

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

Қабдолова Іңкәр Нұрлыбекқызы

Разработка системы усовершенствованного управления технологическим процессом  
гидроочистки бензина НПЗ

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

7М07101 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

УДК 681.518.5

На правах рукописи

Қабдолова Інкәр Нұрлыбекқызы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации

Разработка системы усовершенствованного управления  
технологическим процессом гидроочистки бензина НПЗ

Направление подготовки

7M07101 – Автоматизация и роботизация

Научный руководитель

канд. техн. наук, ассоц. проф.

Ширяева О. И.  
(подпись)

« 2 » июня 2025 г.

Рецензент

канд. техн. наук, доц.

Юничева Н. Р.  
(подпись)

« 16 » июня 2025 г.

Нормоконтроль

магистр техн. наук

Манатов Қ. А.  
(подпись)

« 09 » июня 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой АиУ

канд. техн. наук

Ерсенбаев Н.С.

(подпись)

« 16 » 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий  
Кафедра Автоматизации и управления

7M07101 – Автоматизация и роботизация

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой АиУ

канд. техн. наук

Сарсенбаев Н.С.

(подпись)

«16» 06 2025 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту Қабдоловой І. Н.

Тема Разработка системы усовершенствованного управления технологическим процессом гидроочистки бензина НПЗ

Утверждена приказом Б. Жаутикова № 548-П/Ө от «04» декабря 2023 г.

Срок сдачи законченной работы «09» июня 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: технологический регламент установки гидроочистки бензина, исходные данные параметров температуры первой и второй зоны реактора, расхода топлива и водородсодержащего газа.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) литературный обзор усовершенствованных методов управления;
- б) описание технологического процесса гидроочистки бензина;
- в) разработка схемы автоматизации процессом гидроочистки бензина;
- г) анализ и синтез многомерной и многосвязной системы управления;
- д) синтез модального и предиктивного регуляторов;
- е) синтез развязывающей системы управления.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

*схема автоматизации процесса гидроочистки бензина.*

Рекомендуемая основная литература:

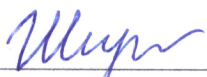
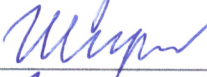
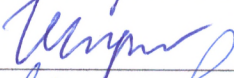
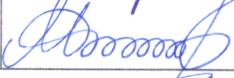
- 1 Мукатдисов Р. Ч. Применение системы усовершенствованного управления технологическим процессом подготовки газа к транспорту // Научный журнал «Газовая промышленность». – Оренбург, 2019. – № 8(788).
- 2 Суриков В. Н., Буйлов Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств / СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 116 с.
- 3 Торгашов А. Ю., Гончаров А. А., Самотылова С. А. Современные методы построения систем усовершенствованного управления технологическими процессами // Научный и общественно-политический журнал «Вестник ДВО РАН», 2016. – № 4.

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации

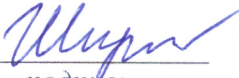
| Наименования разделов,<br>перечень<br>разрабатываемых вопросов                                                     | Сроки представления научному<br>руководителю | Примечание |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------|
| Аналитический раздел<br>Литературный обзор методов<br>усовершенствованного<br>управления                           | 12 апреля 2024 г.                            |            |
| Технологический раздел<br>Описание процесса<br>гидроочистки бензина                                                | 20 ноября 2024 г.                            |            |
| Расчетный раздел<br>Разработка схемы<br>автоматизации процесса<br>гидроочистки бензина                             | 10 марта 2025 г.                             |            |
| Расчетный раздел<br>Анализ и синтез системы<br>усовершенствованного<br>управления процесса<br>гидроочистки бензина | 20 мая 2025 г.                               |            |

**Подписи**

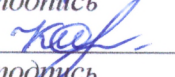
консультантов и нормоконтролёра на законченную магистерскую диссертацию с  
указанием относящихся к ним разделов диссертации

| Наименования<br>разделов  | Консультанты, И.О.Ф.<br>(уч. степень, звание) | Дата<br>подписания | Подпись                                                                               |
|---------------------------|-----------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Аналитический<br>раздел   | О. И. Ширяева<br>канд. техн. наук             | 02.06.2025         |  |
| Технологический<br>раздел | О. И. Ширяева<br>канд. техн. наук             | 02.06.2025         |  |
| Расчетный раздел          | О. И. Ширяева<br>канд. техн. наук             | 02.06.2025         |  |
| Нормоконтролер            | К. А. Манатов<br>магистр техн. наук           | 09.06.2025         |  |

Научный руководитель

  
подпись Ширяева О. И.

Задание принял к исполнению обучающийся

  
подпись Кабдолова И. Н.

Дата

«20» 12 2023 г.

## **АНДАТПА**

Бұл магистрлік диссертацияда бензинді гидротазалаудың технологиялық процесін басқарудың автоматтандырылған жүйесін жасау және кешенді талдау жүргізілді. Технологиялық процестің негізгі бақылау нүктелері анықталды, оның ішінде шикізат сапасының параметрлері, температура параметрлері, ағын жылдамдығы, сонымен қатар құрамында күкірт бар қосылыстар мен реакция өнімдерінің концентрациясы. Автоматтандыру схемасы әзірленді, бастапқы МІМО жүйесі үшін модальды контроллер мен болжамды контроллердің синтезі жүргізілді, сонымен қатар ажырату құрылғысы синтезделді.

## **АННОТАЦИЯ**

В данной магистерской диссертации выполнена разработка и комплексный анализ автоматизированной системы управления технологическим процессом гидроочистки бензина. Проведено определение ключевых точек контроля технологического процесса, в том числе параметры качества исходного сырья, параметры температуры, расхода, а также концентрации серосодержащих соединений и продуктов реакции. Разработана схема автоматизации, осуществлен синтез модального регулятора и предиктивного контроллера для исходной МІМО-системы, также было синтезировано развязывающее устройство.

## **ABSTRACT**

In this master's thesis, the development and comprehensive analysis of an automated control system for the technological process of gasoline hydrotreating has been carried out. The key control points of the technological process were determined, including the parameters of the quality of the feedstock, the parameters of temperature, flow rate, as well as the concentration of sulfur-containing compounds and reaction products. An automation scheme was developed, a synthesis of a modal controller and a predictive controller for the initial MIMO system was carried out, and a decoupling device was also synthesized.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Введение                                                     | 7  |
| 1 Литературный обзор методов усовершенствованного управления | 9  |
| 2 Технологическая часть                                      | 12 |
| 2.1 Описание процесса гидроочистки бензина                   | 12 |
| 2.2 Реактор гидроочистки бензина как объект управления       | 15 |
| 3 Расчетная часть                                            | 18 |
| 3.1 Математическая модель реактора гидроочистки бензина      | 18 |
| 3.2 Синтез ММО-системы в пространстве состояний              | 22 |
| 3.3 Анализ оценок качества САР процесса гидроочистки бензина | 28 |
| 3.4 Синтез многомерного модального регулятора                | 33 |
| 3.5 Синтез МРС контроллера                                   | 42 |
| 4 Синтез развязывающей системы управления                    | 47 |
| Заключение                                                   | 66 |
| Список использованной литературы                             | 67 |
| Приложение А                                                 | 68 |
| Приложение Б                                                 | 69 |
| Приложение В                                                 | 70 |

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день вопросы автоматизации технологических процессов различных отраслей промышленности, включая нефтеперерабатывающее производство, приобретают особую актуальность.

В частности, процесс гидроочистки бензина характеризуется множеством технологических параметров, таких как температура, давление, расход сырья, а также концентрации серосодержащих соединений и продуктов реакции. Эти факторы обуславливают наличие большого количества режимов работы, что требует создания автоматизированной системы управления, способной обеспечить высокое качество готовой продукции и стабильность производственного процесса.

**Общая характеристика.** Данная работа посвящена созданию автоматизированной системы управления многомерной и многосвязной системы, применяемой для управления сложными процессами гидроочистки бензина. В технологической части был подробно описан технологический процесс гидроочистки бензина, на основе которой была разработана схема автоматизации с несколькими контурами управления. В расчетной части используя исходные данные была разработана математическая модель реактора гидроочистки бензина, реализованная на базе структурной и параметрической идентификации в среде MATLAB. На основе методов управления сложными системами была сформирована структура управления с целью развязки взаимосвязей, характерных для процессов гидроочистки бензина.

**Цель работы.** Разработка системы усовершенствованного управления технологическим процессом гидроочистки бензина НПЗ. Опираясь на основные технологические параметры, синтезируем предиктивный регулятор, решим задачу получения требуемых оценок качества системы.

**Задачи.** В данной магистерской диссертации ставится цель повысить уровень автоматизации и совершенствовать процессы управления установкой гидроочистки бензина путем решения ряда ключевых задач. Прежде всего, необходимо выделить критически важные точки контроля, регулирования и управления, которые будут являться основой для эффективной работы установки. Далее предлагается разработка структурированной автоматизированной системы управления, специально адаптированной для установки гидроочистки бензина, с целью оптимизации всех этапов технологического процесса. Также планируется создание схемы автоматизации всего процесса гидроочистки, обеспечивающей согласованную работу всех элементов и их интеграцию в общую систему. Для точного управления сложной многомерной и многосвязной динамической системой установки гидроочистки бензина предусмотрен синтез модельно-предиктивного контроллера. Дополнительно рассматривается синтез типовых регуляторов с использованием процедур развязывания взаимосвязей между каналами.

### **Актуальность темы научно-исследовательской работы.**

Гидроочистка бензина представляет собой сложный технологический процесс, который характеризуется множеством взаимосвязанных параметров. В условиях роста требований к качеству конечной продукции и ужесточения экологических норм, обеспечение стабильной и эффективной работы установки гидроочистки бензина приобретает особое значение. Использование современных технологий автоматизации и внедрение новейших методов управления позволяют минимизировать потери, связанные с браком продукции, повысить стабильность технологического процесса, а также улучшить экономические показатели производства.

На сегодняшний день значительная часть исследований в области автоматизации технологических процессов сосредоточена на одномерных объектах управления. Однако сложные системы, характерные для процессов гидроочистки бензина, изучены недостаточно. Возникает необходимость в разработке современных систем управления, способных эффективно функционировать в условиях многоканального взаимодействия и ограничений, присущих реальным производственным условиям. Синтез усовершенствованной системы управления позволит значительно повысить уровень автоматизации, обеспечить высокое качество и надежность работы.

**Научная новизна научно-исследовательской работы.** Научная новизна данной работы заключается в разработке усовершенствованной автоматизированной системы управления для технологического процесса гидроочистки бензина на нефтеперерабатывающем заводе с учетом особенностей многомерной и многосвязной динамики объекта. В работе представлен комплексный и системный подход к созданию автоматизированной системы управления для сложного технологического объекта, с интеграцией модальных, предиктивных и развязывающих методов регулирования. Это позволяет обеспечить более высокий уровень качества готовой продукции, повысить эффективность использования ресурсов, а также расширить научно-техническую базу для дальнейшего совершенствования управления многомерными промышленными процессами.

Результаты магистерской диссертации были представлены на конференциях и опубликованы в материалах и трудах:

1 Қабдолова І. Н., Ширяева О. И. Разработка системы усовершенствованного управления технологическим процессом гидроочистки бензина НПЗ // Сборник трудов конференции «Сатпаевские чтения», 2024. – С. 939-945.

2 Қабдолова І. Н., Ширяева О. И. Разработка усовершенствованной системы управления технологическим процессом гидроочистки бензина на нефтеперерабатывающем заводе // Сборник трудов конференции «Торайгыровские чтения», том 6, 2024. – С. 56-63.

## 1 Литературный обзор методов усовершенствованного управления

В условиях цифровизации промышленности и ужесточения требований к энергоэффективности, экологичности и качеству продукции ключевым направлением развития автоматизированных производств становится внедрение интеллектуальных систем управления. Одним из наиболее перспективных решений в этом направлении являются системы усовершенствованного управления технологическими процессами, известные также как Advanced Process Control. Эти системы представляют собой надстройку над базовыми уровнями управления и позволяют перейти от реактивного подхода к управлению к активному, основанному на прогнозировании поведения технологических объектов и оптимизации управляющих воздействий.

Основу СУУ ТП составляет модель прогнозирующего управления, которая реализует принцип предсказания будущего состояния технологического объекта на определённом временном горизонте. MPC-алгоритмы формируют оптимальные управляющие воздействия, учитывая текущие измерения, динамические модели объекта, технологические и эксплуатационные ограничения, а также возможные внешние возмущения. За счёт этого обеспечивается не только стабилизация параметров, но и их оптимальное ведение вблизи предельно допустимых значений, что даёт значительный экономический эффект.

С технической точки зрения APC-система представляет собой программный модуль, интегрируемый в структуру существующей автоматизированной системы управления технологическим процессом. Интеграция осуществляется через стандартные интерфейсы, такие как OPC, что позволяет использовать СУУ ТП на существующем оборудовании без необходимости его модернизации. Архитектура таких систем включает в себя прогнозирующую модель, модуль оптимизации, исполнительный контроллер и интерфейс оператора. Кроме того, ключевыми компонентами становятся так называемые виртуальные анализаторы, позволяющие в режиме реального времени оценивать показатели качества продукции на основе легко измеряемых параметров – температуры, давления, расхода и других.

Одним из наиболее значимых преимуществ внедрения СУУ ТП является возможность работы в условиях неопределённости и нестабильных технологических режимов. Современные промышленные объекты, особенно в нефтехимической и газовой отраслях, часто сталкиваются с проблемами переменного запаздывания, сложных нелинейных взаимодействий между параметрами, а также недостаточным описанием исходных данных, таких как свойства сырья или фазовое поведение компонентов. Для таких случаев используются модели, основанные на усечённых импульсных функциях, которые позволяют строить адекватные математические представления процессов даже при отсутствии полной информации о структуре объекта.

Практические результаты внедрения СУУ ТП демонстрируют высокую эффективность таких систем. Например, на установках подготовки газа к транспорту, использующих процессы низкотемпературной сепарации и дросселирования, применение APC позволяет обеспечить стабильную работу при изменяющихся входных параметрах, сократить потери углеводородов, снизить энергозатраты и уменьшить ручные вмешательства со стороны операторов. Система управления в данном случае функционирует в автоматическом режиме, корректируя уставки и компенсируя внешние возмущения в реальном времени. Это приводит не только к экономии ресурсов, но и к значительному снижению эксплуатационных рисков и повышению надёжности оборудования [1].

Отдельное внимание уделяется применению виртуальных анализаторов – программных модулей, которые моделируют поведение аналитического оборудования и вычисляют качественные характеристики продукции без необходимости установки дорогостоящих поточных анализаторов. Такие решения особенно актуальны для нефтеперерабатывающих предприятий, где необходимо в режиме реального времени отслеживать параметры фракционного состава, температуры кипения, содержания примесей и других показателей. Виртуальные анализаторы позволяют отказаться от избыточной рециркуляции, минимизировать потери, а также обеспечить более точное ведение процесса, сокращая отклонения от уставок [2].

Экономическая эффективность применения APC-систем подтверждается рядом производственных кейсов. Установлено, что стабильность технологических режимов может увеличиваться до 50 процентов за счёт снижения колебаний управляемых параметров, выход ценных продуктов – на 5-15 процентов, а расход энергоресурсов может быть снижен на 1-5 процентов. Кроме того, время перехода на новый режим сокращается на 20-60 процентов, а срок окупаемости проекта составляет от 3 до 6 месяцев, что делает внедрение APC оправданным даже в условиях ограниченного инвестиционного бюджета [3].

Особо следует отметить, что внедрение систем усовершенствованного управления не ограничивается улучшением показателей отдельных установок. При грамотной интеграции APC становится частью корпоративной стратегии цифровизации, взаимодействуя с уровнями MES и ERP (рисунок 1.1). В этом случае создаётся единое информационное пространство, позволяющее принимать решения как на уровне технологического оборудования, так и на уровне бизнес-процессов.

Анализ существующих разработок и практических внедрений систем усовершенствованного управления технологическими процессами свидетельствует о том, что APC является не просто очередным этапом автоматизации, а новым подходом к управлению производством. Он сочетает в себе методы математического моделирования, элементы искусственного интеллекта, обработку больших данных и принципы бережливого производства.

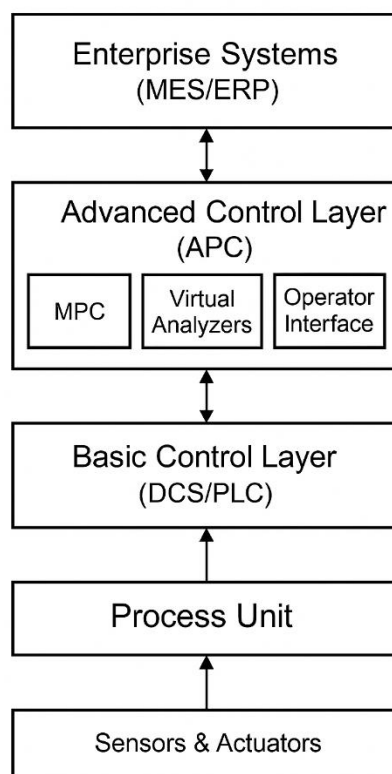


Рисунок 1.1 – Архитектура APC-системы

Уровень технологического процесса включает оборудование, на котором происходит основное производство – реакторы, колонны, теплообменники, сепараторы и т.д. Здесь размещаются датчики и исполнительные механизмы, которые обеспечивают первичную связь с системой управления.

Базовый уровень управления представлен программируемыми логическими контроллерами или распределёнными системами управления. Они обрабатывают сигналы с полевого уровня, обеспечивают стабилизацию простейших контуров и передают данные на верхний уровень.

В уровень усовершенствованного управления входят компоненты APC-системы:

- прогнозирующая модель, формирующая оптимальные управляющие воздействия;
- виртуальные анализаторы, оценивающие качество продукции в реальном времени;
- оптимизатор, учитывающий экономические цели и ограничения;
- человеко-машинный интерфейс (HMI) для взаимодействия оператора с системой.

Уровень производственного менеджмента включает системы MES и ERP. Они обмениваются информацией с APC и могут формировать задания на оптимизацию, анализировать производительность, рассчитывать KPI и планировать загрузку оборудования.

## 2 Технологическая часть

### 2.1 Описание процесса гидроочистки бензина

Технологический процесс гидроочистки бензина состоит из нескольких технологических стадий, вытекающих из требований к качеству товарного бензина и сырья, основными из которых являются:

- очистка различных бензиновых фракций завода от серо-, кислород- и азотсодержащих органических соединений методом гидрирования;
- стабилизация гидроочищенного бензина методом сепарации и ректификации;
- выделение из гидроочищенного бензина фракции  $C_5-C_6$ , обладающей недостаточным октановым числом и ухудшающей моторные свойства товарного бензина методом ректификации;
- очистка фракции  $C_5-C_6$  от микропримесей серы методом сорбции на твердых адсорбентах.

Очистка различных бензиновых фракций от серо-, кислород-, азот-, и металлсодержащих органических соединений, являющихся ядами для катализаторов процессов риформинга и изомеризации, принята путем их разложения и перевода соответственно в углеводороды, сероводород, воду и аммиак методом гидрирования на алюмокобальтмолибденовом катализаторе при повышенном давлении 32-35 кгс/см<sup>2</sup> и температуре не выше 345°C в присутствии избытка водорода, кратность которого по отношению к сырью должна поддерживаться:

- для прямогонных бензинов 40-75 нм<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> сырья;
- для крекинг-бензинов до 500 нм<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> сырья.

При этих условиях также происходит насыщение водородом олефиновых углеводородов, содержащихся в основном в бензине от установки коксования.

Очистка бензина от незначительных примесей металлов, а также мышьяка, фосфора, кремния происходит за счет их адсорбции на катализаторе в виде сульфидов в количестве не более 2 процентов от веса катализатора, после чего активность катализатора по очистке бензина от серы и азота становится не достаточной, что требует замены катализатора.

При повышенном содержании ненасыщенных углеводородов в сырье, недостатке водорода и повышенной температуре процесса на катализаторе могут протекать реакции конденсации и коксообразования с отложением смол и кокса на катализаторе и снижением его активности. Активность катализатора в этом случае может быть существенно восстановлена путем его регенерации.

### 2.1.1 Узел сырьевой емкости

Исходное сырье, характеристики которого приведены в таблице 2.1, от установки ЭЛОУ АТ-2 через клапан регулятора расхода подается в фильтр 11-Z-001, очищается от механических примесей и поступает в сырьевую емкость 11-D-001. Расход бензина по прибору 11-F1 (FIY) должен составлять 55 м<sup>3</sup>/час. Фильтр 11-Z-001 снабжен предохранительными клапанами.

Емкость 11-D-001 служит для коагуляции и отделения воды, поступающей с бензином, а также в качестве буферной емкости для обеспечения надежной работы сырьевого насоса 11-P-001. Давление в емкости поддерживается 1,2–1,5 кгс/см<sup>2</sup> регулятором 11D-P1 (PIC) за счет поддавливания топливным газом через клапан. Уровень бензина в емкости поддерживается 30-70 процентов по приборам 11D-L2 и 11D-L3 с сигнализацией максимального 80 процентов и минимального уровня 20 процентов.

Кроме того предусмотрена:

- сигнализация максимального уровня 80 процентов по прибору 11D-L1;
- сигнализация и блокировка с отключением насоса 11-P-001 при снижении уровня бензина в емкости ниже 3 процентов по прибору 11D-L4.

Таблица 2.1 – Характеристика исходного сырья

| Наименование сырья       | Показатели качества                                          | Норма по ГОСТ  | Область применения                                      |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------|
| Бензин от установки АТ-2 | 1 Фракционный состав:                                        |                | Используется в качестве сырья узла гидроочистки бензина |
|                          | температура начала кипения, °С                               | не менее 30    |                                                         |
|                          | 50% выкипает при температуре, температура начала кипения, °С | 110-120        |                                                         |
|                          | температура конца кипения, температура начала кипения, °С    | не более 180   |                                                         |
|                          | 2 Содержание: серы общей, % масс.                            | не более 0,084 |                                                         |
|                          | азота, ppm мас.                                              | не более 1     |                                                         |
|                          | 3 Плотность при 15°С, кг/м <sup>3</sup>                      | не более 730   |                                                         |

### 2.1.2 Узел гидроочистки бензина

Бензин из емкости 11-D-001 с температурой не выше 40°C по прибору поз. 11-T1 (TI) насосом 11-P-001 через клапан регулятора расхода в количестве 55 м<sup>3</sup>/час подается в узел смешения с водородсодержащим газом от компрессора 11-C-001. Предусмотрена сигнализация снижения подачи бензина в узел смешения ниже 55 м<sup>3</sup>/час по прибору 11-F2 (FIRCA). Расход водородсодержащего газа для смешения с бензином поддерживается 10500-25000 нм<sup>3</sup>/час по прибору 11-F3 (FIRSA) с сигнализацией снижения расхода ниже 10000 нм<sup>3</sup>/час.

Газосырьевая смесь последовательно подогревается в теплообменниках 11-E-001/2/3 за счет тепла продуктов реакции и с температурой 280÷284°C, регулируемой за счет холодного потока от узла смешения направляется в печь 11-F-001. Предусмотрена сигнализация снижения температуры на выходе из теплообменника 11-E-003 ниже 257 °C по прибору 11-T2 (TIA).

В печи 11-F-001 газосырьевая смесь нагревается до температуры 316÷320°C за счет тепла дымовых газов от сжигания топливного газа, подаваемого в горелки печи через клапан регулятора давления газа перед горелками с коррекцией по температуре нагрева газосырьевой смеси по прибору 11F-T1 (TIRC). Газосырьевая смесь из печи 11-F-001 с давлением 32÷40 кгс/см<sup>2</sup> по прибору 11F-P1 (PISA) и температурой 316÷320°C поступает в реактор 11-R-001, последовательно проходит по двум слоям катализатора, на котором серо-, азот-, кислород- и галоидсодержащие компоненты гидрируются с образованием соответственно сероводорода, аммиака, воды и галоидводородов. При протекании реакций гидрирования выделяется тепло, поэтому температура в слоях реактора поднимается.

Температура в 1 зоне реактора поддерживается не выше 345°C по приборам 11R-T1 (TIRA) изменением температуры нагрева сырья в печи 11-F-001.

Температура сырья на входе во 2-ю зону реактора поддерживается 320÷330°C по приборам 11R-T2 (TIRA), 11R-T3 (TIRCA) за счет ввода в реактор холодного водорода в количестве 8000÷8100 нм<sup>3</sup>/час через клапан регулятора расхода с коррекцией по температуре по прибору 11R-T3 (TIRCA).

Температура во 2-й зоне реактора и на выходе поддерживается не выше 345°C по приборам 11R-T4 (TIRA) и 11R-T5 (TIRA) путем изменения температуры на входе во 2-ю зону реактора за счет изменения подачи холодного водорода.

