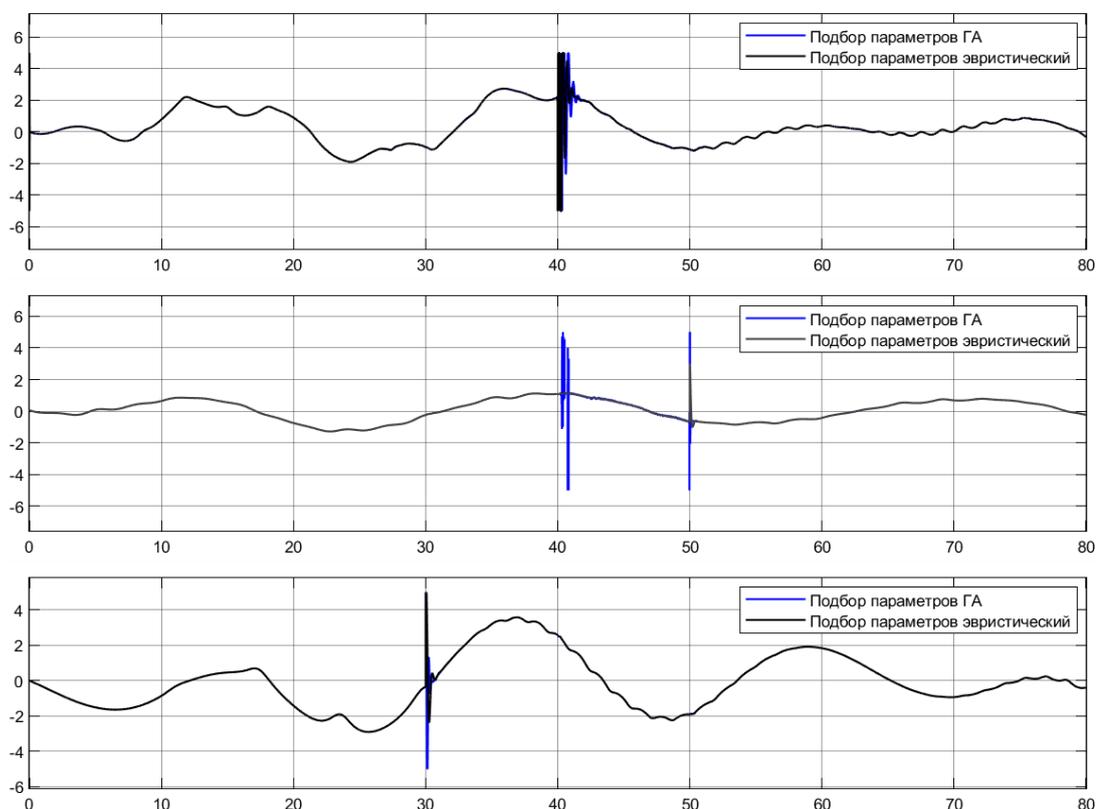


Рисунок 12 – Управляющие воздействия при использовании ГА и эвристического метода поиска

В результате сравнения видно, что наибольшую эффективность работы имеет ГА оптимизации. Спустя 80 с работы значение обобщенного критерия качества САУ (60) для эвристического подхода стало равно  $I = 4.3260e + 04$ , а для генетического составило  $I = 1.8855e + 04$ .

Далее, преобразуем оптимизированную непрерывную систему управления в гибридную, задав максимально возможный шаг дискретизации  $\lambda = 0.00003$ . В результате проведения математического моделирования получаем следующие характеристики, представленные на рисунках 13, 14.

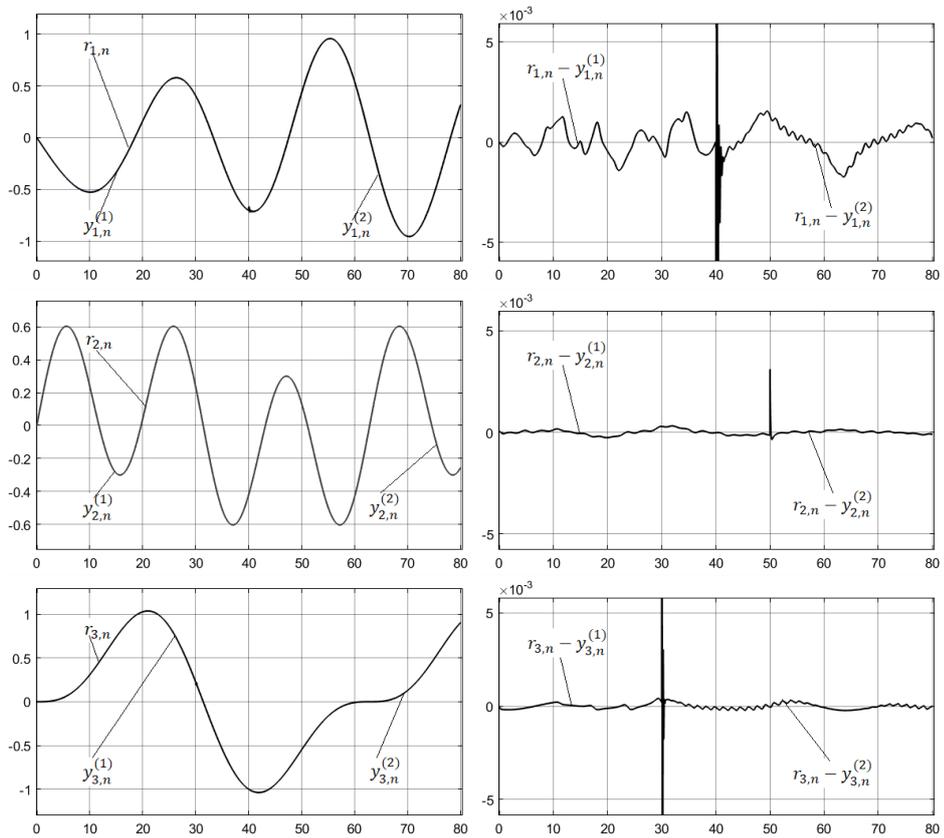


Рисунок 13 – Ошибки рассогласования гибридной системы управления

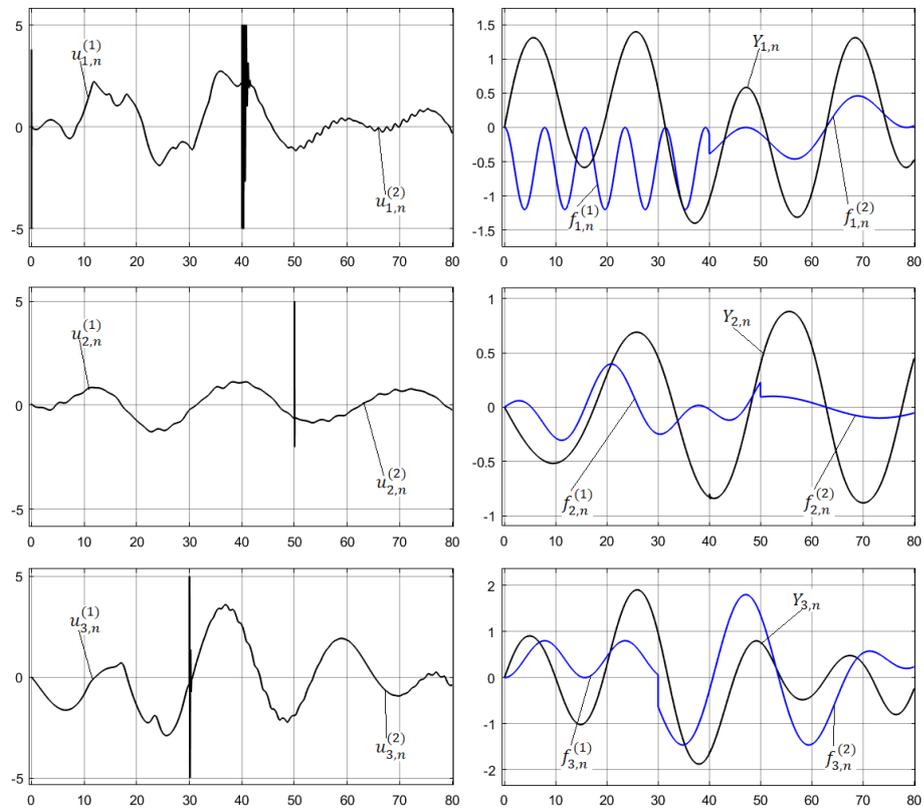


Рисунок 14 – Управляющие воздействия гибридной системы управления, перекрестные связи и возмущения

Таким образом, ГА оптимизации для систем децентрализованного комбинированного управления классом многосвязных и многорежимных объектов, показал достаточно высокую эффективность работы. При этом, если сравнивать результаты работы непрерывных систем управления – рисунок 11, ГА оптимизации показал наименьшее значение обобщенного критерия САУ, что говорит о его лучшей работоспособности в сравнении с эвристическим методом поиска.

*Выводы по главе.*

В первом разделе данной главы были рассмотрены существующие методы параметрической оптимизации, а также изложены общие сведения о принципе работы ГА.

Во втором разделе данной главы генетический алгоритм рассматривается, как метод параметрического синтеза децентрализованного комбинированного регулятора.

В третьем разделе главы проведен вычислительный эксперимент, показавший высокую эффективность работы ГА оптимизации в сравнении с эвристическим методом поиска.

## 4 MATLAB-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной главе разрабатывается пакет прикладных программ для проведения имитационного моделирования систем непрерывного и дискретного децентрализованного комбинированного управления многосвязными и многорежимными объектами.

В первом разделе главы осуществляется выбор наиболее эффективного средства математического моделирования. Во втором разделе описываются возможности приложения, а в третьем и четвертом разделах описан процесс его разработки. Завершающим этапом выступает тестирование программного средства.

### 4.1 Анализ среды разработки Matlab-Simulink

Важным этапом исследования систем управления является проведение имитационного моделирования. С его помощью можно оценить качество работы системы управления. С этой целью в данной главе предлагается рассмотреть наиболее востребованные программные средства для моделирования и оценить их по следующим критериям: удобный интерфейс, высокая функциональность, низкая стоимость (или бесплатный продукт), высокая надежность и скорость, большой объем документации по использованию программы, легкие в изучении.

Среди большого многообразия программных пакетов, предназначенных для проведения математического моделирования, можно выделить наиболее распространенные и сравнить их (см. Таблица 2): Matlab, Mathematica, MathConnex, GNU Octave, Jigrein, VisSim и Scilab/Xcos.

По результатам анализа преимущество имеют два программных продукта Scilab и Matlab. Оба являются мощными инструментами для осуществления инженерных и научных расчетов. Но, несмотря на это, среда разработки Scilab имеет малое количество инструментов для редактирования блочных

диаграмм и симуляции, что может в дальнейшем усложнить разработку специфических и более сложных систем. Главным же недостатком второго обеспечения Matlab выступает его высокая стоимость. В связи с проведением проекта в рамках учебной программы данный критерий теряет свою актуальность, так как высшее учебное заведение предоставляет студентам возможность бесплатно пользоваться данной средой разработки. Таким образом, лучшим программным продуктом для проведения имитационного моделирования становится пакет прикладных программ Matlab.

Таблица 2 – Сравнительный анализ программных продуктов

	Mathematica	MathConnex	GNU Octave	Jigrein	VisSim	Scilab/Xcos	Matlab
Интерфейс	-	-	-	+	+	+	+
Функциональность	+-	+	-	+-	+-	+	+
Стоимость	+	+	+	-	-	+	+-
Надежность	-	+-	+-	+	+	+-	+
Скорость	-	-	-	+	+	+	+
Документация	+	-	-	+	+-	+	+
Обучаемость	-	-	+	+	+	+-	+

Одной из основных особенностей системы Matlab является наличие в ней наглядного и эффективного средства составления программных моделей – Simulink, включающего ряд особенностей: обширной библиотеке компонентов для изучения и модификации; мгновенном изменении математического описания модели при вводе в нее новых блоков; возможности задания в блоках произвольных математических выражений, что позволяет описывать работу различных систем и устройств; возможность моделирования в реальном масштабе времени; интеграции не только с системой Matlab, а также с иными пакетами расширения.

Таким образом, используя среду разработки Matlab-Simulink можно приступить к разработке приложения для проведения имитационного моделирования синтезированных систем управления.

## 4.2 Описание программного продукта

Как было показано ранее во второй главе, рассматриваются два вида систем управления: непрерывная и гибридная, для каждой из которых имеется возможность применить ГА оптимизации параметров. Проводить имитационное моделирование таких систем можно непосредственно в пакете Simulink, однако их довольно сложная и громоздкая структура требует от исследователя довольно высокого уровня подготовки. Поэтому предлагается создать прикладное программное обеспечение, в котором по средствам простого интерфейса можно будет провести ряд вычислительных экспериментов для рассматриваемых подсистем.

Программное обеспечение, для эффективной работы пользователя, должно предоставлять следующие основные функции:

- интерактивный режим задания переменных следующих систем: непрерывной системы управления и гибридной системы;
- оптимизация параметров выбранной системы управления на основе генетического алгоритма;
- графическое представление динамических характеристик заданных систем управления.

Для его разработки Matlab предоставляет два средства создания приложений:

- полуавтоматический способ с помощью инструмента GUI Layout Editor;
- «Ручной» программный способ создания GUI – GUI programmatically.

За счет «динамики» в работе приложения, легче создавать код вторым способом. Код при таком способе лучше структурирован, а создавать новые элементы и удалять старые становится проще. При этом нет разделения программного кода и интерфейса, затрудняющего его обновление, как это имеется в первом средстве – GUIDE.

