

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)»

На правах рукописи

Степанов Павел Сергеевич

Степанов

СИНТЕЗ СИСТЕМ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ
РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Яковис Л.М.
кандидат технических наук, доцент
Ремизова О.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	11
1.1 Ректификационные (дистилляционные) колонны в нефтепромышленности	12
1.2 Многомерный характер процессов в колоннах.....	16
1.3 Одномерные аппроксимации процессов.....	18
1.4 Методы управления колоннами.....	20
1.5 Приложение для синтеза настроек регуляторов	25
1.6 Выводы по Главе 1	31
ГЛАВА 2 РОБАСТНЫЕ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ SISO ОБЪЕКТОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	33
2.1 Беспойсковые методы робастной настройки параметров регуляторов для SiSo «апериодических» объектов.....	35
2.1.1 Настройка И-регулятора в детерминированных условиях	35
2.1.2 Настройка И-регулятора в условиях неопределенности	39
2.2 Беспойсковые методы робастной настройки параметров регуляторов для SiSo «колебательных» объектов.....	46
2.2.1 Настройка И-регулятора в детерминированных условиях	46
2.2.2 Настройка И-регулятора в условиях неопределенности	48
2.3 Поисковые методы робастной настройки параметров регуляторов для SiSo объектов.....	51
2.3.1 Метод максимальной чувствительности	51
2.3.2 Поисковый метод	61
2.4 Сравнительный анализ беспойсковых и поисковых методов робастной настройки параметров регуляторов.....	64
2.5 Выводы по Главе 2	74
ГЛАВА 3 РОБАСТНЫЕ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ MIMO ОБЪЕКТОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	76
3.1 Беспойсковые методы робастной настройки параметров регуляторов.....	77
3.2 Комбинированные методы робастной настройки параметров регуляторов...	94

3.3 Метод максимальной чувствительности	101
3.4 Сравнительный анализ методов робастной настройки параметров регуляторов	105
3.5 Выводы по Главе 3	111
ГЛАВА 4 РОБАСТНО-АДАПТИВНАЯ НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	113
4.1 Робастно-адаптивная настройка параметров регуляторов для SiSo объектов	115
4.2 Робастно-адаптивная настройка параметров регуляторов для MiMo объектов с перекрестными связями и запаздыванием в каналах передачи управляющих воздействий.....	117
4.3 Выводы по Главе 4	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	125
ПРИЛОЖЕНИЕ А Расчет настроек беспойсковым методом для SiSo объектов	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчет настроек поисковым методом для SiSo объектов	146
ПРИЛОЖЕНИЕ В Расчет регулятора методом МЧ для SiSo объектов	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Сравнение поиска и беспойска для SiSo объектов	159
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Расчет регулятора методом МЧ для MiMo объектов ...	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Расчет робастного регулятора комбинированным методом для MiMo объектов	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Расчет робастного-адаптивного регулятора для MiMo объектов.....	201
ПРИЛОЖЕНИЕ И Имитационные модели	213
ПРИЛОЖЕНИЕ К Акт внедрения	216
ПРИЛОЖЕНИЕ Л Государственная регистрация программы для ЭВМ...	217
ПРИЛОЖЕНИЕ М Заявка на патент на изобретение	218

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Современные системы управления являются ключевым звеном в обеспечении стабильного и эффективного функционирования технологических процессов. При этом растущие требования к их надежности требуют разработки таких систем, которые способны эффективно работать в условиях значительной неопределенностей. Эти неопределенности связаны как с неточностью параметров объектов управления, так и с наличием неконтролируемых возмущений, которые становятся нормой в современных условиях.

Большинство технологических процессов представляют собой переработку сырья, свойства которого с течением времени изменяются. По мере выработки стабильного сырья остается менее качественное, параметры которого варьируются в процессе переработки. Такие изменения, вызванные природными или технологическими факторами, формируют параметрические возмущения, которые невозможно заранее контролировать. Это требует от систем управления способности адаптироваться к изменчивым характеристикам сырья, обеспечивая при этом стабильное качество выпускаемой продукции.

Особенно это актуально для процессов в нефтехимической отрасли, где объекты управления характеризуются высокой энерго- и ресурсоемкостью, сложными динамическими свойствами, случайным характером возмущений и измерительных шумов, а также транспортным и информационными запаздываниями. Типичным примером такого процесса является переработка нефти, осуществляемая в установке электрообессоливания и атмосферно-вакуумной перегонки (ЭЛОУ-АВТ). Процесс ЭЛОУ-АВТ включает несколько этапов: подготовку нефти, предварительный подогрев и испарение, а затем разделение на фракции в ректификационных колоннах. В атмосферной колонне нефть разделяется на фракции различного состава и температурного диапазона: от лёгких фракций (бензин, керосин) до тяжёлых остатков (мазут). Далее мазут направляется в вакуумную колонну, где при пониженном давлении происходит разделение на вакуумные газойли и гудрон. Динамика этого процесса характеризуется значительной многосвязностью, внутренними обратными

связями, временными задержками, а также высокой чувствительностью к изменениям состава сырья и режимов подачи тепла. Малейшие отклонения по температуре, давлению или составу могут привести к нарушению качества выходных продуктов. Поэтому задача разработки устойчивой и адаптивной системы управления, способной эффективно функционировать в условиях параметрической неопределенности и внешних возмущений, является крайне актуальной. В этих условиях особенно важным становится использование робастных настроек регуляторов, которые позволяют обеспечить требуемое качество регулирования не только в базовых условиях, но и в условиях существенной параметрической неопределенности и внешних возмущений. В отличие от классических подходов, робастные методы синтеза позволяют заранее учитывать диапазоны изменения параметров объекта и обеспечивать устойчивость и приемлемое качество управления во всем рабочем диапазоне.

Степень разработанности темы исследования. Развитием отрасли нефтехимии занимались такие выдающиеся ученые, как Менделеев Д.И., Бейльштейн Ф.Ф., Марковников В.В., Энглер К.

В настоящее время данный вопрос нашел отражения в научных работах Павлова С.Ю, Gates В. С., Тюреева И.Я. В 1968-1876 гг. была разработана общая теория регуляторов в работах И. Вышнеградского и Д. Максвелла, которая в дальнейшем стала называться теорией автоматического управления [40]. Впоследствии теорией автоматического управления занимались такие ученые, как А.М. Ляпунов, А. Пуанкаре, Н. Винер, Е.П. Попов, Г. Боде, Л. Максвелл, А.А. Вавилов, А.А. Первозванский, Л. Понтрягин, Е.Н. Розенвассер, П. Франк и другие. В их работах были сформулированы математические методы для управления различными процессами, в том числе и химическими. Также их работы посвящены оптимизации, оптимальному управлению, управлению колебательными и инерционными процессами.

Несмотря на большое количество публикаций. Многие из разработанных в теории методов не учитывают специфику непрерывных технологических процессов.

Объект исследования - технологические процессы ректификации в нефтехимической отрасли, подлежащие автоматизации в условиях параметрической неопределенности.

Предмет исследования - методы робастного и робастно-адаптивного управления для объектов в условиях параметрической неопределенности.

Цель работы - повышение устойчивости функционирования ректификационной колонны в условиях параметрической неопределенности.

Идея работы заключается в применении системы робастного управления ректификационными колоннами на основе компенсационного и комбинированного методов, что позволяет определить параметры настроек робастных регуляторов, обеспечивающих устойчивость систем регулирования и качество регулирования по основному показателю качества интегральному квадратичному критерию в критических точках, и сократить процедуру поиска.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Исследование характеристик ректификационной колонны как объекта управления с параметрической неопределенностью.
2. Разработка методики робастных настроек для сложных объектов.
3. Модификация методики для робастно-адаптивного управления
4. Разработка программного обеспечения для моделирования систем управления.

Научная новизна:

1. Предложен метод робастной настройки регуляторов для сложных систем, обеспечивающий устойчивость при параметрической неопределенности объекта управления. Метод позволяет сохранять работоспособность системы во всем диапазоне изменения параметров.

2. Предложен модифицированный робастно-адаптивный подход, обеспечивающий не только устойчивость, но и адаптацию к текущим изменениям характеристик объекта.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами по пунктам:

3. Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.

4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами.

Теоретическая значимость

1. Предложен новый практический реализуемый метод робастной настройки регуляторов для ректификационных колонн, позволяющий сохранять устойчивость в условиях неопределенности.

2. Предложена модификация робастного метода в виде робастно-адаптивной настройки регуляторов для ректификационных колонн.

Практическая значимость

1. Предложенные методы позволяют находить настройки для ректификационных колонн (включая одномерные подсистемы) с учетом изменения параметров модели.

2. Применение робастно-адаптивного подхода позволяет улучшить результаты робастного метода за счет динамического выбора промежуточных настроек, которые адаптируются к текущим изменениям параметров объекта. За счет комбинирования робастных настроек и традиционных настроек достигается баланс между устойчивостью и качеством управления.

3. Предложенные методы позволяют оценивать качество управления с использованием типовых критериев, что делает подходы универсальными для различных применений.

4. Сокращение задач поиска обеспечивает ускорение процесса нахождения оптимальных настроек, что способствует достижению заданного качества управления и позволяет снизить сложность поиска настроек.

5. Результаты диссертационных исследований, а именно методика расчета настроек робастных и адаптивно-робастных регуляторов внедрены в деятельности ООО «Комита Автоматизация» (акт внедрения от 5 мая 2025 года, Приложение К)

Методология и методы исследования. Для достижения поставленных задач использовались методы теории автоматического управления, методы математического моделирования, численного решения дифференциальных уравнений, аппроксимации. Численное решение задач осуществлялось на основе методов математического и компьютерного моделирования. При программной реализации применялись методы функционального программирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод настройки регуляторов для одномерных подсистем управления ректификационной колонны сочетает аналитический (беспоисковый) подход и анализ максимальной чувствительности в критических точках, позволяет понизить до 5 раз значение основного показателя качества интегрального квадратичного критерия для граничных значений по сравнению с традиционными методами.

2. Метод робастного управления многомерными системами управления ректификационных колонн, сочетающий аппроксимацию звеном запаздывания и минимаксную оптимизацию за счет интеграции регуляторов, учитывающих перекрестные связи в объекте, обеспечивает улучшение показателей устойчивости и основного показателя интегрального квадратичного критерия до 3 раз для граничных значений по стандартным критериям по сравнению с традиционными подходами.

3. Комбинированный алгоритм настройки параметров регуляторов ректификационной колонны, сочетающий классические и робастные методы с динамической оптимизацией, позволяет за счет адаптивного регулирования весового коэффициента увеличить преимущества перед робастными подходами по основному показателю интегрального квадратичного критерия до 2 раз.

Степень достоверности полученных результатов подтверждена проведенным имитационным моделированием и экспериментальными исследованиями и подкреплена апробацией основных теоретических положений в статьях и докладах на научных конференциях. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат данным, представленным в литературе и полученным ранее другими авторами.

Апробация работы. За последние 3 года принято участие в 8 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных:

Международная научная конференция «Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ» (24–28 октября 2022 г., Минск; 29 мая–02 июня 2023 г., Нижний Новгород; 23-27 октября 2023 г., Минск; 03-07 июня 2024 г., Казань);

XIII научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2023» (11-13 апреля 2023 г., Санкт-Петербург);

Всероссийская конференция «Неделя науки ФИЗМЕХ». 03–07 апреля 2023 г., 01–05 апреля 2024 г., Санкт-Петербург);

Всероссийское совещание по проблемам управления (17–20 июня 2024 г., Москва).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, программной реализацией разработанных методов и алгоритмов.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 12 печатных работах (пункты списка литературы № 34, 38-42, 46, 47, 49-52), в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [10] (Приложение Л) и подана 1 заявка на патент на изобретение [28] (Приложение М).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего

79 наименований, и содержит 11 приложений. Диссертация изложена на 218 страницах машинописного текста, содержит 359 рисунков и 76 таблиц.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность за ценные советы, профессиональное руководство и всестороннюю поддержку в процессе научной работы своему первому научному руководителю - доктору технических наук, профессору Яковису Леониду Моисеевичу.

ГЛАВА 1 ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Нефтяная промышленность играет ключевую роль в мировой экономике, обеспечивая энергоресурсы и сырье для множества отраслей. Эта отрасль является одним из наиболее сложных и капиталоемких секторов, на который приходится значительная доля глобального ВВП. Современные нефтеперерабатывающие предприятия сталкиваются с растущими требованиями к качеству продукции, энергоэффективности и экологической безопасности. Это обусловлено не только внутренними экономическими факторами, но и ужесточением международных норм по охране окружающей среды.

В Российской Федерации нефтяная промышленность традиционно занимает стратегическое значение, обеспечивая существенную часть государственных доходов и экспортных поступлений. Российские предприятия обладают значительным опытом в переработке нефти и разработке технологических решений, однако многие из них сталкиваются с проблемами, связанными с износом оборудования и необходимостью адаптации к изменяющемуся качеству сырья.

Нефтепереработка — это сложный технологический процесс, целью которого является преобразование сырой нефти в ценные продукты, такие как бензин, дизельное топливо, керосин, смазочные масла и сырье для нефтехимии. Процесс включает несколько этапов, которые можно разделить на первичную и вторичную переработку, а также товарное производство. Автоматизация играет ключевую роль в оптимизации процессов, повышении эффективности, безопасности и экологичности.

Нефть представляет собой сложную смесь углеводородов с различными температурами кипения и молекулярными весами. Сырая нефть непригодна для прямого использования, поэтому её перерабатывают для получения фракций с заданными свойствами. Процесс нефтепереработки можно разделить на три основных этапа:

1. Первичная переработка. Основная цель данного этапа - разделение нефти на фракции на основе различий в температурах кипения.

2. Вторичная переработка. Основная цель - химическое преобразование фракций первичной переработки для улучшения качества продуктов или получения новых (например, высокооктанового бензина).

3. Товарное производство. Основная цель - смешение компонентов с добавлением присадок для получения товарных нефтепродуктов с заданными характеристиками (например, бензин АИ-95, дизельное топливо Евро-5).

Центральное место в процессах переработки нефти занимают установки, отвечающие за разделение сложных многокомпонентных смесей. Среди таких установок особое значение имеют ректификационные (дистилляционные) колонны.

1.1 Ректификационные (дистилляционные) колонны в нефтепромышленности

Ректификационные (дистилляционные) колонны представляют собой ключевые элементы в технологических процессах нефтепереработки и нефтехимии. Эти объекты обеспечивают разделение многокомпонентных смесей на фракции с заданными свойствами на основе различий в температурах кипения компонентов. Подобные процессы играют важную роль в производстве топлива, масел, нефтехимического сырья и других продуктов. Типичная технологическая схема ректификационной колонны представлена на рисунке 1.1.

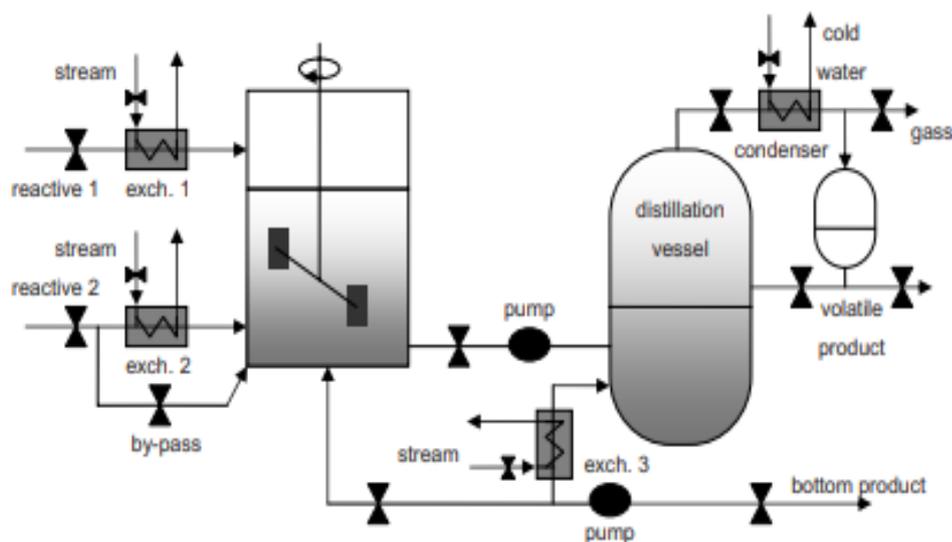


Рисунок 1.1 – Технологическая схема ректификационной колонны [76]

Ректификационные колонны являются основными в установке ЭЛОУ-АВТ. На рисунке 1.2 можно увидеть функциональную схему ЭЛОУ-АВТ.

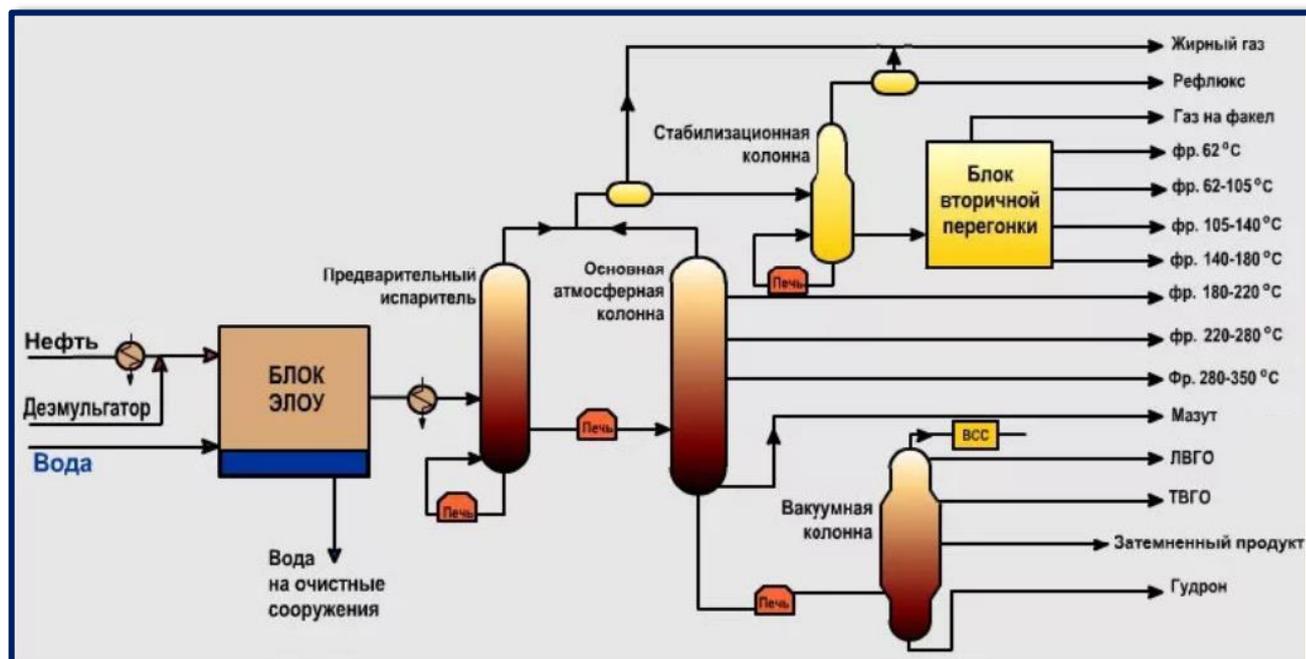


Рисунок 1.2 – Функциональная схема ЭЛОУ-АВТ [76]

ЭЛОУ-АВТ — это комбинированная установка первичной переработки нефти, она подготавливает сырую нефть и разделяет ее на фракции. Установка включает два ключевых блока:

- ЭЛОУ (электрообессоливающая установка) — предназначена для обезвоживания и обессоливания сырой нефти.
- АВТ (атмосферно-вакуумная трубчатка) — состоит из двух подблоков:
 - АТ (атмосферная трубчатка) — для перегонки нефти при атмосферном давлении.
 - ВТ (вакуумная трубчатка) — для перегонки мазута в условиях пониженного давления.

Разделение на фракции происходит в ректификационных колоннах, где нефть разделяется на несколько различных фракций. В таблице 1.1 можно увидеть основные продукты ректификации.

Таблица 1.1 – Основные продукты ЭЛОУ-АВТ [76]

Продукт	Назначение
Углеводородные газы (C1-C5)	Сырье для газофракционирования.

Продолжение таблицы 1.1

Продукт	Назначение
Прямогонный бензин (32-180°C)	Основа для производства товарного бензина
Керосин (180-240°C)	Для авиатоплива
Дизельное топливо (240-350°C)	Основа для дизтоплива
Вакуумный газойл	Сырье для каталитического крекинга
Мазут и гудрон (350-500°C)	Для дальнейшей переработки или как топливо

Сырая нефть содержит воду, соли (например, хлориды) и механические примеси, которые могут вызывать коррозию оборудования и снижать качество продуктов. Блок ЭЛОУ (электрообессоливание и обезвоживание) решает эту проблему. Нефть смешивается с деэмульгатором (веществом, разрушающим водно-нефтяную эмульсию) и подогревается до 100 – 120 °С для снижения вязкости. Далее нефть поступает в электродегидраторы, где под действием электрического поля (напряжение ~30 кВ) капли воды коалесцируют и оседают в нижней части аппарата. Вода с растворёнными солями удаляется, а очищенная нефть направляется в блок АТ. Для повышения эффективности процесс проводится в две ступени с использованием горизонтальных электродегидраторов.

Благодаря блоку АТ (атмосферная перегонка) происходит разделение нефти на фракции при атмосферном давлении на основе различий в температурах кипения. На рисунке 1.3 представлена схема данного блока. Обессоленная нефть подогревается в теплообменниках до 200 – 250 °С за счёт тепла отходящих потоков (рекуперация). Далее нефть поступает в трубчатую печь, где нагревается до 300 – 360 °С. Нагретая нефть вводится в отбензинивающую колонну (К-1), где отделяются газы и лёгкий бензин. Оставшаяся нефть поступает в атмосферную колонну (К-2) для разделения на фракции. Фракции конденсируются в конденсаторах и собираются в резервуарах.

Далее идет блок ВТ (вакуумная перегонка). Данный блок предназначен для переработки мазута, полученного из блока АТ, для получения дополнительных фракций при пониженном давлении (10 – 50 мм рт. ст.), что позволяет снизить температуру кипения и избежать термического разложения углеводородов.

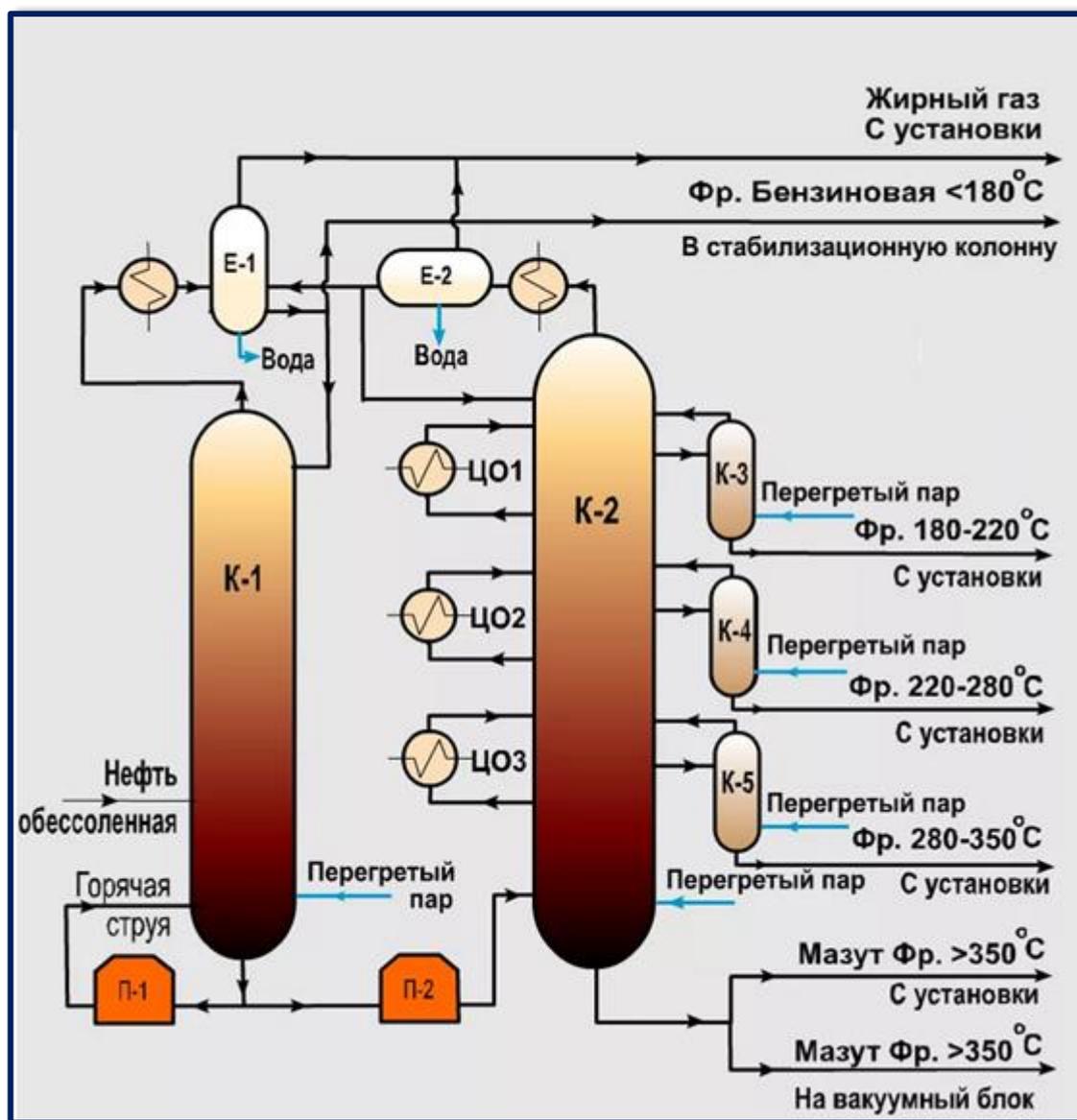


Рисунок 1.3 – Схема блока АТ [76]

Увидеть схему данного блока можно на рисунке 1.4. Мазут нагревается в вакуумной печи до $400 - 420^{\circ}\text{C}$. Нагретый мазут поступает в вакуумную колонну, где разделяется на: лёгкий вакуумный газойль ($350 - 450^{\circ}\text{C}$), тяжёлый вакуумный газойль ($450 - 520^{\circ}\text{C}$) и Гудрон ($> 520^{\circ}\text{C}$). Вакуум создаётся с помощью парэжекторных насосов или конденсационных систем. Для минимизации разложения углеводородов в кубовой части колонны используется форма «перевернутой бутылки» с уменьшенным сечением, что сокращает время пребывания гудрона в зоне высоких температур.

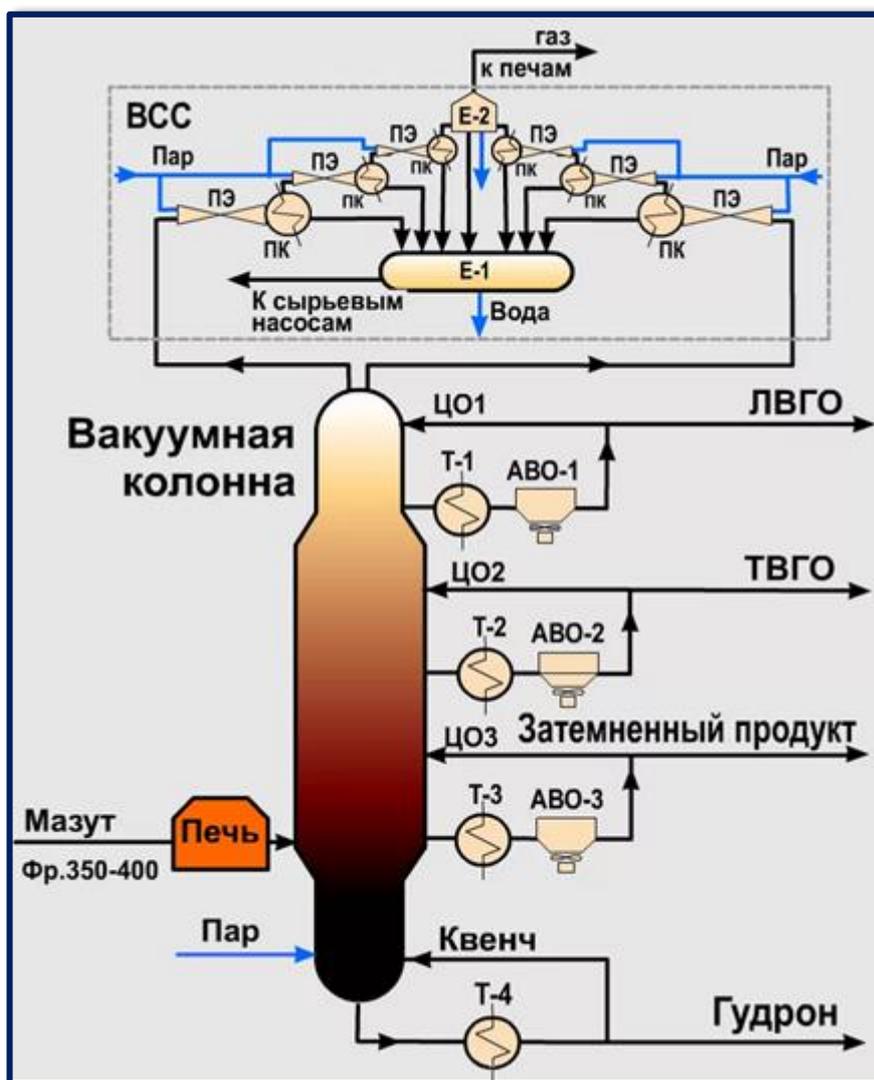


Рисунок 1.4 – Схема блока ВТ [76]

За рубежом активно развиваются технологии, направленные на повышение эффективности работы колонн. Например, в исследованиях [63, 68] подчеркивается важность использования современных материалов и методов моделирования для улучшения теплопереноса и снижения энергозатрат. Примеры таких технологий включают использование интегрированных колонн и систем с минимизацией термодинамических потерь.

1.2 Многомерный характер процессов в колоннах

Ректификационные (дистилляционные) колонны часто рассматриваются как сложные многомерные системы управления. Это обусловлено необходимостью контроля и регулирования множества взаимосвязанных переменных, таких как:

- температуры на различных тарелках или в зонах колонны;

- давление в колонне;
- расходы флегмы, пара и исходного сырья;
- концентрации компонентов в выходных потоках.

Каждая из этих переменных влияет на качество процесса разделения и на энергетическую эффективность установки. Для адекватного описания и управления такими системами используются методы теории автоматического управления многомерными объектами (MiMo-системы). Управление колонной требует учета взаимодействия между контурами регулирования, что усложняет синтез регуляторов и настройку систем управления [3, 30, 69]. Также характерной особенностью многомерных объектов является наличие запаздываний по различным каналам передачи управляющих воздействий [18, 37, 55, 59, 60, 61].

Математическое описание многомерных объектов управления строится на основе передаточных матриц, которые учитывают взаимосвязи между входами и выходами. Передаточная матрица многомерного объекта для системы с m входами и n выходами может быть представлена в следующем виде (1.1):

$$H(p) = \begin{pmatrix} H_{11}(p) & \cdots & H_{1m}(p) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1}(p) & \cdots & H_{nm}(p) \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

где каждый элемент $H_{nm}(p)$ — передаточная функция, описывающая влияние j -го входа на i -й выход, p – оператор Лапласа.

На рисунке 1.5 представлена структурная схема многомерной системы с двумя входами и двумя выходами, демонстрирующая перекрестные связи и наличие запаздываний по каналам.

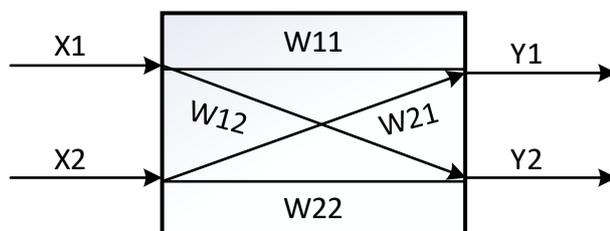


Рисунок 1.5 – Структурная схема многомерного объекта управления [43]

В работах [43, 75, 77] показаны примеры MiMo объектов размерностью 2x2. В [78] показаны примеры MiMo объектов размерностью от 3x3 до 10x10. Исходя

из рассмотренной литературы, передаточная функция многомерного объекта будет описана в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с запаздыванием (1.2):

$$H(p) = [h_{ij}^0(p)e^{-p\tau_{ij}}], \quad (1.2)$$

где $h_{ij}^0(p)$ – правильная дробно-рациональная функция p , $i=1, \dots, l$, $j=1, \dots, m$, $m \leq l$.

1.3 Одномерные аппроксимации процессов

Несмотря на свою сложность, процессы в колоннах часто могут быть аппроксимированы одномерными моделями в целях упрощения анализа и синтеза систем управления. В зависимости от характеристик конкретного процесса динамика таких моделей может быть представлена следующими типами.

Апериодический процесс: данный тип характерен для объектов с большим числом тарелок и значительной инерционностью. Передаточные функции таких систем обычно описываются аperiодическими звеньями первого или второго порядка. Примером является регулирование температуры в нижней части колонны. Системы с аperiодическим поведением важны для промышленного управления, где необходимо стабилизировать процессы при изменении условий [13, 24]. Математическая модель аperiодического объекта управления обычно описывается дифференциальными уравнениями первого или второго порядка. Наиболее распространённой моделью является аperiодическое звено первого порядка, передаточная функция которого имеет вид (1.3):

$$H(p) = \frac{K}{1 + Tp}, \quad (1.3)$$

где $H(p)$ — передаточная функция, K — коэффициент усиления, T — постоянная времени, p — оператор Лапласа.

Для данного аperiодического звена переходная характеристика имеет экспоненциальный вид (1.4):

$$y(t) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (1.4)$$

где $y(t)$ — выходное воздействие, t — время, K — коэффициент усиления, T — постоянная времени.

На рисунке 1.6 показана переходная характеристика апериодического звена.

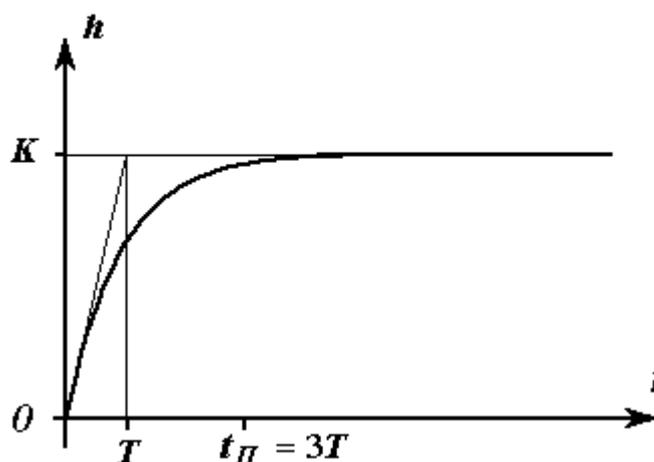


Рисунок 1.6 - Переходная функция апериодического звена [2]

Видно, что система плавно стремится к стационарному значению без колебаний.

Реальные объекты могут обладать сложной динамикой [29], что требует использования апериодических моделей второго порядка. Передаточная функция для апериодического звена второго порядка может быть представлена как (1.5):

$$H(p) = \frac{K}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)} \quad (1.5)$$

где T_1 и T_2 — постоянные времени двух различных динамических компонентов системы, $H(p)$ — передаточная функция, K — коэффициент усиления, p — оператор Лапласа.

Такие модели учитывают более сложные процессы инерции и замедления в системе [31].

Колебательный процесс возникает в системах с заметной задержкой или при наличии обратных связей, например, в верхних частях колонны при регулировании концентрации легкокипящих компонентов [11]. Колебательная динамика может быть описана моделями с комплексными корнями в характеристическом уравнении.

Колебательные системы чаще всего описываются дифференциальными уравнениями второго порядка. Стандартное колебательное звено можно описать передаточной функцией второго порядка (1.6):

$$H(p) = \frac{K}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}, \quad (1.6)$$

где K — коэффициент усиления, ξ — коэффициент демпфирования, ω_0 — собственная частота системы, p — оператор Лапласа, $H(p)$ — передаточная функция.

График переходной характеристики колебательного объекта с затухающими колебаниями показан на рисунке 1.7.

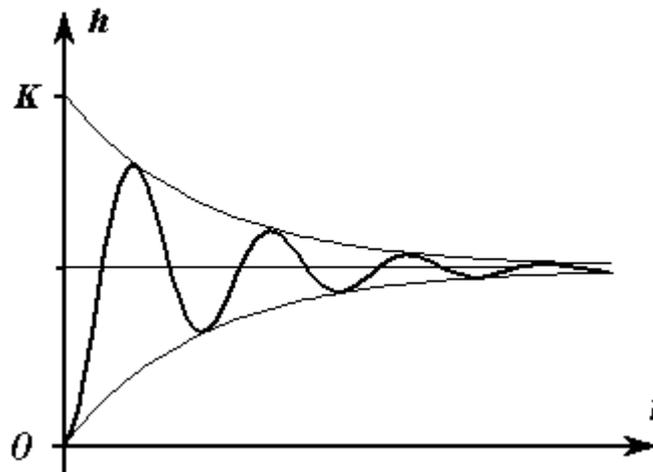


Рисунок 1.7 – Переходная функция колебательного звена [2]

Применение одномерных моделей позволяет сосредоточиться на локальных задачах управления и ускорить настройку регуляторов, что особенно важно для типовых объектов промышленной автоматизации [15].

1.4 Методы управления колоннами

В последние десятилетия управление дистилляционными и ректификационными колоннами становится все более сложной задачей. Одной из ключевых причин этого является ухудшение качества сырья, связанное с истощением месторождений. Нефть, поступающая на переработку, отличается большей изменчивостью физико-химических характеристик, что приводит к высокой степени неопределенности в процессах разделения. Такие изменения особенно актуальны для российских месторождений, где наблюдается тенденция к снижению доли легкой нефти. За рубежом аналогичные проблемы поднимаются в работах [63, 70], где предлагаются адаптивные и робастные подходы к управлению.

В частности, использование методов оптимального управления с учетом неопределенностей позволяет улучшить работу колонн при изменении состава сырья.

Классические методы теории автоматического управления (ТАУ), основанные на строгих математических моделях, часто оказываются недостаточно эффективными, так как строгое описание модели не соотносится с реальностью. В действительности добиться такого точного описания невозможно по той причине, что реальный объект не находится в вакууме. Вследствие этого управление должно обеспечивать стабильность и эффективность работы системы даже в условиях неопределённости [5, 56, 67]. Существуют различные методы учета неопределенности в классической ТАУ, способные компенсировать воздействие изменяющихся условий.

1. Запас устойчивости. Методы анализа запаса устойчивости позволяют учесть параметрические неопределенности путем оценки запаса по фазе и усилению. Для систем управления, спроектированных с использованием частотных методов, таких как критерий Найквиста или диаграммы Боде, возможно оценить устойчивость системы к небольшим изменениям параметров [4]. Таким образом, наличие достаточного запаса по фазе и усилению обеспечивает устойчивость системы при изменении характеристик объекта управления.

2. Частотные методы анализа и синтеза систем управления являются классическим инструментом учета неопределенностей. Используя амплитудно-фазовые частотные характеристики системы, можно оценить чувствительность системы к неопределенностям и внести коррекции для повышения робастности [32]. Например, введение корректирующих звеньев в систему управления позволяет уменьшить влияние изменений в параметрах объекта.

3. Модели с параметрической неопределенностью. Для линейных систем можно использовать модели с параметрическими возмущениями, где параметры объектов управления рассматриваются как интервальные или случайные величины, принимающие значения из определенного диапазона. Один из подходов к анализу таких систем заключается в применении критерия Гурвица или анализа

корневых годографов для исследования устойчивости системы при варьировании параметров [6].

4. Грубое управление. Один из подходов к проектированию систем управления, который позволяет учитывать неопределенности в модели объекта за счет использования простых и надежных законов управления. Термин «грубое» подчеркивает, что система не стремится к точной компенсации всех изменений и возмущений, а нацелена на поддержание устойчивости и приемлемого качества работы даже при значительных изменениях в параметрах объекта. В отличие от робастного управления, которое ориентировано на сохранение заданного уровня качества управления в условиях неопределенности, грубое управление фокусируется на том, чтобы обеспечить «грубое» поведение системы, удовлетворяющее минимальным требованиям к устойчивости и производительности [2].

Для преодоления этих вызовов необходимы подходы, способные учитывать неопределенности и обеспечивать устойчивость систем управления к изменяющимся условиям. Наиболее перспективными направлениями являются применение робастных или адаптивных методов управления, которые позволяют сохранять эффективность даже при значительных отклонениях параметров от номинальных значений.

Методы прямой адаптации представляют собой подходы, при которых система управления изменяет свои параметры в реальном времени в ответ на изменяющиеся условия и неопределенности. Методы прямой адаптации основываются на том, что система управления имеет встроенные механизмы корректировки своих параметров в зависимости от наблюдаемых изменений в объекте управления или внешних условиях. Такие методы особенно эффективны в ситуациях, когда неопределенности велики, и заранее построенная модель объекта не может точно описать все его возможные состояния [7, 12].

Прямые адаптивные системы управления обычно используют в реальном времени информацию о поведении объекта управления и сравнивают ее с желаемым поведением. Если наблюдаются значительные отклонения, система

корректирует свои параметры. Основные подходы к реализации методов прямой адаптации включают: метод модели с референсной траекторией, где система сравнивает реальное поведение объекта с эталонной моделью и корректирует параметры управления на основе возникающих ошибок [22]; метод Ляпунова, который использует критерий устойчивости Ляпунова для построения адаптивных регуляторов, обеспечивающих стабильность системы при изменении параметров объекта [36].

Чтобы найти настройки методами прямой адаптации потребуется много времени из-за того, что параметры регулятора изменяются постепенно. Все это приводит к итерационному поиску настроек, где каждая из итераций состоит из анализа переходных процессов. Для многомерных объектов такой способ нахождения оптимальных настроек становится трудоёмкой задачей.

Методы идентификационной адаптации предполагают наличие специальной процедуры идентификации объекта управления, в ходе которой система оценивает текущие параметры объекта и корректирует законы управления на основе полученных данных. В отличие от методов прямой адаптации, идентификационная адаптация включает явный процесс оценки модели объекта, что делает этот подход особенно эффективным в условиях, когда параметры объекта сильно изменяются с течением времени. Идентификационная адаптация основана на регулярном обновлении математической модели объекта управления. В реальном времени система оценивает текущие параметры объекта, такие как коэффициенты передаточной функции, инерционные характеристики и другие параметры, и использует полученные данные для пересчета оптимальных значений параметров регуляторов.

Методы идентификационной адаптации обеспечивают высокую точность управления за счет регулярного обновления модели объекта управления, что делает их эффективной в условиях значительных изменений в объекте. При определении параметров объекта управления зачастую необходимо применять активные возмущающие воздействия через управляющие каналы, поскольку идентификация основывается на анализе откликов на типовые изменения. Однако в случае

многомерных систем входные сигналы должны быть достаточно мощными для получения чётких реакций, что может негативно сказаться на качестве продукции.

Робастное управление — это подход, направленный на обеспечение устойчивости и желаемого качества работы системы при наличии неопределенностей в модели объекта. В отличие от адаптивных методов, где система изменяет свои параметры в ответ на изменения объекта, робастное управление стремится заранее обеспечить запас устойчивости, позволяющий системе работать эффективно без необходимости коррекции параметров в реальном времени [1, 16, 20, 21, 53, 64, 66, 71, 72, 73, 74]. В основе методологии робастного управления лежит предварительная настройка регулятора на наихудшие условия функционирования системы. Такой подход позволяет минимизировать риски в критических ситуациях. В результате робастные контроллеры помогают предотвратить недопустимые потери качества продукции или избежать неустойчивости системы. Ключевым преимуществом данного метода является его способность обеспечивать надёжную и стабильную работу даже при существенных неопределённостях и внешних возмущениях.

Эти системы могут эффективно функционировать без необходимости сложной идентификации или адаптации.

Основной недостаток заключается в том, что робастное управление зачастую приводит к консервативным решениям, когда система настроена на худшие возможные условия. Это может приводить к снижению эффективности в реальных условиях, когда неопределенности не настолько значительны [24].

Все рассмотренные подходы имеют свои недостатки, в связи с этим предлагается объединить подходы, что позволит избавиться от их минусов, взяв только достоинства. Суть этой стратегии заключается в том, чтобы система управления работала близко к оптимальному режиму при параметрах объекта, соответствующих номинальным значениям, но при отклонениях от номинала корректировала параметры регулятора, сближая их к робастным. Эта перестройка должна происходить без необходимости сложной процедуры идентификации, характерной для адаптивного подхода, и не вызывать значительных изменений в

системе. Робастные настройки будут использоваться лишь в критических случаях, чтобы избежать потери устойчивости, во всех остальных ситуациях система будет пытаться двигаться к номинальным настройкам [9, 29, 48].

Исходя из сказанного, объединённый подход реализует робастно самонастраивающийся регулятор, преимущество которого заключается в гибкости и возможности функционировать в условиях неопределенности и существенных изменений параметров объекта.

1.5 Приложение для синтеза настроек регуляторов

В основу работы положены ранее разработанные компенсационный и комбинированный методы [44, 79]. Данные методы реализованы в программного комплексе (ПК) ММО-Master [33]. Но как методы, так и ПК не учитывали неопределенность параметров объекта управления (ОУ), то есть были предназначены только для объектов в детерминированных условиях. Поэтому была поставлена задача модифицировать данные методы и реализовать свое приложение для расчета настроек регуляторов. В качестве среды разработки использовался MatLab & Simulink [67]. Все методы, которые реализованы в данном приложении будут подробно описаны в соответствующих главах. Также на методы была подана заявка на патент [28] (Приложение М) и получена регистрация программы для ЭВМ [10] (Приложение Л)

Рассмотрим функциональные возможности приложения и последовательность действий при работе с ним. Для запуска приложения необходимо разархивировать папку и в MatLab перейти в директорию, куда была перемещена папка из архива. После этого в консоли необходимо написать *Main*, и Вас встретит главное меню, изображенное на рисунке 1.8.

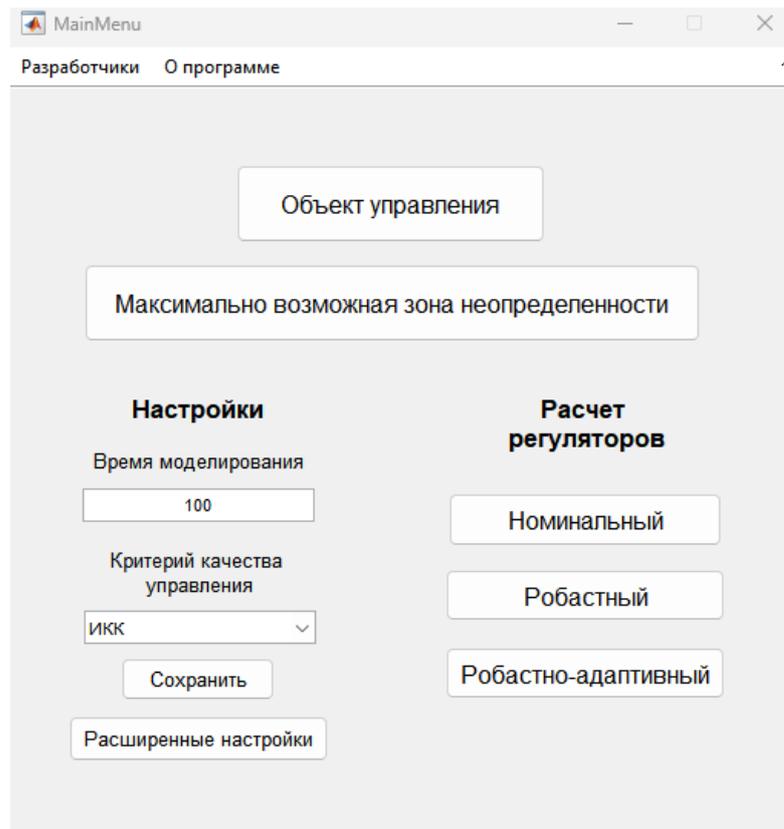


Рисунок 1.8 – Главное меню (составлено автором)

При нажатии на кнопку *Объект управления* высветится меню для ввода параметров модели, а также выбора размерности. При выборе размерности появляются кнопки для ввода параметров при нажатии на них. После ввода параметров необходимо нажать кнопку *сохранить* и значения сохраняться в рабочее пространство MatLab, а также для удобства параметры, которые были введены, отобразятся в консоли. На рисунке 1.9 приведен пример ввода параметров для объекта со следующими параметрами (1.7):

$$H(p) = \frac{12.8e^{-p}}{16.7p + 1}, \quad (1.7)$$

где $H(p)$ — передаточная функция, p — оператор Лапласа.

Если объект имеет две инерционные составляющие, то необходимо в строку знаменателя записать каждую из частей через пробел, как показано на рисунке 1.10, например, для (1.8):

$$H(p) = \frac{-0.101e^{-12p}}{(48p + 1)(45p + 1)}, \quad (1.8)$$

где $H(p)$ — передаточная функция, p — оператор Лапласа.

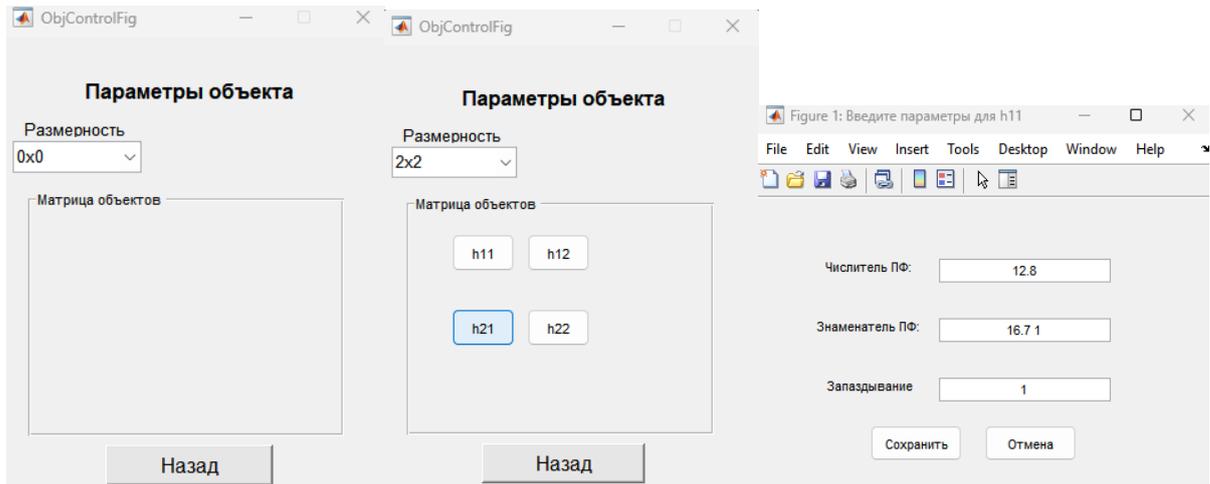


Рисунок 1.9 – Ввод параметров ОУ (составлено автором)

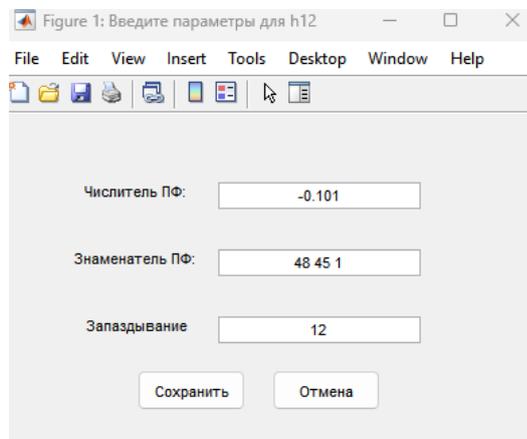


Рисунок 1.10 – Ввод параметров для объекта с двумя инерционными составляющими (составлено автором)

Ввод колебательного ОУ с параметрами $b = 0.21, c = 0.25, k = 1, \tau = 0$.
Можно наблюдать на рисунке 1.11.

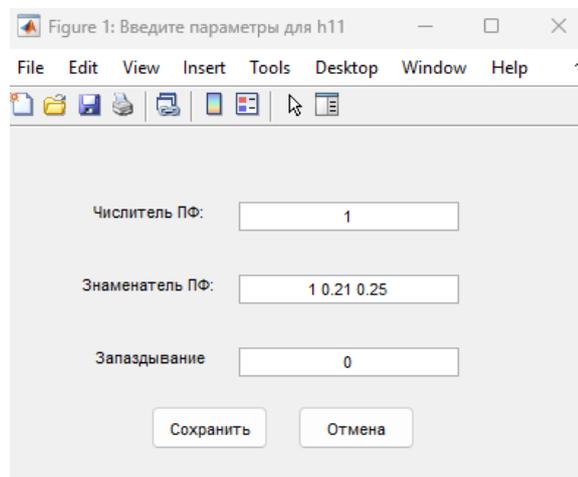


Рисунок 1.11 – Ввод параметров для колебательного объекта (составлено автором)

При нажатии на кнопку *Максимально возможная зона неопределенности*, открывается окно (рисунок 1.12) с двумя кнопками, при нажатии которых происходит расчет зоны неопределенности статических коэффициентов. Результат расчетов появляется в этом же окне, а также выводится в консоли MatLab. Для удобства результаты также сохраняются в Excel файл.

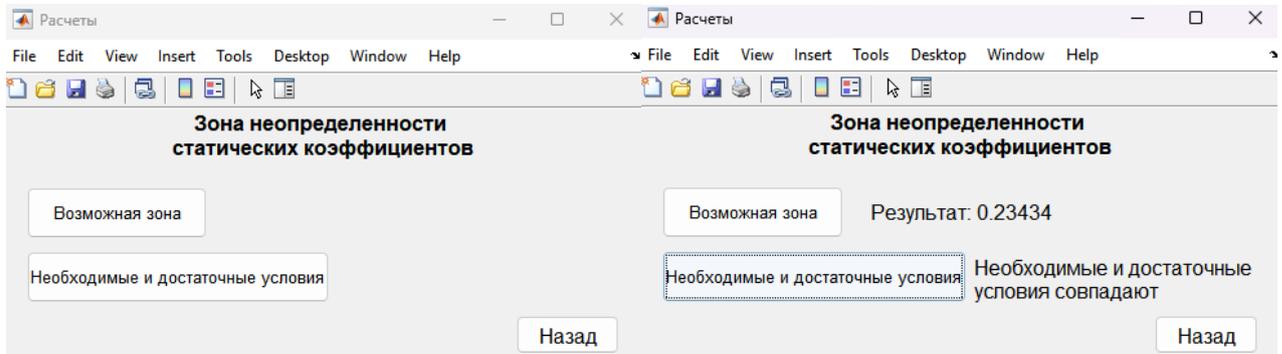


Рисунок 1.12 – Расчет зоны неопределенности для статических коэффициентов
(составлено автором)

Перед тем как приступить к расчетам регуляторов, необходимо задать настройки. На главном экране нас встречают базовые настройки (рисунок 1.13), а именно выбор критерия качества управления и задается время моделирования. После этого необходимо нажать кнопку *сохранить*.

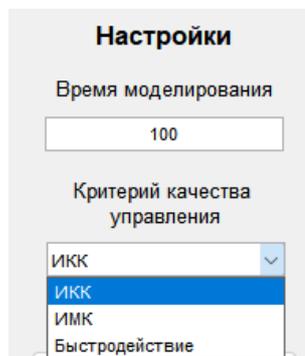


Рисунок 1.13 – Базовые настройки (составлено автором)

Также есть расширенные настройки, и чтобы к ним перейти необходимо нажать на одноименную кнопку и появится следующее окно (рисунок 1.14а).

В расширенных настройках можно задать для каждого параметра свою зону неопределенности. Для этого необходимо нажать кнопку *показать ОУ* и появятся соответствующие кнопки для каждого ОУ. Пример ввода показан на рисунке 1.15.

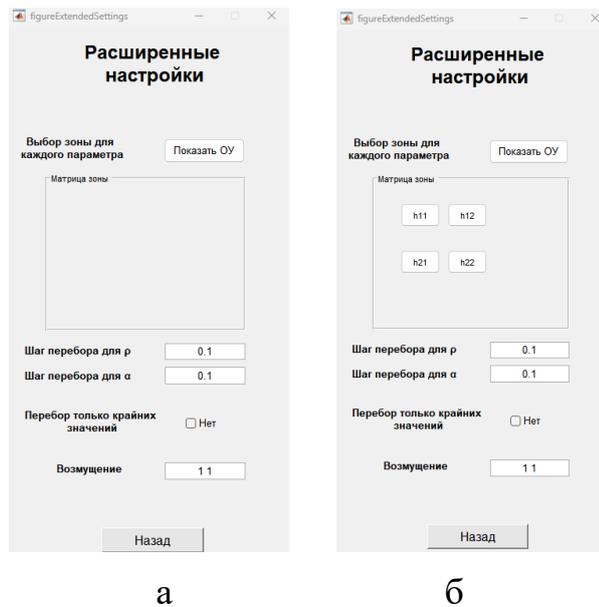


Рисунок 1.14 – а) Расширенные настройки; б) Расширенные настройки после нажатия кнопки *показать ОУ* (составлено автором)

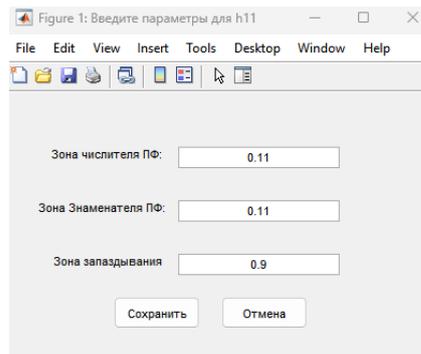


Рисунок 1.15 – Пример ввода зоны неопределенности для каждого параметра (составлено автором)

Также можно задать шаг перебора для поиска коэффициентов (ρ и α) для робастного и робастно-адаптивного регуляторов. При расчете регуляторов учитываются только крайние значения параметров зоны неопределенности, но если необходимо учитывать также и номинальные составляющие, то тогда необходимо нажать на специальный *чекбокс* в расширенных настройках.

Помимо выбора зоны для каждого параметра, выбора шага перебора и выбора, перебирать ли только крайние значения, можно также выбрать возмущения по каналам, что тоже делается в этом же окне.

После ввода ОУ и сохранения настроек для расчетов можно приступать к расчетам настроек регулятора. Все результаты расчетов сохраняются в

специальном Excel файле, а также в командной строке. По окончании расчетов сработает звуковой сигнал. Можно начать как с расчета номинального регулятора, так и с робастного и даже сразу перейти к робастно-адаптивному. В таком случае сначала найдутся номинальные и робастные настройки регуляторов, и только потом перейдет к расчету робастно-адаптивного. При этом во время расчета будет выведено окно, на котором написано, какой именно расчет идет. Также в командной строке можно увидеть количество итераций. В зависимости от типа ОУ (одномерный или многомерный) при нажатии на кнопки *Номинальный*, *Робастный* и *Адаптивный* появляются соответствующие окна, которые показаны на рисунке 1.16.

Во время расчетов появляется окно, чтобы пользователь понимал, что программа работает. По окончании расчета результат сохраняется в Excel файл, а в окне выводятся значения (справа или снизу от нажатой кнопки).

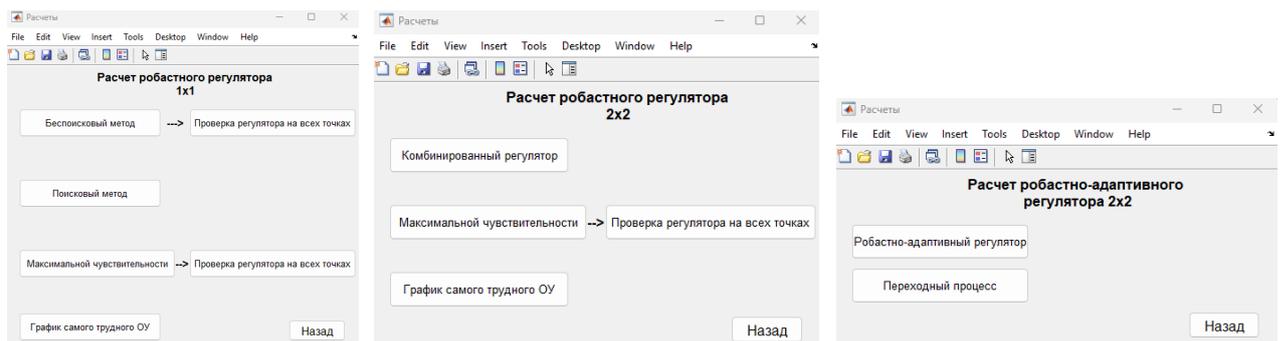


Рисунок 1.16 – Окно расчета регуляторов (слева – расчет робастного регулятора для 1×1 , по центру – расчет робастного регулятора для 2×2 , справа – расчет робастно-адаптивного регулятора для 2×2) (составлено автором)

Для некоторых методов можно проверить полученный регулятор на всех точках зоны неопределенности, а также построить график для самого «трудного ОУ». На рисунке 1.17 продемонстрирован пример графика переходного процесса для «трудного» ОУ.

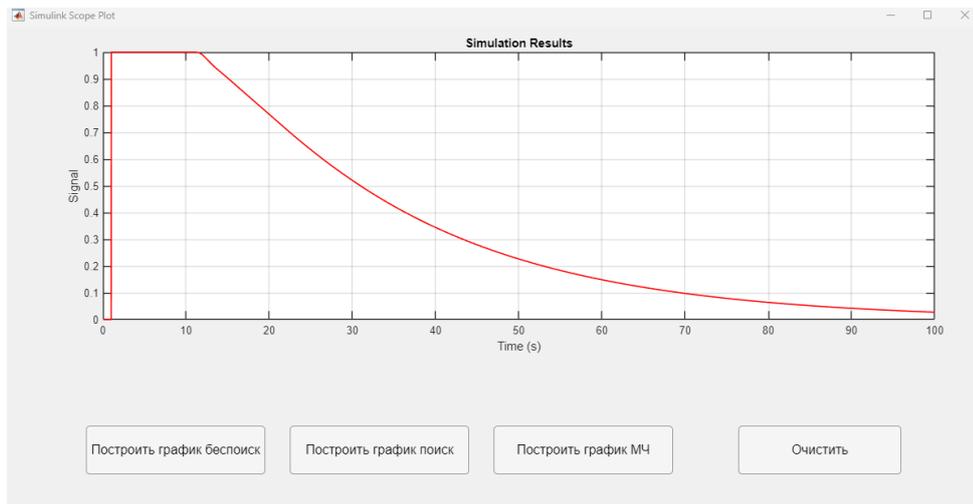


Рисунок 1.17 – График самого «трудного» ОУ (составлено автором)

1.6 Выводы по Главе 1

Нефтяная промышленность, особенно в Российской Федерации, играет стратегическую роль в экономике, обеспечивая значительную часть доходов и экспорта. Современные нефтеперерабатывающие предприятия сталкиваются с повышенными требованиями к качеству продукции, энергоэффективности и экологической безопасности, что требует внедрения передовых технологий и автоматизации.

Нефтепереработка включает три основных этапа: первичную переработку (разделение нефти на фракции), вторичную переработку (химическое преобразование) и товарное производство (смешивание компонентов). Центральное место в этих процессах занимают ректификационные колонны, интегрированные в установки ЭЛОУ-АВТ, которые обеспечивают разделение нефти на фракции, такие как бензин, керосин, дизельное топливо и мазут. ЭЛОУ отвечает за обессоливание и обезвоживание, АТ — за атмосферную перегонку, а ВТ — за вакуумную перегонку, что позволяет эффективно использовать сырье и минимизировать потери.

Ректификационные колонны представляют собой многомерные системы управления (MiMo), где требуется контролировать множество параметров (температура, давление, расходы, концентрации), что усложняется наличием перекрестных связей и запаздываний. Математическое описание таких систем

основано на передаточных матрицах, а управление требует применения сложных методов теории автоматического управления.

Для упрощения анализа и настройки систем управления процессы в колоннах могут быть аппроксимированы одномерными моделями, такими как апериодические (с экспоненциальной динамикой) и колебательные (с затухающими колебаниями) системы. Эти модели помогают сосредоточиться на локальных задачах и ускорить настройку регуляторов.

Изменчивость качества сырья, особенно в условиях истощения месторождений, создает высокую степень неопределенности. Классические методы управления оказываются недостаточными, что приводит к развитию адаптивных, робастных и комбинированных подходов. Адаптивные методы (прямая и идентификационная адаптация) корректируют параметры в реальном времени, но требуют значительных ресурсов. Робастное управление обеспечивает устойчивость при наихудших условиях, но может быть избыточно консервативным. Предлагаемый комбинированный подход объединяет преимущества обоих методов, обеспечивая гибкость и устойчивость.

Для синтеза настроек регуляторов разработано приложение на базе MATLAB & Simulink, расширяющее возможности ранее созданного ПК ММО-Master. Оно позволяет учитывать неопределенность параметров объектов управления, вводить зоны неопределенности, задавать критерии качества и рассчитывать номинальные, робастные и робастно-адаптивные настройки регуляторов с сохранением результатов в Excel-файлы [10]. (Приложение Л)

ГЛАВА 2 РОБАСТНЫЕ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ SISO ОБЪЕКТОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Для управления различными объектами промышленной автоматики широко применяются типовые регуляторы, такие как пропорциональный (П), пропорционально-интегральный (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД). Существуют многочисленные исследования, посвящённые вычислению их параметров в детерминированных условиях, когда математическая модель объекта управления (ОУ) известна [26, 45, 54, 58, 62]. Однако задача настройки регуляторов для систем, работающих в условиях неопределенности, остается значительно более сложной и менее изученной [8, 14, 35, 57].

В данной главе рассматривается задача настройки интегрального регулятора как в условиях полной определенности, так и при наличии параметрической неопределенности. И-регулятор самый простой, но выполняет самую главную задачу в решении задачи регулирования, так как интегральная составляющая обеспечивает астатизм системы. Это свойство гарантирует достижение нулевой ошибки в установлении нового уровня выходной переменной и позволяет компенсировать низкочастотные, а в пределе и постоянные возмущения. Одним из достоинств интегрального регулятора является наличие только одного настраиваемого параметра, что позволяет вывести простые формулы для его настройки. Эти формулы применимы для широкого спектра динамических моделей объектов автоматизации и учитывают различные критерии качества управления. Также предложен метод для робастной настройки ПИ-регулятора, который основан на учете самых чувствительных точек зоны неопределенности.

Блок-схема рассматриваемой системы управления приведена на рисунке 2.1.

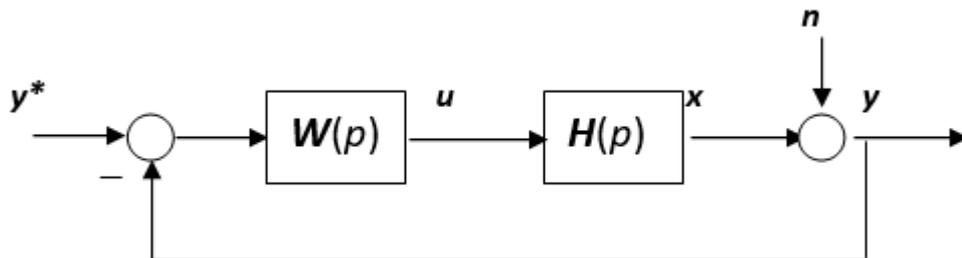


Рисунок 2.1 – Блок-схема системы управления [38]

Наиболее распространённый метод настройки параметров типовых регуляторов начинается с измерения разгонных характеристик объекта управления (ОУ). Этот процесс включает подачу ступенчатого управляющего воздействия на вход системы и регистрацию отклика выходной переменной на это воздействие. Для устойчивых объектов с самовыравниванием разгонные характеристики могут принимать два основных вида: апериодический процесс, при котором выходная переменная постепенно достигает нового установившегося уровня (рисунок 2.2, слева), или тот же процесс с затухающими колебаниями (рисунок 2.2, справа).

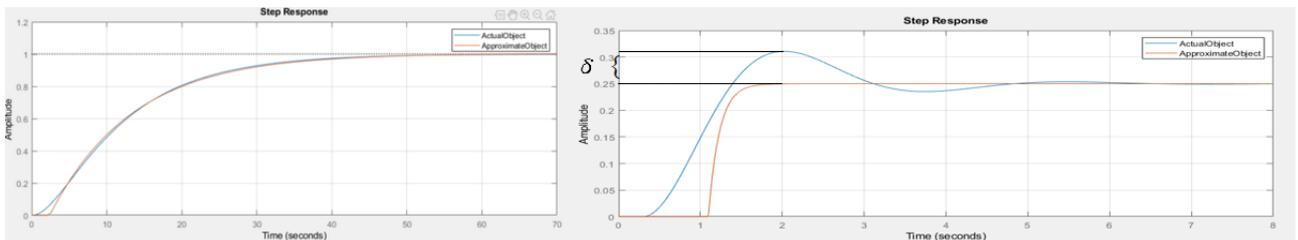


Рисунок 2.2 – Типичные разгонные характеристики (слева апериодический, справа колебательный процессы) и их аппроксимация инерционным звеном с запаздыванием [47]

Предлагается метод настройки интегральных (И) регуляторов, который охватывает оба эти типа отклика. Следуя принципу описания поведения объекта управления с помощью наиболее простых динамических моделей, используются линейные дифференциальные уравнения второго порядка с запаздыванием, которые можно записать в виде:

$$\alpha \ddot{x}(t) + \beta \dot{x}(t) + \gamma x(t) = u(t - \tau), \quad (2.1)$$

где u – управляющее воздействие, x – выходная переменная, τ – запаздывание, t – время, α, β, γ – коэффициенты производных.

При соответствующем выборе параметров α, β, γ и τ данная модель (2.1) может достаточно точно аппроксимировать экспериментальные разгонные характеристики для расчета систем управления с обратной связью. Характеристическое уравнение для этой системы имеет вид (2.1) $\alpha p^2 + \beta p + \gamma = 0$, которое в зависимости от значений коэффициентов может иметь либо два вещественных, либо два комплексно-сопряжённых корня. В случае вещественных корней передаточная функция объекта может быть записана как (2.2):

$$x = \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1p+1)(T_2p+1)}u, \quad (2.2)$$

где u — управляющее воздействие, x — выходная переменная, T_1 и T_2 — постоянные времени двух различных динамических компонентов системы, k — коэффициент усиления, p — оператор Лапласа, τ — запаздывание.

При $T_1 \geq 0, T_2 \geq 0$ — разгонная характеристика ОУ (2.2) носит монотонный апериодический характер. Величины T_1 и T_2 являются постоянными времени двух последовательных инерционных звеньев первого порядка. Такая модель (2.2) может быть интерпретирована как два последовательных идеальных смесителя и транспортер.

В случае комплексно-сопряженных корней модель (2.1) может быть представлена в виде (2.3):

$$x = \frac{ke^{-p\tau}}{p^2 + bp + c}u, \quad (2.3)$$

где u — управляющее воздействие, x — выходная переменная, k — коэффициент усиления, p — оператор Лапласа, τ — запаздывание, параметры b и c определяют динамические свойства системы.

При $\frac{b}{\sqrt{c}} \leq 2, b \geq 0, c > 0$ разгонная характеристика ОУ (2.3) будет иметь колебательный характер.

Эта модель (2.3) может описывать поведение механической системы с пружиной, демпфером вязкого трения и запаздывающим внешним воздействием.

2.1 Беспосредственные методы робастной настройки параметров регуляторов для SiSo «апериодических» объектов

2.1.1 Настройка И-регулятора в детерминированных условиях

Рассмотрим объект управления (ОУ) с передаточной функцией (2.4):

$$H(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1p+1)(T_2p+1)} = \frac{ke^{-p\tau}}{T_1T_2p^2 + (T_1+T_2)p + 1}, \quad (2.4)$$

где $H(p)$ — передаточная функция, T_1 и T_2 — постоянные времени двух различных динамических компонентов системы, k — коэффициент усиления, p — оператор Лапласа, τ — запаздывание.

Известно, что величина $|H(i\omega)|$ характеризует коэффициент усиления гармонического сигнала по каналу управления на частоте ω . Основная задача интегрального (И) регулятора заключается в подавлении низкочастотных возмущений, где ω близко к нулю. На этих частотах можно записать передаточную функцию следующим образом в виде (2.5):

$$H(i\omega) = \frac{ke^{-i\omega\tau}}{T_1T_2(i\omega)^2+(T_1+T_2)i\omega+1} \approx \frac{ke^{-i\omega\tau}}{(T_1+T_2)i\omega+1}. \quad (2.5)$$

где $H(p)$ — передаточная функция, T_1 и T_2 — постоянные времени двух различных динамических компонентов системы, k — коэффициент усиления, ω — угловая частота, τ — запаздывание.

Формула (2.5) дает основание для аппроксимации ОУ второго порядка (2.2) более простым объектом первого порядка с передаточной функцией представленной в (2.6)

$$H(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{Tp+1}, \quad (2.6)$$

где $T = T_1 + T_2$ - постоянная времени, $H(p)$ — передаточная функция, k — коэффициент усиления, p — оператор Лапласа, τ — запаздывание.

Кроме того, инерционное звено с запаздыванием (2.6) можно аппроксимировать звеном с эквивалентным чистым запаздыванием $\tilde{\tau} = \tau + T = \tau + T_1 + T_2$ (рисунок 2.3).

В рамках компенсационного метода [17, 42] было показано, что для управления ОУ, имеющим передаточную функцию чистого запаздывания $H(p) = ke^{-p\tau}$, оптимальная настройка И-регулятора с передаточной функцией $W(p) = k_i/p$ определяется соотношением $k_i = \frac{r}{k\tau}$, где коэффициент r варьируется в зависимости от используемого критерия качества управления [44].

Например:

- для интегрального квадратичного критерия (ИКК) $r = 0.739$;
- для интегрального модульного критерия (ИМК) $r = 0.589$;
- для критерия максимальной быстродействия (время регулирования $t_{\text{пер}}$) $r = 0.507$.

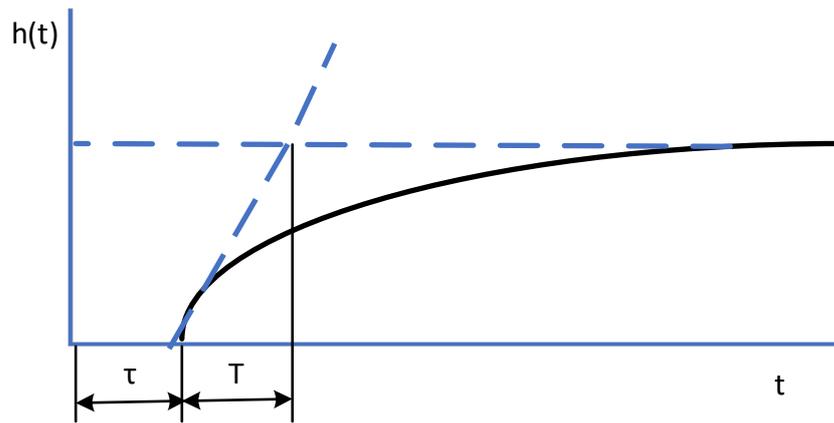


Рисунок 2.3 – Разгонные характеристики инерционного звена с запаздыванием и звена с эквивалентным чистым запаздыванием [38]

Таким образом, для настройки И-регулятора применительно к объекту управления (2.2) с использованием ИКК можно использовать следующий коэффициент усиления, который находится по формуле (2.7):

$$k_i = \frac{r}{k(\tau + T_1 + T_2)}, \text{ где } r = 0.739 \quad (2.7)$$

где $H(p)$ — передаточная функция, T_1 и T_2 — постоянные времени двух различных динамических компонентов системы, τ — запаздывание, r — эталонный коэффициент.

Пример 2.1. Рассмотрим ОУ типа инерционного звена с передаточной функцией $H(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{Tp+1}$ как частный случай модели (2.2) при $T_2 = 0$. Пусть $k = 1$, $T = 3$, $\tau = 6$. Рассматриваемый процесс связан с управлением температурой отбора боковой фракции (дизель) в атмосферной ректификационной колонне (рисунок 1.3). Боковая фракция отбирается с определенной тарелки. Управление введется подачей жидкости в змеевик или теплообменник на уровне отбора. Если предположить, что все остальные показатели являются константной, то такой процесс можно описать как апериодическое звено первого порядка. Номинальное значение дизеля соответствует 200 °С.

Тогда в соответствии с (2.7) коэффициент усиления И-регулятора $k_i = \frac{0.739}{k(T+\tau)} = \frac{0.739}{1 \times (3+6)} = 0.082$. На рисунке 2.4 показаны переходные процессы изменения

управляющей и выходной переменной при обработке приведенного к выходу ОУ возмущения $1(t)$.