Реактор 11-R-001 оборудован:

- сигнализацией снижения давления ниже 30 кгс/см<sup>2</sup> и блокировкой с прекращением процесса при снижении давления ниже 26 кгс/см<sup>2</sup> по прибору 11F-P1 (PISA);
- сигнализацией повышения температуры во втором слое катализатора выше 332°C по приборам 11R-T2 (TIRA), 11R-T3 (TIRCA);

— сигнализацией повышения температуры в слоях катализатора и на выходе из реактора выше 348°C соответственно по приборам 11R-T1 (TIRA), 11R-T4 (TIRA);

— приборами контроля давления в средней части реактора 11R-P1 (PI) и на выходе реактора 11R-P2 (PI).

Схема автоматизации блока гидроочистки бензина представлена в приложении А.

## **2.2 Реактор гидроочистки бензина как объект управления**

Объект управления – это система, над которой осуществляется контроль и регулирование с целью достижения заданных технологических параметров и обеспечения безопасной и эффективной работы процесса.

Реактор 11-R-001 установки гидроочистки бензина представляет собой основной объект управления, в котором происходят ключевые химические реакции по удалению серо-, азот-, кислород- и галогенсодержащих соединений из бензиновых фракций. Управление данным объектом критически важно для обеспечения требуемого качества продукции, соответствующего экологическим стандартам, а также для стабильной и безопасной работы установки в целом.

Процесс гидроочистки в реакторе осуществляется при высоких температурах и давлениях в присутствии катализатора. Газосырьевая смесь, представляющая собой поток бензина, предварительно подогретого до 316-320 °С, и водородсодержащего газа, поступает в реактор после прохождения печи 11-F-001. Давление на входе в реактор составляет 32-40 кгс/см<sup>2</sup>, а температура поддерживается в строго заданных пределах, регулируемых с учетом теплового эффекта протекающих реакций.

Внутри реактора смесь последовательно проходит через два слоя катализатора. В первом слое осуществляется гидрирование основных примесей – сернистых соединений, азотсодержащих, а также кислородных и галогенированных компонентов. В результате этих реакций образуются H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O и галогеноводороды соответственно. Поскольку данные реакции экзотермичны, в слое катализатора происходит дополнительное повышение температуры, что требует контроля и компенсации перегрева.

Температура в первом слое реактора регулируется с помощью изменения степени подогрева сырья в печи 11-F-001. Это осуществляется через контур автоматического регулирования по сигналу от температурного датчика 11R-T1. На выходе из первого слоя и на входе во второй слой предусмотрена дополнительная подача холодного водорода в количестве 8000-8100 нм<sup>3</sup>/ч. Этот поток не только участвует в химических реакциях, но и выполняет функцию терморегуляции, снижая температуру потока перед подачей во второй слой катализатора.

Количество водорода, вводимого на данном этапе, управляется через регулятор расхода с коррекцией по температуре, полученной с датчика 11R-T3.

Во втором слое катализатора продолжают реакции глубокой гидроочистки и завершается удаление остаточных примесей. Температура в данной зоне строго контролируется по показаниям приборов 11R-T2, 11R-T3 (вход во второй слой) и 11R-T4, 11R-T5 (выход реактора). Регулирование осуществляется за счёт управления подачей холодного водорода, обеспечивая, чтобы температура не превышала критическое значение 345 °С. Это важно как для сохранения активности катализатора, так и для предотвращения образования побочных продуктов, например, поликонденсатов или неуглеводородных соединений.

Реактор оборудован обширной системой автоматического контроля и безопасности. В частности, при снижении давления ниже 30 кгс/см<sup>2</sup> срабатывает сигнализация, а при дальнейшем падении до 26 кгс/см<sup>2</sup> – срабатывает блокировка с полной остановкой процесса. Это реализовано на базе измерительного прибора давления 11F-P1, обеспечивающего оперативное принятие защитных мер. Для контроля нормального протекания реакции также предусмотрены сигнализаторы повышения температуры выше 332 °С во втором слое и выше 348 °С в первом слое и на выходе из реактора. Такие меры предотвращают перегрев, приводящий к деградации катализатора, и обеспечивают своевременное вмешательство оператора или автоматической системы.

Входными управляющими воздействиями на реактор как объект управления являются:

- температура нагрева сырья,
- расход водородсодержащего газа,
- состав и расход исходного сырья,
- соотношение Н<sub>2</sub>/углеводородов в газосырьевой смеси.

К выходным параметрам, характеризующим состояние объекта и служащим целевыми показателями управления, относятся:

- температура в зонах реактора,
- давление на входе, в средней части и выходе реактора,
- качество очищенного бензина,
- степень загрузки и активности катализатора.

К возмущающим воздействиям относятся:

- колебания фракционного состава и температуры поступающего бензина,
- нестабильный состав водородного газа,
- колебания давления и температуры после теплообменников и печи,
- деградация катализатора со временем.

Контур управления (рисунок 2.1), реализованный на реакторе, является многопараметрическим и включает:

- контур регулирования температуры первого слоя катализатора,
- контур регулирования подачи водородсодержащего газа в смесь.

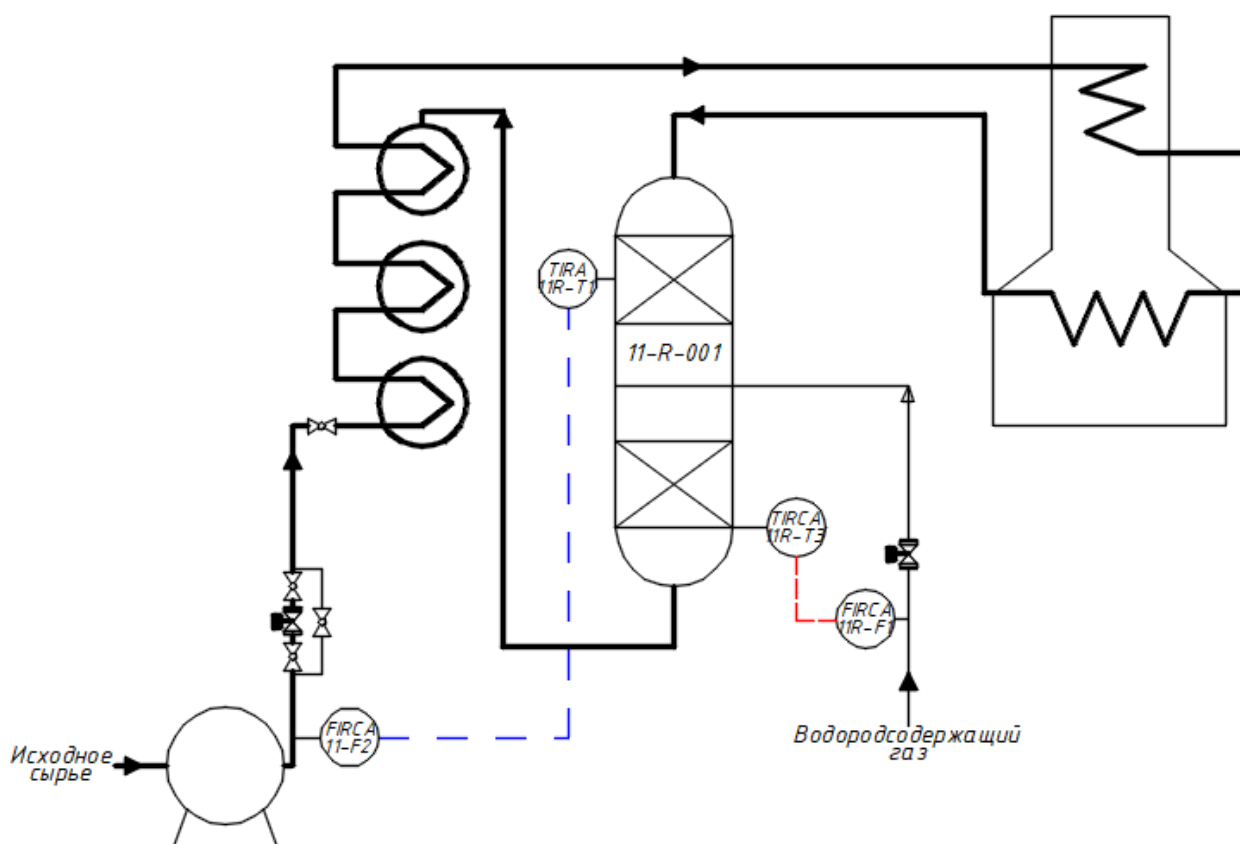


Рисунок 2.1 – Схема контуров регулирования температуры первого слоя катализатора (синяя линия) и подачи водородсодержащего газа в смесь (красная линия)

В первом контуре регулирования температура в первом слое катализатора управляется через изменение нагрева в печи. Входной переменной контура регулирования температуры первого слоя катализатора является расход топлива в печь, а температура – это регулируемый параметр внутри реактора.

Контур регулирования подачи водородсодержащего газа в газосырьевую смесь в установке гидроочистки бензина – это один из важнейших контуров, влияющих на стабильность и эффективность химических реакций в реакторе. Целью является поддержание необходимой температуры во второй зоне реактора за счёт ввода холодного водорода, который действует как охлаждающий агент и дополнительный реагент.

### 3 Расчетная часть

#### 3.1 Математическая модель реактора гидроочистки бензина

Реактор установки гидроочистки бензина представляет собой сложный объект управления, в котором протекают экзотермические реакции с участием водорода и катализатора. Для обеспечения качества продукции, стабильности технологического режима и повышения эффективности процесса используется система автоматического управления, охватывающая несколько взаимосвязанных контуров. По своей структуре реактор является типичной ММО-системой – системой с множественными входами и выходами, влияющими друг на друга.

В первом контуре регулирования осуществляется управление температурой в первом слое катализатора. Регулирующее воздействие подаётся через изменение расхода топлива в печь. Тем самым изменяется температура нагрева сырья на входе в реактор, которая оказывает прямое влияние на температуру в первой реакционной зоне. Расход топлива в печь является входной переменной, а температура в первом слое катализатора – регулируемым выходом.

Второй важный контур регулирования связан с подачей водородсодержащего газа в газосырьевую смесь. Целью данного контура является поддержание необходимой температуры во второй зоне реактора. Для этого используется ввод холодного водорода, который выполняет роль как дополнительного реагента, так и охлаждающего агента. Управляющим воздействием в этом контуре является расход водородсодержащего газа, а регулируемым параметром – температура во втором слое катализатора.

Необходимо учитывать взаимное влияния двух контуров регулирования. Если регулирование температуры в первом контуре резко изменяется, второй контур может не успеть компенсировать это, и возможен перегрев или нарушение технологического режима (рисунок 3.1).

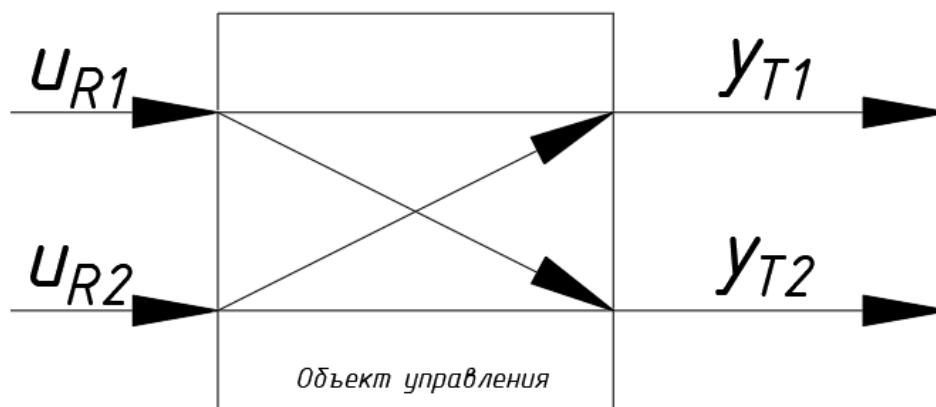


Рисунок 3.1 – Структурная схема многомерной и многосвязной системы управления

На основе собранных данных, представленных в таблице 3.1, была создана математическая модель входных и выходных параметров с использованием алгоритмов идентификации в среде MATLAB.

Таблица 3.1 – Исходные данные

| Расход топлива,<br>м³/час | Расход Н <sub>2</sub> газа,<br>нм³/час | Температура в 1<br>зоне, °C | Температура во 2<br>зоне, °C |
|---------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 55.0                      | 8000                                   | 316.0                       | 330.0                        |
| 57.0                      | 8000                                   | 318.0                       | 331.0                        |
| 55.0                      | 8050                                   | 315.0                       | 325.0                        |
| 58.0                      | 8020                                   | 320.0                       | 329.0                        |
| 60.0                      | 8080                                   | 321.0                       | 324.0                        |
| 62.0                      | 8000                                   | 324.0                       | 332.0                        |
| 60.0                      | 8100                                   | 320.0                       | 322.0                        |
| 63.0                      | 8090                                   | 325.0                       | 323.5                        |
| 65.0                      | 8060                                   | 327.0                       | 325.0                        |
| 66.0                      | 8040                                   | 328.0                       | 326.5                        |
| 67.0                      | 8020                                   | 330.0                       | 328.0                        |
| 68.0                      | 8010                                   | 331.5                       | 329.5                        |
| 69.0                      | 8000                                   | 333.0                       | 331.0                        |
| 70.0                      | 7990                                   | 334.5                       | 332.5                        |
| 71.0                      | 7980                                   | 345.0                       | 334.0                        |

В результате идентификации были получены передаточные функции первого порядка, характеризующие связь между входными и выходными переменными процесса гидроочистки бензина, структурная схема объекта управления представлена на рисунке 3.2.

$$G_{11}(s) = \frac{23.42}{s + 4.405}, \quad (3.1)$$

$$G_{12}(s) = \frac{1.36}{s + 0.2534}, \quad (3.2)$$

$$G_{21}(s) = \frac{2.686}{s + 6.603}, \quad (3.3)$$

$$G_{22}(s) = \frac{11.39}{s + 2.789} \quad (3.4)$$

Запишем выражение модели сложной системы управления реактором гидроочистки бензина по формуле

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{23.42}{s + 4.405} & \frac{1.36}{s + 0.2534} \\ \frac{2.686}{s + 6.603} & \frac{11.39}{s + 2.789} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

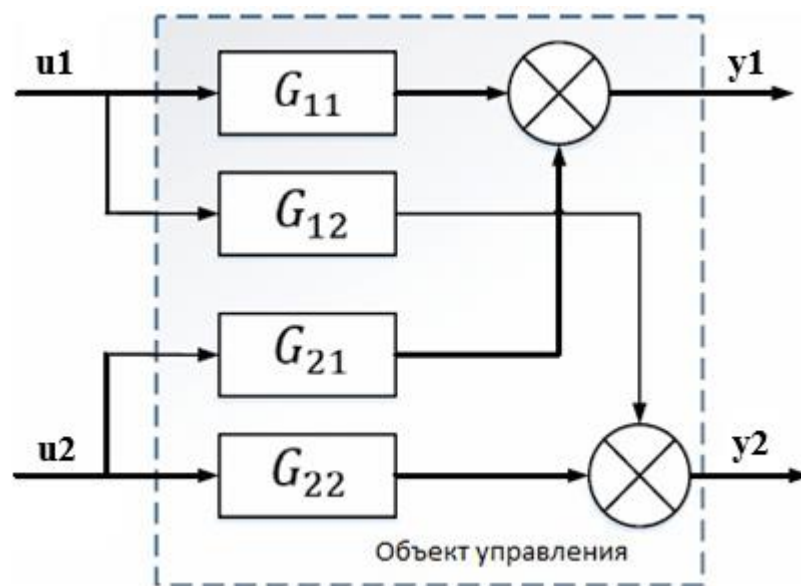


Рисунок 3.2 – Структурная схема реактора гидроочистки бензина

Здесь,

$u_1$  – расход топлива в печи;

$u_2$  – расход водородсодержащего газа;

$y_1$  – температура в первой зоне реактора;

$y_2$  – температура во второй зоне реактора;

$G_{11}(s)$  – соотношение расхода топлива ( $u_1$ ) к температуре в первой зоне ( $y_1$ );

$G_{12}(s)$  – соотношение расхода топлива ( $u_1$ ) к температуре во второй зоне ( $y_2$ );

$G_{21}(s)$  – соотношение расхода водородсодержащего газа ( $u_2$ ) к температуре в первой зоне ( $y_1$ );

$G_{22}(s)$  – соотношение расхода водородсодержащего газа ( $u_2$ ) к температуре во второй зоне ( $y_2$ ).

Промоделируем полученную систему со взаимосвязями (рисунок 3.3) и получим результаты моделирования сложной системы со взаимосвязями (рисунок 3.4).

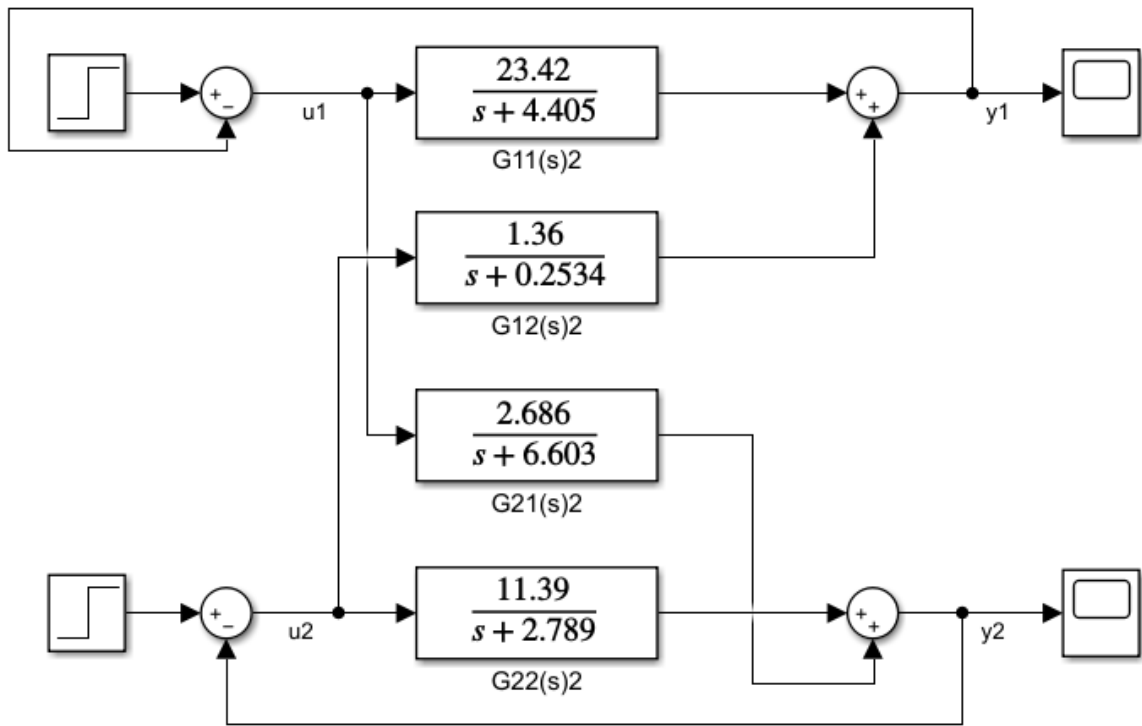


Рисунок 3.3 – Схема моделирования сложной системы (6) со взаимосвязями

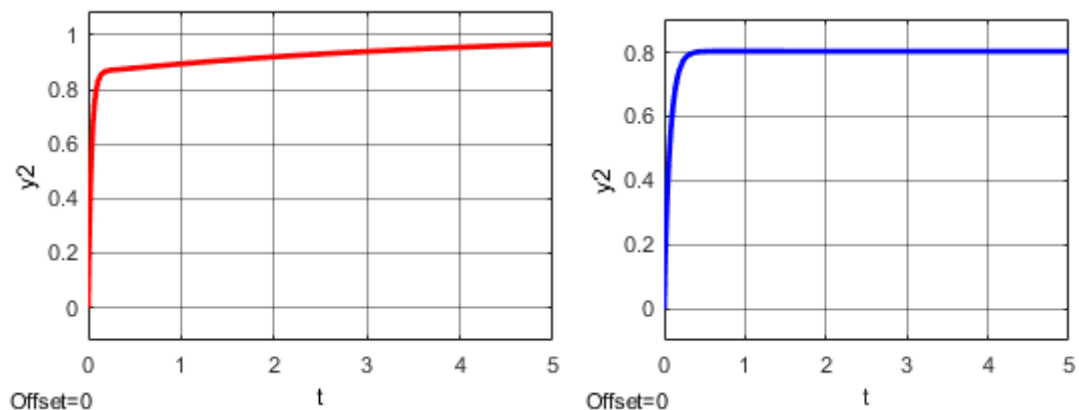


Рисунок 3.4 – Переходные процессы сложной системы (3.6) со взаимосвязями

Анализ кривых, указанных на рисунке 3.4, показывает, что оба выхода  $y_1$  и  $y_2$  реагируют не только на свои входы  $u_1$  и  $u_2$  соответственно, но и на другие входы  $u_2$  и  $u_1$  соответственно. Это говорит о наличии перекрёстных связей между каналами управления.

Изменение одного входного сигнала вызывает отклик сразу на нескольких выходах. На графиках это проявляется в виде искривлённых переходных характеристик, особенно в начальной фазе переходного процесса. Такие перекрёстные взаимодействия могут вызвать нежелательные отклонения в выходных переменных и усложняют настройку регуляторов.

### 3.2 Синтез ММО-системы в пространстве состояний

Заданы передаточные функции (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), описывающие двумерную математическую модель объекта управления реактора гидроочистки бензина.

$$G_{11}(s) = \frac{23.42}{s + 4.405}, \quad (3.1)$$

$$G_{12}(s) = \frac{1.36}{s + 0.2534}, \quad (3.2)$$

$$G_{21}(s) = \frac{2.686}{s + 6.603}, \quad (3.3)$$

$$G_{22}(s) = \frac{11.39}{s + 2.789} \quad (3.4)$$

Получение математической модели в пространстве состояний необходимо выполнить по следующему алгоритму.

Шаг 1. Для анализа системы требуется получить выражения характеристических полиномов, на основе которых определяются полюса системы.

Полюса  $G_{11}(s)$ :  $s_1 = -4.405$

$$b_1 = \frac{23.42}{(s + 4.405)|_{s_1}} = 23.42$$

Полюса  $G_{12}(s)$ :  $s_2 = -0.2534$

$$b_2 = \frac{1.36}{(s + 0.2534)|_{s_2}} = 1.36$$

Полюса  $G_{21}(s)$ :  $s_3 = -6.603$

$$b_3 = \frac{2.686}{(s + 6.603)|_{s_3}} = 2.686$$

Полюса  $G_{22}(s)$ :  $s_4 = -2.789$

$$b_4 = \frac{11.39}{(s + 2.789)|_{s_4}} = 11.39$$

Следовательно, общая размерность матрицы состояний равна 4х4.

Шаг 2. Необходимо получить математическую модель многомерной системы управления в пространстве состояний в канонической форме.

$$G(s) = \begin{vmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{vmatrix}, \quad (3.7)$$

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{Q(s)}{R(s)}, \quad (3.8)$$

$$y(s) = \begin{vmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{vmatrix} = G(s) \cdot u(s) = \begin{vmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{vmatrix}, \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} y_1(s) = G_{11}(s) \cdot u_1(s) + G_{12}(s) \cdot u_2(s) \\ y_2(s) = G_{21}(s) \cdot u_1(s) + G_{22}(s) \cdot u_2(s) \end{cases} \quad (3.10)$$

Вторая форма перехода определяется по формуле

$$\begin{cases} y_1(s) = x_1 + x_2 \\ y_2(s) = x_3 + x_4 \end{cases} \quad (3.11)$$

Полученные передаточные функции из первого шага алгоритма подставим в уравнение (3.10) и запишем итоговое равенство.

$$\begin{cases} y_1(s) = \frac{23.42}{s + 4.405} \cdot u_1(s) + \frac{1.36}{s + 0.2534} \cdot u_2(s) \\ y_2(s) = \frac{2.686}{s + 6.603} \cdot u_1(s) + \frac{11.39}{s + 2.789} \cdot u_2(s) \end{cases} \quad (3.12)$$

Шаг 3. Выразим  $x(s)$  через уравнения (3.11) и (3.12).

$$x_1(s) = \frac{23.42}{s + 4.405} \cdot u_1(s) \Rightarrow sx_1(s) = -4.405x_1(s) + 23.42u_1(s),$$

$$x_2(s) = \frac{1.36}{s + 0.2534} \cdot u_2(s) \Rightarrow sx_2(s) = -0.2534x_2(s) + 1.36u_2(s),$$

$$x_3(s) = \frac{2.686}{s + 6.603} \cdot u_1(s) \Rightarrow sx_3(s) = -6.603x_3(s) + 2.686u_1(s),$$

$$x_4(s) = \frac{11.39}{s + 2.789} \cdot u_2(s) \Rightarrow sx_4(s) = -2.789x_4(s) + 11.39u_2(s)$$

Шаг 4. Запишем математическую модель в пространстве состояний.