Приложение, для выполнения поставленной перед ним задачи, строится на основе двух компонент:

- GUI-приложения, упрощающего работу пользователя с S-моделью и позволяющего в интерактивном режиме выбирать путь проведения исследования;
- Simulink-моделей, непосредственно моделирующих динамические процессы в непрерывных и гибридных системах управления.

Рассмотрим каждый компонент в отдельности.

Пользователь напрямую работает только с *GUI-приложением*, поэтому здесь можно выделить потоки данных, с которыми он работает. Функциональная модель приложения представлена на рисунке 15.

Входные данные GUI-приложения:

- параметры системы управления: параметры объекта, децентрализованного комбинированного регулятора, параметры постоянных времени ФК;
- общие параметры настройки модели: время моделирования, закон, относительная и абсолютная точность, шаг дискретизации;
- параметры генетического алгоритма оптимизации: значение функции принадлежности, число оптимизируемых переменных, количество поколений, размер популяции, максимальные и минимальные значения переменных, параметры обобщенного критерия качества.

В соответствии с введенными входными параметрами на выходе приложения формируются:

- динамические характеристики системы управления: сигналы выходов подсистем объекта управления, сигналы задающих воздействий, ошибок рассогласования, а также сигналы перекрестных связей и внешний возмущений, сигнал управления;
- Simulink-модель с определенными параметрами.



Рисунок 15 – Функциональная модель интерактивного приложения в нотации IDEF0

Декомпозиция первого уровня для описанной функциональной модели включает три основных блока (см. рисунок 16):

- создание окон интерактивного приложения: окно-меню, окно задания параметров объекта управления, окно задания параметров системы управления, окно вывода динамических характеристик;
- редактирование S-модели в соответствии с входными данными;
- запуск параметрической оптимизации.



Рисунок 16 – Декомпозиция первого уровня функциональной модели интерактивного приложения

Второй компонент, необходимый для функционирования приложения – *Simulink-модель*. Как видно из рисунка 16, все параметры рассматриваемой пользователем системы управления поступают непосредственно в Simulink-модели, и именно здесь формируются ее динамические характеристики.

Таким образом, для полноценного функционирования прикладного программного обеспечения необходимо разработать: GUI-приложение, которое принимает введенные пользователем входные параметры системы управления и выводит ее динамические характеристики; набор Simulink-моделей, генерирующих динамические характеристики систем управления заданных в приложении пользователем.

### 4.3 Этапы практической разработки Matlab-приложения

В данном разделе рассмотрим этапы разработки непосредственно интерактивного приложения, включающего 5 видов графических окон, как это представлено на рисунке 17.

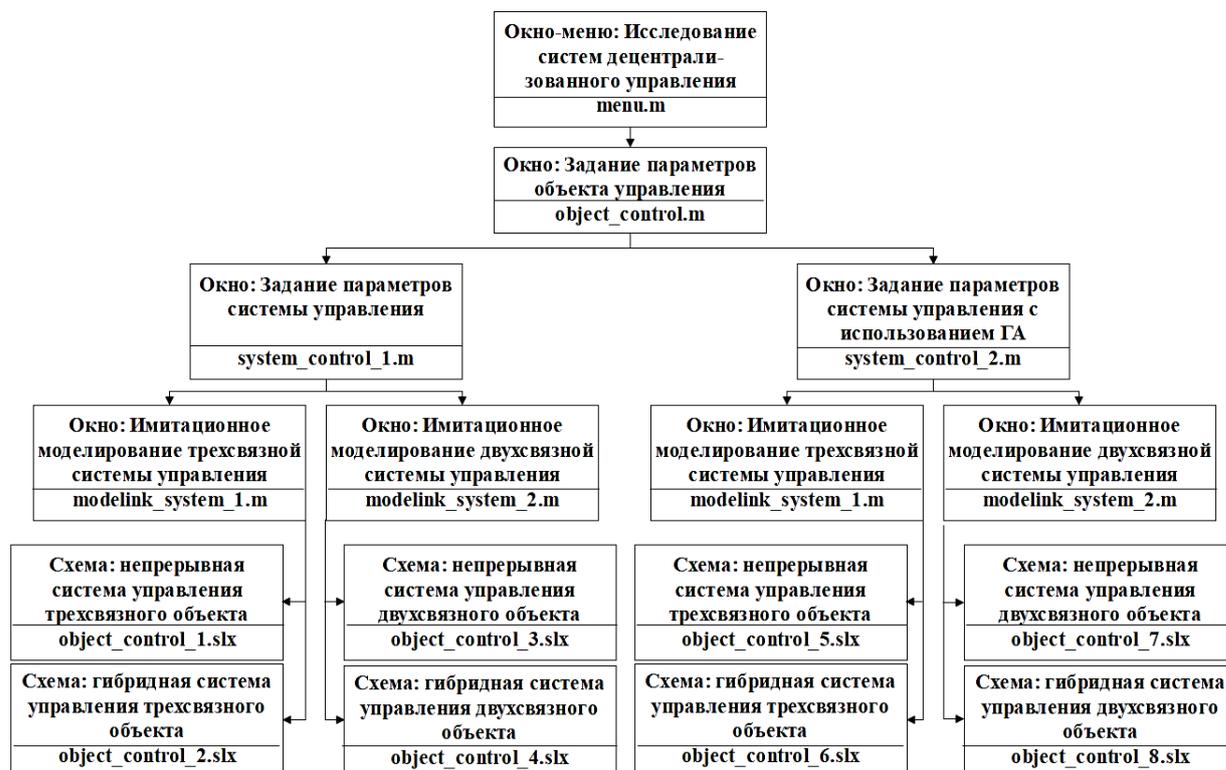


Рисунок 17 – Структура программного комплекса

Matlab предоставляет широкие возможности при создании приложений. Одной из таких возможностей выступает разнообразие компонентов и их

свойств. В разрабатываемом приложении будут использованы только некоторые, основные, компоненты.

Компонент 1: «pushbutton» – кнопка.

Компонент 2: «edit» – редактируемый текст. Предназначен для ввода и редактирования входной информации.

Компонент 3: «text» – не редактируемый текст. Объясняет назначение динамических элементов, его можно изменить программно, но не интерактивно, с клавиатуры.

Компонент 4: «checkbox» – флажок. Данный компонент является динамическим элементом управления, он поддерживает обратную связь, а также служит аналогом бинарного переключателя

Компонент 5: «combobox» – выпадающее меню. Меню может содержать большое количество строковых значений и скрывать их на экране, тем самым позволяя пользователю эффективно использовать имеющееся рабочее пространство.

Компонент 6: «axes» – координатные оси. Данный элемент предназначен для визуализации динамических характеристик.

При работе с данными компонентами использовались следующий ряд свойств.

Свойство 1: «Style» – задает тип компонента.

Свойство 2: «Position» – задает расположение компонентов и их размеры.

Свойство 3: «FontSize» – задает размер шрифта.

Свойство 4: «String» – задает текст внутри компонента.

Свойство 5: «Tag» – задает имя компонента.

Свойство 6: «Callback» – указывает на событие, выполняемое при взаимодействии с компонентом.

Используя данные компоненты и их свойства, создается Matlab-приложение, включающее:

*Окно-меню «Исследование систем децентрализованного управления».*

Основная задача: представить пользователю типы исследуемых систем управления.

Данное окно включает в себя следующие поля и их типы:

- поле типа «Text»: с его помощью задается название окна, обозначаются типы систем управления. В окне расположено 12 элементов данного типа;
- поле типа «combobox»: позволяет выбрать структуру объекта управления (трехсвязный объект управления, двухсвязный, стационарный или нестационарный). В окне расположено два поля данного типа для непрерывной системы управления и гибридной;
- поле типа «checkbox»: позволяет указать метод осуществления параметрического синтеза. Имеется 4 поля данного типа;
- поле типа «Button»: с их помощью осуществляется переход к следующему окну приложения. Расположено 2 кнопки, одна из которых передает данные о непрерывной системе, а другая – гибридной.

Окно имеет основную функцию `My_interface_menu`, которая запускает приложение и создает графический интерфейс первого окна.

Данная функция, взаимодействует с рядом дополнительных (функций-обработчиков событий):

Функция 1: `function BtnPlotCallback1_menu` – запускает следующее окно приложения и передает ему параметры: номер выбранной пользователем схемы, название алгоритма параметрического синтеза.

Функция 2: `function BtnPlotCallback2_menu` – запускает следующее окно приложения и передает ему параметры: номер выбранной пользователем схемы, название алгоритма параметрического синтеза, дискретный сигнал.

*Окно «Задание параметров объекта управления».*

Основная задача: задание параметров объекта управления разных типов. Здесь рассматривается возможность работы с двухканальным и трехканальным объектом управления, в подсистемах которого происходит по 1 или 2 переключениям. Данное окно включает в себя следующие поля и их типы.

Поле типа «Text»: задается заголовок окна, а также надписи для остальных полей. В данном окне 12 полей данного типа.

Поле типа «combobox»: задает номер подсистемы объекта управления, а также номер переключения.

Поле типа «edit» предназначено для задания параметров объекта управления. В данном окне имеется семь полей данного типа: зависящих от номера подсистемы – время переключения, сигнал задающего воздействия, сигнал перекрестной связи, а также зависящих от номера подсистемы и номера переключения: матрица  $A$ , вектор  $B$ , временные функции, сигнал внешнего возмущения.

Поле типа «Button»:

- «Сохранить» – сохраняет все записанные в полях edit переменные в отдельный файл;
- «Очистить» – удаляет данные из редактируемых полей;
- «Открыть» – позволяет открыть ранее сохраненных файлы для данного окна;
- «Запуск» – осуществляет переход к следующему окну приложения, в зависимости от типа параметрического синтеза.

Окно имеет основную функцию `My_interface_pr`, которая запускает приложение и создает графический интерфейс второго окна.

Первая группа функций – обработчиков событий предназначена для обновления и сохранения введенных пользователем значений в `WorkSpace`: `function EdtPlotCallback1_interface` по `function EdtPlotCallback7_interface`

Вторая группа обновляет значения полей в зависимости от задания номера подсистемы: `function PopPlotCallback1_interface`, и в зависимости от номера переключения: `function PopPlotCallback2_interface`.

Третья группа – функции, реагирующие на нажатие кнопок:

- `VtnPlotCallback1_interface` – сохраняет переменные полей edit в файл типа `mat`;

- BtnPlotCallback2\_interface – очищает содержимое полей edit и удаляет созданные с его помощью переменные рабочего пространства;
- BtnPlotCallback3\_interface – передает данные о количестве подсистем в объекте, о сигнале дискретизации и об используемом типе задания параметров;
- BtnPlotCallback4\_interface – позволяет передать значение файла mat в поля edit и создать соответствующие переменные в Workspace.

*Окно «Задание параметров системы управления».*

Основная задача: задать параметры системы управления, а также общие параметры настройки схемы.

Данное окно включает в себя следующие поля и их типы.

Поле типа «Text»: задается заголовок окна, а также надписи для остальных полей. В данном окне 24 поля данного типа.

Поле типа «combobox»: определяет номер подсистемы, для которой задаются параметры фильтр-корректора и комбинированного регулятора; с его помощью также осуществляется выбор закона моделирования. Указано три поля данного типа.

Поле типа «edit» предназначено для задания следующих параметров:

- общие настройки схемы: время моделирования, закон, относительная точность, абсолютная точность, шаг дискретизации (появляется только в случае рассмотрения дискретной системы);
- параметры фильтр-корректора: постоянные времени; порядок фильтр-корректора;
- параметры комбинированного регулятора: адаптивные параметры, робастные параметры, параметры ПИ-регулятора.

Поля типа «Button», аналогично предыдущему окну, выполняют действия с переменными: сохранение, удаление, открытие файла и переход в новое окно.

Окно имеет основную функцию `My_interface_SU_pr_1`, которая запускает приложение и создает графический интерфейс третьего окна. У нее также есть дополнительные функции для обработки событий.

Первая группа функций предназначена для обновления и сохранения введенных пользователем значений в `Workspace`: `function EdtPlotCallback1_SU_pr` по `function EdtPlotCallback12_SU_pr`.

Вторая группа обновляет значения полей задания фильтр-корректора и регулятора в зависимости от задания номера подсистемы: `function PopPlotCallback1_SU_pr` и `function PopPlotCallback2_SU_pr`.

Третья группа – функции, реагирующие на нажатие кнопок. Заданы аналогично предыдущему окну, только работают уже с другими полями типа `edit`.

*Окно «Задание параметров системы управления с использованием ГА».*

Данное окно имеет схожую структуру с окном «Задание параметров системы управления», но имеет дополнительную область задания параметров генетического алгоритма:

- значение функции принадлежности;
- число оптимизируемых переменных;
- количество поколений;
- размер популяции;
- минимальные значения переменных;
- максимальные значения переменных;
- параметры обобщенного критерия качества.

Окно запускается с помощью функции `function My_interface_SU_pr`. Дополнительные функции – обработчики событий аналогичны функциям предыдущего окна, однако имеются расхождения.

Поэтому первая группа функций, предназначенная для обновления и сохранения введенных пользователем значений в `Workspace` становится шире: `function EdtPlotCallback1_SU_pr` по `function EdtPlotCallback21_SU_pr`.

Добавляется дополнительное поле типа «Button», запускающее процесс поиска оптимальных параметров function GA\_algorithm. Для запуска передаются параметры ГА, введенные пользователем.