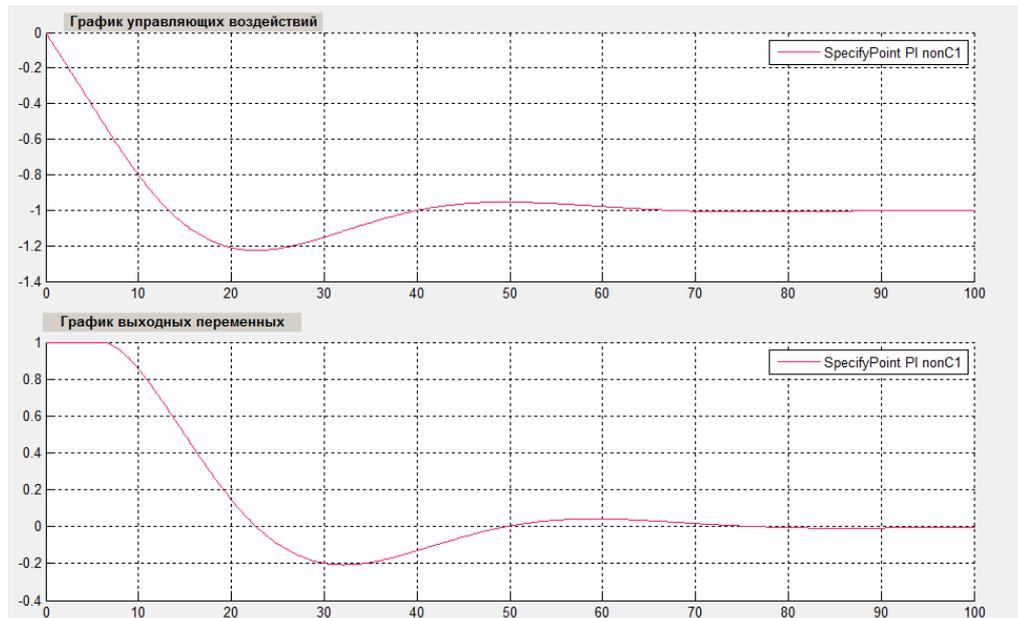


Рисунок 2.4 – Переходные процессы в системе с И-регулятором для инерционного звена с запаздыванием при $k_i = 0.082$ (составлено автором)

При такой настройке регулятора ИКК = 0.1308, а длительность переходного процесса $t_{\text{пер}} = 45.4$.

Пример 2.2. Рассмотрим динамику теплового баланса в нижней части колонны (ребойлер). Подача тепла через ребойлер определяет скорость испарения смеси, что, в свою очередь, влияет на состав паровой фазы, поднимающейся по колонне. Этот процесс можно описать как апериодическое звено второго порядка, где выходной переменной является температура паровой фазы (или доля легкокипящей компоненты в паре), а входное воздействие — подача тепла на ребойлер. Передаточная функция выглядит следующим образом: $H(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$ как частный случай модели (2.2) при $\tau = 0$. Пусть $k = 1$, $T_1 = 3$, $T_2 = 5$. Тогда в соответствии с (2.7) коэффициент усиления И-регулятора $k_i = \frac{0.739}{k(T_1 + T_2)} = \frac{0.739}{1 \times (3 + 5)} = 0.092$. На рисунке 2.5 показаны переходные процессы изменения управляющей и выходной переменной при обработке приведенного к выходу ОУ возмущения $1(t)$.

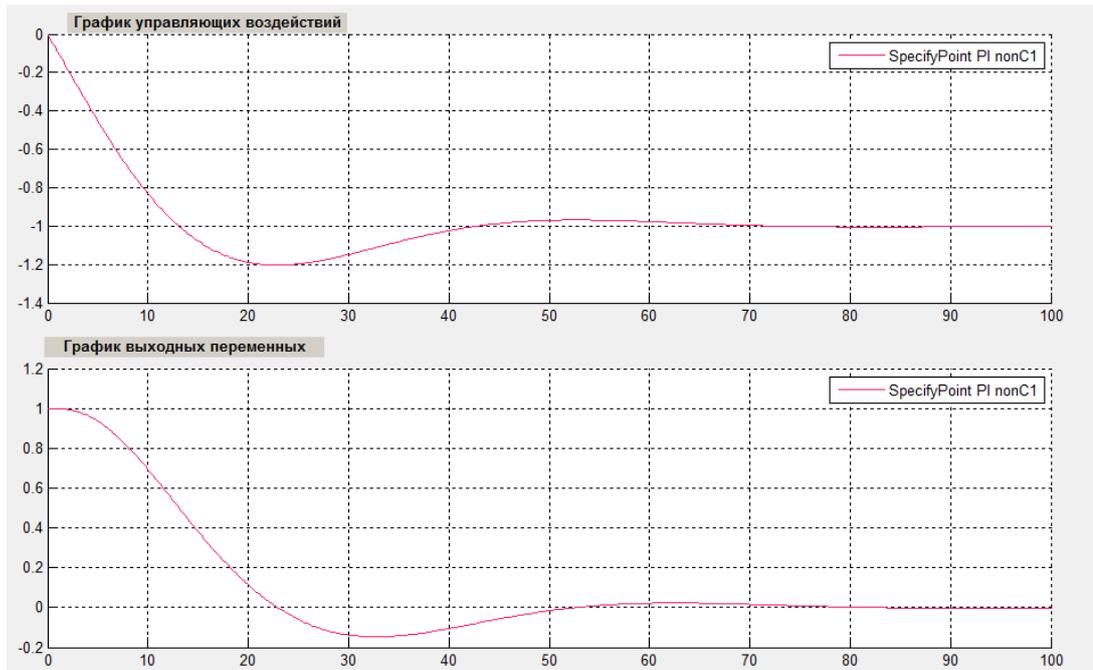


Рисунок 2.5 – Переходные процессы в системе с И-регулятором для двухъёмкостного звена при $k_i = 0.092$ (составлено автором)

При такой настройке регулятора ИКК = 0.1037, а длительность переходного процесса $t_{\text{пер}} = 46$. Сравнение поискового и беспойского методов представлено в соответствующем разделе 2.3.

2.1.2 Настройка И-регулятора в условиях неопределенности

Рассмотрим систему управления, описанную вектором параметров объекта управления (ОУ) $\mathbf{Z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$ и вектором параметров регулятора $\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$. Предположим, что задан показатель качества управления, например, интегральный квадратичный критерий (ИКК), который характеризует переходные процессы в замкнутой системе при изменении задания на выходные переменные или при возникновении возмущений, приведенных к выходу. Этот показатель обозначим как $J = \varphi(\mathbf{Z}, \mathbf{A})$. Также предполагаем, что область возможных значений параметров объекта управления ограничена областью $\mathbf{Z} \in \mathbf{G}$, что может представлять собой интервалы возможных значений для каждого параметра модели объекта.

В классическом подходе настройки регулятора $\mathbf{A}_{\text{ном}}$ рассчитываются с использованием известных методов на основе номинальных параметров модели

объекта \mathbf{Z}_r , что соответствует центральной точке области неопределенности \mathbf{G} . Формула для расчета таких номинальных настроек выглядит как $\mathbf{A}_{nom} = \mathbf{F}(\mathbf{Z}_r)$.

В робастном подходе параметры регулятора \mathbf{A}_{rob} , которые обеспечивают минимальное значение показателя качества J в худшем случае, определяются через решение минимаксной задачи, которая представлена в (2.8):

$$J_{\min \max} = \min_{\mathbf{A}} \max_{\mathbf{Z} \in \mathbf{G}} \varphi(\mathbf{Z}, \mathbf{A}). \quad (2.8)$$

где J – заданный показатель качества управления, \mathbf{Z} – вектор параметров модели, \mathbf{A} – вектор параметров регуляторов, \mathbf{G} – область неопределенности.

Задача минимаксной оптимизации направлена на получение наилучшего гарантированного результата при наихудшем сценарии. Альтернативно можно поставить задачу на достижение наилучшего среднего результата по всем возможным значениям параметров объекта. В таком случае решается следующая задача минимизации, показанная в (2.9):

$$\bar{J}_{\min} = \min_{\mathbf{A}} \overline{\varphi(\mathbf{Z}, \mathbf{A})}, \quad (2.9)$$

где J – заданный показатель качества управления, \mathbf{Z} – вектор параметров модели, \mathbf{A} – вектор параметров регуляторов.

Осреднение производится по всем значениям $\mathbf{Z} \in \mathbf{G}$.

В частном случае, когда речь идет о настройке И-регулятора, вектор параметров регулятора \mathbf{A} имеет вид скаляра k_i , причем, как показывает компьютерное моделирование, для наиболее часто применяемых показателей качества управления (интегральный квадратичный критерий (ИКК), интегральный модульный критерий (ИМК), критерий максимального быстродействия ($t_{\text{пер}}$)) целевая функция имеет сходное поведение, а именно: для любого фиксированного \mathbf{Z} при изменении k_i от 0 до ∞ функция $\varphi(\mathbf{Z}, k_i)$ монотонно убывает до достижения глобального минимума при некотором $k_i^{(opt)}(\mathbf{Z})$, а затем при дальнейшем увеличении k_i возрастает до бесконечности.

Пусть в условиях неопределенности найдено k_i , которое имеет следующий вид (2.10):

$$\tilde{k}_i = \min_{\mathbf{Z} \in \mathbf{G}} \{k_i^{(opt)}(\mathbf{Z})\}. \quad (2.10)$$

где \mathbf{Z} – вектор параметров модели, \tilde{k}_i – коэффициент усиления И-регулятора, $k_i^{(opt)}$ – оптимальный коэффициент усиления И-регулятора.

Для приближенного решения задач (2.8) и (2.9) предлагается принять равенство (2.11)

$$k_i^{(rob)} = \tilde{k}_i. \quad (2.11)$$

где \tilde{k}_i – коэффициент усиления И-регулятора, $k_i^{(rob)}$ – коэффициент усиления робастного И-регулятора.

Необходимым условием работоспособности системы управления является ее устойчивость. Поскольку неустойчивость замкнутой системы с параметрами ОУ \mathbf{Z} может иметь место лишь при $k_i > k_i^{(opt)}(\mathbf{Z})$, то ясно, что достаточным условием устойчивости замкнутой системы при всех $\mathbf{Z} \in \mathbf{G}$ является выполнение неравенства $k_i^{(rob)} \leq \tilde{k}_i$. С другой стороны, строгое выполнение неравенства $k_i^{(rob)} < \tilde{k}_i$ явно не рационально, так как в этом случае в силу монотонного убывания по k_i функции $\varphi(\mathbf{Z}, k_i)$ на интервале $(0, \tilde{k}_i)$ условия $\varphi(\mathbf{Z}, k_i^{(rob)}) > \varphi(\mathbf{Z}, \tilde{k}_i)$ будут выполняться при всех $\mathbf{Z} \in \mathbf{G}$. Отсюда следует, что для гарантии устойчивости и вместе с тем обеспечения приемлемого качества управления имеет смысл формировать настройки И-регуляторов по правилу (2.10), (2.11), причем это правило относится как к неколебательным, так и к колебательным объектам.

Для решения оптимизационной задачи (2.10) рассмотрим область неопределенности \mathbf{G} , заданную интервалами возможных значений параметров динамической модели.

Применительно к модели двухмассового звена с запаздыванием (2.2) будем считать заданными интервалы для параметров k, τ, T_1, T_2 . Тогда с учетом (2.7), (2.10) и (2.11) робастная настройка И-регулятора $k_i^{(rob)}$ находится путем решения задачи оптимизации показанная в (2.12):

$$k_i^{(rob)} = \min\left\{\frac{r}{k(\tau + T_1 + T_2)} \mid \underline{k} \leq k \leq \bar{k}, \underline{\tau} \leq \tau \leq \bar{\tau}, \underline{T}_1 \leq T_1 \leq \bar{T}_1, \underline{T}_2 \leq T_2 \leq \bar{T}_2\right\} \quad (2.12)$$

где $k_i^{(rob)}$ - коэффициент усиления робастного И-регулятора, $\underline{T}_1, T_1, \overline{T}_1$ и $\underline{T}_2, T_2, \overline{T}_2$ — постоянные времени двух различных динамических компонентов системы на границах зоны неопределенности, $\underline{k}, k, \overline{k}$ – коэффициент усиления на границах зоны неопределенности, $\underline{\tau}, \tau, \overline{\tau}$ – запаздывание на границах зоны неопределенности, r – эталонный коэффициент.

Решение этой задачи дает формулу для робастной настройки И-регулятора показанную в (2.13):

$$k_i^{(rob)} = \frac{r}{\overline{k}(\overline{\tau} + \overline{T}_1 + \overline{T}_2)}. \quad (2.13)$$

где $k_i^{(rob)}$ - коэффициент усиления робастного И-регулятора, \overline{T}_1 и \overline{T}_2 — постоянные времени двух различных динамических компонентов системы на верхнем граничном значении, \overline{k} – коэффициент усиления на верхнем граничном значении, $\overline{\tau}$ – запаздывание на верхнем граничном значении, r – эталонный коэффициент.

Необходимо учесть, что (2.13) решает оптимизационную задачу (2.12) приближенно, так как в их основе лежит аппроксимация ОУ второго порядка звеном чистого запаздывания.

Пример 2.3. Возьмем ОУ из примера 2.1. Примем зону неопределенности равной 50 %, что соответствует что соответствует диапазону температуры боковой фракции 180 – 220 °С. В таблице 2.1 представлены пределы изменения параметров модели ОУ.

Таблица 2.1 – Пределы изменения параметров (составлено автором)

	k	T	τ
Верхний	1.5	4.5	9
Средний	1	3	6
Нижний	0.5	1.5	3
$\delta, \%$	50	50	50

Воспользуемся формулой 2.13 для нахождения интегрального коэффициента регулятора k_i . В частности, для интегрального квадратичного критерия (ИКК) $r = 0.739$.

Тогда поставив все известные параметры в формулу (2.13), получим (2.14) и (2.15):

$$k_i^{(rob)} = \frac{43 \cdot 0.739}{1.5(9+4.5+0)} \quad (2.14)$$

$$k_i^{(rob)} = 0.0365 \quad (2.15)$$

где $k_i^{(rob)}$ - коэффициент усиления робастного И-регулятора.

Используя найденное в (2.15) значение коэффициента, рассчитаем ИКК для каждой из 27 точек ($n = 3^3$) возможных сочетаний параметров ОУ и решим две задачи оптимизации:

1. минимаксную,
2. средних показателей.

Для расчетов использовалась модель, построенная в Simulink (Приложение И, рисунок И.1) и программа для расчета ИКК, которая была написана в MatLab. Также можно воспользоваться этой программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5. Время моделирования $T_{mod} = 100$.

Итого: получили ответ на две задачи оптимизации:

1. Нашли параметры объекта с максимальным значением ИКК = 0.3473, $k = 0.5$, $T = 4.5$, $\tau = 9$. Его переходный процесс представлен на рисунке 2.6.

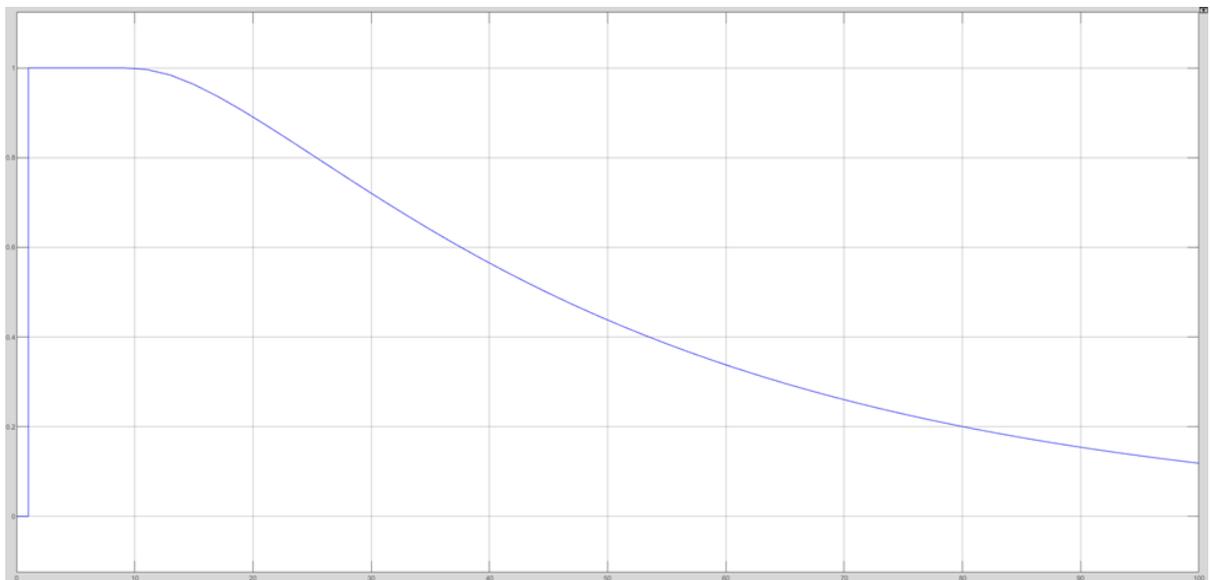


Рисунок 2.6 – Переходный процесс с максимальным значением ИКК = 0.3473
(составлено автором)

Таблица со всеми значениями ИКК и переходные процессы представлены в Приложении А. В таблице с А.1 представлены результаты расчета. Также после

таблиц с расчетами можно изучить вид переходных процессов по графикам на рисунках А.1-А.27.

2. Нашли среднее значение по всем 27 точкам зоны неопределенности: $ИКК_{\text{сред}} = 0.2207$.

Пример 2.4. Возьмем ОУ из примера 2. Примем зону неопределенности равной 50 %. В таблице 2.2 представлены пределы изменения параметров модели ОУ.

Таблица 2.2 – Пределы изменения параметров (составлено автором)

	k	T_1	T_2
Верхний	1.5	4.5	7.5
Средний	1	3	5
Нижний	0.5	1.5	2.5
$\delta, \%$	50	50	50

Воспользуемся формулой 2.13 для нахождения интегрального коэффициента регулятора k_i . В частности, для интегрального квадратичного критерия (ИКК) $r = 0.739$.

Тогда, поставив все известные параметры в формулу (2.13), получим (2.16) и (2.17):

$$k_i^{(rob)} = \frac{0.739}{1.5(9+4.5+7.5)} \quad (2.16)$$

$$k_i^{(rob)} = 0.0410 \quad (2.17)$$

где $k_i^{(rob)}$ - коэффициент усиления робастного И-регулятора.

Используя найденное значение (2.17) коэффициента, рассчитаем ИКК для каждой из 27 точек ($n = 3^3$) возможных сочетаний параметров ОУ и решим две задачи оптимизации:

1. минимаксную,
2. средних показателей.

Для расчетов использовалась модель, построенная в Simulink (Приложение И, рисунок И.1) и программа для расчета ИКК, которая была написана в MatLab. Также можно воспользоваться этой программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5. Время моделирования $T_{mod} = 100$.

Итого: получили ответ на две задачи оптимизации:

Нашли параметры объекта с максимальным значением ИКК = 0.3064: $k = 0.5$, $T_1 = 4.5$, $T_2 = 7.5$. Его переходный процесс представлен на рисунке 2.7.

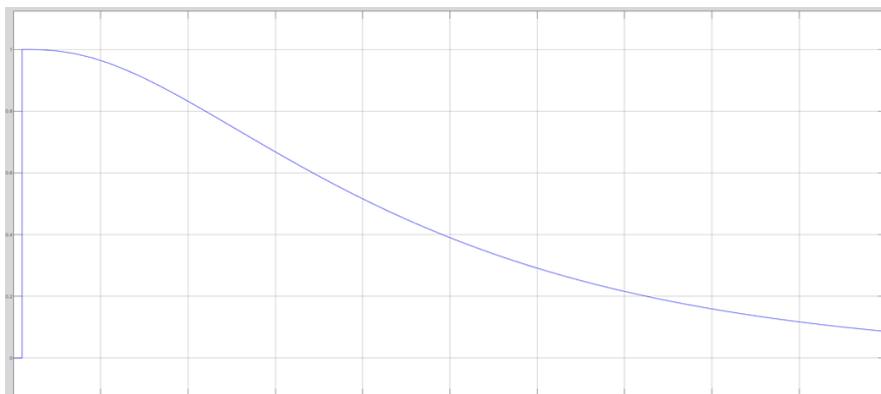


Рисунок 2.7 – Переходный процесс с максимальным значением ИКК = 0.3064
(составлено автором)

Таблица со всеми значениями ИКК и все переходные процессы представлены в Приложении А. В таблице с А.2 представлены результаты расчета. Также после таблиц с расчетами можно изучить вид переходных процессов по графикам на рисунках А.28-А.54.

2. Нашли среднее значение по всем 27 точкам зоны неопределенности: $ИКК_{\text{сред}} = 0.1918$. Видно, что за время моделирования 100 процесс не сходится, поэтому, чтобы убедиться, что процесс устойчивый, увеличим время моделирования до 350 (рисунок 2.8).

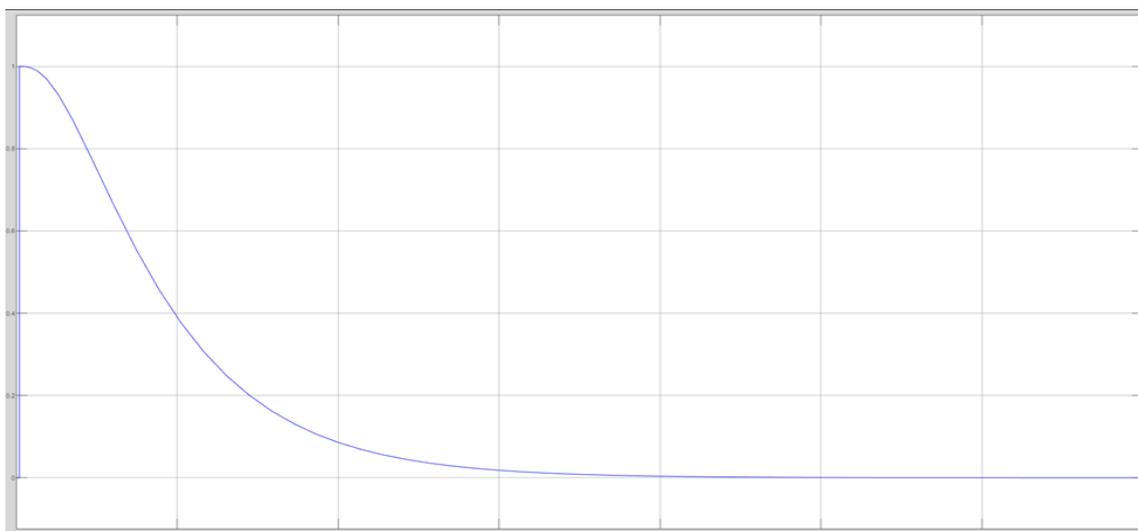


Рисунок 2.8 – Переходный процесс с максимальным значением $T_{mod} = 350$
(составлено автором)

2.2 Бесписковые методы робастной настройки параметров регуляторов для SiSo «колебательных» объектов

2.2.1 Настройка И-регулятора в детерминированных условиях

Рассмотрим устойчивый объект управления (ОУ) (2.3) с колебательной разгонной характеристикой, для которой должны выполняться условия: $\frac{b}{\sqrt{c}} \leq 2$, $b \geq 0$, $c > 0$. Подобно ОУ (2.2) с апериодической разгонной характеристикой используем аппроксимацию ОУ (2.3) звеном чистого запаздывания. В качестве эквивалентного запаздывания примем время от начала до момента достижения максимального значения на графике разгонной характеристики. Например, на рисунке 2.2 справа эквивалентное запаздывание $\tilde{\tau} = 2$. Важно, что, как и для «апериодического» ОУ, эквивалентное запаздывание можно рассчитать аналитически по формуле (2.18):

$$\tilde{\tau} = \tau + \frac{\pi}{\omega}, \text{ где } \omega = \sqrt{c - b^2/4}. \quad (2.18)$$

где $\tilde{\tau}$ – эквивалентное запаздывание, ω — угловая частота, τ – запаздывание, параметры b и c определяют динамические свойства системы.

Передаточная функция аппроксимирующего объекта (2.3) с чистым запаздыванием будет иметь вид (2.19):

$$\tilde{H}(p) = \tilde{k} e^{-p\tilde{\tau}}, \text{ где } \tilde{k} = k/c. \quad (2.19)$$

где $\tilde{H}(p)$ - передаточная функция аппроксимирующего объекта, $\tilde{\tau}$ – эквивалентное запаздывание, p — оператор Лапласа. c – параметр, определяющий динамические свойства системы, k – коэффициент усиления, \tilde{k} - коэффициент усиления аппроксимирующего объекта.

Как отмечалось ранее, оптимальная настройка И-регулятора с передаточной функцией $W(p) = k_i/p$ определяется как $k_i = \frac{r}{\tilde{k}\tilde{\tau}}$, где коэффициент r зависит от выбранного критерия качества управления [44]. Таким образом, для настройки И-регулятора применительно к ОУ (2.3) с использованием ИКК можно применить следующую формулу для коэффициента усиления регулятора (2.20):

$$k_i = \frac{rc}{k(\tau + \pi/\omega)}, \text{ где } \omega = \sqrt{c - b^2/4}, r = 0.739 \quad (2.20)$$

где k_i – коэффициент усиления И-регулятора, r – эталонный коэффициент, ω — угловая частота, τ – запаздывание, b и c – параметры, определяющие динамические свойства системы, k – коэффициент усиления.

Пример 2.5. Рассмотрим колебательный ОУ вида (2.3) с параметрами $b = 0.21$, $c = 0.25$, $k = 1$, $\tau = 0$. Рассмотрим процесс регулирования давления в колонне. Давление в колонне регулируется через шиберную заслонку в выходном трубопроводе. Регулирование давления в колонне через шиберную заслонку — это процесс, требующий учета инерционности газа и системы отвода, а также нелинейных характеристик оборудования. Колебания давления возникают из-за запаздываний в системе, нелинейности заслонки и внешних возмущений. Для минимизации колебаний необходимо оптимизировать настройки регулятора, уменьшить инерционность системы и компенсировать нелинейности. При правильной настройке и проектировании системы можно достичь стабильного поддержания давления с минимальными отклонениями. Номинальное значение давление 2 атм.

По формуле $\delta = e^{-\frac{b\pi}{2\omega}}$ находим величину выбега $\delta = 0.5$ (рисунок 2.9).

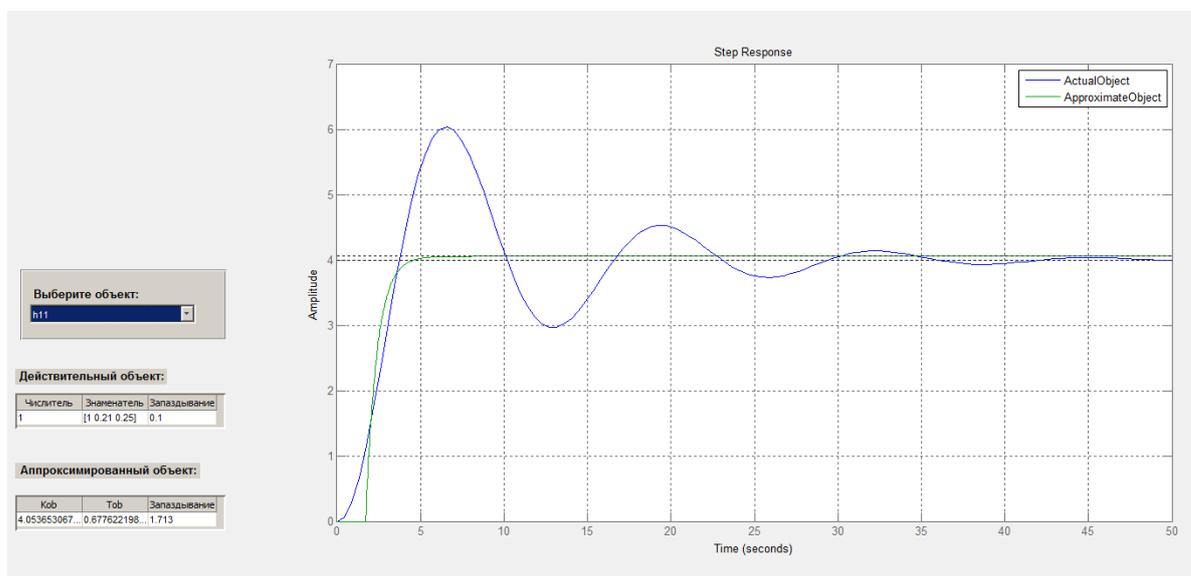


Рисунок 2.9 - Разгонная характеристика колебательного ОУ (синим) и ее аппроксимация инерционным звеном с запаздыванием (составлено автором)

В роли показателя качества управления будем использовать ИКК. По формуле (2.20) рассчитаем коэффициент усиления И-регулятора (2.21):

$$\omega = \sqrt{c - b^2/4} = \sqrt{0.25 - 0.21^2/4} = 0.489, k_i = \frac{rc}{k(\tau + \pi/\omega)} = \frac{0.739 \times 0.25}{1 \times (0 + \pi/0.489)} = 0.029 \quad (2.21)$$

где k_i – коэффициент усиления И-регулятора, r – эталонный коэффициент, ω – угловая частота, τ – запаздывание, b и c – параметры, определяющие динамические свойства системы, k – коэффициент усиления.

На рисунке 2.10 показаны переходные процессы изменения управляющей и выходной переменной при отработке приведенного к выходу ОУ возмущения $1(t)$. При такой настройке регулятора ИКК = 0.0532, а длительность переходного процесса $t_{\text{пер}} = 32$.

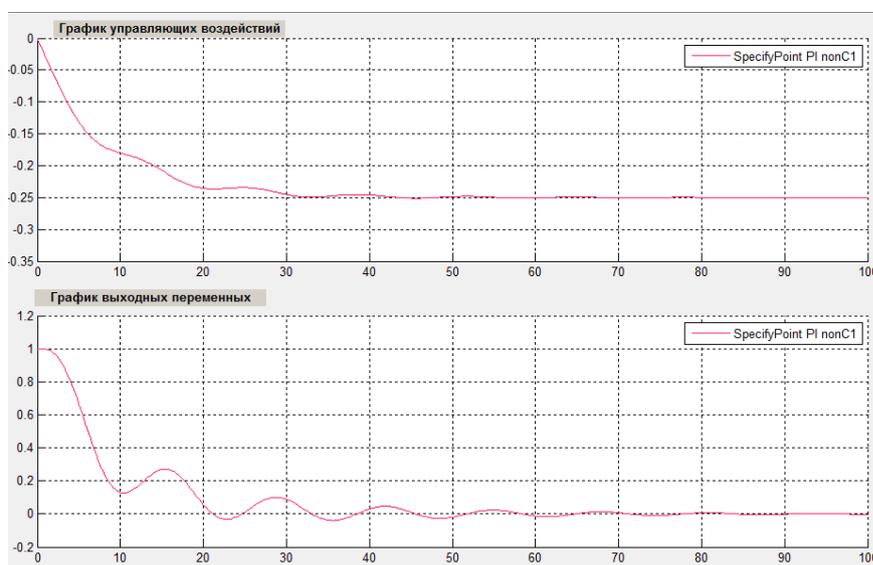


Рисунок 2.10 - Переходные процессы в системе с И-регулятором для колебательного ОУ при $k_i = 0.029$ (составлено автором)

2.2.2 Настройка И-регулятора в условиях неопределенности

Вернемся к решению оптимизационной задачи (2.10), но уже для колебательного ОУ. Применительно к модели колебательного ОУ с запаздыванием (2.3) будем считать заданными интервалы для параметров k, τ, b, c . Тогда с учетом (2.13), (2.18) и (2.20) робастная настройка И-регулятора $k_i^{(rob)}$ находится путем решения задачи оптимизации (2.22):

$$k_i^{(rob)} = \min \left\{ \frac{rc}{k(\tau + \pi/\sqrt{c - b^2/4})} \mid \underline{k} \leq k \leq \bar{k}, \underline{\tau} \leq \tau \leq \bar{\tau}, \underline{c} \leq c \leq \bar{c}, \underline{b} \leq b \leq \bar{b} \right\} \quad (2.22)$$

где $k_i^{(rob)}$ - коэффициент усиления робастного И-регулятора, $\underline{c}, c, \bar{c}$ и $\underline{b}, b, \bar{b}$ — параметры, определяющие динамические свойства системы на границах зоны неопределенности, $\underline{k}, k, \bar{k}$ - коэффициент усиления на границах зоны неопределенности, $\underline{\tau}, \tau, \bar{\tau}$ - запаздывание на границах зоны неопределенности, r - эталонный коэффициент.

Учитывая, что минимизируемая функция монотонно убывает по k, τ, b и монотонно возрастает по c , получим (2.23)

$$k_i^{(rob)} = \frac{rc}{\bar{k}(\bar{\tau} + \pi/\sqrt{c-\bar{b}^2/4})} \quad (2.23)$$

где $k_i^{(rob)}$ - коэффициент усиления робастного И-регулятора, \underline{c} и \bar{b} — параметры, определяющие динамические свойства системы на нижней и верхней границе, \bar{k} - коэффициент усиления на верхней границе, $\bar{\tau}$ - запаздывание на верхней границе, r - эталонный коэффициент.

Необходимо учесть, что (2.23) решает оптимизационную задачу (2.10) приближенно, так как в их основе лежит аппроксимация ОУ второго порядка звеном чистого запаздывания. Также стоит отметить, чтобы применять формулу (2.23) для задачи робастного управления должно выполняться условие (2.24):

$$b \geq a\sqrt{c}, \quad (2.24)$$

где $a = \frac{2\ln\frac{1}{\delta}}{\sqrt{\pi^2 + (\ln\frac{1}{\delta})^2}}$ - параметр, определяющий динамические свойства системы,

$\delta = e^{-\frac{b\pi}{2\omega}}$ - выбег, c и b — параметры, определяющие динамические свойства системы, ω — угловая частота.

Пример 2.6. Возьмем ОУ из примера 2.5. Примем зону неопределенности равной 50 %, что соответствует диапазону изменения давления 1.9 – 2.3 атм. В таблице 2.3 представлены пределы изменения параметров модели ОУ.

Таблица 2.3 – Пределы изменения параметров (составлено автором)

	k	b	c
Верхний	1.5	0.315	0.375
Средний	1	0.21	0.25

Продолжение таблицы 2.3

	<i>k</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Нижний	0.5	0.105	0.125
δ, %	50	50	50

Воспользуемся формулой 2.20 для нахождения интегрального коэффициента регулятора k_i . В частности, для интегрального квадратичного критерия (ИКК) $r = 0.739$.

Тогда поставив все известные параметры в формулу (2.20), получим (2.25) и (2.26):

$$k_i^{(rob)} = \frac{0.739 \cdot 0.125}{1.5(0 + \pi/\sqrt{0.125 - 0.315^2/4})} \quad (2.25)$$

$$k_i^{(rob)} = 0.006205 \quad (2.26)$$

где $k_i^{(rob)}$ - коэффициент усиления робастного И-регулятора.

Используя найденное значение коэффициента (2.26), рассчитаем ИКК для каждой из 27 точек ($n = 3^3$) возможных сочетаний параметров ОУ и решим две задачи оптимизации:

1. минимаксную,
2. средних показателей.

Для расчетов использовалась модель, построенная в Simulink (Приложение И, рисунок И.1) и программа для расчета ИКК, которая была написана в MatLab. Также можно воспользоваться этой программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5. Время моделирования $T_{mod} = 100$.

Итого: получили ответ на две задачи оптимизации:

1. Нашли параметры объекта с максимальным значением ИКК = 0.7013, $k = 0.5$, $b = 0.315$, $c = 0.375$. Его переходный процесс представлен на рисунке 2.11. Таблица со всеми значениями ИКК представлена в Приложении А, все переходные процессы представлены в Приложении А. В таблице с А.3 представлены результаты расчета. Также после таблиц с расчетами можно изучить вид переходных процессов по графикам на рисунках А.55-А.80.

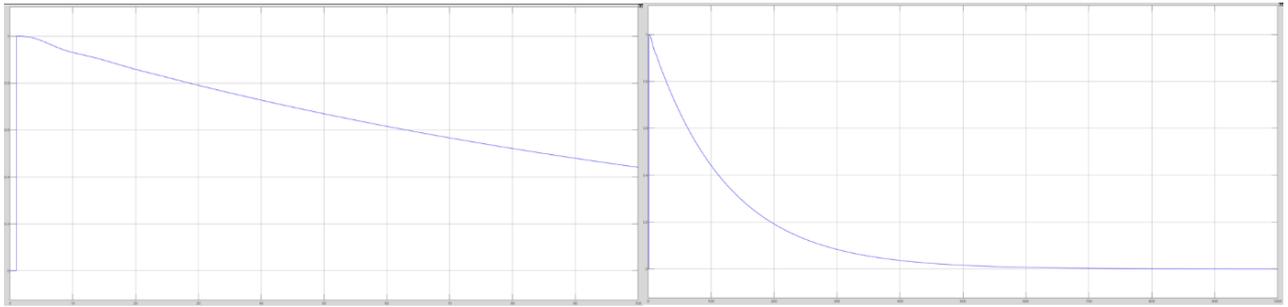


Рисунок 2.11 - Переходный процесс с максимальным значением ИКК (слева переходный процесс при $T_{mod} = 100$, справа при $T_{mod} = 1000$)
(составлено автором)

2. Нашли среднее значение по всем 27 точкам зоны неопределенности: $ИКК_{сред} = 0.4676$.

2.3 Поисковые методы робастной настройки параметров регуляторов для SiSo объектов

2.3.1 Метод максимальной чувствительности

Вернемся к задачам (2.8) и (2.9). Обе эти задачи являются сложными [38], поэтому рассмотрим способы приближенного решения для практических случаев. Пусть выполнена дискретизация области неопределенности \mathbf{G} в виде набора точек \mathbf{Z}_i , где $i = \overline{1, L}$. Вначале определяются N ($1 \leq N \leq L$) наиболее чувствительных точек \mathbf{Z}_{r_k} , где $k = \overline{1, N}$, для которых интегральный показатель качества управления J имеет максимальное (наихудшее) значение. Для найденных точек каким-либо, например, «компенсационным» методом [17, 42] подсчитываются соответствующие им настройки регулятора $\mathbf{A}_{r_k} = \mathbf{F}(\mathbf{Z}_{r_k})$, где $k = \overline{1, N}$. Далее путем решения задачи (2.8) или (2.9) среди регуляторов \mathbf{A}_{r_k} найдем робастный, что вполне возможно при сравнительно небольших значения L и N . Наиболее простой вариант данного метода предполагает $N = 1$ и интервальную область неопределенности параметров ОУ (2.27):

$$\underline{\mathbf{Z}} \leq \mathbf{Z} \leq \overline{\mathbf{Z}} \quad (2.27)$$

где $\underline{\mathbf{Z}}, \mathbf{Z}, \overline{\mathbf{Z}}$ – вектор параметров на границах зоны неопределенности, или в проекциях (2.28):

$$\underline{z}_i \leq z_i \leq \bar{z}_i, i = \overline{1, n}. \quad (2.28)$$

где $\underline{z}_i, z_i, \bar{z}_i$ – конкретный параметр объекта управления в зоне неопределенности, i – индекс параметра, n – общее количество параметров.

Если предположить, что максимум чувствительности к отклонениям модели ОУ, то есть (2.29):

$$\max_{\mathbf{Z}} \{ \varphi(\mathbf{Z}, \mathbf{A}_{nom}) - \varphi(\mathbf{Z}_r, \mathbf{A}_{nom}) | \mathbf{Z} \in \mathbf{G} \} \quad (2.29)$$

где \mathbf{Z} – вектор параметров модели, \mathbf{A}_{nom} – вектор параметров номинального регулятора, \mathbf{G} – зона неопределенности, \mathbf{Z}_r – центр области \mathbf{G} .

Достигается при \mathbf{Z} максимально удаленных от номинальных расчетных значений \mathbf{Z}_r , то ясно, что при интервальной неопределенности точками максимальной чувствительности могут быть лишь точки \mathbf{Z} , лежащие на границах области неопределенности (2.28). Число таких точек составляет 2^n . Для простых одномерных ОУ типа инерционного звена с запаздыванием (2.6), передаточная функция которых содержит 3 параметра ($\mathbf{Z} = [k, T, \tau]$), $2^3 = 8$, задача (2.29) может быть решена простым перебором 8 вершин параллелепипеда (2.28) в пространстве (k, T, τ) . Вместе с тем, для многомерных ОУ число возможных вариантов резко возрастает. Например, для простейшего многомерного ОУ 2×2 с двумя управляемыми входами и двумя выходными переменными, передаточная матрица которого содержит 4 передаточных функции типа (2.6), общее число параметров модели составляет $3 \times 4 = 12$, так что поиск наиболее чувствительной точки требует перебора $2^{12} = 4096$ вариантов, причем для получения значения показателя качества управления $\varphi(\mathbf{Z}, \mathbf{A}_{nom})$ в каждом из этих вариантов требуется моделирование переходного процесса в замкнутой регулятором \mathbf{A}_{nom} системе управления. С учетом этого обстоятельства имеет смысл упростить решение задачи (2.29), сократив объем перебора вариантов.

Пусть $\mathbf{z}_{top}^{(k)} = [\mathbf{z}_{top1}^{(k)}, \mathbf{z}_{top2}^{(k)}, \dots, \mathbf{z}_{topn}^{(k)}]^T$ – одна из 2^n крайних точек интервальной области неопределенности (2.27), так что $\mathbf{z}_{topi}^{(k)} = \bar{z}_i, i = \overline{1, n}$.

Тогда, как показано в [49, 50], в качестве приближенного решения задачи нахождения точки максимальной чувствительности $\tilde{\mathbf{Z}}$ может быть принято (2.30):

$$\tilde{\mathbf{Z}} = [\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \dots, \tilde{z}_n]^T, \quad (2.30)$$

где

$$\tilde{z}_i = \begin{cases} \underline{z}_i, & \text{если } \varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \underline{z}_i, \dots, z_{rn}, \mathbf{A}_{nom}) > \varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \bar{z}_i, \dots, z_{rn}, \mathbf{A}_{nom}), \\ \bar{z}_i, & \text{если } \varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \bar{z}_i, \dots, z_{rn}, \mathbf{A}_{nom}) \geq \varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \underline{z}_i, \dots, z_{rn}, \mathbf{A}_{nom}). \end{cases}$$

$\tilde{\mathbf{Z}}$ – вектор параметров максимальной чувствительности, \mathbf{A}_{nom} – вектор параметров номинального регулятора, \underline{z}_i и \bar{z}_i – параметры, задающие границу неопределенности.

Таким образом, для определения координат наиболее чувствительной к расстройкам модели ОУ точки $\tilde{\mathbf{Z}}$ достаточно для каждого из параметров модели z_i определить два показателя частной чувствительности $\varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \underline{z}_i, \dots, z_{rn}, \mathbf{A}_{nom})$ и $\varphi(z_{r1}, z_{r2}, \dots, \bar{z}_i, \dots, z_{rn}, \mathbf{A}_{nom})$ и сравнить их.

Рассматриваются значения показателя качества управления в системе, замкнутой регулятором \mathbf{A}_{nom} с номинальными настройками, то есть с настройками, вычисленными на середину зоны неопределенности, ОУ которой отличается от расчетного лишь одним i -м параметром, причем этот параметр принимает либо наибольшее значение \bar{z}_i , либо наименьшее значение \underline{z}_i . При таком способе нахождения наиболее чувствительной точки достаточно смоделировать $2 \cdot n$ переходных процессов. В то же время при полном поиске необходим перебор 2^n крайних точек интервального множества возможных значений параметров модели ОУ и, соответственно, столько же циклов моделирования переходных процессов.

Пример 2.7. Цель: найти робастные настройки регулятора для одномерного объекта с использованием компенсационного метода нахождения настроек регулятора.

Возьмем объект из примера 2.1 и примера 2.3. В роли показателя качества управления будем рассматривать интегральный квадратичный критерий (ИКК).

Для автоматического расчета можно воспользоваться приложением, о котором говорилось в разделе 1.5. Графики переходных процессов построены при помощи программного комплекса «ММО-Master» [33].

Задачи:

1. Выявить чувствительность к отклонениям (в пределах интервальной зоны неопределенности) для каждого из 3 параметров исходного динамического ОУ в отдельности, когда каждый параметр может быть на краях диапазона.

2. Сформировать «подозрительный на робастность ОУ», используя самые чувствительные точки, полученные в п.1.

3. Проверить, будет ли устойчива система для «подозрительный на робастность ОУ» при использовании регулятора, рассчитанного на средние значения всех параметров ОУ.

4. Рассчитать регулятор для «подозрительного на робастность ОУ» компенсационным методом.

Для данного объекта найдем параметры регулятора. Параметры полученного таким образом регулятора приведены в таблице 2.4 (в ней приведены данные о значениях интенсивности возмущений, ИКК, длительности переходного процесса, параметрах настройки пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-регулятора). С видом переходного процесса можно ознакомиться на рисунке 2.12.

Таблица 2.4 – Параметры регулятора (составлено автором)

Возмущение	ИКК	Время регулирования, с	k_p	k_i	Время расчета, с
[1]	0.0919	39.6	0.369	0.123	66

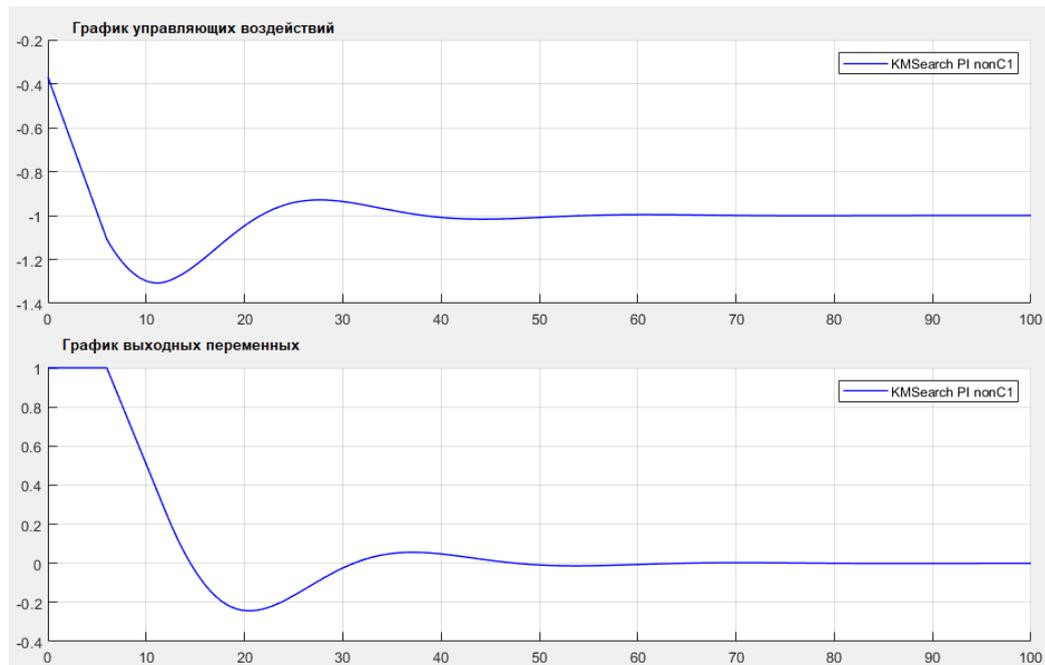


Рисунок 2.12 – Переходный процесс (составлено автором)

Верхняя и нижняя границы для рассматриваемого ОУ ранее была уже рассчитана. Результаты расчета приведены в таблице 2.1.

Используя параметры, начнем расчет чувствительности объекта управления. Примем, что изменяться будут только один параметр, остальные значения будут находиться на номинальном уровне.

В таблице 2.5 представлены результаты 6 различных моделей ОУ, которые отличаются от центральной на один параметр. С переходными процессами можно ознакомиться в Приложении Б. Переходные процессы представлены на рисунках Б.1-Б.6.

Таблица 2.5 – Разность ИКК (составлено автором)

Параметр	ИКК	Разность
\bar{k}	0.1147	24.8 %
\underline{k}	0.1626	76.9 %
\bar{T}	0.0799	13 %
\underline{T}	0.1038	12.95 %
$\bar{\tau}$	0.0593	35.5 %
$\underline{\tau}$	0.1715	86.6 %

По полученным результатам составлена таблица 2.6 с самыми чувствительными точками в порядке уменьшения чувствительности.

Таблица 2.6 – Параметры модели ОУ, наиболее чувствительные к неточностям модели (составлено автором)

Параметр	τ	k	T
Предельные значения	$\bar{\tau}$	\bar{k}	\underline{T}
$\delta, \%$	86.6 %	76.9 %	13 %

В качестве «кандидата» в наиболее чувствительные точки пространства возможных значений параметров может рассматриваться вторая строка таблицы 2.6. В результате получаем «кандидата» (таблица 2.7)

Таблица 2.7 – «Кандидат» в наиболее чувствительную точку (составлено автором)

Параметр	k	T	τ
Кандидат в наиболее чувствительные точки	\bar{k}	\underline{T}	$\bar{\tau}$
	1.5	1.5	9

Проверим устойчивость полученного объекта управления с параметрами регулятора, полученными для среднего значения, а также рассчитаем регулятор

специально для полученного объекта. Результаты показаны на рисунке 2.13 и в таблице 2.8.

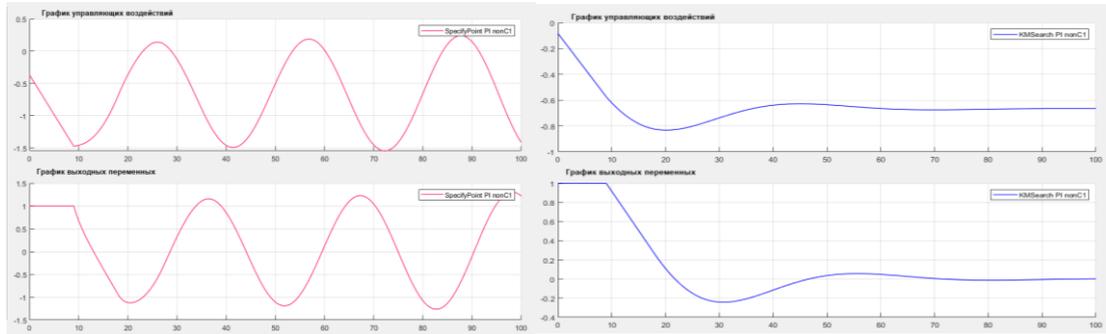


Рисунок 2.13 – Переходный процесс (слева при регуляторе, рассчитанном на средние значения, справа методом МЧ) (составлено автором)

Таблица 2.8 – Значения ИКК (составлено автором)

	ИКК
Настройки рег. на средние	0.7442
Настройки рег. Методом МЧ.	0.1379

По рисунку 2.13 (слева) видно, что регулятор, рассчитанный на средние значения, не удовлетворяет требованиям, так как он не может обеспечить устойчивость переходного процесса (не сходится к нулю). Это означает, что традиционный способ настройки ПИ-регулятора в расчете на центр зоны неопределенности не пригоден в рассматриваемом варианте, когда зона неопределенности имеет столь внушительные размеры. Сравнив полученные ИКК, которые представлены в таблице 2.9, можно сделать вывод, что рассчитанный робастный регулятор для «кандидата» обеспечивает хорошую сходимость. Чтобы убедиться, что найденный регулятор для наиболее чувствительной точки можно называть робастным, проверим сходимость переходных процессов во всех 27 точек зоны неопределённости. Для расчетов использовалась модель, построенная в Simulink (Приложение И, рисунок И.1) и программа для расчета ИКК, которая была написана в MatLab. Также можно воспользоваться этой программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5. Результаты по всем 27 точкам представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Значения ИКК для 27 точек зоны неопределённости (составлено автором)

Параметры	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$
ИКК	0.1980	0.2343	0.2532	0.2059	0.2239	0.2138	0.2325	0.2153	0.2438
Параметры	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$
ИКК	0.1079	0.1278	0.1528	0.1159	0.1376	0.1241	0.1653	0.1475	0.1779
Параметры	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$
ИКК	0.0782	0.1019	0.1378	0.0866	0.1136	0.1564	0.0951	0.1254	0.1751

Среднее значение по всем 27 точкам $ИКК_{ср} = 0.1610$. Следовательно, можно сделать вывод о том, что найденный регулятор может рассматриваться в качестве робастного, а предложенный для его нахождения метод в рассматриваемом варианте широкой зоны неопределенности может быть признан работоспособным.

Аналогичный расчет был сделан для ОУ из примера 2.2 и примера 2.4. Результат представлены в Приложении В.

Пример 2.8. Цель: найти робастные настройки регулятора для одномерного колебательного объекта, с использованием компенсационного метода нахождения настроек регулятора.

Рассмотрим колебательный объект управления (2.31):

$$H(p) = \frac{1}{p^2 + 1.64p + 4} e^{-0.2p} \quad (2.31)$$

где $H(p)$ – передаточная функция, p – оператор Лапласа.

В роли показателя качества управления будем рассматривать интегральный квадратичный критерий (ИКК). Для автоматического расчета можно воспользоваться приложением, о котором говорилось в разделе 1.5. Графики переходных процессов строили при помощи программного комплекса «ММО-Master» [33].

Задачи:

1. Выполняется аппроксимация исходного ОУ инерционным звеном с запаздыванием.
2. Для ОУ, найденного в п.1 компенсационным методом, рассчитывается номинальный регулятор.

3. Методом максимальной чувствительности применительно к номинальному регулятору, рассчитанному в п.2, находится наиболее чувствительная точка в пространстве параметров исходного ОУ.

4. Выполняется аппроксимация исходного ОУ с параметрами, найденными в п. 3 инерционным звеном с запаздыванием.

5. Для ОУ, найденного в п.4 компенсационным методом, рассчитывается регулятор, подозрительный на робастность.

6. Регулятор, найденный в п.5, проверяется на робастность применительно к исходному ОУ.

Выполняем аппроксимацию исходного ОУ инерционным звеном с запаздыванием, показано на рисунке 2.14.

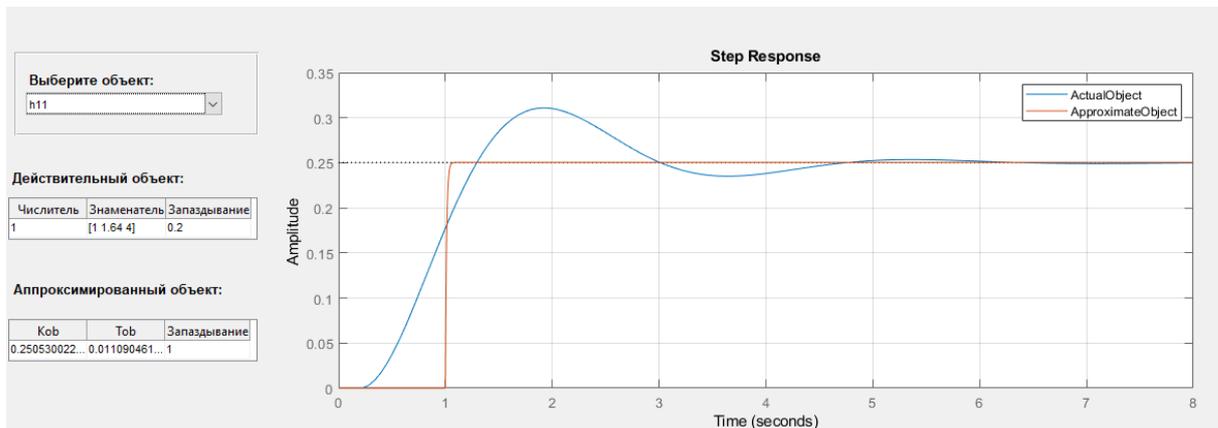


Рисунок 2.14 - Переходный процесс для исходного и аппроксимированного объектов (составлено автором)

Объект, полученный после аппроксимации представлен ниже (2.32):

$$H(p) = \frac{0.25e^{-1p}}{0.011p + 1} \quad (2.32)$$

где $H(p)$ – передаточная функция, p – оператор Лапласа.

Для полученного объекта рассчитывается номинальный регулятор, результаты представлены в таблице 2.10 и на рисунке 2.15.

Таблица 2.10 – Параметры ПИ-регулятора (составлено автором)

Возмущение	ИКК	Время регулирования, с	k_p	k_i	Время расчета, с
[0.6]	0.0055	6.53	0.0325	2.96	136

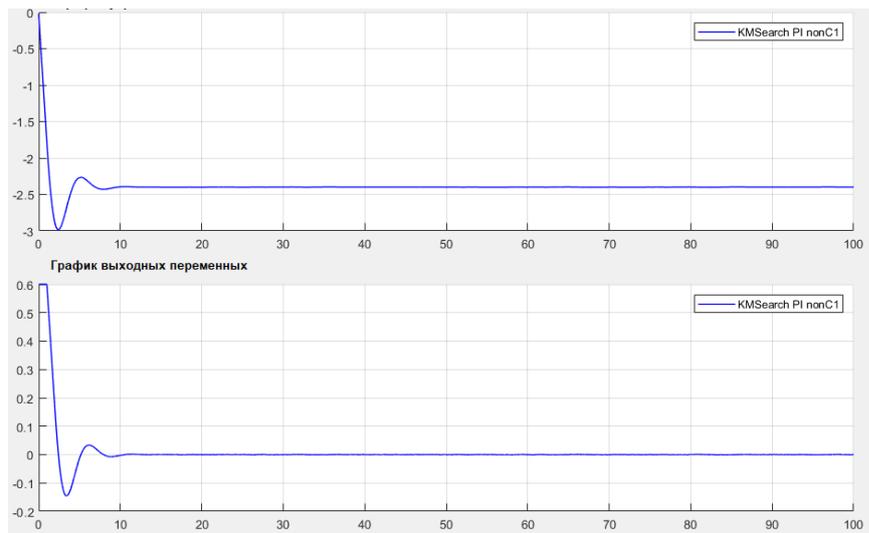


Рисунок 2.15 - Переходный процесс в замкнутой системе управления при расчете ПИ-регулятора компенсационным методом (составлено автором)

Предположим, что параметры b , c и k могут оказаться только на верхних и нижних границах, и они отклоняются лишь на 20 %. Пределы изменения параметров показаны в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Пределы изменения параметров (составлено автором)

	k	b	c
Верхний	1.2	1.968	4.8
Средний	1	1.64	4
Нижний	0.8	1.312	3.2
δ, %	20	20	20

В таблице 2.12 представлены результаты 6 различных моделей ОУ, которые отличаются от центральной на один параметр. С переходными процессами можно ознакомиться в Приложении Б на рисунках Б.7-Б.12.

Таблица 2.12 – Разность ИКК (составлено автором)

Параметр	ИКК	Разность
\bar{k}	50	908 %
\underline{k}	0.0048	-12.72 %
\bar{c}	0.0045	-18.18 %
\underline{c}	0.0056	1.81 %
\bar{b}	0.0046	-16.36 %
\underline{b}	0.0047	-14.54 %

В таблице 2.13 для параметра b принято номинальное значение, поскольку по данным таблице 2.12 на границах имеется отрицательная чувствительность, а, следовательно, худший вариант тогда, когда b при номинальном значении

Таблица 2.13 – Параметры модели ОУ, наиболее чувствительные к неточностям модели (составлено автором)

Параметр	k	c	b
Предельные значения	\bar{k}	\underline{c}	b
$\delta, \%$	908%	1.81%	0%

Выполним аппроксимацию исходного ОУ с параметрами, найденными выше, инерционным звеном с запаздыванием (рисунок 2.16).

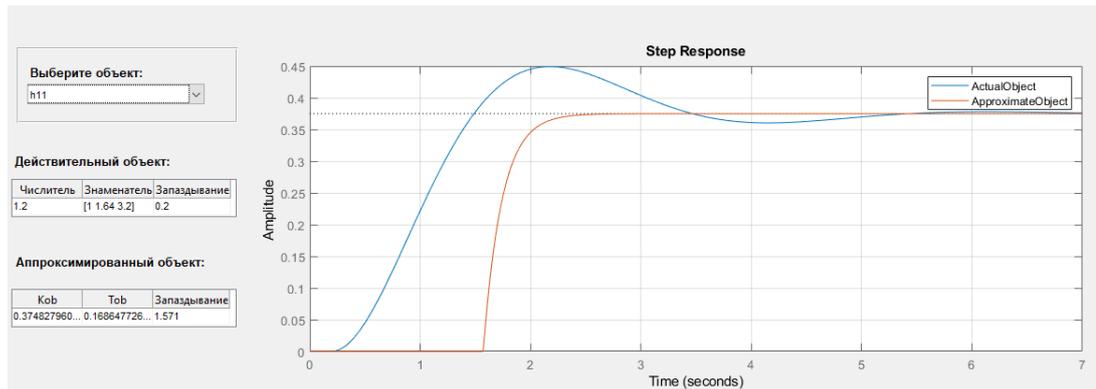


Рисунок 2.16 - Переходный процесс для исходного и аппроксимированного объектов (составлено автором)

Объект, полученный после аппроксимации представлен в (2.33):

$$H(p) = \frac{0.37e^{-1.571p}}{0.168p + 1} \quad (2.33)$$

где $H(p)$ – передаточная функция, p – оператор Лапласа.

Для полученного объекта рассчитаем, подозрительный на робастность регулятор, результаты представлены в таблице 2.10 и на рисунке 2.15.

Таблица 2.14 – Параметры ПИ-регулятор (составлено автором)

Возмущение	ИКК	Время регулирования, с	k_p	k_i	Время расчета, с
[0.6]	0.0087	10.4	0.214	1.27	125

Чтобы убедиться, что найденный регулятор для наиболее чувствительной точки можно называть робастным, проверим сходимость переходных процессов во всех 27 точках зоны неопределённости. Для расчетов использовалась модель, построенная в Simulink (Приложение И, рисунок И.1), и программа для расчета ИКК, которая была написана в Matlab. Также можно воспользоваться этой

программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5.

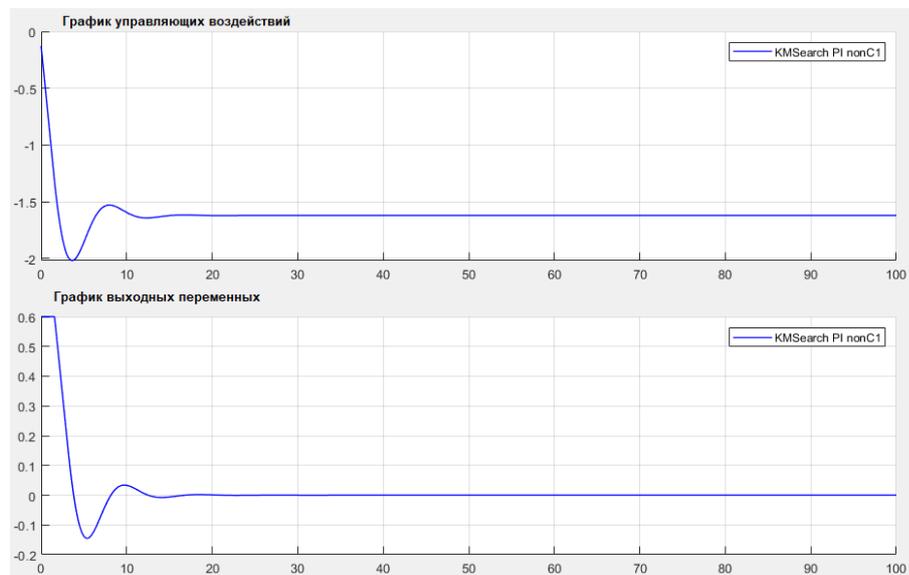


Рисунок 2.17 - Переходный процесс в замкнутой системе управления при расчете ПИ-регулятора компенсационным методом (составлено автором)

Результаты по всем 27 точкам представлены в Приложении Б в таблице Б.1, с переходными процессами можно ознакомиться на рисунках Б.13-Б.39. Среднее значение по всем 27 точкам $ИКК_{ср} = 0.0069$. Следовательно, можно сделать вывод о том, что найденный регулятор может рассматриваться в качестве робастного.

2.3.2 Поисковый метод

В [38] было получено, что всегда выполняется неравенство $k_i^{6п} \leq k_i^п$. Это означает, что для того чтобы найти настройки И-регулятора поисковым путем, можно рассмотреть значение, полученное беспойсковым путем, и увеличивать данное значение с определенным шагом. Увеличивать значение нужно до тех пор, пока не будет получен минимум рассматриваемого показателя качества управления. На каждом шаге определяется значение критерия качества управления при настройке И-регулятора на данное значение k_i . Увеличение k_i продолжается вплоть до достижения минимума значения критерия качества управления. Для расчетов использовалась модель, построенная в Simulink (Приложение И, рисунок И.1), и программа, которая была написана в MatLab. Также можно воспользоваться

этой программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5.

Приведем пример одного расчета для модели (2.2). Для расчета параметров ОУ (2.2) использовались следующие формулы (2.34), (2.35) и (2.36):

$$r = \frac{T}{\tau} \quad (2.34)$$

$$b = \frac{4}{r\tau} \ln\left(\frac{1}{\delta}\right) \quad (2.35)$$

$$c = \left(\frac{2\pi}{r\tau}\right)^2 + \left(\frac{2}{\ln\left(\frac{1}{\delta}\right)r\tau}\right)^2 = \frac{4}{(r\tau)^2} \left[\pi^2 + \left(\ln\left(\frac{1}{\delta}\right)\right)^2\right] \quad (2.36)$$

где δ - выбег, c и b — параметры, определяющие динамические свойства системы, τ — запаздывание, T — постоянная времени, r — коэффициент, показывающий отношение постоянной времени к запаздыванию.

Для расчета k_i используем формулу (2.20). В роли показателя качества управления будем рассматривать интегральный квадратичный критерий (ИКК). Известные параметры: $\tau = 5$, $T = 25$, $\delta = 0.25$, $k = 1$. Подставим известные параметры в формулы (2.35) и (2.36). Получаем значения $b = 0.115$ и $c = 0.066$. Используя формулу (2.20), найдем начальное приближение k_i . $k_i^{\text{бп}} = 0.00281$.

Найдем при полученном k_i значение ИКК. График переходного процесса представлен на рисунке 2.18.

Теперь поиском найдем лучшее значение k_i , которое даст минимальное значение ИКК. Будем искать значение k_i с определенным шагом. Будем двигаться вправо от $k_i^{\text{бп}}$. Таким образом будем идти от $k_i^{\text{бп}}$ до верхней границы. Верхняя граница представляет собой $k_i^{\text{бп}} \cdot 2 = 0.00562$. При этом будет добавлено условие, если k_i достигнет максимальной границы, а также ИКК будет меньше или равняться ИКК минимальному, то сдвигаем максимальную границу k_i на шаг поиска. Шаг поиска находим следующим образом $\Delta k_i = k_i^{\text{бп}}/N$.

Результаты поиска представлены в Приложении Б в таблице Б.3. Время моделирования $T_{\text{mod}} = 200$. Интервал поиска k_i делится на $N = 100$ частей. Шаг дискретизации 0.01.

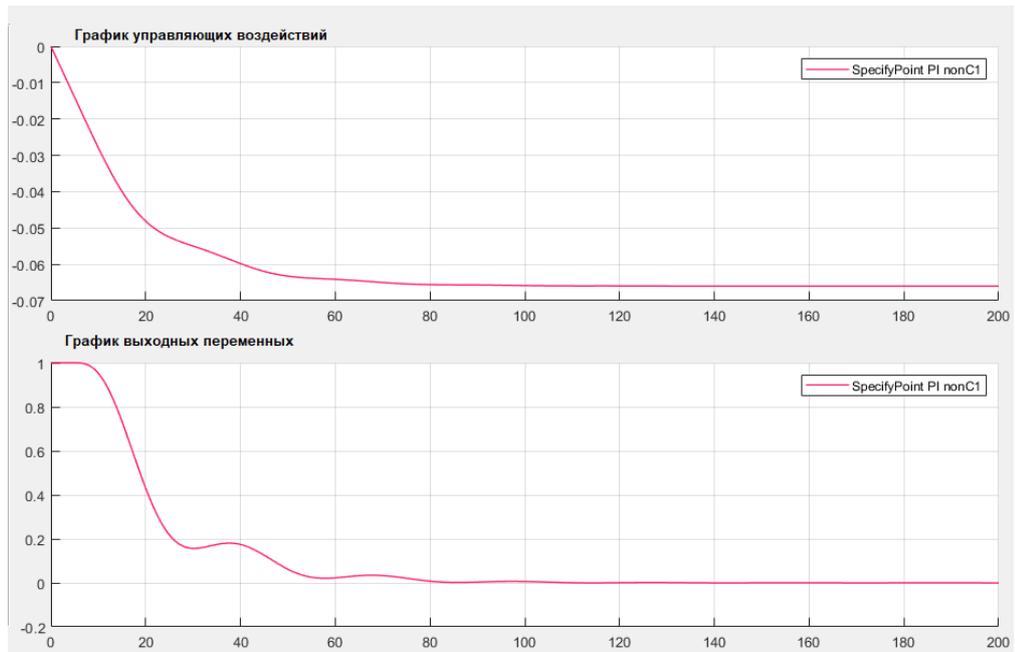


Рисунок 2.18 – Переходный процесс, полученный беспоисковым методом
(составлено автором)

В результате получаем минимальное значение ИКК = 0.0711 при $k_i = 0.00423$ его переходный процесс представлен на рисунке 2.19.

Из графиков видно, что полученный таким образом регулятор обеспечивает устойчивость и может называться робастным.

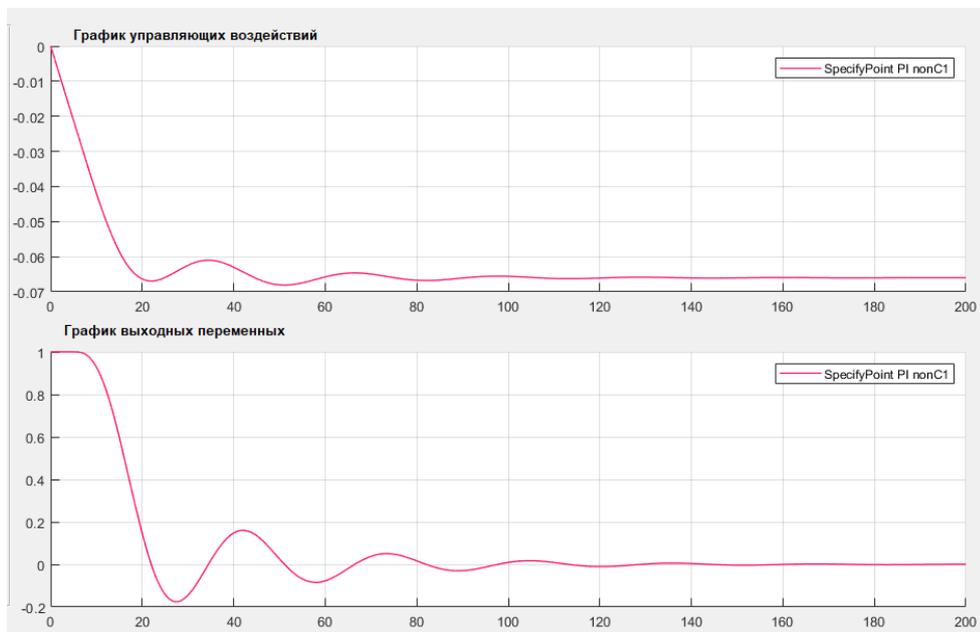


Рисунок 2.19 – Переходный процесс при $k_i = 0.00423$ (составлено автором)

2.4 Сравнительный анализ беспойсковых и поисковых методов робастной настройки параметров регуляторов

В данном разделе на конкретных примерах оптимальные настройки И-регулятора, полученные при имитационном моделировании поисковым путем, сравниваются с настройками, полученными по простым формулам. Сравнение проводилось по трем распространенным показателям качества управления: ИКК, ИМК и $t_{\text{пер}}$. Также будет показано сравнение метода МЧ и беспойскового метода на примере И-регулятора и ПИ-регулятора на примерах из разделов 2.1, 2.2 и 2.3. Помимо этого, проведем сравнение робастного регулятора с классическим ПИ-регулятором, то есть со стандартным ПИ-регулятором, который получили при помощи ПО MatLab.

Приступим к сравнению И-регулятора. Для этого используем модель (2.2), а для расчетов ее параметров используем формулы (2.35) и (2.36). При моделировании будем полагать: $\tau = 5$, $\delta = 0.25$, $k=1$, параметры r , b и c рассчитываются по приведенным выше формулам.

При постоянном $\tau = 5$ будут рассматриваться разные значения T . Рассмотрим такие значения T , чтобы соотношения r равнялись от 0.1 до 10: $T = 0.5$; $T = 2.5$; $T = 5$; $T = 25$; $T = 50$.

Интервал поиска k_i делится на $N = 100$ частей. Шаг дискретизации 0.01. Время моделирования T_{mod} для каждого критерия свое. Для расчетов использовалась модель, построенная в Simulink (Приложение И, рисунок И.1) и программа, которая была написана в MatLab также можно воспользоваться этой программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5.

Ниже приведены таблицы 2.16, 2.17, 2.18 сравнения поискового и беспойскового методов для каждого критерия качества управления. Графики переходных процессов приведены в приложении Г.

Таблица 2.16 - Значения коэффициента регулятора k_i , ИМК при разных значениях T (составлено автором)

T	$k_i^{\text{бп}}$	$k_i^{\text{п}}$	$\delta, \%$	ИМК ^{бп}	ИМК ^п	$\delta, \%$
0.5	21,16	22,225	4,8	0,1066	0,1064	0,18

Продолжение таблицы 2.16

T	$k_i^{бп}$	$k_i^п$	$\delta, \%$	ИМК ^{бп}	ИМК ^п	$\delta, \%$
2.5	0,711	0,846	16	0,1148	0,1114	3,05
5	0,1482	0,1986	25,4	0,1294	0,1176	10
25	0,00252	0,00441	42,8	0,1488	0,0908	63,8
50	0,000374	0,000689	45,7	0,1693	0,0988	71,3

Таблица 2.17 - Значения коэффициента регулятора k_i , быстродействие при разных значениях T (составлено автором)

T	$k_i^{бп}$	$k_i^п$	$\delta, \%$	$t_{reg}^{бп}$	$t_{reg}^п$	$\delta, \%$
0.5	18,219	19,13	4,8	17,6	17,48	0,68
2.5	0,612	0,729	16	22,2	18,29	21,37
5	0,127	0,173	26,6	29,4	19,01	54,65
25	0,00219	0,00433	49,4	84,6	26,66	217,32
50	0,000319	0,000635	49,8	155,2	84,68	83,27

Таблица 2.18 - Значения коэффициента регулятора k_i , ИКК при разных значениях T (составлено автором)

T	$k_i^{бп}$	$k_i^п$	$\delta, \%$	ИКК ^{бп}	ИКК ^п	$\delta, \%$
0.5	26,557	27,6	3,8	0,0776	0,0775	0,12
2.5	0,186	0,244	23,8	0,0912	0,0867	1,8
5	0,892	1,044	14,6	0,0829	0,0814	5,1
25	0,00316	0,00543	41,8	0,0885	0,0704	25,7
50	0,0004696	0,0008547	45	0,0911	0,0713	27,7

Далее приведены графики зависимостей (рисунки 2.20 – 2.25) критериев качества управления от отношения $\frac{T}{\tau}$ и зависимости коэффициента И-регулятора от отношения $\frac{T}{\tau}$ при поисковом и беспойсковом методах нахождения коэффициента регулятора.

1. В рассмотренном (весьма широком диапазоне) параметров колебательного ОУ простейший беспойсковый метод настройки И-регулятора по качеству управления (ИКК) незначительно уступает существенно более сложному поисковому методу только, если отношение $\frac{T}{\tau}$ не превышает 1. В таком случае относительная разница для ИКК не превосходит 6 %, для ИМК – 10 %. Исключение составляет только быстродействие, где беспойсковый незначительно уступает поиску только при отношении 0.1 Относительная разница не превышает 1 %.