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -4.405x_1(t) + 23.42u_1(t) \\ \dot{x}_2(t) = -0.2534x_2(t) + 1.36u_2(t) \\ \dot{x}_3(t) = -6.603x_3(t) + 2.686u_1(t) \\ \dot{x}_4(t) = -2.789x_4(t) + 11.39u_2(t) \\ y_1(t) = x_1(t) + x_2(t) \\ y_2(t) = x_3(t) + x_4(t) \end{cases} \quad (3.13)$$

Запишем полученную систему (3.13) в матричном виде.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.405 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2534 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6.603 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2.789 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 23.42 & 0 \\ 0 & 1.36 \\ 2.686 & 0 \\ 0 & 11.39 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}$$

Выпишем матрицу состояний (матрица Жордана).

$$A = \begin{bmatrix} -4.405 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2534 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6.603 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2.789 \end{bmatrix}$$

Определим матрицу управления.

$$B = \begin{bmatrix} 23.42 & 0 \\ 0 & 1.36 \\ 2.686 & 0 \\ 0 & 11.39 \end{bmatrix}$$

Найдем матрицу наблюдаемости.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Промоделируем математическую модель в пространстве состояний в среде MATLAB, используя командное окно (рисунки 3.5, 3.6) и пакет Simulink (рисунки 3.7, 3.8).

```

Command Window

>> A=[-4.405 0 0 0; 0 -0.2534 0 0; 0 0 -6.603 0; 0 0 0 -2.789];
>> B=[23.42 0; 0 1.36; 2.686 0; 0 11.39];
>> C=[1 1 0 0; 0 0 1 1];
>> D=0;
>> sys=ss(A,B,C,D)

sys =

    A =

           x1           x2           x3           x4
    x1  -4.405           0           0           0
    x2           0  -0.2534           0           0
    x3           0           0  -6.603           0
    x4           0           0           0  -2.789

    B =

           u1           u2
    x1  23.42           0
    x2           0    1.36
    x3  2.686           0
    x4           0   11.39

    C =

           x1  x2  x3  x4
    y1     1   1   0   0
    y2     0   0   1   1

```

Рисунок 3.5 – Математическая модель (13) в командном окне

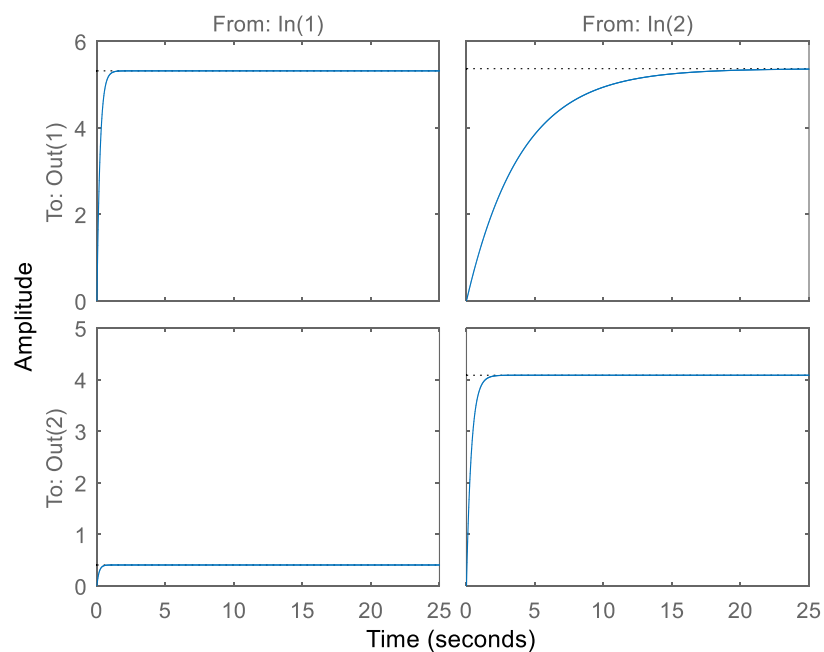


Рисунок 3.6 – Переходные процессы разомкнутой МІМО-системы

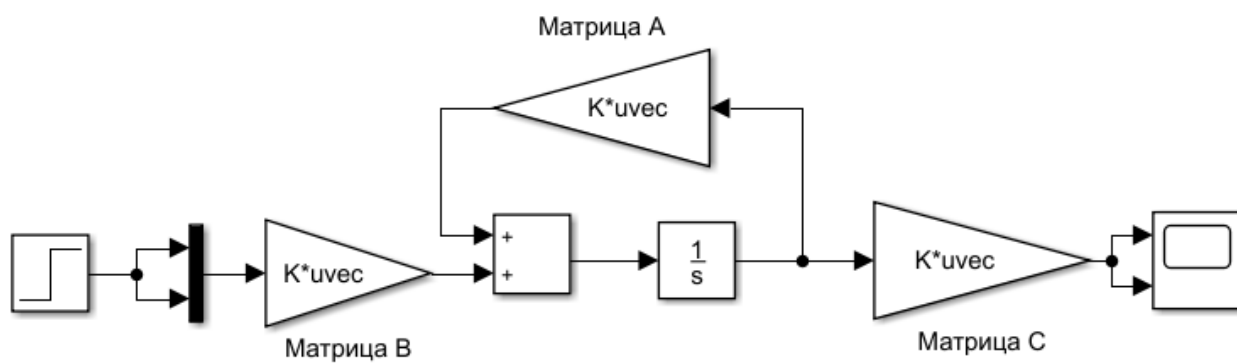


Рисунок 3.7 – Схема моделирования разомкнутой МІМО-системы

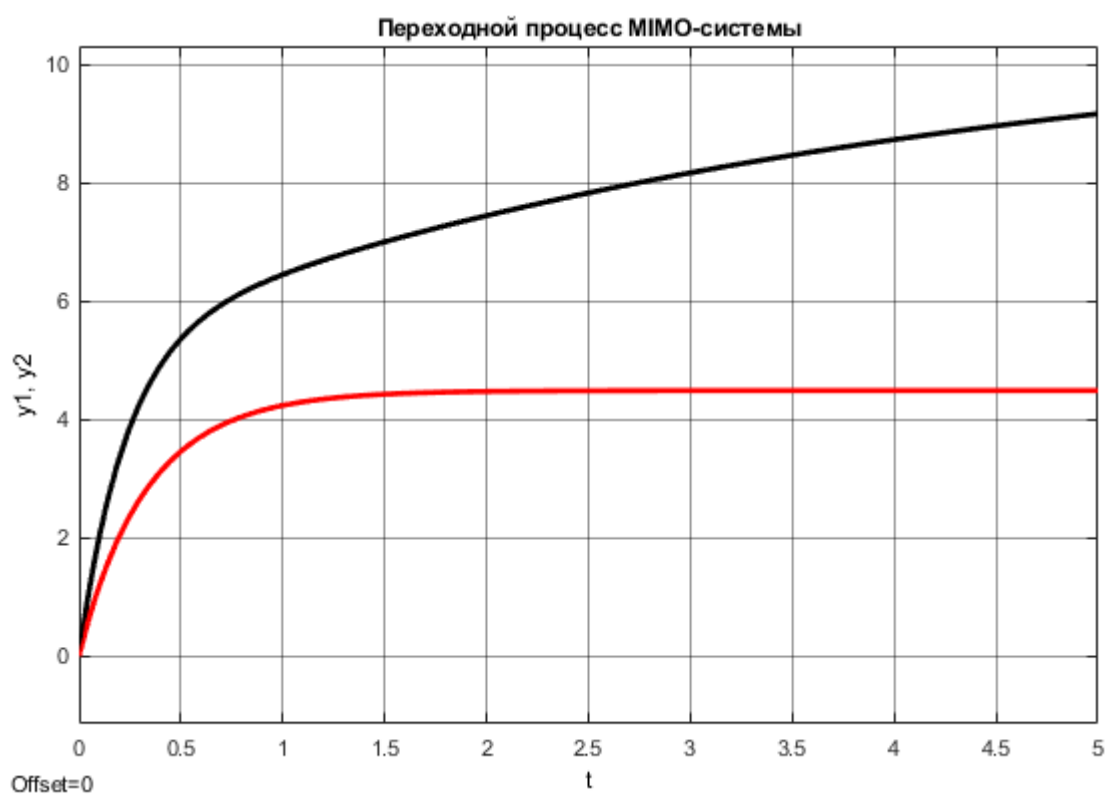


Рисунок 3.8 – Переходные процессы разомкнутой МІМО-системы

Рассмотрим МІМО-систему, замкнув ее отрицательной обратной связью (рисунок 3.9) и проанализируем ее переходной процесс (рисунок 3.10).

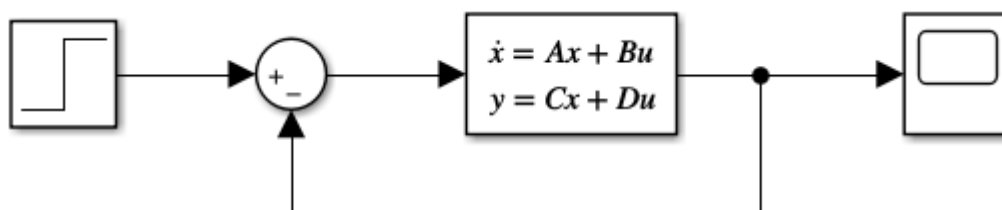


Рисунок 3.9 – Схема моделирования замкнутой МІМО-системы

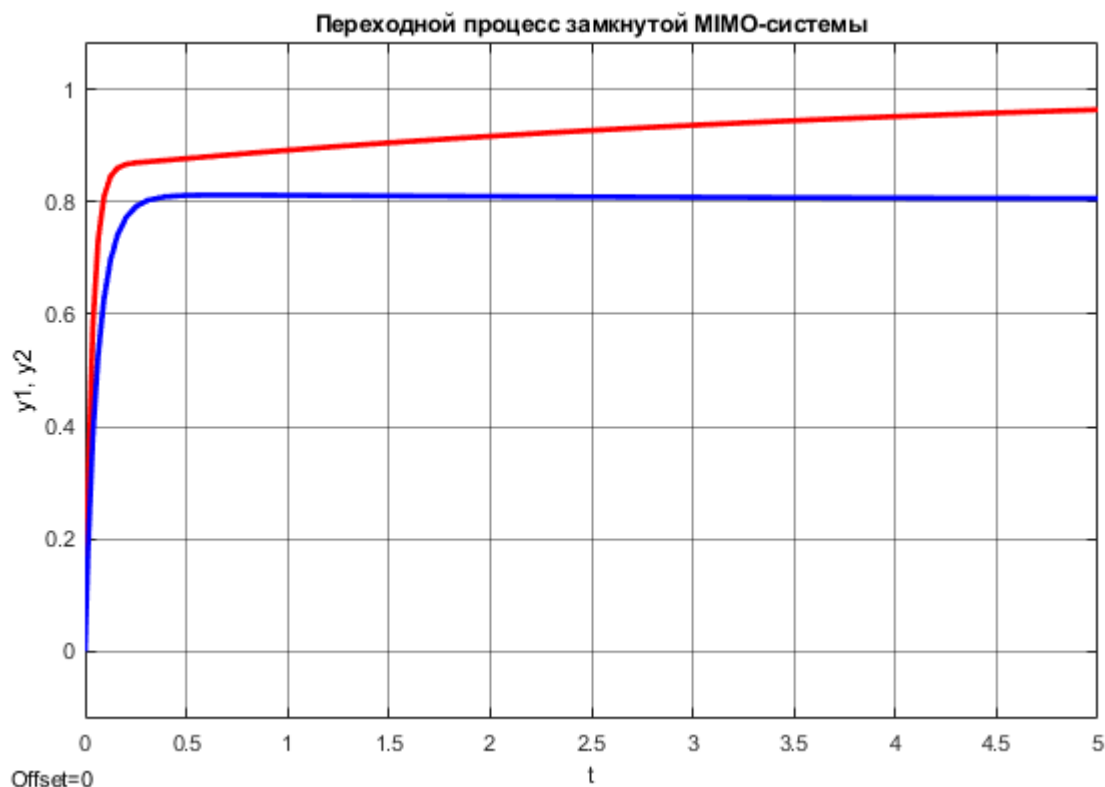


Рисунок 3.10 – Переходные процессы замкнутой ММО-системы

Анализируя графики переходных процессов, представленные на рисунке 3.10, можно отметить, что отклики системы, полученные на основе операторной формы (рисунок 3.4) и формы пространства состояний, полностью совпадают. Это свидетельствует о математической эквивалентности двух представлений модели. Другими словами, преобразование системы из формы передаточных функций в пространство состояний выполнено корректно, а динамические характеристики модели остались неизменными. Такое совпадение подтверждает, что переход от одного представления к другому не вносит искажений в поведение системы и может использоваться для дальнейшего анализа или синтеза системы управления в наиболее удобной форме.

### 3.3 Анализ оценок качества САР процесса гидроочистки бензина

Характер системы можно определить с помощью анализа её переходной характеристики. Построив переходную характеристику системы автоматического регулирования, отвечающей за управление температурой в реакторе, можно оценить, насколько эффективно и стабильно работает система регулирования.

Для более точной оценки качества работы системы управления применяются как прямые, так и косвенные методы анализа. Прямые оценки основываются на исследовании переходного процесса – таких характеристик, как время регулирования, степень колебаний и величина перерегулирования температуры в контрольных зонах реактора. Эти параметры позволяют сделать вывод о динамическом поведении системы в ответ на изменения управляющих воздействий, таких как расход топлива или подача водородсодержащего газа.

Косвенные оценки качества, в свою очередь, выполняются на основе анализа полюсов замкнутой системы управления. Положение полюсов в комплексной плоскости позволяет судить о степени устойчивости, скорости отклика и наличии затухающих колебаний без необходимости строить переходную характеристику.

В качестве источника информации для оценки качества управления в данной задаче выступает замкнутая система автоматического регулирования температурных параметров реактора, которая включает взаимодействующие контуры управления топливоподачей и подачей водородсодержащего газа. Анализ полученных переходных характеристик (рисунок 3.11) позволяет оценить, насколько точно и стабильно поддерживаются температурные режимы в различных зонах реактора, что непосредственно влияет на качество протекающих химических реакций и выход продукта.

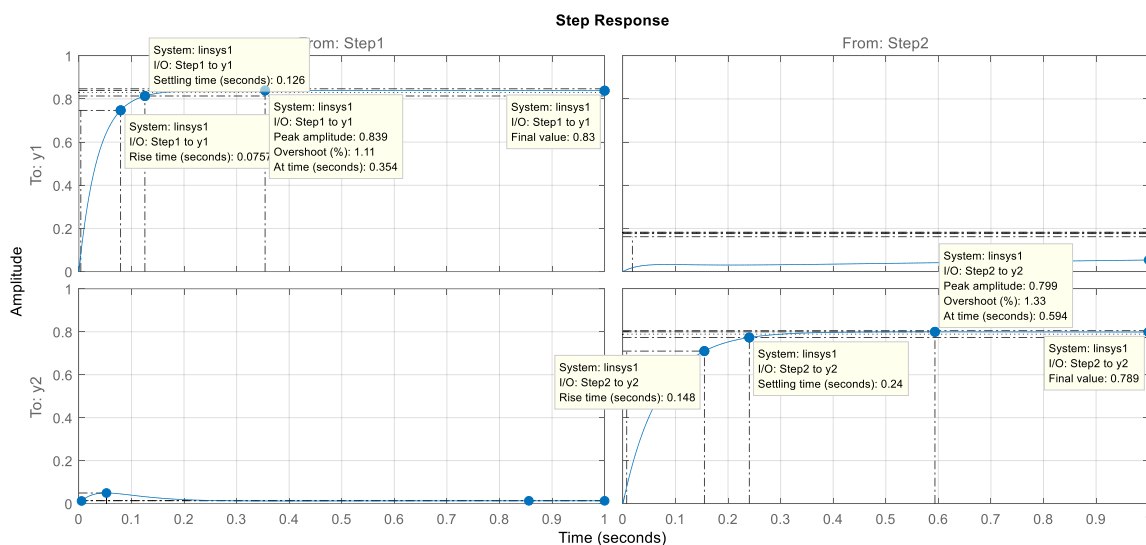


Рисунок 3.11 – Переходные характеристики замкнутой системы

Установившаяся ошибка представляет собой одну из ключевых характеристик динамических свойств системы автоматического управления и напрямую связана с её точностью. Она отражает способность системы обеспечивать соответствие выходного сигнала заданному значению во времени при воздействии установившегося входного сигнала. Если после завершения переходного процесса значение ошибки остаётся отличным от нуля, это означает наличие постоянного отклонения выходной величины от заданной.

В рассматриваемой замкнутой системе управления установившаяся ошибка не равна нулю, что указывает на недостаточную точность регулирования. Иными словами, система не способна полностью устранить ошибку между желаемым и фактическим значениями управляемого параметра, что может негативно сказаться на качестве технологического процесса, особенно при управлении чувствительными объектами, такими как реактор установки гидроочистки бензина.

На основе анализа прямых показателей качества регулирования можно сделать вывод, что быстродействие системы автоматического управления реактором находится на высоком уровне.

Быстродействие определяет способность системы оперативно реагировать на изменения входного сигнала – в данном случае на единичное ступенчатое воздействие. Согласно результатам моделирования, время регулирования относительно первого управляющего воздействия составляет 0.126 секунды, относительно второго – 0.24 секунды, что указывает на очень быструю реакцию системы. Это особенно важно для объектов с быстро протекающими физико-химическими процессами, как в реакторе установки гидроочистки.

Несмотря на высокий показатель быстродействия, точность системы остаётся недостаточной. Это проявляется в наличии установившейся ошибки – конечного отклонения выходного параметра от заданного значения после окончания переходного процесса. В идеале качественная система регулирования должна обеспечивать нулевую установившуюся ошибку, что означает полное соответствие выходной переменной заданному уровню.

В рассматриваемой САУ наблюдается остаточное отклонение, что говорит о недостаточной точности системы. Такое поведение может привести к отклонению важных технологических параметров от нормативных значений, что недопустимо при управлении реактором, где требуется высокая стабильность и точность температурных и расходных режимов.

Графики ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутой системы для нахождения запасов устойчивости по фазе и амплитуде изображены на рисунках 3.12, 3.13, 3.14 и 3.15. На основе анализа частотных характеристик системы можно получить косвенные оценки качества, которые играют важную роль в комплексной оценке работы системы автоматического управления.

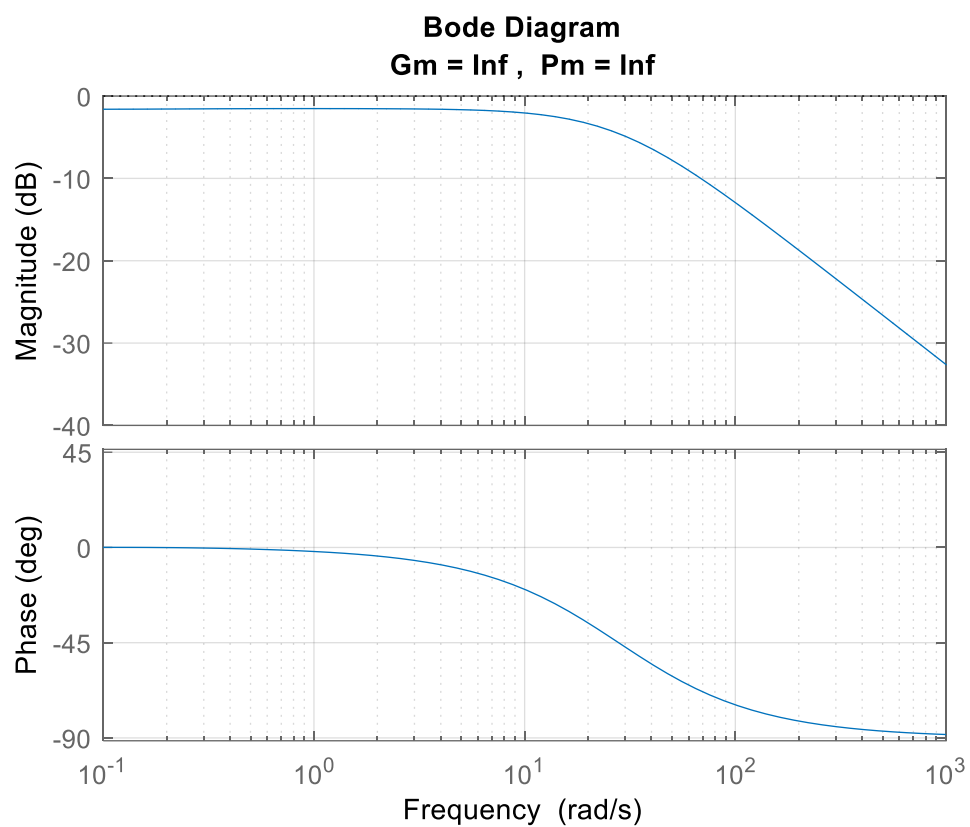


Рисунок 3.12 – ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутой системы относительно  $u_1$  и  $y_1$

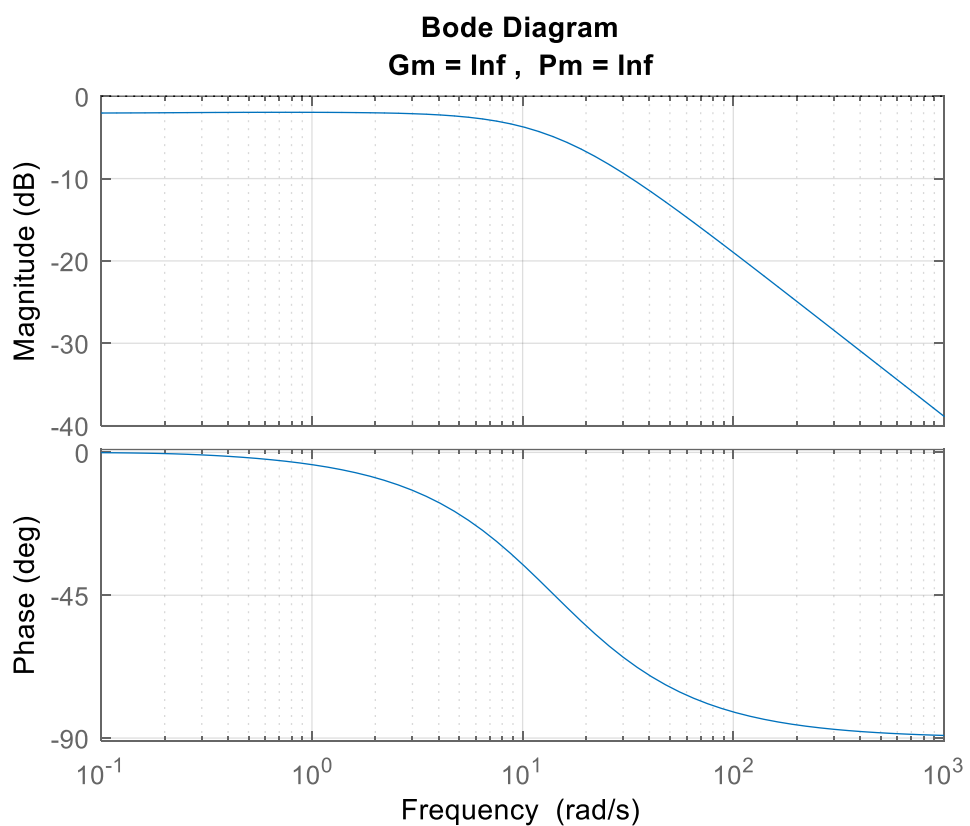


Рисунок 3.13 – ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутой системы относительно  $u_2$  и  $y_2$