Введенные пользователем в описанные выше графические окна данные, необходимые для запуска Simulink-моделей, преобразуются и сохраняются непосредственно в рабочей области Matlab. После чего, осуществляется запуск Simulink-моделей (см. рисунок 3) и вывод характеристик в последний вид графического окна «Имитационное моделирование системы управления».

*Окно «Имитационное моделирование системы управления».*

Основная задача: графическое представление динамических характеристик системы управления.

Поле типа «Text»: задается заголовок окна, а также надписи для остальных полей. В данном окне 4 поля данного типа.

Поле типа «combobox»: позволяет выбрать подсистему, для которой будет происходить вывод характеристики. В окне представлено одно поле данного типа.

Поле типа «edit»: запись верхнего и нижнего предела функции характеристик. Представлено два поля edit.

Поле типа «checkbox» позволяет осуществить выбор одной или нескольких характеристик:

- ошибка рассогласования;
- сигнал выхода подсистемы объекта управления;
- задающий сигнал;
- сигнал управляющего воздействия;
- сигнал перекрестной связи;
- возмущающее воздействие.

Поле типа «axes»: графически отображает динамические характеристики системы. Количество полей зависит от количества подсистем рассматриваемого объекта управления (по одному на каждый объект).

Поле типа «Button»:

- «Моделирование» – выводит графики характеристик в поле «axes»;
- «Очистить» – удаляет данные из поле типа «axes»;
- «Сохранить» – сохраняет содержимое экрана в виде картинки расширения jpg;
- «Открыть» – осуществляет запуск S-модели рассматриваемой системы.

Окно имеет основную функцию `My_interface_modelink`, которая запускает приложение и создает графический интерфейс пятого окна.

Помимо этого, также присутствуют функции:

- `PopPlotCallback1_modelink` – обновляет значения полей типа «checkbox» и «edit» в зависимости от номера подсистемы;
- `Function RdbPlotCallback1_modelink – RdbPlotCallback6_modelink` – создают переменные для обозначения номера необходимой характеристики;
- `EdtPlotCallback1_modelink, EdtPlotCallback2_modelink` – создают переменные задания границ моделирования по оси OY.

Для осуществления событий при нажатии на кнопки, реализованы функции: `function BtnPlotCallback1_modelink – function BtnPlotCallback4_modelink`.

Также, чтобы предоставить пользователю возможность поработать непосредственно с каждой подсистемой рассматриваемого объекта в отдельности, реализовано дополнительное окно вывода динамических характеристик. Для его вызова разработана функция `function Click-mouse`.

Окно содержит четыре поля типа «axes», которые графически отображают динамические характеристики системы: ошибку рассогласования; задающее воздействие и выходы выбранной подсистемы; сигнал управления; сигнал перекрестной связи и внешнего возмущения.

После того, как все графические окна разработаны, необходимо синтезировать Simulink-модели, представленные ранее на рисунке 17, с которыми они будут непосредственно обмениваться данными.

#### 4.4 Разработка Simulink-модели системы управления

Из предыдущего раздела становится понятно, что в приложении рассматриваются 8 разных Simulink-моделей:

- модель непрерывной системы управления двухсвязным объектом с переключениями;
- модель гибридной системы управления двухсвязным объектом с переключениями;
- модель непрерывной системы управления трехсвязным объектом с переключениями;
- модель гибридной системы управления трехсвязным объектом с переключениями;
- модель непрерывной системы управления двухсвязным объектом с переключениями, использующая генетический алгоритм оптимизации;
- модель гибридной системы управления двухсвязным объектом с переключениями, использующая генетический алгоритм оптимизации;
- модель непрерывной системы управления трехсвязным объектом с переключениями, использующая генетический алгоритм оптимизации;
- модель гибридной системы управления трехсвязным объектом с переключениями, использующая генетический алгоритм оптимизации.

Представленные Simulink-модели конструируются на базе основной (одноименной) библиотеки и имеют довольно схожую структуру (Приложение Б). Так во всех моделях можно выделить несколько основных блоков:

- Блок 1: многосвязный объект управления;
- Блок 2: входной и задающий фильтр-корректор;
- Блок 3: управляющее устройство;
- Блок 4: задающее воздействие;
- Блок 5: сигнал возмущения;
- Блок 6: оценка результатов;
- Блок 7: визуализация.

Внутреннее строение данных блоков в зависимости от типа рассматриваемой системы имеет существенные различия. Чтобы учесть все особенности рассматриваемых моделей, разобьем их на два больших класса: непрерывные системы управления и гибридные, и рассмотрим их по отдельности.

Рассмотрим более подробно строение блоков непрерывной системы управления на примере трехсвязного объекта с переключениями (двухсвязный объект будет иметь схожую структуру).

Блок «многосвязный объект управления», графически представленный на рисунке 18, построен на основе математического описания объекта управления. В данном случае в него входит три подсистемы, для каждой из которых установлены блоки дополнительного воздействия – перекрестные связи. Схематичный вид подсистемы объекта управления представлен на рисунке 19.

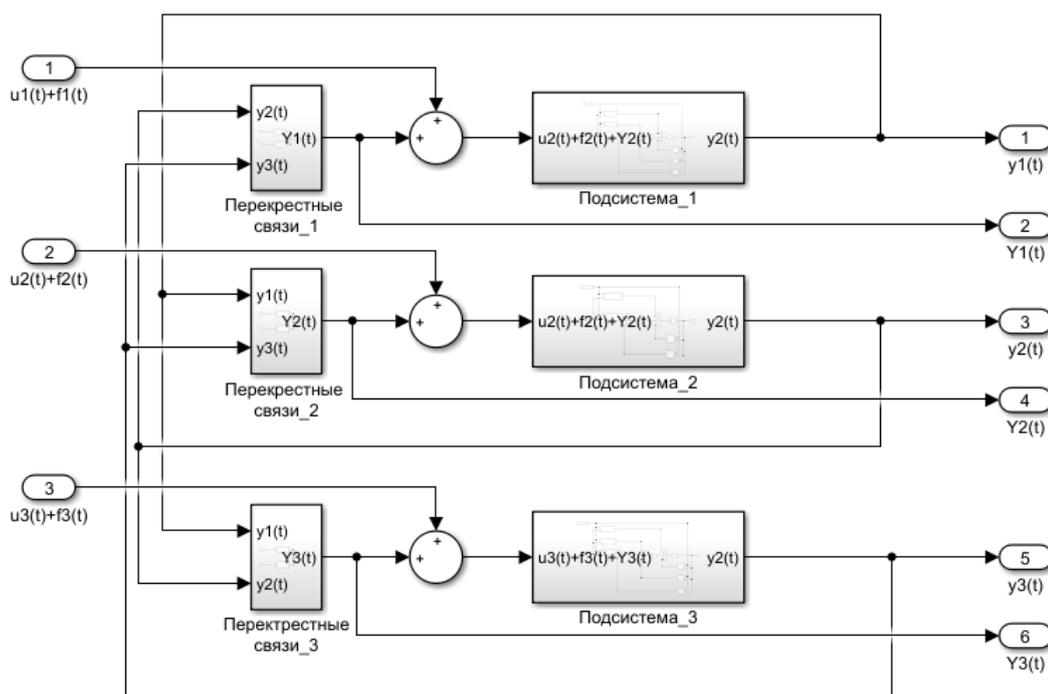


Рисунок 18 – Схема многосвязного объекта управления

В связи с тем, что объект управления имеет множество состояний функционирования, предлагается использовать блок Index Vector для переключения параметров объекта (см. рисунок 19). Переключения будут происходить на основе заданных в блоке «Время переключения» значений временных промежутков.

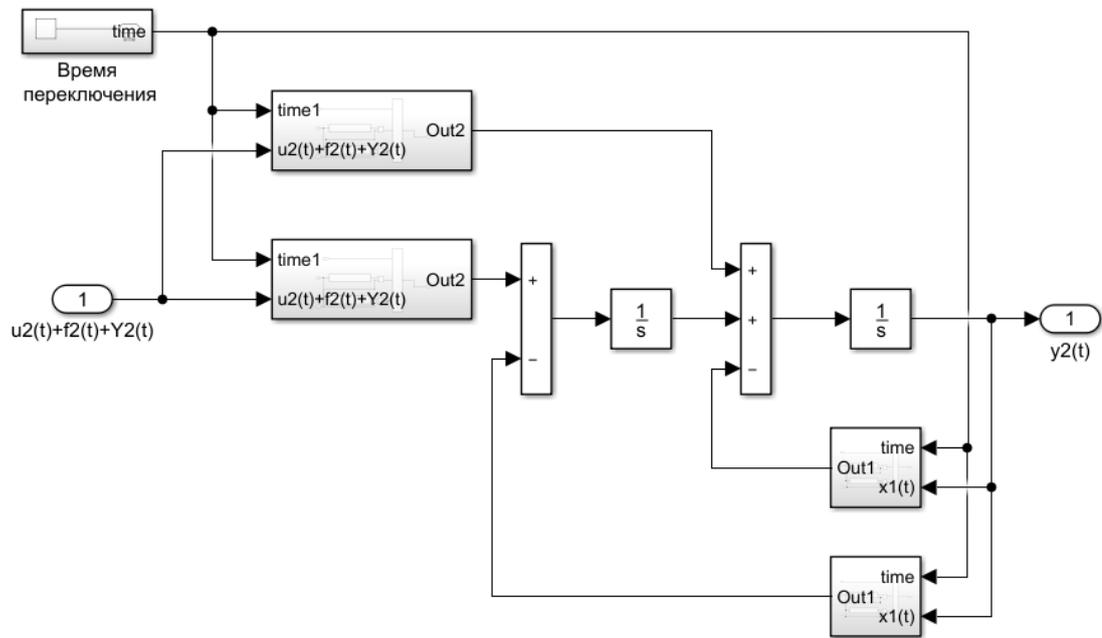


Рисунок 19 – Схема подсистемы многосвязного объекта управления

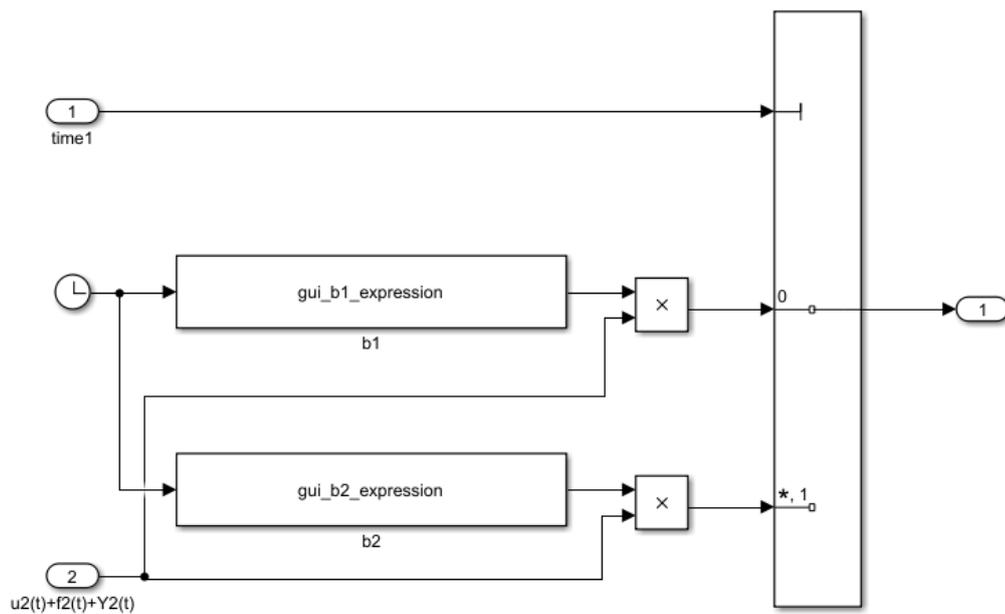


Рисунок 20 – Схема задания параметров

Блоки «ВФК» и «ЗФК» в силу математического описания фильтр-корректоров эквиваленты и имеют вид, представленный на рисунке 21.

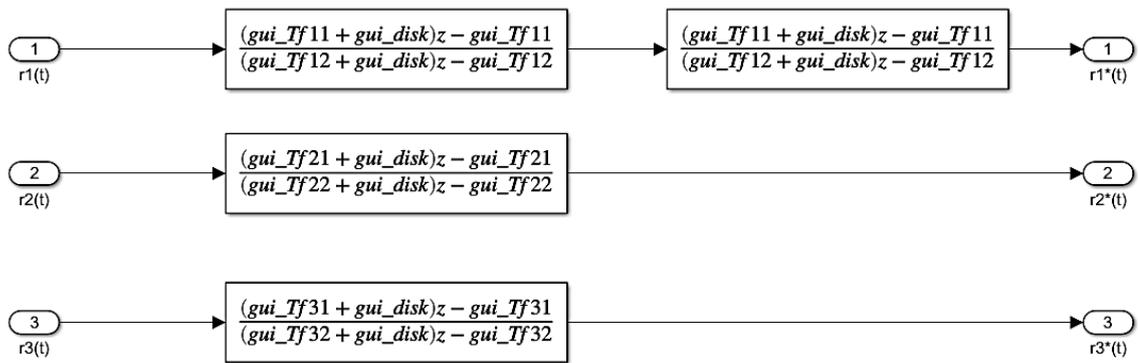


Рисунок 21 – Схема блока ЗФК

Блок «Управление», смотрим рисунок 22, включает определенное количество контуров управления, заданное в соответствии с числом подсистем объекта управления. Схема контура управления представлена на рисунке 23.