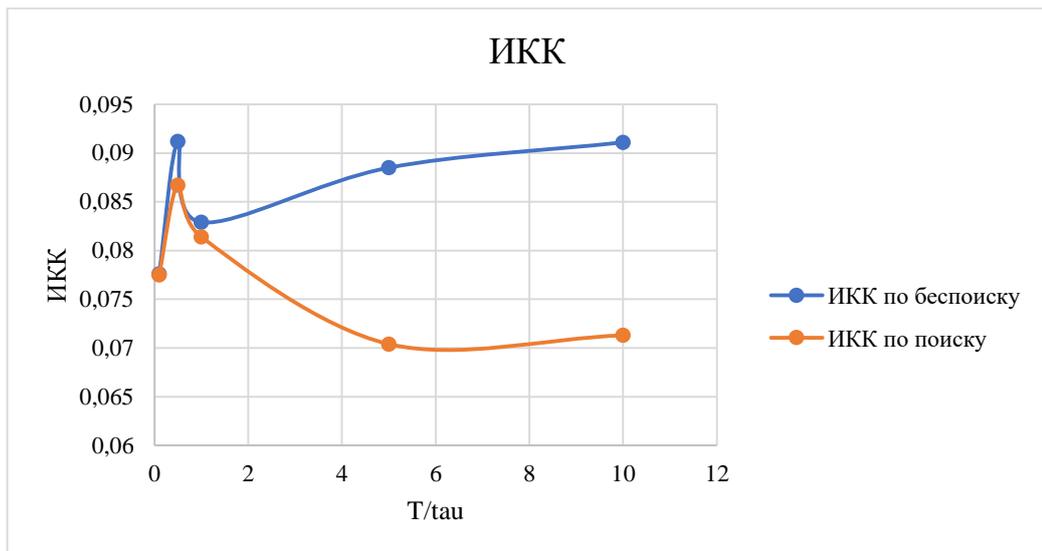


Рисунок 2.20 – График зависимости ИКК от $\frac{T}{\tau}$ (составлено автором)

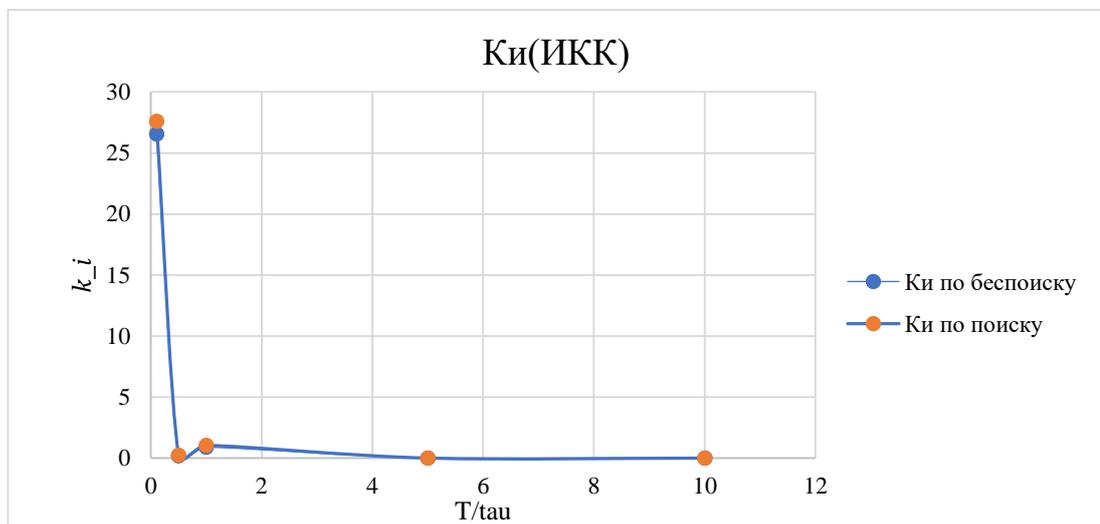


Рисунок 2.21 – График зависимости k_i от $\frac{T}{\tau}$ (составлено автором)

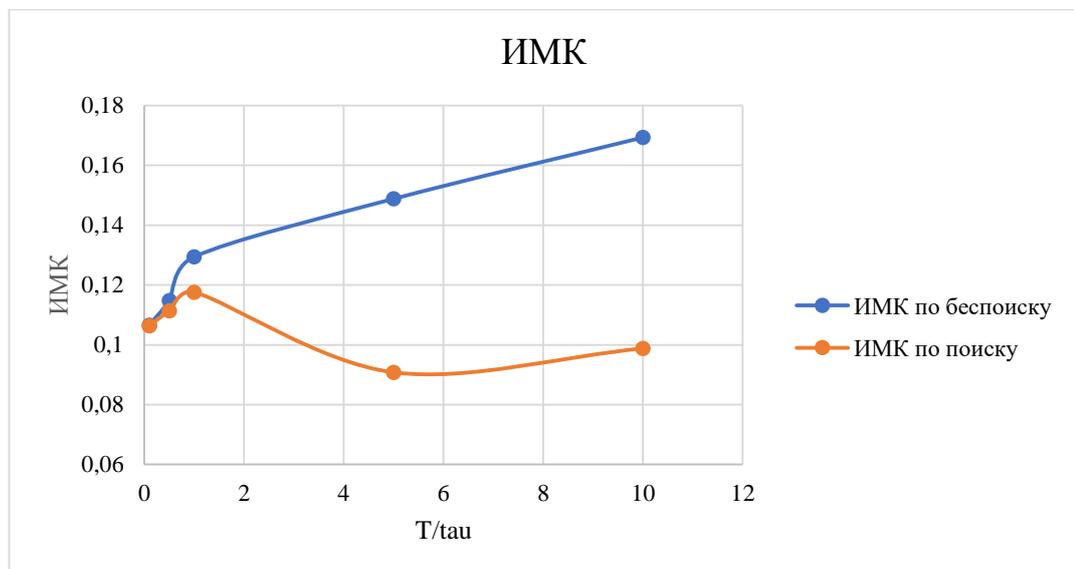


Рисунок 2.22 – График зависимости ИМК от $\frac{T}{\tau}$ (составлено автором)

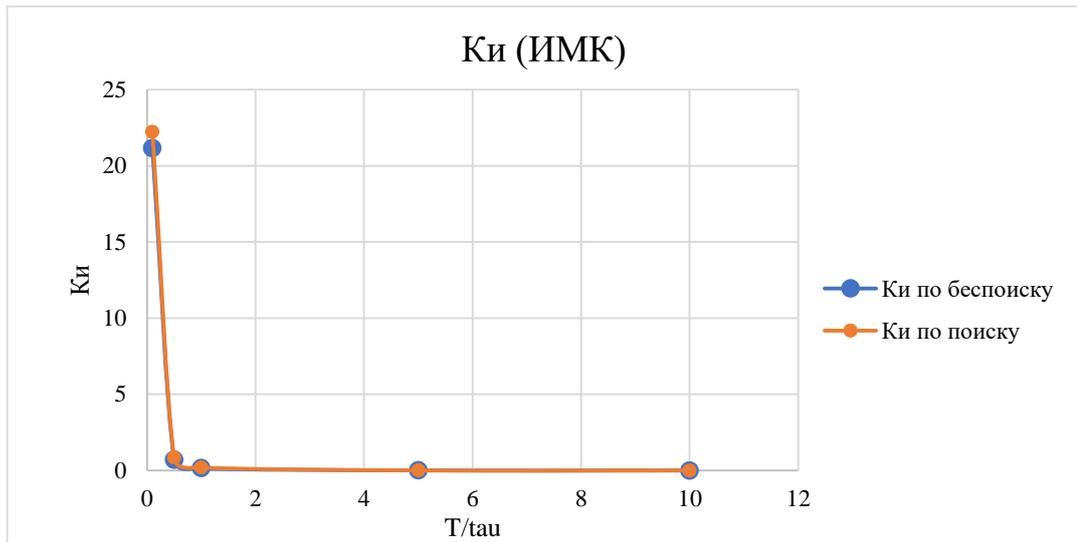


Рисунок 2.23 – График зависимости k_i от $\frac{T}{\tau}$ (составлено автором)

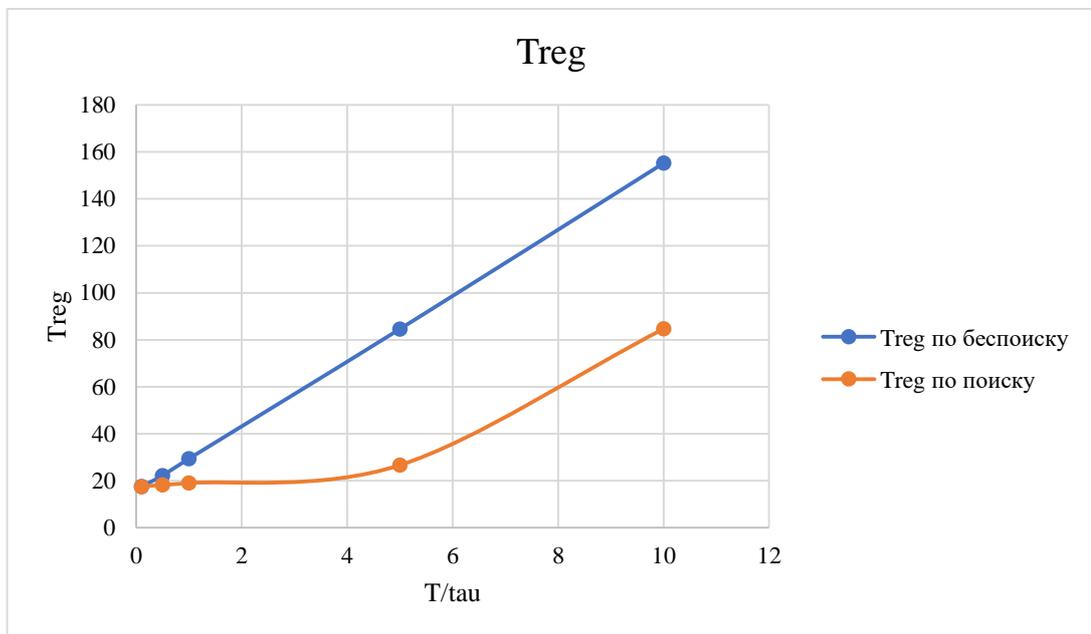


Рисунок 2.24 – График зависимости быстродействия от $\frac{T}{\tau}$ (составлено автором)

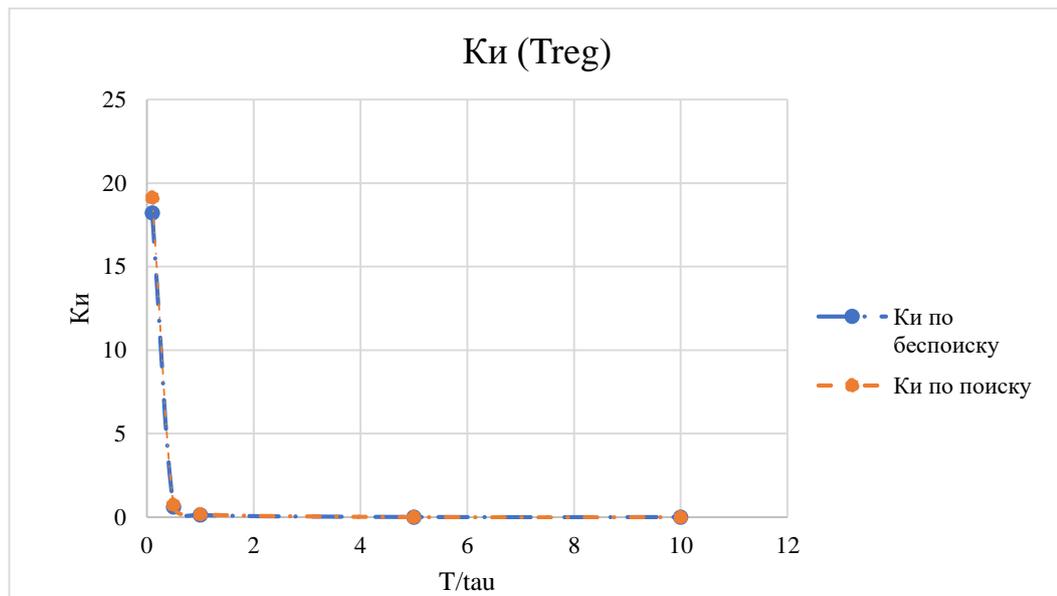


Рисунок 2.25 – График зависимости k_i от $\frac{T}{\tau}$ (составлено автором)

2. Судя по значениям, а также рисункам 2.21, 2.23, 2.25 во всем диапазоне $\frac{T}{\tau}$ беспойсковое значение k_i меньше k_i поискового, то есть беспойсковые настройки являются несколько более «осторожными».

Приступим к сравнению беспойского И-регулятора и ПИ-регулятора, который нашли при помощи метода максимальной чувствительности. Для «апериодического» звена первого порядка в разделе 2.1 и 2.3 были найдены робастный И- и ПИ-регуляторы. Результаты для «апериодического» звена второго порядка и колебательного объекта И-регулятор были рассчитаны в разделе 2.1 и 2.2 соответственно. Результаты расчета ПИ-регулятора для объекта второго порядка представлены в Приложении В. Для колебательного расчеты ПИ-регулятора представлены в приложении Б в таблице Б1 и на рисунках Б.13-Б.39. В таблице 2.19 показано сравнение регуляторов для объекта из примера 2.3.

Таблица 2.19 – Сравнение регуляторов (составлено автором)

	ИКК среднее	ИКК максимальное	Параметры макс.точки
И-регулятор	0.0635	0.1000	$\underline{kT\tau}$
ПИ-регулятор	0.0460	0.0724	$\underline{kT\tau}$
$\delta = 100$ (ИКК_И – ИКК_{ПИ})/ИКК_{ПИ}, %	38	38.1	-

В таблице 2.20 для объекта из примера 4.

Таблица 2.20 – Сравнение регуляторов (составлено автором)

	ИКК среднее	ИКК максимальное	Параметры макс.точки
И-регулятор	0.0550	0.0879	$\underline{k}\bar{T}_1\bar{T}_2$
ПИ-регулятор	0.0114	0.0214	$\underline{k}\bar{T}_1\bar{T}_2$
$\delta = 100 (\text{ИКК}_{\text{И}} - \text{ИКК}_{\text{ПИ}}) / \text{ИКК}_{\text{ПИ}}, \%$	382	311	-

В таблице 2.21 для колебательного объекта из примера 2.5.

Таблица 2.21 – Сравнение регуляторов (составлено автором)

	ИКК среднее	ИКК максимальное	Параметры макс.точки
И-регулятор	0.4676	0.7013	$\underline{k}\bar{c}\bar{b}$
ПИ-регулятор	2.4820	52.995	$\underline{k}\bar{c}\bar{b}$
$\delta = 100 (\text{ИКК}_{\text{И}} - \text{ИКК}_{\text{ПИ}}) / \text{ИКК}_{\text{ПИ}}, \%$	-81.2	-98.7	-

Рассматриваемый беспоисковый метод расчета И-регуляторов дает вполне приемлемые результаты с позиций практики регулирования ТП и может рассматриваться в качестве субоптимального.

Обеспечивая при правильной настройке сходимость к заданному значению выходной переменной, И-регулятор, однако, существенно уступает по быстродействию правильно настроенному ПИ-регулятору.

Как видно из рисунков Г.16-Г.21 и таблицы Г.1 в Приложении Г есть 6 точек при управлении ПИ-регулятором, в которых процесс является неустойчивым, а, следовательно, не удалось найти робастный регулятор. Также робастным регулятором не может быть регулятор, найденный на номинальные параметры регулятора, так как там тоже присутствует неустойчивость. Приступить к расчету с помощью модифицированного метода максимальной чувствительности, а именно итерационным методом также не выйдет, так как смысл этого метода в том, чтобы продолжить расчет робастного регулятора исходя из самой чувствительной точки, найденной ранее, а это одна и та же точка с параметрами $\bar{k}\bar{c}\bar{b}$ и в результате будет получено тоже самое. И тогда можно сделать вывод, что робастный ПИ-регулятор для данного объекта с помощью метода максимальной чувствительности и его модификации не может быть найден, а, следовательно, исходя из расчетов в данном файле в качестве робастного регулятора может быть принят И-регулятор.

Пример 2.9. Рассмотрим колебательный объект с запаздыванием, управляемый И-регулятором. Объект управления задается передаточной функцией (2.37):

$$H(p) = \frac{1e^{-1p}}{p^2 + 0.5p + 10} e^{-1p}, \quad (2.37)$$

где $H(p)$ – передаточная функция объекта, p – оператор Лапласа.

Зона неопределенности 50%. Значения всех параметров зоны неопределенности представлены в таблице 2.22.

Таблица 2.22 – Пределы изменения параметров (составлено автором)

	k	b	c	τ
Верхний	1.5	0.75	15	1.5
Средний	1	0.5	10	1
Нижний	0.5	0.25	5	0.5
δ, %	50	50	50	50

По формуле (2.20) рассчитаем $k_i^{\text{БП}(rob)}$. Так как все параметры нам известны, подставим их в формулу и получим (2.38) и (2.39). Коэффициент $r = 0.739$.

$$k_i^{\text{БП}(rob)} = \frac{0.739 \cdot 5}{1.5 \cdot (1.5 + \pi/\sqrt{5 - 0.75^2/4})}, \quad (2.38)$$

$$k_i^{\text{БП}(rob)} = 0.842 \quad (2.39)$$

где $k_i^{\text{БП}(rob)}$ – коэффициент усиления робастного И-регулятора, по беспойсковому методу.

Теперь поиском найдем значение $k_i^{\text{П}(rob)}$. Будем от $k_i^{\text{БП}(rob)}$ идти вправо. Верхняя граница представляет собой $k_i^{\text{БП}(rob)} \cdot 2 = 1.684$. Шаг поиска находим по формуле: $\Delta k_i = \frac{k_i^{\text{БП}(rob)}}{N}$. Время моделирования $T_{mod} = 200$. Примем $N = 100$. Шаг дискретизации при моделировании 0.01. В результате получаем И-регулятор с параметром $k_i = 1.347$, при этом значение ИКК = 0.0596. Максимальное значение ИКК достигается при $k = 0.5$, $b = 0.75$, $c = 15$ и $\tau = 1.5$. Результаты показаны на рисунке 2.26, а также в таблице 2.23.

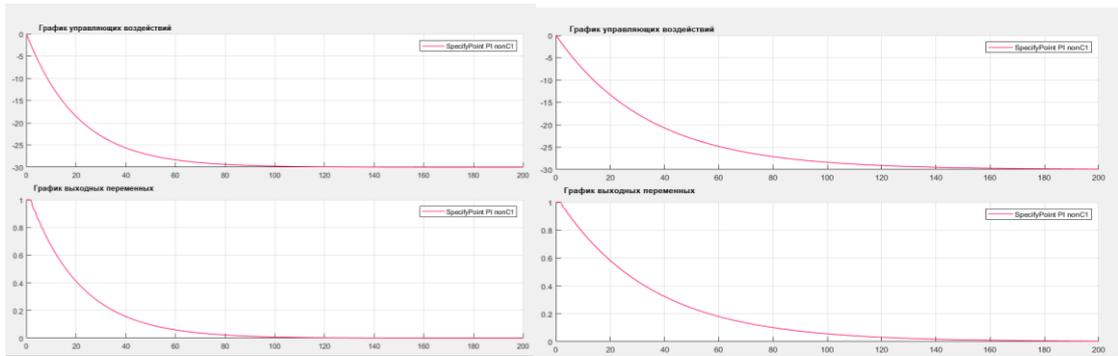


Рисунок 2.26 – Переходный процесс в точке с максимальным ИКК (слева поиск, справа беспоиск) (составлено автором)

Таблица 2.23 – Сравнение регуляторов (составлено автором)

	$k_i^{(rob)}$	ИКК среднее	ИКК максимальное
И-регулятор (беспоисковый)	0.842	0.0392	0.0930
И-регулятор (поиск)	1.347	0.0264	0.0596
$\delta = 100 (\text{ИКК}_{\text{бес}} - \text{ИКК}_{\text{пои}}) / \text{ИКК}_{\text{пои}}, \%$	-	48	56

В результате беспоисковый метод проигрывает поисковому, но беспоисковый метод также дает устойчивость во всех точках, так как является более осторожным.

Теперь сравним робастный И-регулятор по беспоисковому способу с классическим ПИ-регулятором (регулятор получен при помощи стандартных средств ПО MatLab) и номинальным ПИ-регулятором (регулятор рассчитанные по компенсационному методу [17, 42]) на исходном объекте управления и на объекте управления с увеличенным запаздыванием из примера 2.1 и 2.9. На рисунке 2.27 показаны итоговые переходные процессы для примера 2.1, на рисунке 2.28 показаны итоговые переходные процессы для примера 2.9.

На исходном ОУ предложенный регулятор проигрывает только по времени регулированию на 48 % - 97 % в зависимости от метода сравнения. По ИКК выигрывает на 12 % - 17 % также в зависимости от метода, с которым сравниваем. Далее увеличили запаздывание в 3.5 раза, и в результате предложенный (беспоисковый) метод единственный дает устойчивый переходный процесс.

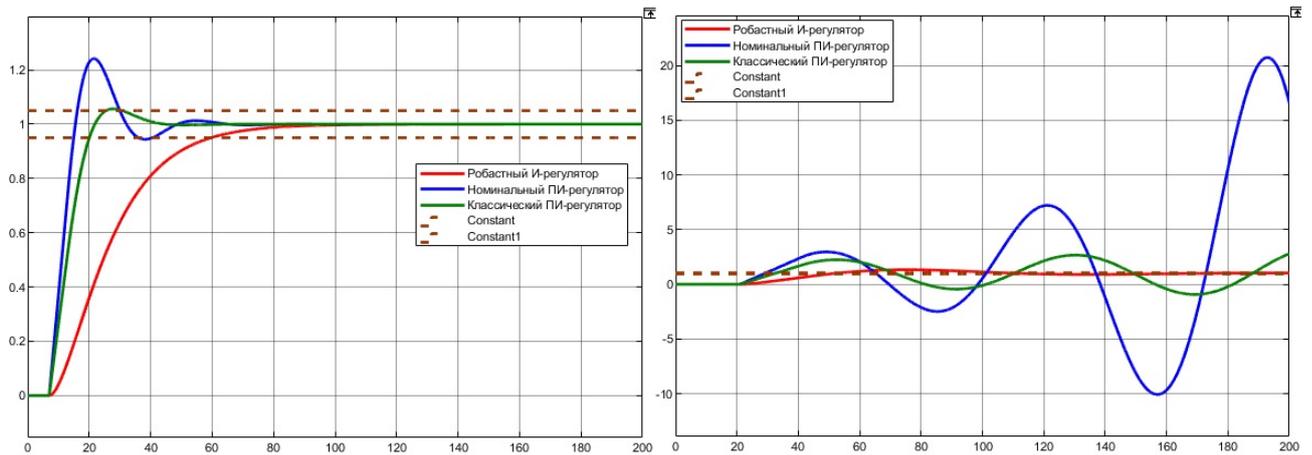


Рисунок 2.27 - Переходные характеристики на исходном ОУ (слева), Переходные характеристики на ОУ с увеличенным запаздыванием (справа)

(составлено автором)

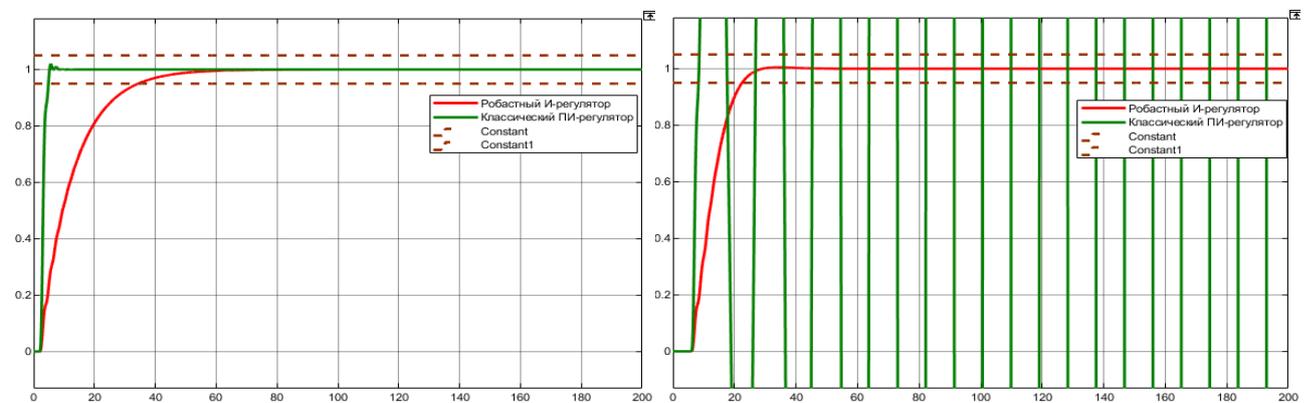


Рисунок 2.28 - Переходные характеристики на исходном ОУ (слева), переходные характеристики на ОУ с увеличенным запаздыванием (справа)

(составлено автором)

Результаты были сведены в таблицы 2.24 и 2.25.

Таблица 2.24 – Показатели качества управления на исходном ОУ (составлено автором)

Метод	ИКК	Время регулирования
Беспоисковый	0.82	59
Компенсационный	0.99	40
Классический (MatLab)	0.93	30

Таблица 2.25 – Показатели качества управления на ОУ с увеличенным запаздыванием (составлено автором)

Метод	ИКК	Время регулирования
Беспоисковый	0.99	156
Компенсационный	inf	inf

Продолжение таблицы 2.25

Метод	ИКК	Время регулирования
Классический (MatLab)	inf	inf

Для примера 2.9 компенсационный метод дал неудовлетворительный результат уже на исходном ОУ, поэтому сравнений с ним проводится не будет.

На исходном ОУ представленный метод проигрывает более чем на 100 % и по ИКК, и по времени регулирования. В тоже время при увеличении запаздывания в 5 раз предложенный метод дает устойчивый переходный процесс. Результаты были сведены в таблицы 2.26 и 2.27.

Таблица 2.26 – Показатели качества управления на исходном ОУ (составлено автором)

Метод	ИКК	Время регулирования
Беспоисковый	0.06	33
Классический (MatLab)	0.02	4

Таблица 2.27 – Показатели качества управления на ОУ с увеличенным запаздыванием (составлено автором)

Метод	ИКК	Время регулирования
Беспоисковый	0.09	22
Классический (MatLab)	inf	inf

Регулятор, рассчитанный по методу максимальной чувствительности, тоже подвергнем такой проверке на примере 2.1. На рисунке 2.29 показаны итоговые переходные процессы.

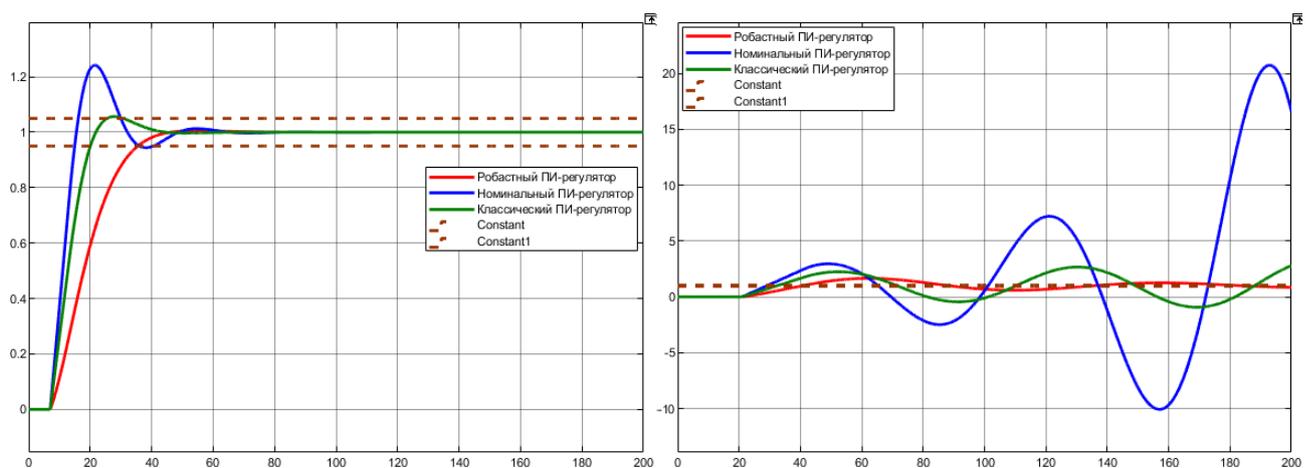


Рисунок 2.29 - Переходные характеристики на исходном ОУ (слева), переходные характеристики на ОУ с увеличенным запаздыванием (справа)

(составлено автором)

На исходном ОУ предлагаемый метод лучше компенсационного по ИКК на 10 % и по времени регулирования на 12 %. Классическому методу уступает только по времени регулирования на 16 %. При увеличении запаздывания в 3.5 раза предлагаемый метод единственный дает устойчивый переходный процесс. Результаты были сведены в таблицы 2.28 и 2.29.

Таблица 2.28 – Показатели качества управления на исходном ОУ (составлено автором)

Метод	ИКК	Время регулирования
Максимальной чувствительности	0.9	35
Компенсационный	1.0	40
Классический (MatLab)	0.9	30

Таблица 2.29 – Показатели качества управления на ОУ с увеличенным запаздыванием (составлено автором)

Метод	ИКК	Время регулирования
Максимальной чувствительности	1.9	309
Компенсационный	inf	inf
Классический (MatLab)	inf	inf

2.5 Выводы по Главе 2

В данной главе исследованы методы робастной настройки регуляторов для объектов нефтехимической промышленности с параметрической неопределенностью. Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработаны аналитические формулы для настройки интегральных (И) регуляторов, обеспечивающие устойчивость и приемлемое качество управления как для апериодических, так и для колебательных объектов. Показано, что предложенные беспойсковые методы дают надежные результаты при неопределенности параметров до 50 %.

2. Для задач, требующих более точной настройки, предложен метод максимальной чувствительности, позволяющий находить робастные параметры регуляторов путем анализа наиболее критичных точек зоны неопределенности.

Метод особенно эффективен для сложных объектов, где полный перебор вариантов затруднен.

3. Проведено сравнение И- и ПИ-регуляторов, которое показало, что И-регуляторы обеспечивают устойчивость в широком диапазоне параметров, но уступают по быстродействию; ПИ-регуляторы демонстрируют лучшее качество управления, однако их применение для колебательных систем может быть ограничено из-за риска потери устойчивости при значительных возмущениях.

ГЛАВА 3 РОБАСТНЫЕ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МІМО ОБЪЕКТОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Прежде всего, необходимо выполнить проверку управляемости. При $n = 0$ в установившемся режиме должно выполняться условие (3.1)

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{y}^*, \quad (3.1)$$

где $\mathbf{K} = \mathbf{H}(0)$ – матрица статических коэффициентов усиления динамического объекта $\mathbf{H}(p)$, \mathbf{u} – вектор управляющих воздействий, \mathbf{y}^* – вектор целевых значений выходных переменных.

Применительно к задачам управления неопределенным объектом рассматриваемого типа для управляемости требуется, чтобы неособенной была матрица статических коэффициентов усиления [29] всех объектов из заданной области \mathbf{G}_k возможных значений элементов матрицы \mathbf{K} , то есть должно выполняться условие (3.2)

$$\Delta_K = \det \mathbf{K} \neq 0 \text{ для всех } \mathbf{K} \in \mathbf{G}_k. \quad (3.2)$$

где \mathbf{K} – матрица статических коэффициентов усиления, \mathbf{G}_k – область возможных значений элементов матрицы \mathbf{K} .

В ходе исследований был обоснован следующий алгоритм проверки робастной управляемости для динамических ОУ рассматриваемого типа.

1. Осуществляется расчет значений определителя матрицы статических коэффициентов \mathbf{K} во всех вершинах l^2 -мерного параллелепипеда (3.3)

$$\underline{k}_{ij} \leq k_{ij} \leq \overline{k}_{ij}, \quad i, j = \overline{1, l}, \quad (3.3)$$

где $\underline{k}_{ij}, k_{ij}, \overline{k}_{ij}$ – значения коэффициентов усиления в области \mathbf{G}_k , i и j – индекс коэффициента, l – размерность,

то есть реализуется перебор всех 2^{l^2} вариантов, для каждого из которых k_{ij} находятся на нижней или верхней границе неравенств (2.4). Для расчета определителей может использоваться, например, пакет MatLab (команда Det(K)).

2. Одновременно с расчетом определителей по п.1 осуществляется поиск минимального $\underline{\Delta}_K$ и максимального $\overline{\Delta}_K$ значений определителя Δ_K .

3. Если $\underline{\Delta}_K$ и $\overline{\Delta}_K$ одного знака, то делается заключение о выполнении условий робастной управляемости, что дает основания продолжить расчеты по определению настроек многомерного регулятора для исходного динамического объекта. В противном случае настройки, обеспечивающие переход в требуемый установившийся режим, не существуют.

3.1 Бесписковые методы робастной настройки параметров регуляторов

Приближенное решение сложной задачи (2.8) предлагается искать в два этапа. На первом этапе рассматривается задача робастного управления статическим объектом, модель которого задается матрицей статических коэффициентов усиления исходного объекта $K = H(0)$. Решение находится в классе многомерных И-регуляторов $W_{st}(p) = B/p$, обеспечивающих свойство робастной устойчивости замкнутой системы управления. Условия робастной устойчивости, то есть экспоненциальной сходимости к нулю нормы вектора выходных переменных $\|y(t)\| = \max_{1 \leq i \leq l} |y_i(t)|$, состоят в требовании диагональной доминантности матрицы [52] $A = KB$ и имеют вид (3.4)

$$\sigma(A) = \sigma = \min_{1 \leq i \leq l} \{a_{ii} - \sum_{j \neq i}^l |a_{ij}|\} > 0. \quad (3.4)$$

где σ - критический параметр, характеризующий степень диагональной доминантности, A - результирующая матрица, определяющая устойчивость замкнутой системы, a_{ii} - элементы матрицы A .

При выполнении условия (3.4) имеет место соотношение (3.5)

$$\|y(t)\| \leq \|y(0)\| e^{-\sigma t} \quad (3.5)$$

где $y(t)$ - вектор выходных переменных в момент времени t , t - время, $y(0)$ - вектор начального отклонения, σ - скорость затухания.

Условие (3.4) может быть записано в виде (3.6)

$$a_{ii} > \sum_{j \neq i}^n |a_{ij}|, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3.6)$$

где a_{ii} - диагональные элементы матрицы A , i - индекс элемента, n - размерность вектора.

Поскольку $KB=A$, то получим (3.7)

$$a_{ij} = \mathbf{k}_i \mathbf{b}_j, \quad (3.7)$$

где $\mathbf{k}_i = [k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{im}]$, $i = \overline{1, n}$; (i -я строка матрицы \mathbf{K})

$\mathbf{b}_j = [b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{mj}]^T$, $j = \overline{1, n}$. (j -й столбец матрицы \mathbf{B})

Отсюда получаем (3.8)

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^m k_{ik} b_{kj}, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}. \quad (3.8)$$

где a_{ij} – элементы матрицы \mathbf{A} , k_{ik} – элементы матрицы \mathbf{K} , b_{kj} – элементы матрицы \mathbf{B} .

Таким образом, можно проверить обеспечивает ли регулятор с матрицей \mathbf{B} сверхустойчивость системе (2.1). Для этого сначала рассчитываются элементы матрицы \mathbf{A} по формуле (3.8). Затем проверяют выполнение условия (3.4). Это условие эквивалентно системе неравенств (3.3), поэтому можно анализировать либо его, либо другое. Если условие (3.4) выполняется, система сверхустойчива, если нет, то отсутствие сверхустойчивости не означает отсутствие устойчивости; вместе с тем наличие сверхустойчивости обеспечивает устойчивость [46].

Чтобы выполнялись условия диагональной доминантности матрицы \mathbf{A} , где $\mathbf{A} = \alpha \mathbf{K} \mathbf{B}$, рассмотрим более сложный вопрос о возможности сверхстабилизации объекта \mathbf{K} в классе многомерного И-регулятора $\mathbf{W}_{st}(p) = \mathbf{B}/p$. Если ввести переменные σ и z_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$, то условия сверхустойчивости (а сверхустойчивость и означает возможность сверхстабилизации) можно записать в виде (3.9):

$$\begin{cases} \sigma > 0, \\ a_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n z_{ij} \geq \sigma, & i = \overline{1, n}, \\ -z_{ij} \leq a_{ij} \leq z_{ij}, & i, j = \overline{1, n}, i \neq j, \\ a_{ij} = \sum_{k=1}^m k_{ik} b_{kj}, & i, j = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (3.9)$$

где σ – критический параметр, характеризующий степень диагональной доминантности, a_{ij} – элементы матрицы \mathbf{A} , z_{ij} – переменные для линеаризации, k_{ik} – элементы матрицы \mathbf{K} , b_{kj} – элементы матрицы \mathbf{B} , i и j – индексы элементов, n – размерность вектора.

Если система (3.9) имеет решение b_{kj} , ($k = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$) и z_{ij} , $i, j = \overline{1, n}, i \neq j$, при некотором $\sigma > 0$, то система (\mathbf{K}, \mathbf{B}) сверхустойчива.

Для того чтобы синтезировать регулятор, обеспечивающий максимальный запас сверхустойчивости, необходимо решить задачу линейного программирования (далее - ЗЛП) по определению $\max \sigma$ при соблюдении всех ограничений (3.9). Переменными в этой ЗЛП являются $m \times n$ элементов матрицы $\mathbf{B} = \{b_{kj}\}_{m \times n}$ и $n \times (n - 1)$ элементов матрицы $\mathbf{Z} = \{z_{ij}\}_{n \times n}, i \neq j$, а также скаляр σ , то есть всего в сформулированной ЗЛП $m \times n + n \times (n - 1) + 1 = n \times (m + n - 1) + 1$ переменных (например, при $m = 3$ и $n = 2$ число переменных равно 9).

Если рассматриваемая ЗЛП не имеет решения, то это означает, что сверхстабилизация объекта \mathbf{K} посредством регулятора невозможна. Несколько модифицируя сформулированную задачу, можно учесть дополнительные ограничения на интенсивность управляющих воздействий, которые могут быть заданы допусками на коэффициенты усиления регулятора (3.10)

$$\underline{b}_{kj} \leq b_{kj} \leq \overline{b}_{kj}, \quad k = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (3.10)$$

где b_{kj} – элементы матрицы \mathbf{B} , k и j – индексы элементов, n и m – размерность вектора.

Формулировка ЗЛП остается та же, но добавляются ограничения (3.10). Если $m = n$, то в этом случае максимальная степень доминантности достигается при $\mathbf{B} = \mathbf{K}^{-1}$, когда $\mathbf{A} = \alpha \mathbf{I}$, где \mathbf{I} – единичная матрица. И поскольку $a_{ij} = 0$ для $i \neq j$, то условия сверхустойчивости (3.6) выполняются при любых α .

Поскольку $a_{ii} = \alpha, i = \overline{1, n}$, то, как следует из (3.4), получим (3.11),

$$\sigma = \alpha \quad (3.11)$$

где σ – критический параметр, характеризующий степень диагональной доминантности, α – масштабируем коэффициент (скорость затухания).

$\mathbf{B} = \mathbf{K}^{-1}$ приобретает вид (3.12)

$$\|\mathbf{y}(t)\| = \|\mathbf{y}_0\| e^{-\alpha t} \quad (3.12)$$

где $\mathbf{y}(t)$ – вектор выходных переменных в момент времени t , t – время, $\mathbf{y}(0)$ – вектор начального отклонения, a – масштабируем коэффициент (скорость затухания).

Ясно, что в отсутствии ограничения (3.10) выбором сколь угодно большого a можно обеспечить любой запас устойчивости и одновременно сколь угодно большое быстродействие.

Рассмотрим вопрос о выборе a при наличии ограничений (3.10).

Пусть (3.13)

$$\mathbf{K}^{-1} = \mathbf{Q} = \{q_{ij}\}. \quad (3.13)$$

где $\mathbf{K}^{-1} = \mathbf{Q}$ – обратная матрица статических коэффициентов, q_{ij} – элементы матрицы \mathbf{Q}

Тогда с учетом $\mathbf{B} = \mathbf{K}^{-1}$ условия (3.10) запишутся в виде (3.14)

$$\underline{b}_{ij} \leq a q_{ij} \leq \overline{b}_{ij} \quad (3.14)$$

где a – масштабируем коэффициент (скорость затухания), \underline{b}_{ij} и \overline{b}_{ij} – заданные нижние и верхние границы, q_{ij} – элементы матрицы \mathbf{Q}

или (3.15)

$$\underline{\alpha}_{ij} \leq a \leq \overline{\alpha}_{ij}, \quad i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}, \quad (3.15)$$

где

$$\overline{\alpha}_{ij} = \begin{cases} \frac{\overline{b}_{ij}}{q_{ij}}, & \text{если } q_{ij} > 0, \\ \frac{b_{ij}}{q_{ij}}, & \text{если } q_{ij} < 0, \end{cases}$$

$$\underline{\alpha}_{ij} = \begin{cases} \frac{b_{ij}}{q_{ij}}, & \text{если } q_{ij} > 0, \\ \frac{\overline{b}_{ij}}{q_{ij}}, & \text{если } q_{ij} < 0, \end{cases}$$

где $\overline{\alpha}_{ij}$ и $\underline{\alpha}_{ij}$ – пороговые значения, b_{ij} и \overline{b}_{ij} – заданные нижние и верхние границы, q_{ij} – элементы матрицы \mathbf{Q} .

В свою очередь, условия (3.15) могут быть записаны в виде (3.16):

$$\underline{\alpha} \leq a \leq \overline{\alpha}, \quad (3.16)$$

где

$$\bar{\alpha} = \min_{\substack{i=1,n \\ j=1,n}} \{\bar{\alpha}_{ij}\}$$

$$\underline{\alpha} = \max_{\substack{i=1,n \\ j=1,n}} \{\underline{\alpha}_{ij}\}$$

где $\bar{\alpha}$ и $\underline{\alpha}$ - максимальное из верхних порогов и минимальное из нижних порогов соответственно.

Наряду с (3.16) необходимо учесть ограничение $\alpha > 0$, так что α могут выбираться из области, задаваемой неравенствами (3.17)

$$\begin{cases} \underline{\alpha} \leq \alpha \leq \bar{\alpha}, \\ \alpha > 0. \end{cases} \quad (3.17)$$

где α – масштабируемый коэффициент (скорость затухания), $\bar{\alpha}$ и $\underline{\alpha}$ - максимальное из верхних порогов и минимальное из нижних порогов соответственно.

Если $\bar{\alpha} < 0$, то задача не имеет решения, то есть при ограничениях (3.10) система (2.1) с регулятором рассматриваемого типа не может быть сделана сверхустойчивой.

Если же $\bar{\alpha} > 0$, то условия (3.17) могут быть записаны в виде (3.18):

$$\max\{0, \underline{\alpha}\} \leq \alpha \leq \bar{\alpha} \quad (3.18)$$

где α – масштабируемый коэффициент (скорость затухания), $\bar{\alpha}$ и $\underline{\alpha}$ - максимальное из верхних порогов и минимальное из нижних порогов соответственно.

Чтобы синтезировать регулятор с максимальным запасом сверхустойчивости, следует принять (3.19):

$$\alpha = \bar{\alpha}. \quad (3.19)$$

где α – масштабируемый коэффициент (скорость затухания), $\bar{\alpha}$ максимальное из верхних порогов.

Исходя из сказанного, будем формировать робастный регулятор в виде $W^{(роб)}(p) = \frac{\alpha}{p} \tilde{K}^{-1}$, где \tilde{K} – ОУ с номинальными параметрами, соответствующий центру зоны неопределенности G , а $\alpha > 0$ - настраиваемый параметр. Область неопределенности параметров статического объекта задана допусками. Введем обозначение \tilde{K} для матрицы номинальных значений параметров (3.20)

$$\tilde{\mathbf{K}} = \frac{1}{2}(\overline{\mathbf{K}} + \underline{\mathbf{K}}), \quad (3.21)$$

где

$$\overline{\mathbf{K}} = [\overline{K}_{ij}], \quad \underline{\mathbf{K}} = [\underline{K}_{ij}], \quad \tilde{\mathbf{K}} = \left[\frac{1}{2}(\overline{K}_{ij} + \underline{K}_{ij}) \right].$$

$\overline{\mathbf{K}}$ – матрица коэффициентов усиления на верхней границе, $\underline{\mathbf{K}}$ – матрица коэффициентов усиления на нижней границе.

Каждый ОУ, принадлежащий зоне неопределенности, может быть задан матрицей $\mathbf{K} = \tilde{\mathbf{K}} + \Delta = [\tilde{k}_{ij} + \Delta_{ij}]$. Здесь элементы матрицы отклонений ОУ от номинала удовлетворяют условию $|\Delta_{ij}| \leq m_{ij}$, где m_{ij} – элементы матрицы $\mathbf{M} = \frac{1}{2}(\overline{\mathbf{K}} - \underline{\mathbf{K}})$, определяющей размеры зоны неопределенности.

Пусть (3.21):

$$\mathbf{K} = \tilde{\mathbf{K}} + \gamma\Delta, \quad (3.21)$$

где \mathbf{K} – матрица статических коэффициентов усиления, $\tilde{\mathbf{K}}$ – матрица номинальных значений коэффициентов, γ – радиус робастной управляемости, Δ – матрица отклонения параметров.

Тогда в соответствии с $\dot{\mathbf{y}} = -\mathbf{A}\mathbf{y}$ условия сверхустойчивости имеет вид (3.21) или в скалярной форме (3.22):

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^n K_{ik} B_{kj}, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (3.22)$$

где K_{ik} – элементы матрицы статических коэффициентов, B_{kj} – элементы матрицы параметров регулятора, a – масштабируемый коэффициент (скорость затухания).

С учетом $\mathbf{B} = \mathbf{K}^{-1}$ и (3.21) получим (3.23):

$$\mathbf{A} = \alpha\mathbf{K}\tilde{\mathbf{K}}^{-1} = \alpha(\tilde{\mathbf{K}} + \tilde{\Delta})\tilde{\mathbf{K}}^{-1} = \alpha(\mathbf{I} + \tilde{\Delta} \times \mathbf{C}), \quad \text{где } \mathbf{C} = \tilde{\mathbf{K}}^{-1} \quad (3.23)$$

где \mathbf{K} – матрица статических коэффициентов усиления, $\tilde{\mathbf{K}}$ – матрица номинальных значений коэффициентов, \mathbf{I} – единичная матрица, \mathbf{C} – обратная матрица номинальных значений коэффициентов, a – масштабируемый коэффициент (скорость затухания), $\tilde{\Delta}$ – матрица отклонения номинальных параметров, \mathbf{A} – результирующая матрица, определяющая устойчивость замкнутой системы.

или в скалярном виде (3.24):

$$a_{ij} = \partial(1 + \gamma \sum_{k=1}^n \Delta_{ik} C_{ki}), i = 1, 2 \quad (3.24)$$

$$a_{ij} = \partial \gamma \sum_{k=1}^n \Delta_{ik} C_{kj}, \quad i = \overline{1, n}, \quad i \neq j$$

где a_{ij} – элементы матрицы связывающий i -й вход и j -й выход системы, γ – радиус робастной управляемости, Δ_{ik} – отклонения параметров, C_{kj} – элементы матрицы \mathbf{C} .

Тогда условия сверхустойчивости (3.6) запишутся в виде (3.25):

$$\partial(1 + \gamma \sum_{k=1}^n \Delta_{ik} C_{kj}) > \sum_{i \neq j}^n \partial \cdot \gamma \left| \sum_{k=1}^n \Delta_{ik} C_{kj} \right|, \quad i = \overline{1, n} \quad (3.25)$$

где a_{ij} – элементы матрицы, связывающие i -й вход и j -й выход системы, γ – коэффициент масштабирования неопределенности, Δ_{ik} – отклонения параметров, C_{kj} – элементы матрицы \mathbf{C} .

или после сокращения ∂ получим (3.26)

$$1 + \gamma \sum_{k=1}^n \Delta_{ik} C_{kj} > \sum_{i \neq j}^n \gamma \left| \sum_{k=1}^n \Delta_{ik} C_{kj} \right|, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3.26)$$

где a_{ij} – элементы матрицы связывающий i -й вход и j -й выход системы, γ – радиус робастной управляемости, Δ_{ik} – отклонения параметров, C_{kj} – элементы матрицы \mathbf{C} .

Учитывая (3.27), что

$$\left| \sum_{k=1}^n \tilde{\Delta}_{ik} c_{kj} \right| \leq \sum_{k=1}^n |\tilde{\Delta}_{ik}| \times |c_{kj}| \leq \gamma \sum_{k=1}^n m_{ik} \times |c_{kj}|, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (3.27)$$

где γ – радиус робастной управляемости, $\tilde{\Delta}_{ik}$ – отклонения номинальных параметров, C_{kj} – элементы матрицы \mathbf{C} , m_{ik} – элементы матрицы \mathbf{M} .

Получим достаточные условия робастной сверхустойчивости (3.28):

$$1 > \gamma \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n m_{ik} |C_{kj}| \quad (3.28)$$

где γ – радиус робастной управляемости, C_{kj} – элементы матрицы \mathbf{C} , m_{ik} – элементы матрицы \mathbf{M}

или (3.29):

$$\gamma < \frac{1}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n m_{ik} |C_{kj}|}, \quad i = \overline{1, n} \quad (3.29)$$

где γ – радиус робастной управляемости, C_{kj} – элементы матрицы C , m_{ik} – элементы матрицы M .

То же самое можно записать в виде (3.30):

$$\gamma < \gamma \frac{1}{\max_{i=1, \overline{n}} \{ \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n m_{ik} \times |c_{kj}| \}} \quad (3.30)$$

где γ – радиус робастной управляемости, C_{kj} – элементы матрицы C , m_{ik} – элементы матрицы M .

Поясним, что оперирующие в формулах m_{ik} и C_{kj} представляют собой соответствующие элементы матриц M и C . Формула (3.30), соответствующая достаточным условиям, может занижать значения $\bar{\gamma}$ радиуса робастной сверхустойчивости. Чтобы ликвидировать этот недостаток, следует при выводе формул использовать не достаточные условия, а необходимые и достаточные условия. Покажем, как найти максимально возможные значения $\bar{\gamma}$ радиуса робастной сверхустойчивости для И-регулятора с матрицей коэффициентов усиления в результате решения соответствующей задачи целочисленного программирования.

Согласно (3.26) для робастной сверхустойчивости необходимо и достаточно выполнения n неравенств (3.31):

$$1 - \gamma \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \left| \sum_{k=1}^n \Delta_{ik} C_{kj} \right| - \sum_{k=1}^n \Delta_{ik} C_{kj} \right) > \emptyset \text{ для } i = \overline{1, n} \quad (3.31)$$

где γ – радиус робастной управляемости, C_{kj} – элементы матрицы C , Δ_{ik} – отклонения параметров.

Пусть определены (3.32):

$$\phi_i^{(max)} = \max_{\Delta_{i1}, \Delta_{i2}, \dots, \Delta_{in}} \{ \phi_i(\Delta_{i1}, \Delta_{i2}, \dots, \Delta_{in}) \mid |\Delta_{ik}| \leq m_{ik}, i, k = \overline{1, n} \} \quad (3.32)$$

где

$$\phi_i(\Delta_{i1}, \Delta_{i2}, \dots, \Delta_{in}) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \left| \sum_{k=1}^n \Delta_{ik} C_{kj} \right| - \sum_{k=1}^n \Delta_{ik} C_{kj}, i = \overline{1, n}$$

где ϕ_i - функция, характеризующая суммарное влияние неопределённостей на i -й выход системы, C_{kj} - элементы матрицы C , Δ_{ik} - отклонения параметров, m_{ik} - элементы матрицы M , $\phi_i^{(max)}$ - максимально возможное значение ϕ_i при заданных ограничениях на Δ_{ik} .

Тогда ясно, что для выполнения условий (3.31) необходимо и достаточно, чтобы было (3.33):

$$1 - \gamma\phi_i > \emptyset \quad \text{для } i = \overline{1, n}. \quad (3.33)$$

где γ - радиус робастной управляемости, ϕ_i - функция, характеризующая суммарное влияние неопределённостей на i -й выход системы.

Или, учитывая, что $\phi_i > \emptyset$, должны выполняться n условий (3.34):

$$\gamma\phi_i < 1 \rightarrow \gamma < \frac{1}{\phi_i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3.34)$$

где γ - радиус робастной управляемости, ϕ_i - функция, характеризующая суммарное влияние неопределённостей на i -й выход системы,

которые можно объединить в одно условие (3.35):

$$\gamma < \min \left\{ \frac{1}{\phi_1}, \frac{1}{\phi_2}, \dots, \frac{1}{\phi_n} \right\} = \frac{1}{\max\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}} \quad (3.35)$$

где γ - радиус робастной управляемости, ϕ_i - функция, характеризующая суммарное влияние неопределённостей на i -й выход системы.

Отсюда получим (3.36):

$$\gamma < \frac{1}{\max\{\phi_1^{(max)}, \phi_2^{(max)}, \dots, \phi_n^{(max)}\}} \quad (3.36)$$

где γ - радиус робастной управляемости, $\phi_i^{(max)}$ - максимально возможное значение ϕ_i при заданных ограничениях на Δ_{ik} .

На втором этапе рассматривается задача робастного управления динамическим объектом. Из общих результатов работы [23] следует, что если для статического ОУ, образованного из исходного динамического объекта рассматриваемого типа исключением динамики, получен И-регулятор $W(p) = \frac{\alpha}{p} B$,

обеспечивающий устойчивость замкнутой системы, то всегда найдется достаточно

малое $\alpha > 0$, что замкнутая таким регулятором система с исходным динамическим ОУ будет также устойчива.

Предположим, что с использованием соотношений (3.30) или (3.36) установлено: для рассматриваемого регулятора в пределах области неопределенности параметров матрицы \mathbf{K} максимальный радиус робастности составляет определенное значение больше 1. В таком случае данный регулятор можно считать робастным для (2.1), если коэффициент выбран достаточно малым. Коэффициент может быть найден из решения задачи (2.8), но для этого надо выполнить дискретизацию области неопределенности \mathbf{G} , а также решить ряд задач одномерного поиска.

Решение может быть улучшено при использовании

- ПИ-регулятора $\mathbf{W}^{(роб)}(p) = (\beta + \frac{\alpha}{p})\tilde{\mathbf{K}}^{-1}$ (3.37)

- ПИД-регулятора $\mathbf{W}^{(роб)}(p) = (\beta + \frac{\alpha}{p} + \gamma p)\tilde{\mathbf{K}}^{-1}$. (3.38)

где $\mathbf{W}^{(роб)}$ – передаточная матрица робастного регулятора, p – оператор Лапласа, $\tilde{\mathbf{K}}$ – матрица номинальных значений коэффициентов, β – пропорциональная составляющая, α – интегральная составляющая, γ – дифференциальная составляющая.

При этом необходимо будет решать ряд задач двумерного или трехмерного поиска.

Пример 3.1. В качестве объекта рассмотрим атмосферную ректификационную колонну на рисунке 1.3 получила название К-2 и процесс управления температурой в верху и внизу колонны. Атмосферная ректификационная колонна К-2 в составе блока ЭЛОУ-АВТ является ключевым элементом первичной переработки нефти, обеспечивающим разделение частично отбензиненной нефти на фракции с различными температурными интервалами кипения. Температура в верхней и нижней частях колонны К-2 критически важна для обеспечения качественного разделения фракций. Неправильный температурный режим может привести к перекрытию фракций (например,

попадание тяжёлых компонентов в лёгкие фракции) или снижению выхода целевых продуктов. Номинальное значение температур в верху колонны 130 °С, а внизу 360 °С. Данный процесс представлен [76] и выглядит следующим образом (3.39):

$$\mathbf{H}(p) = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-p}}{16.7p+1} & \frac{-18.9e^{-3p}}{21.0p+1} \\ \frac{6.6e^{-7p}}{10.9p+1} & \frac{-19.4e^{-3p}}{14.4p+1} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

где $\mathbf{H}(p)$ – передаточная матрица объекта, p – оператор Лапласа.

Вначале необходимо рассчитать максимальную зону неопределённости элементов матрицы статических коэффициентов δ . Для этого в начале необходимо определить матрицу статических коэффициентов. Матрица статических коэффициентов ОУ имеет вид (3.40):

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12.8 & -18.9 \\ 6.6 & -19.4 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

где \mathbf{K} – матрица статических коэффициентов усиления, $k_{11}, k_{22}, k_{21}, k_{12}$ – элементы матрицы \mathbf{K} .

Для того чтобы обеспечить выполнение условия $\mathbf{K}u = \mathbf{y}^*$ при любом \mathbf{y}^* необходимо и достаточно, чтобы квадратная матрица коэффициентов усиления была неособенной, то есть чтобы ее определитель не был равен нулю $\Delta_K \neq 0$. Найдем определитель матрицы \mathbf{K} (3.41):

$$\Delta_K = k_{11}k_{22} - k_{21}k_{12} = 248.32 - 124.74 = 123.58 \quad (3.41)$$

где $k_{11}, k_{22}, k_{21}, k_{12}$ – элементы матрицы \mathbf{K} .

В [52] был введен параметр δ , который определяет размер зоны неопределенности. Тогда в соответствии [52] мы получаем максимальный и минимальный детерминант (3.42) и (3.43):

$$\overline{\Delta}_K(\delta) = -k_{11}|k_{22}|(1 - \delta)^2 + k_{21}|k_{12}|(1 + \delta)^2 \quad (3.42)$$

$$\underline{\Delta}_K(\delta) = -k_{11}|k_{22}|(1 + \delta)^2 + k_{21}|k_{12}|(1 - \delta)^2 \quad (3.43)$$

где $k_{11}, k_{22}, k_{21}, k_{12}$ – элементы матрицы K , $\overline{\Delta_K}$ – значение максимального определителя, $\underline{\Delta_K}$ – значения минимального определителя, δ – коэффициент зоны неопределенности.

Необходимо узнать, когда нарушиться δ граничное значение, то есть, когда $\overline{\Delta_K}(\delta)$ и $\underline{\Delta_K}(\delta)$ будут иметь разные знаки. Для этого предположим, что есть зона неопределённости в 30 %, что соответствуют диапазону изменения температур внизу колонны 345 – 375 °С, а вверху 115 – 145 °С.

Для 30 % параметры K принимают следующие значения:

- матрица с максимальными значениями коэффициентов: $\begin{bmatrix} 16.6 & -13.2 \\ 8.6 & -13.6 \end{bmatrix}$
- матрица с минимальными значениями коэффициентов: $\begin{bmatrix} 9 & -24.6 \\ 4.6 & -25.2 \end{bmatrix}$

Подставляя соответствующие значения, получим (3.44) и (3.45):

$$\overline{\Delta_K} = -9 \cdot 13.6 + 24.6 \cdot 8.6 = 89.2 \quad (3.44)$$

$$\underline{\Delta_K} = -16.6 \cdot 25.2 + 13.2 \cdot 4.6 = -357.6 \quad (3.45)$$

где $\overline{\Delta_K}$ – значение максимального определителя, $\underline{\Delta_K}$ – значения минимального определителя.

Условия управляемости не соблюдается, так как знаки детерминантов разные. Возьмем зону неопределенности 15 %, что соответствуют диапазону изменения температур внизу колонны 355 – 369 °С, а вверху 125 -139 °С, чтобы посмотреть, какие будут знаки снова.

Для 15% параметры K принимают следующие значение:

- матрица с максимальными значениями коэффициентов: $\begin{bmatrix} 14.7 & -16.1 \\ 7.6 & -16.5 \end{bmatrix}$
- матрица с минимальными значениями коэффициентов: $\begin{bmatrix} 10.9 & -21.7 \\ 5.6 & -22.3 \end{bmatrix}$

Подставляя соответствующие значения, получим (3.46) и (3.47):

$$\overline{\Delta_K} = -10.9 \cdot 16.5 + 21.7 \cdot 7.6 = -14.93 \quad (3.46)$$

$$\underline{\Delta_K} = -14.7 \cdot 22.3 + 16.1 \cdot 5.6 = -237.65 \quad (3.47)$$

где $\overline{\Delta_K}$ – значение максимального определителя, $\underline{\Delta_K}$ – значения минимального определителя.

В результате значение, при котором нарушается необходимое условие управляемости, может быть найдено из уравнения $\overline{\Delta}_K(\delta^*) = 0$, то есть имеет вид (3.48):

$$\overline{\Delta}_K(\delta) = -k_{11}|k_{22}|(1 - \delta^*)^2 + k_{21}|k_{12}|(1 + \delta^*)^2 = 0. \quad (3.48)$$

где $\overline{\Delta}_K$ – значение максимального определителя, δ^* – радиус робастной управляемости, $k_{11}, k_{22}, k_{21}, k_{12}$ – элементы матрицы \mathbf{K} .

Решив уравнение, получим значение радиуса робастной управляемости (3.49) и (3.50):

$$\delta^* = \frac{\sqrt{k_{11} \cdot |k_{22}|} - \sqrt{k_{21} \cdot |k_{12}|}}{\sqrt{k_{11} \cdot |k_{22}|} + \sqrt{k_{21} \cdot |k_{12}|}}, \quad (3.49)$$

$$\delta^* = 0.17 \quad (3.50)$$

где $k_{11}, k_{22}, k_{21}, k_{12}$ – элементы матрицы \mathbf{K} , δ – коэффициент зоны неопределенности.

Получаем $\delta^* = 0.17$. Для ОУ зона неопределенности элементов матрицы статических коэффициентов усиления не должна превышать 17 %.

Найдем достаточные условия робастной устойчивости (3.51) и (3.52). Ранее было введено значение ω , $\tilde{\varphi}_1(\omega)$ и $\tilde{\varphi}_2(\omega)$, где ω максимальное относительное отклонение параметров ОУ,

$$\tilde{\varphi}_1(\omega) = \omega|k_{11}|(|k_{22}| + |k_{12}|) + \omega|k_{12}|(|k_{11}| + |k_{21}|), \quad (3.51)$$

$$\tilde{\varphi}_2(\omega) = \omega|k_{22}|(|k_{21}| + |k_{11}|) + \omega|k_{21}|(|k_{22}| + |k_{12}|). \quad (3.52)$$

где $k_{11}, k_{22}, k_{21}, k_{12}$ – элементы матрицы \mathbf{K} , ω – максимальное относительное отклонение параметров ОУ, $\tilde{\varphi}_1$ и $\tilde{\varphi}_2$ – функция, характеризующая суммарное влияние неопределённостей на i -й выход системы.

В результате можно сформулировать достаточные условия робастной сверхустойчивости (3.53):

$$\gamma < \gamma_{max} = \frac{|k_{11} \cdot k_{22} - k_{21} \cdot k_{12}|}{\max\{\tilde{\varphi}_1(\omega), \tilde{\varphi}_2(\omega)\}}. \quad (3.53)$$

где $k_{11}, k_{22}, k_{21}, k_{12}$ – элементы матрицы \mathbf{K} , ω – максимальное относительное отклонение параметров ОУ, $\tilde{\varphi}_1$ и $\tilde{\varphi}_2$ – функция, характеризующая суммарное

влияние неопределённостей на i -й выход системы, γ – радиус робастной управляемости.

Принимая $\gamma = 1$, можно найти $\bar{\omega}$, то есть максимальный размер зоны неопределённости [52], получим (3.54):

$$\bar{\omega} = \frac{|k_{11} \cdot k_{22} - k_{21} \cdot k_{12}|}{\max[|k_{11}|(|k_{22}| + |k_{12}|) + |k_{12}|(|k_{11}| + |k_{21}|), |k_{22}|(|k_{21}| + |k_{11}|) + |k_{21}|(|k_{22}| + |k_{12}|)]} \quad (3.54)$$

где $k_{11}, k_{22}, k_{21}, k_{12}$ – элементы матрицы \mathbf{K} , $\bar{\omega}$ – максимальный размер зоны неопределённости.

Сначала рассчитаем (3.55):

$$\begin{aligned} \bar{\omega} &= \frac{|12.8 \cdot (-19.4) - 6.6 \cdot (-18.9)|}{\max[12.8(19.4 + 18.9) + 18.9(12.8 + 6.6), [19.4(6.6 + 12.8) + 6.6(19.4 + 18.9)]]} \\ &= \frac{|-248.32 + 124.74|}{\max(12.8 \cdot 38.3 + 18 \cdot 19.4), (19.4 \cdot 19.4 + 6.6 \cdot 38.3)} \\ &= \frac{123.58}{\max(490.24 + 250.26), (376.36 + 252.78)} = \frac{123.58}{\max(856.9, 629.14)} = \frac{123.58}{856.9} \\ &= 0.144. \end{aligned} \quad (3.55)$$

где $\bar{\omega}$ – максимальный размер зоны неопределённости, что меньше зоны неопределённости в статике.

Попробуем понять, можно ли еще расширить зону неопределённости. Ранее были получены необходимые и достаточные условия робастной сверхустойчивости (3.56) и (3.57):

$$\varphi_1^{(max)} = \max_{\Delta_{11}, \Delta_{12}} \{ |\Delta_{11}C_{12} + \Delta_{12}C_{22}| - (\Delta_{11}C_{11} + \Delta_{12}C_{21}) \left| \begin{array}{l} \Delta_{11} = \pm m_{11}, \\ \Delta_{12} = \pm m_{12} \end{array} \right. \}, \quad (3.56)$$

$$\varphi_2^{(max)} = \max_{\Delta_{21}, \Delta_{22}} \{ |\Delta_{21}C_{12} + \Delta_{22}C_{21}| - (\Delta_{21}C_{12} + \Delta_{22}C_{22}) \left| \begin{array}{l} \Delta_{21} = \pm m_{21}, \\ \Delta_{22} = \pm m_{22} \end{array} \right. \} \quad (3.57)$$

где \mathbf{C} – обратная матрица \mathbf{K} ,

$$\mathbf{C} = \frac{1}{k_{11} \cdot k_{22} - k_{21} \cdot k_{12}} \begin{bmatrix} k_{22} & -k_{12} \\ -k_{21} & k_{11} \end{bmatrix}$$

$\varphi_1^{(max)}$ и $\varphi_2^{(max)}$ – максимально возможное значение ϕ_i при заданных ограничениях на Δ_{ik} , Δ_{ik} – отклонения параметров, m_{ik} – элементы матрицы \mathbf{M} , и максимальный радиус робастной сверхустойчивости (3.58)

$$\gamma_{max} = \frac{1}{\max(\varphi_1^{(max)}, \varphi_2^{(max)})}. \quad (3.58)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C} = \mathbf{K}^{-1} &= \frac{1}{12.8 \cdot (-19.4) - 6.6 \cdot (-18.9)} \begin{bmatrix} -19.4 & 18.9 \\ -6.6 & 12.8 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{123.58} \begin{bmatrix} -19.4 & 18.9 \\ -6.6 & 12.8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1570 & -0.1529 \\ 0.0534 & -0.1036 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

где \mathbf{C} - обратная матрица \mathbf{K} , $\varphi_1^{(max)}$ и $\varphi_2^{(max)}$ - максимально возможное значение ϕ_i при заданных ограничениях на Δ_{ik} , γ_{max} - максимальный радиус робастной сверхустойчивости.

Далее найдем (3.59), (3.60) и (3.61):

$$\begin{aligned} \varphi_1^{(max)} &= \omega \max\{|k_{11}|C_{12} + |k_{12}|C_{22}| - (-|k_{11}|C_{11} + |k_{12}|C_{21}), \\ &\quad | -|k_{11}|C_{12} + |k_{12}|C_{22}| - (-|k_{11}|C_{11} + |k_{12}|C_{21}), \\ &\quad | -|k_{11}|C_{12} - |k_{12}|C_{22}| - (-|k_{11}|C_{11} - |k_{12}|C_{21}), \\ &\quad ||k_{11}|C_{12} - |k_{12}|C_{22}| - (|k_{11}|C_{11} - |k_{12}|C_{21})\} = \\ &= \frac{\omega}{123.58} \max\{|12.8 \cdot (-18.9) + 18.9 \cdot (-12.8)| \\ &\quad - (12.8 \cdot 19.4 + 18.9 \cdot 6.6), | -12.8 \cdot (-18.9) + 18.9 \cdot (-12.8)| \\ &\quad - (-12.8 \cdot 19.4 + 18.9 \cdot 6.6), | -12.8 \cdot (-18.9) - 18.9 \cdot (-12.8)| \\ &\quad - (-12.8 \cdot 19.4 - 18.9 \cdot 6.6), |12.8 \cdot (-18.9) - 18.9 \cdot (-12.8)| \\ &\quad - (12.8 \cdot 19.4 - 18.9 \cdot 6.6) \\ &= \frac{\omega}{123.58} (12.8 \cdot 18.9 + 18.9 \cdot 12.8 + 12.8 \cdot 19.4 + 18.9 \cdot 6.6) \\ &= \frac{\omega}{123.58} (241.92 + 241.92 + 248.32 + 124.74) \\ &= \frac{\omega}{123.58} \cdot 856.9 \end{aligned} \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} \varphi_2^{(max)} &= \omega \max\{|k_{21}|C_{11} + |k_{22}|C_{21}| - (|k_{21}|C_{12} + |k_{22}|C_{22}), \\ &\quad | -|k_{21}|C_{11} + |k_{22}|C_{21}| - (-|k_{21}|C_{12} + |k_{22}|C_{22}), \\ &\quad | -|k_{21}|C_{11} - |k_{22}|C_{21}| - (-|k_{21}|C_{12} - |k_{22}|C_{22}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left| |k_{21}|C_{11} - |k_{22}|C_{21} \right| - (|k_{21}|C_{12} - |k_{22}|C_{22}) \\
&= \frac{\omega}{123.58} (6.6 \cdot 19.4 + 19.4 \cdot 6.6 + 6.6 \cdot 18.9 + 19.4 \cdot 12.8) \\
&= \frac{\omega}{123.58} \cdot 629.14 \tag{3.60}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\gamma_{max} &= \frac{1}{\max\{\varphi_1^{(max)}, \varphi_2^{(max)}\}} = \frac{1}{\varphi_1^{(max)}} = \frac{\omega}{123.58} \cdot 856.9 \\
\omega^{(max)} &= \frac{123.58}{856.9} = 0.144 \tag{3.61}
\end{aligned}$$

где $\varphi_1^{(max)}$ и $\varphi_2^{(max)}$ - максимально возможное значение φ_i при заданных ограничениях на Δ_{ik} , γ_{max} - максимальный радиус робастной сверхустойчивости, $\omega^{(max)}$ – максимальный размер зоны неопределенности.

Поскольку необходимые и достаточные условия совпадают с полученными выше достаточными, то следует сделать вывод, что для сохранения условий робастной сверхустойчивости зону неопределенности для статики расширить по отношению к 17 % нельзя.

Для объектов 3x3 данная методика немного отличается, так как аналитические формулы для объектов большей размерности вывести достаточно точными невозможно, и они будут получаться очень приближенными. В таком случае предлагается перебирать все возможные варианты определителей при различной зоне неопределенности, когда знаки определителей станут разными, значит, будет найдена максимально возможная зона статических коэффициентов [34]. Для этого можно воспользоваться приложением из раздела 1.5.

Примем зону неопределенности $\omega = 0.14$, что соответствуют диапазону изменения температур внизу колонны 353 – 367 °С, а вверху 123 – 137 °С. Пределы изменения параметров представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Пределы изменения параметров. (составлено автором)

	k_{11}	k_{12}	k_{21}	k_{22}	T_{11}	T_{12}	T_{21}	T_{22}	τ_{11}	τ_{12}	τ_{21}	τ_{22}
Верхняя	14.592	21.546	7.524	22.116	19.038	23.94	12.426	16.416	1.14	3.42	7.98	3.42
Нижняя	11.008	16.254	5.676	16.684	14.362	18.06	9.374	12.384	0.86	2.58	6.02	2.58

Рассчитаем по формуле (3.37) ПИ-регулятор, причем параметры β , α рассчитываются по формулам компенсационного метода [17, 42], а именно для ОУ (3.62):

$$H(p) = \frac{1 \cdot e^{-p\tau_{max}}}{T_{min}p + 1} \quad (3.62)$$

$$k_p = \frac{rT_{min}}{\tau_{max}}, \quad k_i = \frac{r}{\tau_{max}}$$

где $H(p)$ – передаточная функция объекта, p – оператор Лапласа, τ_{max} – максимальное запаздывание, T_{min} – минимальная постоянная времени, k_p – коэффициент усиления П-регулятора, k_i – коэффициент усиления И-регулятора, r – эталонный коэффициент.

Причем T_{min} и τ_{max} берутся с учётом зоны неопределенности (3.63) и (3.64):

$$T_{min} = \min\{T_{ij}\} = (1 - \omega) \min\{\widetilde{T}_{ij}\} = (1 - 0.14) \cdot 10.9 = 9.374 \quad (3.63)$$

$$\tau_{max} = \max\{\tau_{ij}\} = (1 + \omega) \max\{\widetilde{\tau}_{ij}\} = (1 + 0.14) \cdot 7 = 7.98 \quad (3.64)$$

$$r = 0.739 \text{ (ИКК)}$$

таким образом, получим (3.65):

$$\begin{aligned} W(p) &= \begin{bmatrix} 0.1570 & -0.1529 \\ 0.0534 & -0.1036 \end{bmatrix} 0.739 \left(\frac{9.374}{7.98} + \frac{1}{7.98p} \right) \\ &= \begin{bmatrix} 0.1570 & -0.1529 \\ 0.0534 & -0.1036 \end{bmatrix} x \left(0.8681 + \frac{0.0926}{p} \right) \\ &= \begin{bmatrix} 0.1363 & -0.1327 \\ 0.04636 & -0.0899 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0145 & -0.01416 \\ 0.00494 & -0.00959 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{p} \quad (3.65) \end{aligned}$$

где $W(p)$ – передаточная матрица регулятора, p – оператор Лапласа.

Используя приложение из раздела 1.5 или же программу, написанную в MatLab, проверили данный регулятор на всех точках зоны неопределенности. Проверка показала, что во всех точках зоны неопределенности имеется устойчивость. Худший переходных процессов можно наблюдать на рисунке 3.1, значение ИКК, которое соответствует этому процессу равняется 0.0953.

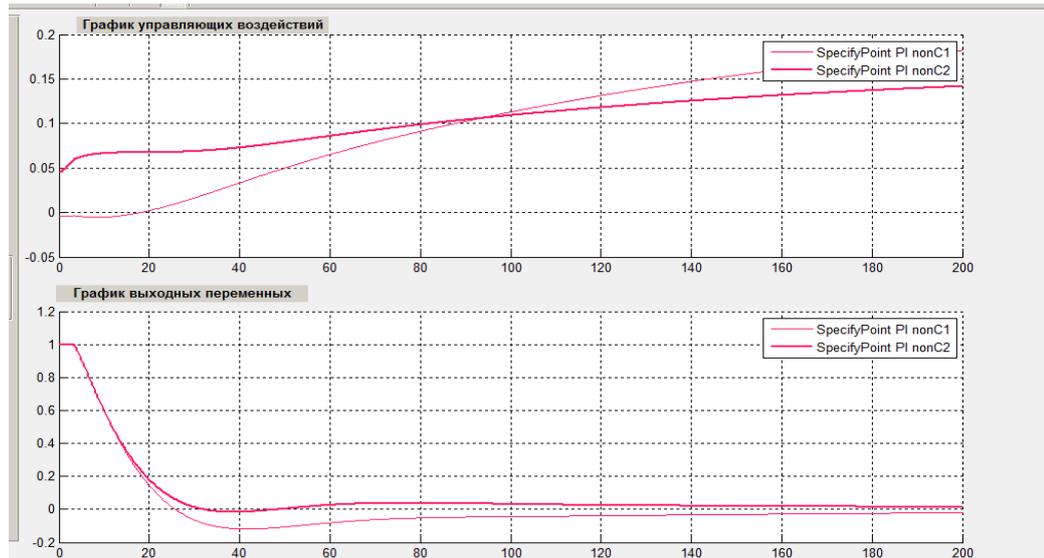


Рисунок 3.1 – Переходный процесс для худшей комбинации параметров модели объекта управления (составлено автором)

3.2 Комбинированные методы робастной настройки параметров регуляторов

Дальнейшее решение задачи (2.8) может быть получено путем декомпозиции решений трех более простых задач [39]. Для объектов с квадратной передаточной матрицей $\mathbf{H}(p)$ можно придерживаться идеологии комбинированного метода настройки регуляторов, когда передаточная матрица формируется как линейная комбинация регуляторов той же структуры (3.66) [41].

$$\mathbf{W}_{comb}(p) = \rho \mathbf{W}_{aut}(p) + (1 - \rho) \mathbf{W}_{car}(p) \quad (3.66)$$

где весовой коэффициент $\rho \in [0,1]$ – настраиваемый параметр, \mathbf{W}_{aut} – автономный регулятор настраивается для объекта $\mathbf{H}_1(p)$, полученного из исходного объекта отбрасыванием перекрестных связей, то есть $\mathbf{H}_1(p) = \text{diag}\{h_{11}(p), h_{22}(p), \dots, h_{nn}(p)\}$, \mathbf{W}_{car} – вспомогательный регулятор имеет ту же матрицу статических коэффициентов усиления, что исходный, но у него одна и та же динамика по всем каналам управления $\mathbf{H}_2(p) = \mathbf{H}(0) \cdot h^{(2)}(p)$. Как уже говорилось в самом начале работы, считаем, что динамика по всем каналам управления описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями с запаздыванием.

Теперь подробнее разберем три задачи по отдельности.

Расчет «автономного» регулятора. Сначала рассчитывается автономный регулятор (децентрализованный), который не учитывает перекрестные связи (3.67):

$$\mathbf{W}_{aut}(p) = \text{diag} \{W_{11}^{(1)}(p), W_{22}^{(1)}(p), \dots, W_{nn}^{(1)}(p)\}, \quad (3.67)$$

где \mathbf{W}_{aut} – автономный регулятор, $W_{Pii}^{(1)}$, $W_{Iii}^{(1)}$ и $W_{Dii}^{(1)}$ – элементы матрицы \mathbf{W}_{aut} , p – оператор Лапласа.

Каждый элемент этой диагональной матрицы имеет вид (3.68):

$$W_{ii}^{(1)}(p) = W_{Pii}^{(1)} + W_{Iii}^{(1)} \frac{1}{p} + W_{Dii}^{(1)} p, \quad (3.68)$$

где $W_{Pii}^{(1)}$, $W_{Iii}^{(1)}$ и $W_{Dii}^{(1)}$ – элементы матрицы \mathbf{W}_{aut} , p – оператор Лапласа.

Параметры определяются из условия стабилизации объекта (3.69)

$$h_{ii}(p) = \tilde{h}_{ii}(p)e^{-p\tau_{ii}} \quad (3.69)$$

где $h_{ii}(p)$ – правильная дробно-рациональная функция.

Для расчёта регуляторов можно использовать методы компенсации или ИМС. В распространённом случае, когда динамика объекта по каналам управления описывается инерционными звеньями первого порядка, параметры рассчитываются по формулам, например, применительно к ПИ-регулятору приходим к передаточной матрице вида (3.70):

$$\mathbf{W}_{aut}(p) = \text{diag}\{\beta_{ii} + \alpha_{ii}/p\}, \beta_{ii} = \frac{rT_{ji}}{k_{ii}\bar{\tau}_{ii}}, \alpha_{ii} = \frac{r}{k_{ii}\bar{\tau}_{ii}}, i = \overline{1, l}, \quad (3.70)$$

где коэффициент r зависит от критерия качества управления. В случае интегрального квадратичного критерия $r = 0.739$.

Расчет «вспомогательного» регулятора. На этом шаге регулятор, который необходимо рассчитать учитывает глобальную динамику системы (3.71):

$$\mathbf{W}_{car}(p) = \{W_{ij}^{(2)}(p)\} = \mathbf{H}(0)^{-1}(W_P^{(2)} + W_I^{(2)} \frac{1}{p} + W_D^{(2)} p) \quad (3.71)$$

где \mathbf{W}_{car} – вспомогательный регулятор, $W_{Pii}^{(2)}$, $W_{Iii}^{(2)}$ и $W_{Dii}^{(2)}$ – элементы матрицы \mathbf{W}_{car} , p – оператор Лапласа.

Процесс настройки начинается с предварительного определения коэффициентов α, β, γ из формул (3.37) и (3.38). Можно применить формулы компенсационного метода [17, 42] к объекту (3.72):

$$h^{(2)}(p) = \tilde{h}^{(2)}(p)e^{-p\tau^{(2)}}, \quad (3.72)$$

где $\tau = \max \bar{\tau}_{ij}$, а динамика определяется по наименьшему переходному процессу $T = \min\{T_{ij}\}, i, j = \overline{1, l}$.