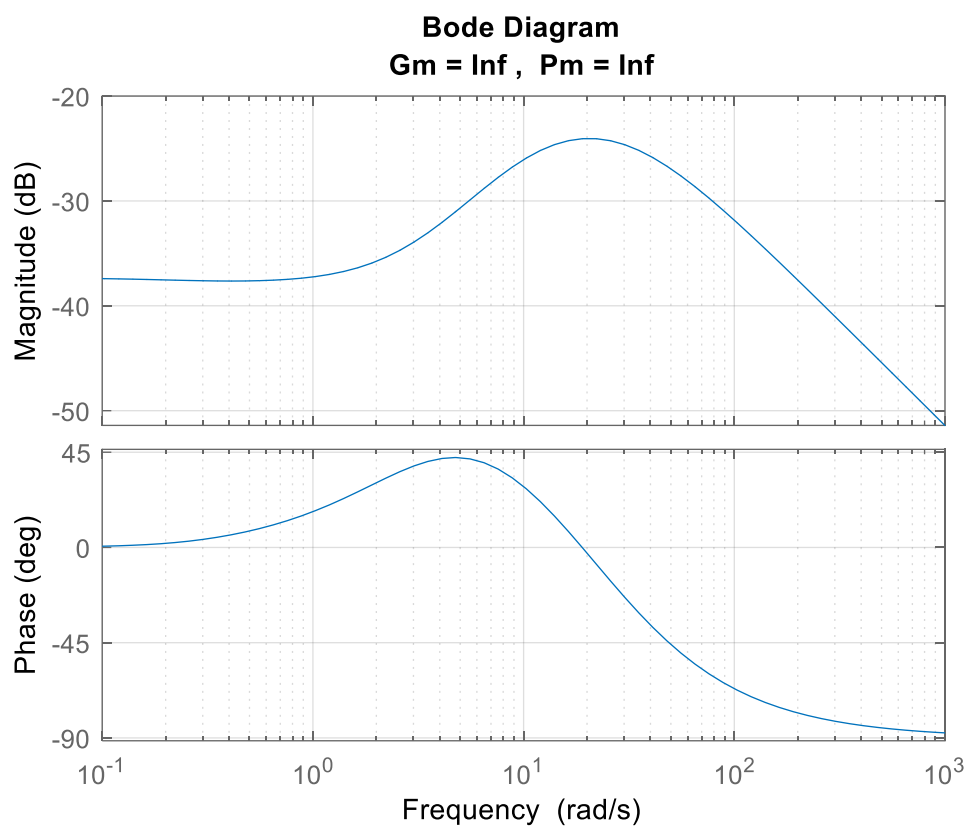


Рисунок 3.14— ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутой системы относительно  $u_1$  и  $u_2$

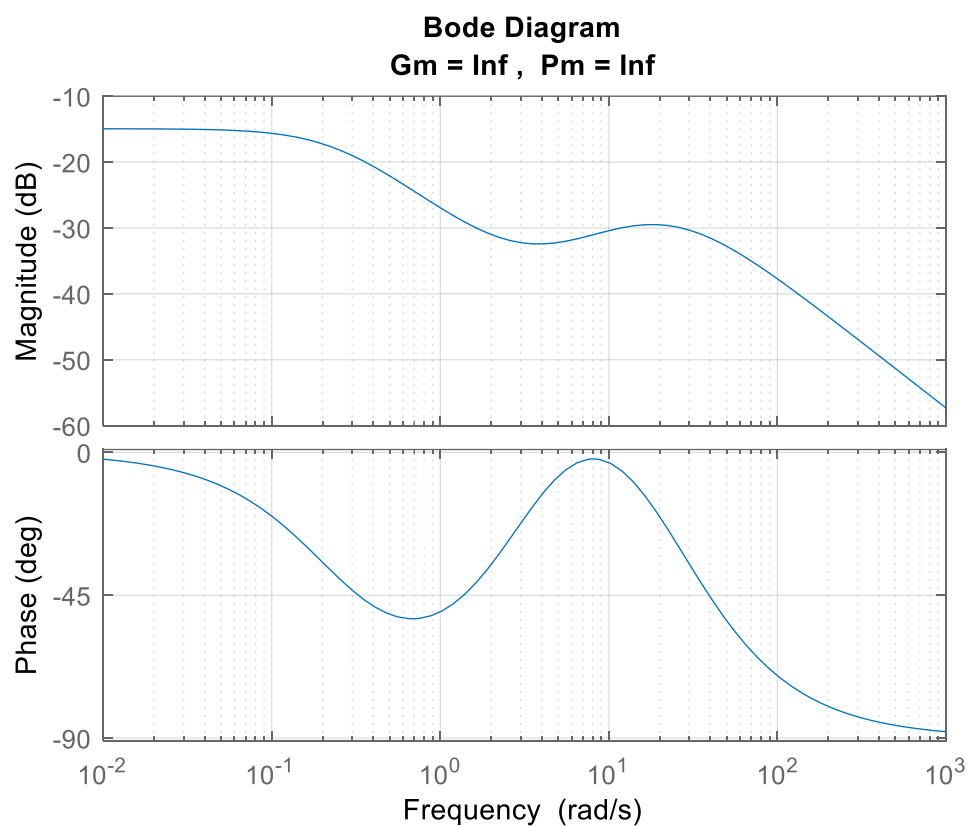


Рисунок 3.15 – ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутой системы относительно  $u_2$  и  $u_1$

Анализируя графики, были определены значения косвенных показателей качества системы, которые сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Запасы устойчивости замкнутой системы

| Запасы устойчивости | Первый контур управления | Второй контур управления |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| $G_m$               | inf                      | inf                      |
| $P_m$               | inf                      | inf                      |

Согласно установленным требованиям к устойчивости систем автоматического управления, минимально допустимое значение запаса устойчивости по амплитуде должно составлять не менее 10 децибел, а по фазе – не менее 30 градусов. В ходе анализа частотных характеристик системы управления реактором было выявлено, что оба показателя значительно превышают эти нормативы.

Так, запас устойчивости по амплитуде оказался равным бесконечности, что означает отсутствие пересечения амплитудной характеристики с критическим уровнем 0 децибел. Это свидетельствует о высокой устойчивости системы, так как при любых колебаниях входного сигнала система сохраняет стабильность.

Аналогично, запас устойчивости по фазе также равен бесконечности. Это указывает на то, что фазовая характеристика не достигает критической фазы минус  $180^\circ$ , при которой возможна потеря устойчивости. По результатам анализа можно заключить, что система обладает высоким уровнем устойчивости и с большим запасом выдерживает внешние и внутренние возмущения, что подтверждается графиками, представленными на рисунке 3.13.

На основе приведённых оценок качества к регулятору предъявляются следующие основные требования (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Основные требования к синтезу регулятора

| № | Оценки качества       |           | Канал №1 | Канал №2 | Регулятор №1 | Регулятор №2 |
|---|-----------------------|-----------|----------|----------|--------------|--------------|
| 1 | Время регулирования   | $T_{set}$ | 0.126с   | 0.24с    | 1с           | 1с           |
| 2 | Перерегулирование     | $P_{ov}$  | 1.11%    | 1.33%    | 0-10%        | 0-15%        |
| 3 | Колебательность       | $\mu$     | —        | —        | 0.5          | 0.5          |
| 4 | Установившаяся ошибка | $e_{ss}$  | 0.17     | 0.211    | 0            | 0            |
| 5 | Время нарастания      | $T_R$     | 0.0757с  | 0.148с   | 0.005с       | 0.005с       |

### 3.4 Синтез многомерного модального регулятора

Для построения регулятора с использованием метода модального управления в качестве управляемого объекта рассматривается исходная двумерная математическая модель, представленная в виде модели в пространстве состояний, приведённой к Жордановой форме.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.405 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2534 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6.603 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2.789 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 23.42 & 0 \\ 0 & 1.36 \\ 2.686 & 0 \\ 0 & 11.39 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Для синтеза модального регулятора необходимо предварительно убедиться в управляемости многомерного объекта. В соответствии с критерием Калмана, рассматриваемая двумерная линейная система с постоянными коэффициентами в формуле (3.16) должна удовлетворять условию полной управляемости.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.16)$$

Условие управляемости системы заключается в следующем

$$\text{rank}Q = \text{rank}(|B, AB, \dots, A^{n-1}B|) = n \quad (3.17)$$

где  $\text{rank}Q$  – ранг матрицы управляемости;

$n$  – размерность системы управления.

Условие наблюдаемости системы заключается в следующем

$$\det Q = \det \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \neq 0 \quad (3.18)$$

где  $\det Q$  – определитель матрицы наблюдаемости.

Используя операторы MATLAB, была получена матрица управляемости (рисунок 3.16) и найден ее ранг, также была вычислена матрица наблюдаемости и ее определитель. Согласно критерию управляемости Калмана, исследуемая ММО-системы полностью управляема, так как ранг матрица управляемости и размерность матрицы состояний равны четырём.

```

>> A=[-4.405 0 0 0; 0 -0.2534 0 0; 0 0 -6.603 0; 0 0 0 -2.789];
>> B=[23.42 0; 0 1.36; 2.686 0; 0 11.39];
>> Q=[B A*B A^2*B A^3*B]

Q =

1.0e+03 *

    0.0234         0   -0.1032         0    0.4544         0   -2.0018         0
         0    0.0014         0   -0.0003         0    0.0001         0   -0.0000
    0.0027         0   -0.0177         0    0.1171         0   -0.7733         0
         0    0.0114         0   -0.0318         0    0.0886         0   -0.2471

>> rl=rank(Q)

rl =

    4

```

Рисунок 3.16 – Нахождение ранга матрицы управляемости

Объект управления по частоте пульсации является полностью наблюдаемым по состоянию, так как определитель матрицы наблюдаемости (рисунок 3.17) не равен нулю.

```

>> Q=[C; C*A; C*A^2; C*A^3]

Q =

    1.0000    1.0000         0         0
         0         0    1.0000    1.0000
   -4.4050   -0.2534         0         0
         0         0   -6.6030   -2.7890
   19.4040    0.0642         0         0
         0         0   43.5996    7.7785
  -85.4747   -0.0163         0         0
         0         0 -287.8882  -21.6943

>> r=rank(Q)

r =

    4

>> det(Q'*Q)

ans =

  1.7939e+10

```

Рисунок 3.17 – Нахождение определителя матрицы наблюдаемости

Задача синтеза модального регулятора для многомерной системы управления заключается в следующем

$$u(t) = -Fx(t), \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = -F \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

где  $F$  – матрица настраиваемых параметров.

Необходимо определить желаемую динамику замкнутой системы на основе биномиальной стандартной формы (рисунок 3.18), обеспечивающей одинаковости всех корней характеристического уравнения (рисунок 3.19).

$$\begin{aligned} & s + \omega_0 \\ & s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2 \\ & s^3 + 3\omega_0 s^2 + 3\omega_0^2 s + \omega_0^3 \\ & s^4 + 4\omega_0 s^3 + 6\omega_0^2 s^2 + 4\omega_0^3 s + \omega_0^4 \\ & s^5 + 5\omega_0 s^4 + 10\omega_0^2 s^3 + 10\omega_0^3 s^2 + 5\omega_0^4 s + \omega_0^5 \\ & s^6 + 6\omega_0 s^5 + 15\omega_0^2 s^4 + 20\omega_0^3 s^3 + 15\omega_0^4 s^2 + 6\omega_0^5 s + \omega_0^6 \\ & s^7 + 7\omega_0 s^6 + 21\omega_0^2 s^5 + 35\omega_0^3 s^4 + 35\omega_0^4 s^3 + 21\omega_0^5 s^2 + 7\omega_0^6 s + \omega_0^7 \\ & s^8 + 8\omega_0 s^7 + 28\omega_0^2 s^6 + 56\omega_0^3 s^5 + 70\omega_0^4 s^4 + 56\omega_0^5 s^3 + 28\omega_0^6 s^2 + 8\omega_0^7 s + \omega_0^8 \end{aligned}$$

Рисунок 3.18 – Биномиальные стандартные формы

Число  $\omega_0$  подбирается исходя из требований к быстродействию системы: чем больше  $\omega_0$ , тем быстрее система реагирует. При этом характеристическое уравнение принимает вид бинома Ньютона  $(s + \omega_0)^n$ .

```
>> w0=6.603;
>> p=[1 4*w0 6*w0^2 4*w0^3 w0^4];
>> r=roots(p)

r =

-6.6039 + 0.0009i
-6.6039 - 0.0009i
-6.6021 + 0.0009i
-6.6021 - 0.0009i
```

Рисунок 3.19 – Желаемые полюса замкнутой системы

Определим вектор настраиваемых параметров многомерного модального регулятора по следующему алгоритму.

Первый шаг алгоритма – получение одномерной матрицы  $b$  по формуле

$$b = B * q \quad (3.21)$$

где  $B$  – матрица управления исходной ММО-системы;

$q$  – матрица глубины обратных связей.

$$b = \begin{bmatrix} 23.42 & 0 \\ 0 & 1.36 \\ 2.686 & 0 \\ 0 & 11.39 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.342 \\ 0.136 \\ 0.2686 \\ 1.139 \end{bmatrix}$$

Второй шаг – вычисление вектора настраиваемых параметров, применяя алгоритм синтеза одномерного модального регулятора.

Шаг 1. Формирование матрицы  $H_1$  (рисунок 3.20) осуществляется по формуле

$$H_1 = [A^3b; A^2b; Ab; b] \quad (3.22)$$

```
>> A=[-4.405 0 0 0; 0 -0.2534 0 0; 0 0 -6.603 0; 0 0 0 -2.789];
>> b=[2.342; 0.136; 0.2686; 1.139];
>> H1=[A^3*b A^2*b A*b b]

H1 =

-200.1818    45.4442   -10.3165     2.3420
  -0.0022     0.0087   -0.0345     0.1360
 -77.3268    11.7109   -1.7736     0.2686
 -24.7098     8.8597   -3.1767     1.1390
```

Рисунок 3.20 – Нахождение матрицы  $H_1$

Шаг 2. Получение коэффициентов характеристических полиномов разомкнутой (рисунок 3.21) и замкнутой (рисунок 3.22) систем управления.

$$\det(sI - A) = s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4, \quad (3.23)$$

$$\det(sI - D) = s^4 + c_1s^3 + c_2s^2 + c_3s + c_4, \quad (3.24)$$

$$\det(sI - D) = (s - s_1)(s - s_2)(s - s_3)(s - s_4) \quad (3.25)$$

```
>> syms s
>> a=det(s*eye(4)-A);
>> expand(a)

ans =

s^4 + (17563*s^3)/1250 + (158209217*s^2)/2500000 + (120339516221*s)/1250000000 + 20556176351109/1000000000000
```

Рисунок 3.21 – Характеристический полином разомкнутой системы

```
>> expand((s+6.603).^4)

ans =

s^4 + (6603*s^3)/250 + (130798827*s^2)/500000 + (287888218227*s)/250000000 + 1900925904952881/1000000000000
```

Рисунок 3.22 – Характеристический полином замкнутой системы

Шаг 3. Формирование вспомогательного вектора  $d$  выполняется по формуле

$$d = c - a = \begin{bmatrix} c_4 \\ c_3 \\ c_2 \\ c_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$d = \begin{bmatrix} 1900.9 \\ 1151.6 \\ 261.6 \\ 26.4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 20.5562 \\ 96.2716 \\ 63.2837 \\ 14.0504 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1880.4 \\ 1055.3 \\ 198.3 \\ 12.4 \end{bmatrix}$$

Шаг 4. Формирование матрицы  $H_2$  определяется по формуле

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 1 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 14.0504 & 1 & 0 & 0 \\ 63.2837 & 14.0504 & 1 & 0 \\ 96.2716 & 63.2837 & 14.0504 & 1 \end{bmatrix}$$

Шаг 5. Вычисление произведения двух матриц (рисунок 3.23) вычисляется по формуле

$$Q = H_2^T H_1^T \quad (3.28)$$

```
>> Q=transpose(H2)*transpose(H1)

Q =

    10.9289    11.0325    0.8362    8.3949
    48.7036    8.1311    3.7895   36.3064
    22.5895    1.8764    2.0004   12.8267
     2.3420    0.1360    0.2686    1.1390
```

Рисунок 3.23 – Нахождение произведения двух матриц

Шаг 6. Определение обратной матрицы  $Q_1$  (рисунок 3.24).

```
>> Q1=inv(Q)

Q1 =

    0.0290   -0.1275    0.5618   -2.4749
    0.1100   -0.0279    0.0071   -0.0018
   -0.0699    0.4618   -3.0495   20.1355
   -0.0562    0.1567   -0.4370    1.2187
```

Рисунок 3.24 – Обратная матрица  $Q_1$

Шаг 7. Определение элементов вектора настраиваемых параметров (рисунок 3.25) вычисляется по формуле

$$k = Q^{-1}d \quad (3.29)$$

```
>> k=Q1*d

k =

    0.6758
   178.8150
   -0.0001
  -11.8877
```

Рисунок 3.25 – Нахождение элементов вектора настраиваемых параметров

Шаг 8. Необходимо проверить правильности решения задачи (рисунок 3.26) по формуле

$$\det(sI - D) = \det(sI - A + Bk^T) \quad (3.30)$$

```
>> expand((s+6.603).^4)

ans =

s^4 + (6603*s^3)/250 + (130798827*s^2)/500000 + (287888218227*s)/250000000 + 1900925904952881/1000000000000

>> expand(det(s*eye(4)-A+b*k'))

ans =

s^4 + (2436077022374080868114107*s^3)/92233720368547758080000 + (135829267706427949273132025850161680983729
```

Рисунок 3.26 – Проверка правильности решения

Третий шаг – получение матрицы настраиваемых параметров (рисунок 3.27) для многомерного регулятора по формуле

$$F = q \cdot k^T \quad (3.31)$$

```
>> F=q*k'

F =

    0.0676    17.8815    -0.0000    -1.1888
    0.0676    17.8815    -0.0000    -1.1888
```

Рисунок 3.27 – Вычисление матрицы настраиваемых параметров

Четвертый шаг – проверка расчётов с использованием оператора модального регулятора (рисунок 3.28) и проверка собственных значений разомкнутой и замкнутой системы (рисунок 3.29).

```
>> r

r =

-6.6039 + 0.0009i
-6.6039 - 0.0009i
-6.6021 + 0.0009i
-6.6021 - 0.0009i

>> k=acker(A,b,r)

k =

    0.6758    178.8150    -0.0000   -11.8877
```

Рисунок 3.28 – Проверка расчётов через оператора модального регулятора

```
>> eig(A)           >> eig(A+B*(-F))

ans =               ans =

   -6.6030          -6.7259 + 0.1243i
   -4.4050          -6.7259 - 0.1243i
   -2.7890          -6.4801 + 0.1216i
   -0.2534          -6.4801 - 0.1216i
```

Рисунок 3.29 – Проверка собственных значений разомкнутой и замкнутой системы

Пятый шаг – вычисление масштабирующего коэффициента  $K_m$  (рисунок 3.30) по формуле

$$k_m = (-C(A - BF)^{-1}B)^{-1} \quad (3.32)$$

```
>> Km=inv(-C*inv(A-B*F)*B)

Km =

   -1.6136    24.4314
   -1.8435    24.9785
```

Рисунок 3.30 – Определение масштабирующего коэффициента

Шестой шаг – моделирование системы регулирования с модальным регулятором и масштабирующим коэффициентом в среде MATLAB Simulink (рисунок 3.31), нахождение переходных процессов системы (рисунок 3.32).

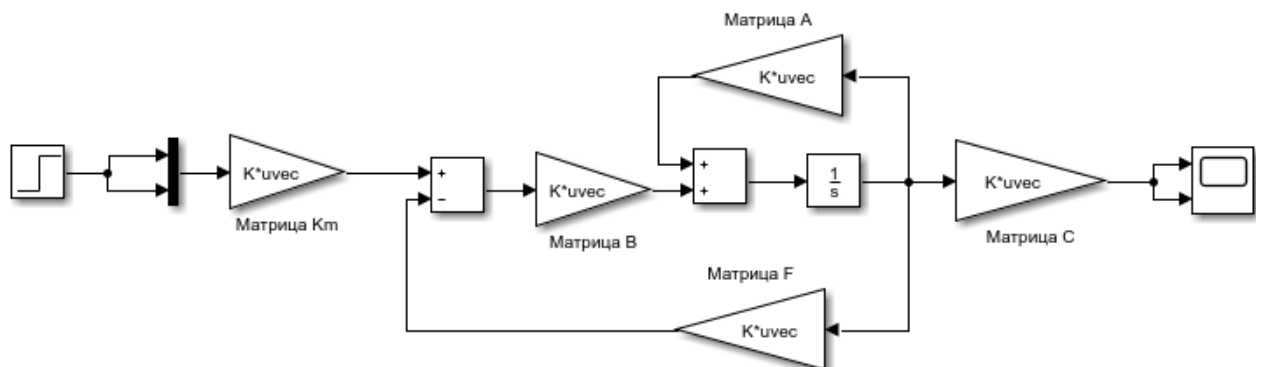


Рисунок 3.31 – Схема моделирования системы с модальным регулятором и масштабирующим коэффициентом

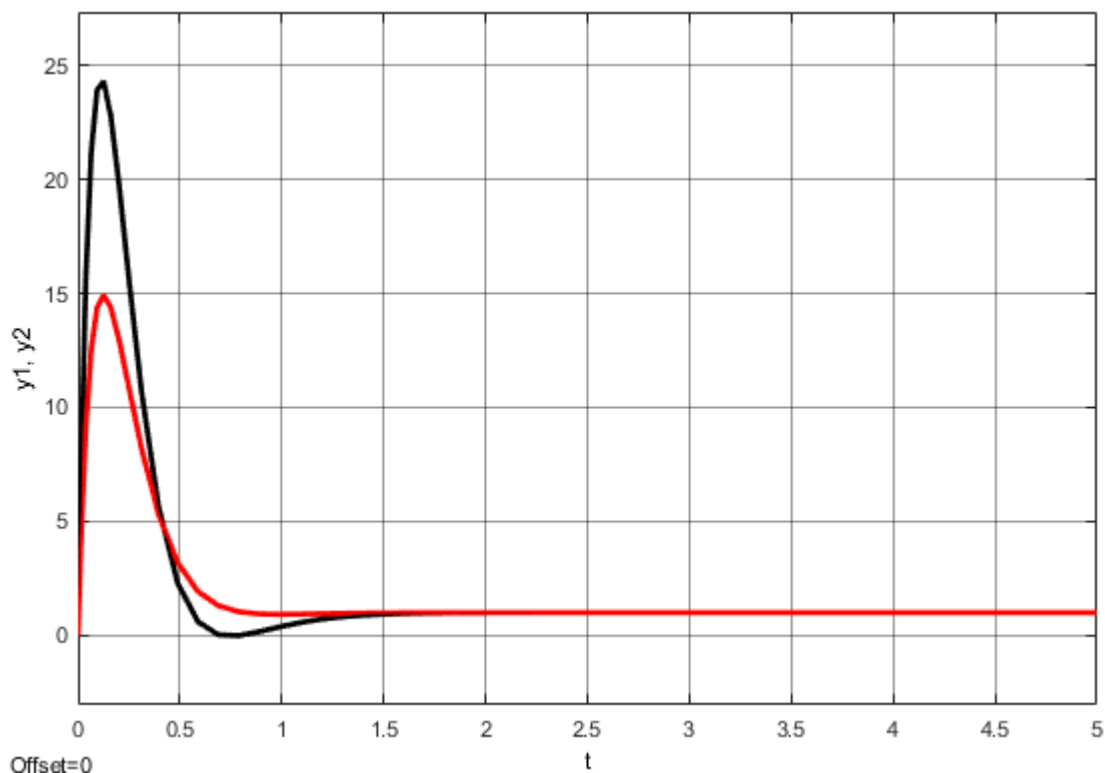


Рисунок 3.32 – Переходные процессы системы с модальным регулятором и масштабирующим коэффициентом

На представленном графике переходного процесса отображена динамика многомерной системы управления с модальным регулятором и применением масштабирующего коэффициента. Выходные переменные демонстрируют устойчивое поведение с относительно быстрым временем установления. Однако наблюдается значительное перерегулирование, особенно на выходе  $y_1$ , сопровождающееся выраженными колебаниями в начальной фазе отклика.

Подобный характер переходного процесса указывает на недостаточную согласованность динамики каналов и ограниченную способность модального управления эффективно учитывать внутренние связи между входами и выходами системы. В многомерных объектах такие перекрёстные влияния могут существенно снижать качество регулирования при использовании статических регуляторов с фиксированным усилением.

С целью повышения точности, улучшения плавности отклика и снижения амплитуды перерегулирования целесообразно рассмотреть синтез предиктивного регулятора. Данный класс регуляторов позволяет реализовать оптимальное управление на основе прогноза поведения системы во времени, с учётом физических ограничений на управляющие воздействия и выходные параметры.

### 3.5 Синтез MPC контроллера

Предиктивное управление представляет собой современный метод автоматического регулирования, основанный на использовании математической модели объекта для прогнозирования его будущего поведения и оптимального формирования управляющих воздействий (рисунок 3.33). Этот подход получил широкое распространение в промышленности благодаря своей способности учитывать ограничения на входы, выходы и внутренние состояния системы, а также эффективно управлять многомерными и инерционными объектами с запаздыванием.