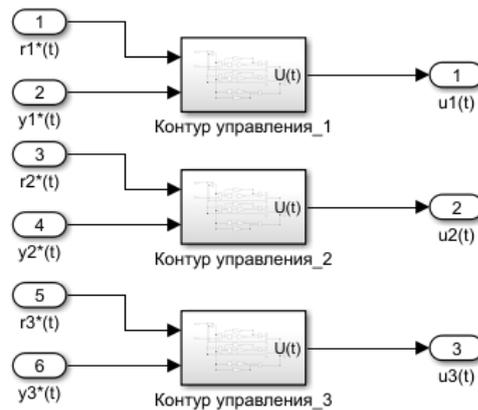


Рисунок 22 – Схема управляющего устройства

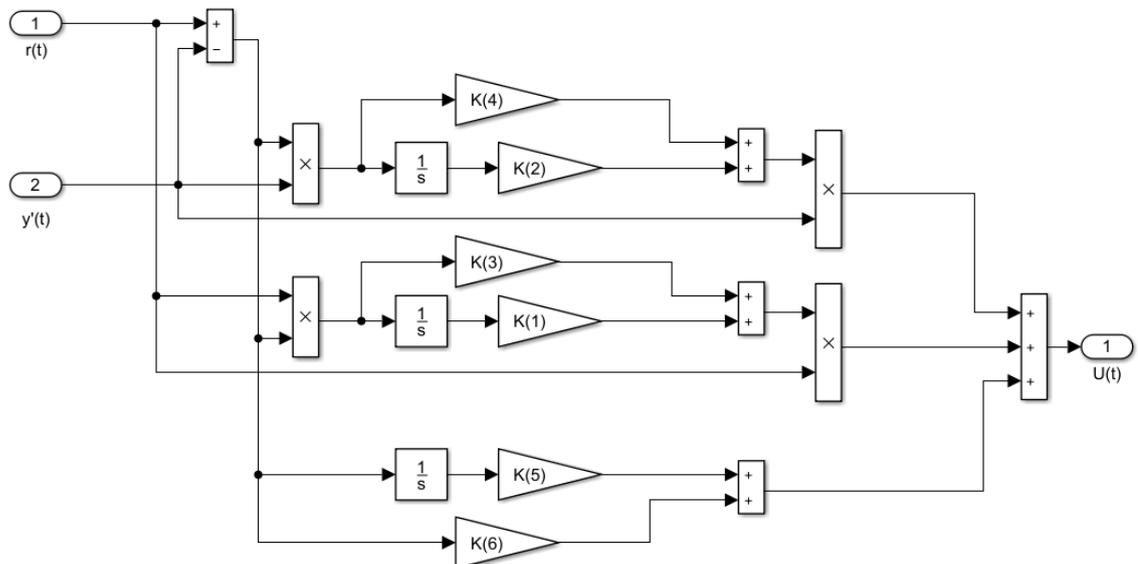


Рисунок 23 – Схема управляющего контура

Блок «Задающее воздействие», «Возмущение» показаны на рисунках 24, 25.

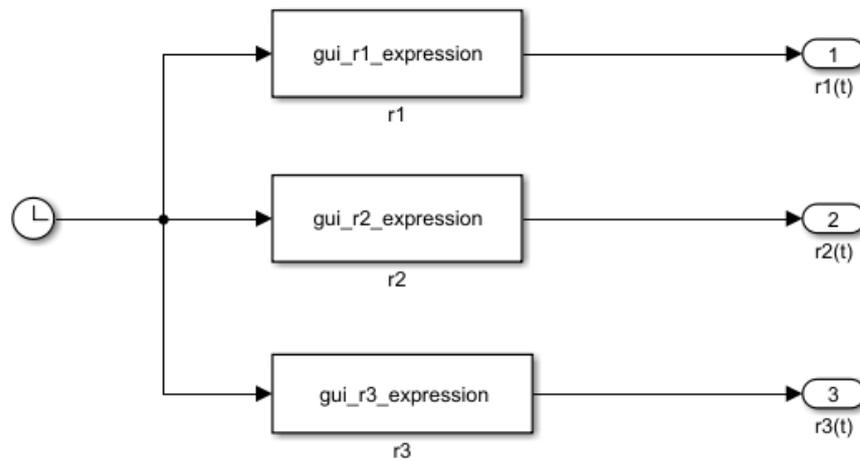


Рисунок 24 – Схема задающего воздействия

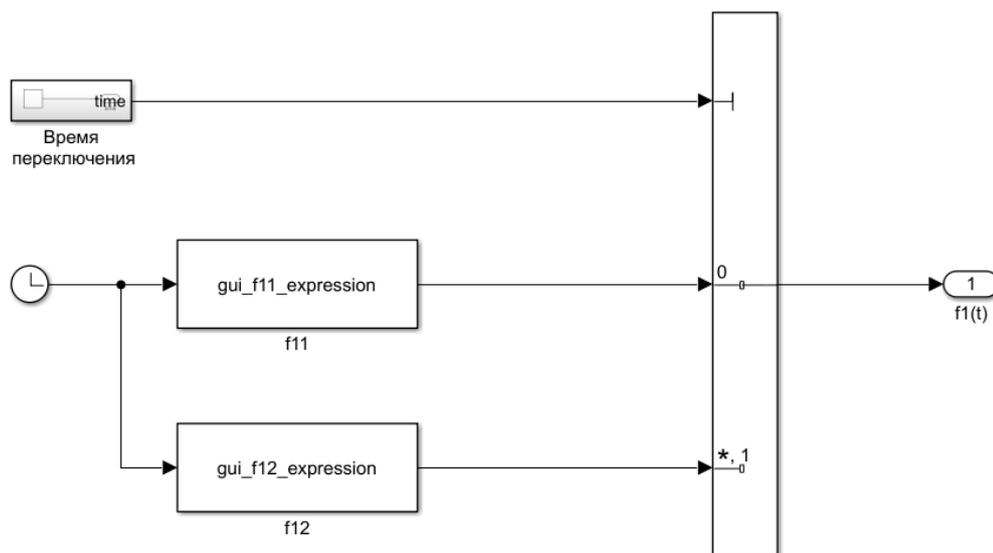


Рисунок 25 – Схема возмущения для подсистемы

Блок «Оценка результатов» имеет вид, представленный на рисунке 9 (см. раздел 3.2). Проектируется только в схемах, где осуществляется параметрическая оптимизация контуров управления.

Блок «Визуализация» содержит лишь два элемента Score для графического представления всех процессов, происходящих в системе управления.

Далее рассмотрим более подробно строение блоков гибридной системы управления трехсвязным объектом с переключениями.

Для гибридной системы управления блоки «Многосвязный объект управления», «Оценка результатов» и «Визуализация» не изменяются. Изменения присутствуют в блоках «ВФК» и «ЗФК», смотрим рисунок 26, 27.

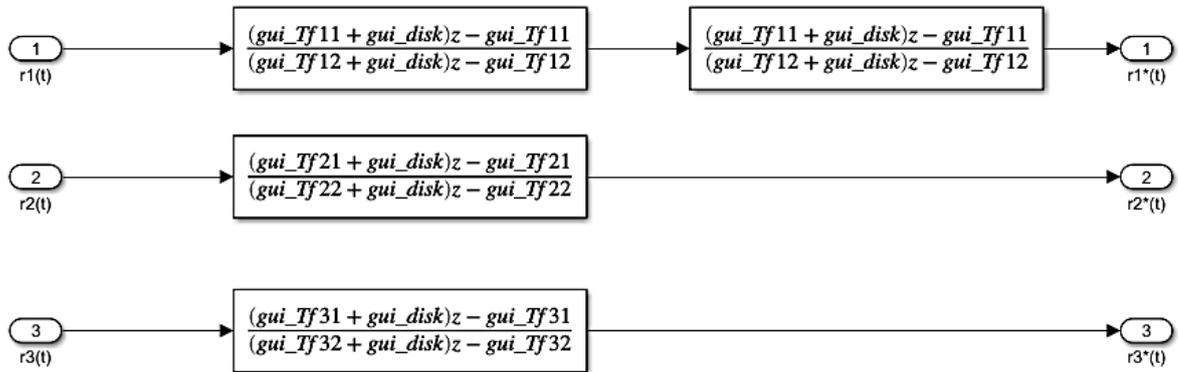


Рисунок 26 – Схема блока ЗФК для гибридной системы управления

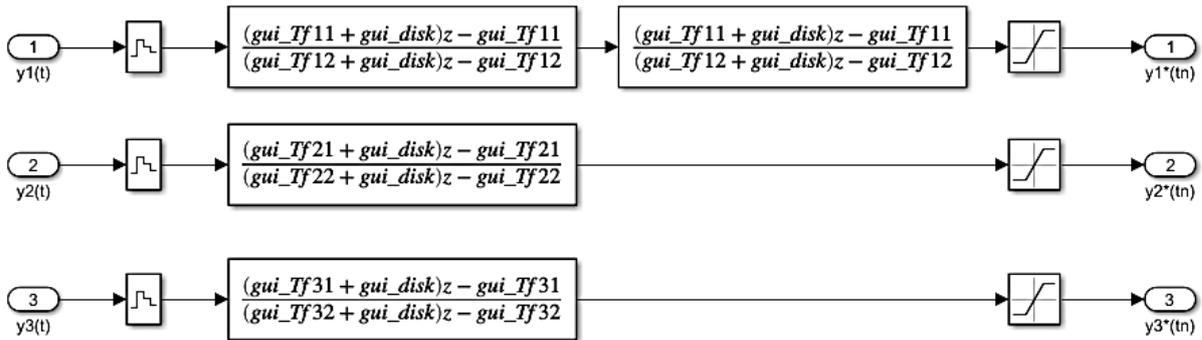


Рисунок 27 – Схема блока ВФК для гибридной системы управления

В блоках «Задающее воздействие» (рисунок 28) и «Возмущение» (рисунок 29) присутствует дополнительный элемент Zero-Order Hold.

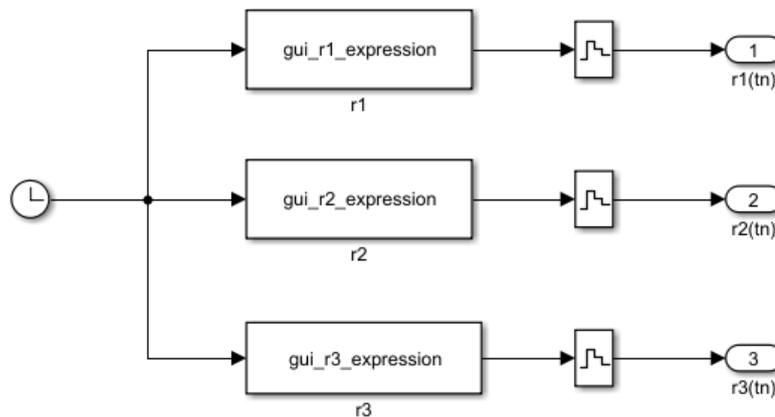


Рисунок 28 – Задающее воздействие для гибридной системы управления

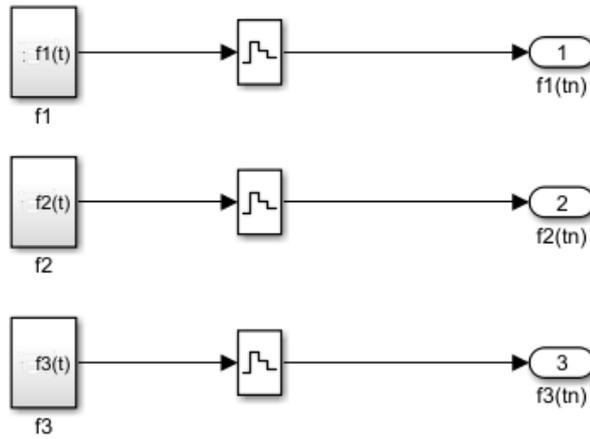


Рисунок 29 – Схема возмущения для гибридной системы управления

В блоке «Управление» происходит замена элемента Integrator на Discrete-Time Integrator, результат которой представлен на рисунке 30.

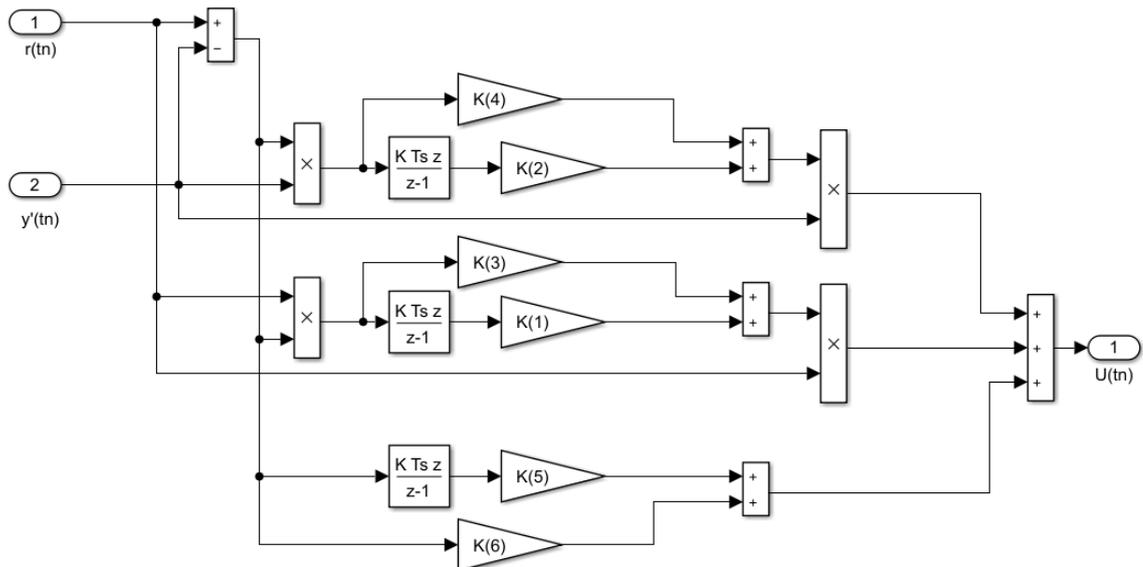


Рисунок 30 – Схема управляющего контура гибридной системы управления

Таким образом, с помощью функциональных возможностей Simulink, происходит построение S-моделей рассматриваемых ранее систем управления. На этом этап разработки интерактивного приложения можно считать завершенным.