Формирование динамических характеристик вспомогательного объекта по этим правилам способствует робастности управления, так как объекты с большим запаздыванием требуют «осторожных» настроек регулятора, то есть он будет реагировать на изменения в системе или на возмущения медленно. Для $h^{(2)}(p)$ сформируем «вспомогательный» типовой регулятор. Например, в наиболее распространенном варианте ПИ-регулятора в соответствии с [45] получим (3.73):

$$W_{car}(p) = (\beta + \alpha/p)\tilde{K}^{-1}, \quad \beta = \frac{rT}{\tau}, \quad \alpha = \frac{r}{\tau}, \quad (3.73)$$

где коэффициент r зависит от критерия качества управления. В случае интегрального квадратичного критерия $r = 0.739$, W_{car} – вспомогательный регулятор, p – оператор Лапласа, β – пропорциональная составляющая, α – интегральная составляющая

Расчет комбинированного регулятора [13]. Каждый из регуляторов, который мы получаем в ходе декомпозиции, имеет свои недостатки. Например, автономный регулятор приводит к потере устойчивости, а вспомогательный затягивает переходные процессы. Воспользуемся формулой (3.66) и определим весовой коэффициент ρ путем решения задачи (2.8). В качестве отправной точки данный весовой коэффициент может быть вычислен с использованием матрицы Бристоля [45] (3.74).

$$\lambda = [\lambda_{ij}], \text{ где } \lambda_{ij} = [\mathbf{H}(0)]_{ij} [(\mathbf{H}(0)^T)^{-1}]_{ij} \quad (3.74)$$

Степень диагональной доминантности этой матрицы определяет влияние перекрестных связей. На основе этого можно принять (3.75):

$$\rho = \|\lambda_{diag}\| / \|\lambda\|, \quad (3.75)$$

где $\lambda_{diag} = diag\{\lambda_{11}, \dots, \lambda_{nn}\}$, $\|\lambda_{diag}\| = \sum_{i=1}^n |\lambda_{ii}|$, $\|\lambda\| = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\lambda_{ij}|$.

Работаем с 4 объектами 2x2 и 2 объектами 3x3, взятых из [76]. Эти объекты представлены в таблице 3.2 и таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Объекты 2x2 [76]

	TS (Tyreus Stabilizer)	WB (Wood and Berry)	VL (Vinante and Luyben)	WW (Wardle and Wood)
h_{11}	$\frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(4p+1)^3}$	$\frac{12.8e^{-p}}{16.7p+1}$	$\frac{-2.2e^{-p}}{7p+1}$	$\frac{0.126e^{-6p}}{60p+1}$
h_{12}	$\frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2}$	$\frac{-18.9e^{-3p}}{21p+1}$	$\frac{1.3e^{-0.3p}}{7p+1}$	$\frac{-0.101e^{-12p}}{(48p+1)(45p+1)}$
h_{21}	$\frac{-0.0887e^{-12.6p}}{(43p+1)(22p+1)}$	$\frac{6.6e^{-7p}}{10.9p+1}$	$\frac{-2.8e^{-1.8p}}{9.5p+1}$	$\frac{0.094e^{-8p}}{38p+1}$
h_{22}	$\frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)}$	$\frac{-19.4e^{-3p}}{14.4p+1}$	$\frac{4.3e^{-0.35p}}{9.2p+1}$	$\frac{-0.12e^{-8p}}{35p+1}$

Таблица 3.3 – Объекты 3x3 [76]

	OR (Ogunnaike and Ray)	SM
h_{11}	$\frac{0.66e^{-2.6p}}{6.7p+1}$	$\frac{103.5e^{-15p}}{20p+1}$
h_{12}	$\frac{-0.61e^{-3.5p}}{8.64p+1}$	$\frac{75.44e^{-20p}}{20p+1}$
h_{13}	$\frac{-0.0049e^{-p}}{9.06p+1}$	$\frac{71.28e^{-25p}}{20p+1}$
h_{21}	$\frac{1.11e^{-6.5p}}{3.25p+1}$	$\frac{115.2e^{-15p}}{20p+1}$
h_{22}	$\frac{-2.36e^{-3p}}{5p+1}$	$\frac{121.3e^{-20p}}{20p+1}$
h_{23}	$\frac{-0.01e^{-1.2p}}{7.09p+1}$	$\frac{108.4e^{-25p}}{20p+1}$
h_{31}	$\frac{-34.68e^{-9.2p}}{8.15p+1}$	$\frac{-174.8e^{-15p}}{20p+1}$
h_{32}	$\frac{46.2e^{-9.4p}}{10.9p+1}$	$\frac{-147.3e^{-20p}}{20p+1}$
h_{33}	$\frac{0.87(11.61p+1)e^{-p}}{(3.89p+1)(18.8p+1)}$	$\frac{185.6e^{-25p}}{20p+1}$

Пример 3.2. В качестве примера возьмем тот же объект, который использовали в разделе 3.1. В таблице 3.2 он находится во втором столбце и имеет название WB, что также соответствует колонке К-2 на рисунке 1.3.

$$H(p) = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-p}}{16.7p+1} & \frac{-18.9e^{-3p}}{21.0p+1} \\ \frac{6.6e^{-7p}}{10.9p+1} & \frac{-19.4e^{-3p}}{14.4p+1} \end{bmatrix}$$

Приступим к расчету комбинированного регулятора (3.66). Параметр ρ будет найден при помощи поиска (перебором от 0 до 1). Примем зону неопределенности такую же, как и в разделе 3.1, ранее мы рассчитали, что зона неопределенности для статических коэффициентов не должна превышать 17 %. В нашем случае приняли ее равной $\omega = 0.14$ для всех параметров. Регулятор (3.37) рассчитывается по формулам компенсационного метода [17, 42]. Найдем $W_{car}(p)$, используя формулы (3.62):

$$H(p) = \frac{1 \cdot e^{-p\tau_{max}}}{T_{min}p + 1}$$

$$K_p = \frac{rT_{min}}{\tau_{max}}, \quad K_i = \frac{r}{\tau_{max}}$$

Причем T_{min} и τ_{max} берутся с учётом зоны неопределенности, то есть

$$T_{min} = \min\{T_{ij}\} = (1 - \omega) \min\{\widetilde{T}_{ij}\} = (1 - 0.14) \cdot 10.9 = 9.374$$

$$\tau_{max} = \max\{\tau_{ij}\} = (1 + \omega) \max\{\widetilde{\tau}_{ij}\} = (1 + 0.14) \cdot 7 = 7.98$$

$$r = 0.739 \text{ (ИКК)}$$

Таким образом, получим (3.76)

$$\begin{aligned} W_{car}(p) &= \begin{bmatrix} 0.1570 & -0.1529 \\ 0.0534 & -0.1036 \end{bmatrix} 0.739 = \begin{bmatrix} 0.1570 & -0.1529 \\ 0.0534 & -0.1036 \end{bmatrix} x \left(0.8681 + \frac{0.0926}{p} \right) \\ &= \begin{bmatrix} 0.1363 & -0.1327 \\ 0.04636 & -0.0899 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0145 & -0.01416 \\ 0.00494 & -0.00959 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{p} \end{aligned} \quad (3.76)$$

Теперь приступим к расчету $W_{aut}(p)$

$$H(p) = \frac{K_{max} \cdot e^{-p\tau_{max}}}{T_{min}p + 1}$$

$$K_p = \frac{rT_{min}}{K_{max}\tau_{max}}, \quad K_i = \frac{r}{K_{max}\tau_{max}}, \quad r = 0.739$$

В нашем случае с учетом зоны неопределенности получим (3.77) и (3.78):

$$\begin{aligned} H_{aut}(p) &= \begin{bmatrix} \frac{(1+0.14) \cdot 12.8e^{-p(1+0.14)}}{(1-0.14)10.9p+1} & 0 \\ 0 & -\frac{(1+0.14) \cdot 19.4e^{-p(1+0.14) \cdot 3}}{(1-0.14) \cdot 14.4p+1} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \frac{14.592e^{-1.14p}}{9.374p+1} & 0 \\ 0 & -\frac{22.116e^{-3.42p}}{12.384p+1} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.77)$$

где $H_{aut}(p)$ – передаточная матрица «вспомогательного» ОУ, p – оператор Лапласа.

$$\begin{aligned} W_{aut}(p) &= \begin{bmatrix} \frac{0.739 \cdot 9.374}{14.592 \cdot 1.14} & 0 \\ 0 & -\frac{0.739 \cdot 12.384}{22.116 \cdot 3.42} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{0.739}{14.592 \cdot 1.14} & 0 \\ 0 & -\frac{0.739}{22.116 \cdot 3.42} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{p} \\ &= \begin{bmatrix} 0.4162 & 0 \\ 0 & -0.1210 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0444 & 0 \\ 0 & -0.00977 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{p} \end{aligned} \quad (3.78)$$

Для реализации перебора ρ была построена модель в Simulink (Приложение И, рисунок И.2) и использована программа, которая была написана в MatLab. Также можно воспользоваться этой программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5. Необходимо найти оптимальный робастный регулятор, предполагая, что параметры ОУ k , T и τ могут принимать крайние значения зоны неопределенности. Для этого необходимо перебирать значения ρ от 0 до 1. Далее на каждом шаге рассчитываются новые параметры ПИ-регулятора и перебираются все возможные значения параметров k , T , и τ (4096). Затем для всех 4096 значений находится ИКК и среди них выбирается максимальное. В конце среди всех максимальных ИКК выбирается минимальное (минимаксная задача). Зона неопределенности для всех параметров $\omega = 0.14$. Границы параметров представлены в таблице 3.1. Шаг дискретизации 0.01. Время моделирования $T_{mod} = 200$.

Результаты расчетов представлены в таблице 3.4. Графики переходных процессов представлены в Приложении Е на рисунках Е.1 – Е.7.

Таблица 3.4 – Результаты перебора ρ (составлено автором)

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0.32	$\begin{bmatrix} 11.008e^{-1.14p} & -21.546e^{-3.42p} \\ 19.038p + 1 & 18.06p + 1 \\ 7.542e^{-7.98p} & -16.684e^{-3.42p} \\ 9.374p + 1 & 16.416p + 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.2259 & -0.0902 \\ 0.0315 & -0.0999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.02407 & -0.00963 \\ 0.00336 & -0.00965 \end{bmatrix}$	0.06873
0.42	$\begin{bmatrix} 11.008e^{-1.14p} & -21.546e^{-3.42p} \\ 19.038p + 1 & 18.06p + 1 \\ 7.542e^{-7.98p} & -16.684e^{-3.42p} \\ 9.374p + 1 & 16.416p + 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.2539 & -0.0769 \\ 0.0269 & -0.1029 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.02706 & -0.00821 \\ 0.00287 & -0.00967 \end{bmatrix}$	0.06868
0.52	$\begin{bmatrix} 11.008e^{-1.14p} & -21.546e^{-3.42p} \\ 19.038p + 1 & 18.06p + 1 \\ 7.542e^{-7.98p} & -16.684e^{-3.42p} \\ 9.374p + 1 & 16.416p + 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.2218 & -0.0637 \\ 0.0222 & -0.1061 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.03005 & -0.0068 \\ 0.00237 & -0.00968 \end{bmatrix}$	0.07095
0.62	$\begin{bmatrix} 11.008e^{-1.14p} & -21.546e^{-3.42p} \\ 19.038p + 1 & 18.06p + 1 \\ 7.542e^{-7.98p} & -22.116e^{-3.42p} \\ 9.374p + 1 & 12.384p + 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.3098 & -0.0504 \\ 0.0176 & -0.1092 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.03304 & -0.00538 \\ 0.00188 & -0.0097 \end{bmatrix}$	0.07612
0.72	$\begin{bmatrix} 11.008e^{-1.14p} & -21.546e^{-3.42p} \\ 19.038p + 1 & 18.06p + 1 \\ 7.542e^{-7.98p} & -22.116e^{-3.42p} \\ 9.374p + 1 & 12.384p + 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.3378 & -0.0372 \\ 0.013 & -0.1123 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.03603 & -0.00396 \\ 0.00138 & -0.00972 \end{bmatrix}$	0.09230
0.82	$\begin{bmatrix} 11.008e^{-1.14p} & -21.546e^{-3.42p} \\ 19.038p + 1 & 18.06p + 1 \\ 7.542e^{-7.98p} & -22.116e^{-3.42p} \\ 9.374p + 1 & 12.384p + 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.3658 & -0.0239 \\ 0.0083 & -0.1154 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.03902 & -0.00255 \\ 0.00089 & -0.00974 \end{bmatrix}$	0.12253
0.92	$\begin{bmatrix} 11.008e^{-1.14p} & -21.546e^{-3.42p} \\ 19.038p + 1 & 18.06p + 1 \\ 7.542e^{-7.98p} & -22.116e^{-3.42p} \\ 9.374p + 1 & 12.384p + 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.3938 & -0.0106 \\ 0.0037 & -0.1185 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.04201 & -0.00113 \\ 0.0004 & -0.00976 \end{bmatrix}$	0.19143

В результате получаем, что оптимальный робастный регулятор получается при $\rho = 0.42$. Посмотрим на переходный процесс при робастном регуляторе на рисунке 3.2.

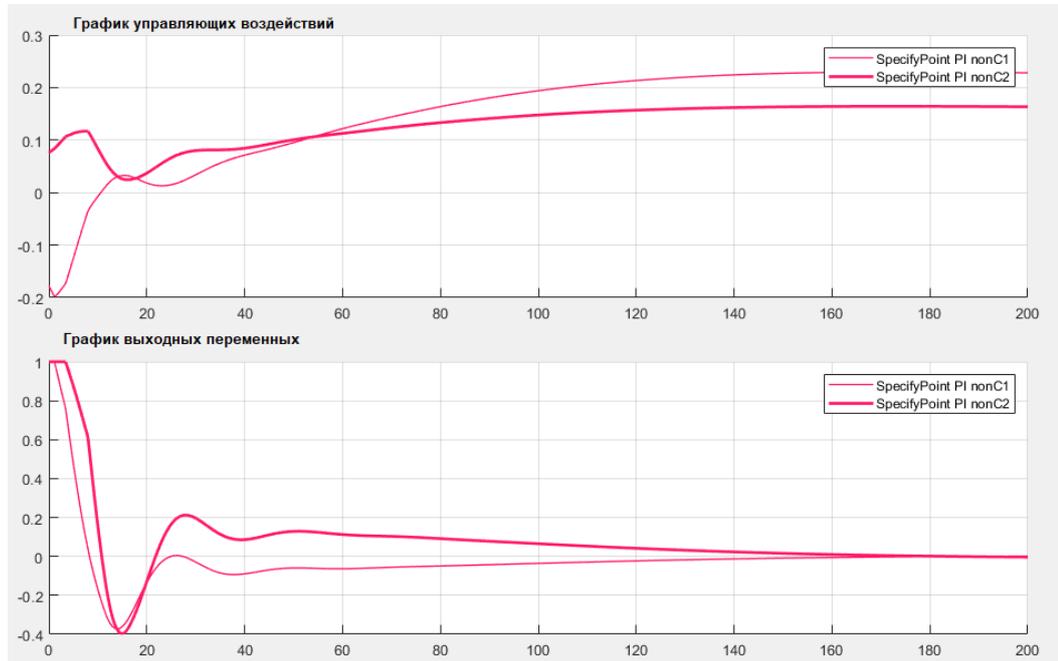


Рисунок 3.2 – Переходный процесс при $\rho = 0.42$ и $T_{mod} = 200$
(составлено автором)

Так как мы решали минимаксную задачу, то можно сказать, что данный регулятор обеспечивает устойчивое поведение объекта при всех возможных вариантах зоны неопределенности, а значит, мы можем назвать данный регулятор робастным.

Результаты применения данной методики на объектах 3x3 из таблицы 3.3 продемонстрированы в Приложении Е.

3.3 Метод максимальной чувствительности

Описанные в начале главы 3 и в разделе 3.1 условия применимы для предложенных методов в разделе 3.1 и 3.2. Если данные условия будут нарушены, то нет гарантии, что будет найден робастный регулятор этими методами, а значит, нет гарантии устойчивости системы. Но что, если зона неопределенности параметров со временем станет больше, например, из-за того, что сырье станет еще более худшего качества. В таком случае предлагается использовать метод максимальной чувствительности. Ранее указывался метод максимальной

чувствительности в разделе 2.3, где он был применен для SiSo объектов. Так как он хорошо показал себя с такими объектами, его можно использовать для MiMo объектов. Применим этот метод для того же объекта ректификационной колонны из таблицы 3.2 столбец WB, что соответствует колонне К-2 на рисунке 1.3:

$$H(p) = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-p}}{16.7p+1} & \frac{-18.9e^{-3p}}{21.0p+1} \\ \frac{6.6e^{-7p}}{10.9p+1} & \frac{-19.4e^{-3p}}{14.4p+1} \end{bmatrix}$$

В состав объекта управления входят 4 одномерных ПИ-звена. В роли показателя качества управления выступает интегральный квадратичный критерий (ИКК). Для автоматического расчета можно воспользоваться приложением, о котором говорилось в разделе 1.5. Графики переходных процессов строили при помощи программного комплекса «MIMO-Master» [33].

Для данного объекта найдем параметры регулятора. Параметры регулятора приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Параметры регулятора (составлено автором)

Возмущение	ИКК	Время регулирования, с	k_p	k_i	Время расчета, с
[0.6 0.8]	0.0461	23.6	$\begin{bmatrix} 0,536 & -0,0175 \\ 0,0184 & -0,127 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,0338 & -0,00161 \\ 0,00169 & -0,00962 \end{bmatrix}$	385

С видом переходного процесса можно ознакомиться на рисунке 3.3.

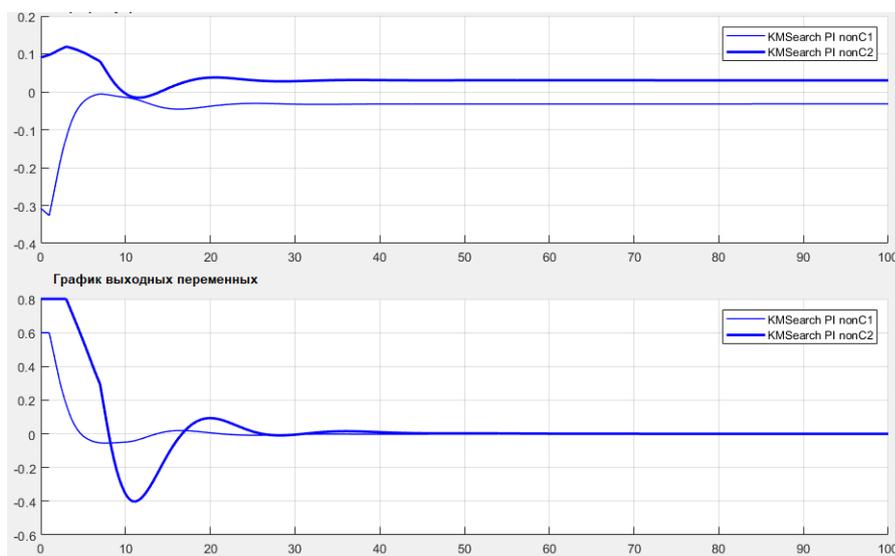


Рисунок 3.3 – Переходный процесс при регуляторе найденным на центр зоны неопределенности (номинальный) (составлено автором)

Рассчитаем верхнюю и нижнюю границы для ОУ в пределах большой зоны неопределенности $\delta = 40\%$, что соответствует диапазону изменения температуры вверху колонны 110 - 150°C, внизу колонны 340 - 380°C. Пределы изменения параметров приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Пределы изменения параметров (составлено автором)

	k_{11}	k_{12}	k_{21}	k_{22}	T_{11}	T_{12}	T_{21}	T_{22}	τ_{11}	τ_{12}	τ_{21}	τ_{22}
Верхний	17.8	-3.8	9.2	-11.7	23.4	29.4	15.3	20.2	1.4	4.2	9.8	4.2
Средний	12.8	-6.3	6.6	-19.4	16.7	21	10.9	14.4	1	3	7	3
Нижний	7.8	-8.8	4	-27.1	10	12.6	6.5	8.6	0.6	1.8	4.2	1.8

Используя данные из таблицы 3.2, начнем расчет чувствительности объекта управления к отклонениям по каждому параметру динамической модели по отдельности, то есть примем, что изменяться будет только один параметр, остальные значения будут находиться на номинальном уровне.

Со всеми результатами исследования можно ознакомиться в Приложении Д. В таблице Д.1 представлены результаты расчета. Также после таблиц с расчетами можно изучить вид переходных процессов по графикам на рисунках Д.1-Д.24. На каждом рисунке представлены кривые, соответствующие переходным процессам по двум выходным переменным.

По полученным результатам составлена таблица 3.7 с самыми чувствительными точками в порядке уменьшения чувствительности.

Таблица 3.7 – Граничные значения параметров модели ОУ, соответствующие наибольшей чувствительности (составлено автором)

Параметр	τ_{22}	k_{11}	T_{21}	k_{21}	T_{11}	k_{22}	τ_{21}	τ_{11}	T_{22}	τ_{12}	k_{12}	T_{12}
Предельные значения	$\bar{\tau}_{22}$	\underline{k}_{11}	\underline{T}_{21}	\bar{k}_{21}	\bar{T}_{11}	\underline{k}_{22}	$\bar{\tau}_{21}$	$\bar{\tau}_{11}$	\underline{T}_{22}	$\bar{\tau}_{12}$	\underline{k}_{12}	\underline{T}_{12}
$\delta, \%$	28.2	17.57	15.83	13.4	11.7	9.97	6.94	6.29	3.68	1.51	0.65	0.65

В качестве «кандидата» в наиболее чувствительные точки пространства возможных значений параметров может рассматриваться вторая строка таблицы 3.7. В результате получаем «кандидата» (таблица 3.8)

Таблица 3.8 – «Кандидат» в наиболее чувствительную точку (составлено автором)

Параметр	k_{11}	k_{12}	k_{21}	k_{22}	T_{11}	T_{12}	T_{21}	T_{22}	τ_{11}	τ_{12}	τ_{21}	τ_{22}
Кандидат в наиболее чувствительные точки	\underline{k}_{11}	\underline{k}_{12}	\bar{k}_{21}	\underline{k}_{22}	\bar{T}_{11}	\underline{T}_{12}	\underline{T}_{21}	\underline{T}_{22}	$\bar{\tau}_{11}$	$\bar{\tau}_{12}$	$\bar{\tau}_{21}$	$\bar{\tau}_{22}$
	7.8	-8.8	9.1	-27.1	23.4	12.6	6.5	8.6	1.4	4.2	9.8	4.2

Проверим устойчивость полученного объекта управления с параметрами регулятора, полученными для среднего значения. Переходный процесс показан на рисунке 3.4.

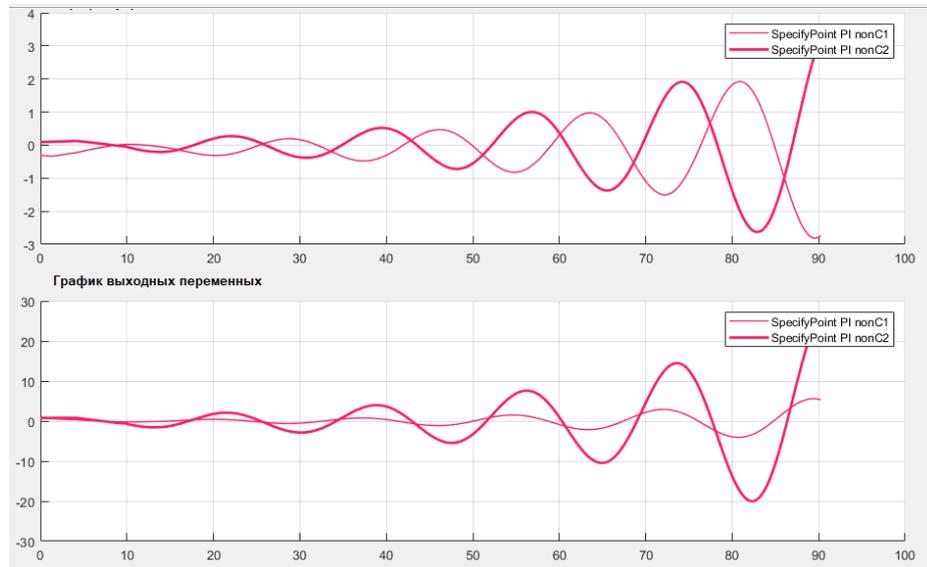


Рисунок 3.4 – Переходный процесс при регуляторе, рассчитанном на средние значения параметров модели ОУ (составлено автором)

Теперь для полученного по данным таблицы 3.8 объекта управления найдем параметры регулятора. Параметры полученного регулятора приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Параметры регулятора (составлено автором)

Возмущение	ИКК	Время регулирования, с	k_p	k_i	Время расчета, с
[0.6 0.8]	0.0522	72	$\begin{bmatrix} 0.161 & -0,0317 \\ 0,0332 & -0,0304 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,0177 & -0,00488 \\ 0,00511 & -0,00459 \end{bmatrix}$	394

С видом переходного процесса также можно ознакомиться на рисунке 3.5. По рисунку 3.5 видно, что процесс устойчивый. Приступим к проверке на робастность настроек многомерного ПИ-регулятора. Для расчетов использовались модель, построенная в Simulink (Приложение И, рисунок И.2), и программа для расчета ИКК, которая была написана в MatLab. Также можно воспользоваться этой программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5.

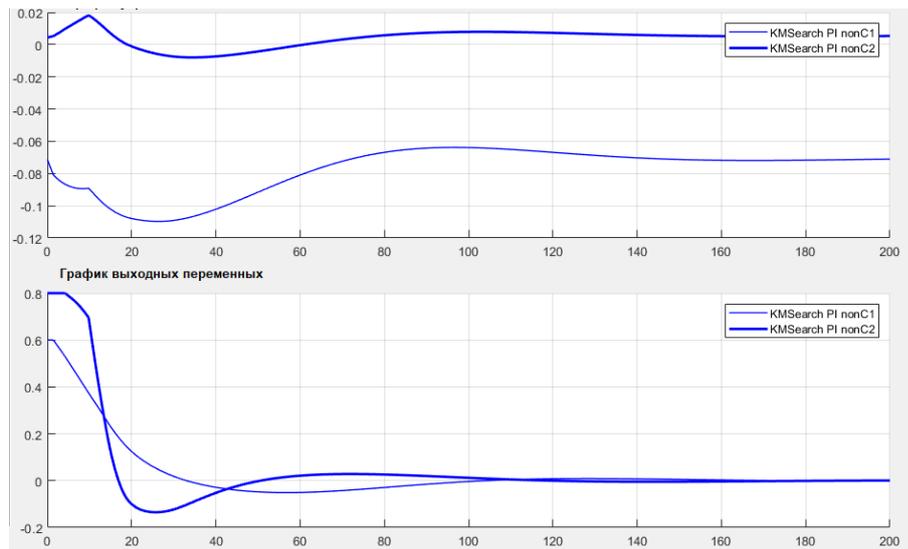


Рисунок 3.5 – Переходный процесс для самой чувствительной точки
(составлено автором)

Рассчитаем $2^{12} = 4096$ точек зоны неопределенности при одинаковых знаках возмущений $[0.6 \quad 0.8]$ и $T_{mod} = 200$. Чтобы отсеять заведомо неприемлемые варианты, был установлен порог ИКК. Он равен ИКК (то значение, которое мы получили) $\cdot 10$, то есть в нашем случае ИКК = $0.0552 \cdot 10 = 0.552$.

В результате расчета количество точек, где было превышено пороговое значение, равно нулю, и среднее значение ИКК - 0.0530. По результатам расчета можно сделать вывод, что найденный регулятор может называться робастным, так как он обеспечивает устойчивость переходного процесса во всех 4096 точках зоны неопределённости.

3.4 Сравнительный анализ методов робастной настройки параметров регуляторов

В данном разделе на конкретных примерах робастные настройки ПИ-регулятора, полученные при имитационном моделировании поисковым путем, сравниваются с номинальными настройкам, полученными для управления объекта при номинальных показателях зоны неопределенности. Сравнение проводилось по ИКК. Получение номинальных настроек будет рассмотрено на примере объекта WB с зоной, полученной в разделе 3.1. Для остальных объектов из таблицы 3.2 и таблицы 3.3 будет показан окончательных результат. После этого проведем сравнение беспоискового робастного ПИ-регулятора, поискового робастного ПИ-

регулятора с номинальным регулятором (ПИ-регулятор, рассчитанный по компенсационному методу) и классическим ПИ-регулятором (стандартный ПИ-регулятор, который был получен при помощи MatLab). Сравнение будем проводить на исходном ОУ WB, а также на ОУ с увеличенным запаздыванием.

Так как в разделе 3.2 получен робастный регулятор, необходимо выполнить проверку для оценки его необходимости. Возможно, может подойти регулятор, который был рассчитан для номинального ОУ. Для расчета использовался тот же комбинированный метод, что и для робастного регулятора (3.37). Воспользовавшись приложением из раздела 1.5, получили номинальный регулятор вида (3.78):

$$\mathbf{W}_{nom}(p) = \begin{bmatrix} 0.4314 & -0.1197 \\ 0.0418 & -0.1396 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0297 & -0.0110 \\ 0.0038 & -0.0115 \end{bmatrix} \frac{1}{p} \quad (3.78)$$

где $\mathbf{W}_{nom}(p)$ – передаточная матрица номинального регулятора, p – оператор Лапласа.

Применим полученный регулятор ко всем (4096) точкам зоны неопределенности. Для этого была построена модель в Simulink. Для расчетов использовались модель, построенная в Simulink (Приложение И, рисунок И.2) и программа для расчета ИКК, которая была написана в MatLab. Также можно воспользоваться этой программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5. Получаем «наиболее трудный» и соответствующие ему значение ИКК = 0.0771. Посмотрим на переходный процесс и на переходный процесс этого же ОУ при робастном комбинированном регуляторе на рисунке 3.6. Видно, что хотя система остается устойчивой при номинальном регуляторе, но переходный процесс сильно колебательный, а значит, использовать такой регулятор на практике не приемлемо. В отличие от робастного, как мы видим, получается устойчивый не колебательный процесс, который соответствует инженерным требованиям.

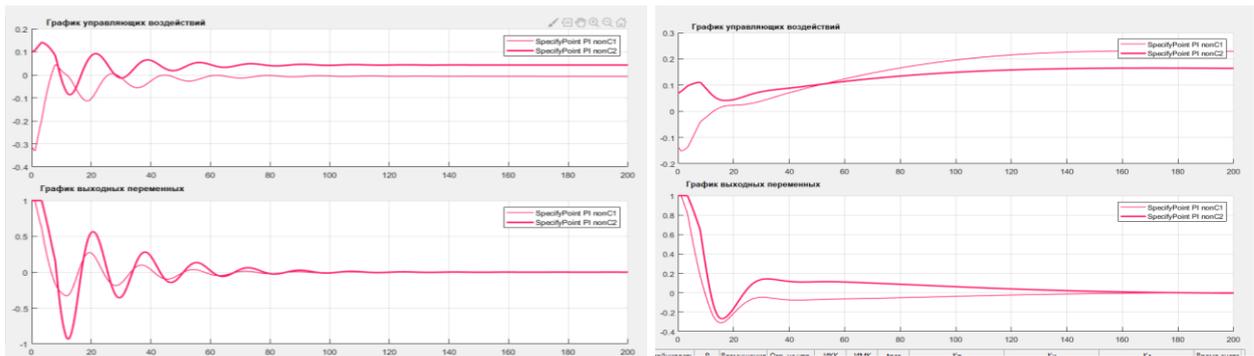


Рисунок 3.6 – Переходный процесс «наиболее трудный» ОУ (слева при номинальном комбинированном регуляторе, справа при робастном комбинированном) (составлено автором)

Результаты сравнения остальных объектов из таблицы 3.2 и таблицы 3.3 представлены в таблице 3.10 и таблице 3.11. Ознакомиться более подробно с расчетами можно в Приложении Е в таблицах перебора ρ и на графиках переходных процессов.

Таблица 3.10 – Сравнение регуляторов для объектов 2x2 (составлено автором)

№	Объект	Зона неопределенности для большинства параметров, %	Зона неопределенности для определенных параметров, %	ИКК _{роб} при наиболее трудном ОУ	ИКК _{ном} при наиболее трудном ОУ	Разница, %
1	WW	11	-	0.1839	0.1908	4
2	WW	11	$T_{22}, \tau_{12} - 90$	0.1144	50.0000	>100
3	VL	15	-	0.0115	20.0306	>100
4	VL	-	$k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22} - 15$	0.0086	0.0094	9
5	VL	-	$\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{21}, \tau_{22} - 90$	0.0117	50.0000	>100
6	TS	11	$T_{11}, \tau_{21} - 90$	0.1012	50.0000	>100
7	WB	14	$\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{21}, \tau_{22} - 90$	0.2639	50.0000	>100
8	WB	14	-	0.0684	0.0771	13

Для объектов размерностью 3x3 изменяли зону неопределенности только для запаздывания, так как запаздывание очень сильно влияет на устойчивость ОУ, а также для того, чтобы сократить вычисления, например, для объекта 2x2, когда каждый из его параметров может находиться на границе зоны неопределенности есть $2^{12} = 4096$ комбинаций. Для объекта 3x3 уже $2^{27} = 134\,217\,728$ комбинаций. Для перебора такого количества комбинаций необходимо очень мощные

вычислительные ресурсы, поэтому мы ограничились лишь запаздыванием. Модель Simulink для объекта 3x3 представлена в Приложении 3 на рисунке 3.3.

Таблица 3.11 – Сравнение регуляторов для объектов 3x3 (составлено автором)

№	Объект	Зона неопределенности для большинства параметров, %	Зона неопределенности для определенных параметров, %	ИКК _{rob} при наиболее трудном ОУ	ИКК _{nom} при наиболее трудном ОУ	Разница, %
1	SM	0	$\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{21},$ $\tau_{22}, \tau_{23}, \tau_{31}, \tau_{32}, \tau_{33}$ – 10	0.1429	0.2282	60
2	OR	0	$\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{21},$ $\tau_{22}, \tau_{23}, \tau_{31}, \tau_{32}, \tau_{33}$ – 20	35.1393	42.6187	21

Как видно из таблиц 3.10 и 3.11, во многих случаях робастный регулятор является лучшим и, самое главное, обеспечивает устойчивость во всех точках зоны неопределенности.

Теперь сравним робастный ПИ-регулятор по беспойсковому способу и поисковому (комбинированный) с классическим ПИ-регулятором (регулятор получен при помощи стандартных средств ПО MatLab) и номинальным ПИ-регулятором (регулятор рассчитанные по компенсационному методу [64]) на исходном объекте управления и на объекте управления с увеличенным запаздыванием из примера 3.1. На рисунке 3.7 показаны итоговые переходные процессы. На исходном ОУ оба метода проигрывают по ИКК. Поисковый метод по ИКК уступает 25 %, беспойковые - более 100 %. По времени регулирования поисковый метод лучше классического на 26 %, в каждом канале управления в 2 раза. В таком случае и поисковый, и беспойковый методы превосходят два метода по ИКК в 2 раза, по времени регулирования в 3 раза. Стоит отметить, что в данном случае по времени регулирования беспойковый выигрывает у поискового метода, но поисковый способ демонстрирует лучшие результаты на трудных комбинациях значений в пределах рассчитанной зоны неопределенности.

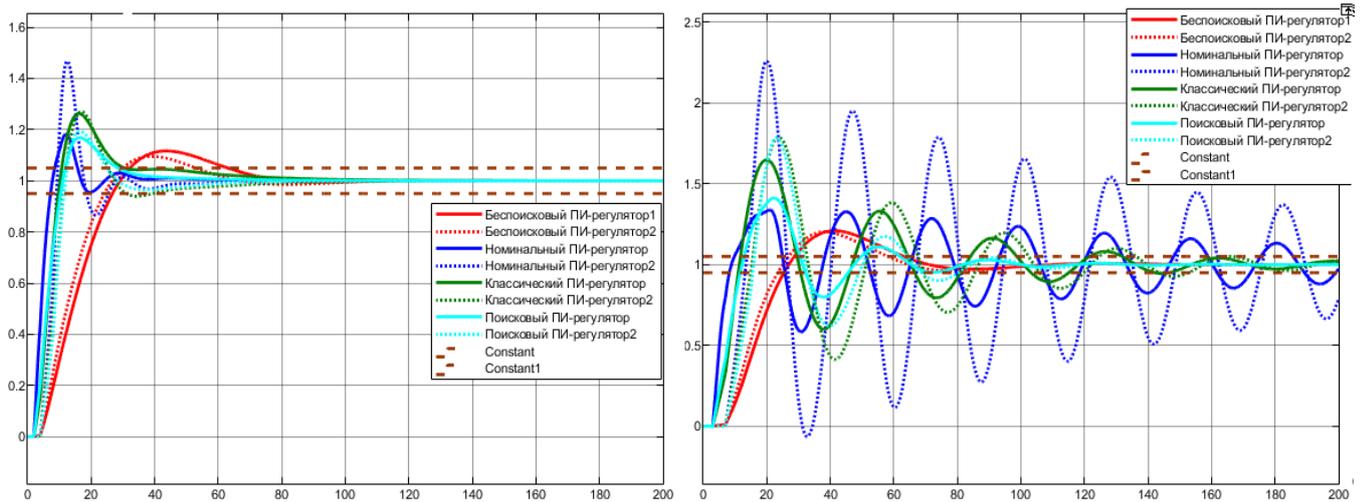


Рисунок 3.7 - Переходные характеристики на исходном ОУ (слева), переходные характеристики на ОУ с увеличенным запаздыванием (справа)
(составлено автором)

Результаты были сведены в таблицы 3.12 и 3.13.

Таблица 3.12 – Показатели качества управления на исходном ОУ (составлено автором)

Метод	ИКК	Время регулирования
Беспоисковый	0.09	62
Поисковый	0.05	28
Компенсационный	0.04	25
Классический (MatLab)	0.04	34

Таблица 3.13 – Показатели качества управления на ОУ с увеличенным запаздыванием (составлено автором)

Метод	ИКК	Время регулирования
Беспоисковый	0.13	62
Поисковый	0.11	79
Компенсационный	0.32	455
Классический (MatLab)	0.21	199

Регулятор, рассчитанный по методу максимальной чувствительности в разделе 3.3, подвергнем такой проверке на примере 3.1. На рисунке 3.8 показаны итоговые переходные процессы.

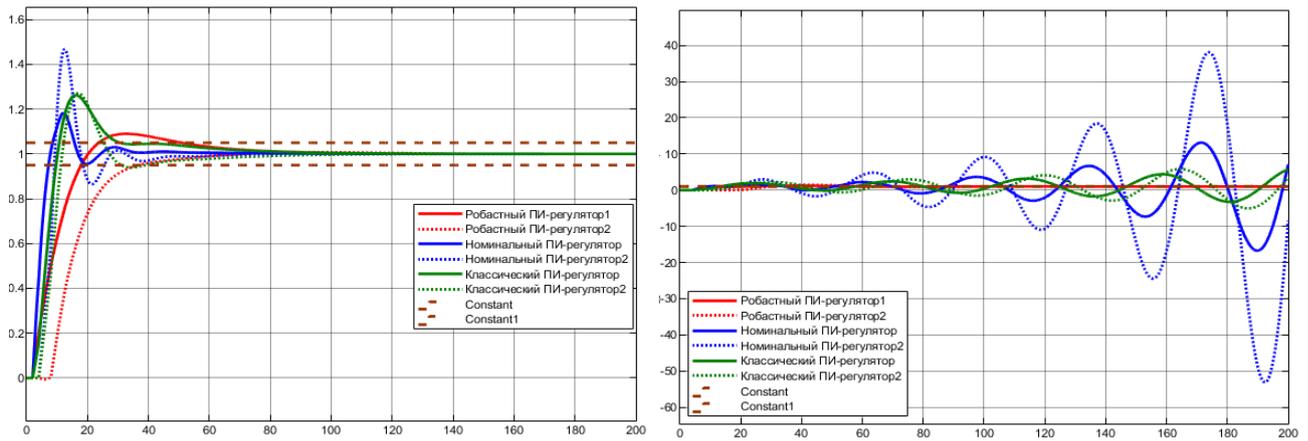


Рисунок 3.8 - Переходные характеристики на исходном ОУ (слева), переходные характеристики на ОУ с увеличенным запаздыванием (справа)
(составлено автором)

На исходном ОУ метод максимальной чувствительности проигрывает по ИКК в 2 раза, а по времени регулирования проигрывает на 47% и 100% в зависимости от метода. Затем увеличили запаздывание в каждом из каналов в 3 раза и теперь регулятор, рассчитанный методом максимальной чувствительности единственный дает устойчивый переходный процесс. Результаты были сведены в таблицы 3.14 и 3.15.

Таблица 3.14 – Показатели качества управления на исходном ОУ (составлено автором)

Метод	ИКК	Время регулирования
Максимальной чувствительности	0.08	50
Компенсационный	0.04	25
Классический (MatLab)	0.04	34

Таблица 3.15 – Показатели качества управления на ОУ с увеличенным запаздыванием (составлено автором)

Метод	ИКК	Время регулирования
Беспоисковый	0.17	92
Компенсационный	inf	inf
Классический (MatLab)	inf	inf

Проведенное сравнение робастных (беспоисковых, поисковых методов и метода максимальной чувствительности), номинальных и классических ПИ-регуляторов (таблицы 3.10-3.15) выявило преимущество робастных подходов, особенно при увеличенном запаздывании. Для объекта WB робастный регулятор

($\rho = 0.42$) обеспечил ИКК = 0.0684 против 0.0771 для номинального, а метод максимальной чувствительности сохранил устойчивость там, где другие методы (ИКК = inf) не справились.

3.5 Выводы по Главе 3

1. Установлено, что необходимым условием робастной управляемости является невырожденность матрицы статических коэффициентов усиления во всех вершинах заданной области неопределенности. Разработан алгоритм проверки, включающий расчет определителей матрицы и анализ их знаков. На примере атмосферной ректификационной колонны К-2 подтверждено, что зона неопределенности элементов матрицы K не должна превышать 17 % для сохранения управляемости, что создает основу для дальнейшего синтеза регуляторов.

2. Предложен беспойсковый метод, который заключается в двухэтапном подходе к синтезу И-регуляторов, включающий анализ статического и динамического объектов. Условия диагональной доминантности матрицы (3.4) и сверхустойчивости (3.9) позволяют формировать регуляторы с заданным запасом устойчивости. Задача линейного программирования, учитывающая ограничения на коэффициенты усиления (3.10), обеспечивает максимизацию этого запаса. Также данный метод позволяет улучшить результаты используя аналитические формулы для ПИ (3.337) и ПИД-регуляторов (3.38).

3. Разработан метод декомпозиции задачи робастного управления на автономный, вспомогательный и комбинированный регуляторы (3.66), показавший высокую эффективность для объектов размерностей 2×2 и 3×3 . Определение оптимального весового коэффициента (например, $\rho = 0.42$ для объекта WB) с использованием минимаксной задачи и перебора обеспечивает устойчивость во всей зоне неопределенности (до 17 %). Анализ переходных процессов (например, рисунок 3.2) подтверждает робастные свойства полученных настроек.

4. Адаптация метода максимальной чувствительности к MiMo-объектам продемонстрировала возможность управления при увеличении зоны

неопределенности до 28.2 % для наиболее чувствительных параметров. Регулятор, синтезированный для «наиболее чувствительной точки» (таблица 3.8), обеспечил устойчивость при всех 4096 комбинациях параметров с средним значением интегрального квадратичного критерия (ИКК) 0.0530, что свидетельствует о его робастности.

ГЛАВА 4 РОБАСТНО-АДАПТИВНАЯ НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Все также рассмотрим ОУ, который характеризуется вектором параметров модели Z и вектором параметров регулятора A . Будем считать, что заданы показатель качества управления (например, интегральный квадратичный критерий, характеризующий переходный процесс в замкнутой системе при действии приведенного к выходу ступенчатого возмущения) $J = \phi(Z, A)$, а также область возможных значений неизвестных параметров объекта управления $Z \in G$ (например, интервалы возможных значений каждого параметра модели объекта управления). При «традиционном» подходе к расчету регуляторов в рамках одной из известных методик [17, 42, 45] A_{tr} рассчитывается в зависимости от параметров расчетной модели управляемого объекта Z_r , то есть $A_{tr} = F(Z_r)$, причем в условиях неопределенности Z_r может отличаться от Z . При «адаптивном» подходе, базирующемся на идентификации ОУ, «истинная модель» ОУ становится известна, и $A_{ad} = F(Z)$. При «робастном» подходе настройки регулятора A_{rob} , обеспечивающие оптимальное (для определенности наименьшее) значение показателя J «в худшем случае», могут быть найдены в результате решения задачи (2.8).

Предлагаемый метод ориентирован на динамическую настройку параметров регулятора в условиях неопределенности модели объекта управления. «Традиционные» настройки, основанные на фиксированной настройке для центральной точки Z_n области неопределенности G , показывают хорошую эффективность, если реальная модель Z мало отклоняется от центра Z_n . Однако при значительном рассогласовании такие настройки могут привести к ухудшению качества управления, а в крайних случаях – к потере устойчивости. Для предотвращения этого используются робастные настройки, рассчитанные на наихудшие возможные условия работы системы. Однако вместо использования фиксированных параметров предложенный подход предлагает адаптивное смешивание «традиционных» и робастных настроек, что позволяет регулятору

подстраиваться к текущему положению \mathbf{Z} внутри области неопределенности \mathbf{G} . Формально это выражается следующим образом (4.1):

$$\mathbf{A}_{rob\,ad} = \alpha \mathbf{A}_{rob} + (1 - \alpha) \mathbf{A}_{tr}, \quad (4.1)$$

где коэффициент α подбирается на основе минимизации функции качества управления, $\mathbf{A}_{rob\,ad}$ – вектор параметров робастно-адаптивного регулятора, \mathbf{A}_{rob} – вектор параметров робастного регулятора, \mathbf{A}_{tr} – вектор параметров традиционного регулятора.

$$J_{rob\,ad} = \min_{\alpha} \{ \phi(\mathbf{Z}, \mathbf{A}) | \mathbf{A} = \alpha \mathbf{A}_{rob} + (1 - \alpha) \mathbf{A}_{tr} \}. \quad (4.2)$$

где $\mathbf{A}_{rob\,ad}$ – вектор параметров робастного регулятора, \mathbf{A}_{tr} – вектор параметров традиционного регулятора, \mathbf{A} – вектор параметров регуляторов, \mathbf{Z} – вектор параметров модели, $J_{rob\,ad}$ – показатель качества управления.

Важной особенностью предложенного метода является его вычислительная простота: поиск оптимального значения α сводится к решению одномерной задачи, что делает алгоритм достаточно быстрым даже при изменении параметров модели ОУ в реальном времени. Такой метод можно отнести к классу робастно-адаптивных стратегий управления (РАУ), поскольку он сочетает в себе адаптацию к текущему состоянию системы и использование заранее рассчитанных робастных параметров [51]. Дополнительным преимуществом является возможность реализации метода в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. В отличие от сложных адаптивных алгоритмов, требующих решения многомерных оптимизационных задач, здесь применяется сравнительно простая процедура, обеспечивающая быстрый отклик на изменения модели ОУ. Это делает предложенный метод особенно привлекательным для промышленных и встроенных систем, где критически важны надежность и быстродействие. Как и в других адаптивных методах, эффективность РАУ зависит от динамики изменения точки \mathbf{Z} в области неопределенности. Для корректной работы алгоритма предполагается либо плавное изменение параметров ОУ, либо их скачкообразное переключение с длительным пребыванием в новых состояниях. Соблюдение этих условий необходимо для корректного функционирования процедуры оптимизации

(4.1), (4.2), основанной на вычислении интегрального критерия качества $J = \phi(\mathbf{Z}, \mathbf{A})$ в режиме реального времени.

4.1 Робастно-адаптивная настройка параметров регуляторов для SiSo объектов

Используем формулу (4.1) для решения задачи (4.2). Для решения данной задачи, а именно поиска робастно-адаптивного регулятора в пространстве регуляторов необходимо знать параметры робастного и номинального регулятора для ОУ. Для поиска робастных настроек можно воспользоваться методами, которые были изложены в главе 2. Данный метод продемонстрируем на объекте управления из примера 1, 3, 7 главы 2. Необходимые настройки также уже были получены в разделе 2.1 и 2.3:

- номинальный регулятор: $A_{tr} = 0.369 + 0.123/p$.
- робастный регулятор: $A_{rob} = 0.0821 + 0.0547/p$

Для того чтобы найти робастно-адаптивный регулятор по формуле (4.1), необходимо найти α . Для реализации перебора α была построена модель в Simulink, с которой можно ознакомиться в Приложении И на рисунке И.1, написана программа в MatLab. Также можно воспользоваться программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5.

Необходимо найти регулятор, предполагая, что параметры ОУ k , T и τ могут принимать крайние и номинальные значения зоны неопределенности. Для каждого из возможных значений параметров ($3^3 = 27$) перебирается значение α от 0 до 1 с шагом 0.1 и находится минимальное значение ИКК. Далее для тех же возможных значений параметров считается ИКК при робастном регуляторе. Для каждого параметра считается относительная разница между ИКК при робастном и робастно-адаптивным регулятором. Затем находится среднее значение относительной разницы ИКК. Зона неопределенности для всех параметров $\omega = 0.5$. Границы параметров представлены в таблице 2.1. Шаг дискретизации 0.01. Время моделирования $T_{mod} = 100$.

В таблице 4.1 представлены параметры ОУ и параметры робастно-адаптивного регулятора, при которых получаются максимальная и минимальная разница ИКК между робастным и робастно-адаптивным регулятором. Также посчитаны средние значения ИКК по каждому регулятору. На рисунке 4.1 представлены графики переходных процессов для ОУ с максимальной разницей ИКК.

Таблица 4.1 - Результаты перебора α (составлено автором)

	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК robad	ИКК rob	%
Максимальная разница ИКК	$\frac{0.5e^{-3p}}{1.5p + 1}$	0.369	0.123	0.0904	0.1980	119
Минимальная разница ИКК	$\frac{0.5e^{-6p}}{1.5p + 1}$	0.0821	0.0547	0.2153	0.2153	0
Средняя разница (27)	-	-	-	-	-	4.39
Среднее значение ИКК	-	-	-	0.157048	0.161023	0.025

В результате получаем, что в максимальная разница между регуляторами в разных точках неопределенности может достигать 119 %, что дает уверенность в необходимости робастно-адаптивных настройках, так как они существенно могут улучшить результат.

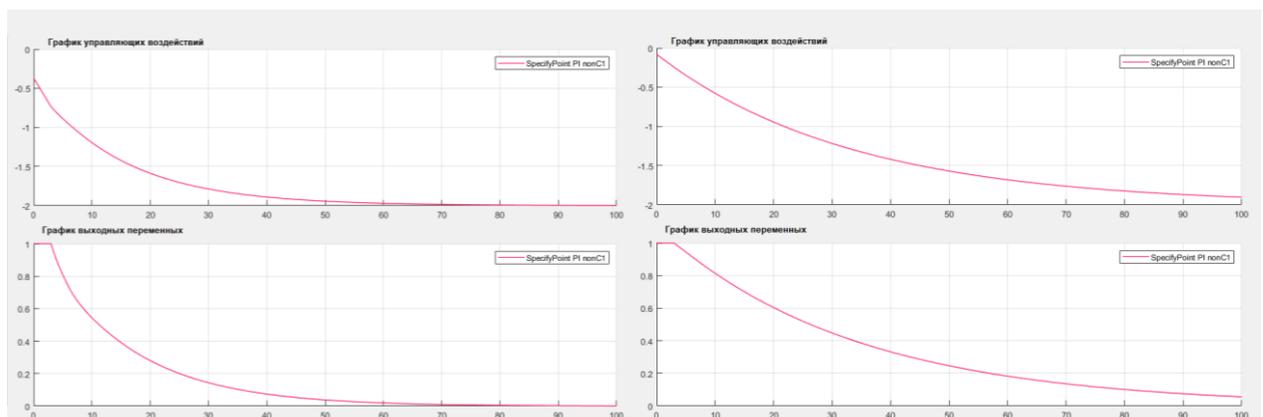


Рисунок 4.1 – Переходный процесс (слева при робастно-адаптивных настройках, справа при робастных настройках) (составлено автором)

По рисунку 4.1 хорошо заметно, что при робастно-адаптивных настройках получили более быстрый процесс, что может говорить о том, что в некоторых точках из-за робастных настройках может быть слишком медленный результат.

4.2 Робастно-адаптивная настройка параметров регуляторов для MiMo объектов с перекрестными связями и запаздыванием в каналах передачи управляющих воздействий

Воспользуемся формулой (4.1) для решения задачи (4.2). Суть данной задачи заключается в поиске промежуточных значений (между робастным и номинальным регулятором) в пространстве параметров регулятора. Для этого подхода нам необходимо знать робастный регулятор и номинальный регулятор для данного ОУ. Для нахождения робастных и номинальных настроек можно воспользоваться методами из раздела 3.2 и 3.3. Продемонстрируем данный метод робастно-адаптивных настроек на объекте WB из таблицы 3.2. Ранее они уже были получены в разделе 3.2 и 3.4:

- номинальный регулятор: $A_{tr} = \begin{bmatrix} 0.4314 & -0.1197 \\ 0.0418 & -0.1396 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0297 & -0.0110 \\ 0.0038 & -0.0115 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{p}$
- робастный регулятор: $A_{rob} = \begin{bmatrix} 0.2539 & -0.0769 \\ 0.0269 & -0.1029 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.02706 & -0.00821 \\ 0.00287 & -0.00967 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{p}$

Для того чтобы найти робастно-адаптивный регулятор по формуле (3.14), необходимо найти α . Для реализации перебора α была построена модель в Simulink, с которой можно ознакомиться в Приложении И на рисунке И.2, написана программа в MatLab. Также можно воспользоваться этой программой внутри разработанного приложения, о котором говорилось в разделе 1.5.

Необходимо найти регулятор, предполагая, что параметры ОУ k , T и τ могут принимать крайние значения зоны неопределенности. Для каждого из возможных значений параметров ($2^{12} = 4096$) перебирается значение α от 0 до 1 с шагом 0.1 и находится минимальное значение ИКК. Далее для тех же возможных значений параметров считается ИКК при робастном регуляторе. Для каждого параметра считается относительная разница между ИКК при робастном и робастно-адаптивным регулятором. Затем находится среднее значение относительной разницы ИКК. Зона неопределенности для всех параметров $\omega = 0.14$. Границы параметров представлены в таблице 3.1. Шаг дискретизации 0.01. Время моделирования $T_{mod} = 200$.

В таблице 4.2 представлены параметры ОУ и параметры робастно-адаптивного регулятора, при которых получаются максимальная и минимальная разница ИКК между робастным и робастно-адаптивным регулятором, также посчитаны средние значения ИКК по каждому регулятору. На рисунке 4.2 представлены графики переходных процессов для ОУ с максимальной разницей ИКК.

В результате получаем, что в разных точках зоны неопределенности разница между робастным и робастно-адаптивным регулятором может достигать 15 % для данного ОУ, что является хорошим результатом.

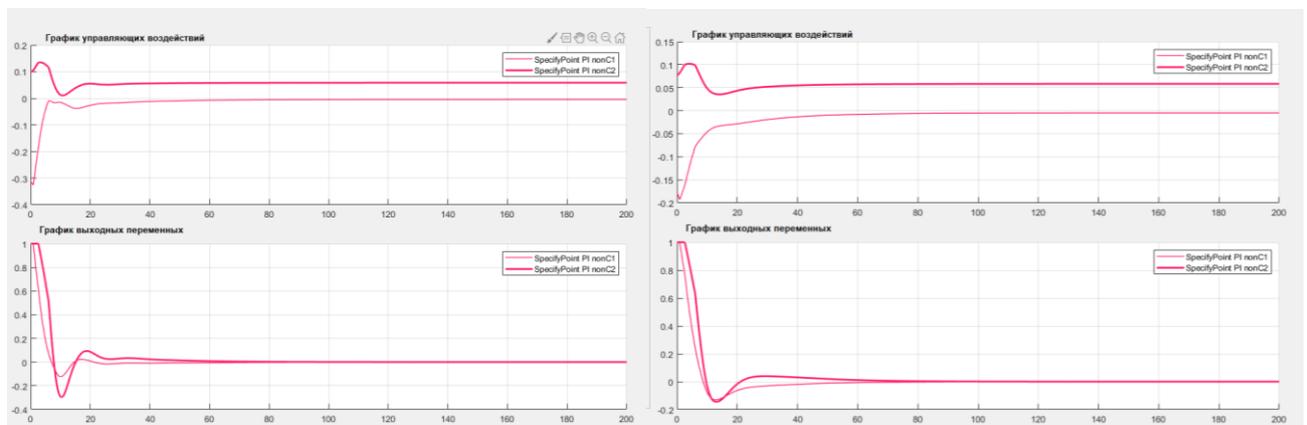


Рисунок 4.2 – Переходный процесс (слева при робастно-адаптивных настройках, справа при робастных настройках) (составлено автором)

По рисунку 4.2 хорошо заметно, что при робастно-адаптивных настройках получается более колебательный процесс, что объясняется тем, что робастные настройки дают затяжные переходные процессы.

Таблица 4.2 – Результаты перебора α (составлено автором)

	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК _{robad}	ИКК _{rob}	%
Максимальная разница ИКК	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-0.86p}}{14.362p + 1} & \frac{-16.254e^{-2.58p}}{18.06p + 1} \\ \frac{5.67e^{-6.02p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-2.58p}}{12.384p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4314 & -0.1197 \\ 0.0418 & -0.1396 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0297 & -0.0110 \\ 0.0038 & -0.0115 \end{bmatrix}$	0.0379	0.0438	15.56
Минимальная разница ИКК	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-0.86p}}{14.362p + 1} & \frac{-16.254e^{-2.58p}}{18.06p + 1} \\ \frac{5.67e^{-6.02p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-3.42p}}{12.384p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.2539 & -0.0769 \\ 0.0269 & -0.1029 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0271 & -0.0082 \\ 0.0029 & -0.0097 \end{bmatrix}$	0.0476	0.0476	0
Средняя разница (4096)	-	-	-	-	-	0.0038
Среднее значение ИКК	-	-	-	0.050043	0.050044	0.002

Результаты сравнения остальных объектов из таблицы 3.2, а также из таблицы 3.3 представлены в таблице 4.3 и таблице 4.4. Ознакомиться более подробно с расчетами можно в Приложении Ж для объектов размерностью 2x2 и 3x3, в котором находятся таблицы перебора α и графики переходных процессов.

Таблица 4.3 – Сравнение регуляторов для объектов 2x2 (составлено автором)

№	Объект	Зона неопределенности для большинства параметров, %	Зона неопределенности для определенных параметров, %	ИКК _{rob}	ИКК _{rob^{ad}}	Максимальная разница, %
1	WW	11	$T_{22}, \tau_{12} - 90$	0.1081	0.0957	12.95
2	WW	11	-	0.1344	0.1331	1
3	VL	15	-	0.0084	0.0064	31.25
4	VL	-	$k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22} - 15$	0.0082	0.0076	7.9
5	VL	-	$\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{21}, \tau_{22} - 90$	0.0069	0.0037	86.48
6	WB	14	-	0.0438	0.0379	15.56
7	WB	14	$\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{21}, \tau_{22} - 90$	0.0283	0.0124	128

Таблица 4.4 – Сравнение регуляторов для объектов 3x3 (составлено автором)

№	Объект	Зона неопределенности для большинства параметров, %	Зона неопределенности для определенных параметров, %	ИКК _{rob}	ИКК _{rob^{ad}}	Максимальная разница, %
1	SM	0	$\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{21}, \tau_{22}, \tau_{23}, \tau_{31}, \tau_{32}, \tau_{33} - 10$	0.5358	0.5440	1.5
2	OR	0	$\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{21}, \tau_{22}, \tau_{23}, \tau_{31}, \tau_{32}, \tau_{33} - 20$	31.25	31.25	0

Как можно увидеть по таблице 4.3, во многих случаях робастный регулятор является лучшим и, самое главное, обеспечивает устойчивость во всех точках зоны неопределенности. Если же мы имеем дело с объектом большей размерности, то улучшения не столь существенные, а иногда их даже не может быть, поскольку данный метод, как минимум, не может дать результат хуже, чем робастный. В тоже время из-за особенностей объектов больше размерности может получаться так, что данный метод не всегда может давать улучшения. Так, робастный регулятор может быть лучшим из возможных результатов для таких объектов. В любом случае, улучшения даже на 1.5 % может существенно улучшить результаты и сэкономить множество ресурсов для нефтехимических компаний.

4.3 Выводы по Главе 4

Разработанный метод РАУ интегрирует элементы традиционных и робастных стратегий, позволяя адаптироваться к колебаниям параметров ОУ в условиях неопределенности. Благодаря формуле (4.1) и коэффициенту α достигается динамическое сочетание номинальных и робастных параметров, оптимизируя типовой критерий управления.

Метод характеризуется высокой вычислительной эффективностью, так как оптимизация сводится к решению одномерной задачи. Это делает его подходящим для внедрения в промышленные системы с ограниченными вычислительными возможностями, обеспечивая оперативную реакцию на изменения параметров и гарантируя стабильность работы, что особенно важно для нефтехимического сектора.

Продемонстрировано, что для объектов с одним входом и одним выходом (SiSo) робастно-адаптивные настройки значительно повышают качество управления. Разница в ИКК между робастным и робастно-адаптивным регулятором достигает максимума в 119 %, а среднее значение разницы составляет 4.39 %. Графики переходных процессов подтверждают более быстрое достижение устойчивого состояния при использовании РАУ по сравнению с чисто робастными настройками.

Для объектов с многоканальным управлением (MiMo) и перекрестными связями (раздел 4.2) метод также приносит улучшения, но их масштаб меньше. Для объекта WB максимальная разница ИКК достигает 15.56 %, тогда как средняя разница остается на уровне 0.002 %, что указывает на ограниченный эффект в сложных многосвязных системах.

Успешность метода во многом определяется характером изменения параметров ОУ — оптимальны либо постепенные переходы, либо резкие изменения с длительным сохранением новых значений. В случае объектов с высокой размерностью (например, 3x3) улучшения могут быть незначительными или отсутствовать, что связано с избыточной осторожностью робастных настроек. Даже минимальные улучшения, такие как 1.5 % для объектов 3x3, могут иметь

важное значение для нефтехимической отрасли, где оптимизация процессов приводит к экономии ресурсов. Метод гарантирует устойчивость системы во всей зоне неопределенности, что подчеркивает его надежность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан метод настройки регуляторов для одномерных подсистем ректификационной колонны без поиска, позволяющий обеспечить устойчивость и заданное качество регулирования в условиях параметрической неопределенности, в частности, улучшение по интегральному квадратичному критерию в 5 раз.

2. Расширена методика робастного управления на многомерные объекты. Предложен комбинированный подход к синтезу многомерных регуляторов, основанный на минимаксной оптимизации и аппроксимации модели с чистым запаздыванием. Показано, что применение этого подхода позволяет обеспечить требуемую устойчивость и качество управления даже при сильных перекрестных связях, позволяет добиться улучшения по интегральному квадратичному критерию в 3 раза по сравнению с классическими методами.

3. Введено понятие и реализован метод максимальной чувствительности, направленный на упрощение процедуры поиска устойчивых настроек. Метод позволяет сократить количество симуляций, фокусируясь на граничных и наихудших по качеству сценариях, что особенно актуально для объектов с высокой размерностью. Применение метода для одномерных подсистем позволило добиться улучшения по интегральному квадратичному критерию в 1.5 раза, а для многомерных систем - в 3 раза.

4. Разработан робастно-адаптивный метод настройки регуляторов, обеспечивающий динамическую корректировку параметров в процессе функционирования системы. За счет взвешенного комбинирования традиционных и робастных параметров с оптимизацией по типовым показателям управления достигается повышение точности и устойчивости управления.

5. В рамках дальнейших исследований планируется развитие предложенных методов с применением технологий машинного обучения, в частности, разработка нейросетевых алгоритмов для автоматического подбора оптимальных параметров регуляторов на основе накопленных данных о работе системы. Перспективным направлением является создание гибридных систем управления, сочетающих методы робастного управления с предиктивными

моделями на основе машинного обучения, а также исследование возможностей глубокого обучения для прогнозирования наихудших сценариев и автоматической адаптации параметров регуляторов. Кроме того, предполагается разработка цифровых двойников ректификационных колонн для ускорения тестирования и верификации алгоритмов управления, а также оптимизация вычислительных процедур за счет методов реинфорсмент-обучения для динамической настройки регуляторов, что позволит существенно расширить функциональные возможности предложенных методов и адаптировать их к работе в условиях высокой неопределенности и нестационарности технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, Е.А. Робастная система управления реактором твердофазного дополиамидирования / Е.А. Алексеев, А.Н. Лабутин, Ю.Н. Пономарева // Современные наукоёмкие технологии. – 2023. – №1. – С. 31–36.
2. Астром, К. Регуляторы и управления. / К. Астром, Т. Хагглунд // 4-е изд. – Москва: Машиностроение, 2006. – 446 С.
3. Баранов, Н.И. Теория управления многомерными объектами / Н.И. Баранов – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 2008. – 116 С.
4. Боде, Х. В. Частотные методы анализа и синтеза систем автоматического управления / Х. Боде – Москва: Энергоатомиздат, 1980. – 567 С.
5. Варламов, И.Г. Гаечный ключ для наладчика САР / И.Г. Варламов, Л.П. Сережин, Б.В. Филимонов. // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №9. – С. 17–22.
6. Гурвиц, А. А. Теория устойчивости линейных систем / А.А. Гурвиц – Москва: Физматлит, 1964. – 740 С.
7. Гоголь, И.В. Адаптивное управление технологическими процессами с запаздыванием по управлению / И.В. Гоголь, О.А. Ремизова, В.В. Сыроквашин, А.Л. Фокин // Известия Санкт-Петербургского Государственного Технологического Института (Технического Университета). – 2021. – №57(83). – С. 90 – 97
8. Данилов, О. Ф. Метод повышения робастных свойств линейной замкнутой системы в условиях структурно-параметрической неопределенности описания передаточной функции объекта управления / О.Ф. Данилов, А.Н. Паршуков, И.Л. Полянская // Вестник. НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2018. – Т. 16. – № 1. – С. 86–99
9. Доронина, Н.А. Робастно-адаптивное управление инерционными объектами с запаздыванием / Н.А. Доронина, Л.М. Яковис // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт прикладной математики и механики – Санкт–Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 62 – 64.

10. Заявка на патент на изобретение № 2025106282. Способ синтеза настроек ПИ-регулятора робастной и робастно-адаптивной системы. Заявл. 17.03.25 / Ремизова О.А., Степанов П.С; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). – 128 КБ.

11. Иванов, П.Н. Моделирование и управление осцилляторными системами / П.Н. Иванов // Санкт–Петербург: Политехнический университет, 2020. – С. 20 – 24.

12. Катковник, В.Я. Методы поиска экстремума и задача синтеза многомерных систем управления / Катковник В.Я., Первозванский А.А. // Адаптивные автоматические системы. Сборник статей под ред. Г.А. Медведева. Москва: Советское радио, 1972. – С.17–42.

13. Кирин, Ю.П. Совершенствование управления процессом восстановления тетрахлорида титана магнием / Ю.П. Кирин, Н.В. Бильфельд, В.А. Тихонов // Вестник ПНИПУ. – 2022. – №41. – С.31–51.

14. Кирин, Ю.П. Управление технологическими процессами производства губчатого титана в условиях неопределенности / Ю.П. Кирин, В.В. Кирьянов // Инженерный вестник Дона. – 2016. – №2. – С.1–20

15. Козлов, В.Н. Одномерные аппроксимации динамики сложных технологических систем / В.Н. Козлов, Д.А. Иванов // Известия вузов. Химическая и нефтегазовая промышленность. – 2013.

16. Колногоров, А.В. Робастное параллельное управление многоальтернативной гауссовской случайной среде / А.В. Колногоров // Вестник Новгородского государственного университета. – 2015. – №3. – С.21–25.

17. Кондрат, А.С. Компенсационный метод настройки регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием / Кондрат А.С., Яковис Л.М. // XXXII Неделя науки СПбГПУ. – Ч. IV. – Санкт–Петербург: Изд-во СПбГПУ. – 2004. – С.27–28.

18. Кузнецов, А.И. Системы управления с запаздыванием: теория и приложения / Кузнецов А.И. // Москва: Физматлит, 2017. – 358 С.

19. Кустов, Б.С. Комбинированный метод расчета многомерных пропорционально-интегральных регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием / Кустов Б.С., Яковис Л.М. // XXXIII Неделя науки СПбГПУ. – Ч.IV. – Изд-во СПбГПУ. – 2005. – С. 11–13

20. Лубенцова, Е.В. Анализ и синтез робастных систем управления методом гарантируемой динамики / Е.В. Лубенцова, В.Ф. Лубенцов, Г.В. Масютина // Современные проблемы и пути их решения в науке, производстве и образовании. – 2018. – №6. – С.7 – 9.

21. Лубенцова, Е.В. Робастная нечеткая система автоматического управления с переменной структурой / Д.Л. Пиотровский, В.Ф. Лубенцов // Фундаментальные исследования. – 2017. – №3. – С.53–59.

22. Ляпунов, А. М. Проблемы устойчивости движения / А.М. Ляпунов // Москва: ГИТТЛ, 1950. – С. 120

23. Маркечко, М.И. Оптимизация квазистационарного режима в линейных системах / М.И. Маркечко, М.В. Рыбашов // Автоматика и телемеханика. – 1987. – №12. – С. 55 – 65

24. Матвейчев, И.В. Робастная настройка типовых регуляторов при управлении инерционными объектами с запаздыванием / И.В. Матвейчев, Л.М. Яковис // XXXVI Неделя науки СПбГПУ. Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. IV. Санкт–Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2008. – С. 90 – 91.

25. Петров, И.А. Моделирование и управление аperiodическими системами: Учебное пособие. // Санкт–Петербург: Лань, 2015. – С. 288

26. Поляк, Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков // Москва: Наука, 2007. – С. 303

27. Рей, У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей // Москва: Мир, 1983. – С. 368

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025615215 Российская Федерация. Программный комплекс для синтеза робастно и робастно-адаптивного ПИ-регулятора. Заявка № 2025613337: заявл.

18.02.2025: опублик. 03.03.2025 / Ремизова О.А., Степанов П.С.; правообладатель(и) Ремизова О.А., Степанов П.С. – 706 КБ.

29. Симахин, В.А. Адаптивные робастные непараметрические алгоритмы прогноза / В.А. Симахин // Вестник Томского государственного университета. – 2011. – №1. – С.45-54.

30. Скопинцев, А.С. Основы автоматического управления технологическими процессами нефтепереработки. / А.С. Скопинцев // Москва: Химия, 2005. – С. 528

31. Смирнов, Н.Г. Динамические системы с апериодическими характеристиками в автоматическом управлении. / Н.Г. Смирнов // Москва: Техносфера, 2017. – С. 350

32. Соболев, В. Н. Основы частотных методов в системах управления. / В.Н. Соболев // Санкт–Петербург: Издательство СПбГУ, 1995. – С. 256

33. Спорягин, К.В. Программный комплекс настройки типовых регуляторов для многосвязных объектов управления произвольной размерности / К.В. Спорягин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2010. – № 2. – С. 92–99.

34. **Степанов, П.С.** Синтез робастного ПИ-регулятора для многомерного объекта управления размерностью 3×3 / **П.С. Степанов**, О.А. Ремизова // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического университета (технического университета). – 2025. – №72 (98). – С. 106–110.

35. Цирлин, А.М. Робастная устойчивость и выбор настройки регуляторов для технологических объектов с запаздыванием / А.М. Цирлин, В.С. Овсепян // Проблемы управления. – 2018. – №4. – С.21–27.

36. Шпинель, А. Н. Прямые методы адаптации в системах управления / А.Н. Шпинель // Москва: Энергоатомиздат, 2001. – С. 438

37. Штейнберг, Ш.Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования / Штейнберг Ш.Е., Сережин Л.П. и др. // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №7. – С. 1 – 7.

38. Яковис, Л.М. Беспойсковая настройка интегральных регуляторов в условиях полной и неполной определенности / Л.М. Яковис, **П.С. Степанов**,

П.Я. Стронгин // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – №11. – С. 19 – 26. DOI: 10.52348/2712-8873_ММТТ_2023_11_19

39. Яковис, Л.М. Декомпозиция задачи робастной настройки типовых регуляторов при управлении многомерными динамическими объектами в условиях интервальной неопределенности / Л.М. Яковис, **П.С. Степанов**, П.Я. Стронгин // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – №8. – С.17-22.

40. Яковис, Л.М. История развития теории автоматического управления / Л.М. Яковис, **П.С. Степанов** // НЕДЕЛЯ НАУКИ-2023 : Сборник тезисов XIII научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) в рамках мероприятий 2023 года по проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Санкт-Петербург, 11-13 апреля 2023 года. – Санкт- Петербург: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 2023. – С.458

41. Яковис, Л.М. Комбинированный метод робастной настройки типовых регуляторов для многосвязных динамических объектов в условиях интервальной неопределенности / Л.М. Яковис, **П.С. Степанов**, П.Я. Стронгин // Неделя науки ФизМех: сборник материалов Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 1-5 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 87-90.

42. Яковис, Л.М. Компенсационный метод настройки типовых регуляторов для различных динамических объектов / Л.М. Яковис, **П.С. Степанов** // НЕДЕЛЯ НАУКИ-2023 : Сборник тезисов XIII научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) в рамках мероприятий 2023 года по проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Санкт-Петербург, 11-13 апреля 2023 года. – Санкт- Петербург: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 2023. – С.362.

43. Яковис, Л.М. Многокомпонентные смеси для строительства: Расчетные методы оптимизации состава / Л.М. Яковис // Ленинград: Стройиздат. Ленингр.отд-ние, 1988. – С. 296

44. Яковис, Л.М. Настройка типовых регуляторов для многосвязных объектов управления / Л.М. Яковис, К.В. Спорягин // Мехатроника, Автоматизация, Управление. –2009. – № 6. – С. 55–63.

45. Яковис, Л.М. Простые способы расчета типовых регуляторов для сложных объектов промышленной автоматизации / Л.М. Яковис // Автоматизация в промышленности. – 2007. – №6. – С. 51 – 56.

46. Яковис, Л.М. Расчет типовых регуляторов для многосвязных объектов управления на основе условий робастной сверхустойчивости/ Л.М. Яковис, **П.С. Степанов**, П.Я. Стронгин // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник трудов конференции, Москва, 17-20 июня 2024 года. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. – С. 491-495.

47. Стронгин П.Я. Расчет регуляторов для типичных объектов промышленной автоматики / П.Я. Стронгин, **П.С. Степанов**, Л.М. Яковис // Неделя науки ФизМех: Сборник материалов Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 03-07 апреля 2023 года. - Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 307-309.

48. Яковис, Л.М. Робастно-адаптивное управления непрерывными процессами с применением типовых регуляторов / Л.М. Яковис // Математические методы в технике и технологиях. – 2020. – №9. – с. 24–30

49. Яковис, Л.М., Робастные настройки регуляторов методом максимальной чувствительности / Л.М. Яковис, **П.С. Степанов**, П.Я. Стронгин // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – №10. – С. 11-15.

50. Яковис, Л.М. Робастная настройка типовых регуляторов методом максимальной / Л.М. Яковис, П.Я. Стронгин, **П.С. Степанов** // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 12. – С. 47–54. DOI: 10.25728/avtprom.2022.12.10

51. Яковис, Л.М. Робастное и робастно-адаптивное управление для многосвязных объектов управления на основе условий робастной устойчивости / Л.М. Яковис, **П.С. Степанов**, О.А. Ремизова // Известия Санкт-Петербургского

государственного технологического университета (технического университета). – 2025. – №72 (98). – С. 101-105.

52. Яковис, Л.М., Условия робастной управляемости в статике для многосвязных объектов / Л.М. Яковис, П.С. Степанов, П.Я. Стронгин // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 4. – С. 21-27. DOI: 10.52348/2712-8873_ММТТ_2023_4_21

53. Buljević, A. Examples of robust controller design / Anja Buljević, Miloš Miletić, Aleksandra Mitrović, Mirna N. Kapetina, Milan R. Rapaić // Serbian journal of electrical engineering. – 2020. – Vol. 17. – №1. – P.65-82.

54. Åström, K. J. Advanced PID control. / K. J. Åström, T. Hägglund // ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. – P. 354

55. Bao, J. Robust multiloop controller design: a successive semidefinite programming approach / J. Bao, J.F. Forbes, P.J. McLellan // Ind. Eng. Chem. Res. – 1999. – №38. – P. 3407–3419.

56. Christiansen, D. Control system: article. The electronics Engineers' Handbook 5th Edition / D. Christiansen, Charles K. Alexander, Ronald K. Jurgen // New-York: McGraw-Hill Publishing, 2005. – P. 938

57. Danaboyina, S.R. New algorithm for the design of robust PI controller for plants with parametric uncertainty / S.R. Danaboyina, S.K. Mangipudi, R.R. Manyala // Transactions of the Institute of Measurement and Control. – 2017. – P.1-9

58. Dorf, R. C. Modern control systems. Twelfth Edition / R.C. Dorf, R.H. Bishop // Pearson Education. – 2011. – P.1112

59. Economou, M. Internal model control: 6. multiloop design / M. Economou, M. Morari // Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. – 1986. №25. – P. 411–419.

60. Han, D. Six sigma robust multi-objective optimization modification of machine-tool settings for hypoid gears by considering both geometric and physical performances / D. Han, J. Tang // Applied Soft Computing. – 2018. – №70. – P.550-561.

61. Huang, H. P. A direct method for multi-loop PI/PID controller design / H. P. Huang, J.C. Jeng, C.H. Chiang, W. Pan. // Journal of Process Control. –2003. – №13. – P. 769–786.

62. Levine, W. S. The Control Handbook. Second Edition / W.S. Levine // CRC Press. – 2010. – P. 3526

63. Luyben, W.L. Distillation Design and Control Using Aspen Simulation / W.L. Luyben // Wiley-AIChE, 2013. – 512 P.: ISBN: 978-1-118-41143-8

62. Mahapatro, S.R. Design and experimental realization of a robust decentralized PI controller for a coupled tank system / S.R. Mahapatro, B. Subudhi, S. Ghosh // ISA Transactions. – 2019. – №89. – P.158-168

64. MathWorks.com: Официальный сайт. – США: Нэтик – URL: <http://www.mathworks.com>.- Текст: электронный (дата обращения 19.05.2025)

66. Sapounas, I. A simulation-based robust methodology for operator guidance on injection moulding machine settings / I. Sapounas, G.-C. Vosniakos, G. Papazetis // International Journal on Interactive Design and Manufacturing. –2020. – Vol. 14 – P.519-533.