Основная идея предиктивного управления заключается в том, что в каждый дискретный момент времени контроллер получает информацию о текущем состоянии управляемой системы и использует её вместе с внутренней математической моделью для предсказания поведения системы на определённом временном горизонте. Этот интервал в будущем называется горизонтом предсказания. На основе предсказания рассчитывается оптимальная последовательность управляющих воздействий, минимизирующая отклонения выходных переменных от заданных значений, а также учитывающая ограничения на параметры системы. Полученная задача формулируется как оптимизационная задача, решаемая при каждом шаге управления. Однако, из всей найденной оптимальной последовательности воздействий фактически используется только первое управляющее действие, после чего система получает новые измерения и расчёт повторяется – этот принцип называется «скользящим горизонтом управления».

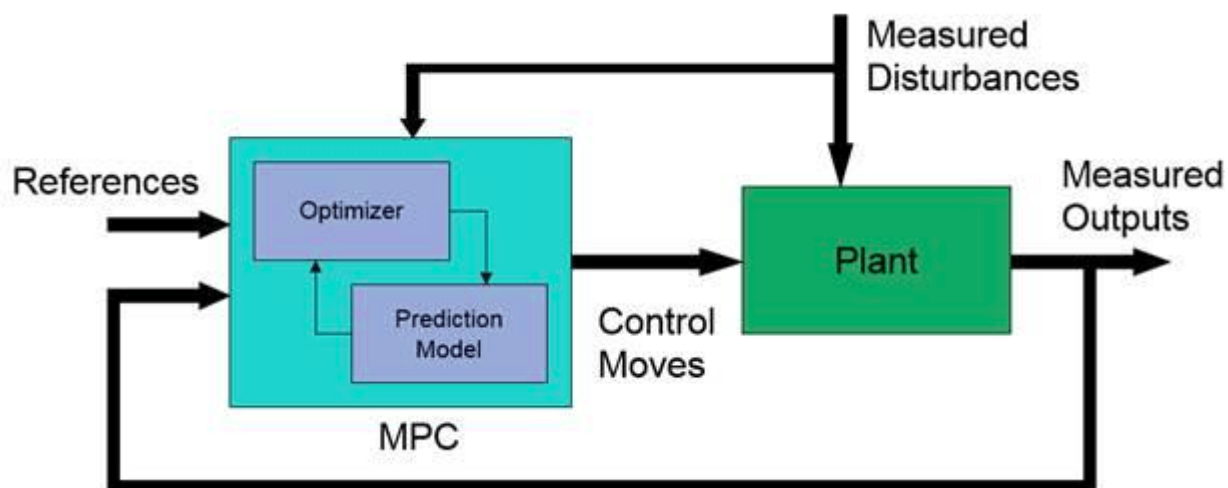


Рисунок 3.33 – Основной цикл управления

Предиктивное управление особенно эффективно в системах, где необходимо учитывать ограничения, например, на расход топлива, давление, температуру, уровень, а также ограничения на скорости изменения управляющих воздействий. Это делает MPC одним из наиболее предпочтительных подходов при управлении технологическими установками, где важны как безопасность, так и экономичность процессов.

К числу преимуществ MPC относятся: высокая точность регулирования, возможность работы с многомерными системами (MIMO), естественное включение ограничений на переменные в структуру алгоритма, предсказание будущего поведения объекта, а также гибкость в настройке веса критериев качества управления.

MPC контроллер – это ключевой элемент системы управления, реализующий алгоритм предиктивного регулирования. Он основан на модели объекта управления и предназначен для вычисления управляющих воздействий, оптимальных по заранее заданному критерию качества. MPC-контроллер не просто реагирует на отклонения, как это делают типовые регуляторы, а предсказывает поведение системы во времени и выбирает оптимальные действия с учётом будущих изменений и ограничений.

Система автоматического управления с использованием модели предиктивного управления представлена на рисунке 3.34. В центре схемы расположен объект управления, реализованный в виде модели в пространстве состояний.

Контроллер MPC получает на вход текущее значение выхода объекта  $y(t)$ , а также опорный сигнал  $r(t)$ , который задаётся пользователем через блок ввода. Контроллер на основе модели объекта предсказывает поведение системы на некотором горизонте предсказания, и, решая задачу оптимизации, минимизирует заданный функционал стоимости.

Выход контроллера – управляющее воздействие – поступает обратно на объект управления, формируя замкнутую систему. Таким образом, на каждом шаге времени MPC контроллер обновляет свои предсказания и вычисляет оптимальное управляющее воздействие с учётом текущего состояния объекта и заданной цели.

Для синтеза MPC контроллера реактора установки гидроочистки бензина были выбраны параметры, соответствующие динамике объекта. Время нарастания реактора составляет 0.24 секунды, на основе чего шаг дискретизации принят равным 0.02 секунды – это обеспечивает достаточную точность при отслеживании переходных процессов. Горизонт предсказания выбран равным 30 шагам, что позволяет контроллеру охватывать 2.5 времени нарастания и точно прогнозировать поведение системы. Горизонт управления установлен в 8 шагов, что даёт баланс между качеством управления и вычислительной сложностью. Такой выбор параметров обеспечивает быструю и стабильную реакцию контроллера в условиях технологических ограничений (рисунок 3.35).

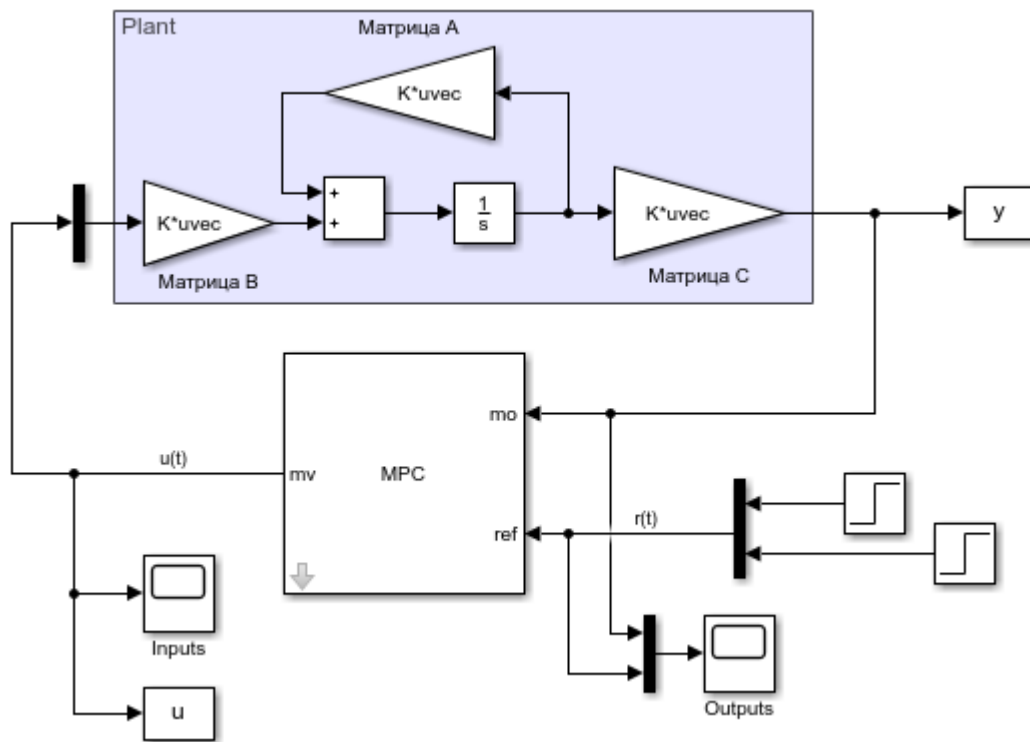


Рисунок 3.34 – Схема моделирования объекта управления с MPC контроллером

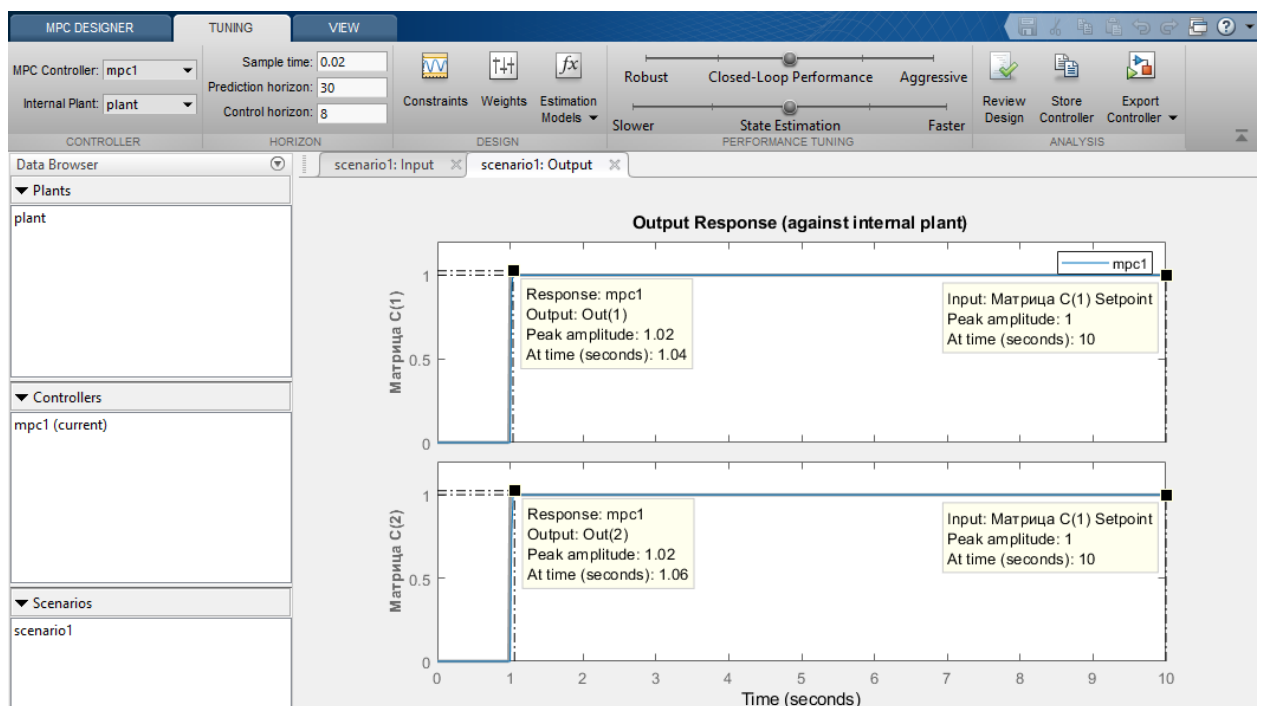


Рисунок 3.35 – Переходной процесс системы усовершенствованного управления

Система (рисунок 3.35) обладает высокой стабильностью и быстрой реакцией на изменения задания. Переходная характеристика демонстрирует достижение установившегося режима примерно за одну секунду с незначительным перерегулированием около 2 процентов. Это говорит о том, что контроллер эффективно предсказывает поведение объекта и корректирует управляющее воздействие, обеспечивая хорошее качество регулирования.

При этом наблюдается небольшое превышение амплитуды выходного сигнала над заданием, что может свидетельствовать о недостаточной «мягкости» регулятора. Это можно скорректировать за счет увеличения веса управляющего воздействия в целевой функции MPC, а также за счет уточнения горизонта предсказания и управления. В целом, контроллер демонстрирует достаточную гибкость и высокую степень согласования каналов, что важно для многоканальных систем управления.

Синтез модального регулятора для многомерной и многосвязной системы потребовал дополнительного анализа, исходя из полученного ранее переходного процесса. Из переходных характеристик (рисунок 3.32) видно, что использование только модального регулятора приводит к заметному перерегулированию и высокому пиковому значению отклика, что не соответствует требованиям высокой точности и надежности регулирования в условиях ограничений на управляющие воздействия. Введение MPC контроллера позволяет значительно улучшить качество управления и повысить устойчивость и надежность системы (рисунок 3.36).

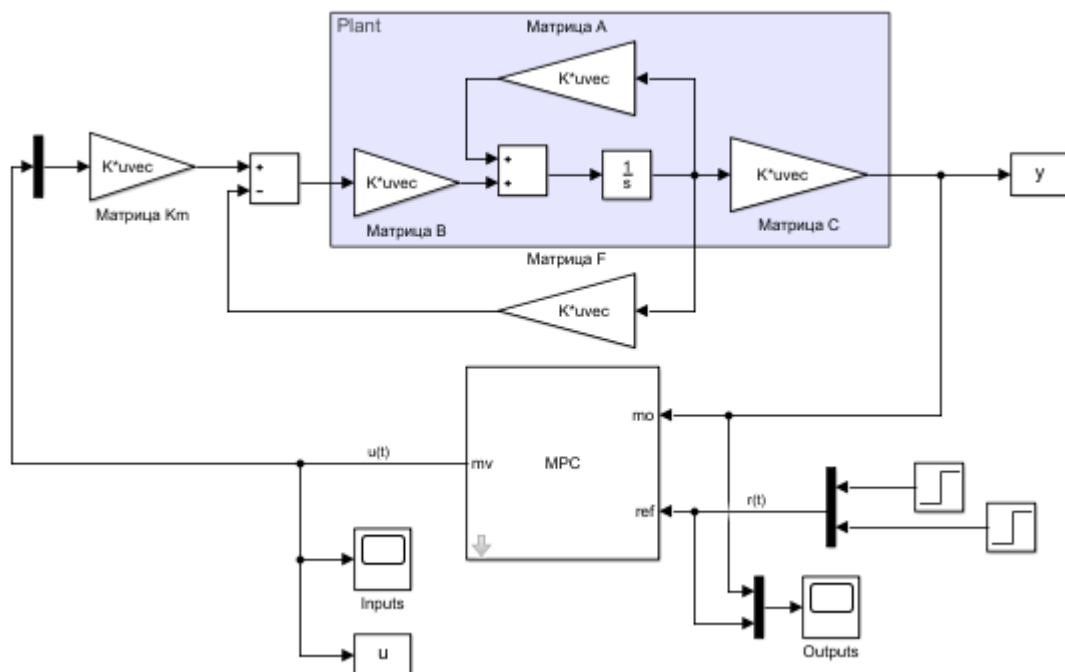


Рисунок 3.36 – Схема моделирования объекта управления с MPC контроллером и модальным регулятором

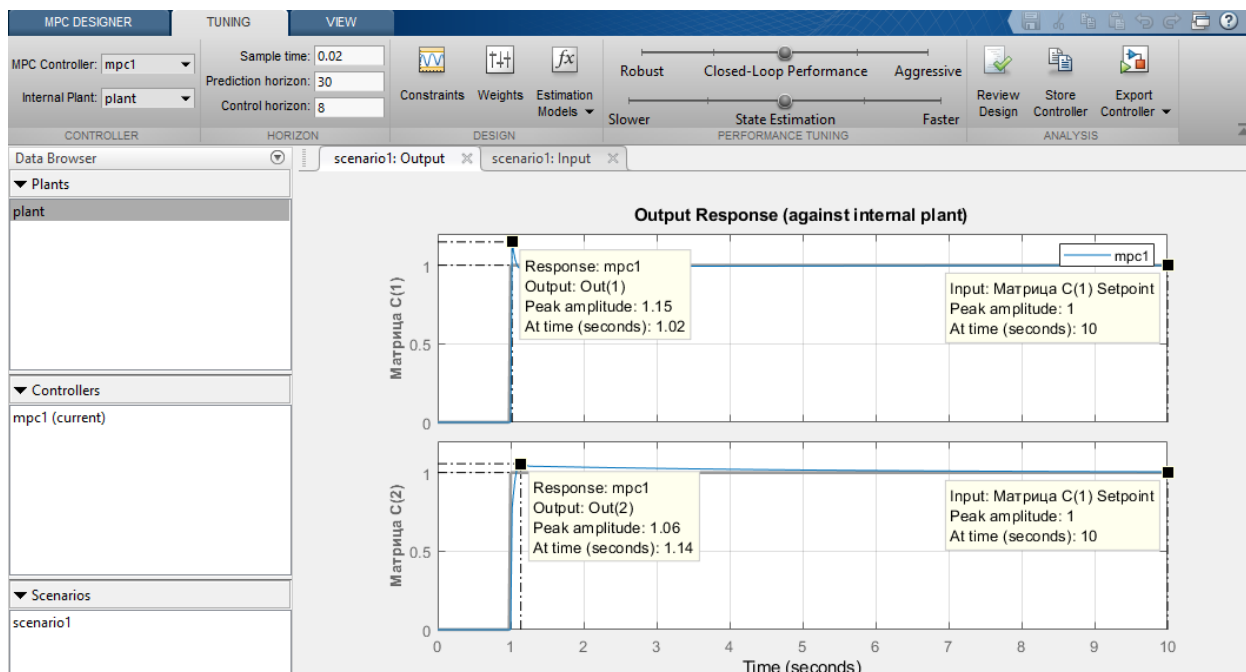


Рисунок 3.37 – Переходной процесс объекта управления с MPC контроллером и модальным регулятором

Система управления с модальным регулятором и MPC контроллером была успешно смоделирована (рисунок 3.37). Использование MPC контроллера позволило добиться устойчивого выхода системы с незначительным перерегулированием.

В ходе анализа выходных откликов видно, что выходные сигналы точно следуют по заданной траектории (установившейся амплитудой 1), а динамические показатели отклика находятся в пределах допустимого уровня перерегулирования и времени переходного процесса. Так, например, для первого выхода отклик имеет пик 1.15 с максимальным значением на 1.02 секундах, а для второго – пик 1.06 с максимальным значением на 1.14 секундах. Эти результаты показывают, что регулятор обеспечивает быструю реакцию с незначительным перерегулированием. При изменении веса скорости изменения управляющего воздействия на 0.01 была получена более мягкая реакция без значительного ухудшения времени отклика, что подтверждает эффективность настройки MPC контроллера.

## 4 Синтез развязывающей системы управления

В соответствии с рисунком 3.4 можно отметить, что взаимосвязи между каналами оказывают значительное влияние на выходные сигналы системы. Следовательно, для обеспечения требуемых характеристик необходимо устранить данный эффект. В рамках сложной системы автоматического управления основная задача заключается в точном отслеживании задающего сигнала, который подается на вход установки в виде единичного ступенчатого воздействия. Для этого требуется провести синтез регулятора, основываясь на исходной модели объекта управления и заданной переходной характеристике.

Однако, ввиду существенного влияния взаимосвязей между каналами, необходимо разработать методы компенсации этих взаимосвязей. Поэтому в данном разделе будет рассмотрен синтез развязывающего устройства, которое позволит минимизировать влияние перекрестных связей и обеспечить эффективное управление многомерной системой.

**Постановка задачи (глобальная).** Для многомерной многосвязной системы управления (3.6) необходимо синтезировать регулятор на основе эмпирических методов настройки параметров регулятора с целью наискорейшего достижения желаемых режимов.

Для решения поставленной задачи и с учетом наличия взаимосвязей в системе (3.6), требуется выполнить следующие этапы:

- 1) ввести в рассмотрение сложную систему управления процесса гидроочистки бензина без взаимосвязей;
- 2) выбрать закон типовых регуляторов для решения задачи стабилизации выходных сигналов;
- 3) решить задачу синтеза типовых регуляторов для изолированных подсистем без взаимосвязей;
- 4) для сложной системы с взаимосвязями, с включёнными регуляторами в подсистемах, реализовать процедуру развязывания, чтобы компенсировать влияние взаимосвязей на выходные сигналы.

Результаты моделирования системы (3.6) без взаимосвязей, на основе схемы моделирования в среде MATLAB (рисунок 4.1), представлены на рисунке 4.2.

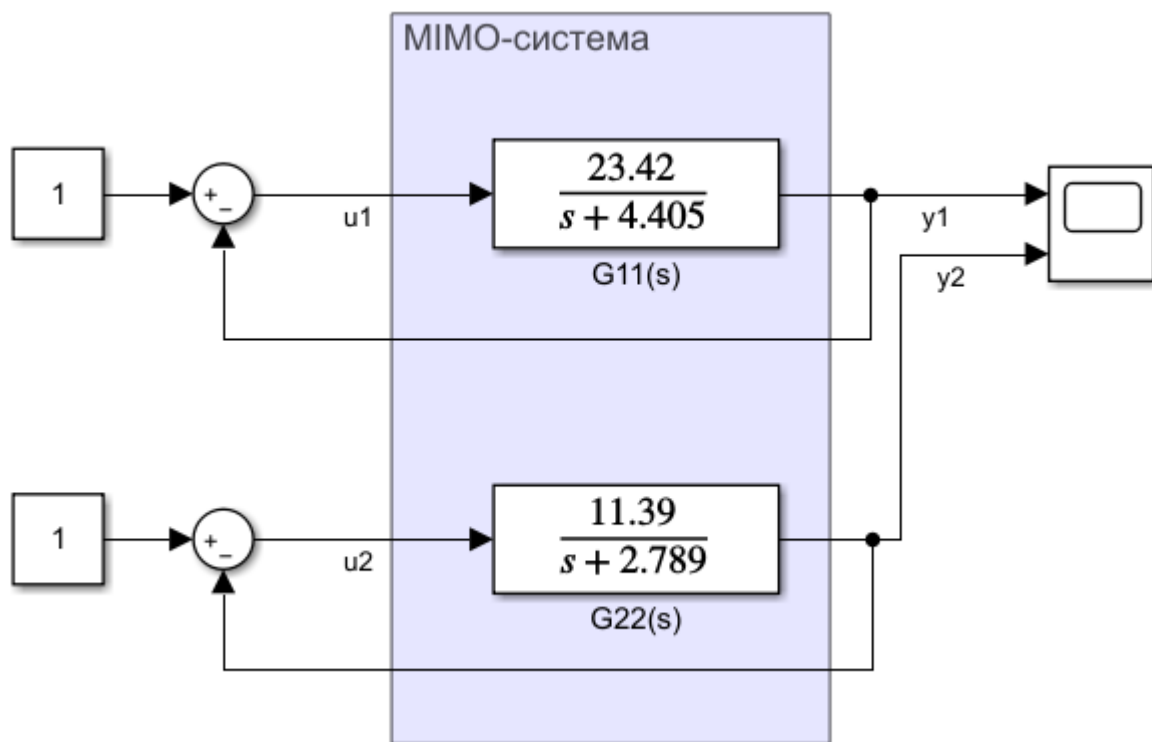


Рисунок 4.1 – Схема моделирования сложной системы без взаимосвязей

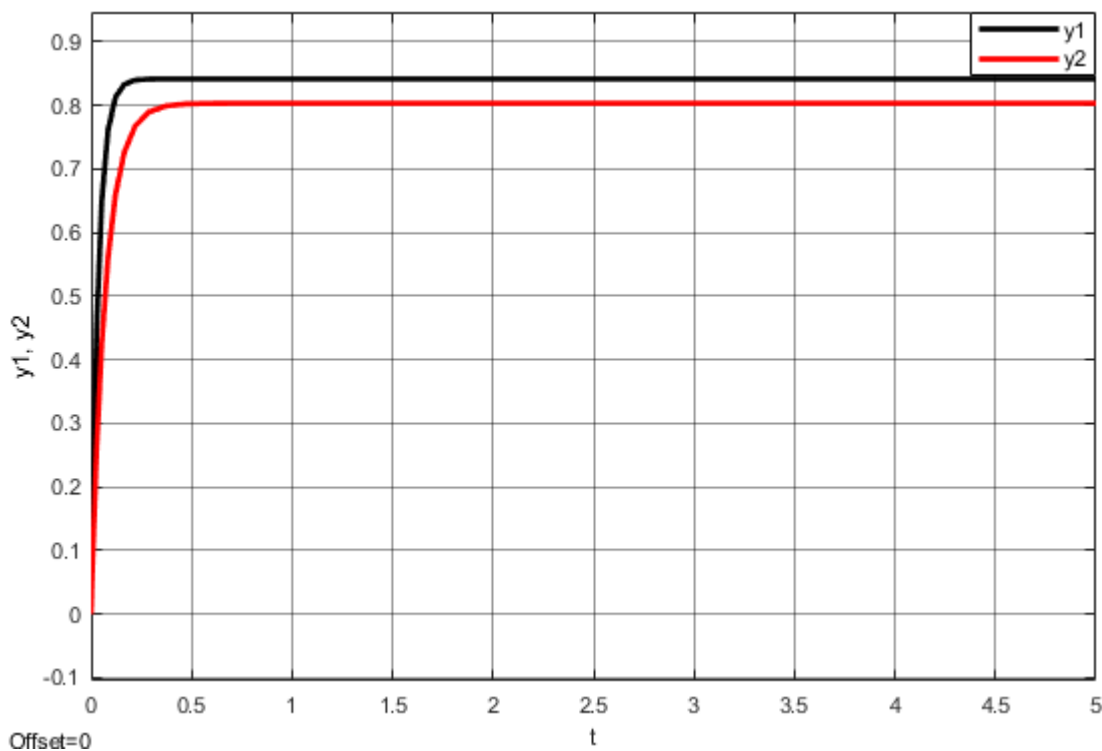


Рисунок 4.2 – Выходные сигналы объекта управления без взаимосвязей

Поскольку в системе (3.6) присутствуют аддитивные возмущения, в схеме моделирования (рисунок 4.3) в качестве тестового возмущения использовано единичное ступенчатое воздействие.