#### 4.5 Тестирование программного продукта

Для проверки работоспособности разработанного программного продукта проведем этап тестирования.

В качестве примера рассмотрим, аналогично главам 2 и 3, непрерывную систему управления трехсвязным объектом с переключениями. Пусть для данной системы параметрический синтез будет осуществляться в соответствии с ГА оптимизации.

На первом этапе пользователь для работы с прикладным программным обеспечением должен иметь доступ к среде разработки Matlab. После того, как запуск данной среды успешно завершился, необходимо запустить первое окно приложения – файл Mu\_interface\_menu, внешний вид которого представлен на рисунке 31.

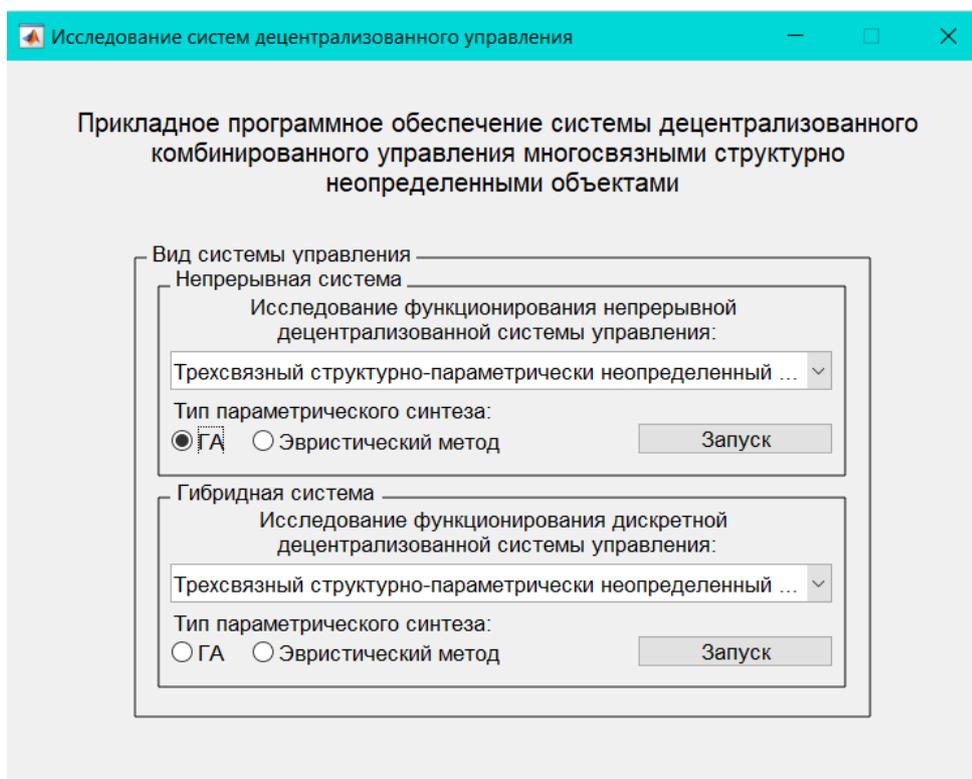


Рисунок 31 – Интерфейс окна «Исследование систем децентрализованного управления»

Для пользователя в данном окне в соответствии с рассматриваемым примером выбирает в области «Непрерывная система» трехсвязный объект управления и отмечает тип параметрического синтеза – ГА. После выбора системы управления, объекта и типа параметрической оптимизации пользователь нажимает на кнопку «Запуск» в соответствующей области и переходит к следующему окну приложения.

Внешний вид окна «Задание параметров объекта управления» представлен на рисунке 32.

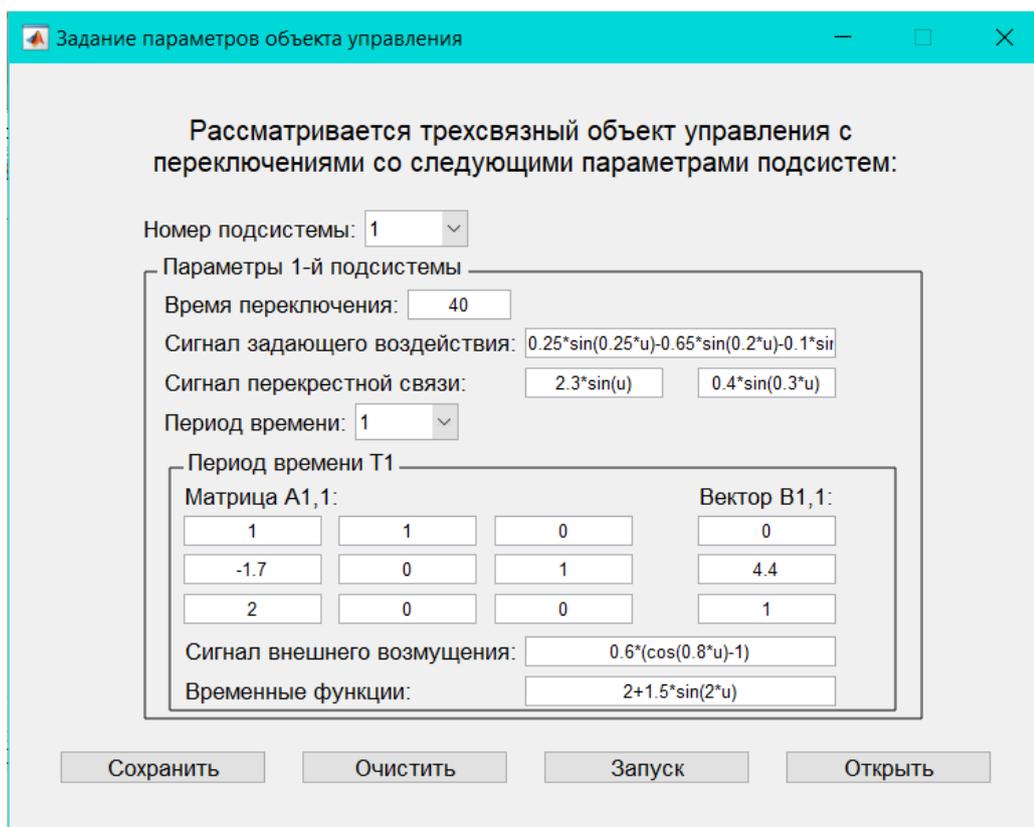


Рисунок 32 – Интерфейс окна «Задание параметров объекта управления»

В нем пользователь последовательно заполняет все поля для каждой подсистемы: время переключения, сигнал задающего воздействия, сигнал перекрестной связи. В подсистемах происходит по одному переключений в результате которого изменяются такие данные как: матрица состояния, управления, а также сигнал внешнего возмущения.

Пользователю очень важно правильно задать выражения в таких полях, как, к примеру, сигнал задающего воздействия. Выражения должны быть написаны корректно и иметь зависимость от переменной  $u$  (стандартная переменная в Simulink).

После заполнения всех полей, пользователь может:

- выполнить сохранение данных в отдельном mat файле, нажав на кнопку «Сохранить» и задав имя файла, как показано на рисунке 33;

- удалить все данные с полей текущего окна, нажав на кнопку «Очистить»;
- осуществить переход к следующему окну, нажав на кнопку «Запуск»;
- открыть сохраненных ранее mat файл, нажав на кнопку «Открыть».

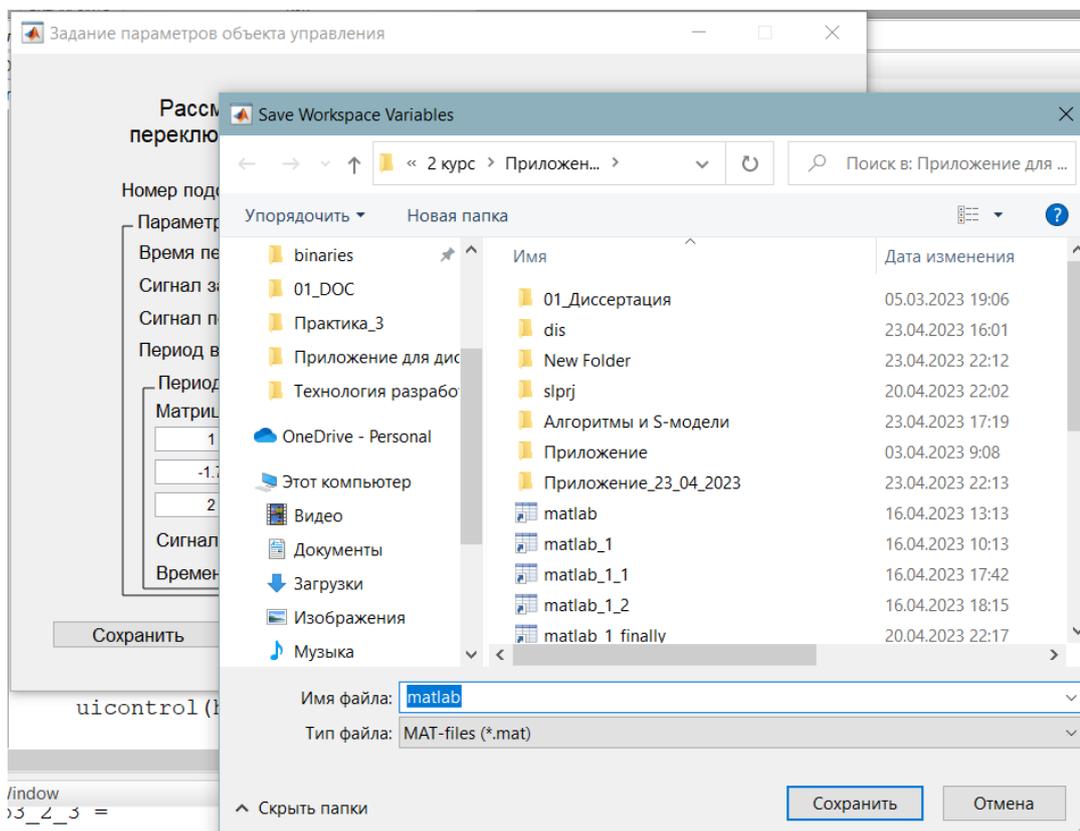


Рисунок 33 – Сохранение данных об объекте управления в mat файл

После нажатия на кнопку «Запуск», для пользователя откроется форма «Задание параметров системы управления с использованием ГА», смотрим рисунок 34. Она включает в себя четыре части: область задания общих параметров схемы, область задания параметров фильтр-корректора, параметров ГА и область вывода переменных регулятора. Все значения в полях обязательно должны быть представлены в числовом виде, никакие выражения, арифметические, логические знаки не допускаются.

Пользователю стоит обратить внимание на поле минимальных и максимальных значений переменных для поиска. В данной области необходимо

представить последовательность чисел, разделенных пробелами. Размер последовательности определяется количеством оптимизируемых переменных. Причем значения верхней границы параметров регулятора, должны быть больше нижней границы.

Остальные поля в области параметров генетического алгоритма представляют собой целые числовые значения, не считая поля функции принадлежности – оно может содержать дробную часть. После заполнения всех полей для ГА в области параметры регулятора появляются сгенерированные числовые значения.

Непрерывная децентрализованная система управления для трехсвязного объекта с переключениями со следующими параметрами:

**Общие параметры**

Время моделирования: 80  
 Закон: ode23tb  
 Относительная точность: 0.001  
 Абсолютная точность: 0.001

**Параметры ФК**

Номер подсистемы: 1  
 Постоянные времени ФК:  
 Коэффициент T1: 0.1  
 Коэффициент T2: 0.005  
 Порядок ФК: 2

**Параметры генетического алгоритма**

Значение функции принадлежности: 0.0001  
 Число оптимизируемых переменных: 18  
 Количество поколений: 30  
 Размер популяции: 30  
 Максимальные значения переменных: 500 3000 500 3000 2000 600 500 3000  
 Минимальные значения переменных: 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

**Параметры обобщенного критерия качества**

Параметры для матрицы Q:						Параметры для матрицы R:		
20	20	30	10	0	0	0	0	0
20	50	10	0	10	0	0	10	0
30	10	50	0	0	10	0	0	10

Запуск генетического алгоритма

**Параметры регулятора**

Номер подсистемы: 1

Адаптивная часть:	Робастная часть:	ПИ-регулятор:
h11 = 135.721	h21 = 7.5786	h31 = 422.674
h12 = 710.48	h22 = 354.174	h32 = 309.668

Запуск    Очистить    Сохранить    Открыть

Рисунок 34 – Интерфейс окна «Задание параметров системы управления с использованием ГА» для непрерывной системы управления

Управляющие кнопки на рисунке 34: «Запуск», «Очистить», «Сохранить», «Открыть» работают по аналогии с окном «Задание параметров объекта управления».

Завершающим этапом в работе приложения является работа с окном «Имитационное моделирование системы управления», представленным на рисунке 35.