67. Seborg, D.E. Automation and control of chemical and petrochemical plants / D.E. Seborg // Mechanical Engineering. – 2003. – №5. – P.1-12.

68. Smith, R. Chemical Process Design and Integration. – Wiley, 2005. – P.713

69. Skogestad, S. Dynamics and Control of Distillation Columns: A Tutorial Introduction / S. Skogestad // Chemical Engineering Research and Design. –1997. – Vol. 75. – P. 539-562

70. Shinskey, F.G. Distillation Control for Productivity and Energy Conservation / F.G. Shinskey // McGraw-Hill, 1984. – 354. P.: ISBN 10: 0070568936

71. Tsou, T.S. A reproducible robust likelihood approach to inference about marginal characteristics of binary data in paired settings / T.S. Tsou // SMMR. – 2019. – Vol.29. – P.282-292.

72. Turksoy, O. Computation of robust PI-Based pith controller parameters for large wind turbines / O. Turskoy // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2020. – Vol.43. – №1. – P.57-63.

73. Van Hemert, J.I. Robust parameter settings for variation operators by measuring the resampling ratio: a study on binary constraint satisfaction problems / J.I. Van Hemert, T. Back // Journal of Heuristics. – 2004. – №10. – P.629-640

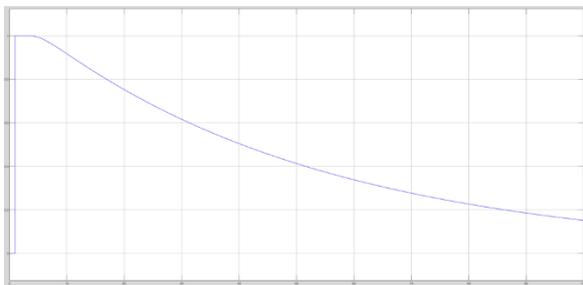
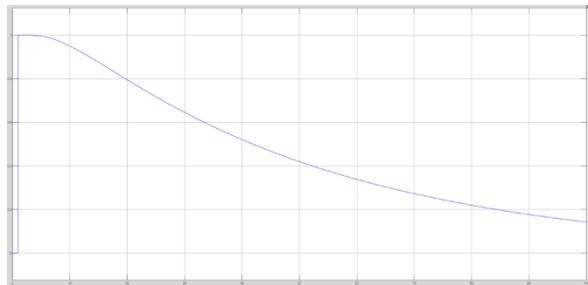
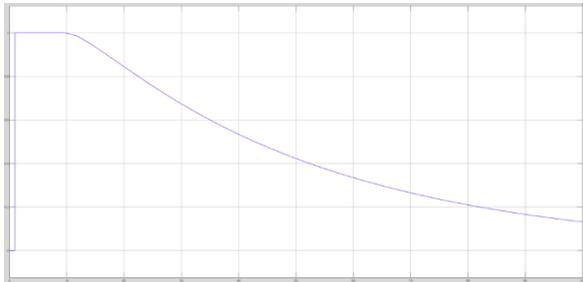
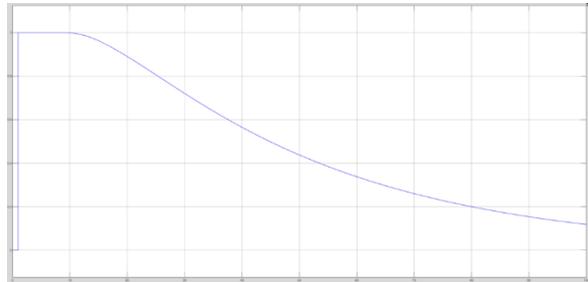
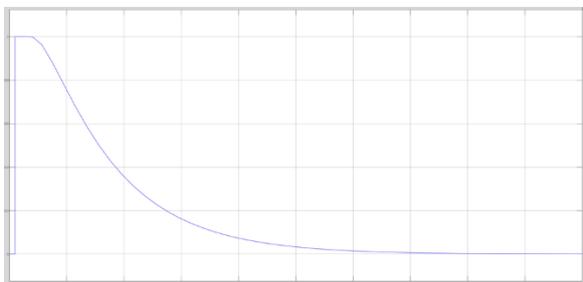
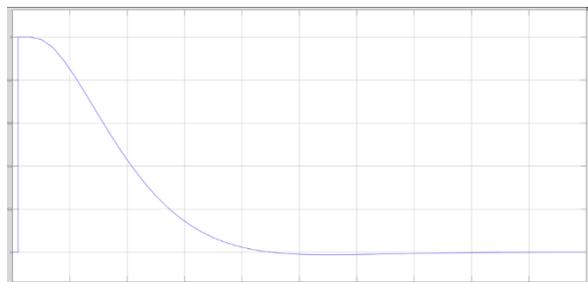
74. Walheer, B. Input allocation in multi-output settings: Nonparametric robust efficiency measurements / B. Walheer // *Journal of the Operational Research Society*. – 2019. – Vol. 70. – P.2127-2142.
75. Wang, Q.-G. Decoupling Control / Q.-G. Wang // New York: Springer, 2003. – 363 P.
76. Wang, Q.-G. PID Control for Multivariable Processes. / Q.-G. Wang, Z. Ye, W.-J. Cai, C.-C. Hang // Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 249 P.
77. Xiong, Q. A practical loop pairing criterion for multivariable processes / Q. Xiong, W.-J. Cai, M.-J. He. // *Journal of Process Control*. – 2005. – Vol. 15. – P. 741–747.
78. Xiong, Q. Equivalent transfer function method for PI/PID controller design of MIMO processes / Q. Xiong, W.-J. Cai, M.-J. He. // *Journal of Process Control*. – 2007. – Vol. 17. – P. 665–673.
79. Yakovis, L. M. Controller Tuning for Inertia Objects with Time Delay / L.M. Yakovis, K.V. Sporyagin // *Automation and Remote Control*. – 2011. – Vol. 72. – P. 208 – 217

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет настроек беспойсковым методом для SiSo объектов

Таблица А.1 – Значения ИКК

Параметры	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$
ИКК	0.2915	0.3084	0.3284	0.3473	0.1167	0.1345	0.1670	0.1958	0.3000
Параметры	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\tau}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$	$\underline{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$
ИКК	0.3094	0.0898	0.3273	0.3378	0.1613	0.1696	0.1780	0.1804	0.1899
Параметры	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\tau}$	$\bar{kT\bar{\tau}}$
ИКК	0.1995	0.2025	0.2135	0.2247	0.1255	0.1387	0.1497	0.1608	0.1813

Рисунок А.1 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT\tau}$ Рисунок А.2 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT\bar{\tau}}$ Рисунок А.3 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT\bar{\tau}}$ Рисунок А.4 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT\bar{\tau}}$ Рисунок А.5 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{kT\tau}$ Рисунок А.6 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{kT\bar{\tau}}$

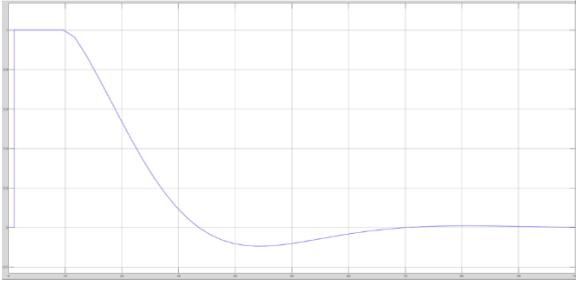


Рисунок А.7 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT\tau}$

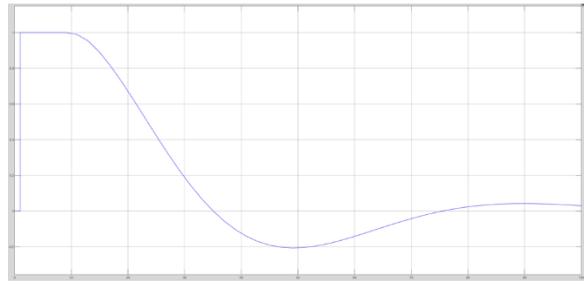


Рисунок А.8 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT\tau}$

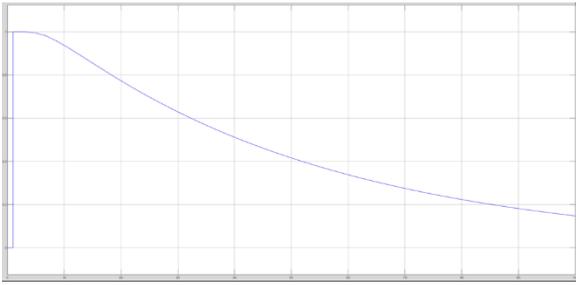


Рисунок А.9 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT\tau}$

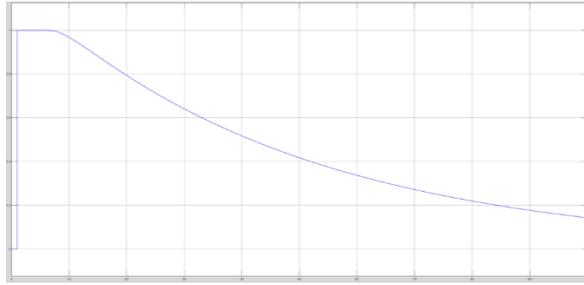


Рисунок А.10 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT\tau}$



Рисунок А.11 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT\tau}$

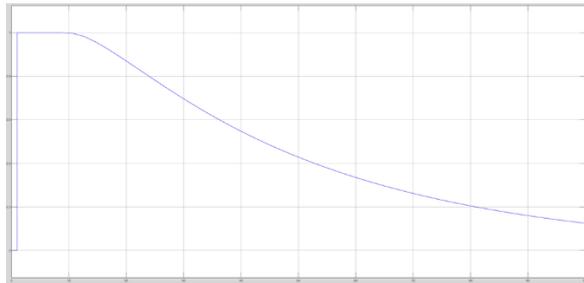


Рисунок А.12 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT\tau}$

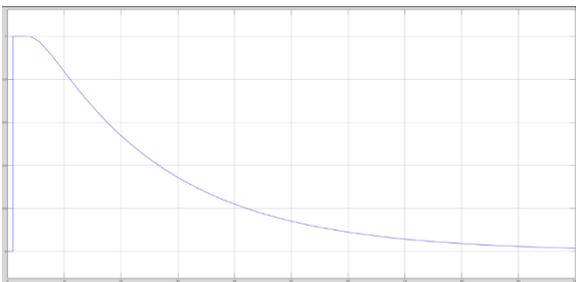


Рисунок А.13 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT\tau}$

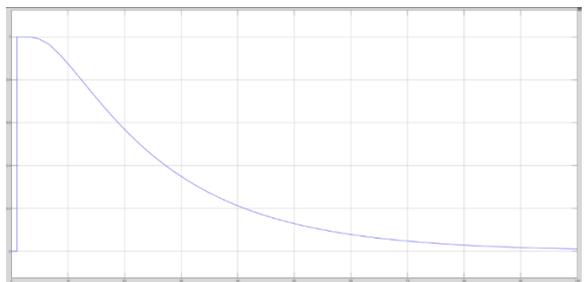


Рисунок А.14 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT\tau}$

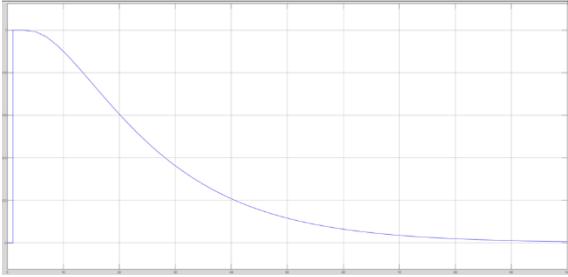


Рисунок А.15 – Переходный процесс при параметрах: $kT\underline{\tau}$

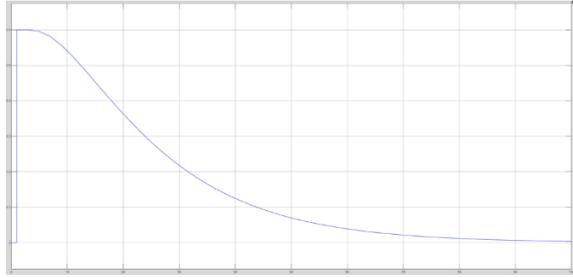


Рисунок А.16 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{T}\underline{\tau}$

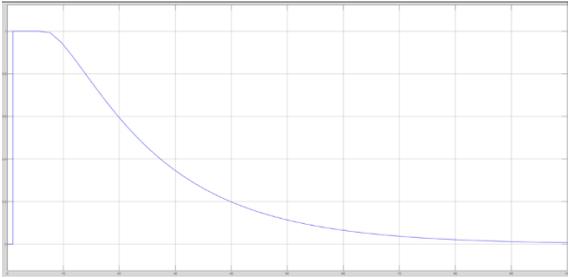


Рисунок А.17 – Переходный процесс при параметрах: $kT\underline{\tau}$

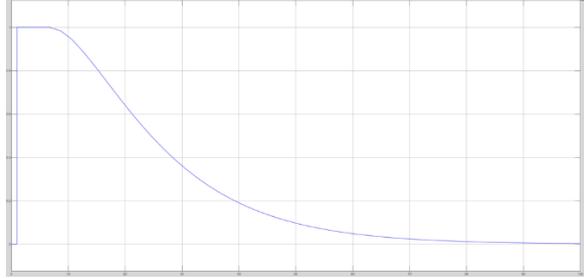


Рисунок А.18 – Переходный процесс при параметрах: $kT\u03c4$

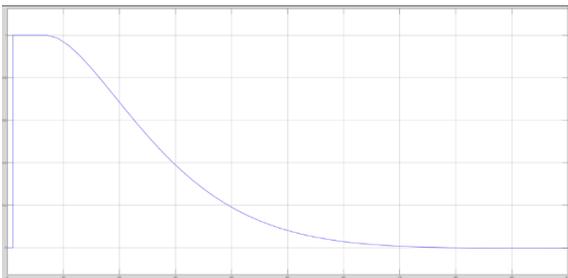


Рисунок А.19 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{T}\underline{\tau}$

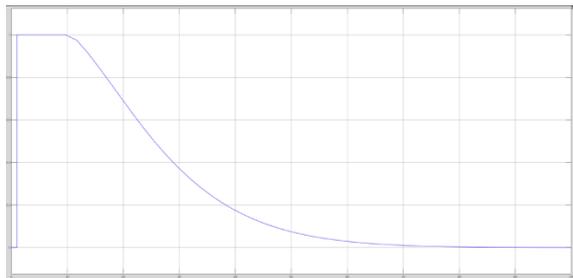


Рисунок А.20 – Переходный процесс при параметрах: $kT\u03c4$

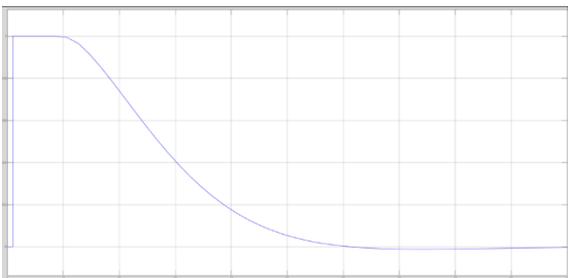


Рисунок А.21 – Переходный процесс при параметрах: $kT\u03c4$

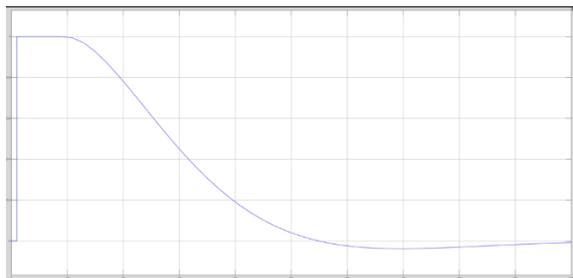


Рисунок А.22 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{T}\underline{\tau}$

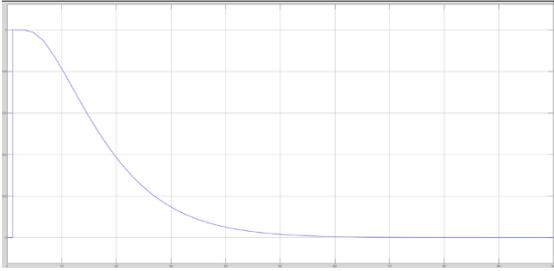


Рисунок А.23 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}T\tau$

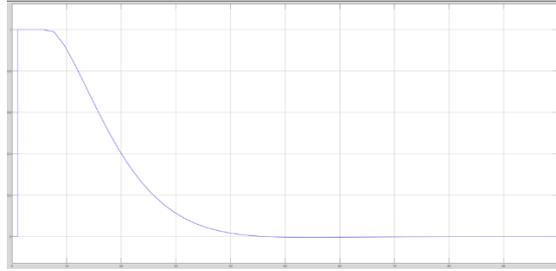


Рисунок А.24 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}T\tau$

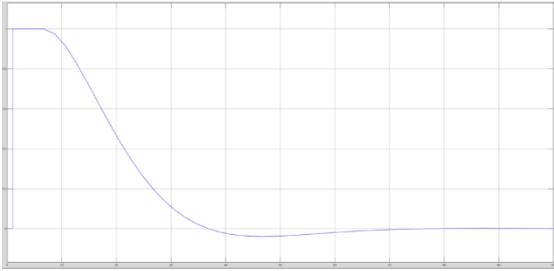


Рисунок А.25 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}T\tau$

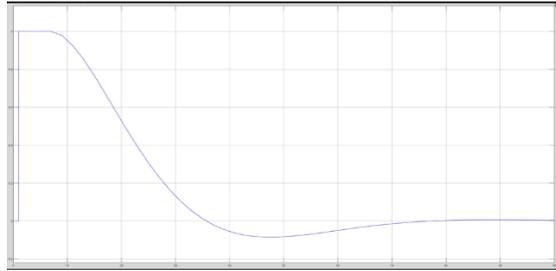


Рисунок А.26 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}T\tau$

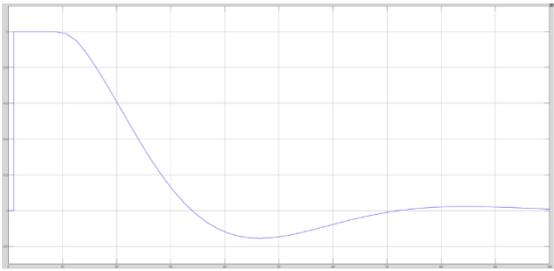


Рисунок А.27 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}T\tau$

Таблица А.2 – Значения ИКК

Параметры	$\underline{k}T_1T_2$	$\underline{\bar{k}}T_1T_2$	$\underline{k}T_1\bar{T}_2$	$\underline{\bar{k}}T_1\bar{T}_2$	$\bar{k}T_1T_2$	$\bar{\bar{k}}T_1T_2$	$\bar{k}T_1\bar{T}_2$	$\bar{\bar{k}}T_1\bar{T}_2$	$\underline{k}T_1T_2$
ИКК	0.2611	0.2777	0.2882	0.3064	0.1025	0.1201	0.1300	0.1538	0.2694
Параметры	$\underline{k}T_1T_2$	$\underline{k}T_1T_2$	$\underline{\bar{k}}T_1T_2$	$\underline{\bar{k}}T_1T_2$	$\bar{k}T_1T_2$	$\bar{k}T_1T_2$	$\bar{\bar{k}}T_1T_2$	$\bar{\bar{k}}T_1T_2$	$\bar{k}T_1T_2$
ИКК	0.2747	0.2834	0.2920	0.2973	0.1427	0.1511	0.1594	0.1561	0.1653
Параметры	$\bar{k}T_1T_2$	$\bar{k}T_1T_2$	$\bar{k}T_1T_2$	$\bar{k}T_1T_2$	$\bar{\bar{k}}T_1T_2$	$\bar{\bar{k}}T_1T_2$	$\bar{\bar{k}}T_1T_2$	$\bar{\bar{k}}T_1T_2$	$\bar{\bar{k}}T_1T_2$
ИКК	0.1746	0.1694	0.1795	0.1898	0.1113	0.1163	0.1265	0.1369	0.1418

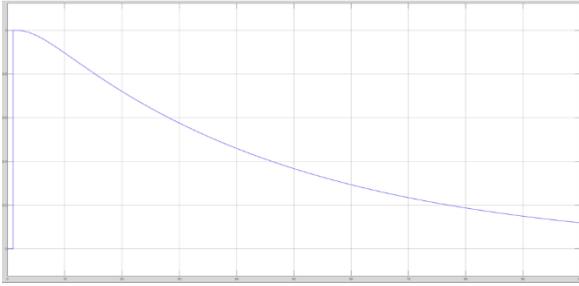


Рисунок А.28 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

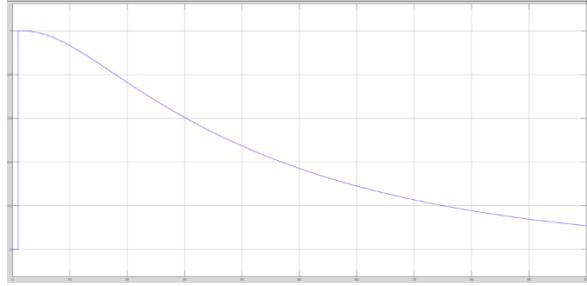


Рисунок А.29 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

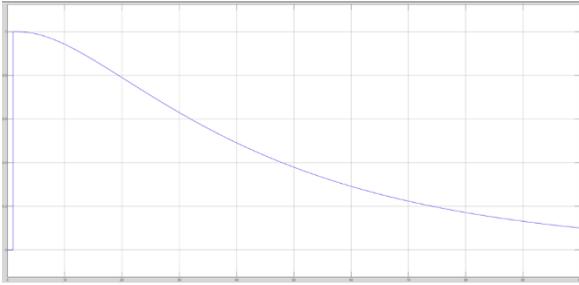


Рисунок А.30 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

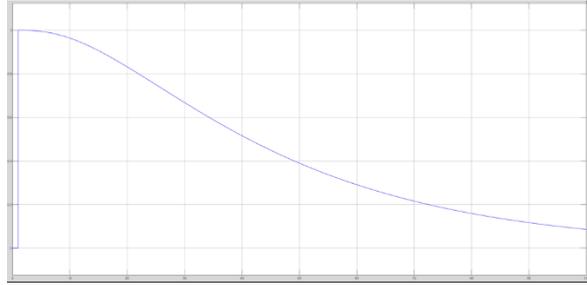


Рисунок А.31 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

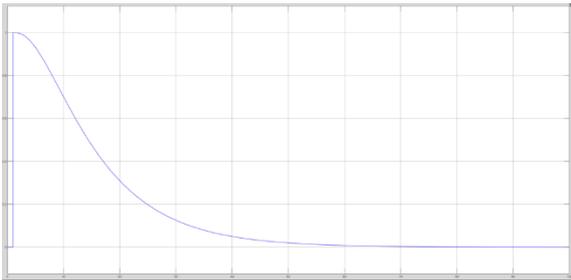


Рисунок А.32 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

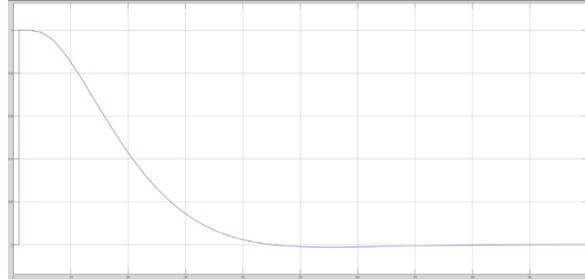


Рисунок А.33 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

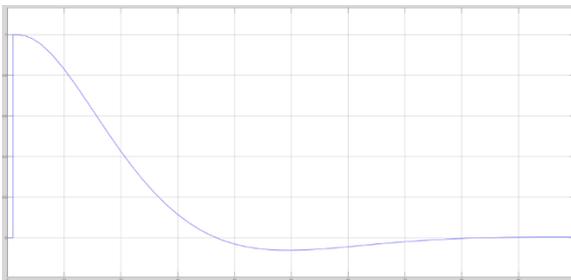


Рисунок А.34 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

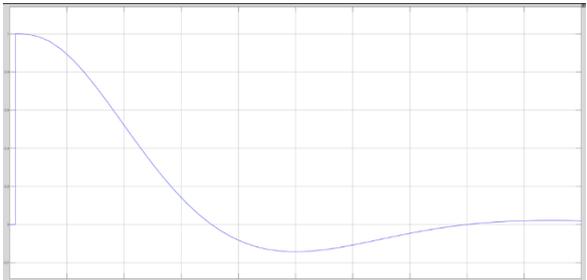


Рисунок А.35 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

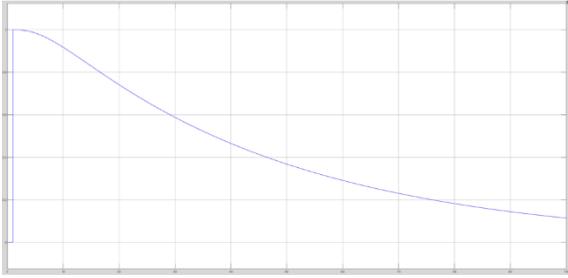


Рисунок А.36 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

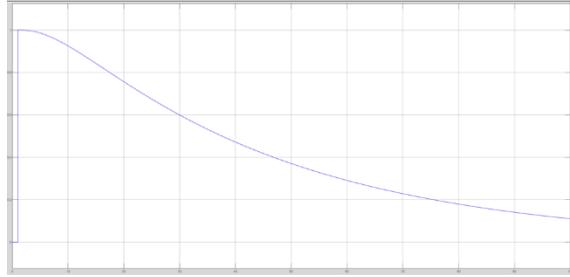


Рисунок А.37 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

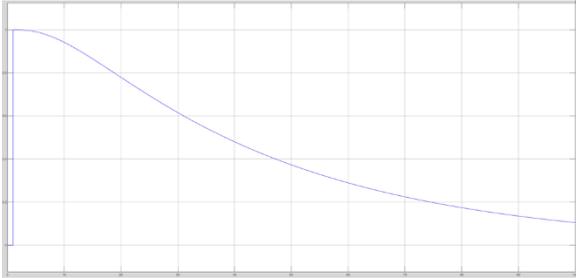


Рисунок А.38 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

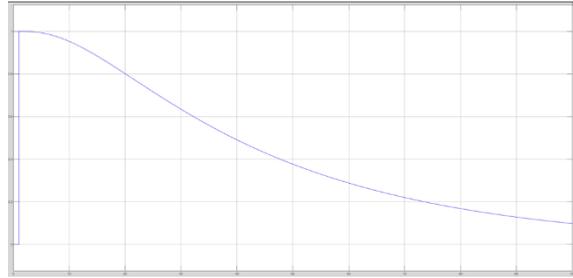


Рисунок А.39 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k\overline{T_1}T_2}$

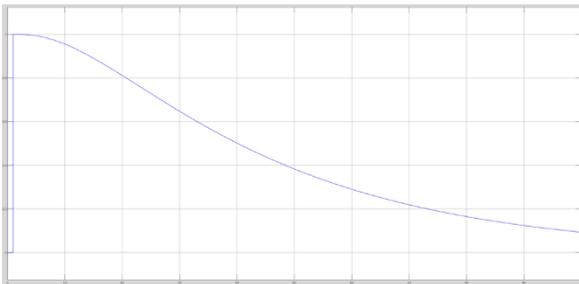


Рисунок А.40 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1\overline{T_2}}$

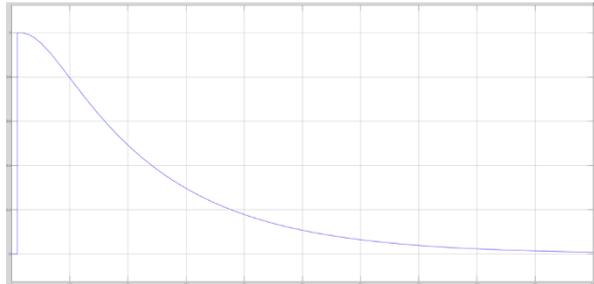


Рисунок А.41 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

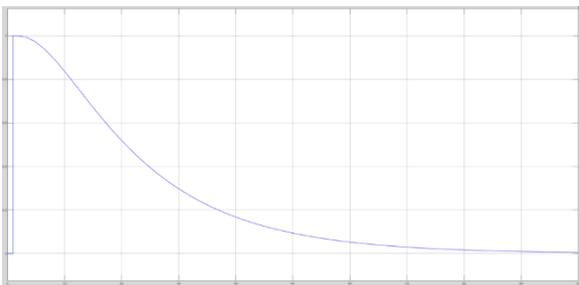


Рисунок А.42 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

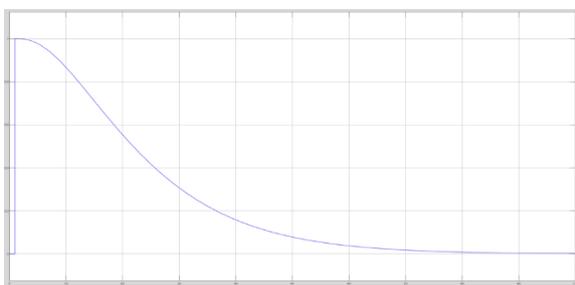


Рисунок А.43 – Переходный процесс при параметрах: $k\overline{T_1}T_2$

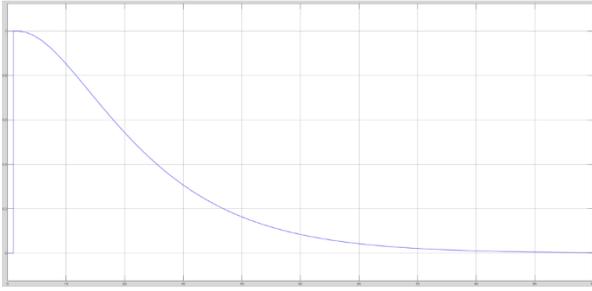


Рисунок А.44 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

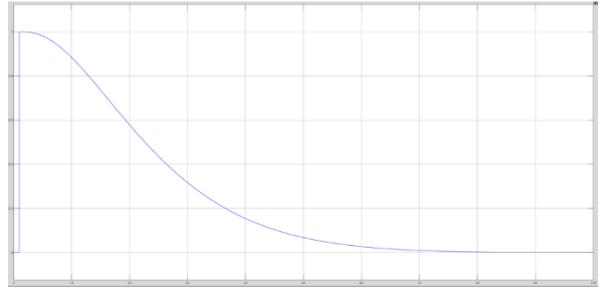


Рисунок А.45 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

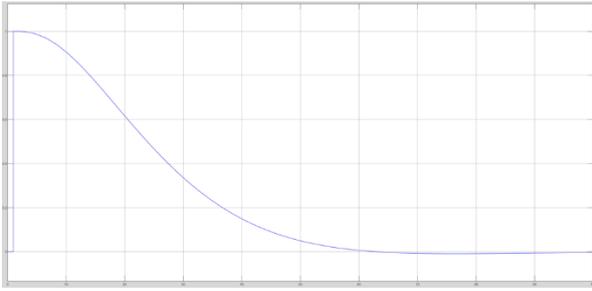


Рисунок А.46 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

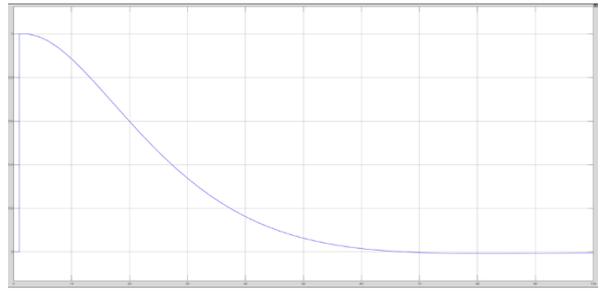


Рисунок А.47 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

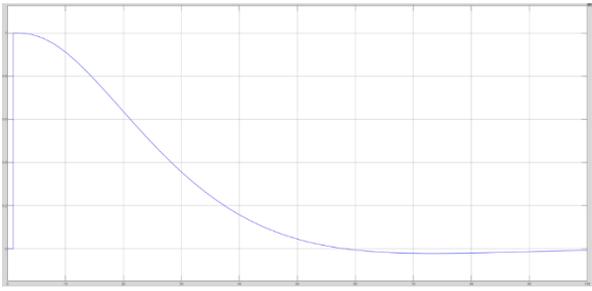


Рисунок А.48 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

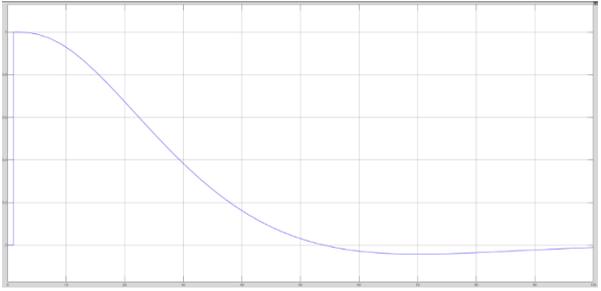


Рисунок А.49 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

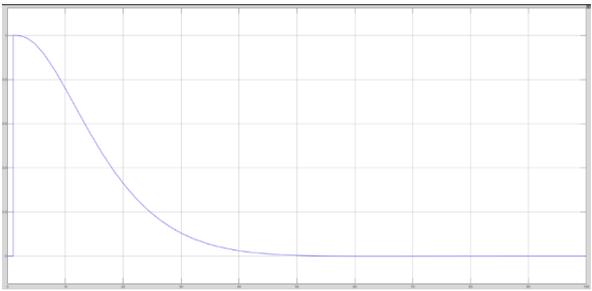


Рисунок А.50 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

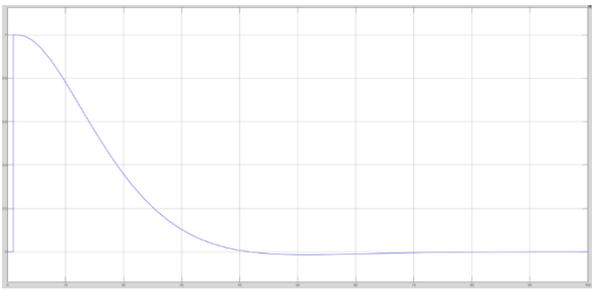


Рисунок А.51 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

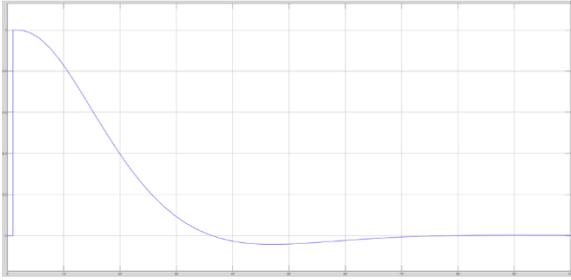


Рисунок А.52 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT_1T_2}$

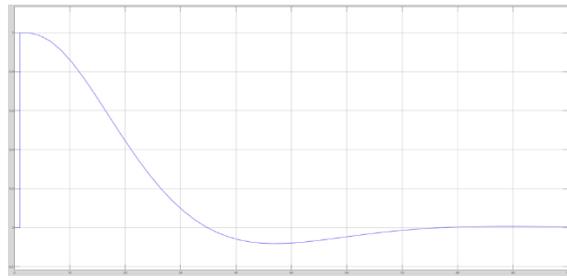


Рисунок А.53 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT_1T_2}$

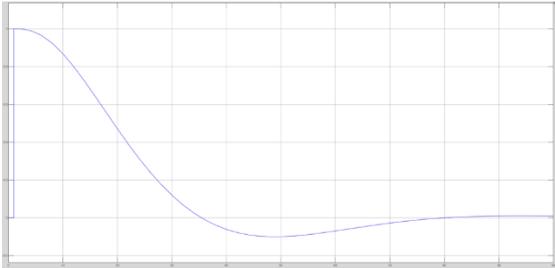


Рисунок А.54 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT_1T_2}$

Таблица А.3 – Значения ИКК

Параметры	\underline{kbc}	$\underline{k\overline{bc}}$	$\underline{k\overline{b\overline{c}}}$	$\underline{k\overline{b\overline{c}}}$	\overline{kbc}	$\overline{k\overline{bc}}$	$\overline{k\overline{b\overline{c}}}$	$\overline{k\overline{b\overline{c}}}$	\underline{kbc}
ИКК	0.4534	0.4626	0.6900	0.7013	0.2849	0.2892	0.4493	0.4524	0.4580
Параметры	\underline{kbc}	\underline{kbc}	$\underline{k\overline{bc}}$	$\underline{k\overline{b\overline{c}}}$	\underline{kbc}	\underline{kbc}	$\underline{k\overline{bc}}$	\underline{kbc}	\underline{kbc}
ИКК	0.6091	0.6111	0.6130	0.7001	0.3297	0.3342	0.3401	0.4503	0.4526
Параметры	$\underline{k\overline{bc}}$	$\underline{k\overline{b\overline{c}}}$	$\underline{k\overline{b\overline{c}}}$	$\underline{k\overline{b\overline{c}}}$	\overline{kbc}	$\overline{k\overline{bc}}$	\overline{kbc}	$\overline{k\overline{bc}}$	$\overline{k\overline{b\overline{c}}}$
ИКК	0.4550	0.5409	0.5423	0.5436	0.2831	0.3708	0.3733	0.3760	0.4508

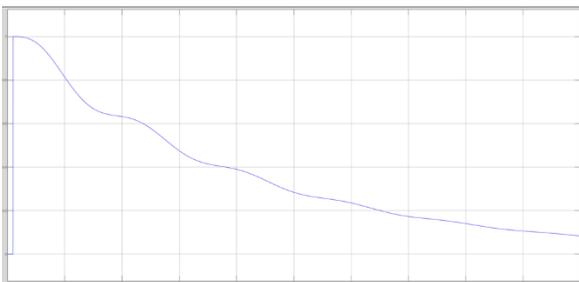


Рисунок А.55 – Переходный процесс при параметрах: \underline{kbc}

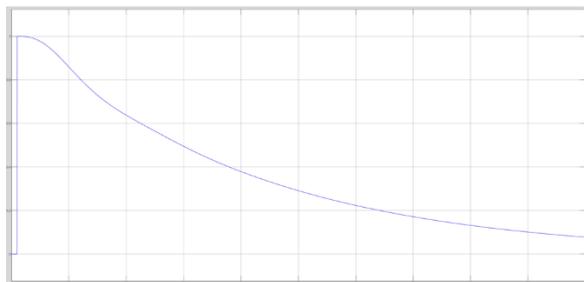


Рисунок А.56 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k\overline{bc}}$

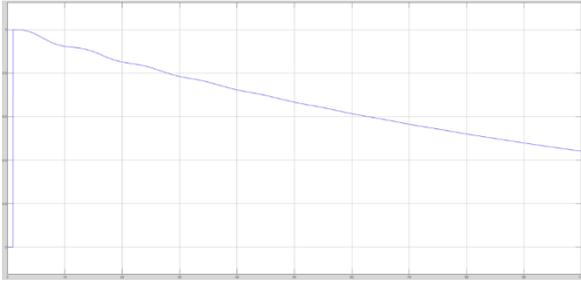


Рисунок А.57 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kb}\bar{c}$

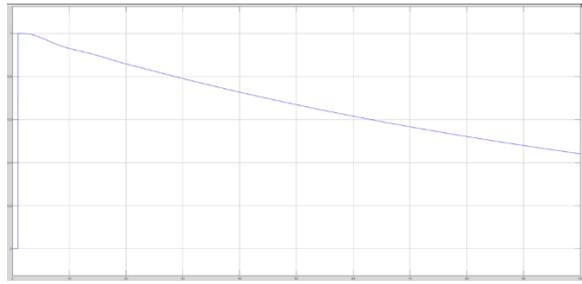


Рисунок А.58 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k}\bar{b}\bar{c}$

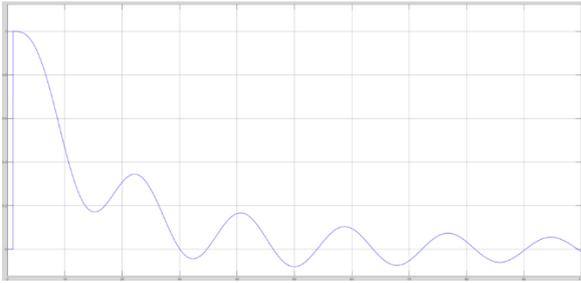


Рисунок А.59 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\underline{b}\underline{c}$

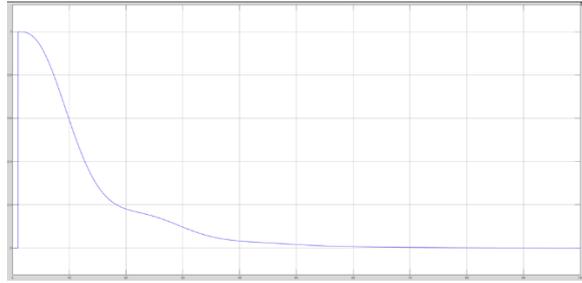


Рисунок А.60 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\bar{b}\underline{c}$

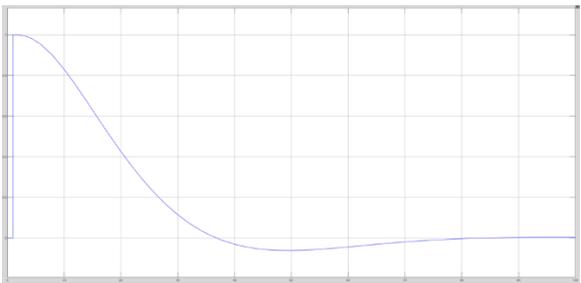


Рисунок А.61 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\underline{T}_1\underline{T}_2$

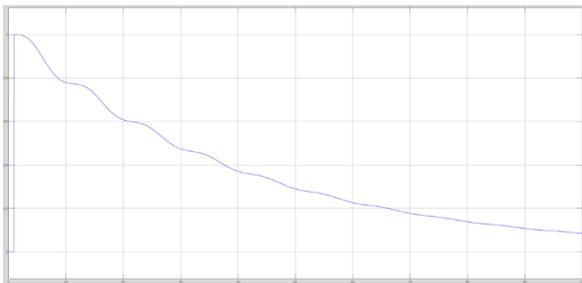


Рисунок А.62 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\bar{b}\bar{c}$

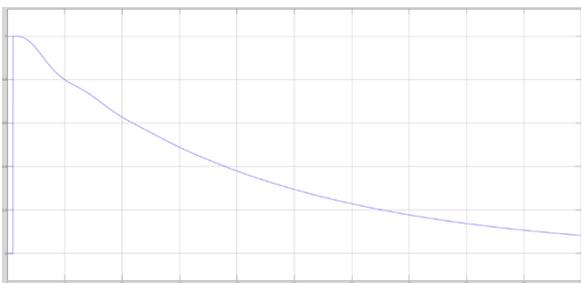


Рисунок А.63 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kb}\underline{c}$

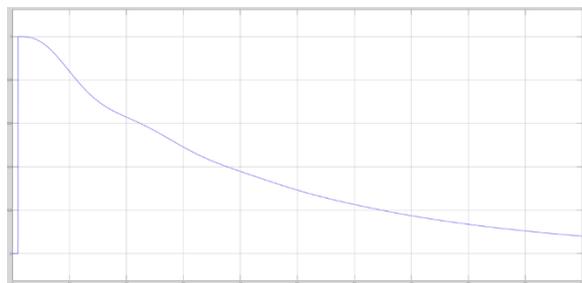


Рисунок А.64 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kb}\underline{c}$

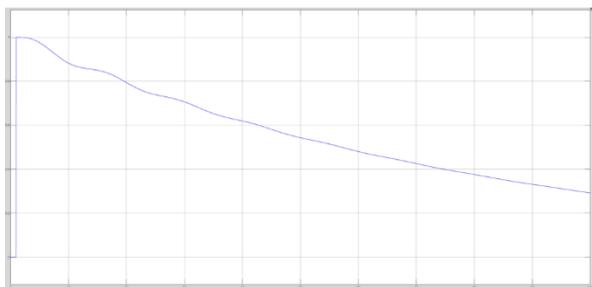


Рисунок А.65 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}c$

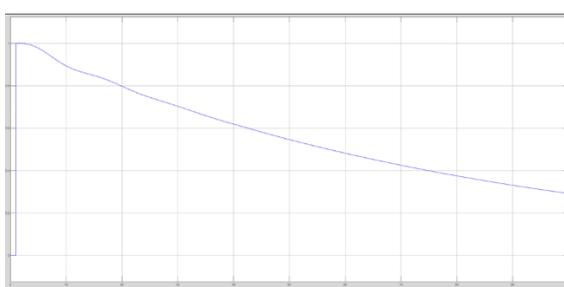


Рисунок А.66 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{b}c$

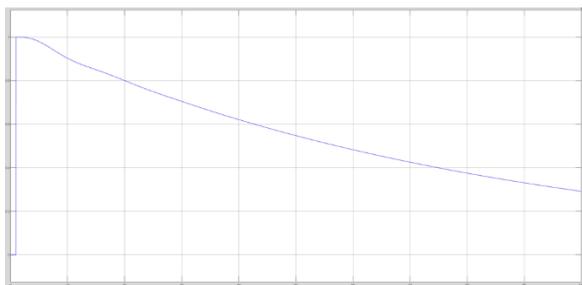


Рисунок А.67 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}\bar{c}$

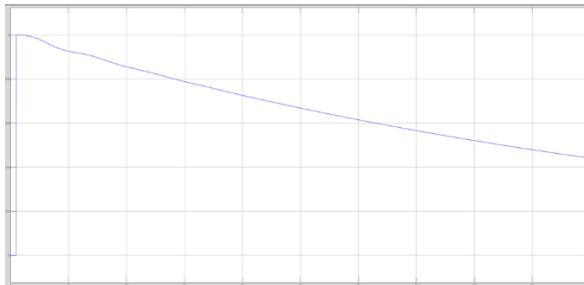


Рисунок А.68 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{b}c$

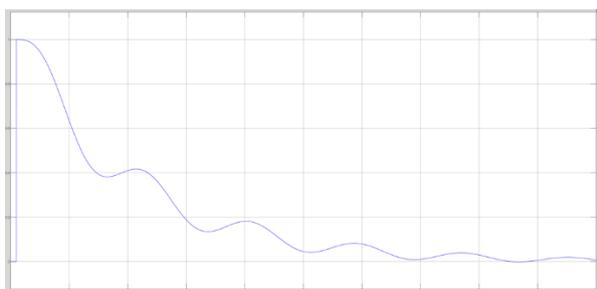


Рисунок А.69 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}\underline{c}$

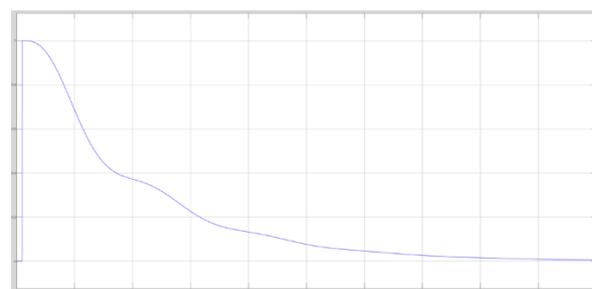


Рисунок А.70 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{b}\underline{c}$

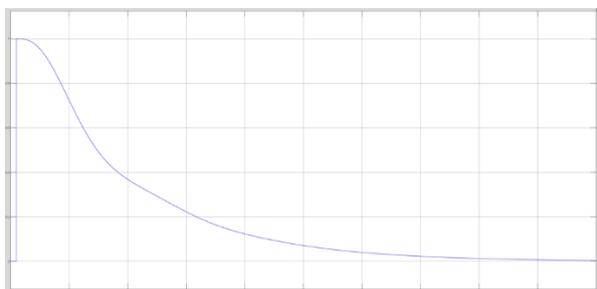


Рисунок А.71 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}c$

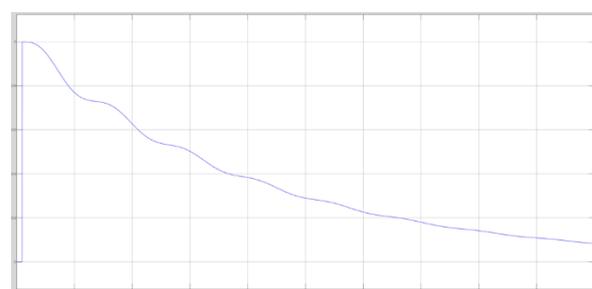


Рисунок А.72 – Переходный процесс при параметрах: kbc

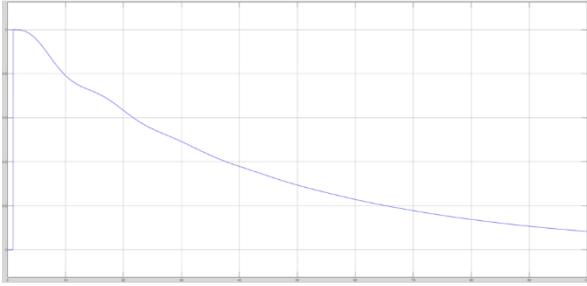


Рисунок А.73 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{b}\bar{c}$

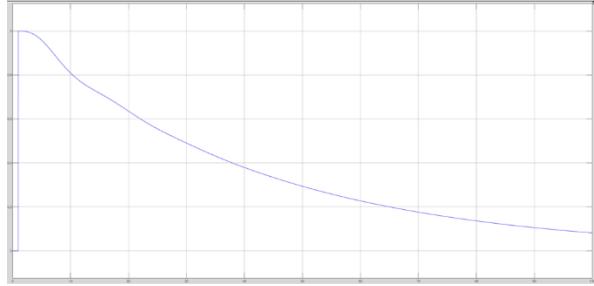


Рисунок А.74 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}\bar{c}$

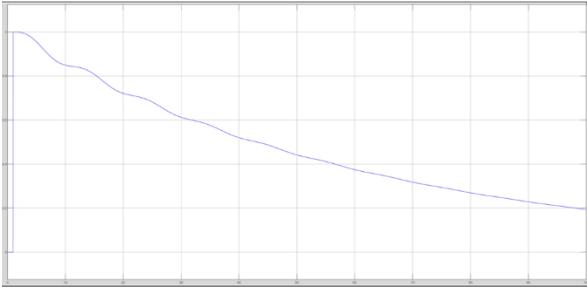


Рисунок А.75 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}\bar{c}$

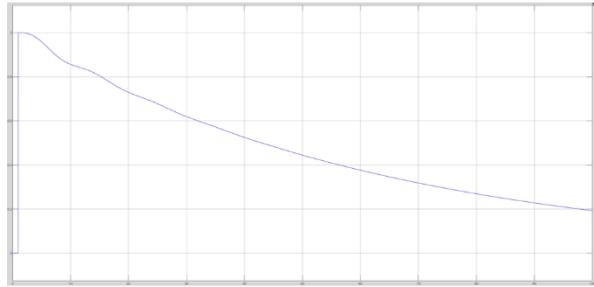


Рисунок А.76 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{b}\bar{c}$



Рисунок А.77 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}bc$

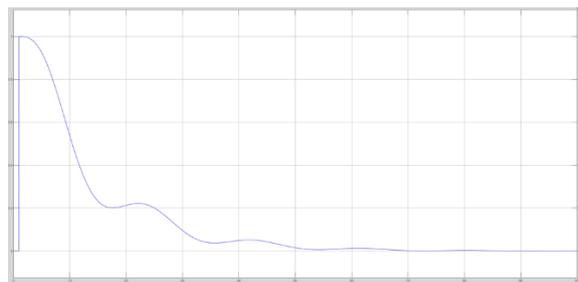


Рисунок А.78 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}bc$

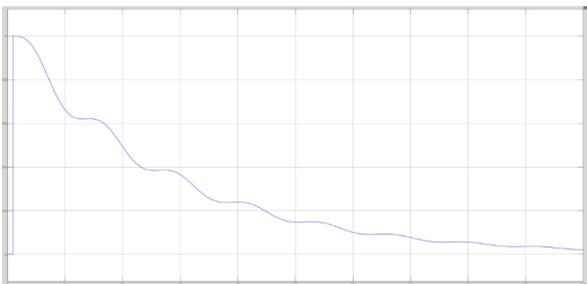


Рисунок А.79 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}bc$

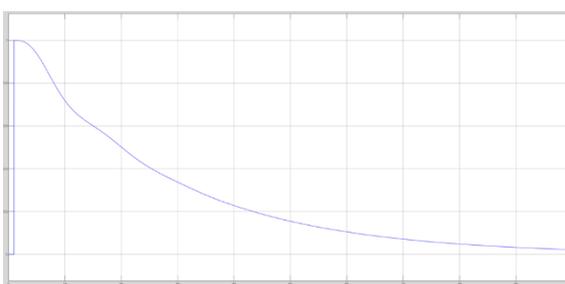


Рисунок А.80 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\bar{b}\bar{c}$

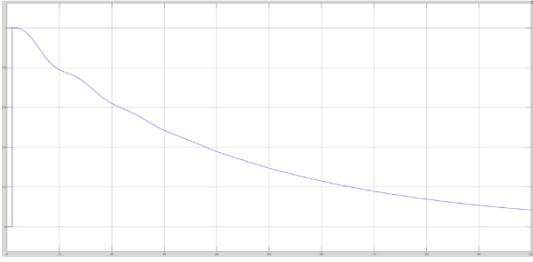


Рисунок А.81 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\bar{b}\bar{c}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчет настроек поисковым методом для SiSo объектов

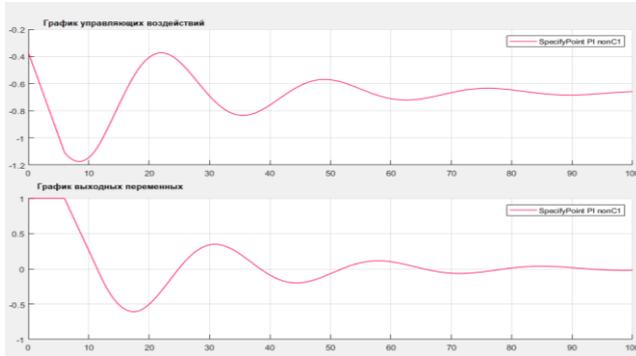


Рисунок Б.1 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT\tau}$

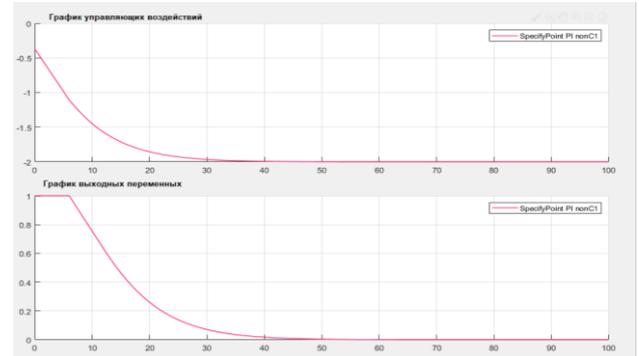


Рисунок Б.2 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT\tau}$

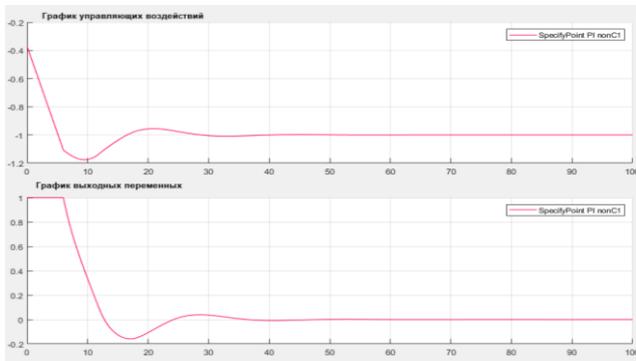


Рисунок Б.4 – Переходный процесс при параметрах: $k\overline{T\tau}$

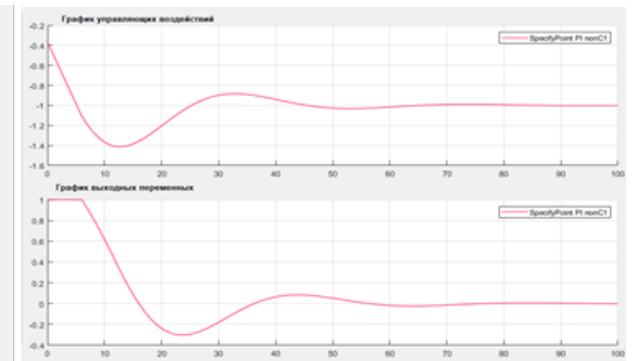


Рисунок Б.3 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{T\tau}$

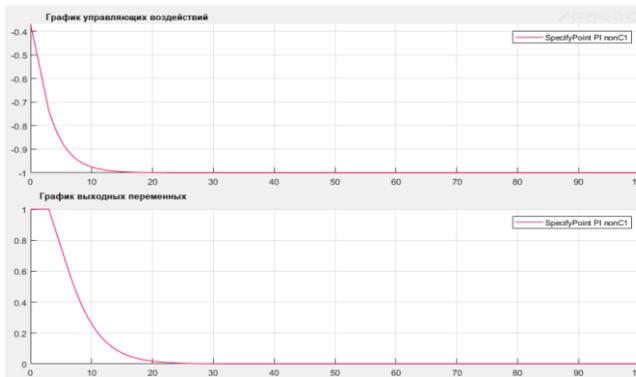


Рисунок Б.5 – Переходный процесс при параметрах: $kT\underline{\tau}$

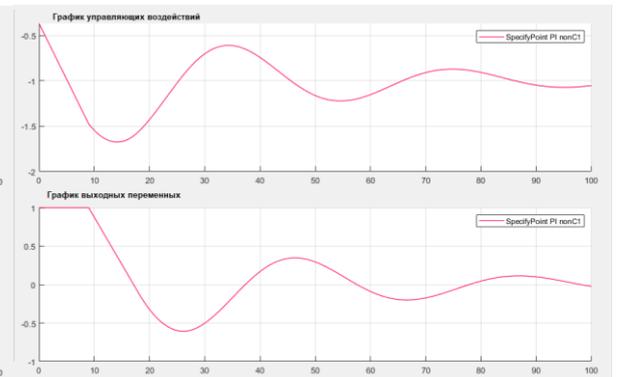


Рисунок Б.6 – Переходный процесс при параметрах: $kT\overline{\tau}$

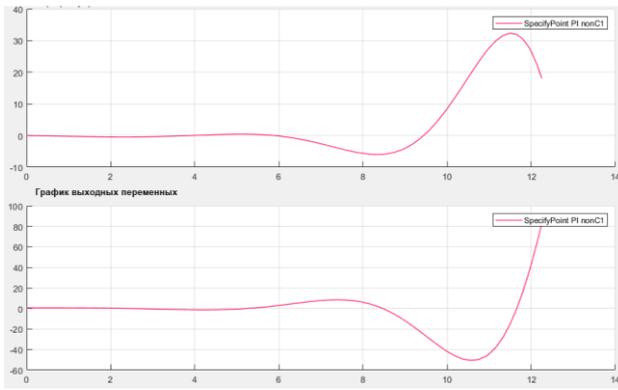


Рисунок Б.7 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}bc$

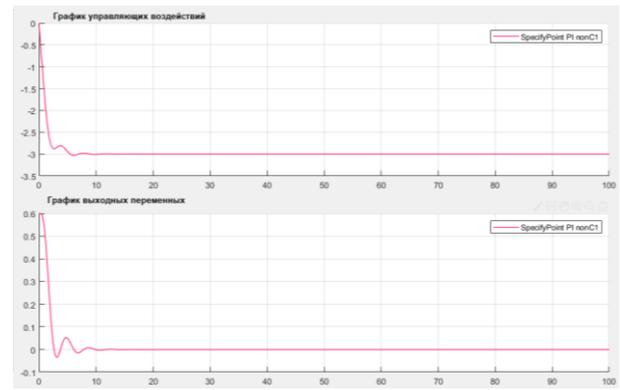


Рисунок Б.8 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k}bc$

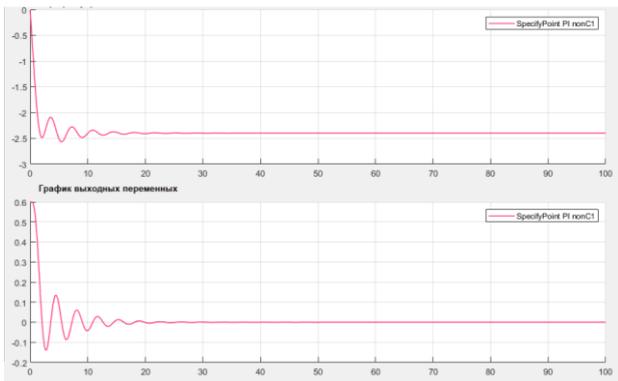


Рисунок Б.9 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{bc}$

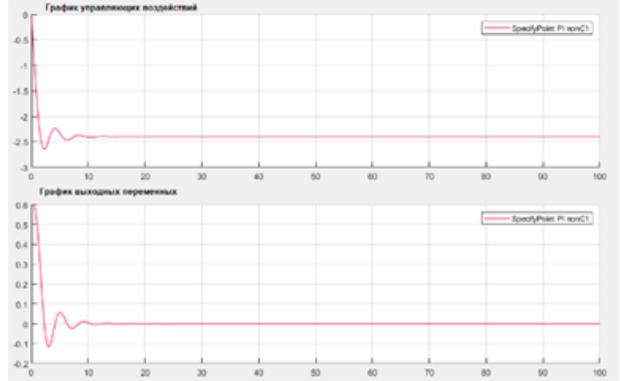


Рисунок Б.10 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{bc}$

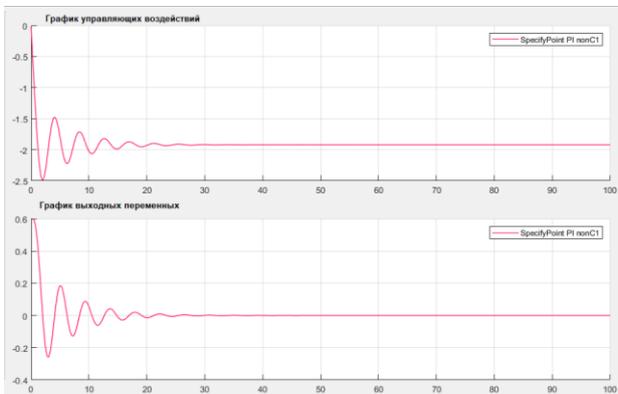


Рисунок Б.11 – Переходный процесс при параметрах: $kb\underline{c}$

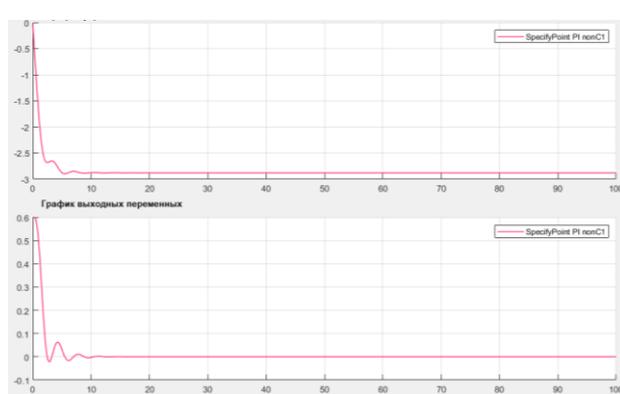


Рисунок Б.12 – Переходный процесс при параметрах: $kb\bar{c}$

Таблица Б.1 – Значения ИКК

Параметры	$\underline{k}bc$	$\underline{k}\bar{bc}$	$\underline{k}\bar{b}\bar{c}$	$\underline{k}\bar{b}\bar{c}$	$\bar{k}bc$	$\bar{k}bc$	$\bar{k}\bar{b}\bar{c}$	$\bar{k}\bar{b}\bar{c}$	$\bar{k}bc$
ИКК	0.0067	0.0071	0.0092	0.0094	0.0051	0.0053	0.0064	0.0066	0.0069
Параметры	$\underline{k}bc$	$\underline{k}bc$	$\underline{k}\bar{bc}$	$\underline{k}\bar{b}\bar{c}$	$\underline{k}bc$	$\underline{k}bc$	$\underline{k}\bar{bc}$	$\underline{k}bc$	$\underline{k}bc$
ИКК	0.0079	0.0080	0.0082	0.0093	0.0057	0.0058	0.0060	0.0065	0.0067
Параметры	$\bar{k}bc$	$\bar{k}\bar{bc}$	$\bar{k}b\bar{c}$	$\bar{k}\bar{b}\bar{c}$	$\bar{k}bc$	$\bar{k}bc$	$\bar{k}bc$	$\bar{k}bc$	$\bar{k}b\bar{c}$
ИКК	0.0068	0.0075	0.0076	0.0077	0.0052	0.0056	0.0058	0.0059	0.0065

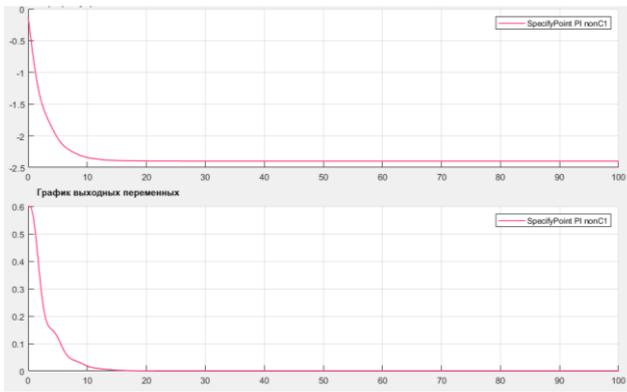


Рисунок Б.13 – Переходный процесс при параметрах: \underline{kbc}

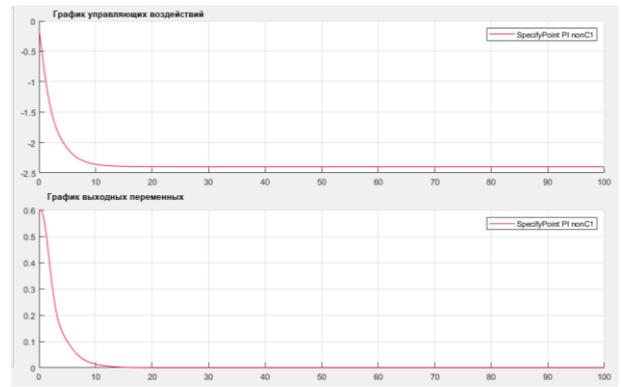


Рисунок Б.14 – Переходный процесс при параметрах: \overline{kbc}

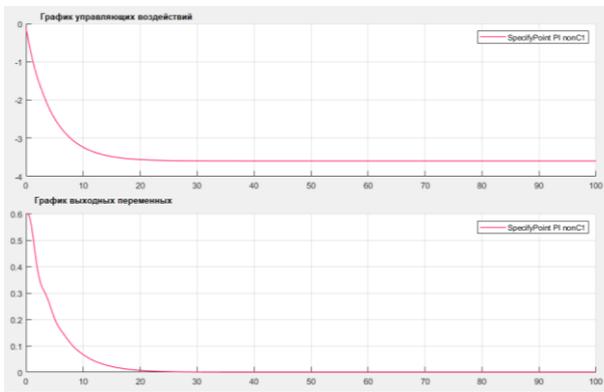


Рисунок Б.15 – Переходный процесс при параметрах: \overline{kbc}

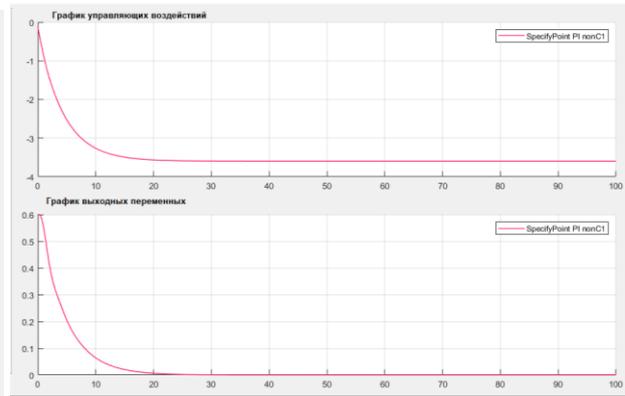


Рисунок Б.16 – Переходный процесс при параметрах: \overline{kbc}

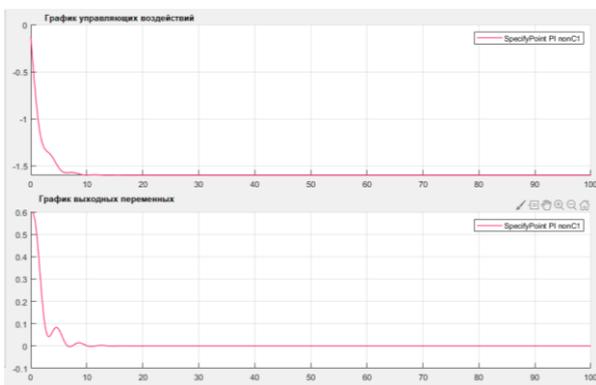


Рисунок Б.17 – Переходный процесс при параметрах: \overline{kbc}

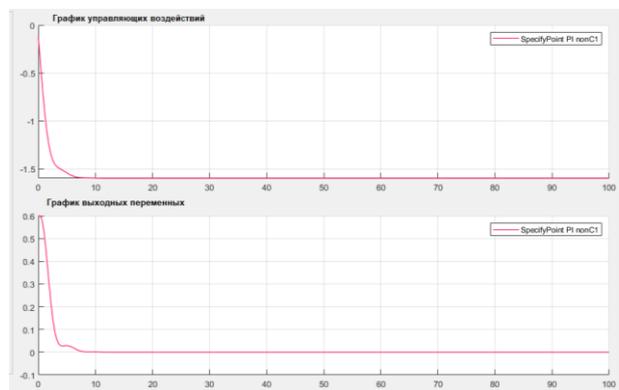


Рисунок Б.18 – Переходный процесс при параметрах: \overline{kbc}

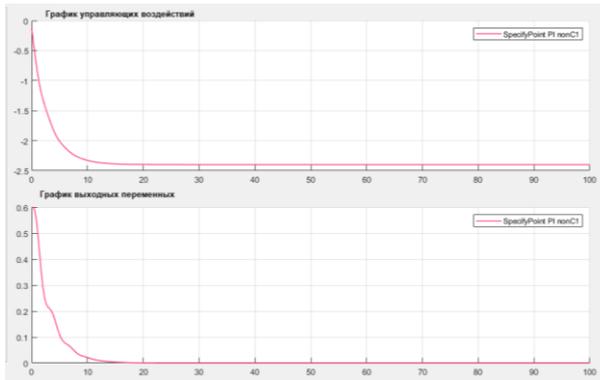


Рисунок Б.19 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\bar{b}\bar{c}$

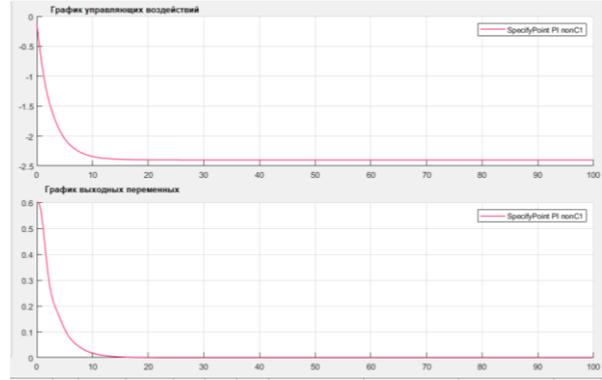


Рисунок Б.20 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\bar{b}\bar{c}$

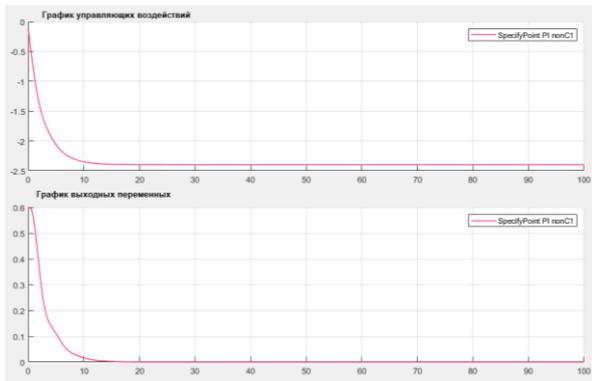


Рисунок Б.21 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k}\underline{b}\underline{c}$

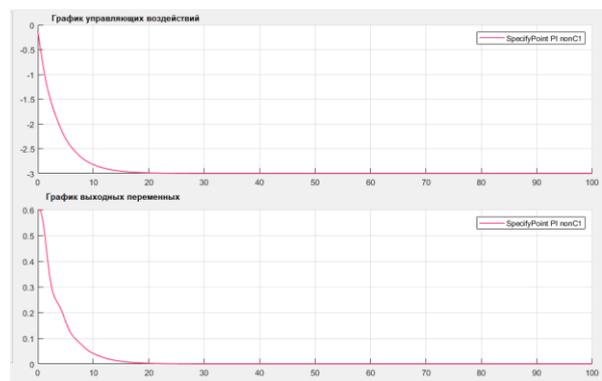


Рисунок Б.22 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k}\underline{b}\underline{c}$

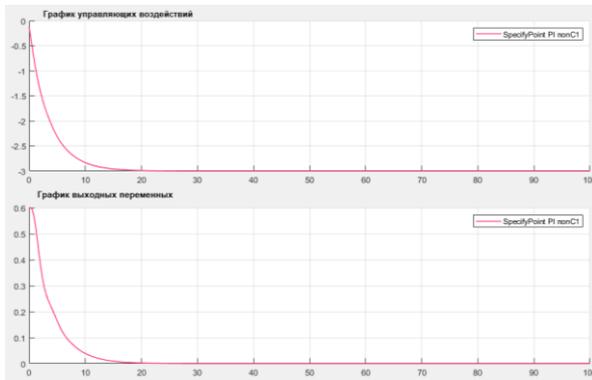


Рисунок Б.23 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k}\underline{b}\underline{c}$

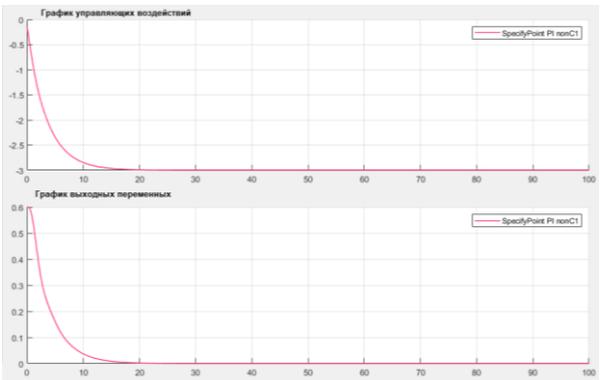


Рисунок Б.24 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k}\bar{b}\bar{c}$