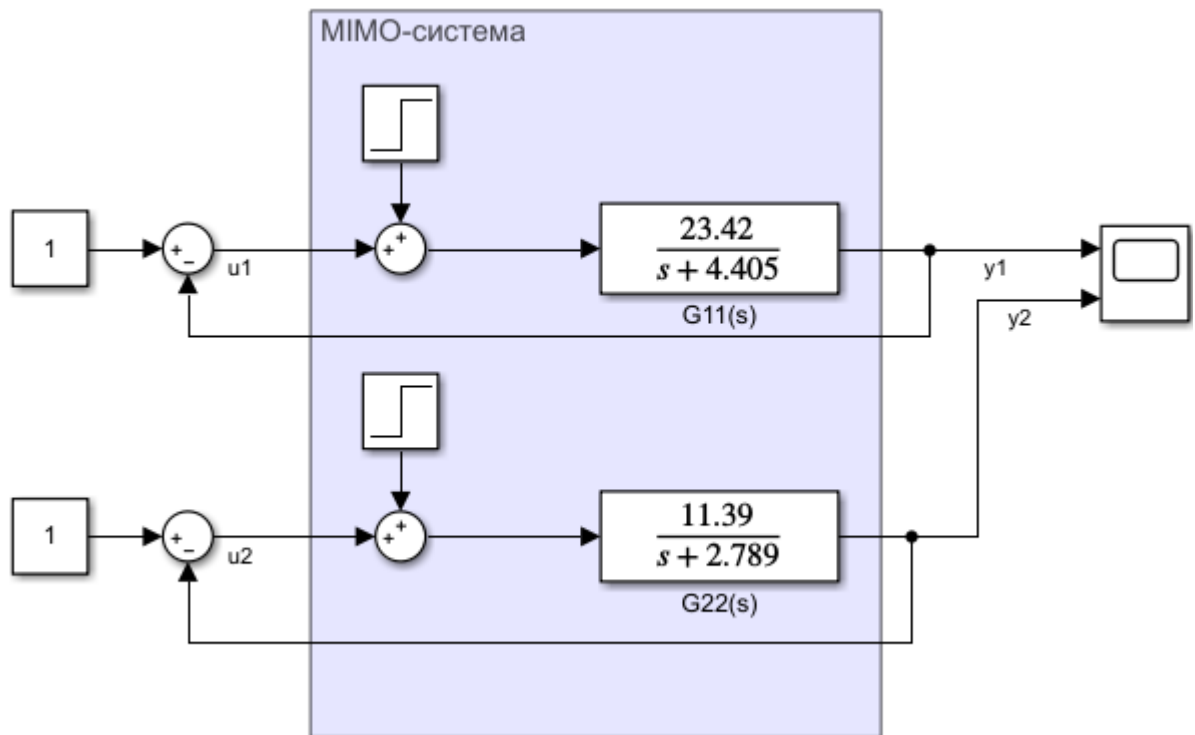


Рисунок 4.3 – Схема моделирования сложной системы с возмущениями

Результаты моделирования, представленные на рисунке 4.4, четко демонстрируют влияние возмущения на динамику технологического процесса.

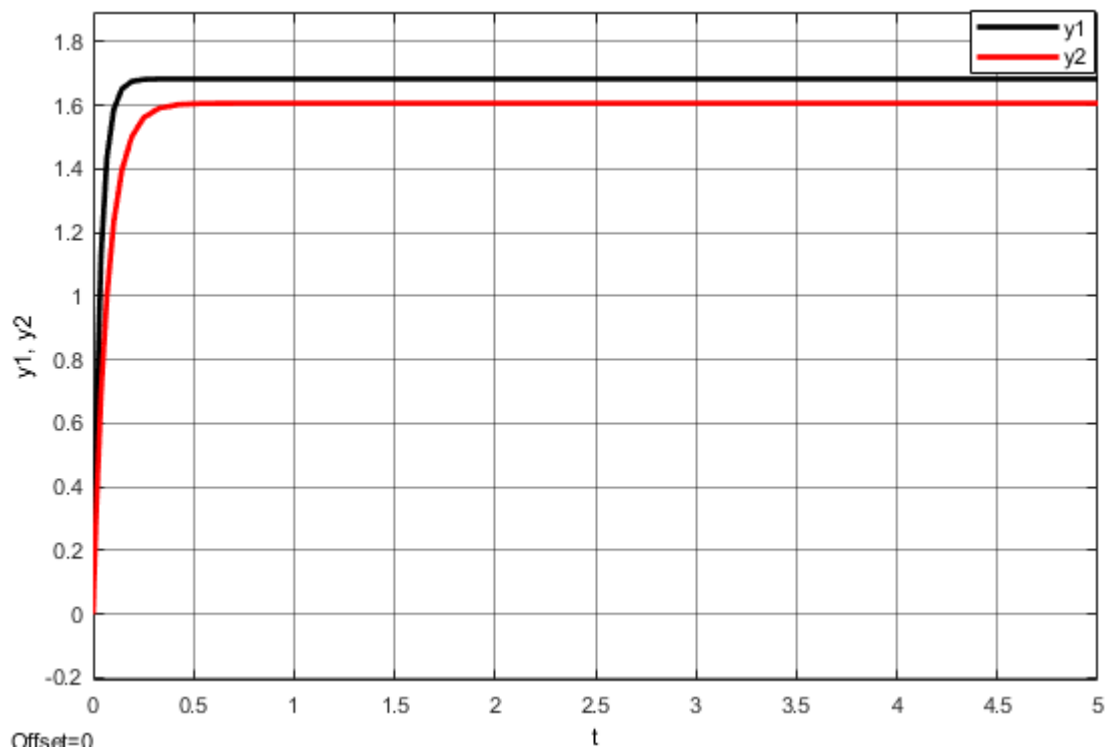


Рисунок 4.4 – Выходные сигналы объекта управления с возмущениями

При разработке регулятора необходимо учитывать, что повышение точности системы – особенно стремление к нулевому значению установившейся ошибки – может привести к увеличению времени переходного процесса. Это связано с тем, что изначально система не обладает высокой точностью, и для её улучшения возможно замедление отклика. Однако в рамках данного технологического процесса ключевым критерием эффективности регулирования является именно точность, что обосновывает допустимость такого компромисса.

На следующем этапе были спроектированы регуляторы для каждого из двух независимых контуров управления. Для реализации этого были разработаны пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы, по одному для каждой пары «вход-выход». После выбора структуры регуляторов выполнена настройка их параметров. В качестве метода настройки были использованы классические подходы – алгоритмы Циглера-Никольса и Чина-Хронеса-Ресвика, позволяющие определить приближённо желаемые значения коэффициентов для обеспечения стабильного и точного управления.

При заданной математической модели объекта управления (3.6) необходимо найти параметры PI-регулятора

$$u(t) = k_p \left( e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \right) \quad (4.1)$$

(идеальная форма) с применением эмпирического метода Чина-Хронеса-Ресвика (CHR), направленного на достижение заданных показателей качества системы, таких как высокая точность и необходимое быстродействие.

Данный метод был выбран исходя из переходной характеристики исходной системы (3.6), так как метод CHR предназначен для систем с монотонным процессом. Алгоритм выполнения данного метода заключается в следующем.

Шаг 1. По переходному процессу исходной системы найдем необходимые параметры, а именно коэффициент передачи, постоянную времени и время запаздывания (рисунок 4.5).

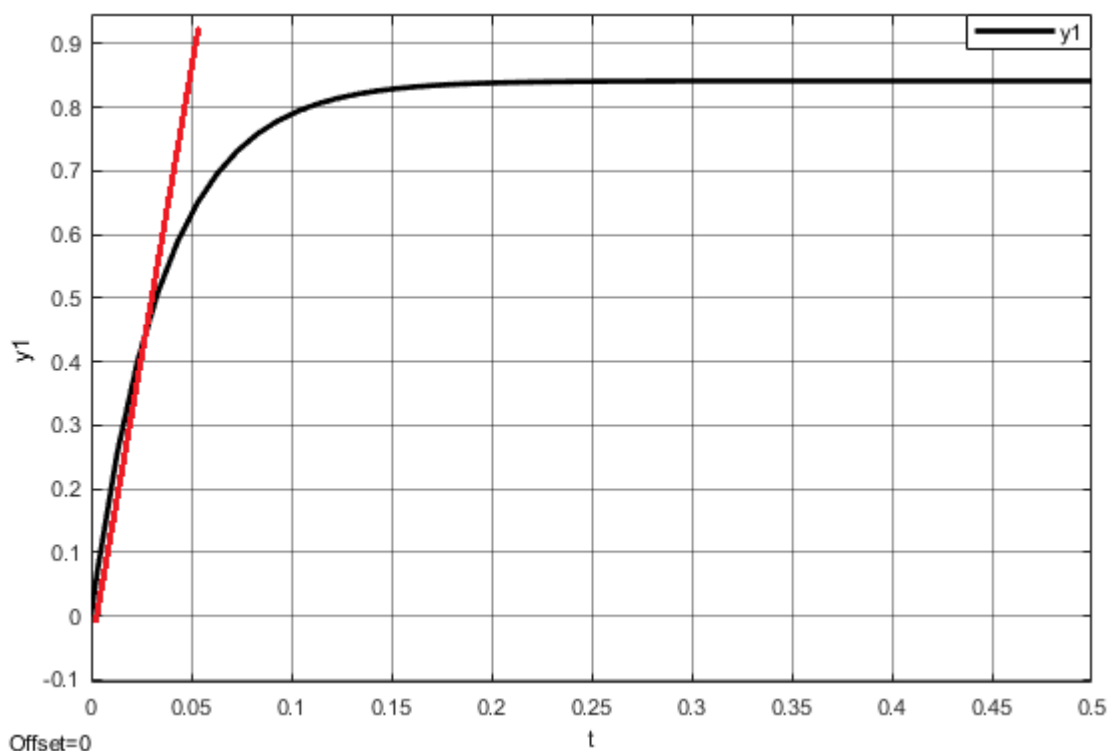


Рисунок 4.5 – Переходной процесс первого контура управления

Для определения неизвестных параметров системы необходимо сначала найти точку перегиба на переходной характеристике, а затем провести к этой точке касательную. Время запаздывания  $L=0.02\text{с}$  определяется как промежуток времени от момента подачи ступенчатого входного сигнала до начала отклика системы. Коэффициент передачи  $k=0.4$  соответствует установившемуся значению выходного сигнала. Постоянная времени  $T=0.1\text{с}$  вычисляется как разность между временем, соответствующим пересечению касательной с уровнем установившегося значения, и временем запаздывания.

Проведём анализ соответствия полученных значений установленным требованиям по формуле

$$0.15 < \frac{L}{T} < 0.6 \quad (4.2)$$

Вычисленное значение, равное 0.2, удовлетворяет требованию.

Шаг 2. Учитывая, что процесс с маленьким процентом перерегулирования, найдем параметры PI-регулятора по формулам для наблюдения отклика при изменении уставки и занесем результаты в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры PI-регулятора методом CHR (1 контур)

| Тип регулятора | $k_P$                    | $T_I = 1/I$                                     |
|----------------|--------------------------|-------------------------------------------------|
| PI             | $0.6 \frac{T}{kL} = 7.5$ | $T_I = 1L = 0.02$<br>$k_I = \frac{1}{T_I} = 50$ |

Имея значения регулятора, можно записать закон управления PI-регулятора для системы первого контура следующим образом

$$u(t) = 7.5 \left( e(t) + 50 \int_0^t e(t) dt \right) \quad (4.3)$$

Исходя из полученных параметров типового регулятора методом CHR, промоделируем систему с PI-регулятором (рисунок 4.6).

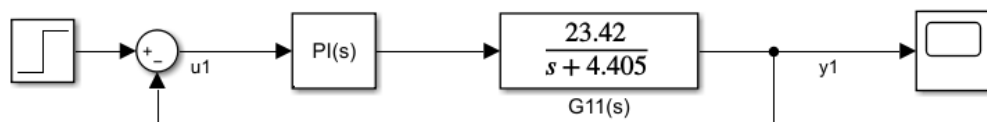


Рисунок 4.6 – Схема моделирования системы первого контура с PI-регулятором (CHR)

Результаты моделирования показаны на рисунке 4.7, оценки качества полученной системы описаны на рисунках 4.8, 4.9.

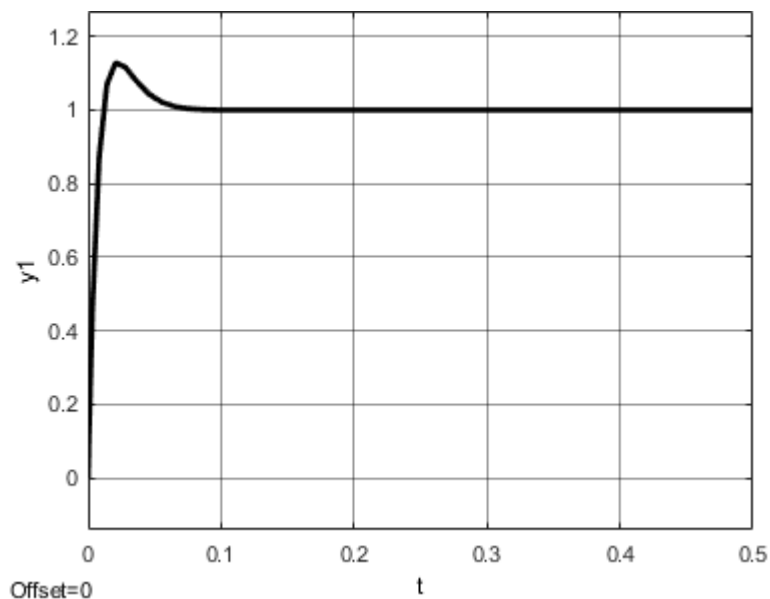


Рисунок 4.7 – Переходной процесс системы первого контура с PI-регулятором (CHR)

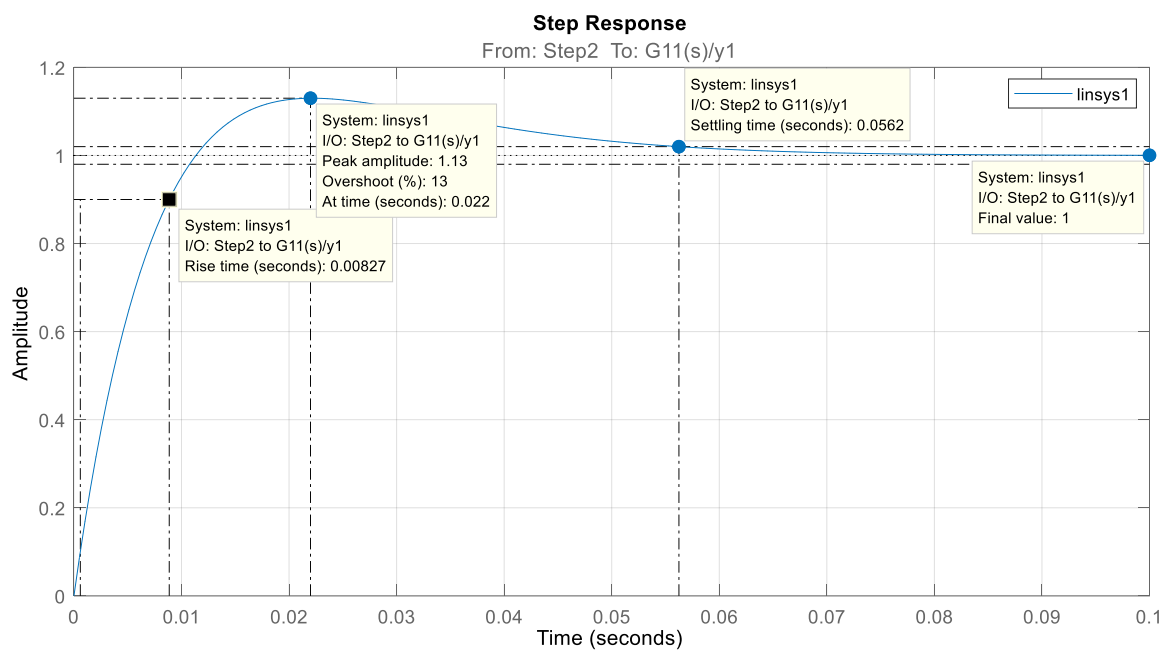


Рисунок 4.8 – Оценки качества системы первого контура с PI-регулятором (CHR)

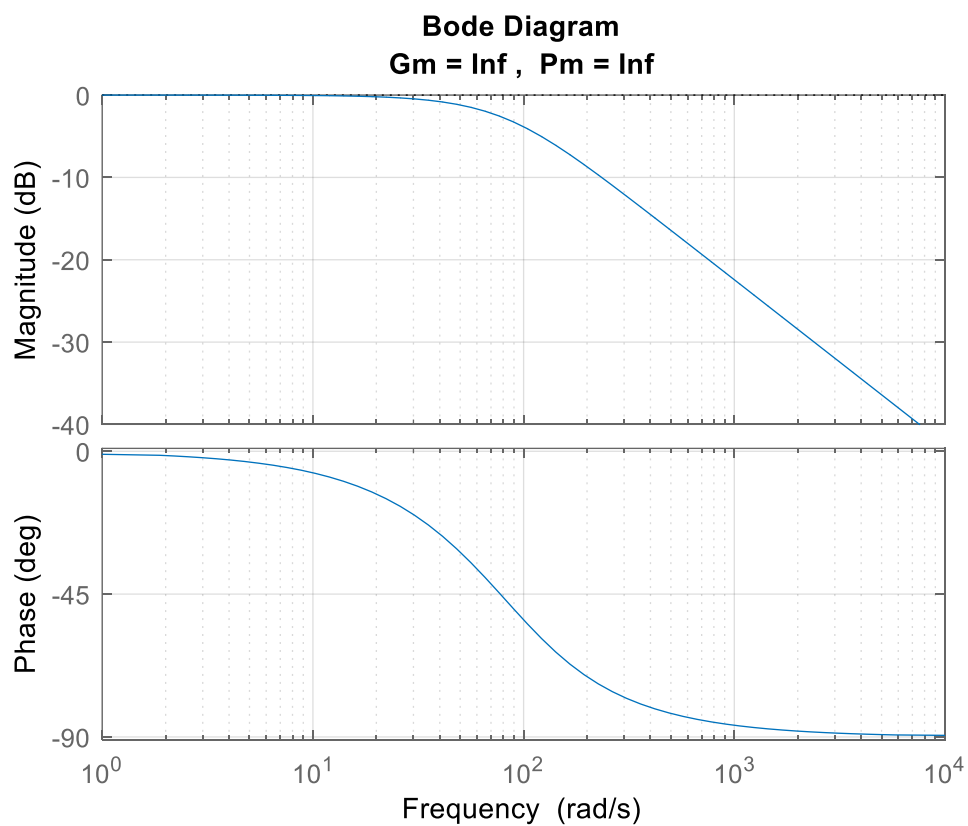


Рисунок 4.9 – Запасы устойчивости системы первого контура с PI-регулятором (CHR)

Проведем синтез типового регулятора для системы второго контура управления, и занесем найденные параметры регулятора в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры PI-регулятора методом CHR (2 контур)

| Тип регулятора | $k_P$                   | $T_I = 1/I$                                      |
|----------------|-------------------------|--------------------------------------------------|
| PI             | $0.6 \frac{T}{k_L} = 6$ | $T_I = 1L = 0.01$<br>$k_I = \frac{1}{T_I} = 100$ |

Запишем закон управления PI-регулятора для системы второго контура управления следующим образом

$$u(t) = 6 \left( e(t) + 100 \int_0^t e(t) dt \right) \quad (4.4)$$

Основываясь на полученных параметрах типового регулятора методом CHR, промоделируем систему с PI-регулятором (рисунок 4.10).

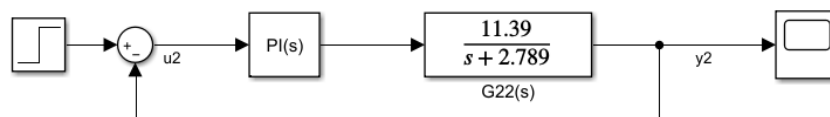


Рисунок 4.10 – Схема моделирования системы второго контура с PI-регулятором (CHR)

Результаты моделирования продемонстрированы на рисунке 4.11, оценки качества полученной системы приведены на рисунках 4.12, 4.13.

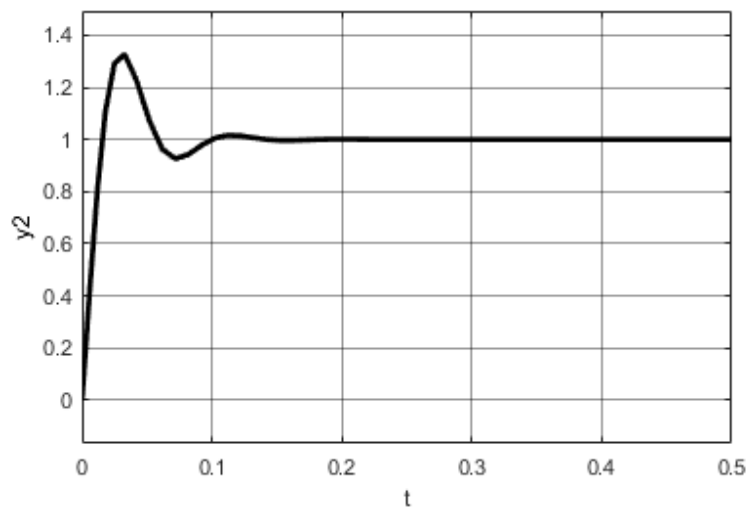


Рисунок 4.11 – Переходной процесс системы второго контура с PI-регулятором (CHR)

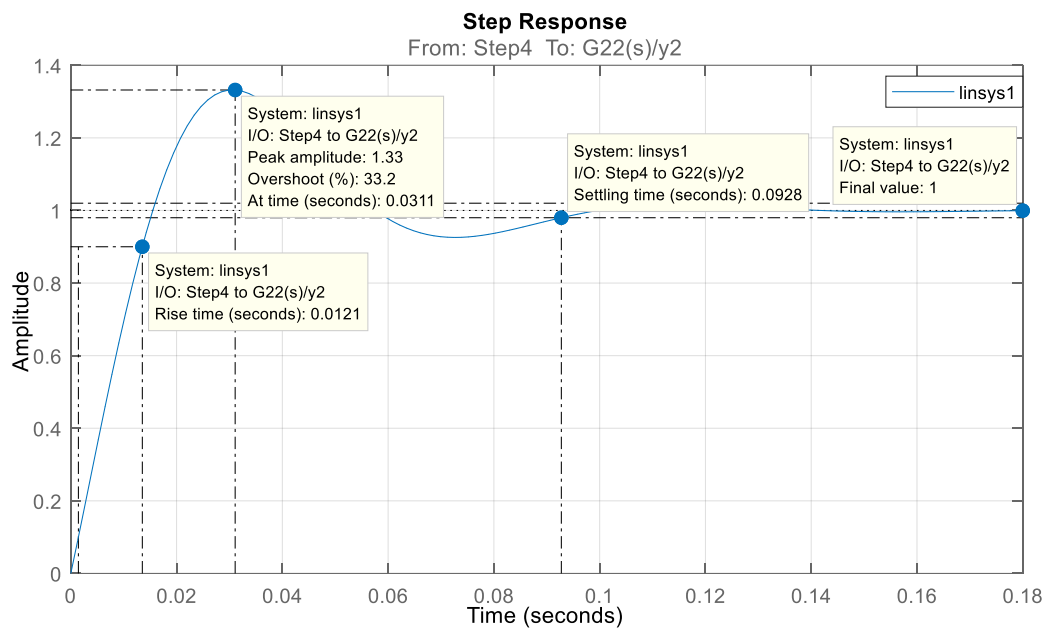


Рисунок 4.12 – Оценки качества системы второго контура с PI-регулятором (CHR)