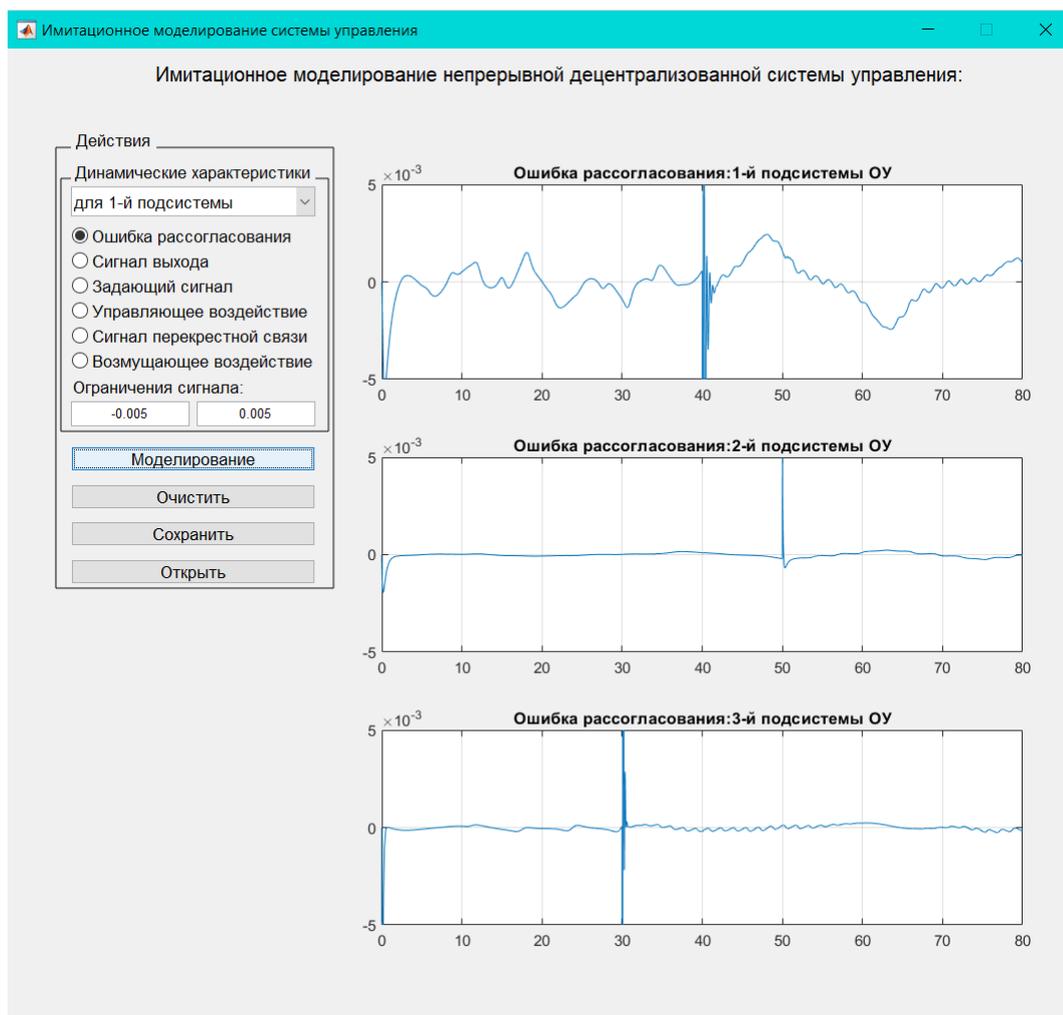


Рисунок 35 – Интерфейс окна «Имитационное моделирование системы управления» для трехсвязного объекта управления

В области действий пользователь может выбрать номер подсистемы и ее динамические характеристики, которые необходимо вывести на экран. Для каждой подсистемы рассчитано одно поле вывода, поэтому, при необходимости, можно вывести по несколько графиков. Для просмотра характеристик

подсистем объекта по отдельности используется окно «Характеристики подсистемы», в котором представлены четыре поля вывода графиков, смотрим рисунок 36.

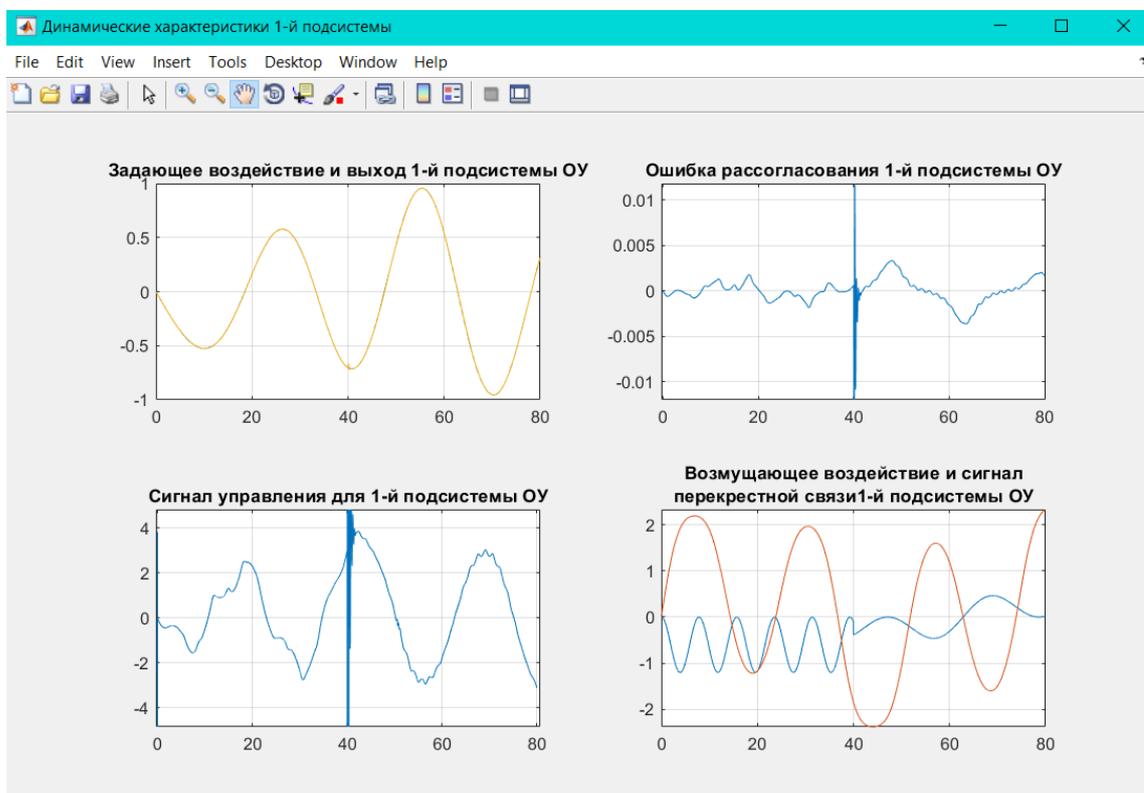


Рисунок 36 – Интерфейс окна «Характеристики 1-й подсистемы объекта»

Поля «ограничение сигнала» необходимы для редактирования графиков, а именно выбор наиболее подходящего диапазона вывода по оси ОУ.

Стандартно для пользователя предлагаются четыре кнопки:

- кнопка «Моделирование» запускает процесс моделирования и выводит результат в виде графиков на экран;
- кнопка «Очистить» удаляет графики с координатных осей;
- кнопка «Сохранить» сохраняет изображение динамических характеристик в файл jpg;
- кнопка «Открыть» позволяет поработать пользователю непосредственно с S-моделью рассматриваемой системы управления, см. рисунок 37.

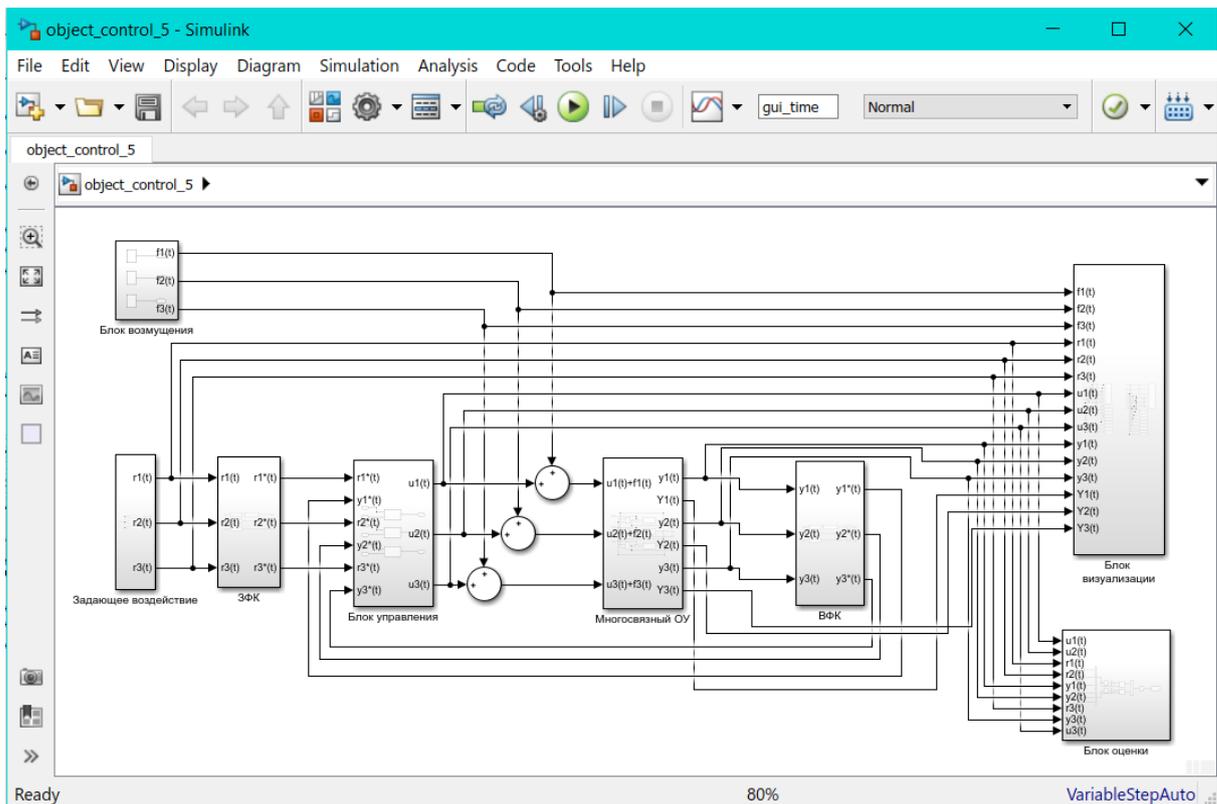


Рисунок 37 – Пример S-модели непрерывной системы управления

Таким образом, разработанное прикладное программное обеспечение предоставляет широкие возможности для удобного и простого исследования гибридных и непрерывных систем управления.

*Выводы по главе.*

В первой части главы была выбрана среда разработки Matlab совместно с пакетом Simulink, в которой будет создаваться прикладное программное обеспечение.

Во второй части изучены основные задачи, которые должно выполнять программное средство, а в третьей и четвертой части описан уже процесс его разработки.

В заключении проведено тестирование программного обеспечение на рассмотренном ранее примере трехсвязного объекта управления с переключениями, с помощью которого была подтверждена его работоспособность, а также простота и удобство использования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской диссертации были выполнены поставленные задачи.

На первом этапе работы рассмотрены современные проблемы управления многосвязными объектами с переключениями, функционирующими в условиях структурной и параметрической неопределенности. Приведено описание критерия гиперустойчивости как эффективного метода структурного синтеза сложных непрерывных систем управления, а также метода непрерывных моделей, позволяющего спроектировать гибридную систему на основе ее непрерывной модели.

На втором этапе решены две задачи синтеза системы управления.

*Первая задача:* в рамках критерия гиперустойчивости для многосвязного и многорежимного объекта синтезирована система непрерывного децентрализованного комбинированного управления.

*Вторая задача:* на основе метода непрерывных моделей разработана гибридная система децентрализованного комбинированного управления.

Высокое качество работы данных синтезированных систем продемонстрировано на этапе их имитационного моделирования.

На третьем этапе данной работы решена задача параметрического синтеза децентрализованных комбинированных систем управления с помощью генетического алгоритма оптимизации, который существенно повысил эффективность работы системы управления в условиях переключений.

На четвертом, заключительном, этапе разработано прикладное программное обеспечение в среде Matlab, позволяющее в удобной и простой форме проводить исследования в области непрерывных и гибридных систем децентрализованного комбинированного управления многосвязными объектами с переключениями.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1 Еремин, Е. Л. Комбинированная нелинейная система управления с неявным эталоном для априорно неопределенного неаффинного двухканального объекта с запаздываниями по выходу / Е. Л. Еремин, Л. В. Никифорова, Е. А. Шеленок // Информатика и системы управления. – 2020. – № 1(63). – С. 95-108.

2 Еремин, Е. Л. Метод большого коэффициента усиления в задаче самоорганизации систем управления структурно неопределенными линейными объектами с переключениями. I / Е.Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2021. – № 4(70). – С. 95-109.

3 Еремин, Е.Л. Система децентрализованного нелинейно-периодического управления для одного класса неаффинных многосвязных объектов / Е.Л. Еремин, А.И. Годяев, Е.А. Шеленок // Информатика и системы управления. – 2018. – № 4(58). – С. 129-140.

4 Смирнова, С. А. Децентрализованное комбинированное управление многосвязным структурно и параметрически неопределенным объектом / С.А. Смирнова // Информатика и системы управления. – 2022. – №2(72). – С. 89-102.