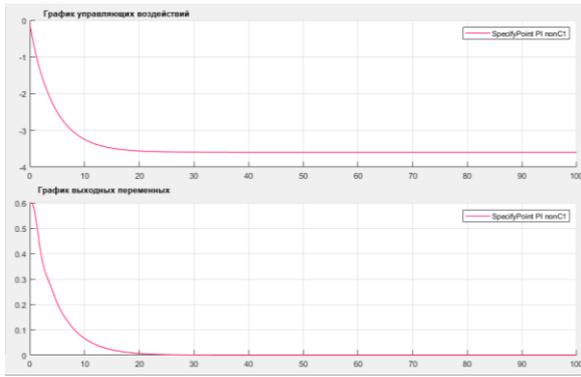


Рисунок Б.25 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{b}\bar{c}$

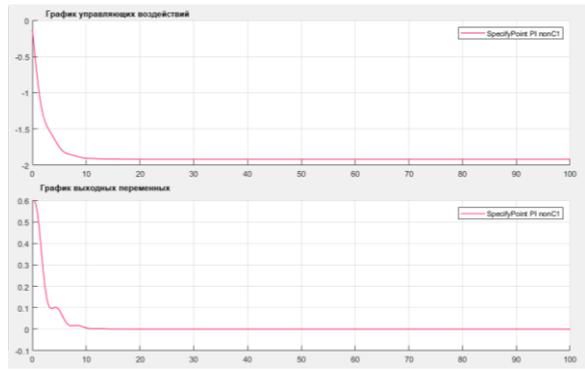


Рисунок Б.26 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}c$

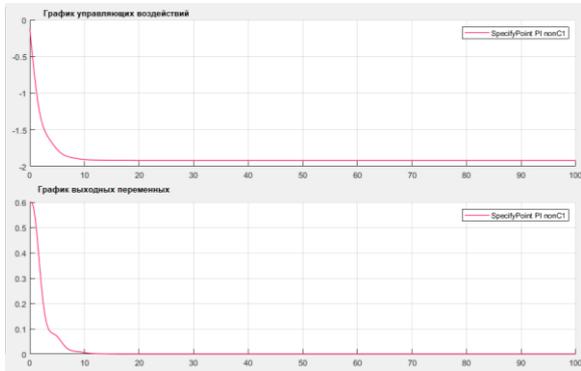


Рисунок Б.27 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}c$

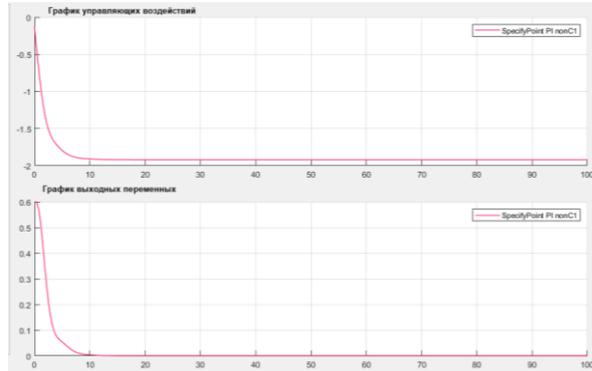


Рисунок Б.28 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{b}c$

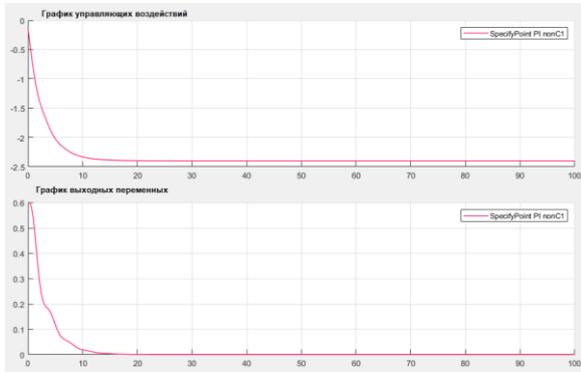


Рисунок Б.29 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}c$

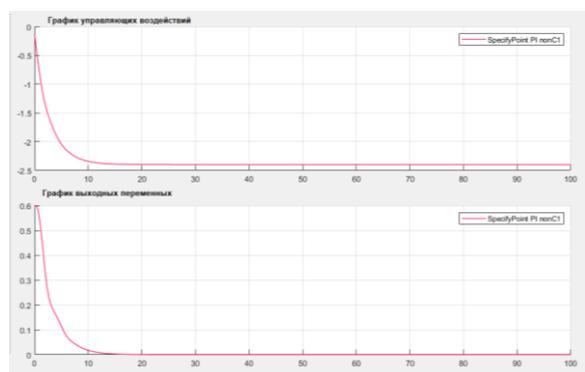


Рисунок Б.30 – Переходный процесс при параметрах: kbc

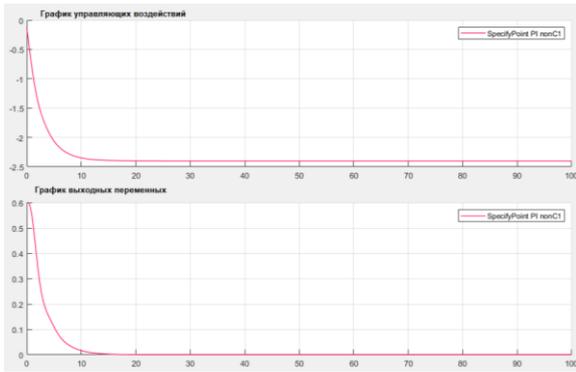


Рисунок Б.31 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{b}\bar{c}$

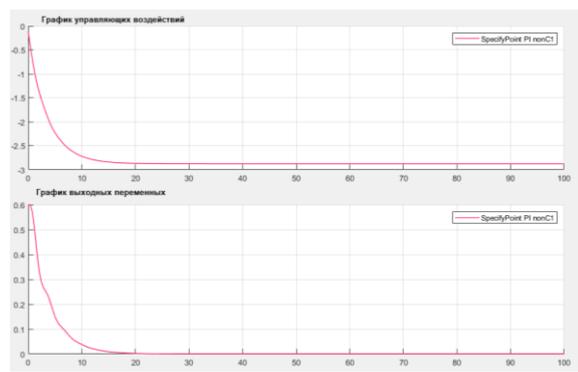


Рисунок Б.32 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}\bar{c}$

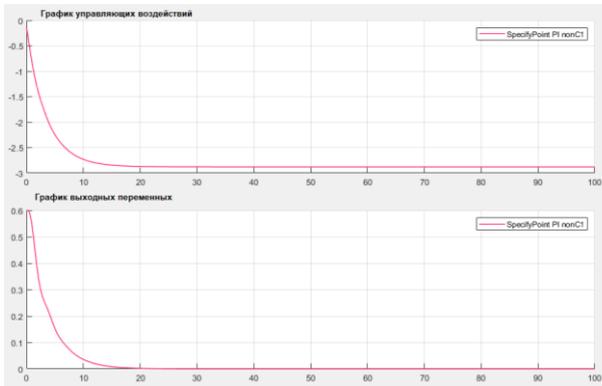


Рисунок Б.33 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{b}\underline{c}$

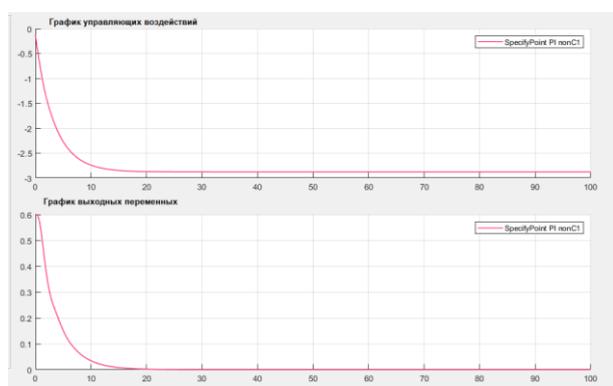


Рисунок Б.34 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}\underline{c}$

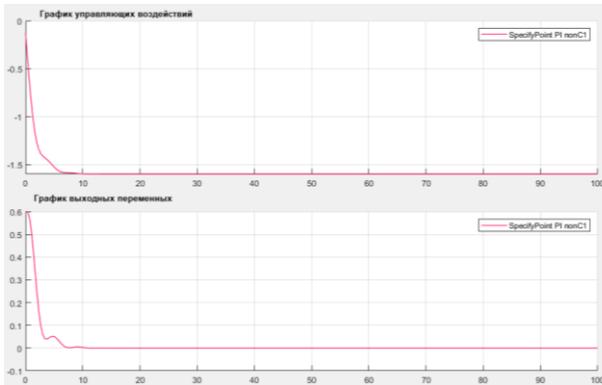


Рисунок Б.35 – Переходный процесс при параметрах: $k\bar{b}\underline{c}$

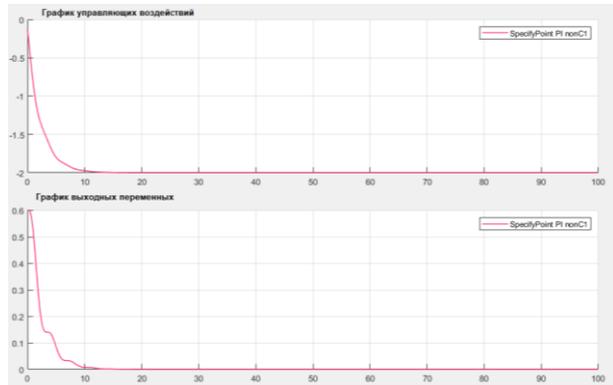


Рисунок Б.36 – Переходный процесс при параметрах: $k\underline{b}\bar{c}$

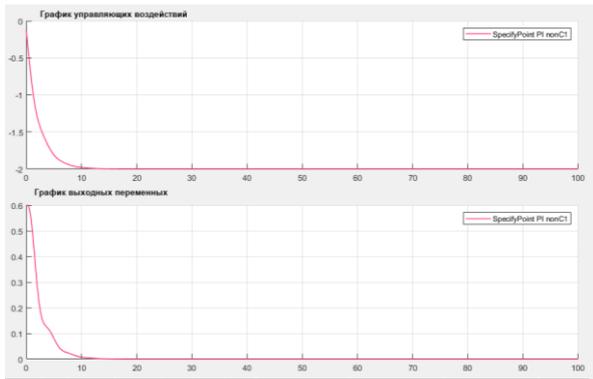


Рисунок Б.37 – Переходный процесс при параметрах: \bar{kbc}

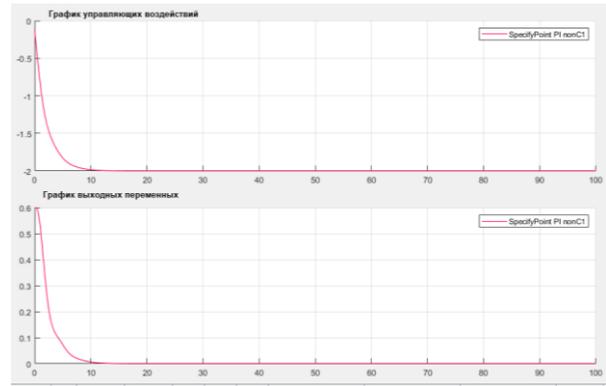


Рисунок Б.38 – Переходный процесс при параметрах: \bar{kbc}

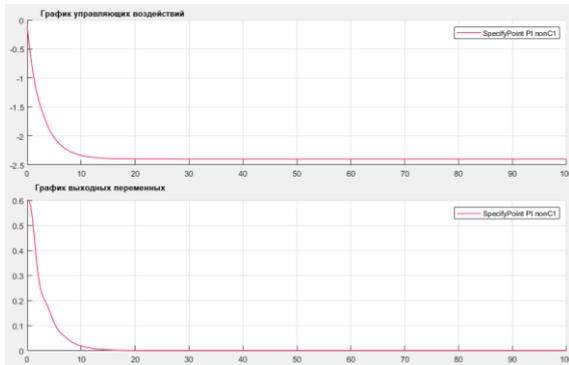


Рисунок Б.39 – Переходный процесс при параметрах: \bar{kbc}

Таблица Б.2 – Результаты поиска

k_i	0.00278	0.00281	0.00284	0.00286	0.00289	0.00292	0.00295	0.00297	0.003
ИКК	0.0827	0.0823	0.0818	0.0813	0.0809	0.0805	0.0801	0.0797	0.0793
k_i	0.00303	0.00306	0.00309	0.00311	0.00314	0.00317	0.0032	0.00322	0.00325
ИКК	0.0789	0.0785	0.0781	0.0778	0.0775	0.0771	0.0768	0.0765	0.0762
k_i	0.00328	0.00331	0.00334	0.00336	0.00339	0.00342	0.00345	0.00347	0.0035
ИКК	0.0759	0.0756	0.0754	0.0751	0.0748	0.0746	0.0744	0.0741	0.0739
k_i	0.00353	0.00356	0.00359	0.00361	0.00364	0.00367	0.0037	0.00372	0.00375
ИКК	0.0737	0.0735	0.0733	0.0731	0.073	0.0728	0.0726	0.0725	0.0723
k_i	0.00378	0.00381	0.00384	0.00386	0.00389	0.00392	0.00395	0.00397	0.004
ИКК	0.0722	0.0721	0.0719	0.0718	0.0717	0.0716	0.0715	0.0715	0.0714
k_i	0.00403	0.00406	0.00409	0.00411	0.00414	0.00417	0.00420	0.00423	0.00425
ИКК	0.0713	0.0713	0.0712	0.0712	0.0711	0.0711	0.0711	0.0711	0.0711
k_i	0.00428	0.00431	0.00434	0.00436	0.00439	0.00442	0.00445	0.00448	0.0045
ИКК	0.0711	0.0711	0.0712	0.0712	0.0712	0.0713	0.0714	0.0715	0.0716
k_i	0.00453	0.00456	0.00459	0.00461	0.00464	0.00467	0.0047	0.00473	0.00475
ИКК	0.0717	0.0718	0.0719	0.0721	0.0722	0.0724	0.0725	0.0727	0.0729
k_i	0.00478	0.00481	0.00484	0.00486	0.00489	0.00492	0.00495	0.00498	0.005
ИКК	0.0731	0.0733	0.0735	0.0738	0.074	0.0743	0.0746	0.0749	0.0752
k_i	0.00503	0.00506	0.00509	0.00511	0.00514	0.00517	0.0052	0.00523	0.00525
ИКК	0.0755	0.0758	0.0762	0.0766	0.077	0.0774	0.0778	0.0783	0.0788
k_i	0.00528	0.00531	0.00534	0.00536	0.00539	0.00542	0.00545	0.00548	0.0055
ИКК	0.0793	0.0793	0.0798	0.0803	0.0809	0.0815	0.0821	0.0828	0.0834

Продолжение таблицы Б.2

k_i	0.00553	0.00556	-	-	-	-	-	-	-
ИКК	0.0842	0.0849	-	-	-	-	-	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Расчет регулятора методом МЧ для SiSo объектов

Таблица В.1 – Разность ИКК

Параметр	ИКК	Разность
\bar{k}	0.0196	28.46%
\underline{k}	0.0343	25.18%
\bar{T}_1	0.0292	6.56%
\underline{T}_1	0.0168	38.6%
\bar{T}_2	0.0293	6.93%
\underline{T}_2	0.0163	40.51%

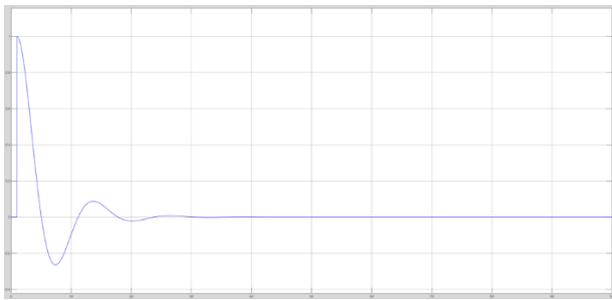
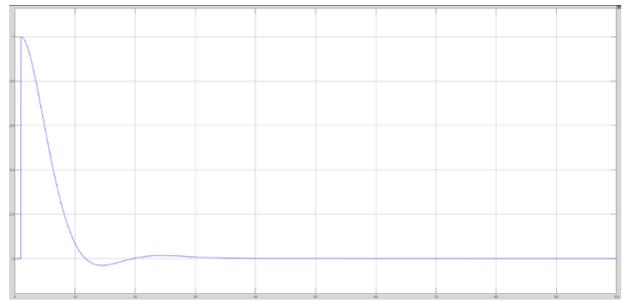
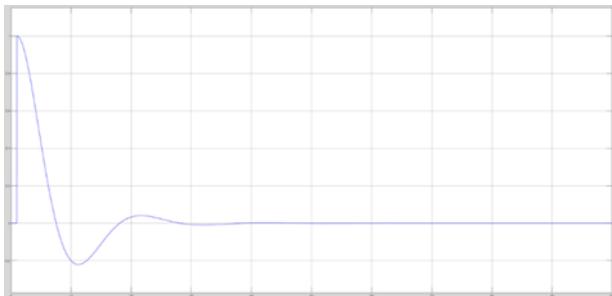
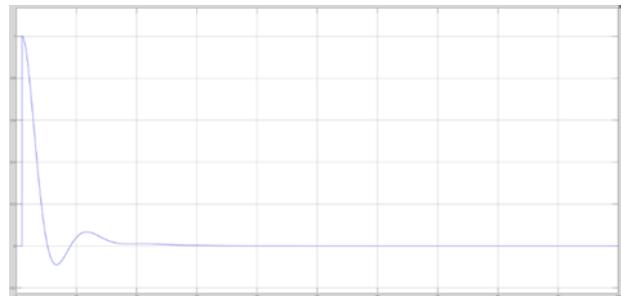
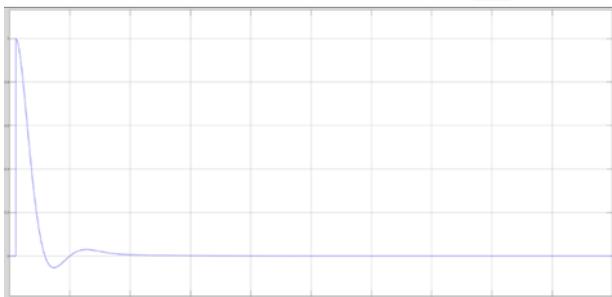
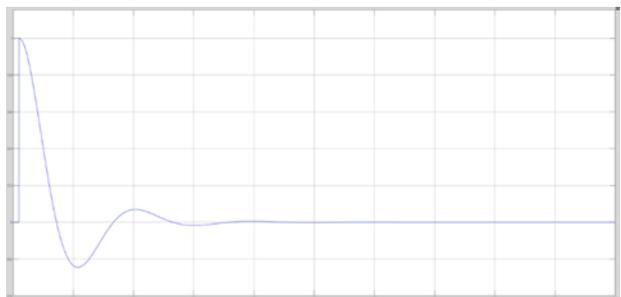
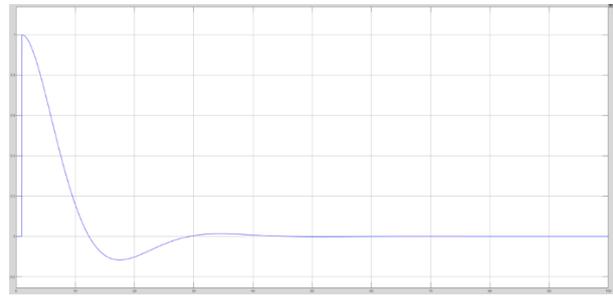
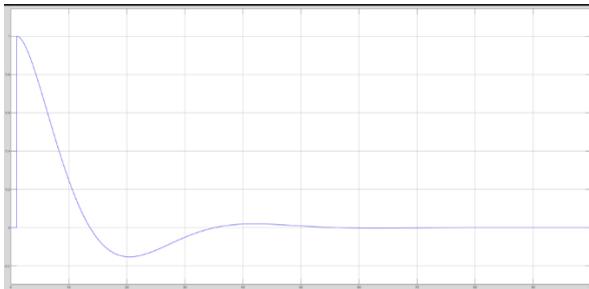
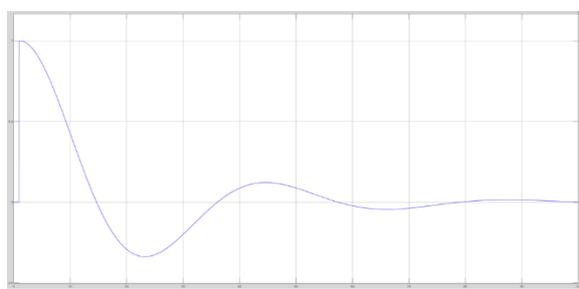
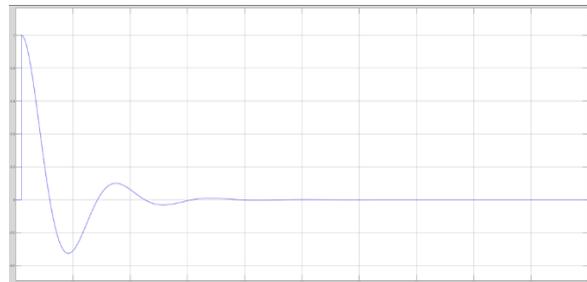
Рисунок В.1 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}T_1T_2$ Рисунок В.2 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k}T_1T_2$ Рисунок В.3 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\underline{T}_1T_2$ Рисунок В.4 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\bar{T}_1T_2$ Рисунок В.5 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k}\underline{T}_1T_2$ Рисунок В.6 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{k}\bar{T}_1T_2$

Таблица В.2 – Параметры робастного регулятора

Возмущение	ИКК	Время регулирования, с	k_p	k_i	Время расчета, с
[1]	0.0180	7.8	1.28	0.418	42

Таблица В.3 – Значения ИКК

Параметры	$\underline{kT_1T_2}$	$\overline{kT_1T_2}$	$\underline{kT_1\overline{T_2}}$	$\overline{kT_1\overline{T_2}}$	$\underline{\overline{kT_1T_2}}$	$\overline{\overline{kT_1T_2}}$	$\underline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$	$\overline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$	$\underline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$
ИКК	0.0292	0.0430	0.0484	0.0749	0.0138	0.0263	0.0275	0.0699	0.0361
Параметры	$\underline{kT_1T_2}$	$\overline{kT_1T_2}$	$\underline{kT_1\overline{T_2}}$	$\overline{kT_1\overline{T_2}}$	$\underline{\overline{kT_1T_2}}$	$\overline{\overline{kT_1T_2}}$	$\underline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$	$\overline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$	$\underline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$
ИКК	0.0389	0.0485	0.0587	0.0609	0.0176	0.0242	0.0306	0.0256	0.0365
Параметры	$\underline{\overline{kT_1T_2}}$	$\overline{\overline{kT_1T_2}}$	$\underline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$	$\overline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$	$\underline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$	$\overline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$	$\underline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$	$\overline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$	$\underline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$
ИКК	0.0487	0.0334	0.0487	0.0687	0.0202	0.0208	0.0324	0.0463	0.0446

Рисунок В.7 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$ Рисунок В.8 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{\overline{kT_1T_2}}$ Рисунок В.9 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT_1T_2}$ Рисунок В.10 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{\overline{kT_1T_2}}$ Рисунок В.11 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$ Рисунок В.12 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{\overline{kT_1\overline{T_2}}}$

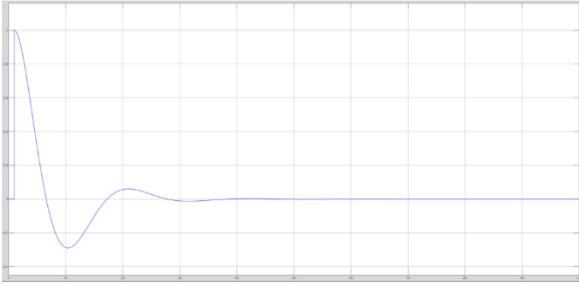


Рисунок В.13 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT_1T_2}$

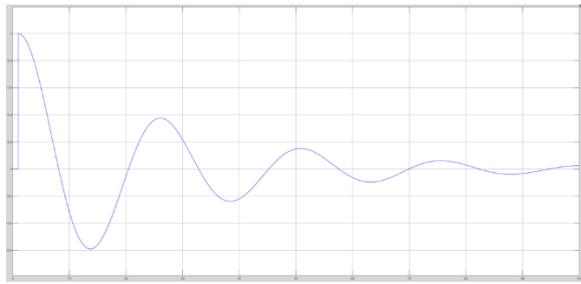


Рисунок В.14 – Переходный процесс при параметрах: $\overline{kT_1T_2}$

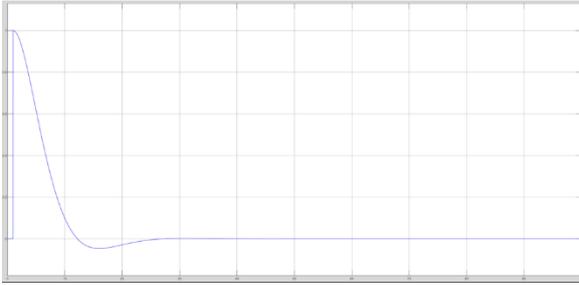


Рисунок В.15 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

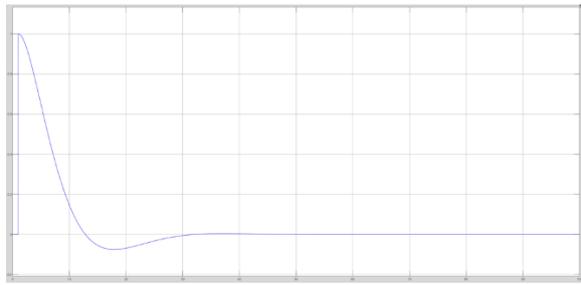


Рисунок В.16 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

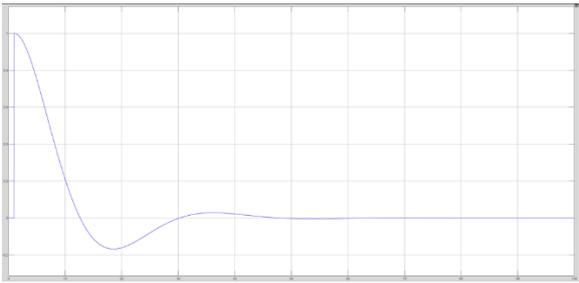


Рисунок В.17 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

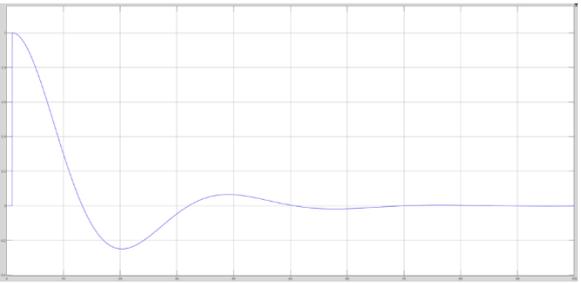


Рисунок В.18 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

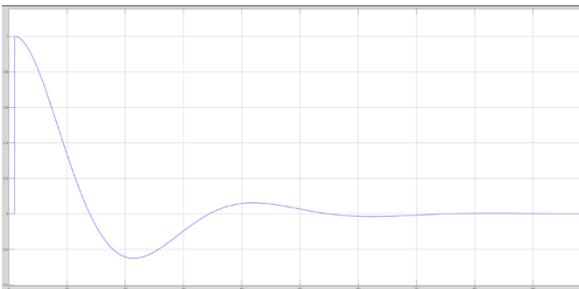


Рисунок В.19 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$



Рисунок В.20 – Переходный процесс при параметрах: $\underline{kT_1T_2}$

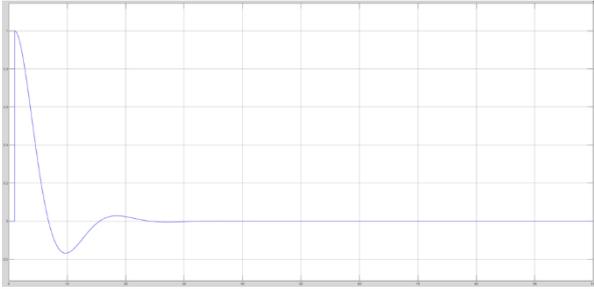


Рисунок В.21 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

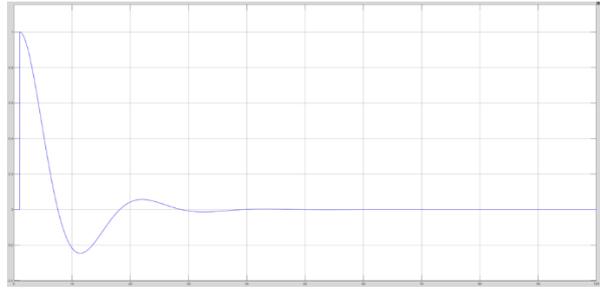


Рисунок В.22 – Переходный процесс при параметрах: $k\overline{T}_1T_2$

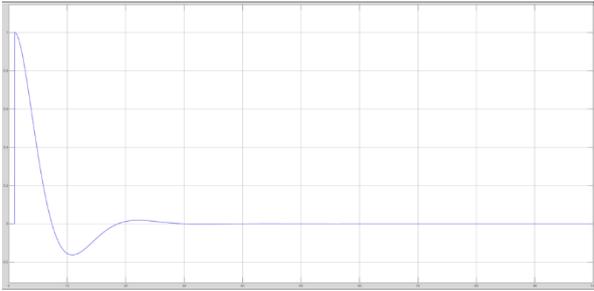


Рисунок В.23 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

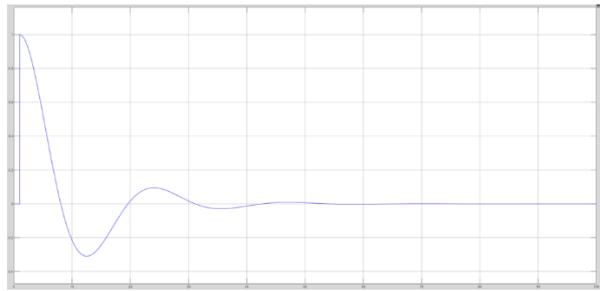


Рисунок В.24 – Переходный процесс при параметрах: kT_1T_2

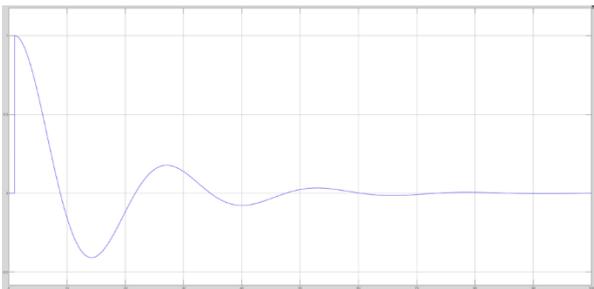


Рисунок В.25 – Переходный процесс при параметрах: $k\overline{T}_1T_2$

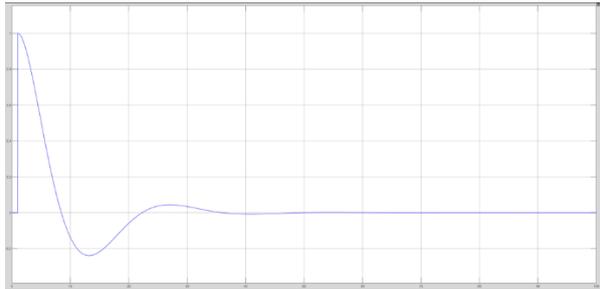


Рисунок В.26 – Переходный процесс при параметрах: $kT_1\overline{T}_2$

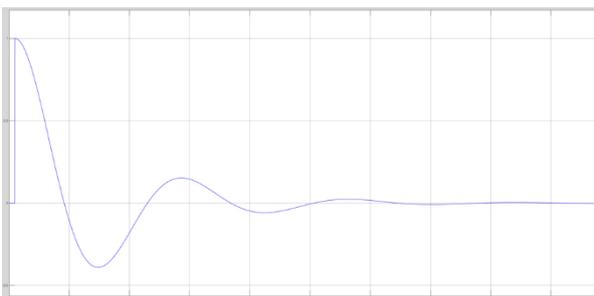


Рисунок В.27 – Переходный процесс при параметрах: $kT_1\overline{T}_2$

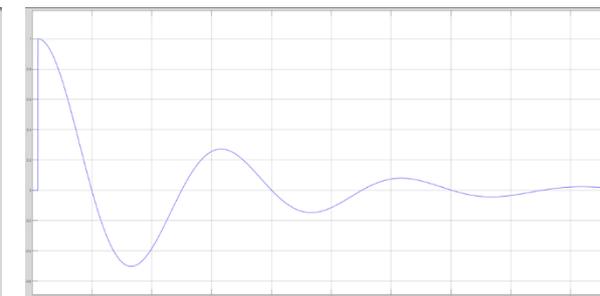


Рисунок В.28 – Переходный процесс при параметрах: $k\overline{T}_1T_2$



Рисунок В.29 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}T_1T_2$

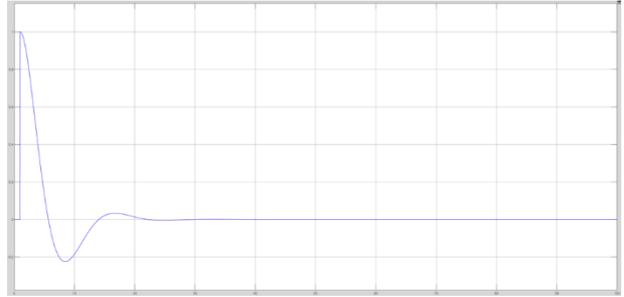


Рисунок В.30 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\underline{T}_1T_2$

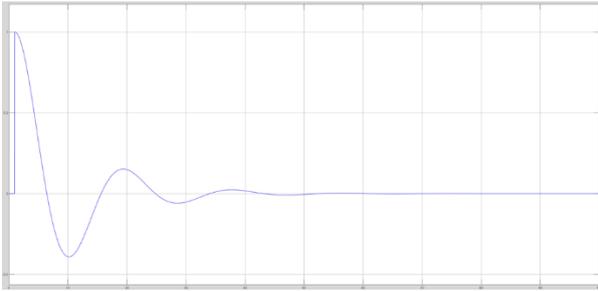


Рисунок В.31 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}T_1T_2$

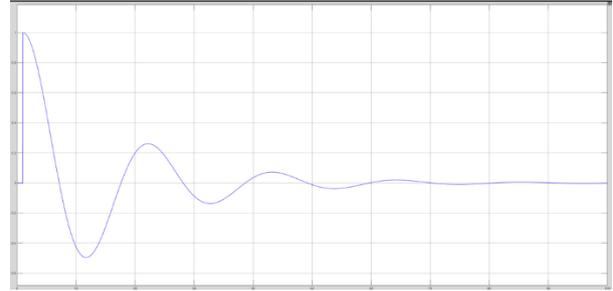


Рисунок В.32 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}\overline{T}_1T_2$

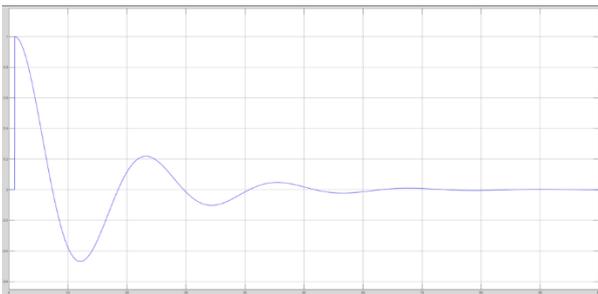


Рисунок В.33 – Переходный процесс при параметрах: $\bar{k}T_1\overline{T}_2$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Сравнение поиска и беспойска для SiSo объектов

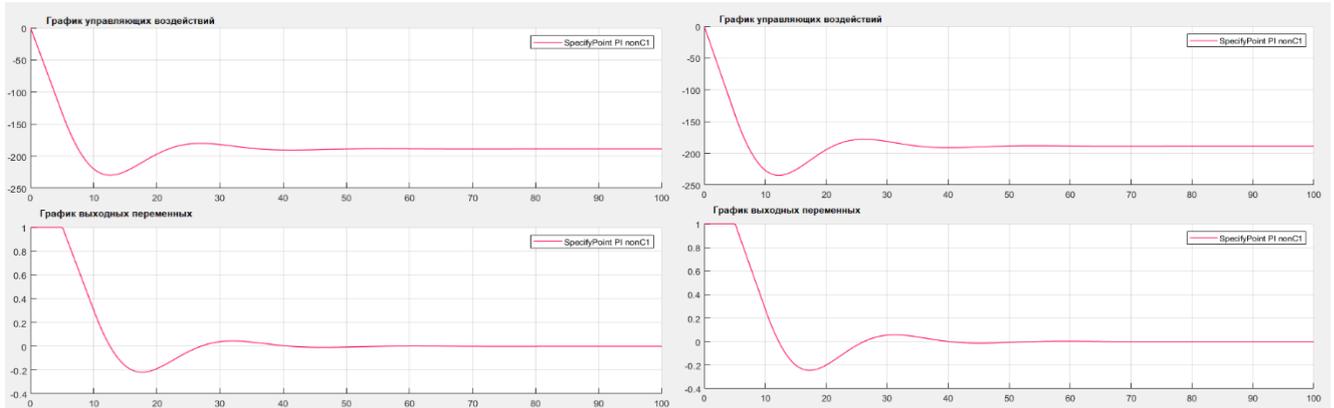


Рисунок Г.1 – Графики переходных процессов по ИКК при $T = 0.5$ (слева – беспойсковый метод, справа – поисковый метод)

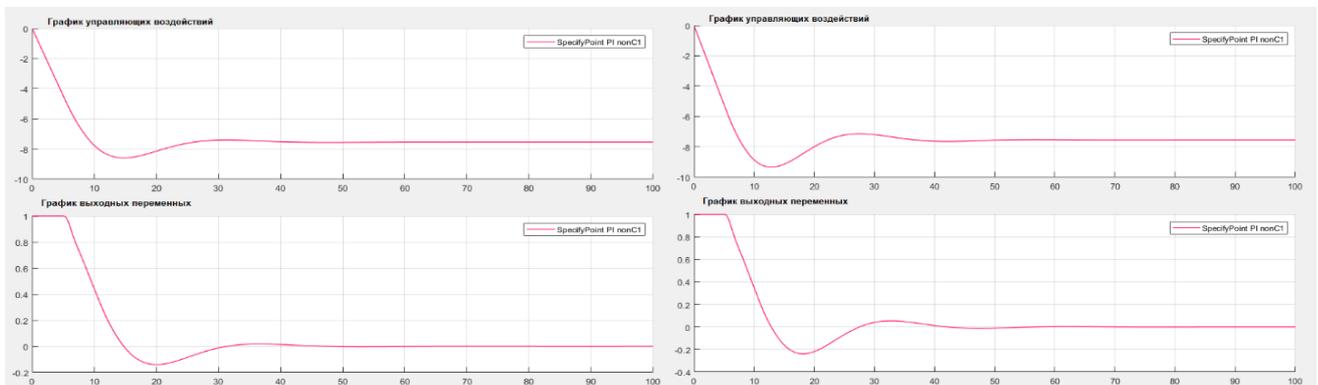


Рисунок Г.2 – Графики переходных процессов по ИКК при $T = 2.5$ (слева – беспойсковый метод, справа – поисковый метод)

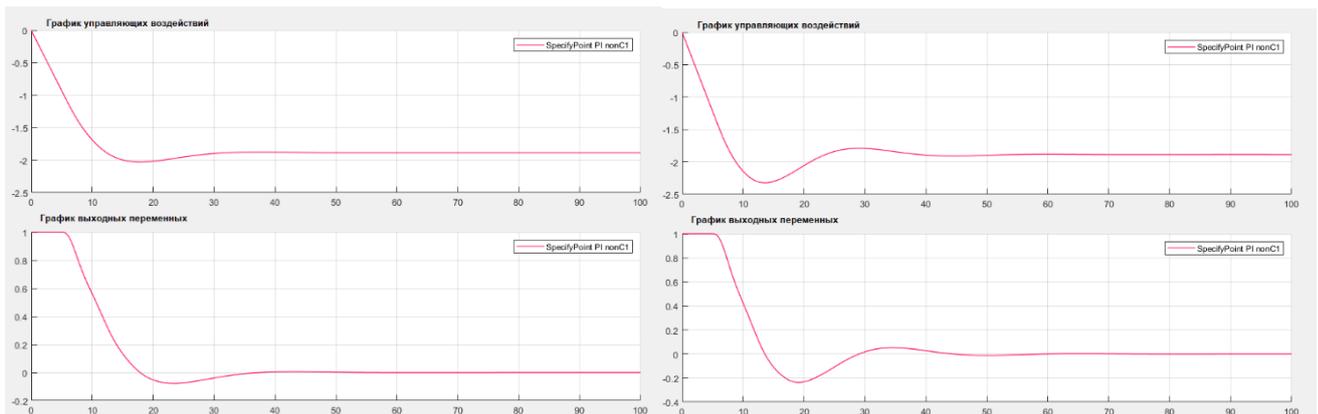


Рисунок Г.3 – Графики переходных процессов по ИКК при $T = 5$ (слева – беспойсковый метод, справа – поисковый метод)

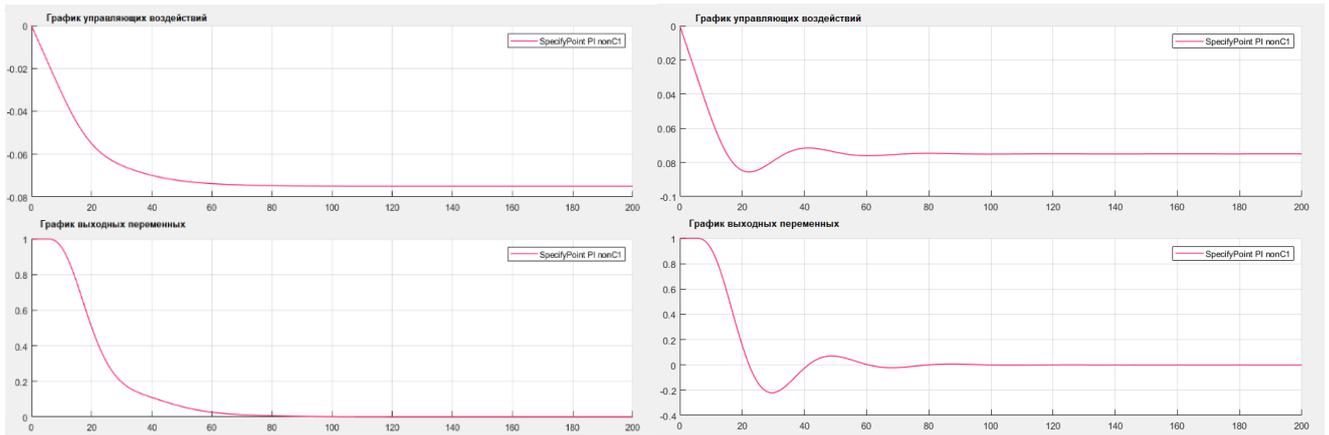


Рисунок Г.4 – Графики переходных процессов по ИКК при $T = 25$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

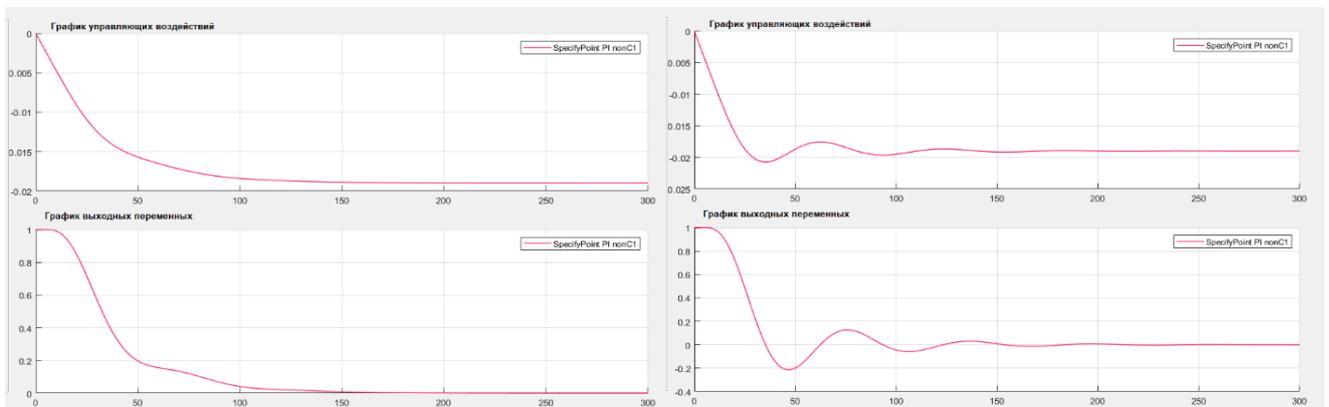


Рисунок Г.5 – Графики переходных процессов по ИКК при $T = 50$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

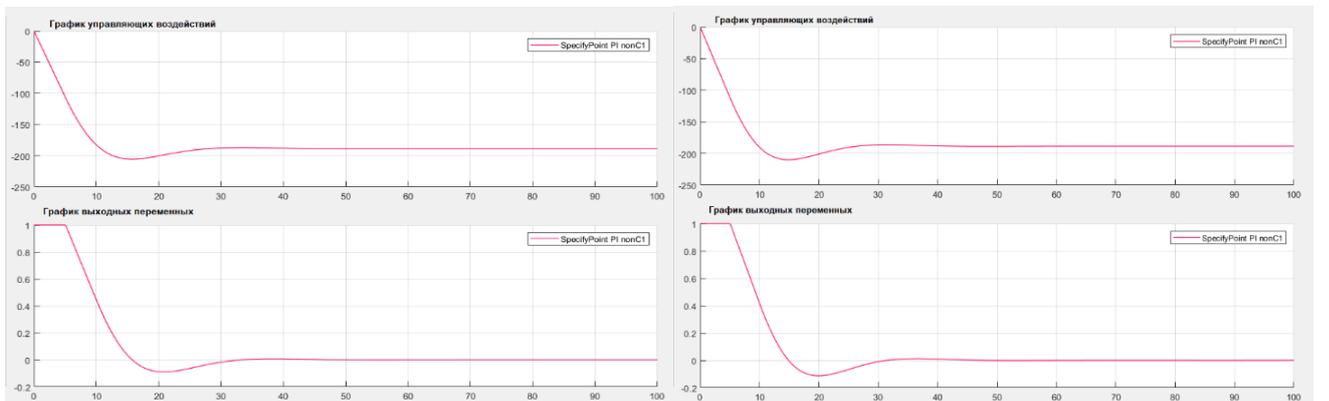


Рисунок Г.6 – Графики переходных процессов по ИМК при $T = 0.5$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

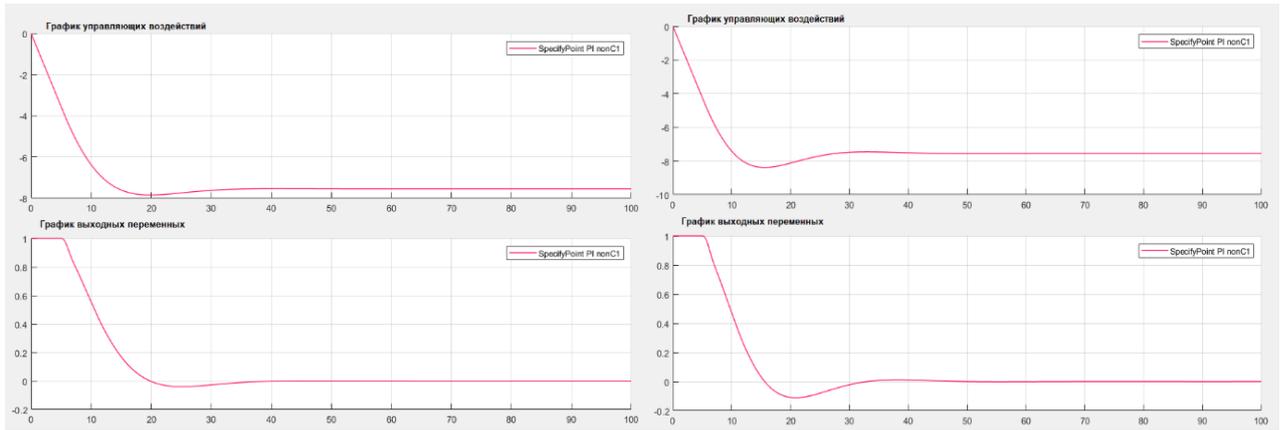


Рисунок Г.7 – Графики переходных процессов по ИМК при $T = 2.5$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

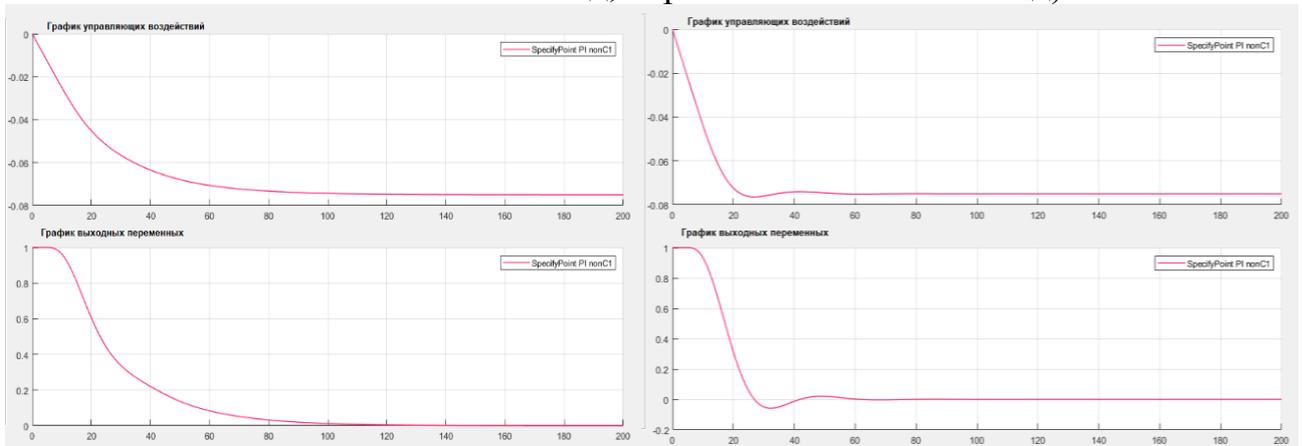


Рисунок Г.8 – Графики переходных процессов по ИМК при $T = 5$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

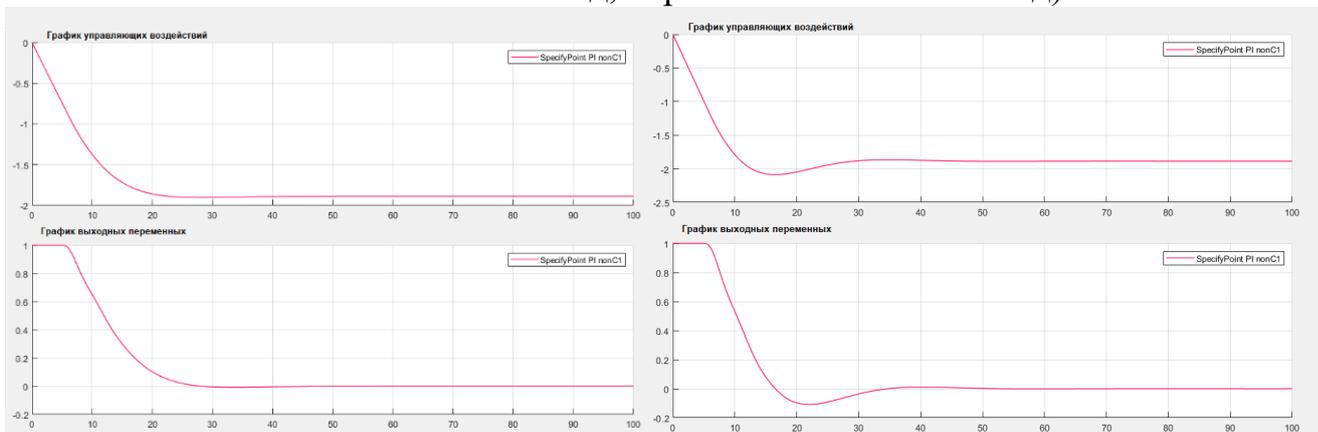


Рисунок Г.9 – Графики переходных процессов по ИМК при $T = 25$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

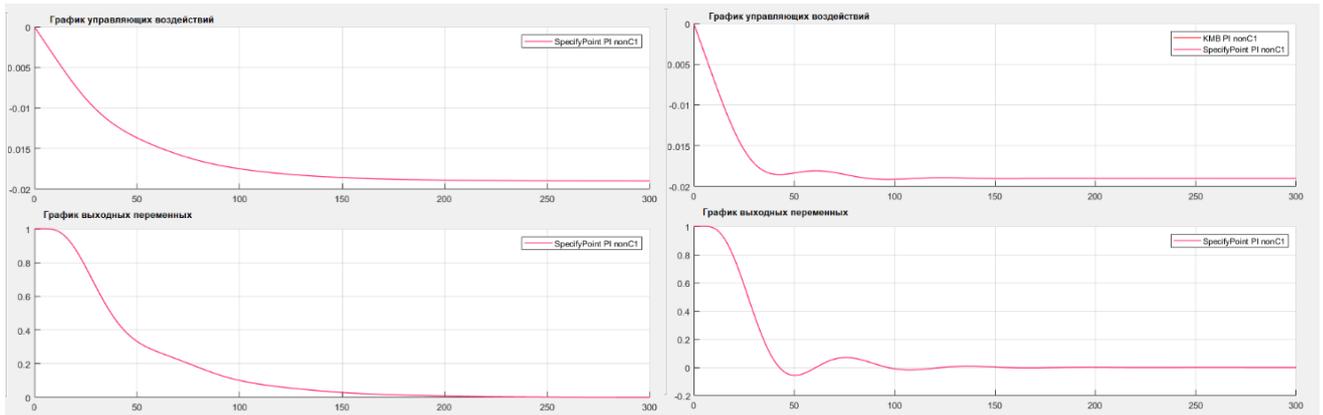


Рисунок Г.10 – Графики переходных процессов по ИМК при $T = 50$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

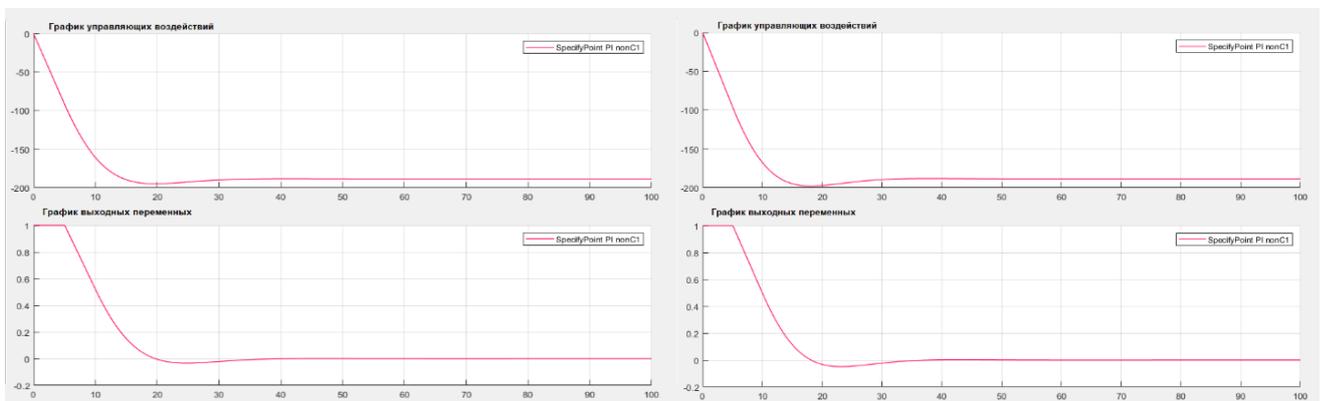


Рисунок Г.11 – Графики переходных процессов по быстродействию при $T = 0.5$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

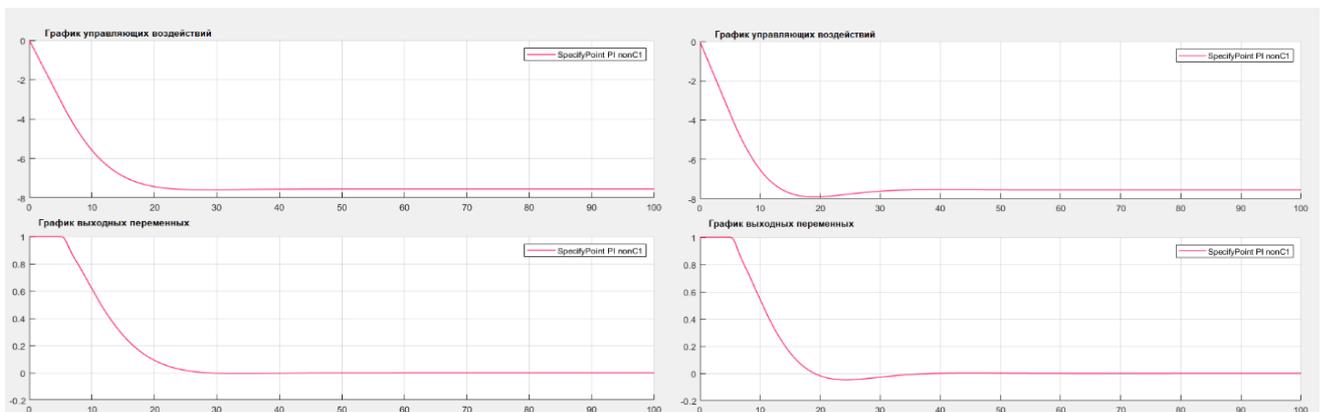


Рисунок Г.12 – Графики переходных процессов по быстродействию при $T = 2.5$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

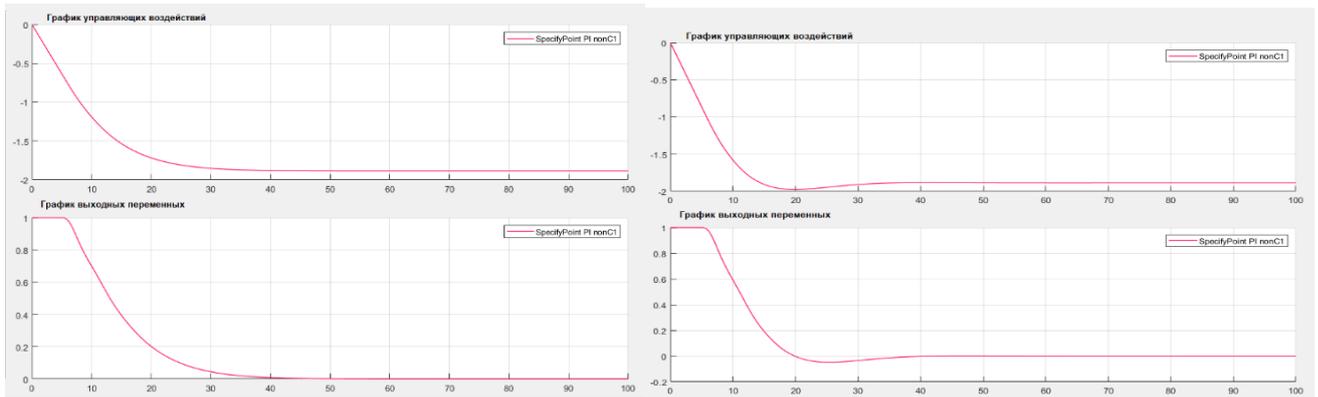


Рисунок Г.13 – Графики переходных процессов по быстродействию при $T = 5$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

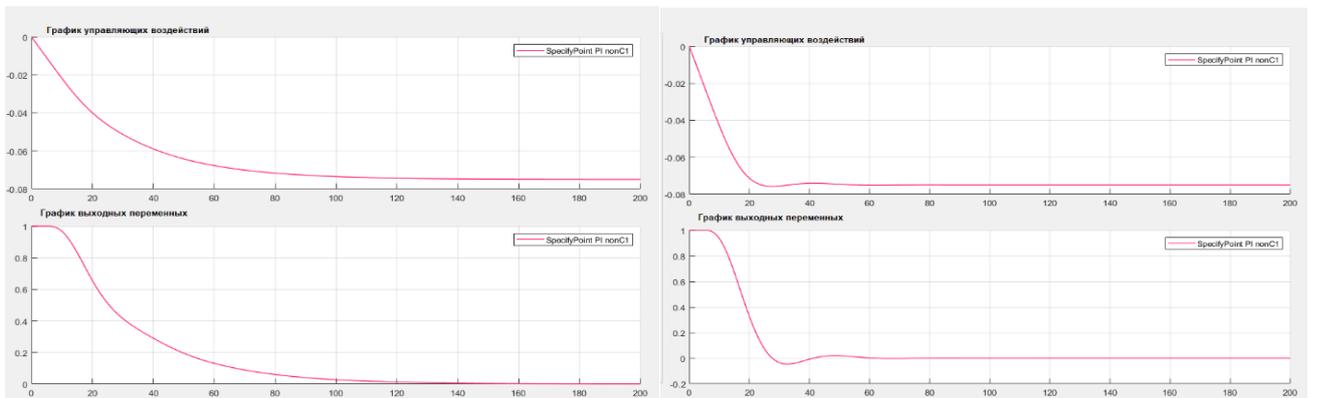


Рисунок Г.14 – Графики переходных процессов по быстродействию при $T = 25$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

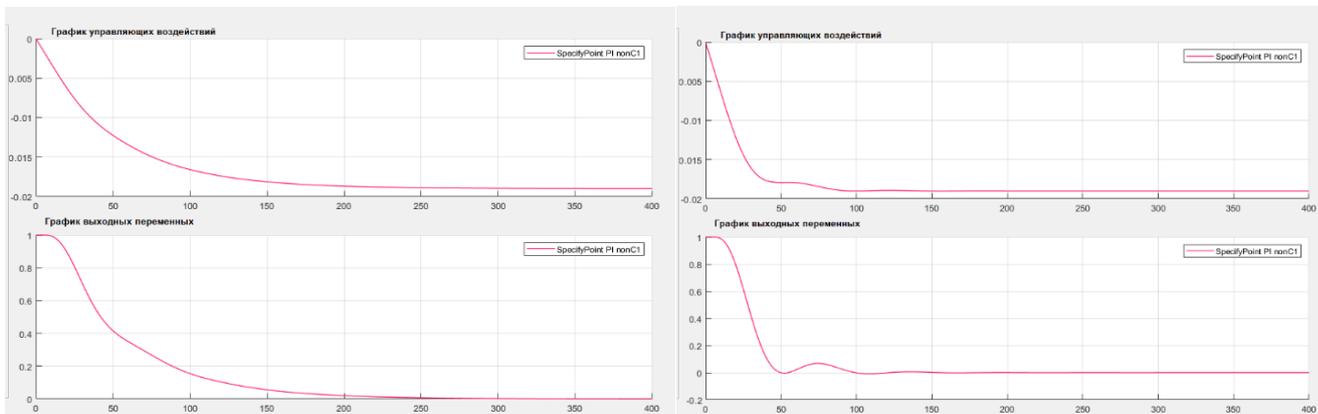


Рисунок Г.15 – Графики переходных процессов по быстродействию при $T = 50$ (слева – беспоисковый метод, справа – поисковый метод)

Таблица Г.1 – Значения ИКК

Параметры	\underline{kbc}	$\underline{k\bar{b}c}$	$\underline{k\bar{b}\bar{c}}$	$\underline{k\bar{b}\bar{c}}$	$\underline{\bar{k}bc}$	$\underline{\bar{k}bc}$	$\underline{\bar{k}\bar{b}\bar{c}}$	$\underline{\bar{k}\bar{b}\bar{c}}$	$\underline{\bar{k}bc}$
ИКК	0.3291	0.2245	0.3336	0.3369	52.9	0.2678	0.2642	0.1977	0.2227
Параметры	\underline{kbc}	\underline{kbc}	$\underline{k\bar{b}c}$	$\underline{k\bar{b}\bar{c}}$	$\underline{\bar{k}bc}$	$\underline{\bar{k}bc}$	$\underline{\bar{k}\bar{b}\bar{c}}$	$\underline{\bar{k}\bar{b}c}$	$\underline{\bar{k}bc}$
ИКК	0.2757	0.2765	0.2795	0.3351	5.499	0.3203	0.2069	0.2828	0.2044
Параметры	$\underline{k\bar{b}c}$	$\underline{k\bar{b}\bar{c}}$	$\underline{\bar{k}bc}$	$\underline{\bar{k}\bar{b}\bar{c}}$	$\underline{\bar{k}\bar{b}c}$	$\underline{\bar{k}bc}$	$\underline{\bar{k}\bar{b}c}$	$\underline{\bar{k}\bar{b}\bar{c}}$	$\underline{\bar{k}\bar{b}\bar{c}}$
ИКК	0.2047	0.2415	0.2372	0.2390	1.4723	1.1953	0.1946	0.1788	0.1979

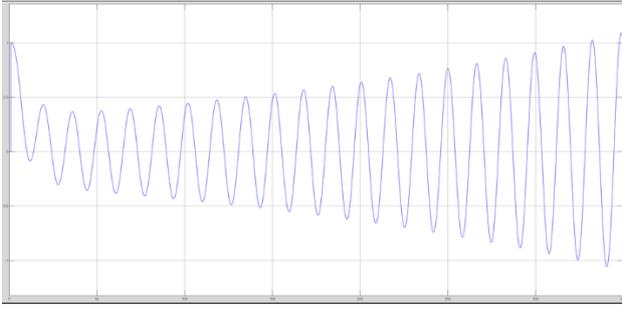


Рисунок Г.16 – Переходный процесс при параметрах: \underline{kbc}

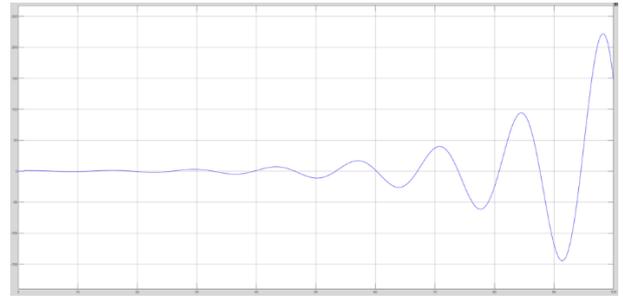


Рисунок Г.17 – Переходный процесс при параметрах: \overline{kbc}

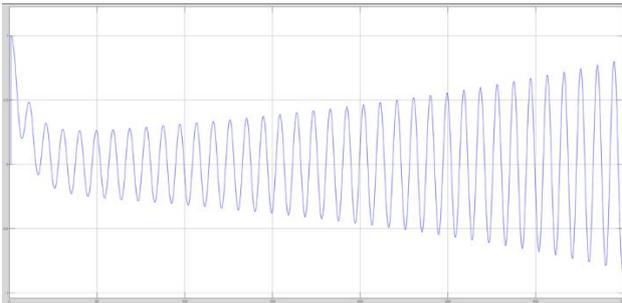


Рисунок Г.18 – Переходный процесс при параметрах: \overline{kbc}

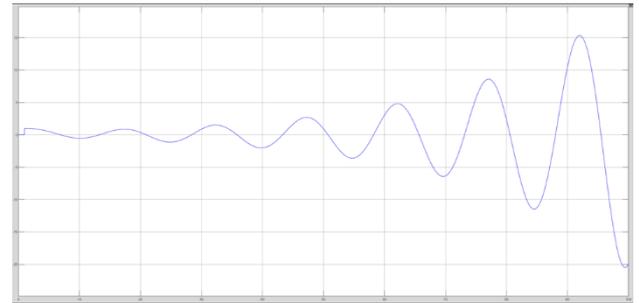


Рисунок Г.19 – Переходный процесс при параметрах: \underline{kbc}

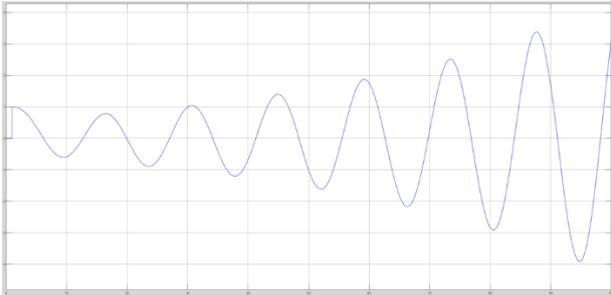


Рисунок Г.20 – Переходный процесс при параметрах: \overline{kbc}

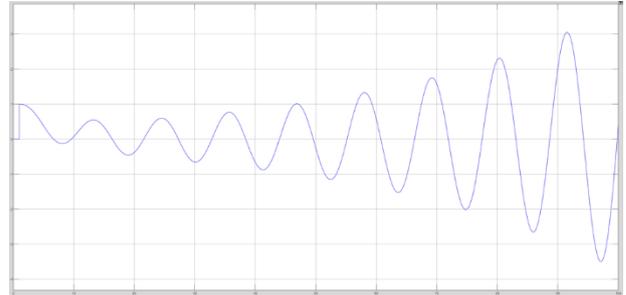


Рисунок Г.21 – Переходный процесс при параметрах: \overline{kbc}

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Расчет регулятора методом МЧ для MiMo объектов

Таблица Д.1 – Разность ИКК

Нижняя граница												
Параметр	k_{11}	k_{12}	k_{21}	k_{22}	T_{11}	T_{12}	T_{21}	T_{22}	τ_{11}	τ_{12}	τ_{21}	τ_{22}
ИКК	0.0542	0.0464	0.0421	0.0507	0.0409	0.0464	0.0534	0.0478	0.0441	0.0451	0.0379	0.0357
Разность, %	17.57	0.65	-8.67	9.97	-11.2	0.65	15.83	3.68	-4.33	-2.16	-17.78	-22.55
Верхняя граница												
Параметр	k_{11}	k_{12}	k_{21}	k_{22}	T_{11}	T_{12}	T_{21}	T_{22}	τ_{11}	τ_{12}	τ_{21}	τ_{22}
ИКК	0.0422	0.0461	0.0523	0.0463	0.0515	0.0461	0.0436	0.0471	0.0490	0.0468	0.0493	0.0591
Разность, %	-8.45	0	13.44	0.43	11.71	0	-5.42	0.21	6.29	1.51	6.94	28.19

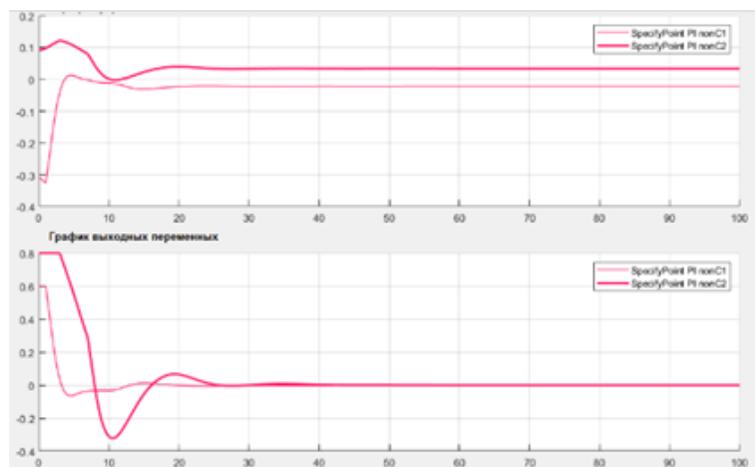


Рисунок Д.1 – Переходный процесс при \bar{k}_{11}

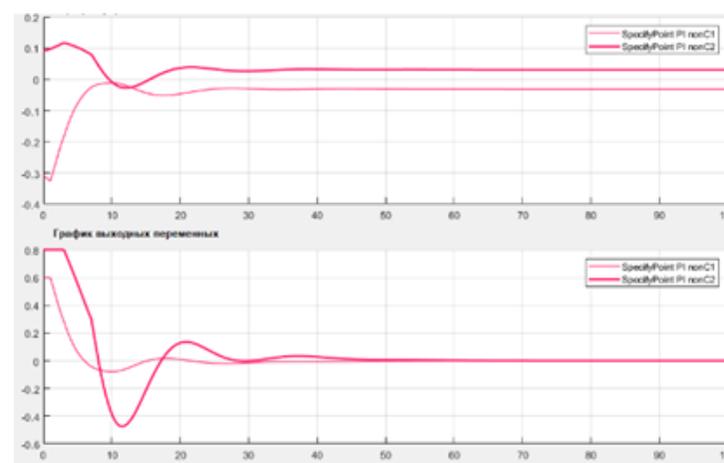


Рисунок Д.2 – Переходный процесс при \bar{T}_{11}

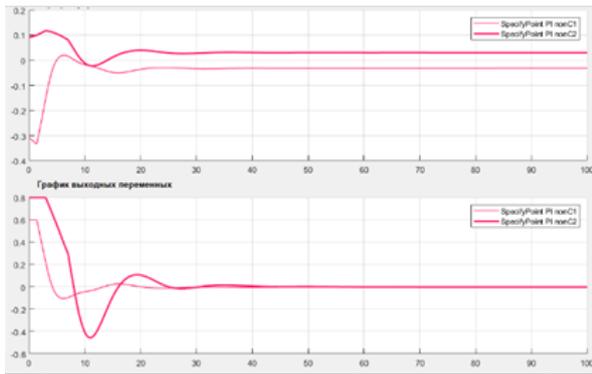


Рисунок Д.3 – Переходный процесс при \bar{T}_{11}

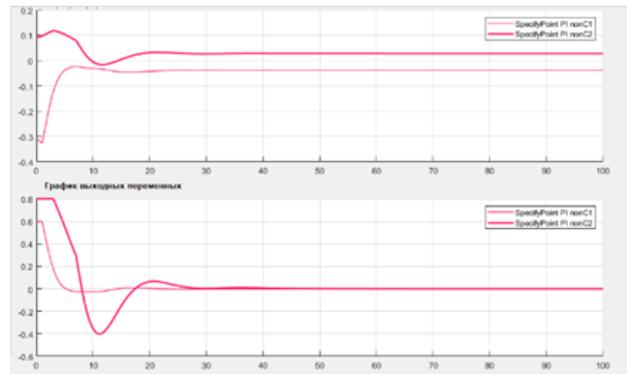


Рисунок Д.4 – Переходный процесс при \bar{k}_{12}

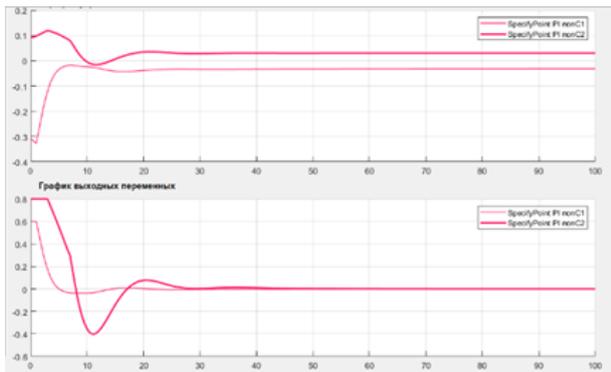


Рисунок Д.5 – Переходный процесс при \bar{T}_{12}

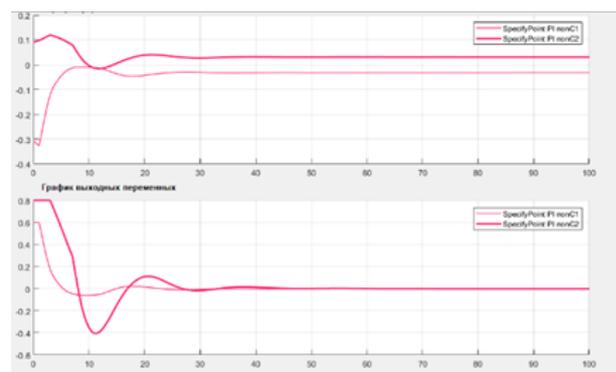


Рисунок Д.6 – Переходный процесс при \bar{T}_{12}

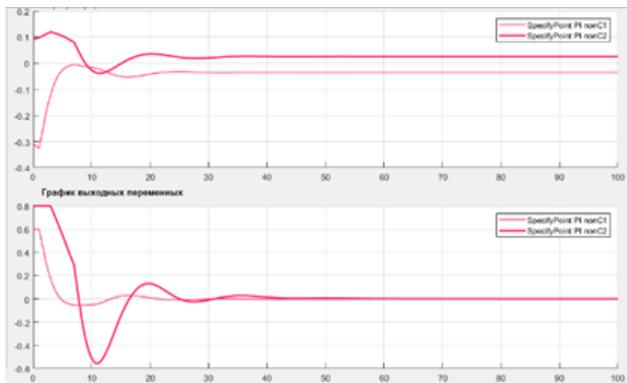


Рисунок Д.7 – Переходный процесс при \bar{k}_{21}

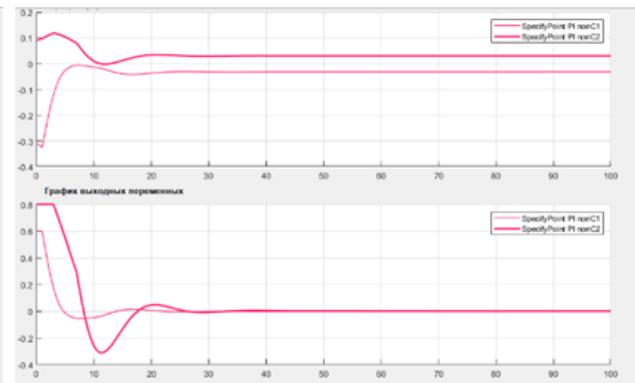


Рисунок Д.8 – Переходный процесс при \bar{T}_{21}

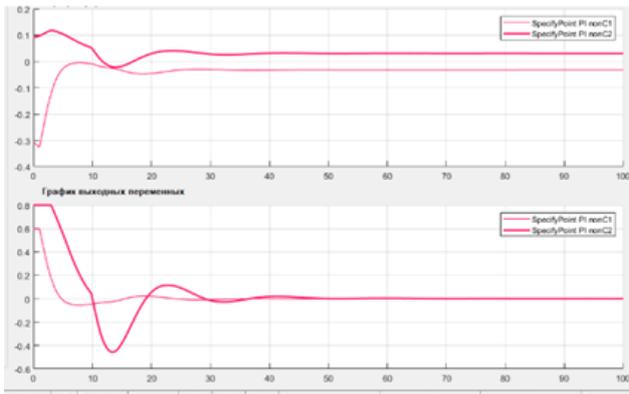


Рисунок Д.9 – Переходный процесс
при \bar{k}_{21}

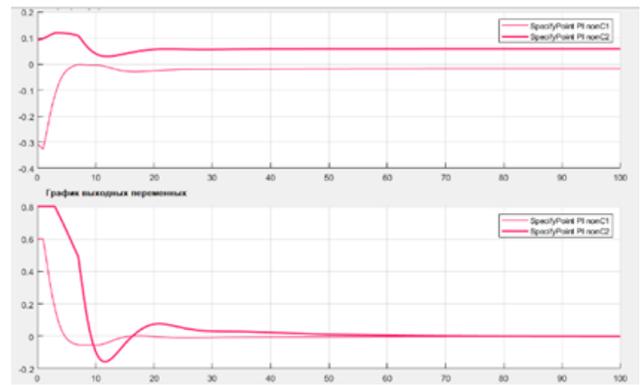


Рисунок Д.10 – Переходный процесс
при \bar{k}_{22}

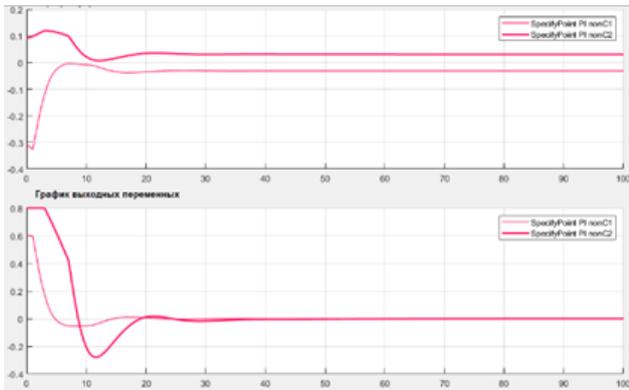


Рисунок Д.11 – Переходный процесс
при \bar{T}_{22}

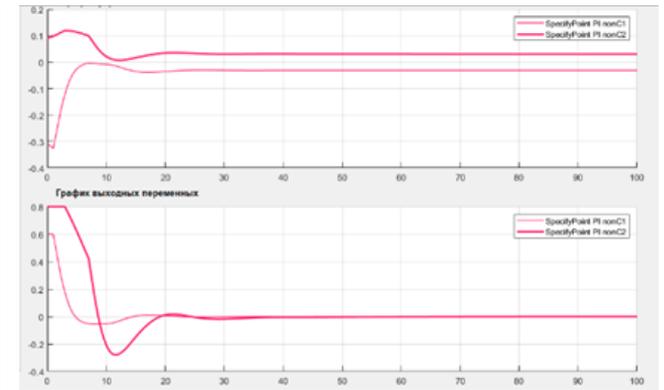


Рисунок Д.12 – Переходный процесс
при \bar{T}_{22}

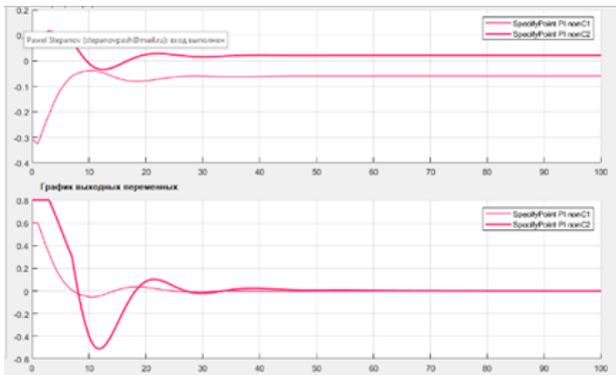


Рисунок Д.13 – Переходный
процесс при \underline{k}_{11}

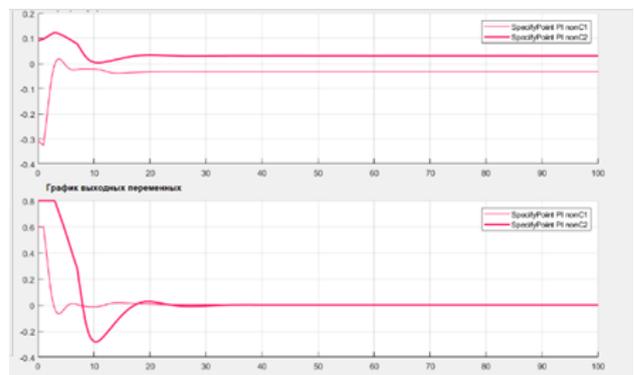


Рисунок Д.14 – Переходный
процесс при \underline{T}_{11}

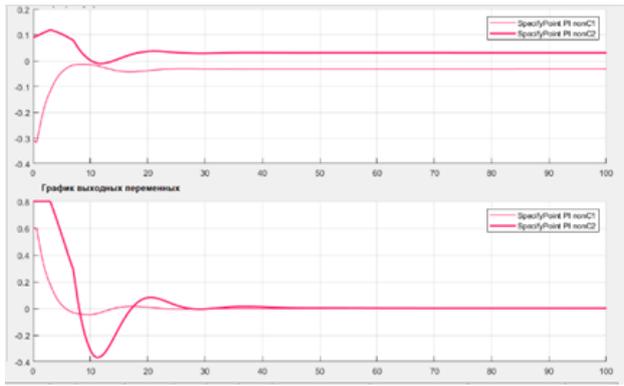


Рисунок Д.15 – Переходный процесс при $\underline{\tau}_{11}$

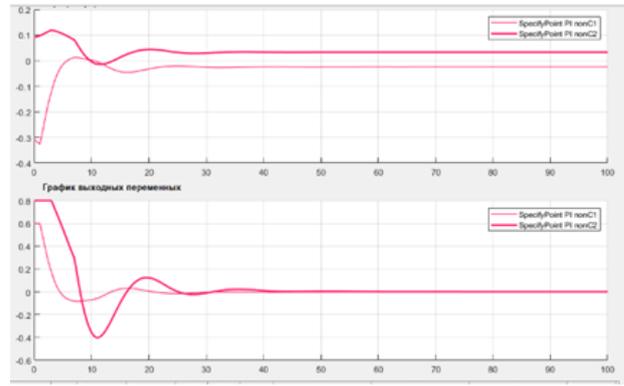


Рисунок Д.16 – Переходный процесс при \underline{k}_{12}

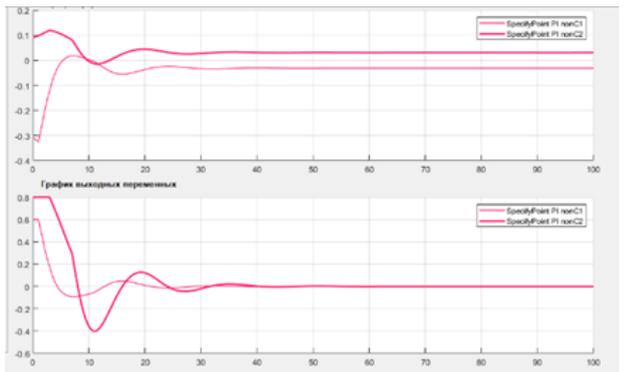


Рисунок Д.17 – Переходный процесс при \underline{T}_{12}

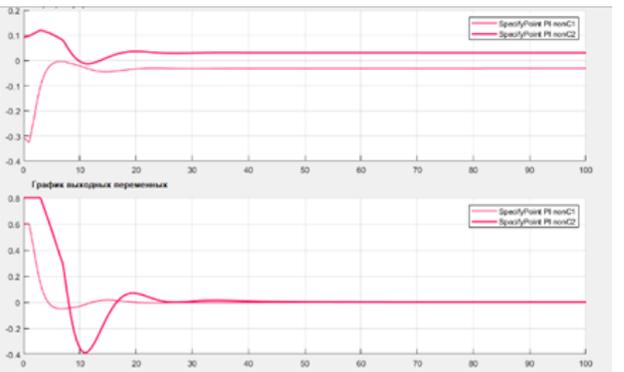


Рисунок Д.18 – Переходный процесс при $\underline{\tau}_{12}$

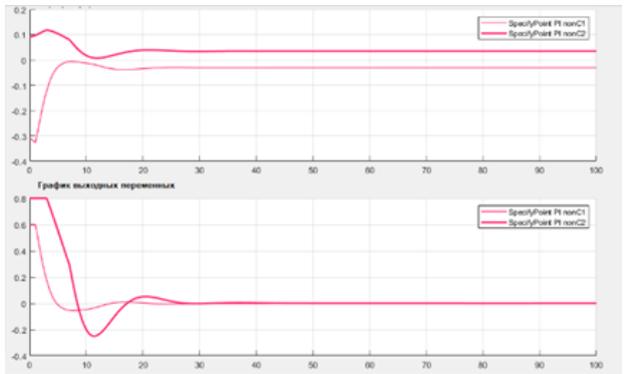


Рисунок Д.19 – Переходный процесс при \underline{k}_{21}

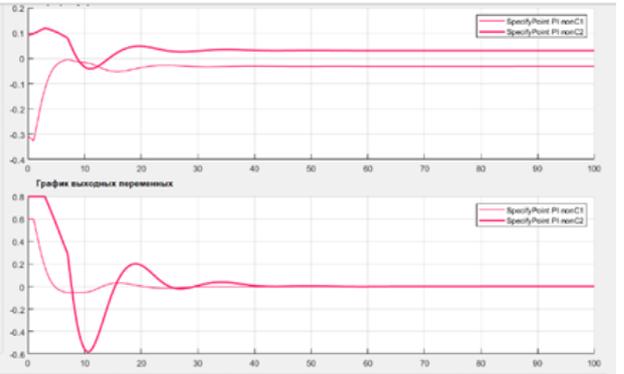


Рисунок Д.20 – Переходный процесс при \underline{T}_{21}

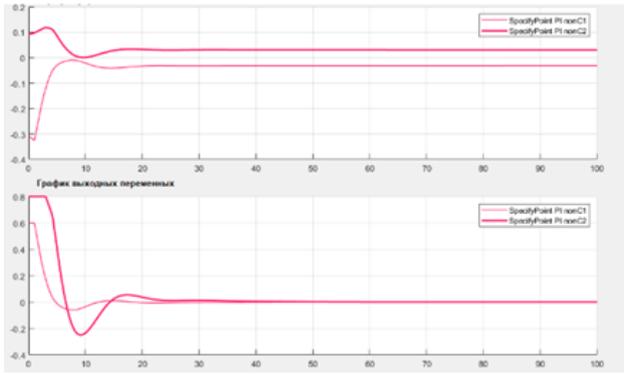


Рисунок Д.21 – Переходный процесс при τ_{21}

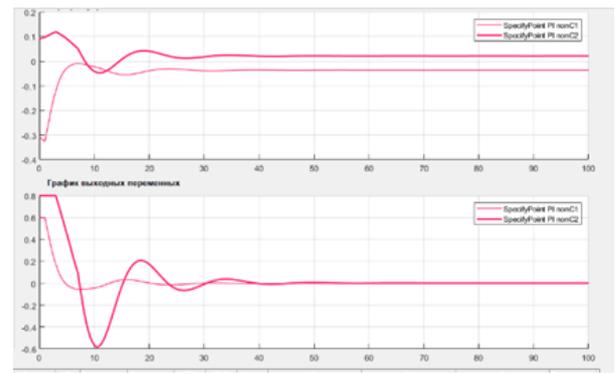


Рисунок Д.22 – Переходный процесс при k_{22}

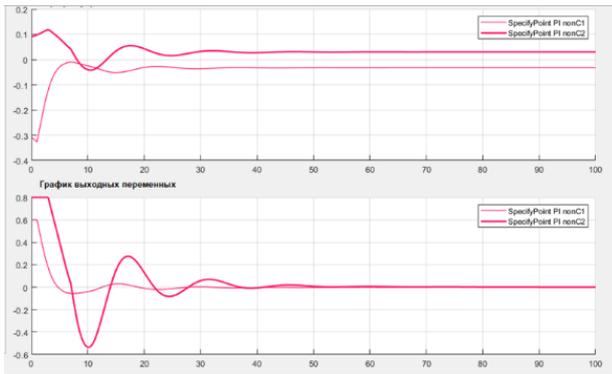


Рисунок Д.23 – Переходный процесс при T_{22}

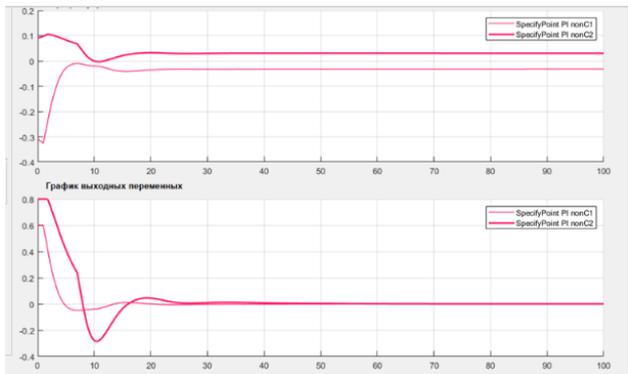


Рисунок Д.24 – Переходный процесс при τ_{22}

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Расчет робастного регулятора комбинированным методом для MiMo объектов