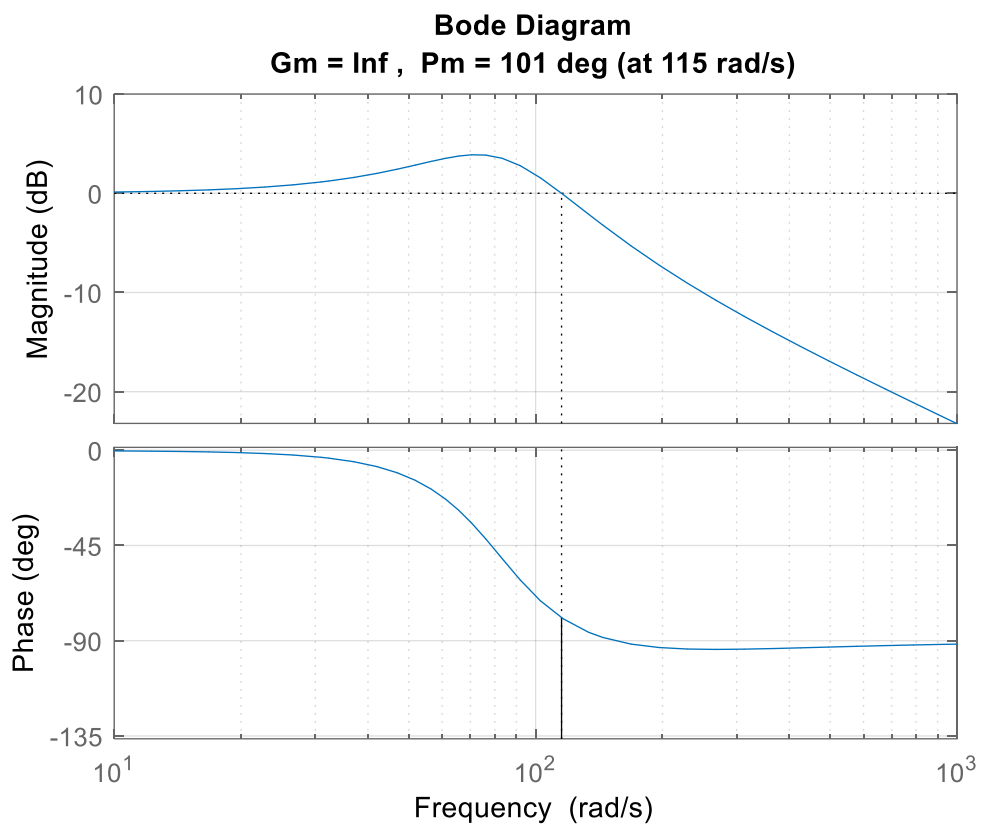


Рисунок 4.13 – Запасы устойчивости системы второго контура с PI-регулятором (CHR)

Для сравнения регулятора, полученного с использованием метода CHR, рассмотрим систему с регулятором, настроенным по другому эмпирическому методу – Циглера-Никольса №1 (ZN1). Поскольку алгоритм данного подхода во многом аналогичен методике Чина-Хронеса-Ресвика, выполним расчет параметров PI-регулятора и представим полученные значения в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры PI-регулятора методом ZN1 (1 и 2 контуры)

| Тип регулятора         | $k_P$                      | $T_I = 1/I$                                                 |
|------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| PI для первого контура | $0.9 \frac{T}{kL} = 11.25$ | $T_I = \frac{L}{0.3} = 0.067$<br>$k_I = \frac{1}{T_I} = 15$ |
| PI для второго контура | $0.9 \frac{T}{kL} = 9$     | $T_I = \frac{L}{0.3} = 0.033$<br>$k_I = \frac{1}{T_I} = 30$ |

Закон управления PI-регулятора, синтезированного методом Циглера-Никольса №1, для системы первого канала выглядит следующим образом

$$u(t) = 11.25 \left( e(t) + 15 \int_0^t e(t) dt \right) \quad (4.5)$$

Закон управления PI-регулятора, полученного методом Циглера-Никольса №1, для системы второго канала распишем следующим образом

$$u(t) = 9 \left( e(t) + 30 \int_0^t e(t) dt \right) \quad (4.6)$$

Промоделировав системы первого и второго канала с PI-регулятором методом Циглера-Никольса №1 (рисунки 4.14, 4.15), найдем оценки качества полученных моделей (рисунки 4.16, 4.17, 4.18, 4.19).

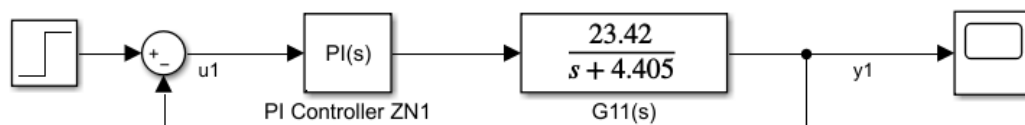


Рисунок 4.14 – Схема моделирования системы первого контура с PI-регулятором (ZN1)

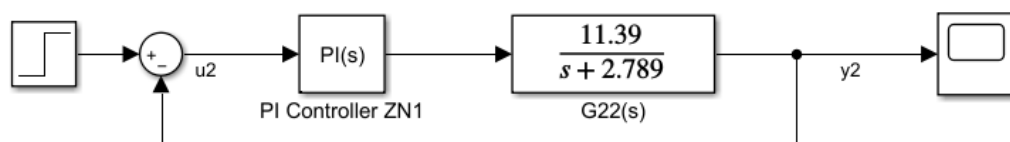


Рисунок 4.15 – Схема моделирования системы второго контура с PI-регулятором (ZN1)

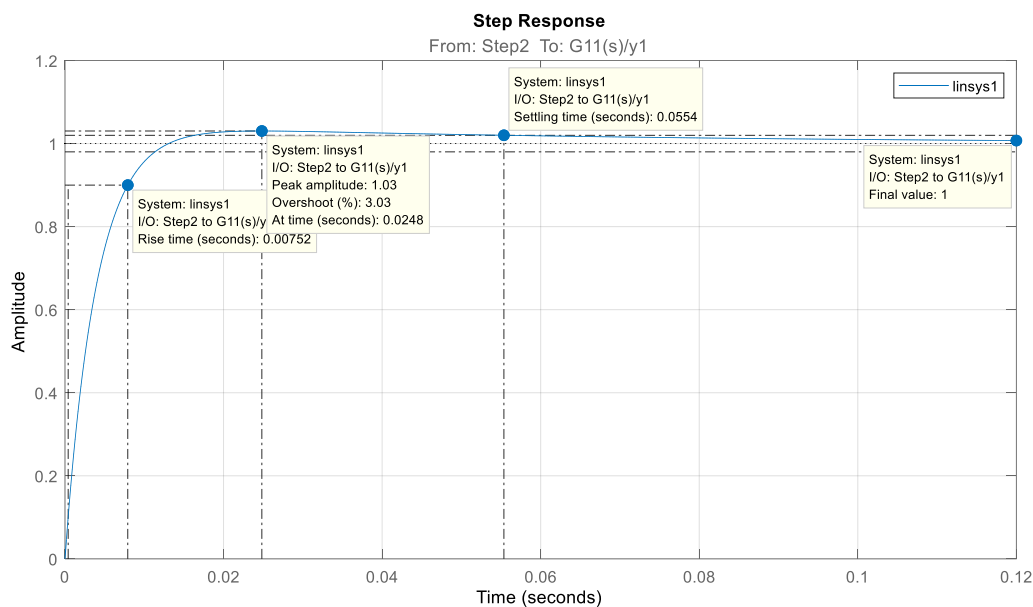


Рисунок 4.16 – Переходной процесс с оценками качества системы первого канала с PI-регулятором (ZN1)

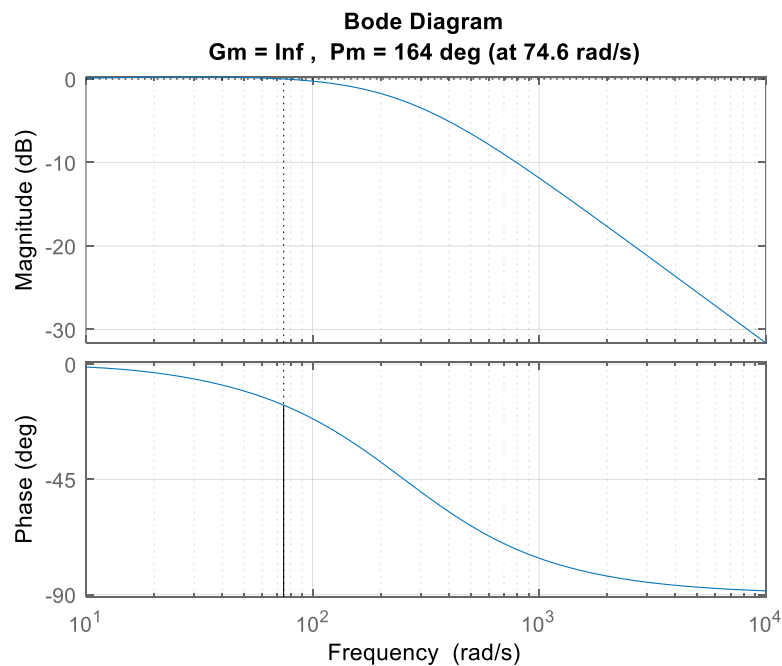


Рисунок 4.17 – Запасы устойчивости системы первого канала с PI-регулятором (ZN1)

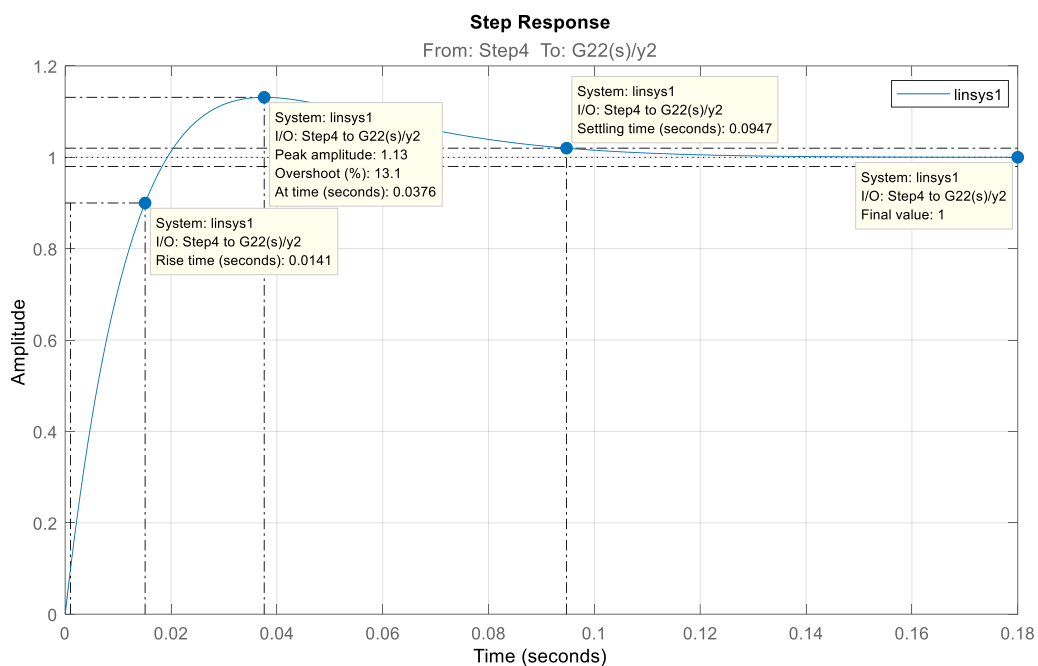


Рисунок 4.18 – Переходной процесс с оценками качества системы второго канала с PI-регулятором (ZN1)

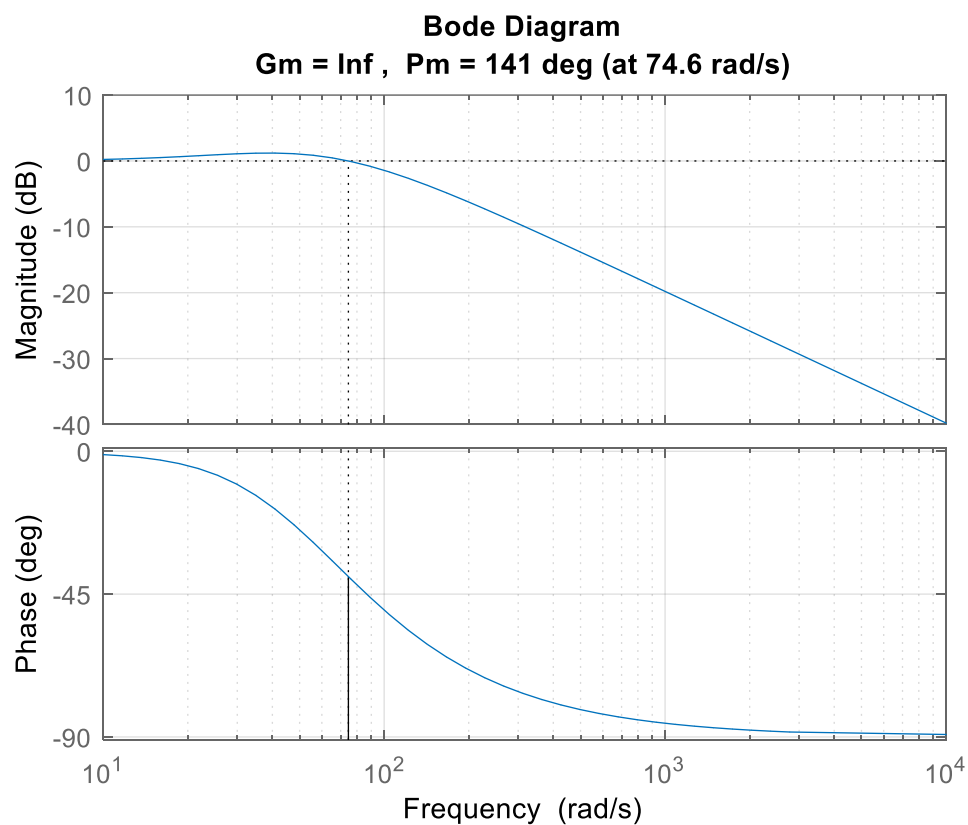


Рисунок 4.19 – Запасы устойчивости системы второго канала с PI-регулятором (ZN1)

Рассмотрим оценки качества системы первого и второго контуров управления без регулятора и с PI-регулятором (таблицы 4.4, 4.5), также запасы устойчивости (таблицы 4.6, 4.7).

Таблица 4.4 – Оценки качества системы первого контура управления без регулятора и с PI-регулятором

| № | Оценки качества       |           | Канал №1 | Метод CHR | Метод ZN1 |
|---|-----------------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 1 | Время регулирования   | $T_{set}$ | 0.141    | 0.0562    | 0.0554    |
| 2 | Перерегулирование     | $P_{ov}$  | 0%       | 13%       | 3.03%     |
| 3 | Колебательность       | $\mu$     | –        | 1         | –         |
| 4 | Установившаяся ошибка | $e_{ss}$  | 0.158    | 0         | 0         |
| 5 | Время нарастания      | $T_R$     | 0.079    | 0.00827   | 0.00752   |

Таблица 4.5 – Оценки качества системы второго контура управления без регулятора и с PI-регулятором

| № | Оценки качества       |           | Канал №2 | Метод CHR | Метод ZN1 |
|---|-----------------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 1 | Время регулирования   | $T_{set}$ | 0.276    | 0.0928    | 0.0947    |
| 2 | Перерегулирование     | $P_{ov}$  | 0%       | 33.2%     | 13.1%     |
| 3 | Колебательность       | $\mu$     | –        | 1         | –         |
| 4 | Установившаяся ошибка | $e_{ss}$  | 0.197    | 0         | 0         |
| 5 | Время нарастания      | $T_R$     | 0.155    | 0.0121    | 0.0141    |

Таблица 4.6 – Запасы устойчивости системы первого контура управления без регулятора и с PI-регулятором

| № | Запасы устойчивости | Первый контур управления | Метод CHR | Метод ZN1 |
|---|---------------------|--------------------------|-----------|-----------|
| 1 | $G_m$               | inf                      | inf       | inf       |
| 2 | $P_m$               | inf                      | inf       | 164 °     |

Таблица 4.7 – Запасы устойчивости системы второго контура управления без регулятора и с PI-регулятором

| № | Запасы устойчивости | Второй контур управления | Метод CHR | Метод ZN1 |
|---|---------------------|--------------------------|-----------|-----------|
| 1 | $G_m$               | inf                      | inf       | inf       |
| 2 | $P_m$               | inf                      | 101 °     | 141 °     |

В исходном виде, без применения регулятора, первый контур управления системы характеризуется временем регулирования 0.141 секунда, что указывает на достаточно высокую скорость реакции на входное воздействие. Однако установившаяся ошибка 0.158 свидетельствует о том, что система не достигает заданного уровня в установившемся режиме, что негативно сказывается на точности регулирования. Перерегулирование и колебательность отсутствуют, что указывает на слабое демпфирование.

Внедрение PI-регулятора, настроенного по методу Чина-Хронеса-Ресвика, приводит к полному устранению установившейся ошибки, что существенно повышает точность регулирования. При этом возникает незначительное перерегулирование (2.07 процентов) и увеличивается колебательность, что может вызывать колебания во временном отклике. Время регулирования сокращается до 0.0562 секунды, демонстрируя значительное улучшение быстродействия. Запасы устойчивости по фазе и амплитуде остаются на высоком уровне, обеспечивая надёжность функционирования системы. При использовании метода Циглера–Никольса №1 также наблюдается устранение установившейся ошибки, при этом перерегулирование (2.06 процентов) остаётся на уровне CHR, но время регулирования (0.0554 секунды) несколько меньше, что указывает на более быстрое реагирование. Колебательность отсутствует, обеспечивая плавность и устойчивость отклика. Запасы устойчивости по фазе также превышают рекомендуемые минимумы, что гарантирует надёжную работу системы.

Для второго контура управления без регулятора время регулирования составляет 0.276 секунды, а установившаяся ошибка – 0.501. Это говорит о том, что при отсутствии регулятора система имеет умеренное быстродействие, но низкую точность. Применение PI-регулятора, настроенного по методу CHR, полностью устраняет установившуюся ошибку, время регулирования сокращается до 0.0726 секунды, а время нарастания – до 0.0121 секунды, что значительно повышает быстродействие. Однако возникает перерегулирование (33.2 процентов) и колебательность, что требует внимания при анализе динамики. При этом запасы устойчивости остаются высокими, что гарантирует устойчивую работу системы. Использование метода ZN1 для второго контура также позволяет полностью устранить установившуюся ошибку, время регулирования составляет 0.0754 секунды, а время нарастания – 0.014 секунды. Перерегулирование (13.7 процентов) значительно ниже, чем у CHR, и отсутствует колебательность. Запасы устойчивости по фазе остаются высокими, обеспечивая надёжность при эксплуатации.

Оба метода настройки PI-регуляторов демонстрируют высокие показатели повышения точности и быстродействия системы управления процессом гидроочистки бензина, при этом метод ZN1 обеспечивает более плавный отклик с меньшим перерегулированием и более высокими запасами устойчивости, что предпочтительно для промышленных условий эксплуатации.

Для глубокого анализа и повышения качества управления рассмотрено поведение многоканальной системы со взаимосвязями с применением синтезированных типовых регуляторов (рисунок 4.20) и представлены переходные характеристики (рисунок 4.21).

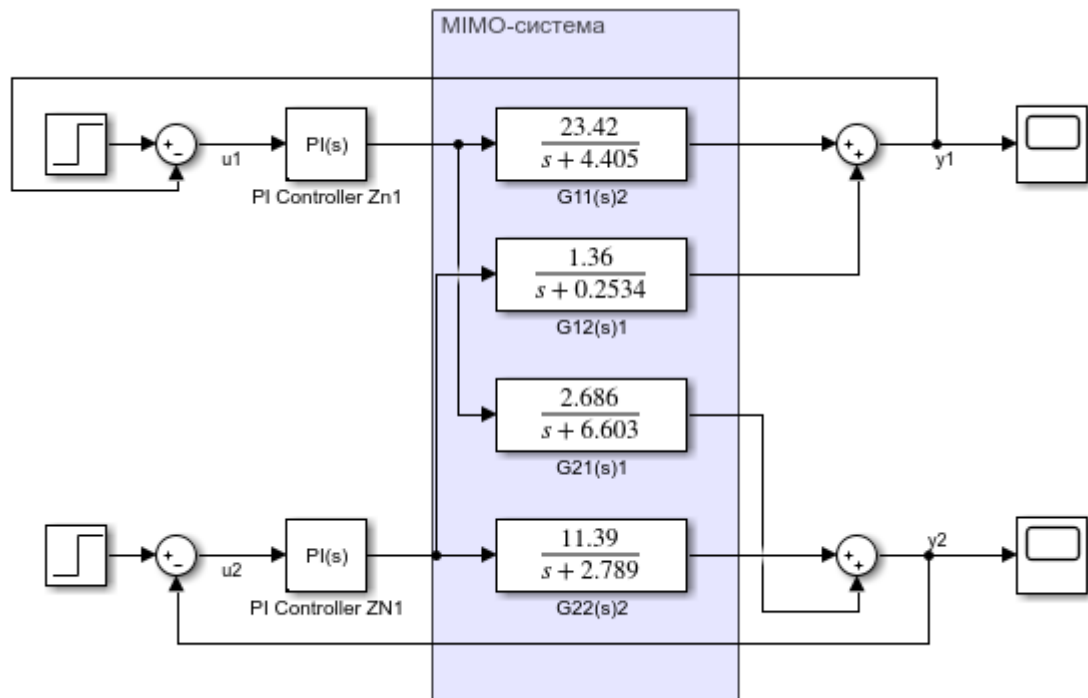


Рисунок 4.20 – Схема моделирования ММО-системы с PI-регуляторами

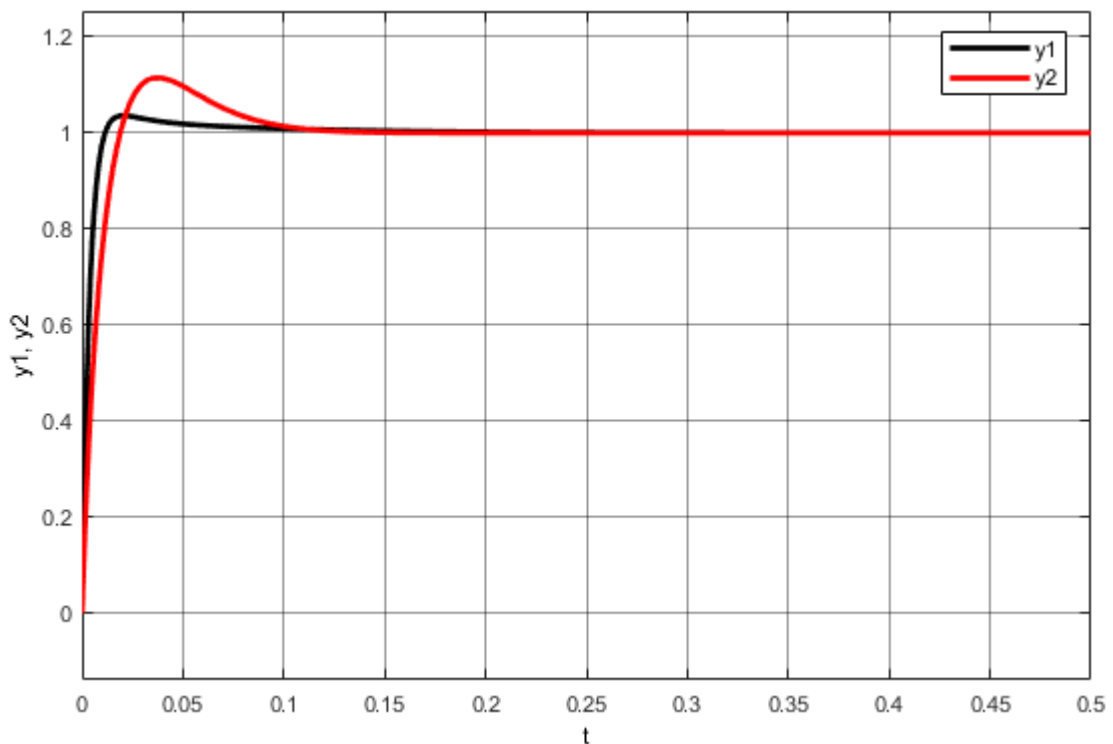


Рисунок 4.21 – Переходные процессы ММО-системы с PI-регуляторами

На представленной схеме (рисунок 4.21) благодаря PI-регуляторам удалось устранить установившуюся ошибку и добиться высокой точности регулирования: выходные сигналы  $u_1$  и  $u_2$  точно достигают заданной уставки в установившемся режиме. Однако влияние взаимосвязей между каналами проявляется в разном характере переходных процессов – это заметно в различии времени нарастания и перерегулирования. Тем не менее, применение PI-регуляторов позволило компенсировать эти взаимосвязи частично, обеспечив приемлемое качество регулирования. Для дальнейшего повышения качества, устранения перерегулирования и различий между выходами требуется разработка развязывающего устройства, который позволит минимизировать перекрестные влияния между каналами и достичь более сбалансированных и быстрых переходных процессов.