5 Куцый, Н.Н. Синтез системы управления многосвязным объектом с помощью генетического алгоритма на примере прямого котла / Н.Н. Куцый, Н.Д. Лукьянов // Научный вестник НГТУ – 2014. – №2. – С. 36-42.

6 Лебедев, А.В. Методы синтеза робастного и адаптивного управления необитаемыми подводными аппаратами: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01. – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки). – ИАПУ ДВО РАН, 2011. – 315 с.

7 Еремин, Е.Л. Адаптивное управление динамическим объектом на множестве состояний функционирования / Е.Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2012. – № 4(34). – С. 107-118.

8 Цыкунов, А.М. Робастное управление линейными объектами с переключениями / А.М. Цыкунов // Пробл. управл. – 2017, № 4. – С. 2-7.

9 Landau, I. D. Adaptive Control Systems: The Model Reference Approach / I.D. Landau – N.Y.: Marsel Dekker, 1979.

10 Егупова, Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.3: Методы современной теории автоматического управления / Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 748 с.

11 Еремин, Е.Л. Нелинейное робастное управление нестационарными объектами / Е.Л. Еремин, Т.А. Галаган, Н.П. Семичевская. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006 – 185 с.

12 Еремин, Е.Л. Робастное управление нелинейным объектом со стационарным наблюдателем и быстродействующей эталонной моделью / Е.Л. Еремин, Н.В. Кван, Н.П. Семичевская // Информатика и системы управления. 2008. №4(18). – С. 122-130.

13 Никифоров, В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений / В.О. Никифоров. – СПб: Наука, 2003.

14 Смирнова, С.А. Комбинированная система управления по выходу линейным объектом с неизвестным относительным порядком / С.А. Смирнова // Информатика и системы управления. – 2021. – №1(67). – С. 114-125.

15 Levi, I. Robust Adaptive Nonlinear  $H_\infty$  Control for Robot Manipulators / I. Levi, N. Berman, A. Ailon // Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control & Automation. 2007.

16 Попов, В.М. Гиперустойчивость автоматических систем / В.М. Попов. – М.: Наука, 1970. – 456 с.

17 Бобцов, А.А. Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами / А.А. Бобцов // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 21. – С.108-117.

18 Еремин, Е.Л. Комбинированная адаптивная система управления структурно-параметрически неопределенным нелинейным объектом периодического действия / Е.Л. Еремин, Е.А. Шеленок // Информатика и системы управления. – 2015. – № 2(44). – С.99-109.

19 Дерезицкий, Д.П. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления / Д.П. Дерезицкий, А.Л. Фрадков. – М.: Наука, 1981. – 216 с.

20 Якубович, В. А. Методы теории абсолютной устойчивости / В.А. Якубович; под. ред. Р. А. Нелепина // М.: Наука. – 1975. – С. 74-180.

21 Вукобратович, М. Управление манипуляционными роботами / М. Вукобратович, Д. Стокич. – М.: Наука, 1985.

22 Еремин, Е. Л. Управление и автоматизация сложных систем в условиях неопределенности / Е. Л. Еремин, Д. А. Теличенко, Е. А. Шеленок. – Благовещенск: Амурский государственный университет, 2015. – 248 с

23 Еремин, Е. Л. L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. III. / Е. Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С. 153-164.

24 Смирнова, С.А. Децентрализованное комбинированное управление многосвязным структурно неопределенным объектом с переключениями / С.А. Смирнова // Современные технологии в науке и образовании. – Рязань, 2022. – С. 130-138.

25 Фрадков, А. Л. Синтез адаптивной системы стабилизации линейного динамического объекта / А. Л. Фрадков // Автомат. и телемех. – 1974. – № 12. – С. 96-103.

26 Халил, Х. К. Нелинейные системы / Х.К. Халил. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» – Институт компьютерных исследований, 2009.

27 Еремин, Е.Л. Комбинированный регулятор для неаффинной многосвязной системы с запаздыванием по управлению / Е.Л. Еремин, Л.В. Чепак // Информатика и системы управления. – 2019. – № 1(59). – С. 118-130.

28 Дарвин, Ч. О происхождении видов путем естественного отбора или сохранении благоприятствуемых пород в борьбе за жизнь / Ч.О. Дарвин. – М.: АН СССР, 1939.

29 Смирнова, С. А. Оптимизация регулятора самоорганизующейся системы комбинированного управления многорежимным структурно неопределенным объектом с переключениями / С.А. Смирнова // Информатика и системы управления. – 2022. – №4(74). – С. 131-139.

30 Шеленок, Е. А. Периодические системы нелинейного управления в условиях неопределенности: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки). – ТОГУ, 2022. – 458 с.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Бобцов, А.А. Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами / А.А. Бобцов // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 21. – С.108-117.
- 2 Вукобратович, М. Управление манипуляционными роботами / М. Вукобратович, Д. Стокич. – М.: Наука, 1985.
- 3 Дарвин, Ч. О происхождении видов путем естественного отбора или сохранении благоприятствуемых пород в борьбе за жизнь / Ч.О. Дарвин. – М.: АН СССР, 1939.
- 4 Дерезицкий, Д.П. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления / Д.П. Дерезицкий, А.Л. Фрадков. – М.: Наука, 1981. – 216 с.
- 5 Еремин, Е.Л. Адаптивное управление динамическим объектом на множестве состояний функционирования / Е.Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2012. – № 4(34). – С. 107-118.
- 6 Еремин, Е.Л. Комбинированная адаптивная система управления структурно-параметрически неопределенным нелинейным объектом периодического действия / Е.Л. Еремин, Е.А. Шеленок // Информатика и системы управления. – 2015. – № 2(44). – С.99-109.
- 7 Еремин, Е. Л. Комбинированная нелинейная система управления с неявным эталоном для априорно неопределенного неаффинного двухканального объекта с запаздываниями по выходу / Е. Л. Еремин, Л. В. Никифорова, Е. А. Шеленок // Информатика и системы управления. – 2020. – № 1(63). – С. 95-108.
- 8 Еремин, Е.Л. Комбинированная система с неявным эталоном для класса априорно неопределенных одноканальных объектов неаффинных по управлению на множестве состояний функционирования / Е.Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2018. – № 3(57). – С. 93-103.

9 Еремин, Е.Л. Комбинированный регулятор для неаффинной много-  
связной системы с запаздыванием по управлению / Е.Л. Еремин, Л.В. Чепак // Информатика и системы управления. – 2019. – № 1(59). – С. 118-130.

10 Еремин, Е. Л. Метод большого коэффициента усиления в задаче са-  
моорганизации систем управления структурно неопределенными линейными  
объектами с переключениями. I / Е.Л. Еремин // Информатика и системы  
управления. – 2021. – № 4(70). – С. 95-109.

11 Еремин, Е.Л. Нелинейное робастное управление нестационарными  
объектами / Е.Л. Еремин, Т.А. Галаган, Н.П. Семичевская. – Благовещенск:  
Амурский гос. ун-т, 2006 – 185 с.

12 Еремин, Е.Л. Нелинейно-робастная система управления с явно-неяв-  
ным эталоном для нестационарных SISO-объектов с запаздыванием по состо-  
янию / Е.Л. Еремин, Н.П. Семичевская, Л.В. Чепак // Мехатроника, автомати-  
зация, управление. 2007. №1. – С. 14-20.

13 Еремин, Е.Л. Периодические режимы в схемах децентрализованного  
управления адаптивного и робастного управления / Е.Л. Еремин, Д.А. Тели-  
ченко, Е.А. Шеленок // Вестник РГРТУ – 2011. – № 1 (выпуск 35). – С.108-116.

14 Еремин, Е.Л. Робастное управление нелинейным объектом со стаци-  
онарным наблюдателем и быстродействующей эталонной моделью / Е.Л. Ере-  
мин, Н.В. Кван, Н.П. Семичевская // Информатика и системы управления.  
2008. №4(18). – С. 122-130.

15 Еремин, Е.Л. Система децентрализованного нелинейно-периодиче-  
ского управления для одного класса неаффинных многосвязных объектов /  
Е.Л. Еремин, А.И. Годяев, Е.А. Шеленок // Информатика и системы управле-  
ния. – 2018. – № 4(58). – С. 129-140.

16 Еремин, Е. Л. Управление и автоматизация сложных систем в усло-  
виях неопределенности / Е. Л. Еремин, Д. А. Теличенко, Е. А. Шеленок. – Бла-  
говещенск: Амурский государственный университет, 2015. – 248 с

17 Еремин, Е. Л. L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. I / Е. Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2006. – № 2(12). – С. 94-101.

18 Еремин, Е. Л. L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. III / Е. Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С. 153-164.

19 Еремин, Е. Л. L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурных возмущениях. IV / Е. Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2013. – № 2(36). – С. 100-106.

20 Егупова, Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.3: Методы современной теории автоматического управления / Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 748 с.

21 Ковалик, А. И. Основные проблемы и современные методы построения систем автоматического управления в условиях неопределенности / А. И. Ковалик, Е. А. Шеленок // Вестник ТОГУ. – 2019. – №4(55). – С. 23-34.

22 Куцкий, Н.Н. Синтез системы управления многосвязным объектом с помощью генетического алгоритма на примере прямоточного котла / Н.Н. Куцкий, Н.Д. Лукьянов // Научный вестник НГТУ – 2014. – №2. – С. 36-42.

23 Лебедев, А.В. Методы синтеза робастного и адаптивного управления необитаемыми подводными аппаратами: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01. – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки). – ИАПУ ДВО РАН, 2011. – 315 с.

24 Никифоров, В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений / В.О. Никифоров. – СПб: Наука, 2003.

25 Попов, В.М. Гиперустойчивость автоматических систем / В.М. Попов. – М.: Наука, 1970. – 456 с.

26 Смирнова, С. А. Гибридная система адаптивно-робастного управления многорежимным параметрически и структурно неопределенным объектом

/ С.А. Смирнова // Современные технологии в науке и образовании. – Рязань, 2023.

27 Смирнова, С. А. Децентрализованное комбинированное управление многосвязным структурно и параметрически неопределенным объектом / С.А. Смирнова // Информатика и системы управления. – 2022. – №2(72). – С. 89-102.

28 Смирнова, С. А. Децентрализованное комбинированное управление многосвязным структурно неопределенным объектом с переключениями / С.А. Смирнова // Современные технологии в науке и образовании. – Рязань, 2022. – С. 130-138.

29 Смирнова, С. А. Комбинированная система управления по выходу линейным объектом с неизвестным относительным порядком / С.А. Смирнова // Информатика и системы управления. – 2021. – №1(67). – С. 114-125.

30 Смирнова, С. А. Оптимизация регулятора самоорганизующейся системы комбинированного управления многорежимным структурно неопределенным объектом с переключениями / С.А. Смирнова // Информатика и системы управления. – 2022. – №4(74). – С. 131-139.

31 Смирнова, С. А. Разработка комбинированной системы управления нестационарным многорежимным объектом по выходу в схеме с неявным эталоном / С. А. Смирнова // Современные технологии в науке и образовании / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань, 2021. – С. 109-115.

32 Смирнова, С. А. Система децентрализованного комбинированного управления многосвязным нестационарным объектом с неявным эталоном / С.А. Смирнова // Молодёжь XXI века: шаг в будущее. Материалы XXIII региональной научно-практической конференции. Благовещенск, 2022. – С. 221-222.

33 Смирнова, С. А. Система комбинированного управления по выходу многорежимным нестационарным объектом с неявным эталоном / С.А. Смирнова // День науки. Материалы XXX научной конференции Амурского государственного университета. – Благовещенск, 2021. – С. 38-40.

34 Фрадков, А. Л. Синтез адаптивной системы стабилизации линейного динамического объекта / А. Л. Фрадков // Автомат. и телемех. – 1974. – № 12. – С. 96-103.

35 Халил, Х. К. Нелинейные системы / Х.К. Халил. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» – Институт компьютерных исследований, 2009.

36 Шеленок, Е. А. Периодические системы нелинейного управления в условиях неопределенности: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки). – ТОГУ, 2022. – 458 с.

37 Шпилевая, О.А. Переключаемые системы: устойчивость и проектирование (обзор) / О.А. Шпилевая, К.Ю. Котов // Автометрия. – 2008. Т. 44, № 5. – С. 71-87.

38 Цыкунов, А.М. Робастное управление линейными объектами с переключениями / А.М. Цыкунов // Пробл. управл. – 2017, № 4, 2-7.

39 Якубович, В. А. Методы теории абсолютной устойчивости / В.А. Якубович; под. ред. Р. А. Нелепина // М.: Наука. – 1975. – С. 74-180.

40 Landau, I. D. Adaptive Control Systems: The Model Reference Approach / I.D. Landau – N.Y.: Marsel Dekker, 1979.

41 Levi, I. Robust Adaptive Nonlinear  $H_\infty$  Control for Robot Manipulators / I. Levi, N. Berman, A. Ailon // Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control & Automation. 2007.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Условия L-диссипативности видоизмененной и исходной систем управления

Для упрощенной системы управления (15), изображенной на рисунке 4, был произведен синтез непрерывного децентрализованного адаптивно-робастного регулятора, обеспечивающий ее гиперустойчивость. На следующем этапе необходимо обеспечить диссипативность уже исходной системы управления (14) за счет подбора значений постоянных времени БСВ.