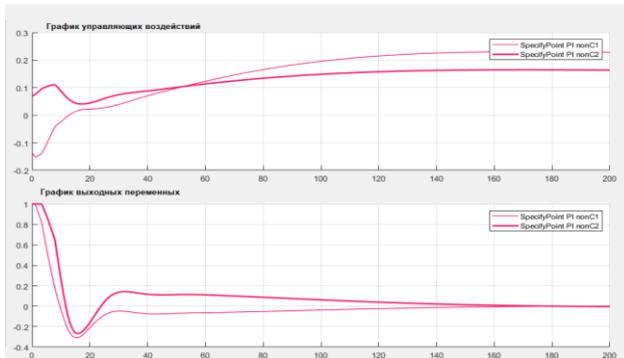


Рисунок Е.1 – Переходный процесс при $\rho = 0.32$

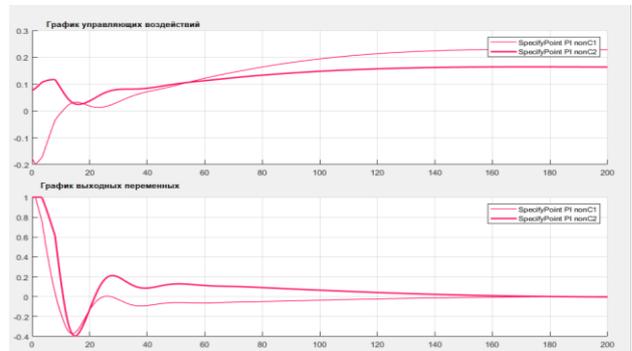


Рисунок Е.2 – Переходный процесс при $\rho = 0.42$

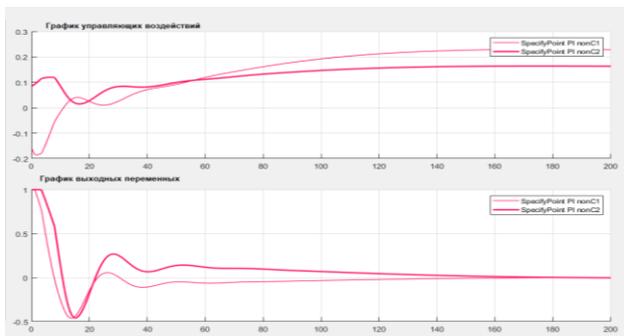


Рисунок Е.3 – Переходный процесс при $\rho = 0.52$

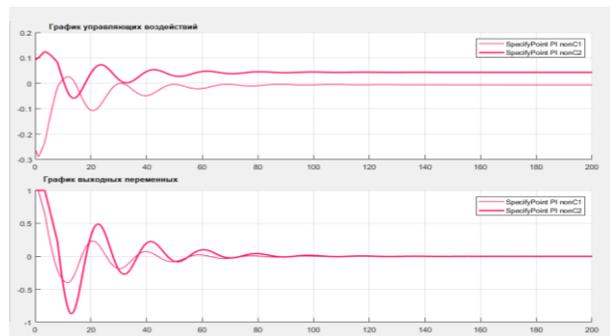


Рисунок Е.4 – Переходный процесс при $\rho = 0.62$

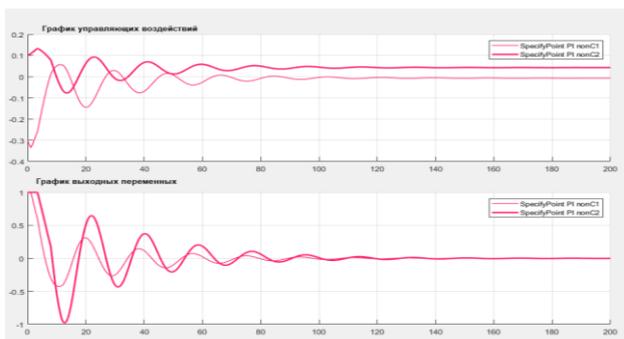


Рисунок Е.5 – Переходный процесс при $\rho = 0.72$

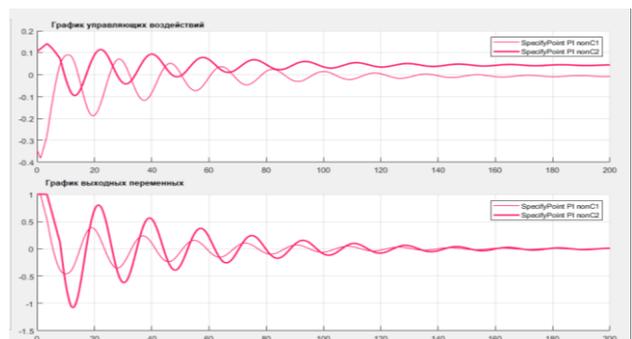


Рисунок Е.6 – Переходный процесс при $\rho = 0.82$

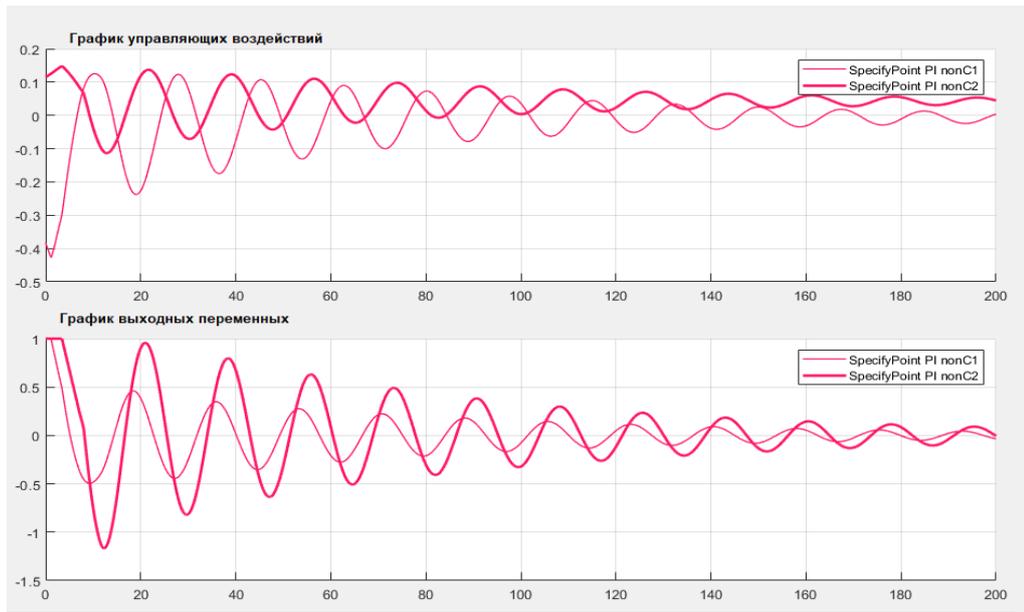


Рисунок Е.7 – Переходный процесс при $\rho = 0.92$

Таблица Е.1 – Результаты перебора ρ для WW (1)

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-13.32p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.0837e^{-8.88p}}{42.18p + 1} - \frac{0.1068e^{-8.88p}}{38.85p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 13.514 & -11.297 \\ 10.514 & -14.094 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.431 & -0.363 \\ 0.338 & -0.452 \end{bmatrix}$	0.4235
0.1	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-13.32p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.0837e^{-8.88p}}{42.18p + 1} - \frac{0.1068e^{-8.88p}}{38.85p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 16.399 & -10.167 \\ 9.463 & -14.631 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4618 & -0.3267 \\ 0.3042 & -0.4693 \end{bmatrix}$	0.2748
0.2	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-13.32p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.0837e^{-8.88p}}{42.18p + 1} - \frac{0.1068e^{-8.88p}}{38.85p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 19.284 & -9.038 \\ 8.411 & -15.168 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4926 & -0.2904 \\ 0.2704 & -0.4866 \end{bmatrix}$	0.2159
0.3	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-13.32p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1068e^{-8.88p}}{38.85p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 22.17 & -7.908 \\ 7.36 & -15.704 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5234 & -0.2541 \\ 0.2366 & -0.5039 \end{bmatrix}$	0.1946
0.4	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-13.32p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1068e^{-8.88p}}{38.85p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 25.055 & -6.778 \\ 6.308 & -16.241 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5542 & -0.2178 \\ 0.2028 & -0.5212 \end{bmatrix}$	0.1883
0.5	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-13.32p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{38.85p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 27.94 & -5.649 \\ 5.257 & -16.778 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.585 & -0.1815 \\ 0.169 & -0.5385 \end{bmatrix}$	0.1885

Продолжение таблицы E.1

p	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0.6	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-13.32p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{38.85p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 30.825 & -4.519 \\ 4.206 & -17.315 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.6158 & -0.1452 \\ 0.1352 & -0.5558 \end{bmatrix}$	0.1955
0.7	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.1121e^{-13.32p}}{(42.72 + p)(40.05 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{31.15p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 33.71 & -3.389 \\ 3.154 & -17.851 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.6466 & -0.1089 \\ 0.1014 & -0.5731 \end{bmatrix}$	0.2065
0.8	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.1121e^{-13.32p}}{(42.72 + p)(40.05 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{31.15p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 36.596 & -2.259 \\ 2.103 & -18.388 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.6774 & -0.0726 \\ 0.0676 & -0.5904 \end{bmatrix}$	0.2271
0.9	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.1121e^{-13.32p}}{(42.72 + p)(40.05 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{31.15p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 39.48 & -1.13 \\ 1.051 & -18.925 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.7082 & -0.0363 \\ 0.0338 & -0.6077 \end{bmatrix}$	0.2525
1	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.1121e^{-13.32p}}{(42.72 + p)(40.05 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{31.15p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 42.366 & 0 \\ 0 & -19.462 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.793 & 0 \\ 0 & -0.625 \end{bmatrix}$	0.2835

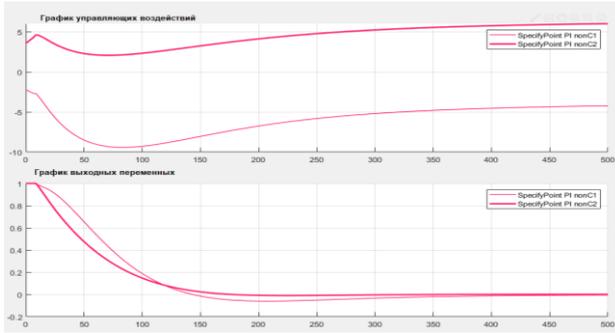


Рисунок Е.8 – Переходный процесс при $\rho = 0$

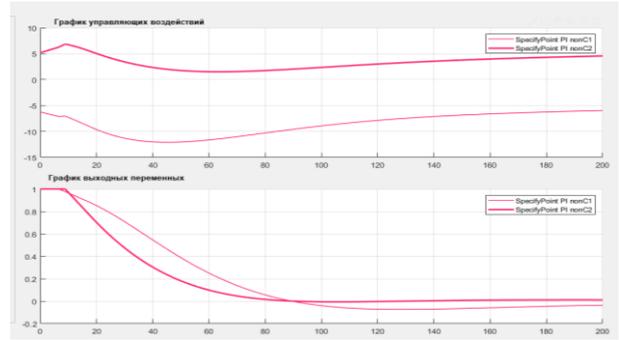


Рисунок Е.9 – Переходный процесс при $\rho = 0.1$

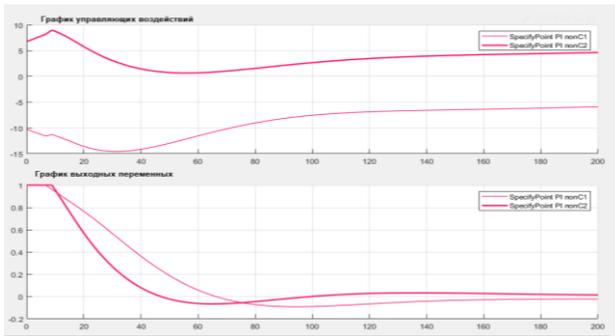


Рисунок Е.10 – Переходный процесс при $\rho = 0.2$

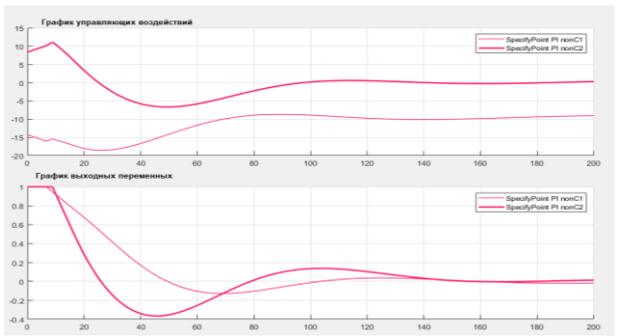


Рисунок Е.11 – Переходный процесс при $\rho = 0.3$

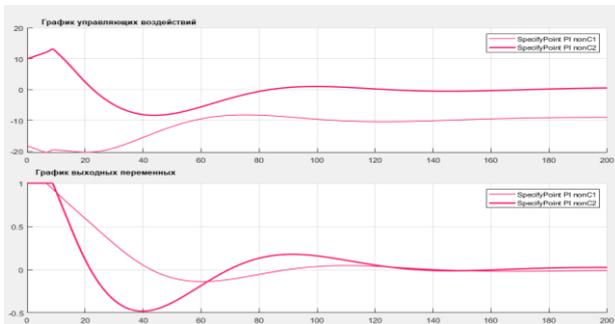


Рисунок Е.12 – Переходный процесс при $\rho = 0.4$

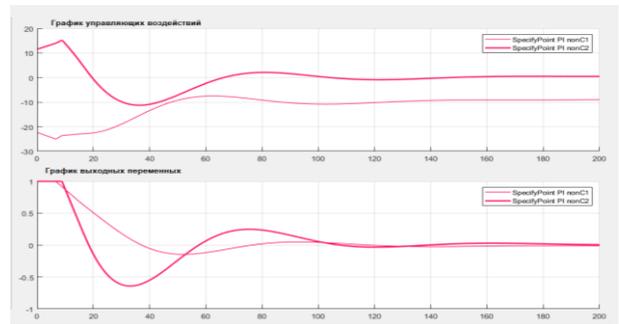


Рисунок Е.13 – Переходный процесс при $\rho = 0.5$

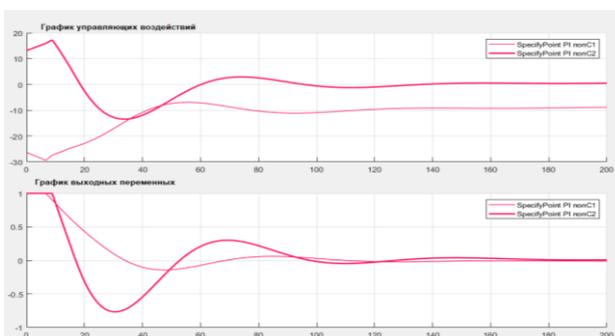


Рисунок Е.14 – Переходный процесс при $\rho = 0.6$

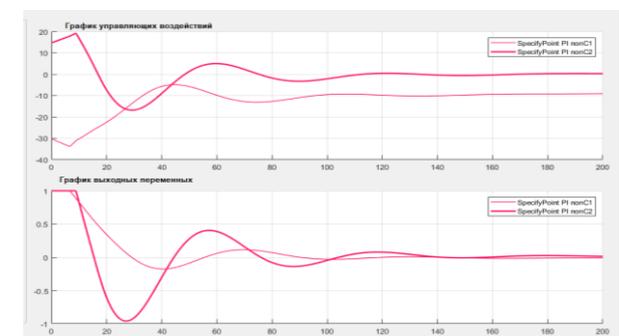


Рисунок Е.15 – Переходный процесс при $\rho = 0.7$

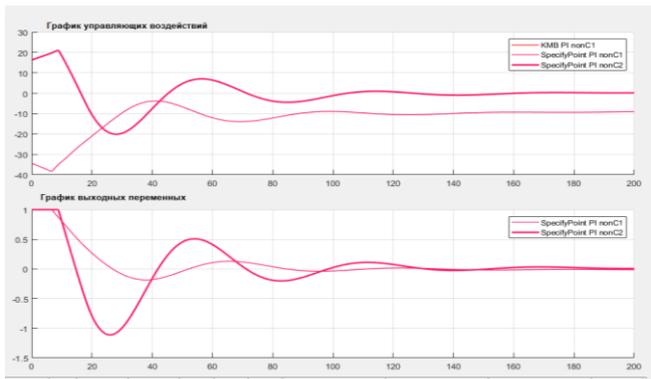


Рисунок Е.16 – Переходный процесс при $\rho = 0.8$

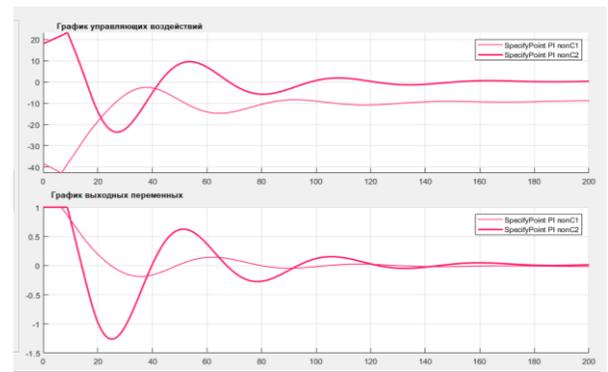


Рисунок Е.17 – Переходный процесс при $\rho = 0.9$

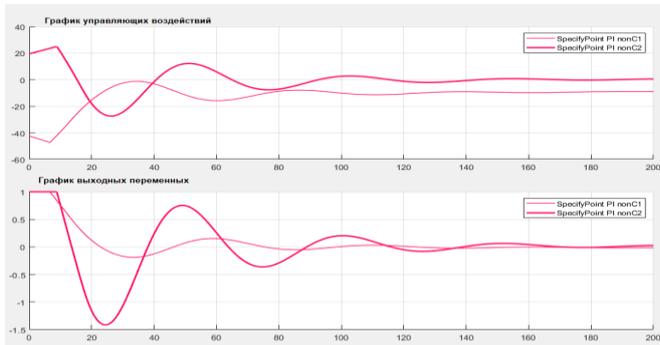


Рисунок Е.18 – Переходный процесс при $\rho = 1$

Таблица Е.2 – Результаты перебора ρ для VL (3)

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.57 & 0.474 \\ -1.022 & 0.803 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.264 & 0.08 \\ -0.172 & 0.135 \end{bmatrix}$	0.0514
0.1	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.56 & 0.427 \\ -0.92 & 1.013 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.263 & 0.072 \\ -0.155 & 0.159 \end{bmatrix}$	0.0429
0.2	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.558 & 0.379 \\ -0.818 & 1.223 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.252 & 0.064 \\ -0.138 & 0.182 \end{bmatrix}$	0.0381
0.3	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.552 & 0.332 \\ -0.715 & 1.433 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.261 & 0.056 \\ -0.12 & 0.206 \end{bmatrix}$	0.0350
0.4	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.546 & 0.284 \\ -0.613 & 1.643 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.26 & 0.048 \\ -0.103 & 0.229 \end{bmatrix}$	0.0329
0.5	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.541 & 0.237 \\ -0.511 & 1.853 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.259 & 0.04 \\ -0.086 & 0.253 \end{bmatrix}$	0.0312

Продолжение таблицы E.2

p	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0.6	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.535 & 0.19 \\ -0.409 & 2.063 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.258 & 0.032 \\ -0.069 & 0.277 \end{bmatrix}$	0.0299
0.7	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.529 & 0.142 \\ -0.307 & 2.273 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.257 & 0.024 \\ -0.052 & 0.3 \end{bmatrix}$	0.0289
0.8	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.523 & 0.095 \\ -0.204 & 2.483 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.256 & 0.016 \\ -0.034 & 0.324 \end{bmatrix}$	0.0280
0.9	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.517 & 0.047 \\ -0.102 & 2.693 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.255 & 0.008 \\ -0.017 & 0.347 \end{bmatrix}$	0.0272
1	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-1.15p}}{8.05p + 1} & \frac{1.495e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-3.22e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{10.58p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.511 & 0 \\ 0 & 2.903 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.254 & 0 \\ 0 & 0.371 \end{bmatrix}$	0.0265

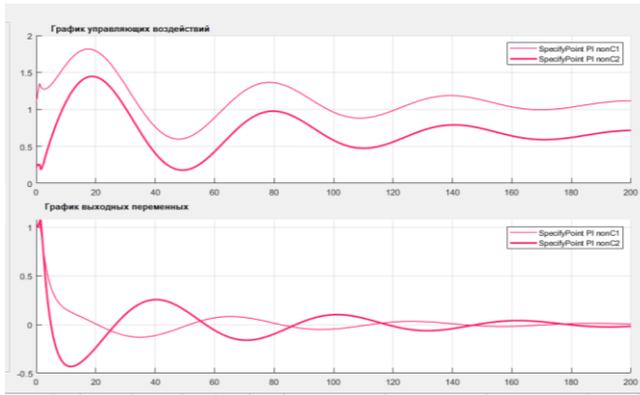


Рисунок Е.19 – Переходный процесс при $\rho = 0$

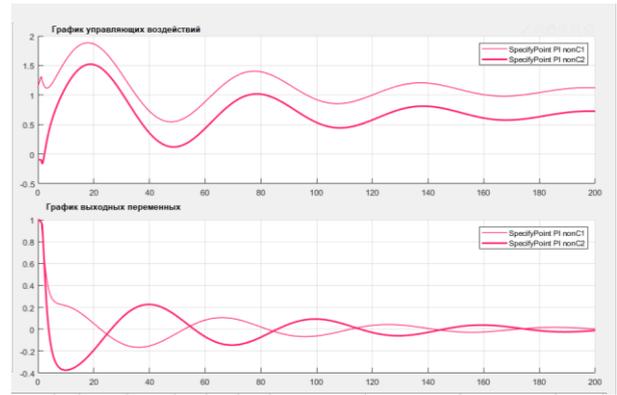


Рисунок Е.20 – Переходный процесс при $\rho = 0.1$

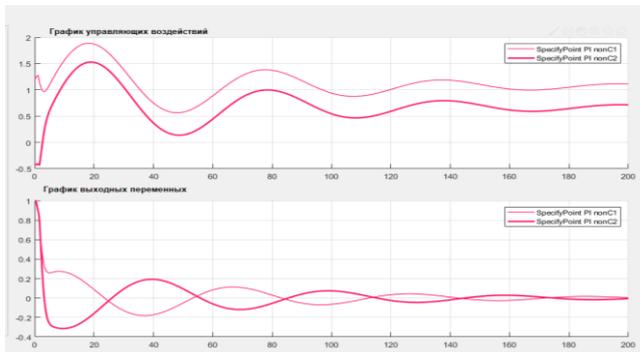


Рисунок Е.21 – Переходный процесс при $\rho = 0.2$

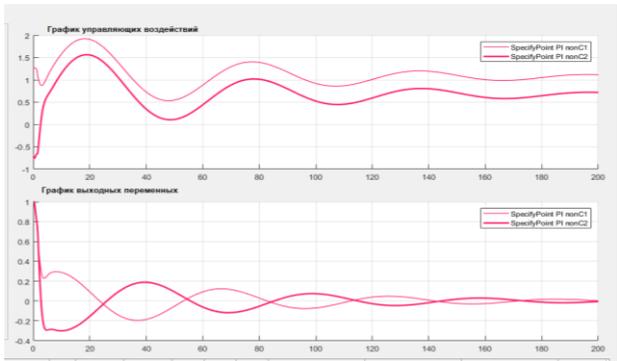


Рисунок Е.22 – Переходный процесс при $\rho = 0.3$

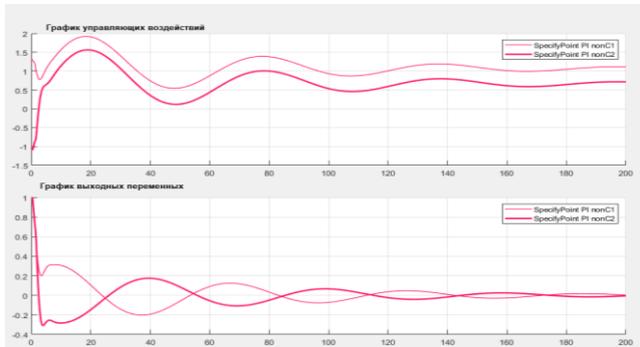


Рисунок Е.23 – Переходный процесс при $\rho = 0.4$

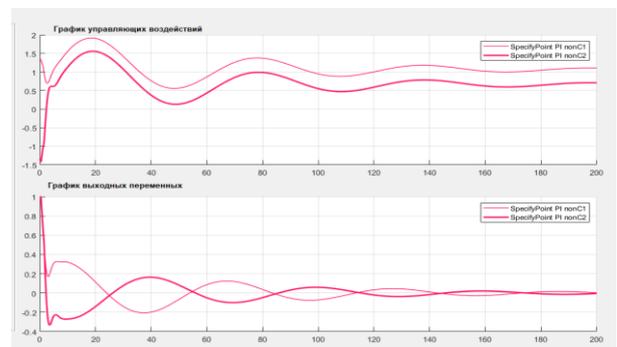


Рисунок Е.24 – Переходный процесс при $\rho = 0.5$

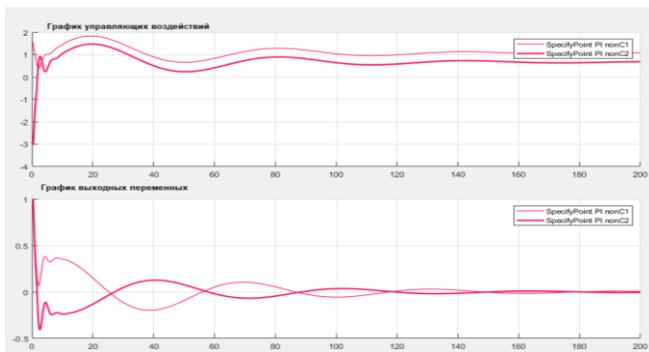
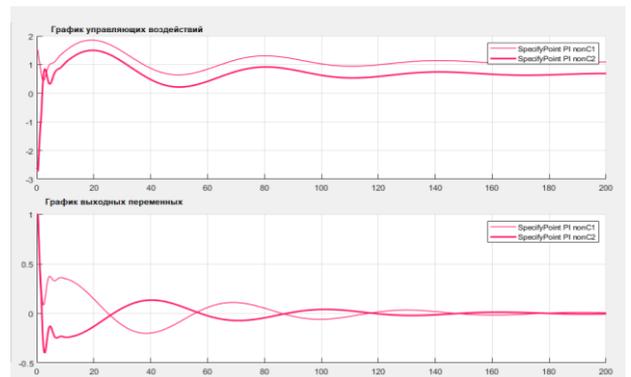
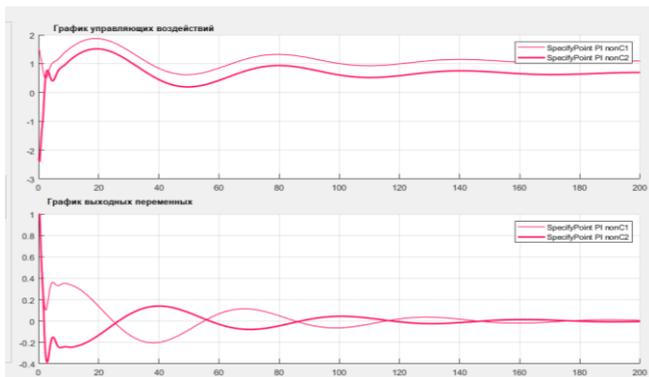
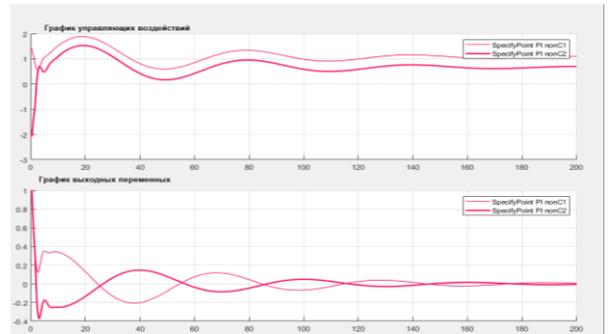
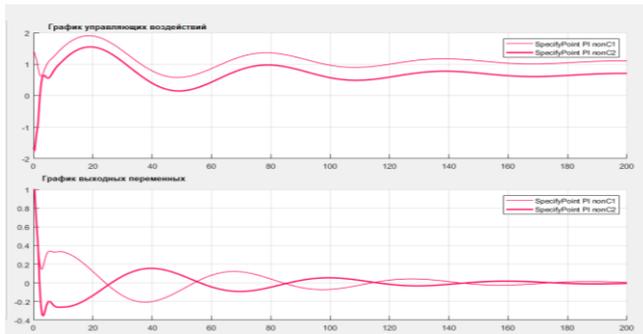


Таблица Е.3 – Результаты перебора ρ для VL (4)

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.12 & 0.641 \\ -1.38 & 1.086 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.303 & 0.092 \\ -0.197 & 0.155 \end{bmatrix}$	0.0271
0.1	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.11 & 0.577 \\ -1.24 & 1.37 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.302 & 0.083 \\ -0.177 & 0.182 \end{bmatrix}$	0.0207
0.2	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.1 & 0.513 \\ -1.1 & 1.65 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.301 & 0.074 \\ -0.158 & 0.209 \end{bmatrix}$	0.0172
0.3	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} 2.097 & 0.449 \\ -0.97 & 1.94 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.3 & 0.064 \\ -0.138 & 0.237 \end{bmatrix}$	0.0149
0.4	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.09 & 0.385 \\ -0.83 & 2.22 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.299 & 0.055 \\ -0.118 & 0.264 \end{bmatrix}$	0.0134
0.5	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.08 & 0.321 \\ -0.69 & 2.51 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.298 & 0.046 \\ -0.099 & 0.291 \end{bmatrix}$	0.0122
0.6	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.075 & 0.256 \\ -0.552 & 2.791 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.296 & 0.037 \\ -0.079 & 0.318 \end{bmatrix}$	0.0114
0.7	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.067 & 0.192 \\ -0.414 & 3.075 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.295 & 0.028 \\ -0.059 & 0.345 \end{bmatrix}$	0.0107
0.8	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.06 & 0.128 \\ -0.276 & 3.36 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.294 & 0.018 \\ -0.039 & 0.373 \end{bmatrix}$	0.0102
0.9	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.053 & 0.064 \\ -0.138 & 3.644 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.293 & 0.009 \\ -0.019 & 0.4 \end{bmatrix}$	0.0096
1	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.495, k_{21}$ $= -3.22, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.045 & 0 \\ 0 & 3.928 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.292 & 0 \\ 0 & 0.427 \end{bmatrix}$	0.0094

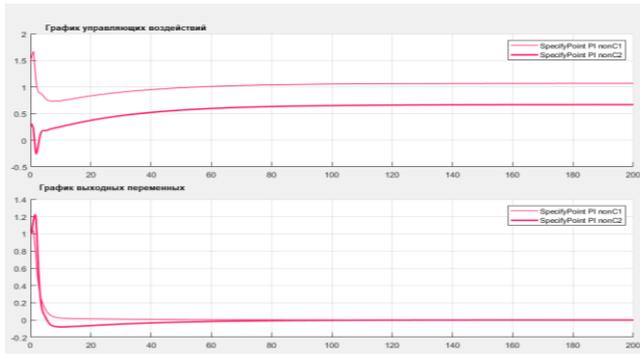


Рисунок E.30 – Переходный процесс при $\rho = 0$

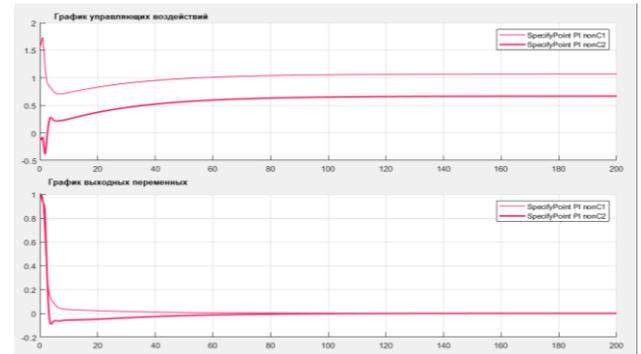


Рисунок E.31 – Переходный процесс при $\rho = 0.1$

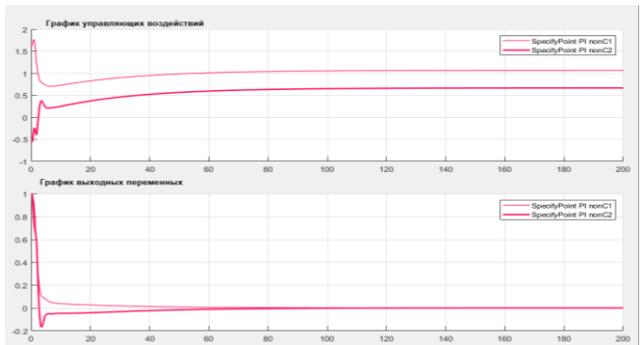


Рисунок E.32 – Переходный процесс при $\rho = 0.2$

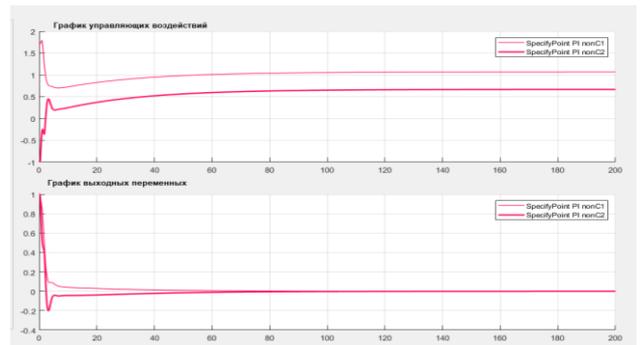


Рисунок E.33 – Переходный процесс при $\rho = 0.3$

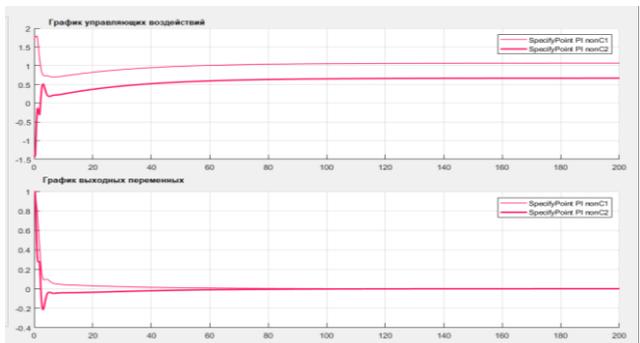


Рисунок E.34 – Переходный процесс при $\rho = 0.4$

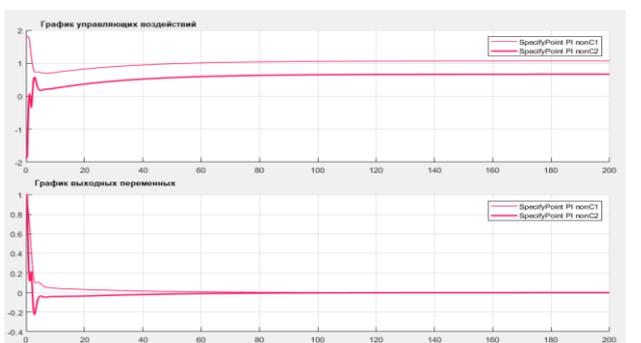


Рисунок E.35 – Переходный процесс при $\rho = 0.5$

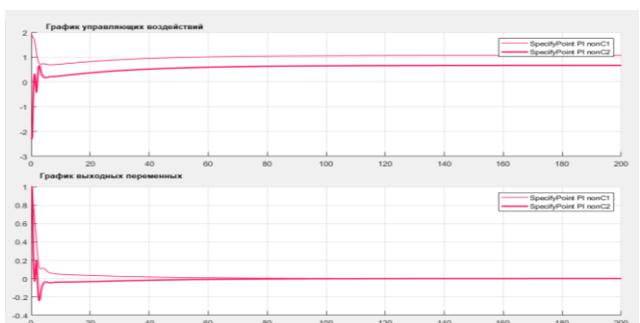


Рисунок E.36 – Переходный процесс при $\rho = 0.6$

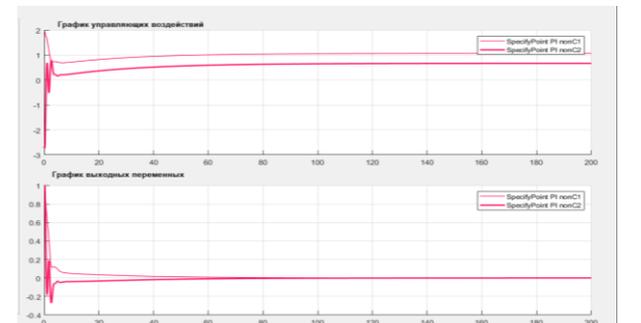


Рисунок E.37 – Переходный процесс при $\rho = 0.7$

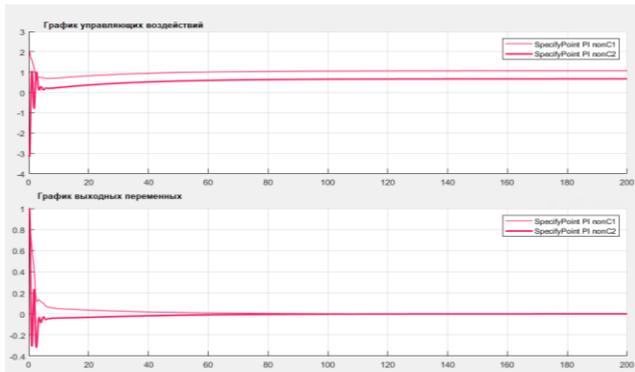


Рисунок Е.38 – Переходный процесс при $\rho = 0.8$

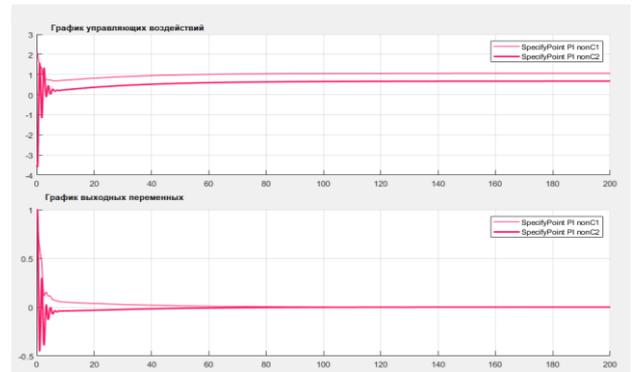


Рисунок Е.39 – Переходный процесс при $\rho = 0.9$

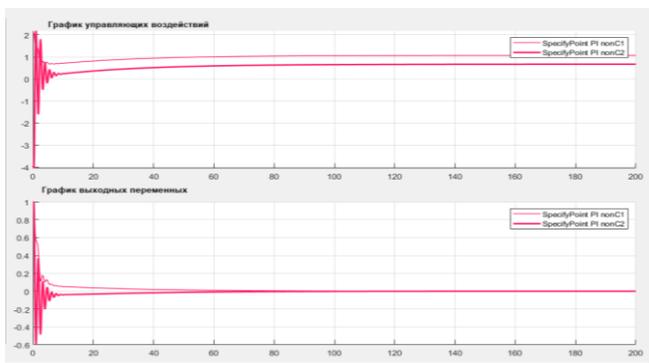


Рисунок Е.40 – Переходный процесс при $\rho = 1$

Таблица Е.4 – Результаты перебора ρ для VL (5)

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.03, \tau_{21} = 3.42, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.11779 & 0.3373 \\ -0.72755 & 0.57175 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.15968 & 0.04819 \\ -0.10394 & 0.08168 \end{bmatrix}$	0.0471
0.1	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.57, \tau_{21} = 3.42, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.129771 & 0.30357 \\ -0.654795 & 0.752335 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.161392 & 0.043371 \\ -0.093546 & 0.099352 \end{bmatrix}$	0.0345
0.2	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.57, \tau_{21} = 3.42, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.141752 & 0.26984 \\ -0.58204 & 0.93292 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.163104 & 0.038552 \\ -0.083152 & 0.117024 \end{bmatrix}$	0.0279
0.3	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.57, \tau_{21} = 3.42, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.153733 & 0.23611 \\ -0.509285 & 1.113505 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.164816 & 0.03373 \\ -0.072758 & 0.134696 \end{bmatrix}$	0.0238
0.4	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.57, \tau_{21} = 3.42, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.165714 & 0.20238 \\ -0.43653 & 1.29409 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.166528 & 0.028914 \\ -0.062364 & 0.152368 \end{bmatrix}$	0.0209
0.5	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.57, \tau_{21} = 3.42, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.177695 & 0.16865 \\ -0.363775 & 1.474675 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.16824 & 0.024095 \\ -0.05197 & 0.17004 \end{bmatrix}$	0.0188
0.6	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.57, \tau_{21} = 3.42, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.189676 & 0.13492 \\ -0.29102 & 1.65526 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.169952 & 0.019276 \\ -0.041576 & 0.187712 \end{bmatrix}$	0.0172
0.7	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.57, \tau_{21} = 3.42, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.201657 & 0.10119 \\ -0.218265 & 1.835845 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.171664 & 0.014457 \\ -0.031182 & 0.205384 \end{bmatrix}$	0.0159
0.8	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.57, \tau_{21} = 1.8, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.213638 & 0.06746 \\ -0.14551 & 2.01643 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.173376 & 0.009638 \\ -0.020788 & 0.223056 \end{bmatrix}$	0.0151
0.9	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.03, \tau_{21} = 0.18, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.225619 & 0.03373 \\ -0.072755 & 2.197015 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.175088 & 0.004819 \\ -0.010394 & 0.240728 \end{bmatrix}$	0.0149
1	$\tau_{11} = 1.9, \tau_{12} = 0.03, \tau_{21} = 0.18, \tau_{22} = 0.665$	$\begin{bmatrix} -1.2376 & 0 \\ 0 & 2.3776 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.1768 & 0 \\ 0 & 0.2584 \end{bmatrix}$	0.0148

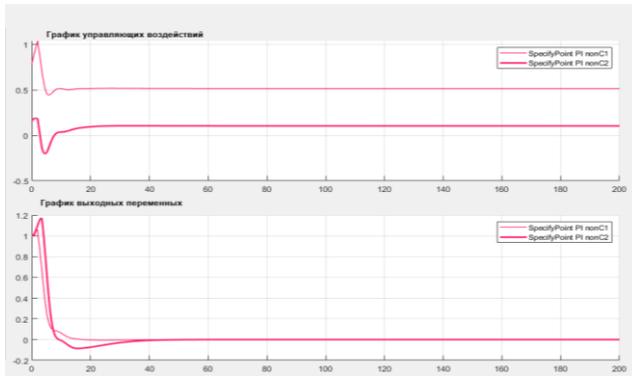


Рисунок Е.41 – Переходный процесс при $\rho = 0$

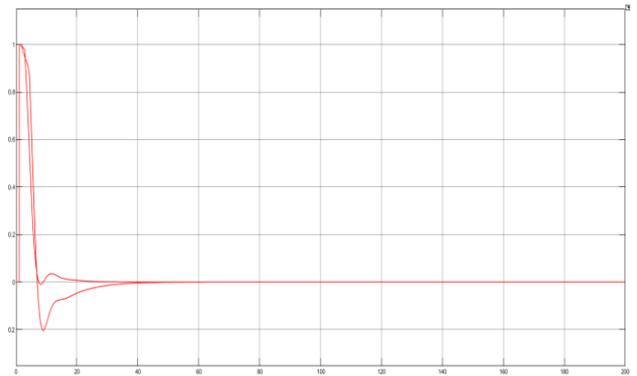


Рисунок Е.42 – Переходный процесс при $\rho = 0.1$

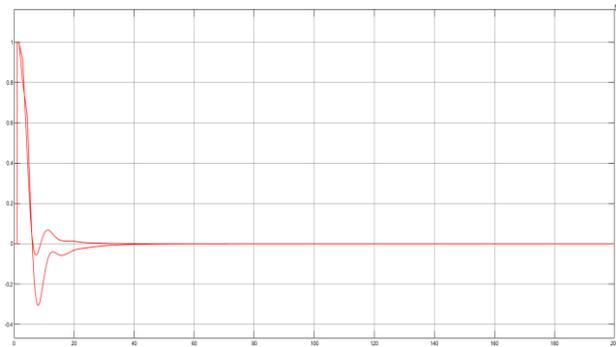


Рисунок Е.43 – Переходный процесс при $\rho = 0.2$

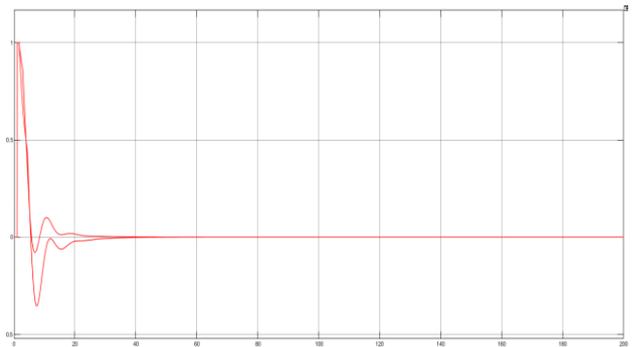


Рисунок Е.44 – Переходный процесс при $\rho = 0.3$

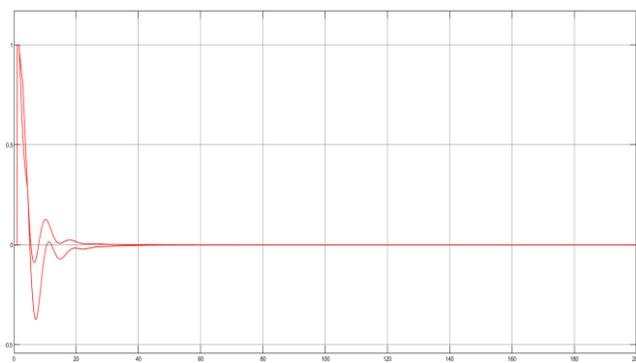


Рисунок Е.45 – Переходный процесс при $\rho = 0.4$

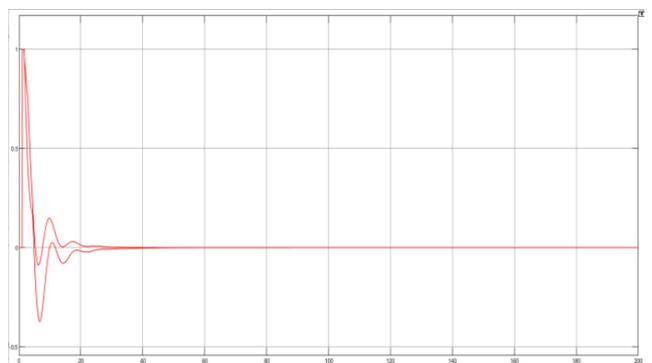


Рисунок Е.46 – Переходный процесс при $\rho = 0.5$

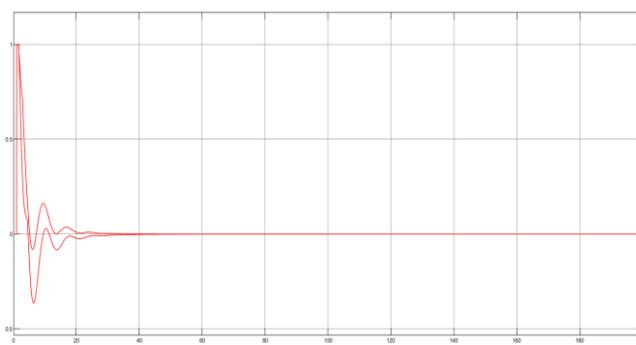


Рисунок Е.47 – Переходный процесс при $\rho = 0.6$

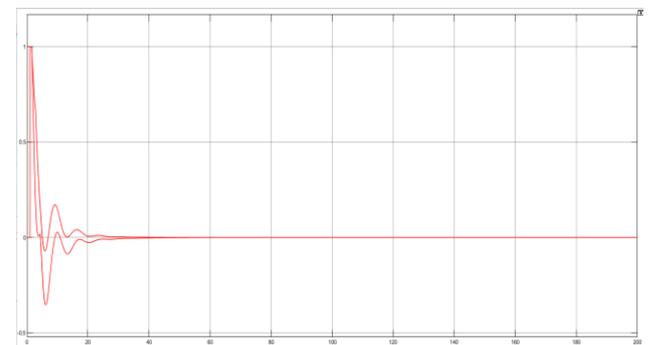


Рисунок Е.48 – Переходный процесс при $\rho = 0.7$

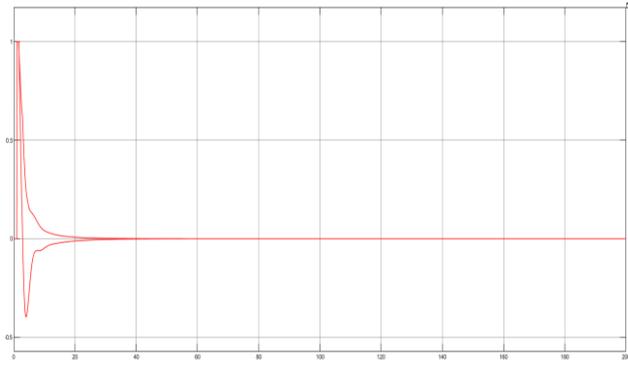


Рисунок Е.49 – Переходный процесс
при $\rho = 0.8$

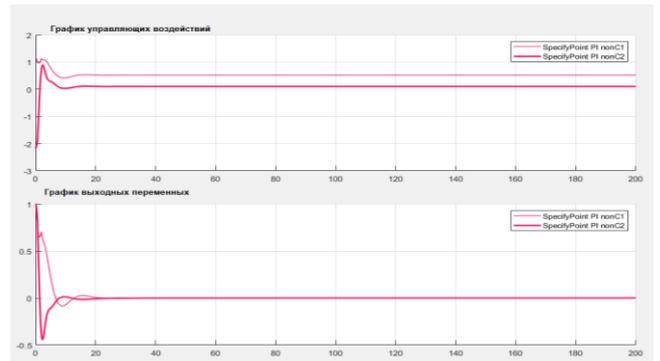


Рисунок Е.50 – Переходный процесс
при $\rho = 0.9$

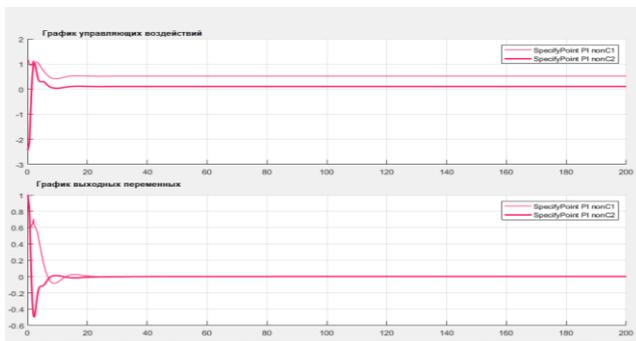


Рисунок Е.51 – Переходный
процесс при $\rho = 1$

Таблица Е.5 – Результаты перебора ρ для TS (6)

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0	$\left[\begin{array}{c} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} \\ \frac{-0.0887e^{-23.94p}}{(43p+1)(22p+1)} \end{array} \quad \begin{array}{c} \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} -1.155 & 1.555 \\ -0.422 & 0.548 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.637 & 0.637 \\ -0.232 & 0.302 \end{bmatrix}$	0.1421
0.1	$\left[\begin{array}{c} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} \\ \frac{-0.0887e^{-23.94p}}{(43p+1)(22p+1)} \end{array} \quad \begin{array}{c} \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} -1.729 & 1.0395 \\ -0.3798 & 1.1453 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.953 & 0.5733 \\ -0.209 & 0.2844 \end{bmatrix}$	0.1053
0.2	$\left[\begin{array}{c} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} \\ \frac{-0.0887e^{-23.94p}}{(43p+1)(22p+1)} \end{array} \quad \begin{array}{c} \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} -2.302 & 0.924 \\ -0.338 & 1.7426 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.269 & 0.5096 \\ -0.186 & 0.2668 \end{bmatrix}$	0.1839
0.3	$\left[\begin{array}{c} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} \\ \frac{-0.0887e^{-23.94p}}{(43p+1)(22p+1)} \end{array} \quad \begin{array}{c} \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} -2.876 & 0.809 \\ -0.295 & 2.34 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.585 & 0.4459 \\ -0.162 & 0.2492 \end{bmatrix}$	284.29
0.4	$\left[\begin{array}{c} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} \\ \frac{-0.0887e^{-23.94p}}{(43p+1)(22p+1)} \end{array} \quad \begin{array}{c} \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} -3.45 & 0.693 \\ -0.253 & 2.937 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.901 & 0.382 \\ -0.139 & 0.2316 \end{bmatrix}$	1214180
0.5	$\left[\begin{array}{c} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} \\ \frac{-0.0887e^{-23.94p}}{(43p+1)(22p+1)} \end{array} \quad \begin{array}{c} \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} -4.023 & 0.5775 \\ -0.211 & 3.534 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.217 & 0.3185 \\ -0.116 & 0.214 \end{bmatrix}$	$2.8 \cdot 10^9$

Продолжение таблицы E.5

p	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0.6	$\begin{bmatrix} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} & \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{-0.0887e^{-23.94p}}{(43p+1)(22p+1)} & \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -4.597 & 0.462 \\ -0.169 & 4.132 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.533 & 0.255 \\ -0.093 & 0.1964 \end{bmatrix}$	$2.2 \cdot 10^{12}$
0.7	$\begin{bmatrix} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} & \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{-0.0887e^{-23.94p}}{(43p+1)(22p+1)} & \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -5.171 & 0.3465 \\ -0.127 & 4.729 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.849 & 0.1911 \\ -0.0696 & 0.1788 \end{bmatrix}$	$1.45 \cdot 10^{15}$
0.8	$\begin{bmatrix} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} & \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{-0.0887e^{-23.94p}}{(43p+1)(22p+1)} & \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -5.745 & 0.231 \\ -0.0844 & 5.3264 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3.165 & 0.1274 \\ -0.0464 & 0.1612 \end{bmatrix}$	$5.44 \cdot 10^{17}$
0.9	$\begin{bmatrix} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} & \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{-0.0887e^{-1.26p}}{(43p+1)(22p+1)} & \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -6.318 & 0.1155 \\ -0.0422 & 5.9237 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3.481 & 0.0637 \\ -0.0232 & 0.1436 \end{bmatrix}$	$1.1 \cdot 10^{920}$
1	$\begin{bmatrix} \frac{-0.1153(10p+1)e^{-0.1p}}{(7.6p+1)^3} & \frac{0.2429e^{-2p}}{(33p+1)^2} \\ \frac{-0.0887e^{-1.26p}}{(43p+1)(22p+1)} & \frac{0.2429e^{-0.17p}}{(44p+1)(20p+1)} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -6.892 & 0 \\ 0 & 6.521 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3.797 & 0 \\ 0 & 0.126 \end{bmatrix}$	$2.12 \cdot 10^{22}$

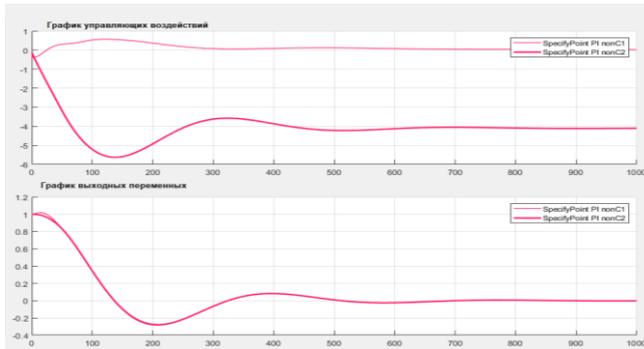


Рисунок E.52 – Переходный процесс при $\rho = 0$

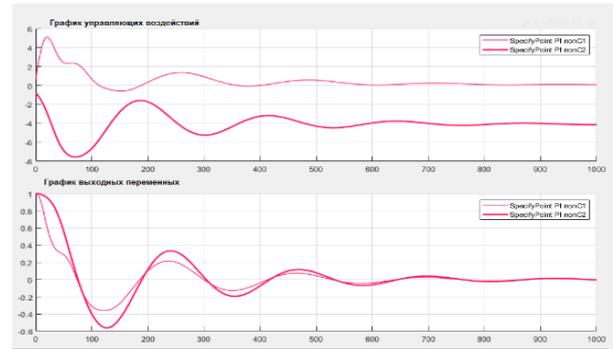


Рисунок E.53 – Переходный процесс при $\rho = 0.1$

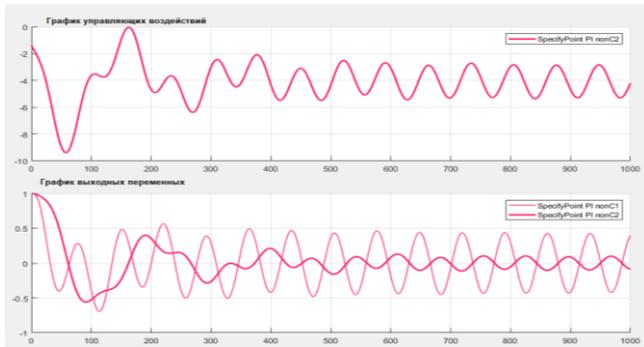


Рисунок E.54 – Переходный процесс при $\rho = 0.2$

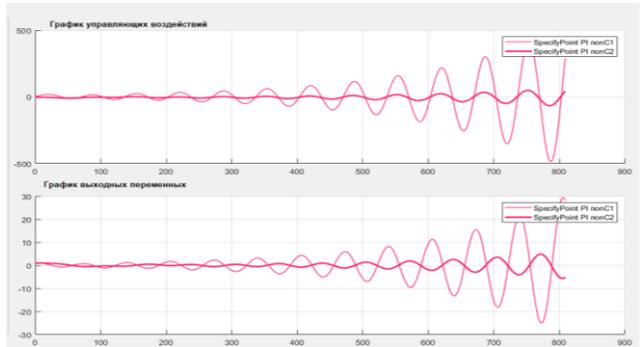


Рисунок E.55 – Переходный процесс при $\rho = 0.3$

Таблица Е.6 – Результаты перебора ρ для WB (7)

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{7.524e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.08177 & -0.07964 \\ 0.02781 & -0.04396 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.00872 & -0.00849 \\ 0.00297 & -0.00576 \end{bmatrix}$	0.4505
0.1	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{7.524e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.111901 & -0.071676 \\ 0.025029 & -0.046823 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.010515 & -0.007641 \\ 0.002673 & -0.00577 \end{bmatrix}$	0.3988
0.2	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{7.524e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.142032 & -0.063712 \\ 0.022248 & -0.049686 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.01231 & -0.006792 \\ 0.002376 & -0.00578 \end{bmatrix}$	0.3822
0.3	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{7.524e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.172163 & -0.055748 \\ 0.019467 & -0.052549 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.014105 & -0.005943 \\ 0.002079 & -0.00579 \end{bmatrix}$	0.3661
0.4	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{7.524e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.202294 & -0.047884 \\ 0.016686 & -0.054412 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0159 & -0.005094 \\ 0.001782 & -0.0058 \end{bmatrix}$	0.3474
0.5	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{7.524e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.232425 & -0.03982 \\ 0.013905 & -0.058275 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.017965 & -0.004245 \\ 0.001485 & -0.00581 \end{bmatrix}$	0.3266

Продолжение таблицы Е.6

p	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0.6	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{7.524e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.262556 & -0.031856 \\ 0.011124 & -0.061138 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.01949 & -0.003396 \\ 0.001188 & -0.00582 \end{bmatrix}$	0.3051
0.7	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{7.524e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.292687 & -0.023892 \\ 0.008343 & -0.064001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.021285 & -0.002547 \\ 0.000891 & -0.00583 \end{bmatrix}$	0.2835
0.8	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{7.524e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.322818 & -0.015928 \\ 0.005562 & -0.066864 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.02308 & -0.001698 \\ 0.000594 & -0.00584 \end{bmatrix}$	0.2627
0.9	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-5.7p}}{18.06p + 1} \\ \frac{22.116e^{-13.3p}}{12.384p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.352949 & -0.007964 \\ 0.002781 & -0.069727 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.024875 & -0.000849 \\ 0.000297 & -0.00585 \end{bmatrix}$	0.4437
1	$\begin{bmatrix} \frac{11.008e^{-1.9p}}{19.038p + 1} & \frac{-21.546e^{-5.7p}}{18.06p + 1} \\ \frac{22.116e^{-13.3p}}{12.384p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{16.416p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.38308 & 0 \\ 0 & -0.07259 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.02667 & 0 \\ 0 & -0.00586 \end{bmatrix}$	0.9198

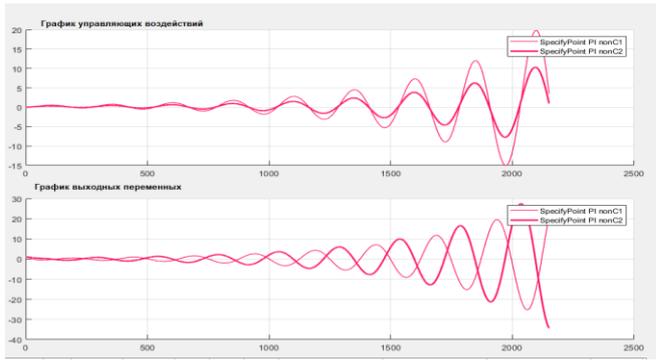


Рисунок Е.56 – Переходный процесс при $\rho = 0$

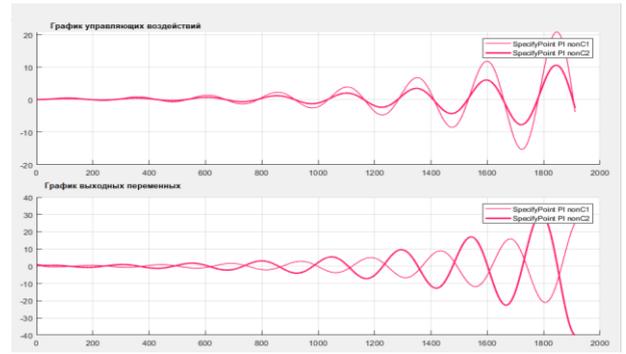


Рисунок Е.57 – Переходный процесс при $\rho = 0.1$

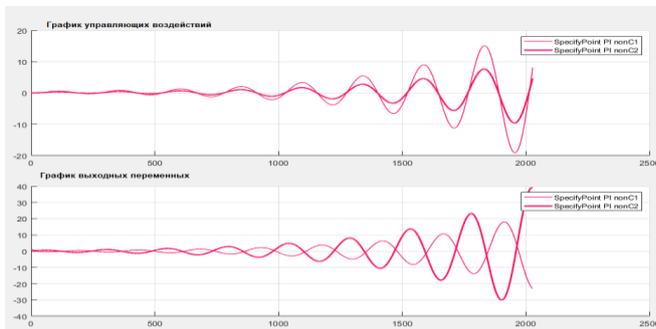


Рисунок Е.58 – Переходный процесс при $\rho = 0.2$

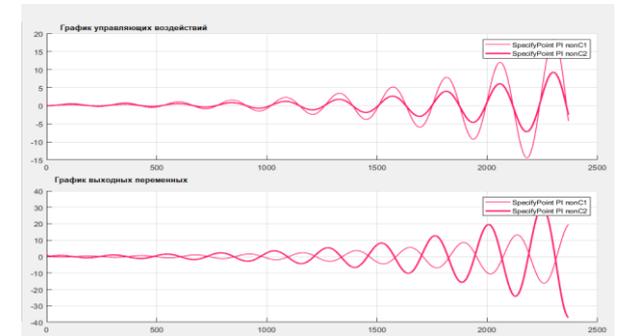


Рисунок Е.59 – Переходный процесс при $\rho = 0.3$

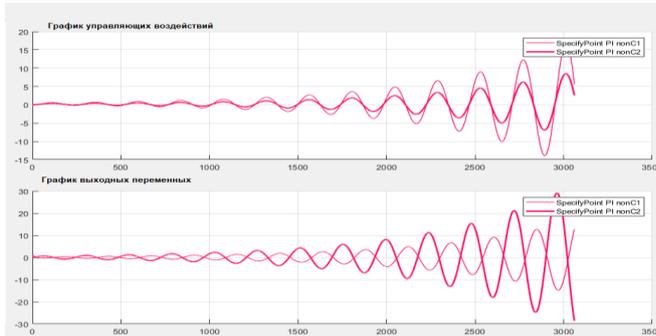


Рисунок Е.60 – Переходный процесс при $\rho = 0.4$

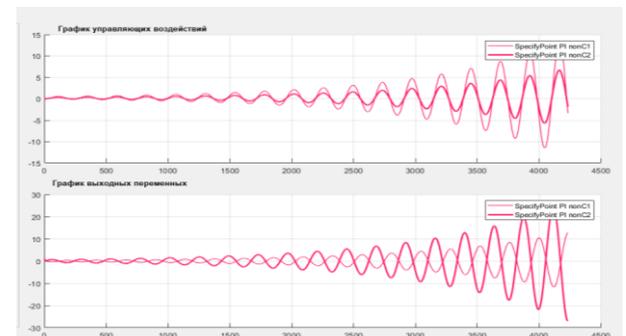


Рисунок Е.61 – Переходный процесс при $\rho = 0.5$

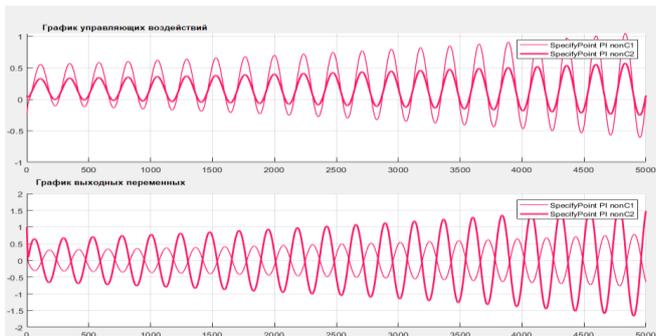


Рисунок Е.62 – Переходный процесс при $\rho = 0.6$

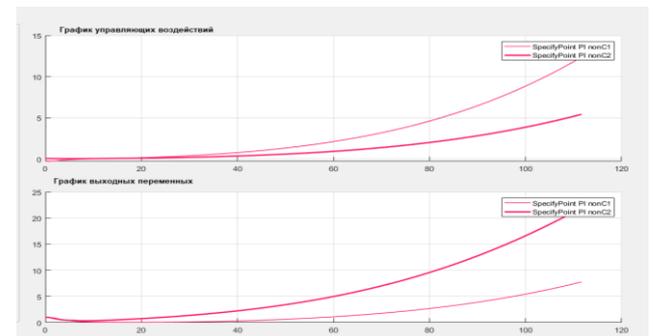


Рисунок Е.63 – Переходный процесс при $\rho = 0.7$

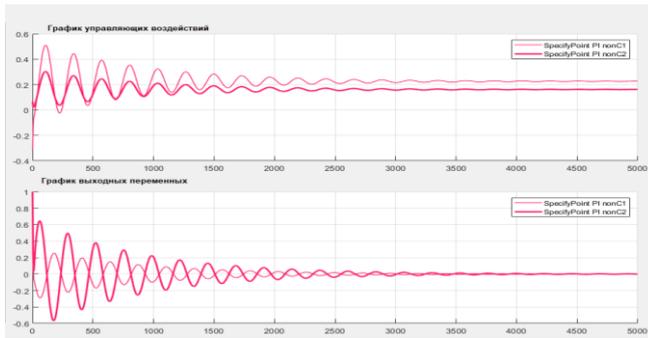


Рисунок E.64 – Переходный процесс
при $\rho = 0.8$

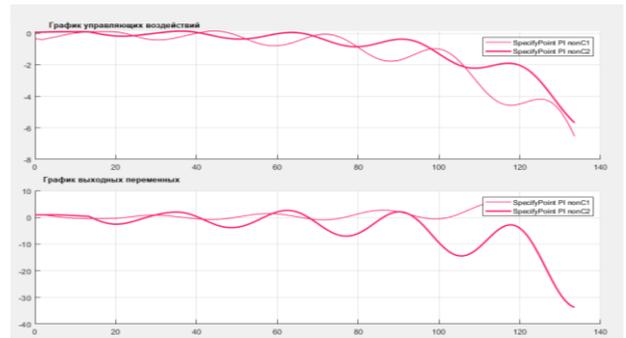


Рисунок E.65 – Переходный процесс
при $\rho = 0.9$

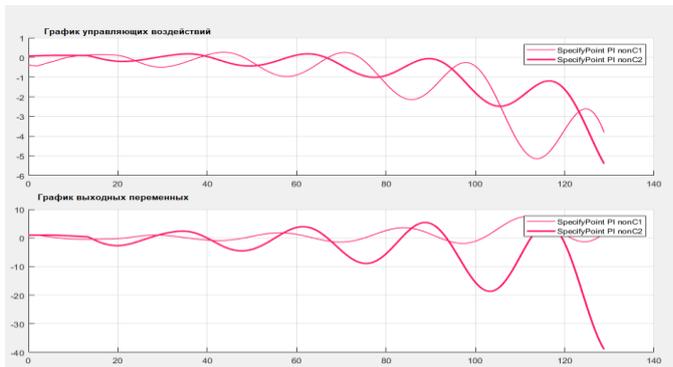


Рисунок E.66 – Переходный процесс при
 $\rho = 1$

Таблица Е.7 – Результаты перебора ρ для WW (2)