Запишем передаточную функцию последовательного соединения видоизмененного объекта и БСВ следующим образом:

$$\begin{aligned}\tilde{W}_i^{(k)}(s) &= \left( \tilde{C}_{0i}^{(k)} \right)^T (Ej\omega - \tilde{A}_i^{(k)})^{-1} \tilde{B}_i^{(k)} = \\ &= \frac{\tilde{b}_{(l-1)i}^{(k)} s^{l-1} + \tilde{b}_{(l-2)i}^{(k)} s^{l-2} + \dots + \tilde{b}_{1i}^{(k)} s + \tilde{b}_{0i}^{(k)}}{s^l + \tilde{a}_{li}^{(k)} s^{l-1} + \dots + \tilde{a}_{2i}^{(k)} s + \tilde{a}_{1i}^{(k)}} = \frac{\tilde{b}_i^{(k)}(s)}{\tilde{a}_i^{(k)}(s)}, \\ W_{ПООУ}^{(k)}(s) &= \tilde{W}_i^{(k)}(s) \cdot W_{БСВ}^{(k)}(s) = \frac{\tilde{b}_i^{(k)}(s)}{\tilde{a}_i^{(k)}(s)} \cdot \frac{1}{(T_{*i}s + 1)^{n_i - m_i^{(k)} - 1}},\end{aligned}\tag{A.1}$$

где  $l = \left( p_i^+ + m_i^{(k)} \right) i$ ;

$\tilde{W}_i^{(k)}(s)$  – передаточная функция ВМОУ;

$W_{БСВ}^{(k)}(s)$  – передаточная функция БСВ, и представим ее в замкнутой системе следующего вида:

$$W_i^{(k)}(s) = \frac{\chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_i^{(k)}(s)}{\tilde{a}_i^{(k)}(s) \cdot (T_{*i}s + 1)^{n_i - m_i^{(k)} - 1} + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_i^{(k)}(s)},\tag{A.2}$$

для которой характеристическое уравнение запишется:

$$\begin{aligned}(s^l + \tilde{a}_{li}^{(k)} s^{l-1} + \dots + \tilde{a}_{2i}^{(k)} s + \tilde{a}_{1i}^{(k)}) \cdot (T_{*i}s + 1)^{n_i - m_i^{(k)} - 1} + \\ + \chi_{*i}^{(k)} (\tilde{b}_{(l-1)i}^{(k)} s^{l-1} + \tilde{b}_{(l-2)i}^{(k)} s^{l-2} + \dots + \tilde{b}_{1i}^{(k)} s + \tilde{b}_{0i}^{(k)}) = 0.\end{aligned}\tag{A.3}$$

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Очевидно, если характеристическое уравнение (А.3) является гурвицевым, то структурно возмущенная упрощенная система МОУ будет устойчивой. Поэтому, используя соотношение:

$$\begin{aligned} (T_{*i}s + 1)^{n_i - m_i^{(k)} - 1} &= T_{*i}^{n_i - m_i^{(k)} - 1} s^{n_i - m_i^{(k)} - 1} + \\ &+ \sum_{j=1}^{n_i - m_i^{(k)} - 2} \mathcal{G}_j T_{*i}^{n_i - m_i^{(k)} - 1 - j} s^{n_i - m_i^{(k)} - 1 - j} + 1, \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

перепишем характеристическое уравнение замкнутой системы (А.3) в виде:

$$\begin{aligned} &(s^l + \tilde{a}_{li}^{(k)} s^{l-1} + \dots + \tilde{a}_{2i}^{(k)} s + \tilde{a}_{1i}^{(k)}) \times \\ &\times (T_{*i}^{n_i - m_i^{(k)} - 1} s^{n_i - m_i^{(k)} - 1} + \sum_{j=1}^{n_i - m_i^{(k)} - 2} \mathcal{G}_j T_{*i}^{n_i - m_i^{(k)} - 1 - j} s^{n_i - m_i^{(k)} - 1 - j}) + \\ &+ s^l + (\tilde{a}_{li}^{(k)} + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_{(l-1)i}^{(k)}) s^{l-1} + \dots + (\tilde{a}_{2i}^{(k)} + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_{1i}^{(k)}) s + \\ &+ \tilde{a}_{1i}^{(k)} + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_{0i}^{(k)} = 0. \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

С учетом того, что переменные  $\chi_{*i}^{(k)}$  имеют довольно большие значения, а  $T_{*i} \ll 1$ , выражение (А.5) можно упростить и представить:

$$\begin{aligned} &T_*^{l+n_i - m_i^{(k)} - 1} s^{n_i - m_i^{(k)} - 1} + \mathcal{G}_1 T_{*i}^{n_i - m_i^{(k)} - 2} s^{l+n_i - m_i^{(k)} - 2} + \dots + \mathcal{G}_{n_i - m_i^{(k)} - 2} T_{*i} s^{l+1} + \\ &+ s^l + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_{(l-1)i}^{(k)} s^{l-1} + \dots + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_{1i}^{(k)} s + \chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_{0i}^{(k)} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Как показано в работе [27], полиномы (А.6) являются гурвицевыми, в случае выполнения следующих неравенств:

$$\begin{aligned} T_{*i} &\leq \frac{0.93}{\chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_{(l-1)i}^{(k)} (n_i - m_i^{(k)} - 2)}, \\ T_{*i} &\leq \frac{0.465 \tilde{b}_{(l-1)i}^{(k)}}{\tilde{b}_{(l-2)i}^{(k)} (n_i - m_i^{(k)} - 1)}. \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

которые с учетом действия априорной неопределенности можно преобразовать в соотношения:

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

$$\begin{aligned}
 T_{*i} &\leq \frac{0.93}{\chi_{*i}^{(k)} \tilde{b}_{(l-1)i}^+ (n_i - m_i^{(k)} - 2)}, \\
 T_{*i} &\leq \frac{0.465 \tilde{b}_{(l-1)i}^-}{\tilde{b}_{(l-2)i}^+ (n_i - m_i^{(k)} - 1)}
 \end{aligned}
 \tag{A.8}$$

где  $\tilde{b}_{(l-1)i}^+$ ,  $\tilde{b}_{(l-2)i}^+$ ,  $\tilde{b}_{(l-1)i}^-$  – максимальные и минимальные значения параметров.

Таким образом, на основе проведенных преобразований можно сделать вывод: МОУ (7), (13), (17), (21), (39) за счет подбора величины  $T_{*i}$ , в соответствии с условиями (A.8), обеспечивает выполнение условий устойчивости и L-диссипативности.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Simulink-модели систем управления

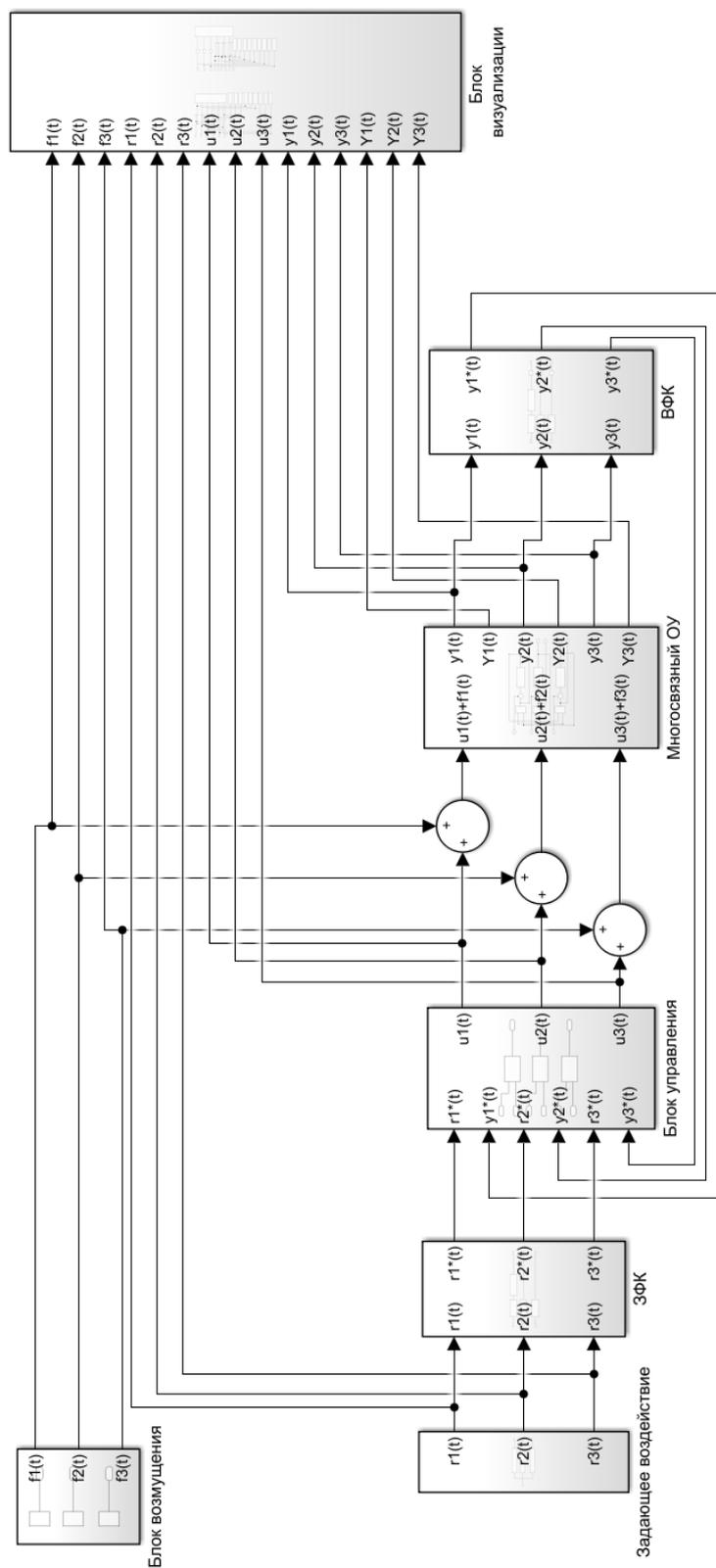


Рисунок Б.1 – Схема децентрализованной системы управления трехсвязным объектом

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

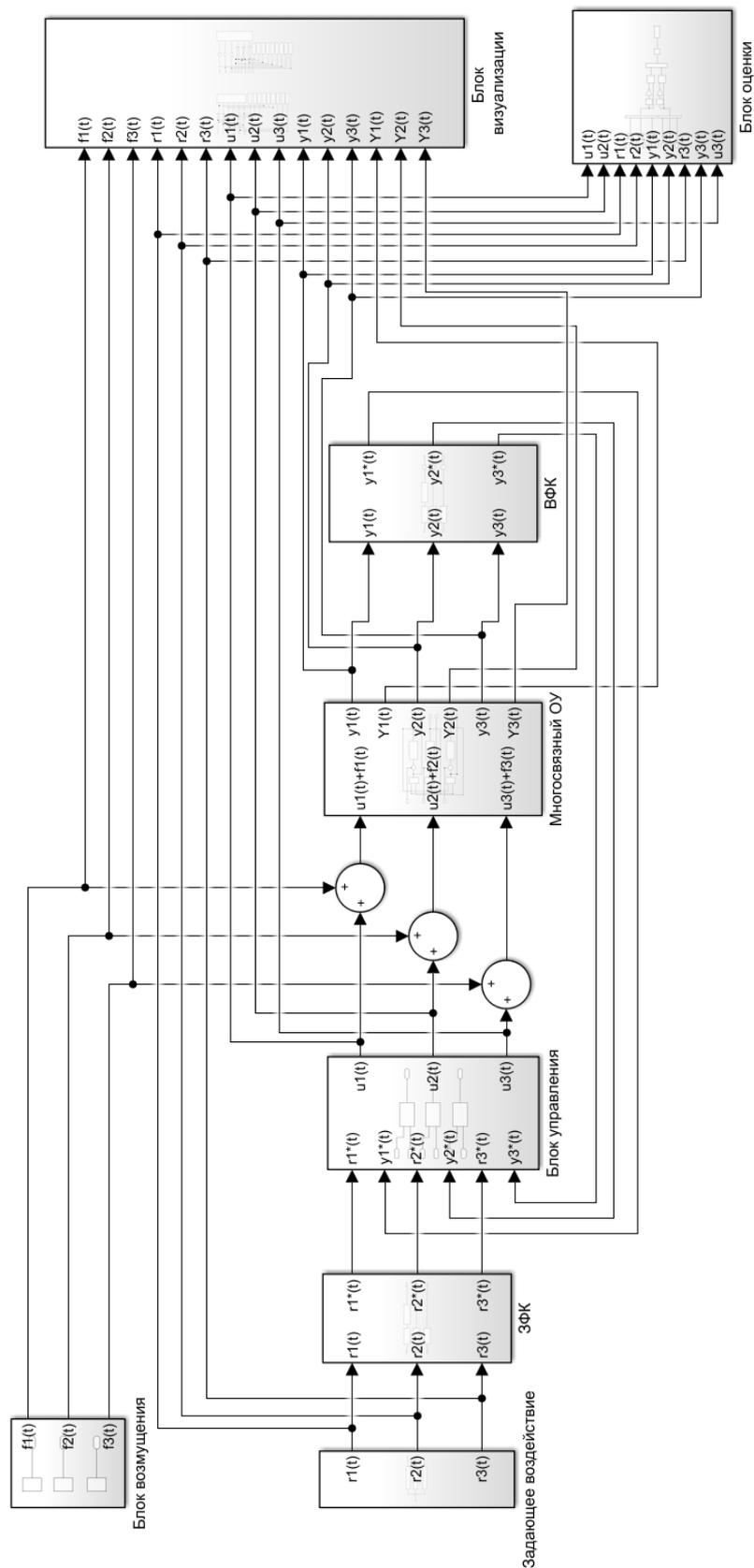


Рисунок Б.2 – Схема децентрализованной системы управления трехсвязным объектом с ГА