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-22.8p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.0837e^{-8.88p}}{42.18p + 1} - \frac{0.1068e^{-8.88p}}{66.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 1.203 & -1.013 \\ 0.942 & -1.263 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.344 & -0.289 \\ 0.269 & -0.361 \end{bmatrix}$	0.7327
0.1	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-22.8p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{42.18p + 1} - \frac{0.1068e^{-8.88p}}{66.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 5.319 & -0.9117 \\ 0.8478 & -1.3557 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.3889 & -0.2601 \\ 0.2421 & -0.3874 \end{bmatrix}$	0.4396
0.2	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-22.8p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{66.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 9.436 & -0.8104 \\ 0.7536 & -1.4484 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4338 & -0.2312 \\ 0.2152 & -0.4138 \end{bmatrix}$	0.3339
0.3	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-22.8p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{66.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 13.552 & -0.7091 \\ 0.6594 & -1.5411 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4787 & -0.2023 \\ 0.1883 & -0.4402 \end{bmatrix}$	0.2996
0.4	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-22.8p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{66.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 17.668 & -0.6078 \\ 0.5652 & -1.6338 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5236 & -0.1734 \\ 0.1614 & -0.4666 \end{bmatrix}$	0.2752
0.5	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-22.8p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{66.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 21.785 & -0.5065 \\ 0.471 & -1.7265 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5685 & -0.1445 \\ 0.1345 & -0.493 \end{bmatrix}$	0.2607

Продолжение таблицы E.7

p	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0.6	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-22.8p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{66.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 25.9 & -0.4052 \\ 0.3768 & -1.819 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.6134 & -0.1156 \\ 0.1076 & -0.5194 \end{bmatrix}$	0.2540
0.7	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.089e^{-22.8p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{66.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 30.017 & -0.3039 \\ 0.2826 & -1.9119 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.6583 & -0.0867 \\ 0.0807 & -0.5458 \end{bmatrix}$	0.2508
0.8	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.1121e^{-22.8p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{66.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 34.13 & -0.2026 \\ 0.1884 & -2.0046 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.7032 & -0.0578 \\ 0.0538 & -0.5722 \end{bmatrix}$	0.2488
0.9	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.1121e^{-22.8p}}{(53.28 + p)(49.95 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{66.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 38.25 & -0.1013 \\ 0.0942 & -2.097 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.7481 & -0.0289 \\ 0.0269 & -0.5986 \end{bmatrix}$	0.2477
1	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.1121e^{-6.66p}}{66.6p + 1} - \frac{0.1121e^{-22.8p}}{(42.72 + p)(40.05 + p) + 1} \\ \frac{0.1043e^{-8.88p}}{33.82p + 1} - \frac{0.1332e^{-8.88p}}{3.5p + 1} \end{array} \right]$	$\begin{bmatrix} 42.366 & 0 \\ 0 & -2.19 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.793 & 0 \\ 0 & -0.625 \end{bmatrix}$	0.2605

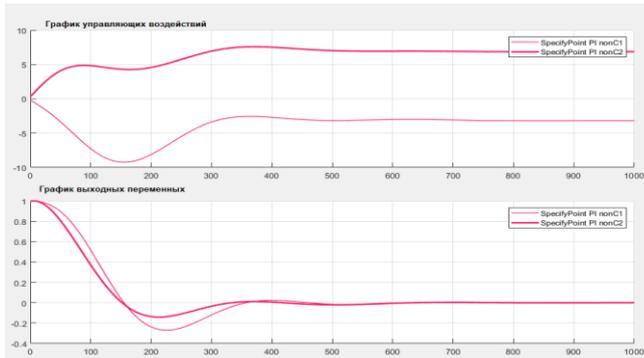


Рисунок E.67 – Переходный процесс при $\rho = 0$

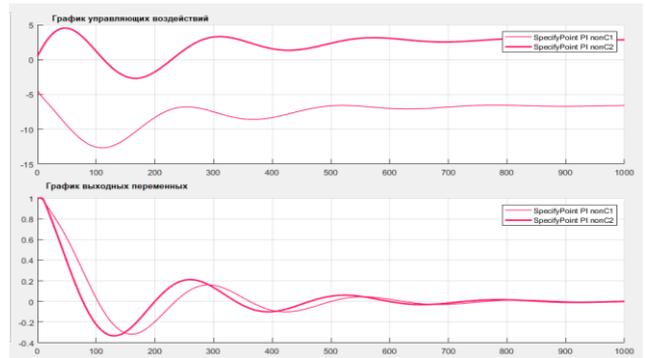


Рисунок E.68 – Переходный процесс при $\rho = 0.1$

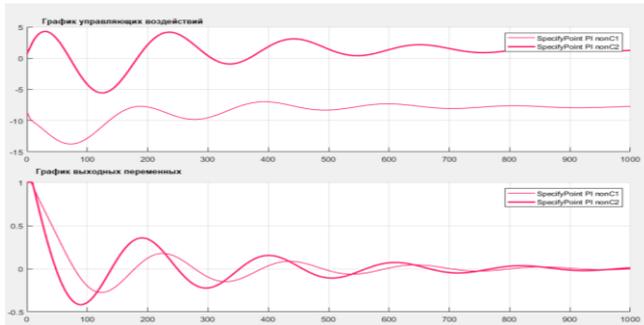


Рисунок E.69 – Переходный процесс при $\rho = 0.2$

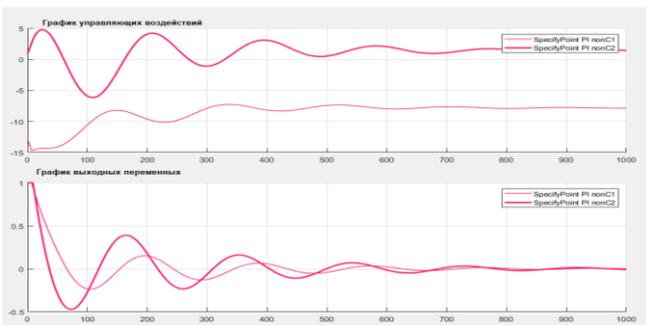


Рисунок E.70 – Переходный процесс при $\rho = 0.3$

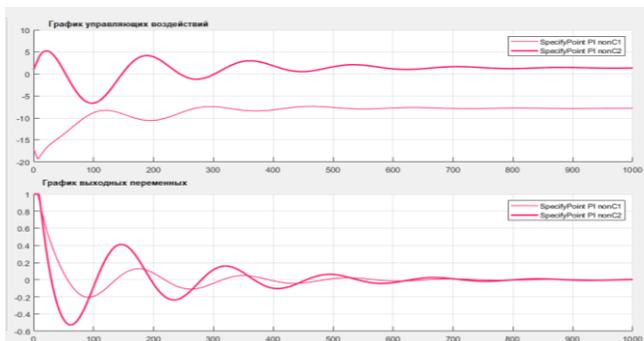


Рисунок E.71 – Переходный процесс при $\rho = 0.4$

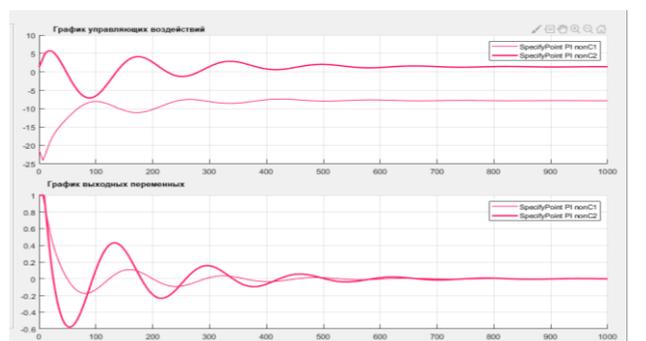


Рисунок E.72 – Переходный процесс при $\rho = 0.5$

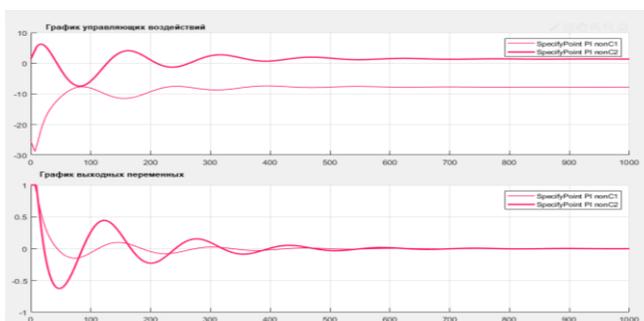


Рисунок E.73 – Переходный процесс при $\rho = 0.6$

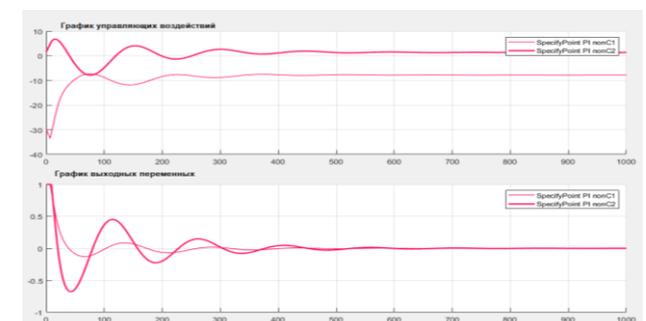


Рисунок E.74 – Переходный процесс при $\rho = 0.7$

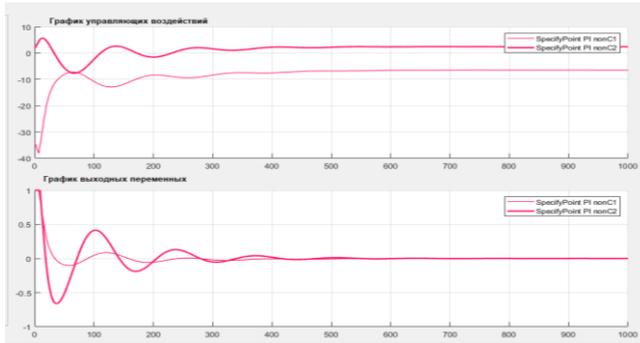


Рисунок E.75 – Переходный процесс
при $\rho = 0.8$

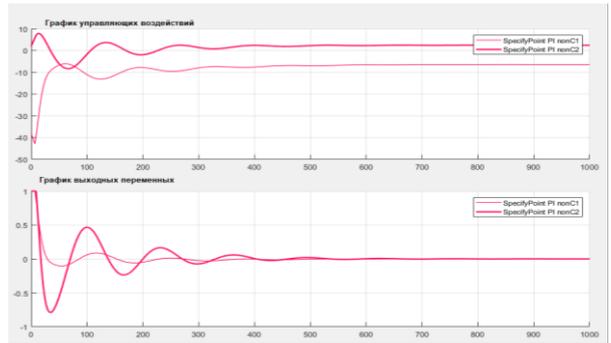


Рисунок E.76 – Переходный процесс
при $\rho = 0.9$

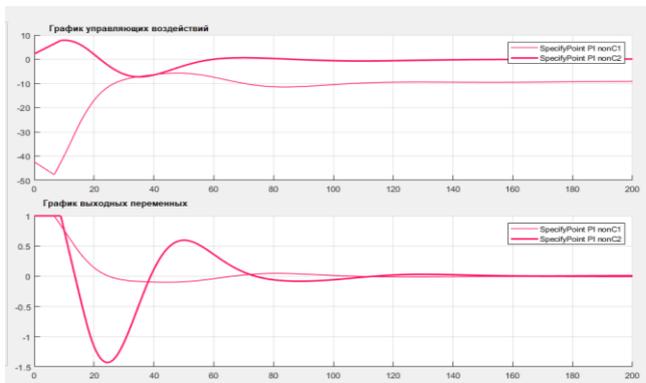


Рисунок E.77 – Переходный процесс
при $\rho = 1$

Таблица Е.8 – Результаты перебора ρ для SM (1)

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0	$\tau_{11} = 16.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 27.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 22, \tau_{23} = 22.5, \tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 22, \tau_{33} = 27.5$	$\begin{bmatrix} 0.016594 & -0.010629 & -0.0002544 \\ -0.01739 & 0.013734 & -0.0012474 \\ 0.001826 & 0.0008877 & 0.001666 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.000823 & -0.0005315 & -0.00001272 \\ -0.0008696 & 0.0006866 & -0.00006237 \\ 0.00009130 & 0.00004439 & 0.00008331 \end{bmatrix}$	0.9845
0.1	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 27.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 18, \tau_{23} = 22.5, \tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18, \tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 0.250558 & -0.005956 & -0.0002289 \\ -0.015653 & 0.28042 & -0.0011227 \\ 0.0016433 & 0.00079896 & 0.22049 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0125279 & -0.00047831 & -0.00001147 \\ -0.0007827 & 0.014021 & -0.000056134 \\ 0.00008217 & 0.00003995 & 0.0110246 \end{bmatrix}$	$1.14 \cdot 10^{25}$
0.2	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 27.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 18, \tau_{23} = 27.5, \tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18, \tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 0.4845 & -0.008503 & -0.000203 \\ -0.0139 & 0.5471 & -0.000998 \\ 0.001461 & 0.0007102 & 0.439 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.02423 & -0.000425 & -1.02 \cdot 10^{-5} \\ -0.000696 & 0.027356 & -4.99 \cdot 10^{-5} \\ -7.304 \cdot 10^{-5} & 3.551 \cdot 10^{-5} & 0.02197 \end{bmatrix}$	$1.47 \cdot 10^{31}$
0.3	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 27.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 18, \tau_{23} = 27.5, \tau_{31} = 16.5, \tau_{32} = 18, \tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 0.71849 & -0.00744 & -0.000178 \\ -0.01217 & 0.8138 & -0.000873 \\ 0.001278 & 0.000621 & 0.65814 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.03592 & -0.000372 & -8.9 \cdot 10^{-6} \\ -0.000609 & 0.04069 & -4.37 \cdot 10^{-5} \\ 6.39 \cdot 10^{-5} & 3.11 \cdot 10^{-5} & 0.032907 \end{bmatrix}$	$2.82 \cdot 10^{34}$
0.4	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 22.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 18, \tau_{23} = 22.5, \tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18, \tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 0.95245 & -0.006377 & -0.000153 \\ -0.010435 & 1.0805 & -0.000748 \\ 0.001096 & 0.000533 & 0.87697 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.047622 & -0.000319 & -7.63 \cdot 10^{-6} \\ -0.000522 & 0.054024 & -3.74 \cdot 10^{-5} \\ 5.48 \cdot 10^{-5} & 2.66 \cdot 10^{-5} & 0.043848 \end{bmatrix}$	$1.55 \cdot 10^{37}$
0.5	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 27.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 18, \tau_{23} = 22.5, \tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18, \tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 1.1864 & -0.005315 & -0.000127 \\ -0.008696 & 1.34718 & -0.000624 \\ 0.000913 & 0.000444 & 1.095795 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.059321 & -0.000266 & -6.36 \cdot 10^{-6} \\ -0.000435 & 0.067359 & -3.12 \cdot 10^{-5} \\ -4.56 \cdot 10^{-5} & 2.22 \cdot 10^{-5} & 0.05479 \end{bmatrix}$	$2.96 \cdot 10^{39}$
0.6	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 27.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 18, \tau_{23} = 22.5, \tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18, \tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 1.42038 & -0.004252 & -0.000102 \\ -0.006956 & 1.61387 & -0.000499 \\ 0.00073 & 0.000355 & 1.314621 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.071019 & -0.000213 & -5.09 \cdot 10^{-6} \\ -0.000348 & 0.080693 & -2.49 \cdot 10^{-5} \\ 3.65 \cdot 10^{-5} & 1.78 \cdot 10^{-5} & 0.065731 \end{bmatrix}$	$2.23 \cdot 10^{41}$
0.7	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 27.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 18, \tau_{23} = 22.5, \tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18, \tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 1.65434 & -0.003189 & -0.0000763 \\ -0.005217 & 1.880558 & -0.000374 \\ 0.000548 & 0.000266 & 1.533447 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.082717 & -0.000159 & -3.82 \cdot 10^{-6} \\ -0.000261 & 0.094028 & -1.897 \cdot 10^{-5} \\ 2.74 \cdot 10^{-5} & 1.33 \cdot 10^{-5} & 0.076672 \end{bmatrix}$	$7.76 \cdot 10^{42}$

Продолжение таблицы Е.8

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0.8	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 27.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 18, \tau_{23} = 22.5, \tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18, \tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 1.8883 & -0.002126 & -0.0000509 \\ -0.003478 & 2.4173 & -0.000249 \\ 0.000365 & 0.000178 & 1.752273 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.094415 & -0.000106 & -2.54 \cdot 10^{-6} \\ -0.000174 & 0.107362 & -1.25 \cdot 10^{-5} \\ 1.83 \cdot 10^{-5} & 8.88 \cdot 10^{-6} & 0.087614 \end{bmatrix}$	$1.57 \cdot 10^{44}$
0.9	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 27.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 18, \tau_{23} = 22.5, \tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18, \tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 2.12227 & -0.001063 & -0.0000254 \\ -0.001739 & 2.413937 & -0.000125 \\ 0.000183 & 0.0000888 & 1.971099 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.106113 & -5.31 \cdot 10^{-5} & -1.27 \cdot 10^{-6} \\ -8.7 \cdot 10^{-5} & 0.120697 & -6.24 \cdot 10^{-6} \\ 9.13 \cdot 10^{-6} & 4.44 \cdot 10^{-6} & 0.098555 \end{bmatrix}$	$2.12 \cdot 10^{45}$
1	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18, \tau_{13} = 27.5, \tau_{21} = 13.5, \tau_{22} = 18, \tau_{23} = 22.5, \tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18, \tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 2.3562 & 0 & 0 \\ 0 & 2.6806 & 0 \\ 0 & 0 & 2.1899 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.1178 & 0 & 0 \\ 0 & 0.13403 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1096 \end{bmatrix}$	$2.09 \cdot 10^{46}$

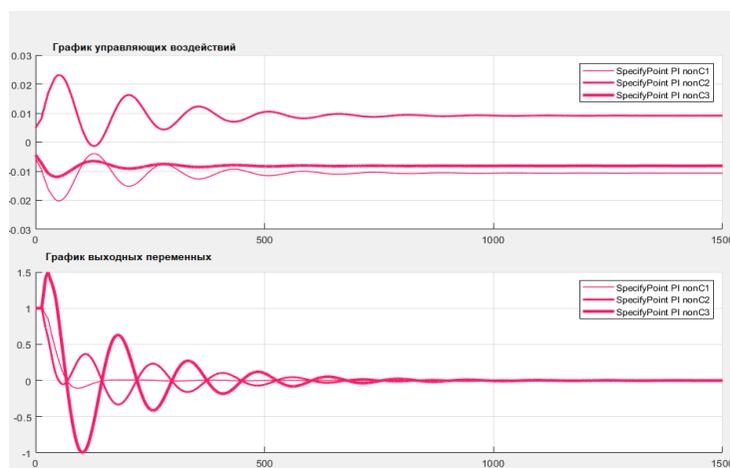


Рисунок Е.78 – Переходный процесс при $\rho = 0$

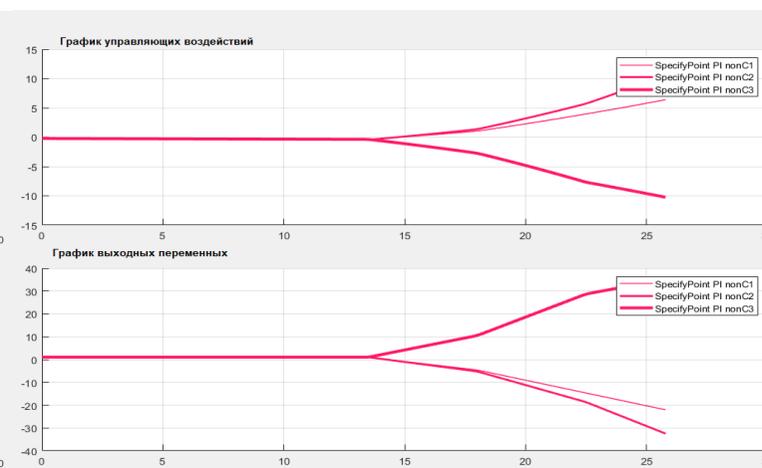
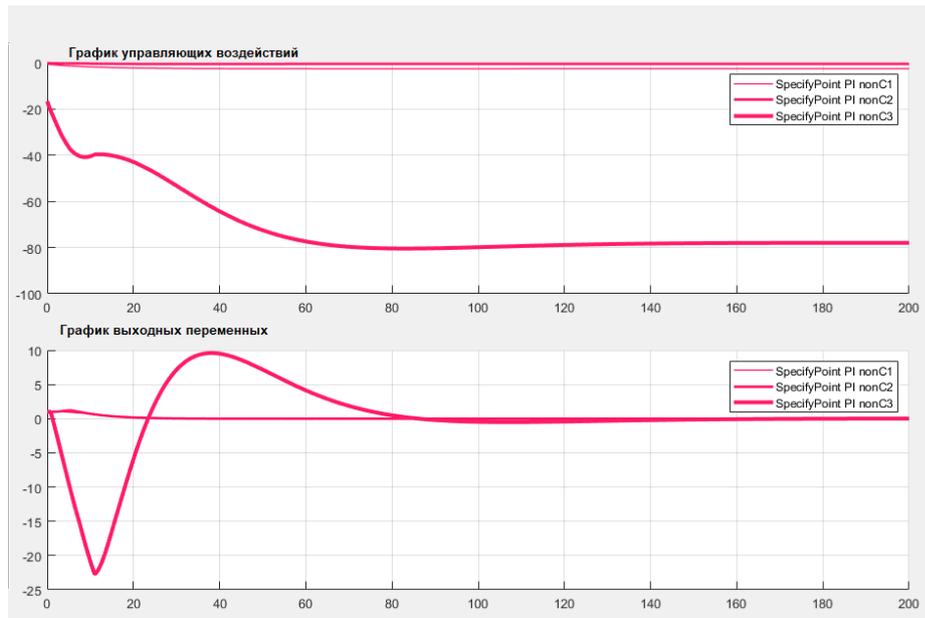
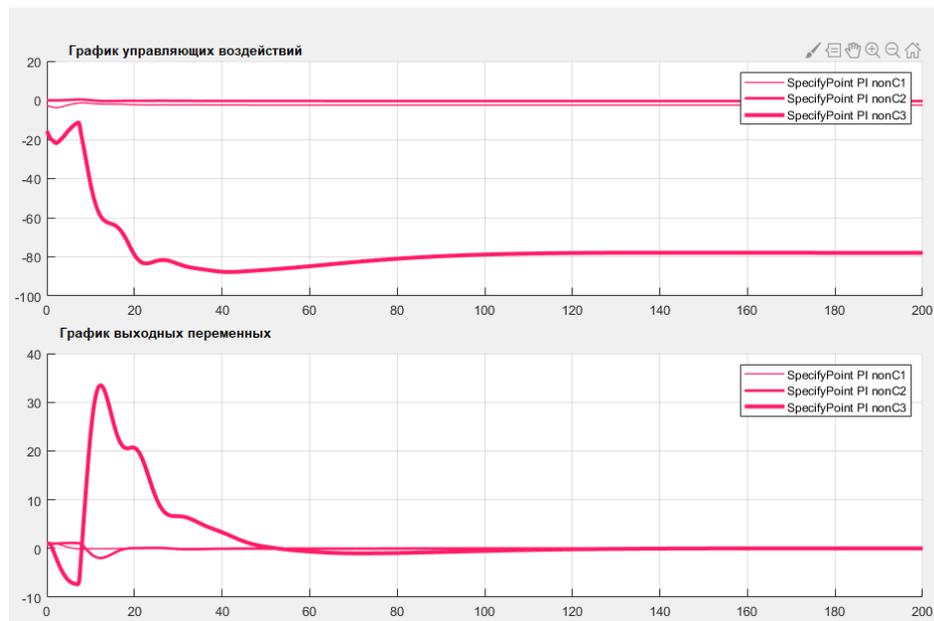


Рисунок Е.79 – Переходный процесс при $\rho = 0.1$

Таблица Е.9 – Результаты перебора ρ для OR (2)

ρ	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК
0	$\tau_{11} = 3.12, \tau_{12} = 4.2, \tau_{13} = 0.8,$ $\tau_{21} = 5.2, \tau_{22} = 2.4, \tau_{23} = 1.44, \tau_{31} = 7.36, \tau_{32} = 11.28, \tau_{33}$ $= 0.8$	$\begin{bmatrix} 0.6479185 & -0.1239156 & 0.0022248 \\ 0.2520090 & -0.1646133 & -0.0004727 \\ 12.444825 & 3.8020019 & 0.35852961 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.1993596 & -0.0381278 & 0.0006845 \\ 0.0775412 & -0.0506502 & -0.000145 \\ 3.8291770 & 1.16984675 & 0.1103168 \end{bmatrix}$	23.76
0.1	$\tau_{11} = 2.08, \tau_{12} = 4.2, \tau_{13} = 0.8,$ $\tau_{21} = 7.8, \tau_{22} = 2.4, \tau_{23} = 1.44, \tau_{31} = 7.36, \tau_{32}$ $= 11.28, \tau_{33} = 0.8$	$\begin{bmatrix} 2.9237412 & -0.1115240 & 0.0020023 \\ 0.2268081 & -0.1916430 & -0.0004254 \\ 11.200342 & 3.4218017 & 1.1593686 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.199359 & -0.0381278 & 0.0006845 \\ 0.0775412 & -0.050650 & -0.000145 \\ 3.8291770 & 1.1698467 & 0.1103168 \end{bmatrix}$	$5.46 \cdot 10^{122}$
0.2	$\tau_{11} = 2.08, \tau_{12} = 2.8, \tau_{13} = 1.2,$ $\tau_{21} = 7.8, \tau_{22} = 2.4, \tau_{23} = 0.96, \tau_{31} = 7.36, \tau_{32}$ $= 11.28, \tau_{33} = 0.8$	$\begin{bmatrix} 5.199564 & -0.099133 & 0.0017799 \\ 0.2016072 & -0.218673 & -0.000378 \\ 9.9558604 & 3.0416016 & 1.9602077 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.8581786 & -0.030502 & 0.0005477 \\ 0.062033 & -0.057917 & -0.000116 \\ 3.0633417 & 0.9358774 & 0.2301342 \end{bmatrix}$	$2.55 \cdot 10^{170}$
0.3	$\tau_{11} = 2.08, \tau_{12} = 2.8, \tau_{13} = 0.8,$ $\tau_{21} = 7.8, \tau_{22} = 2.4, \tau_{23} = 0.96, \tau_{31} = 7.36, \tau_{32}$ $= 11.28, \tau_{33} = 0.8$	$\begin{bmatrix} 7.475387 & -0.086741 & 0.001557 \\ 0.176406 & -0.245703 & -0.000331 \\ 8.711378 & 2.661401 & 2.761047 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.187588 & -0.02669 & 0.000479 \\ 0.054279 & -0.06155 & -0.000102 \\ 2.680424 & 0.818893 & 0.290043 \end{bmatrix}$	$3.1 \cdot 10^{200}$
0.4	$\tau_{11} = 2.08, \tau_{12} = 4.2, \tau_{13} = 0.8,$ $\tau_{21} = 7.8, \tau_{22} = 2.4, \tau_{23} = 1.44, \tau_{31} = 7.36, \tau_{32}$ $= 11.28, \tau_{33} = 0.8$	$\begin{bmatrix} 9.751209 & -0.074349 & 0.001335 \\ 0.151205 & -0.272732 & -0.000284 \\ 7.466895 & 2.281201 & 3.561886 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.516998 & -0.022899 & 0.000411 \\ 0.046525 & -0.065183 & -0.0000873 \\ 2.297506 & 0.701908 & 0.349952 \end{bmatrix}$	$2 \cdot 10^{222}$
0.5	$\tau_{11} = 2.08, \tau_{12} = 4.2, \tau_{13} = 0.8,$ $\tau_{21} = 5.2, \tau_{22} = 2.4, \tau_{23} = 1.44, \tau_{31} = 7.36, \tau_{32}$ $= 11.28, \tau_{33} = 0.8$	$\begin{bmatrix} 12.02703 & -0.061958 & 0.001112 \\ 0.126005 & -0.299762 & -0.000236 \\ 6.222413 & 1.901001 & 4.362725 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.846407 & -0.019064 & 0.000342 \\ 0.038771 & -0.068816 & -0.0000727 \\ 1.914589 & 0.584923 & 0.40986 \end{bmatrix}$	$2.6 \cdot 10^{239}$
0.6	$\tau_{11} = 2.08, \tau_{12} = 4.2, \tau_{13} = 0.8,$ $\tau_{21} = 5.2, \tau_{22} = 2.4, \tau_{23} = 1.44, \tau_{31} = 7.36, \tau_{32}$ $= 11.28, \tau_{33} = 0.8$	$\begin{bmatrix} 14.30285 & -0.049566 & 0.00089 \\ 0.100804 & -0.326792 & -0.000189 \\ 4.97793 & 1.520801 & 5.163564 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.175817 & -0.015251 & 0.000274 \\ 0.031016 & -0.072449 & -0.0000582 \\ 1.531671 & 0.467939 & 0.469769 \end{bmatrix}$	$3.1 \cdot 10^{253}$
0.7	$\tau_{11} = 2.08, \tau_{12} = 4.2, \tau_{13} = 0.8,$ $\tau_{21} = 7.8, \tau_{22} = 2.4, \tau_{23} = 1.44, \tau_{31} = 7.36, \tau_{32}$ $= 11.28, \tau_{33} = 0.8$	$\begin{bmatrix} 16.57868 & -0.037175 & 0.000667 \\ 0.075603 & -0.353821 & -0.000142 \\ 3.733448 & 1.140601 & 5.964403 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.505226 & -0.011438 & 0.000205 \\ 0.023262 & -0.076083 & -0.0000436 \\ 1.148753 & 0.350954 & 0.529678 \end{bmatrix}$	$3.3 \cdot 10^{265}$
0.8	$\tau_{11} = 2.08, \tau_{12} = 2.8, \tau_{13} = 1.2,$ $\tau_{21} = 7.8, \tau_{22} = 2.4, \tau_{23} = 0.96, \tau_{31} = 11.04, \tau_{32}$ $= 7.52, \tau_{33} = 1.2$	$\begin{bmatrix} 18.8545 & -0.024783 & 0.000445 \\ 0.050402 & -0.380851 & -0.0000945 \\ 2.488965 & 0.7604 & 6.765242 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.834636 & -0.007626 & 0.000137 \\ 0.015508 & -0.079716 & -0.0000291 \\ 0.765835 & 0.233969 & 0.589586 \end{bmatrix}$	$1.3 \cdot 10^{276}$
0.9	$\tau_{11} = 2.08, \tau_{12} = 2.8, \tau_{13} = 1.2,$ $\tau_{21} = 7.8, \tau_{22} = 3.6, \tau_{23} = 0.96, \tau_{31} = 11.04, \tau_{32}$ $= 7.52, \tau_{33} = 1.2$	$\begin{bmatrix} 21.13032 & -0.012392 & 0.000222 \\ 0.025201 & -0.407881 & -0.0000473 \\ 1.244483 & 0.3802 & 7.566081 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.164045 & -0.003813 & 0.0000685 \\ 0.007754 & -0.083349 & -0.0000145 \\ 0.382918 & 0.116985 & 0.649495 \end{bmatrix}$	$3.9 \cdot 10^{285}$
1	$\tau_{11} = 2.08, \tau_{12} = 4.2, \tau_{13} = 1.2,$ $\tau_{21} = 7.8, \tau_{22} = 2.4, \tau_{23} = 0.96, \tau_{31} = 11.04, \tau_{32}$ $= 11.28, \tau_{33} = 1.2$	$\begin{bmatrix} 23.40615 & 0 & 0 \\ 0 & -0.434911 & 0 \\ 0 & 0 & 8.36692 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.493455 & 0 & 0 \\ 0 & -0.086982 & 0 \\ 0 & 0 & 0.709404 \end{bmatrix}$	$1.4 \cdot 10^{294}$

Рисунок Е.80 – Переходный процесс при $\rho = 0$ Рисунок Е.81 – Переходный процесс при $\rho = 0.1$

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Расчет робастного-адаптивного регулятора для МiМо объектов

Таблица Ж.1 – Результаты перебора α для WW (2)

	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК rob _{ad}	ИКК rob	%
Максимальная разница ИКК	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.112pe^{-5.34p}}{53.4p + 1} \quad \frac{-0.0898e^{-10.68p}}{(42.75p + 1)(40.05p + 1)} \\ \frac{0.0837e^{-7.12p}}{33.82p + 1} \quad \frac{-0.1068e^{-7.12p}}{31.15p + 1} \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{c} 25.85 \quad -6.91 \\ 6.428 \quad -16.701 \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{c} 0.4749 \quad -0.2199 \\ 0.2047 \quad -0.5296 \end{array} \right]$	0.1331	0.1344	1
Минимальная разница ИКК	$\left[\begin{array}{c} \frac{0.112pe^{-5.34p}}{53.4p + 1} \quad \frac{-0.0898e^{-10.68p}}{(42.75p + 1)(40.05p + 1)} \\ \frac{0.0837e^{-7.12p}}{33.82p + 1} \quad \frac{-0.1068e^{-8.88p}}{31.15p + 1} \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{c} 25.055 \quad -6.778 \\ 6.308 \quad -16.241 \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{c} 0.5542 \quad -0.2178 \\ 0.2028 \quad -0.5212 \end{array} \right]$	0.1402	0.1402	0
Средняя разница (8192)	-	-	-	-	-	0.0002
Среднее значение ИКК	-	-	-	0.147078	0.147078	0

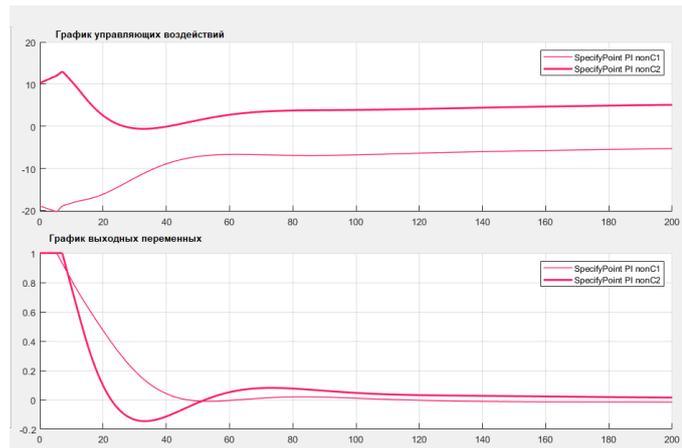


Рисунок Ж.1 – Переходный процесс при робастно-адаптивных настройках, максимальная разница

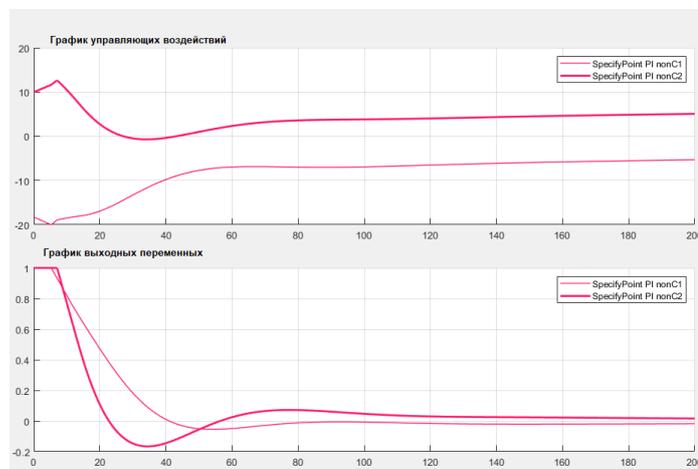


Рисунок Ж.2 – Переходный процесс при робастных настройках, максимальная разница

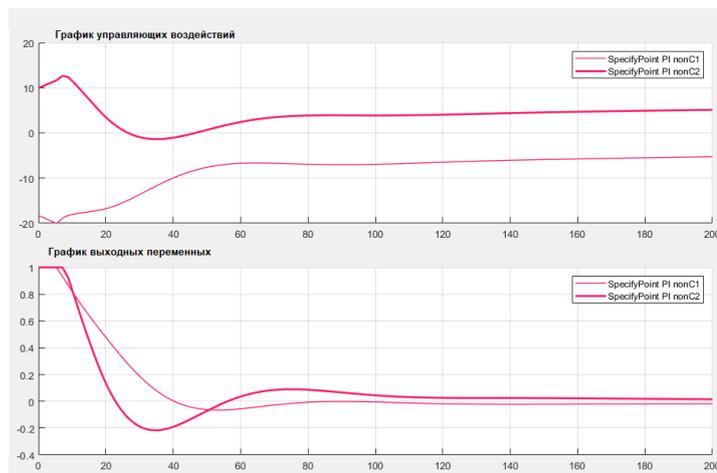


Рисунок Ж.3 – Переходный процесс при робастно-адаптивных и робастных настройках, минимальная разница

Таблица Ж.2 – Результаты перебора α для VL (3)

	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК robad	ИКК rob	%
Максимальная разница ИКК	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-0.85p}}{5.95p + 1} & \frac{1.105e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-2.38e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.2975p}}{7.82p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.351 & 0 \\ 0 & 4.517 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.355 & 0 \\ 0 & 0.491 \end{bmatrix}$	0.0064	0.0084	31.25
Минимальная разница ИКК	$\begin{bmatrix} \frac{-1.87e^{-0.85p}}{5.95p + 1} & \frac{1.105e^{-0.255p}}{5.95p + 1} \\ \frac{-2.38e^{-1.53p}}{8.075p + 1} & \frac{3.655e^{-0.4025p}}{7.82p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.511 & 0 \\ 0 & 2.903 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.254 & 0 \\ 0 & 0.371 \end{bmatrix}$	0.0088	0.0088	0
Средняя разница (4096)	-	-	-	-	-	0.007
Среднее значение ИКК	-	-	-	0.0094601	0.0094606	0.005

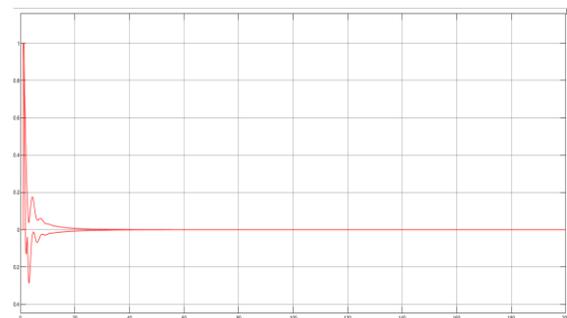


Рисунок Ж.4 – Переходный процесс при робастно-адаптивных настройках,



Рисунок Ж.5 – Переходный процесс при робастных настройках, максимальная разница

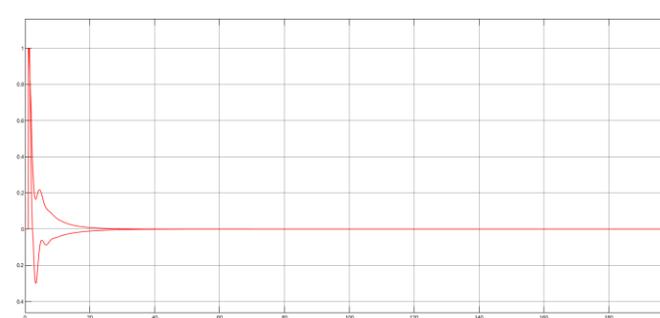


Рисунок Ж.6 – Переходный процесс при робастно-адаптивных и робастных настройках, минимальная разница

Таблица Ж.3 – Результаты перебора α для VL (4)

	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК robad	ИКК rob	%
Максимальная разница ИКК	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.105, k_{21} = -2.38, k_{22} = 3.655$	$\begin{bmatrix} -2.351 & 0 \\ 0 & 4.517 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.355 & 0 \\ 0 & 0.491 \end{bmatrix}$	0.0076	0.0082	7.9
Минимальная разница ИКК	$k_{11} = -1.87, k_{12} = 1.105, k_{21} = -2.38, k_{22} = 4.3$	$\begin{bmatrix} -2.045 & 0 \\ 0 & 3.928 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.292 & 0 \\ 0 & 0.427 \end{bmatrix}$	0.0081	0.0081	0
Средняя разница (81)						0.099
Среднее значение ИКК				0.0078004	0.0078008	0.005



Рисунок Ж.7 – Переходный процесс при робастно-адаптивных настройках, максимальная разница



Рисунок Ж.8 – Переходный процесс при робастных настройках, максимальная разница



Рисунок Ж.9 – Переходный процесс при робастно-адаптивных и робастных настройках, минимальная разница

Таблица Ж.4 – Результаты перебора α для VL (5)

	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК robad	ИКК rob	%
Максимальная разница ИКК	$\begin{bmatrix} \frac{-2.2e^{-0.1p}}{7p+1} & \frac{1.3e^{-0.03p}}{7p+1} \\ \frac{-2.8e^{-0.18p}}{9.5p+1} & \frac{4.3e^{-0.035p}}{9.2p+1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.351 & 0 \\ 0 & 4.517 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.355 & 0 \\ 0 & 0.491 \end{bmatrix}$	0.0037	0.0069	86.48
Минимальная разница ИКК	$\begin{bmatrix} \frac{-2.2e^{-0.1p}}{7p+1} & \frac{1.3e^{-0.03p}}{7p+1} \\ \frac{-2.8e^{-0.18p}}{9.5p+1} & \frac{4.3e^{-0.35p}}{9.2p+1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.2376 & 0 \\ 0 & 2.3776 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.1768 & 0 \\ 0 & 0.2584 \end{bmatrix}$	0.0078	0.0078	0
Средняя разница (4096)	-	-	-	-	-	1.08
Среднее значение ИКК	-	-	-	0.010439	0.010479	0.38

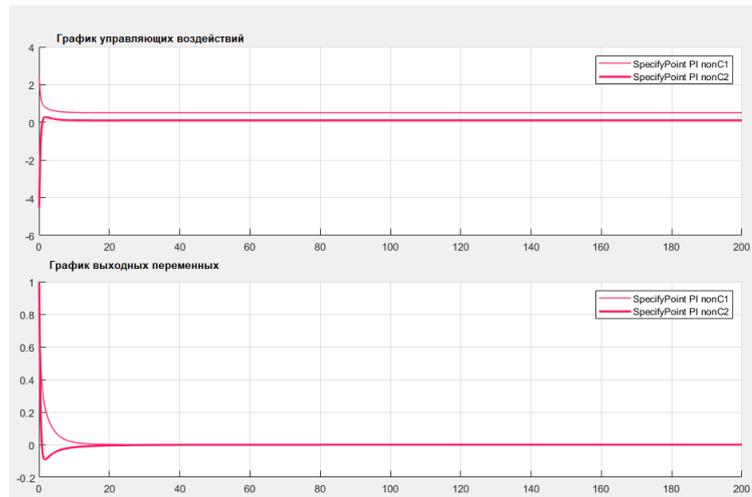


Рисунок Ж.10 – Переходный процесс при робастно-адаптивных настройках, максимальная разница

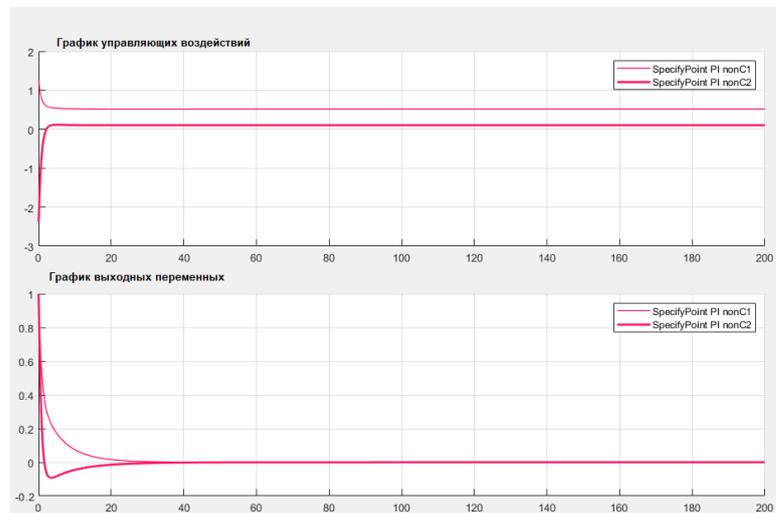


Рисунок Ж.11 – Переходный процесс при робастных настройках, максимальная разница

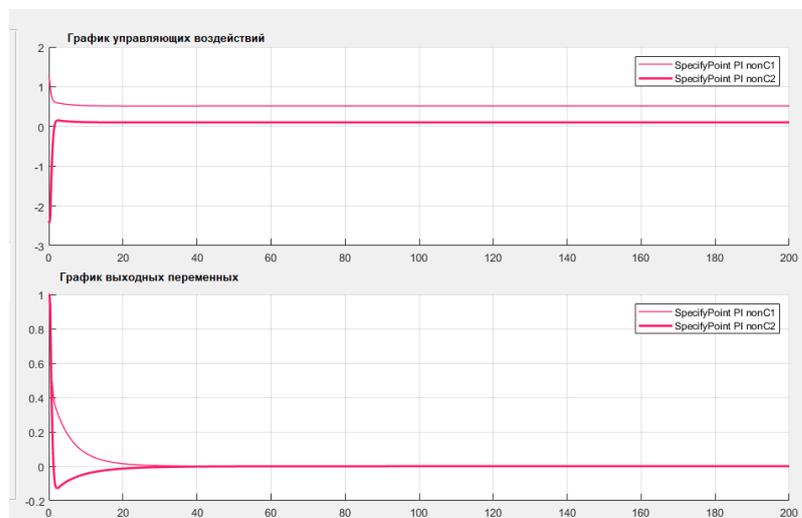


Рисунок Ж.12 – Переходный процесс при робастно-адаптивных и робастных настройках, минимальная разница

Таблица Ж.5 – Результаты перебора α для WW (2)

	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК robad	ИКК rob	%
Максимальная разница ИКК	$\begin{bmatrix} \frac{0.1121e^{-5.34p}}{53.4p + 1} & \frac{-0.0899e^{-1.2p}}{42.72p + 1} \\ \frac{0.0837e^{-7.12p}}{33.82p + 1} & \frac{-0.1068e^{-7.12p}}{3.5p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 36.69 & -2.492 \\ 2.32 & -7.721 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.726 & -0.0919 \\ 0.0854 & -0.6007 \end{bmatrix}$	0.0957	0.1081	12.95
Минимальная разница ИКК	$\begin{bmatrix} \frac{0.1121e^{-5.34p}}{53.4p + 1} & \frac{-0.0899e^{-1.2p}}{42.72p + 1} \\ \frac{0.0837e^{-7.12p}}{33.82p + 1} & \frac{-0.1068e^{-8.88p}}{3.5p + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 38.25 & -0.1013 \\ 0.0942 & -2.097 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.7481 & -0.0289 \\ 0.0269 & -0.5986 \end{bmatrix}$	0.1161	0.1161	0
Средняя разница (8192)	-	-	-	-	-	0.0016
Среднее значение ИКК	-	-	-	0.1406	0.1406	0

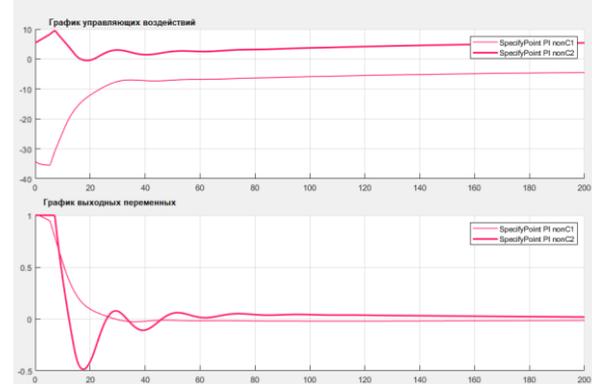


Рисунок Ж.13 – Переходный процесс при робастно-адаптивных настройках, максимальная разница

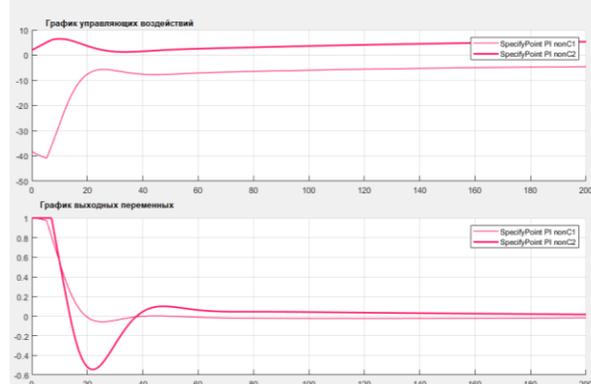


Рисунок Ж.15 – Переходный процесс при робастных настройках, максимальная разница

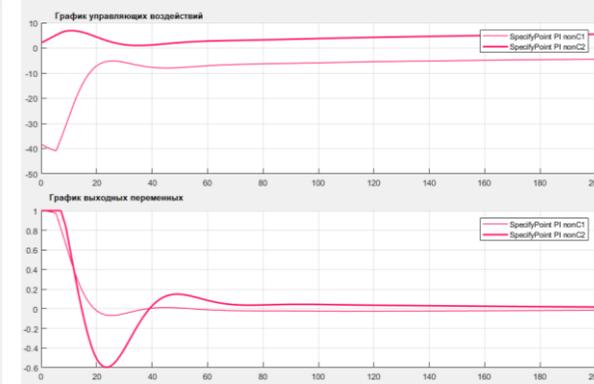


Рисунок Ж.14 – Переходный процесс при робастно-адаптивных и робастных настройках, минимальная разница

Таблица Ж.6 – Результаты перебора α для WB (7)

	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК robad	ИКК rob	%
Максимальная разница ИКК	$\left[\begin{array}{cc} \frac{11.008e^{-0.1p}}{14.362p + 1} & \frac{-16.254e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{5.676e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-0.3p}}{12.384p + 1} \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{cc} 0.650757 & -0.070396 \\ 0.024583 & -0.157393 \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{cc} 0.106899 & -0.006458 \\ 0.002255 & -0.011992 \end{array} \right]$	0.0124	0.0283	128
Минимальная разница ИКК	$\left[\begin{array}{cc} \frac{11.008e^{-0.1p}}{14.362p + 1} & \frac{-16.254e^{-0.3p}}{18.06p + 1} \\ \frac{5.676e^{-0.7p}}{9.374p + 1} & \frac{-16.684e^{-5.7p}}{12.384p + 1} \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{cc} 0.322818 & -0.015928 \\ 0.005562 & -0.066864 \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{cc} 0.02308 & -0.001698 \\ 0.000594 & -0.00584 \end{array} \right]$	0.0348	0.0348	0
Средняя разница (4096)	-	-	-	-	-	0.024
Среднее значение ИКК	-	-	-	0.047493	0.047496	0.006

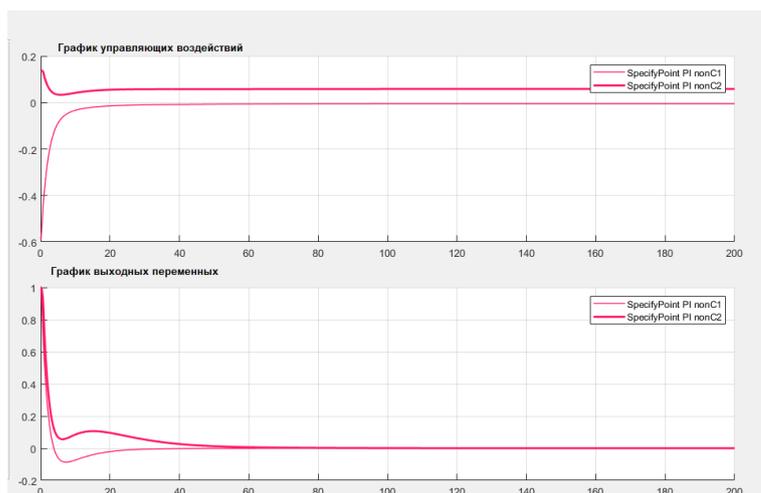


Рисунок Ж.16 – Переходный процесс при робастно-адаптивных настройках, максимальная разница

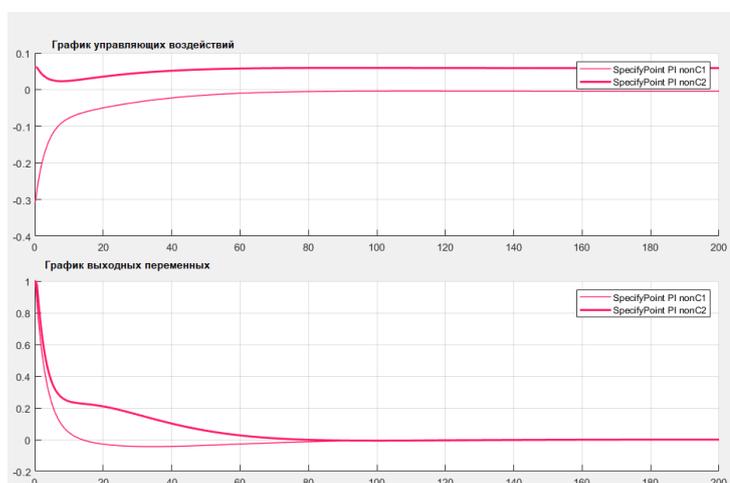


Рисунок Ж.17 – Переходный процесс при робастных настройках, максимальная разница

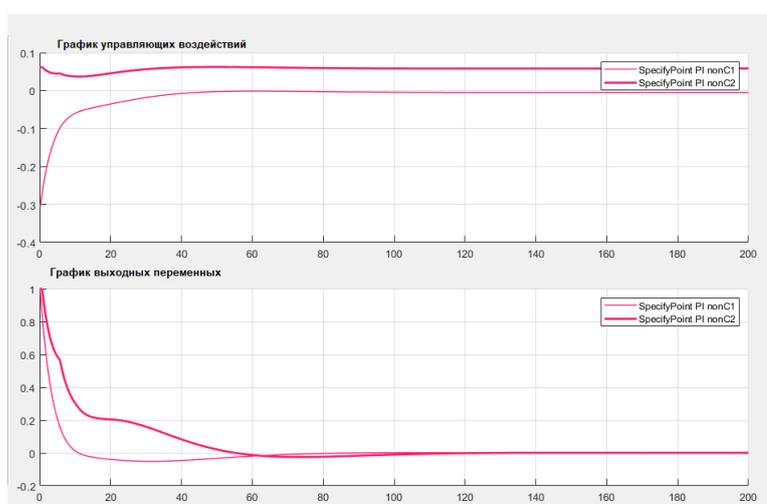


Рисунок Ж.18 – Переходный процесс при робастно-адаптивных и робастных настройках, минимальная разница

Таблица Ж.7 – Результаты перебора α для SM (1)

	Параметры ОУ	Параметры k_p	Параметры k_i	ИКК robad	ИКК rob	%
Максимальная разница ИКК	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18,$ $\tau_{13} = 22.5, \tau_{21} = 13.5,$ $\tau_{22} = 18, \tau_{23} = 22.5,$ $\tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18,$ $\tau_{33} = 22.5$	$\begin{bmatrix} 0.01825 & -0.0116 & -0.00027 \\ -0.0191 & 0.01511 & -0.00137 \\ 0.00201 & 0.00097 & 0.00183 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.00091 & -0.00058 & -0.000013 \\ -0.00095 & 0.00075 & -0.000068 \\ 0.00011 & 0.00004 & 0.000091 \end{bmatrix}$	0.5358	0.5440	1.5
Минимальная разница ИКК	$\tau_{11} = 13.5, \tau_{12} = 18,$ $\tau_{13} = 22.5, \tau_{21} = 13.5,$ $\tau_{22} = 18, \tau_{23} = 22.5,$ $\tau_{31} = 13.5, \tau_{32} = 18,$ $\tau_{33} = 27.5$	$\begin{bmatrix} 0.01659 & -0.01062 & -0.00025 \\ -0.01739 & 0.01373 & -0.00124 \\ 0.00182 & 0.00088 & 0.00166 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.00082 & -0.00053 & -0.000012 \\ -0.00086 & 0.00068 & -0.000062 \\ 0.000091 & 0.000044 & 0.000083 \end{bmatrix}$	0.6139	0.6139	0
Средняя разница (512)	-	-	-	-	-	0.0023
Среднее значение ИКК	-	-	-	0.608729	0.608741	0.002

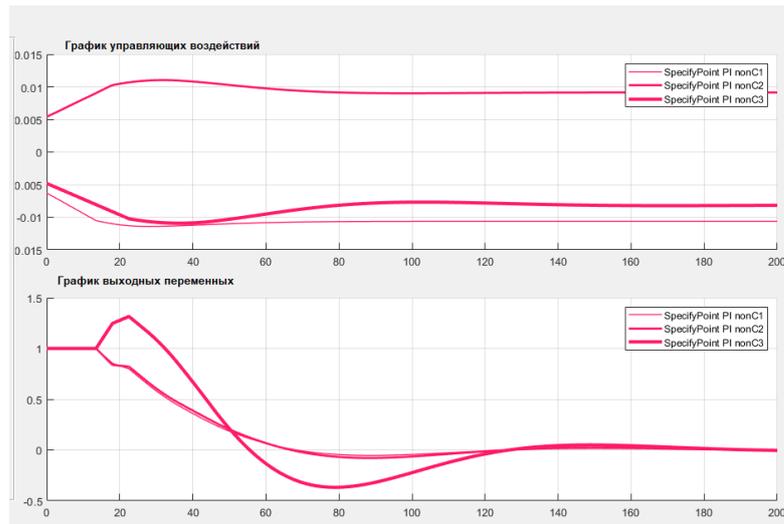


Рисунок Ж.19 – Переходный процесс при робастно-адаптивных настройках, максимальная разница

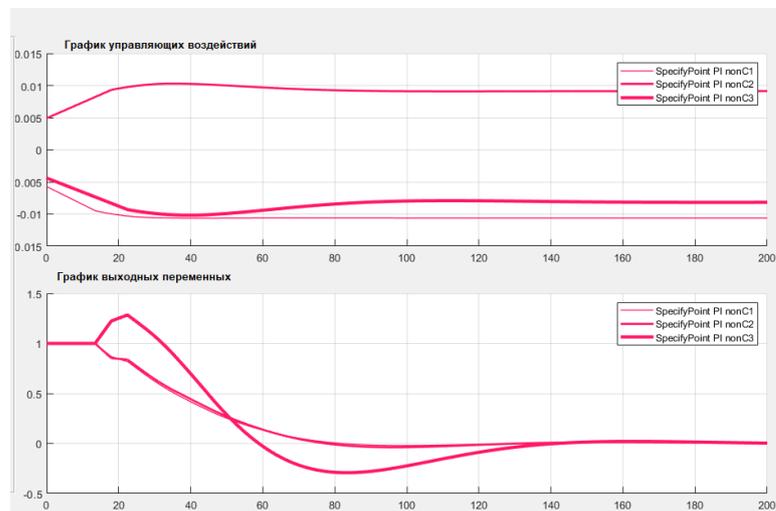


Рисунок Ж.20 – Переходный процесс при робастных настройках, максимальная разница

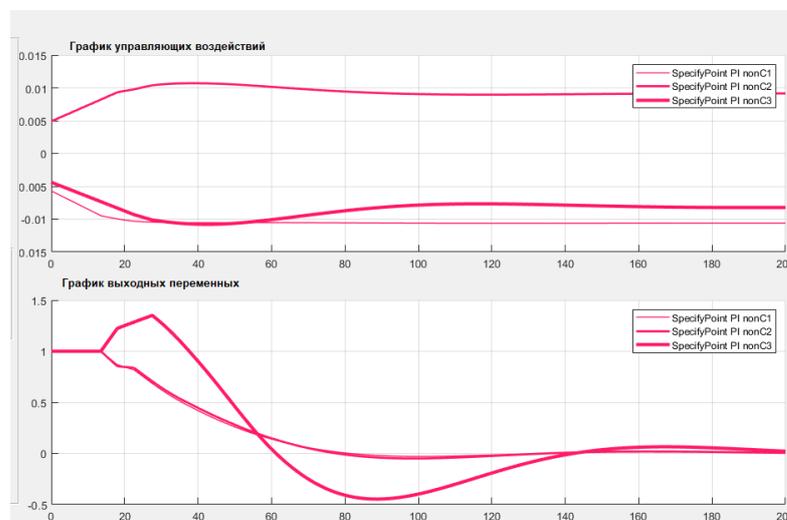


Рисунок Ж.21 – Переходный процесс при робастно-адаптивных и робастных настройках, минимальная разница

Таблица Ж.8 – Результаты перебора α для OR (2)

	Параметры ОУ	Параметры k_{π}	Параметры k_{η}	ИКК robad	ИКК rob	%
Максимальная разница ИКК	$\tau_{11} = 3.12, \tau_{12} = 4.2, \tau_{13} = 1.2, \tau_{21} = 7.8, \tau_{22} = 3.6, \tau_{23} = 1.44, \tau_{31} = 11.04, \tau_{32} = 11.28, \tau_{33} = 1.2$	$\begin{bmatrix} 0.64791 & -0.12391 & 0.00222 \\ 0.25201 & -0.16461 & -0.00047 \\ 12.44482 & 3.80201 & 0.35852 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.19935 & -0.03812 & 0.00068 \\ 0.07754 & -0.05065 & -0.00014 \\ 3.82917 & 1.16984 & 0.11031 \end{bmatrix}$	31.25	31.25	0
Минимальная разница ИКК	$\tau_{11} = 3.12, \tau_{12} = 4.2, \tau_{13} = 1.2, \tau_{21} = 7.8, \tau_{22} = 3.6, \tau_{23} = 1.44, \tau_{31} = 11.04, \tau_{32} = 11.28, \tau_{33} = 1.2$	$\begin{bmatrix} 0.64791 & -0.12391 & 0.00222 \\ 0.25201 & -0.16461 & -0.00047 \\ 12.44482 & 3.80201 & 0.35852 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.19935 & -0.03812 & 0.00068 \\ 0.07754 & -0.05065 & -0.00014 \\ 3.82917 & 1.16984 & 0.11031 \end{bmatrix}$	31.25	31.25	0
Средняя разница (512)	-	-	-	-	-	0
Среднее значение ИКК	-	-	-	21.937	21.937	0

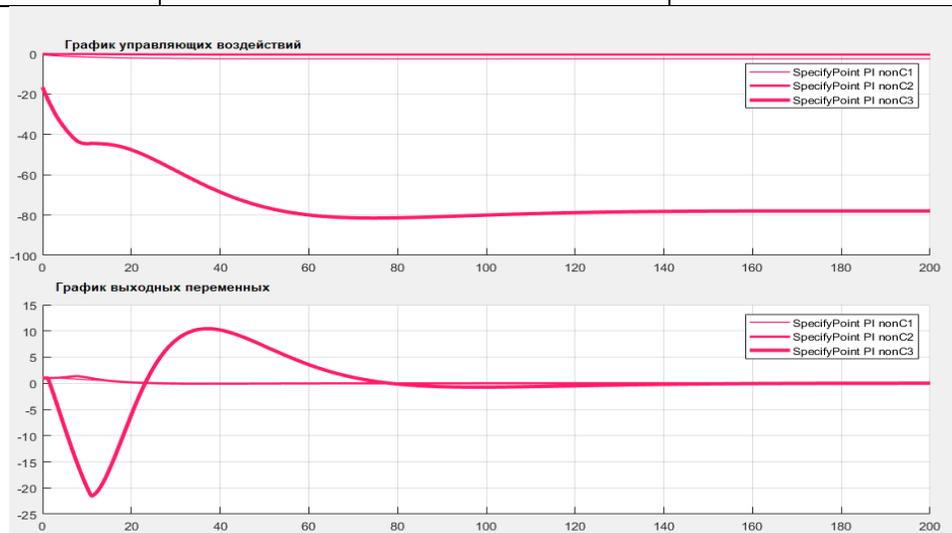


Рисунок Ж.22 – Переходный процесс при робастно-адаптивных и робастных настройках, минимальная разница и максимальная разница

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Имитационные модели

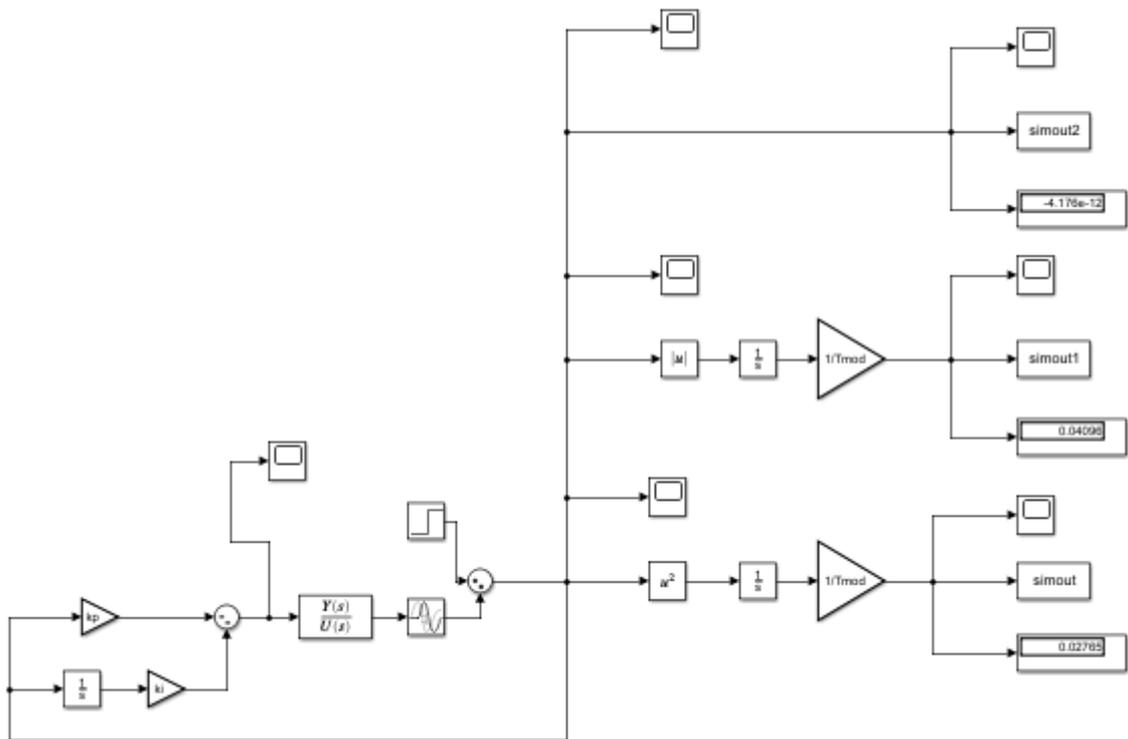


Рисунок И.1 – Имитационная модель для SiSo объекта управления

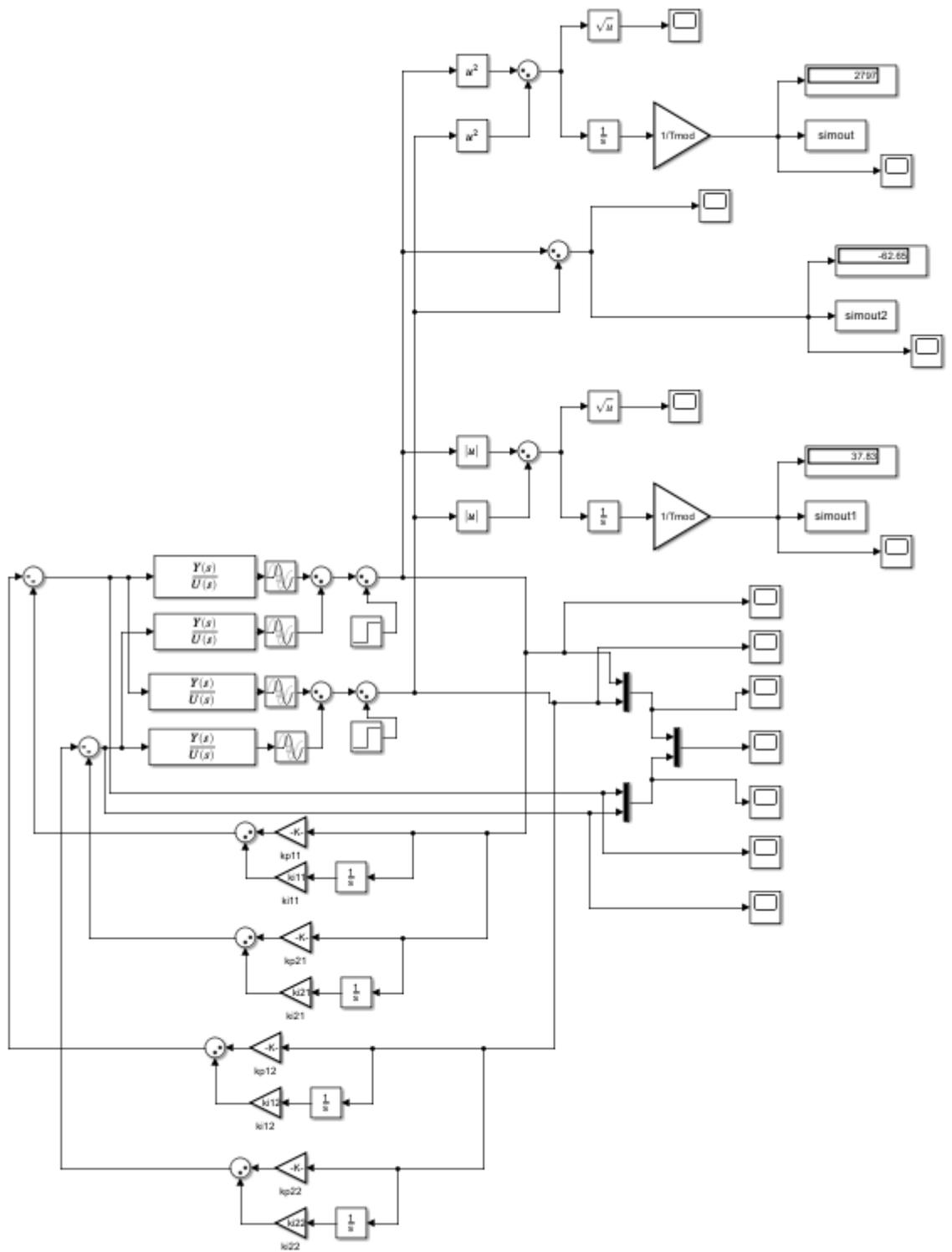


Рисунок И.2 – Имитационная модель для МiМo объекта управления размерностью 2x2

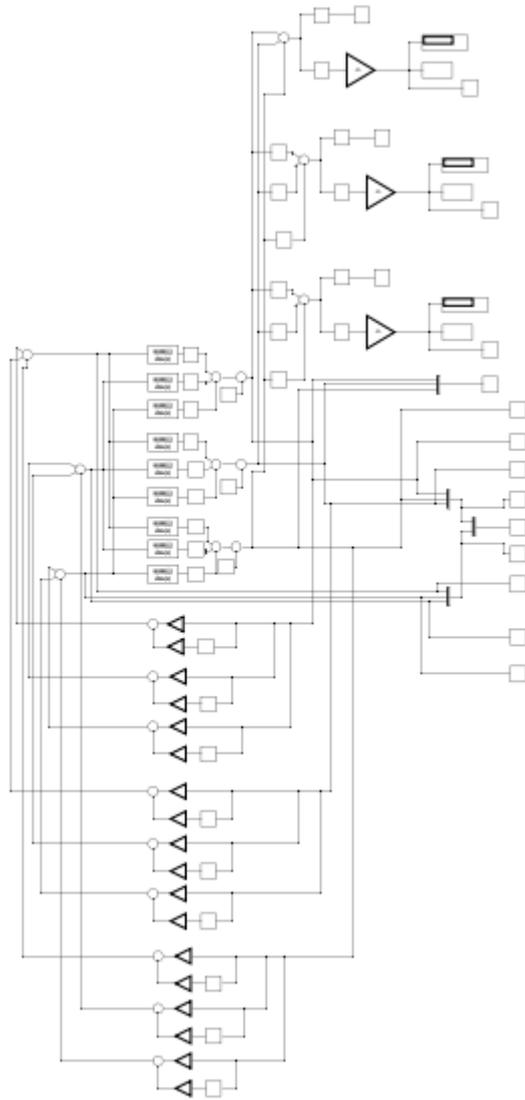


Рисунок И.3 – Имитационная модель для МiМо объекта управления
размерностью 3x3

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Акт внедрения

Утверждаю
 генеральный директор
 ООО «Комити Автоматизация»
 А. Солодовник
 Дата «05» мая 2025 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Акт №1 от 05 мая 2025 года

О внедрении результатов кандидатской диссертации Степанова Павла Сергеевича

На тему: **Синтез систем робастного управления в условиях параметрической неопределенности на примере ректификационной колонны процесса переработки нефти**

Данным актом подтверждаем, внедрение результатов диссертационной работы на тему: «Синтез систем робастного управления в условиях параметрической неопределенности на примере ректификационной колонны процесса переработки нефти», а именно методики расчета настроек робастных и адаптивно-робастных регуляторов разработанные на кафедре автоматизации процессов химической промышленности (АПХП) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» Степанов Павлом Сергеевичем под руководством Ремизовой Ольги Александровны.

При разработке систем управления нефтехимическим предприятием может быть получен положительный экономический эффект по сравнению с традиционными методиками за счёт возможности перенастройки действующих регуляторов, вследствие улучшения качественных показателей систем, а также за счет повышения производительности. Кроме того, экономический эффект достигается благодаря улучшению качественных показателей регулирования, связанных с экономией энергетических затрат на перенастройку системы.

Основные методики были разработаны Степановым П.С. в рамках подготовки его диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

С учетом положительного результата апробации, данная методика рекомендована к внедрению и использованию в исследовательских работах соответствующей тематики.

**Председатель
комиссии**

Члены комиссии



 должность



 должность



 должность

К.т.н., директор по развитию, Липатов А.А.

 должность, ФИО

Заместитель генерального директора,
 Переверзев Ф.Ф.

 должность, ФИО

Начальник отдела пусконаладочных работ и
 технического обслуживания, Черепанов А.В.

 должность, ФИО

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Государственная регистрация программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2025615215

**Программный комплекс для синтеза робастного и
робастного-адаптивного ПИ-регулятора**

Правообладатели: *Ремизова Ольга Александровна (RU),
Степанов Павел Сергеевич (RU)*

Авторы: *Ремизова Ольга Александровна (RU), Степанов
Павел Сергеевич (RU)*

Заявка № **2025613337**
Дата поступления **18 февраля 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **03 марта 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности
Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ М

Заявка на патент на изобретение

Форма № 94 ВЗ, ПМ, ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)

Бережковская наб., 30, корпус 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

17.03.2025	016376	2025106282
Дата поступления	Входящий №	Регистрационный №

Заявление о выдаче патента Российской Федерации на изобретение

ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ Дата приема документа заявки 17 MAR 2025	(11) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № (11) ДАТА ПЕРЕКВОДА иностранной заявки на изобретение (пат)	ВХОДЯЩИЙ №
<input type="checkbox"/> (86) ФИПС ПТД В ТТ Заявительский лист: международная заявка и/или международный патент, опубликованный международным ведомством патентов <input type="checkbox"/> (87) Номер и дата международной публикации международной заявки <input type="checkbox"/> (96) Номер европейской заявки и дата ее подачи <input type="checkbox"/> (97) Номер и дата публикации европейской заявки	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕВОДА (полностью) Адрес филиала в издании для публикации (адрес) 190013, Санкт-Петербург, пр. Московский, дом 24-26/49, литер А, ФББОУ ВО «СПбТИТУ», УИИ Телефон: (812) 315-11-11, Факс: (812) 712-77-01 Адрес электронной почты: ruspatent@fipec.ru	АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕВОДА (полностью) при подаче заявки на открытие изобретения
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на изобретение		
(34) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ Способ синтеза настроек ПИ-регулятора робастной и робастно-адаптивной системы.		
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (полностью или частично (полностью - при наличии фактически или юридически признанного лица (лицами) управления имуществом), полное наименование или полное наименование организации (организаций)) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» 190013, Санкт-Петербург, пр. Московский, дом 24-26/49, литер А, (ФУ) <input type="checkbox"/> заявленное платно за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> армией/военным заказчиком <input type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту Заказчик работ	ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1027810258761 КПП 783801001 ИНН 7809012725 СНИЛС ДОКУМЕНТ (номер, номер) КОД СТРАНЫ (код по ISO 3166) RU	ОТД 7 19 MAR 2025 240 60 15
(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОЕ ЗАЯВИТЕЛИ (полностью фамилия, имя, отчество патентовед - при наличии или наименование организации, полное наименование для филиала для не коммерции организации для не филиала и филиальной сети не коммерческой организации или наименование организации и имя патентовед)		
<input type="checkbox"/> патентовед (патентовед) <input type="checkbox"/> представитель по договоренности <input type="checkbox"/> представитель по закону		

Общее количество документов в листах	26	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)	0	Добренкова Л.Б.
Количество платежных документов	1	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/registers-web		