В многосвязных системах управления технологическими процессами существует проблема взаимного влияния контуров управления. Например, расход топлива в печь напрямую влияет на температуру первого слоя катализатора, а подача водородосодержащего газа оказывает влияние на температуру во втором слое реактора. Однако в реальных условиях оба эти канала также оказывают перекрёстное влияние друг на друга: изменение расхода газа может косвенно сказаться на температуре первого слоя, а изменение подачи тепла – на распределении температуры по всей высоте реактора. Такие перекрёстные связи создают сложности при проектировании системы управления и могут приводить к нежелательным колебаниям или ухудшению качества регулирования.

Для устранения этих перекрёстных воздействий используется метод развязки (рисунок 4.22), одним из таких является метод статического диагонального упрощения.

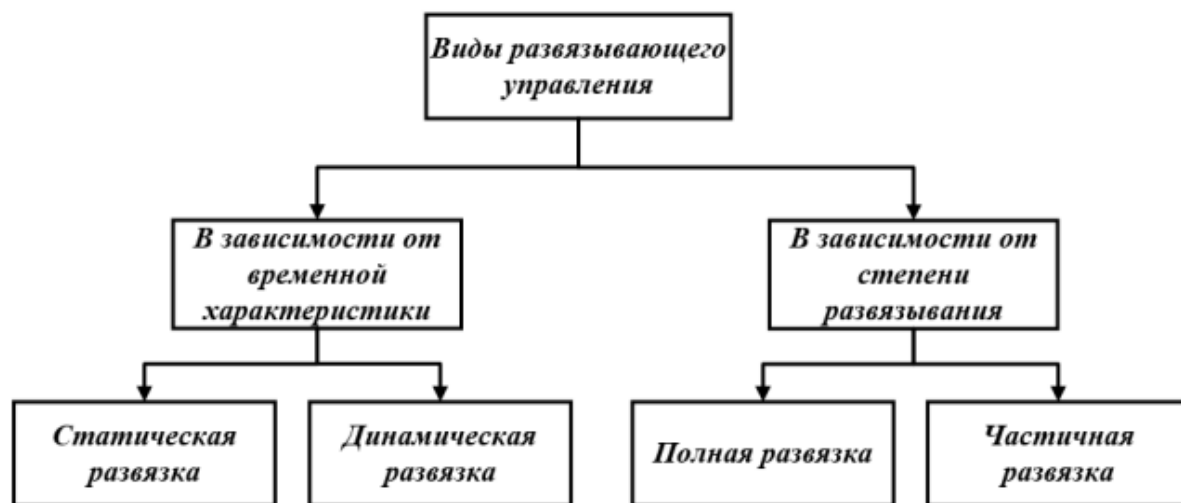


Рисунок 4.22 – Классификация развязывающего управления

Суть данного подхода заключается в том, чтобы путём преобразования входных сигналов сформировать такую систему управления, в которой каждый канал можно было бы рассматривать как независимый. Это достигается посредством умножения матрицы передаточных функций объекта управления  $G(s)$  на специальную диагональную развязывающую матрицу  $D(s)$ . В результате формируется новая матрица, обладающая диагональным видом, где каждый выход зависит только от одного соответствующего входа.

Для синтеза развязывающего управления необходимо определить развязывающую матрицу  $D(s)$  согласно формуле

$$F(s) = D(s) \cdot G(s) \quad (4.7)$$

Для получения развязывающей матрицы  $D(s)$  с постоянными коэффициентами применяют метод статического диагонального упрощения. В этом подходе элементы матрицы  $D(s)$  выбираются как величины, обратные статическим коэффициентам (то есть значениям при  $s=0$ ) диагональных элементов матрицы передаточных функций объекта  $G(s)$ .

Опираясь на данный метод, были получены элементы развязывающей матрицы  $D(s)$  с использованием статического диагонального упрощения, а также сформирована сама матрица развязывающего элемента  $D(s)$ , построенная на основе вычисленных коэффициентов развязки по формуле

$$D(s) = \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.25 & 0 \\ 0 & 0.99 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Элементы  $D_{12}(s)$  и  $D_{21}(s)$  развязывающей матрицы  $D(s)$  равны нулю, следовательно, матрица развязывающего элемента, структурная схема которой представлена на рисунке 4.23, упрощает многосвязный объект управления реактор гидроочистки бензина до диагональной формы и способствует обеспечению независимого управления каждым контуром.

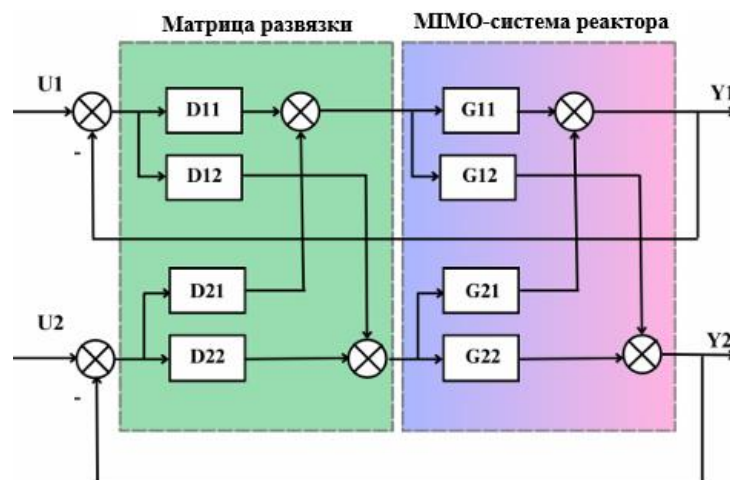


Рисунок 4.23 – Структурная схема развязывающего управления реактором

Промоделируем исходную сложную систему с учетом использования синтезированных PI-регуляторов и развязывающего устройства (рисунок 4.24), результаты моделирования представлены на рисунке 4.25.

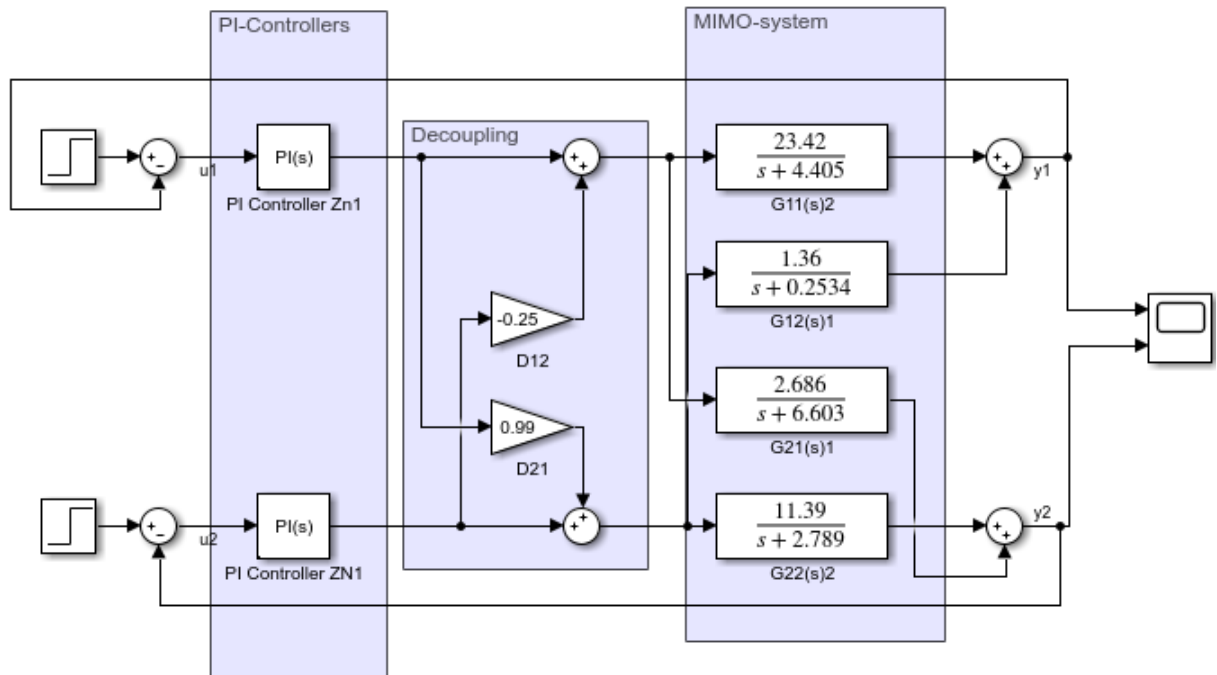


Рисунок 4.24 – Схема моделирования процессов с регуляторами и развязыванием

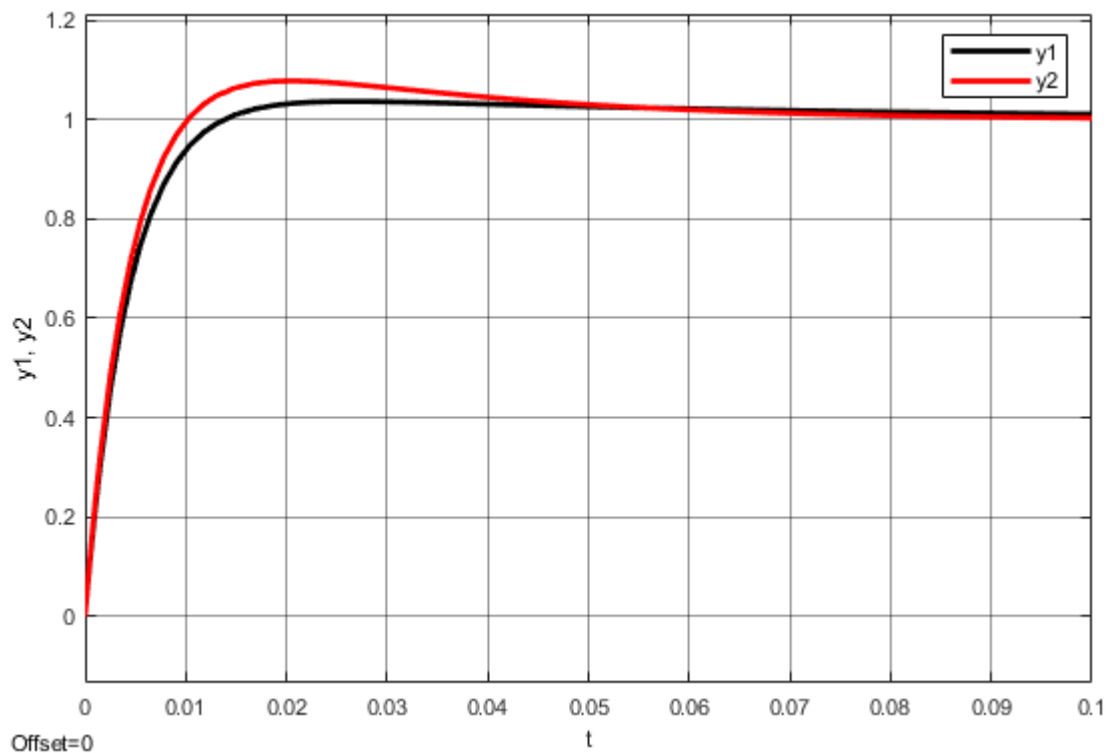


Рисунок 4.25 – Переходные процессы сложной системы с регуляторами и развязыванием

Анализируя переходные процессы сложной системы с регуляторами и развязывающим устройством (рисунок 4.25), можно сделать несколько ключевых выводов. На графиках представлены отклики выходных сигналов на единичное ступенчатое воздействие, что позволяет оценить быстродействие и точность системы при наличии развязывания.

Сначала наблюдается достаточно быстрое возрастание выходных сигналов, что свидетельствует о хорошем быстродействии системы. Временные задержки и инерционность минимальны: система реагирует на входное воздействие с малым запаздыванием. Далее выходные сигналы демонстрируют плавное приближение к установившемуся значению без значительного перерегулирования, что указывает на эффективную компенсацию взаимосвязей между каналами.

Особо важно отметить небольшую разницу в динамике каналов. Канал  $y_2$  имеет немного более выраженный пик перерегулирования по сравнению с  $y_1$ , однако амплитуда этого перерегулирования остаётся в допустимых пределах, что не оказывает существенного влияния на устойчивость и точность системы.

Наличие развязывающего устройства позволяет минимизировать перекрёстные влияния между каналами, что отражается в синхронности их установления к заданному уровню. Отсутствие значительных колебаний в установившемся режиме свидетельствует о хорошем демпфировании и стабильности системы.

Можно заключить, что синтезированные регуляторы в сочетании с развязывающим устройством позволяют эффективно устранить взаимосвязи, обеспечивая высокое качество регулирования многомерной системы. Быстродействие, точность и устойчивость системы находятся на хорошем уровне, что подтверждает эффективность разработанного метода управления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертации можно отметить, что поставленная цель – разработка системы усовершенствованного управления технологическим процессом гидроочистки бензина – была успешно достигнута. В рамках работы был проведен всесторонний анализ объекта управления, построена его математическая модель, которая легла в основу для последующего синтеза системы управления.

Ключевой задачей исследования являлся синтез предиктивного контроллера, что позволило эффективно учесть динамику процесса и обеспечить высокую точность регулирования технологических параметров. Проведённый анализ переходных процессов подтвердил значительное улучшение динамических характеристик системы, включая снижение времени перерегулирования и повышение устойчивости. Предиктивный контроллер продемонстрировал способность гибко адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать качественное управление сложной многомерной системой. Существенное внимание было уделено влиянию взаимосвязей между каналами управления, характерных для многомерной системы. Для компенсации этих взаимосвязей было реализовано развязывающее устройство, что позволило минимизировать перекрестные влияния между управляющими контурами. Это обеспечило более согласованное управление процессом и позволило добиться высокой степени устойчивости системы.

Полученные результаты открывают перспективы для дальнейшего совершенствования процессов гидроочистки бензина с точки зрения энергосбережения, повышения производительности и качества конечной продукции. Разработанный подход может быть использован в других сложных технологических процессах нефтеперерабатывающей промышленности, требующих высокой точности и адаптивности управления.

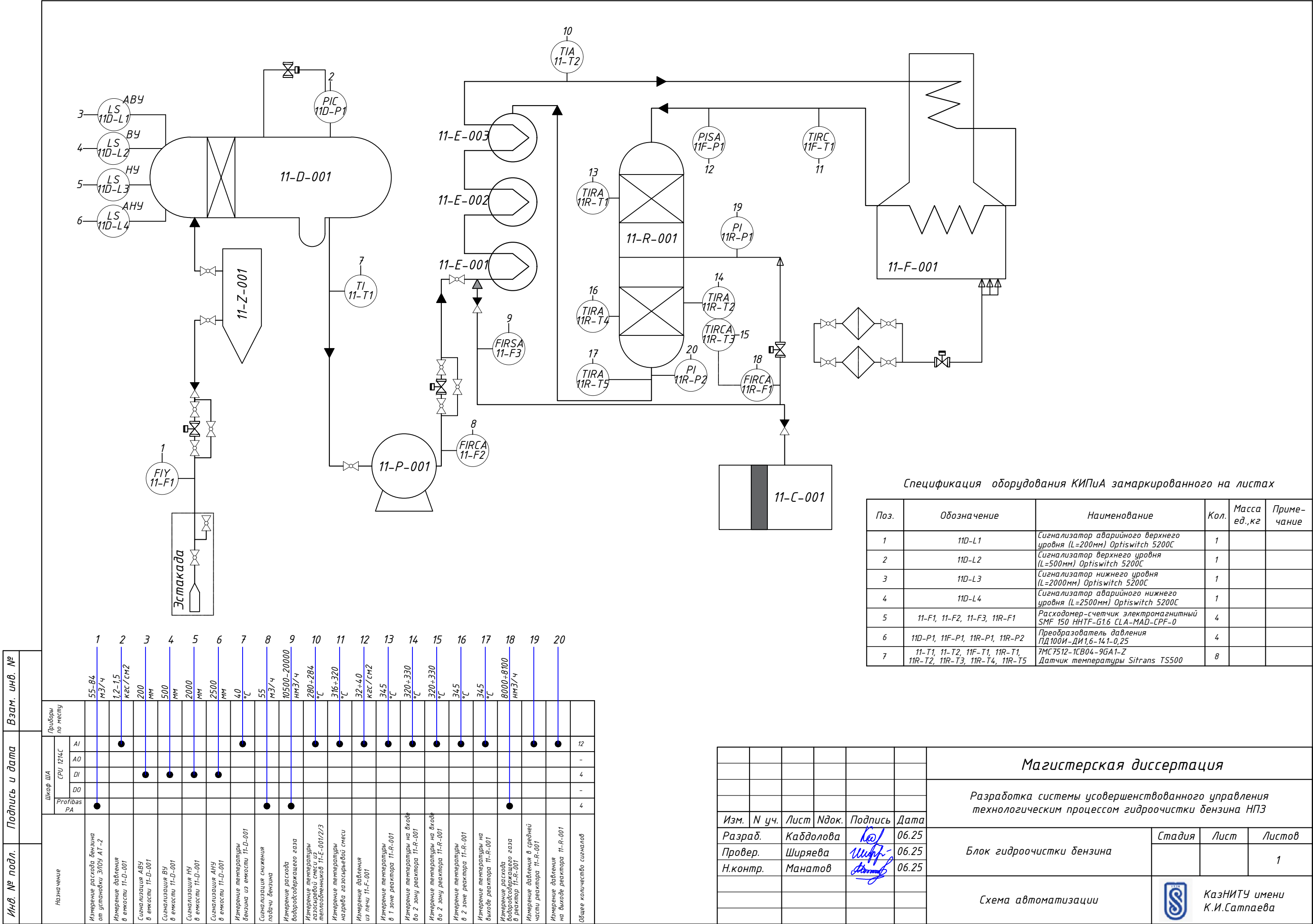
В заключение, данная работа внесла существенный вклад в развитие технологий усовершенствованного управления в отрасли, а результаты исследования могут послужить основой для последующих практических внедрений и научных разработок.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Мукатдисов Р. Ч. Применение системы усовершенствованного управления технологическим процессом подготовки газа к транспорту // Научный журнал «Газовая промышленность». – Оренбург, 2019. – № 8(788).
- 2 Торгашов А. Ю., Гончаров А. А., Самотылова С. А. Современные методы построения систем усовершенствованного управления технологическими процессами // Научный и общественно-политический журнал «Вестник ДВО РАН», 2016. – № 4.
- 3 Дозорцев В. М., Кнеллер Д. В. APC – усовершенствованное управление технологическими процессами // Журнал «Датчики и системы», 2005. – №10. – С.56-62.
- 4 Торгашов А. Ю., Гончаров А. А., Самотылова С. А. Современные методы построения систем усовершенствованного управления технологическими процессами // Научный и общественно-политический журнал «Вестник ДВО РАН», 2016. – № 4.
- 5 Технологический регламент комбинированной установки гидроочистки и изомеризации бензина ППНГО, 2019.
- 6 Паршаков С. И. Основы управления техническими процессами и системами: учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство Урал. ун-та, 2017. – 148 с.
- 7 Ушева Н. В. Математическое моделирование химико-технологических процессов: учебное пособие. – Томск: Издательство Томск. политехн. инс, 2014. – 135 с.
- 8 Ким Д. П. Теория Автоматического Управления. – 2-е изд., испр. и доп. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – С. 90-92.
- 9 Малафеев С. И., Малафеева А. А. Основы автоматики и системы автоматического управления: учебник для студ. высш. учеб. Заведений. – М: Издательский центр «Академия», 2010. – 384 с.
- 10 Corripio A. B., Newell M. Tuning of Industrial Control Systems. — 3rd ed. – Research Triangle Park, NC: International Society of Automation (ISA), 2015. – 300 p.

## **Приложение А**

### **Развернутая схема автоматизации**



## Приложение Б

Статья «Satbayev International Conference» 2024 г.



Satbayev International Conference

Volume 24 (2024), Issue 1, 939-945

<https://doi.org/10.51301/SIC.2024.11.128>

### Development of an advanced control system for the technological process of gasoline hydrotreatment at the refinery

I. Kabdolova\*, O. Shiryayeva

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

\*Corresponding author: [inkar.kabdolova@stud.satbayev.university](mailto:inkar.kabdolova@stud.satbayev.university)

**Abstract.** This work is devoted to the development of an advanced control system for the technological process of gasoline hydrotreating at an oil refinery. The paper examines the current state of the technological process of gasoline hydrotreating at oil refineries and analyzes existing control systems. The development of modern process control systems for gasoline hydrotreating includes the analysis of current control methods, modeling of the hydrotreating process, as well as the development of optimal control algorithms, such as predictive control methods. The intended benefits of the advanced management system include increased process productivity, reduced energy consumption and reduced environmental impact. The results of this study can be applied to improve the production processes of oil refineries and ensure their competitiveness in the market. Gasoline hydrotreating process control systems at refineries play a key role in ensuring efficient and safe operation of the production stage. Gasoline hydrotreating is a complex technological process aimed at removing soot, sulfur, aromatic hydrocarbons and other impurities from raw materials in order to improve its quality and compliance with environmental safety standards. The developed control system includes various components and subsystems, each of which performs certain functions. They provide control over temperature, pressure, reagent flow and other process parameters, which allows maintaining optimal conditions for hydrotreating reactions. Thus, the control systems for the technological process of gasoline hydrotreating at refineries are an integral part of modern production of petroleum products, ensuring its safety, efficiency and compliance with high quality standards.

**Keywords:** gasoline hydrotreating process, gasoline separation, gasoline stabilization, advanced control, control system, predictive control.

#### 1. Введение

В настоящее время нефтеперерабатывающие заводы сталкиваются с рядом технических и экологических проблем, связанных с процессом гидроочистки бензина. Для эффективного управления этим процессом требуется разработка и внедрение новой системы, способной улучшить качество и эффективность производства при соблюдении экологических стандартов. В этом контексте целью данного исследования является разработка системы усовершенствованного управления технологическим процессом гидроочистки бензина на НПЗ для повышения качественных показателей продукции и снижения энергетических затрат на производство высококачественного бензина, что представляет собой важную задачу в области нефтегазовой промышленности.

## Приложение В

### Статья «XVI ТОРАЙГЫРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» 2024 г.

- 2 Шабалин А. Ф. Обратное водоснабжение промышленных предприятий. – М., Стройиздат, 2006. – 296 с.
- 3 Алфёрова А. А., Нечаев А. П. Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий, комплексов и районов. – М.: Стройиздат, 2007. – 315с.
- 4 Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 238 с.
- 5 Сипайлов В. А., Букреев В. Г., Сипайлова Н. Ю. Способы повышения энергоэффективности установок электроцентробежных насосов добычи нефти // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – Казань. – 2008. – №7-8/1 – С. 31-41.
- 6 Киянов Н. В. От электромонтажных работ до систем комплексной автоматизации // Новости приводной техники. – 2006. – № 12. – С. 1.
- 7 Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И. Градирии промышленных и энергетических предприятий: Справ. Пособие – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
- 8 Крюков О. В. Микропроцессорное управление машинами двойного питания: Учеб. пособие / Нижегород. гос. тех.ун-т. Н. Новгород. – 1999. – 118 с
- 9 Крюков О.В. Автоматизированная система энергосберегающего управления водооборотными системами с градириями// Газовая промышленность. – 2011. – №8. – С. 90-94.
- 10 Крюков О. В., Хлынин А. С., Принципы инвариантных систем автоматического управления электроприводами турбокомпрессоров // Научный альманах – 2015 – №1(3). – С.126-136.

#### **РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ГИДРООЧИСТКИ БЕНЗИНА НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ**

КАБДОЛОВА І. Н.  
магистрант, КазНИТУ им. К. И. Сатпаева, г. Алматы  
ШИРЯЕВА О. И.

к.т.н., ассоц. профессор, КазНИТУ имени К. И. Сатпаева, г. Алматы

Актуальность разработки усовершенствованной системы управления технологическим процессом гидроочистки бензина на нефтеперерабатывающем заводе обусловлена несколькими важными

факторами. Во-первых, растущий спрос на высококачественные нефтепродукты и ужесточение экологических норм требуют совершенствования существующих технологий переработки нефти, чтобы обеспечить соответствие продукции современным требованиям качества и экологической безопасности. Гидроочистка бензина является ключевым процессом на НПЗ, который направлен на удаление серы и других вредных примесей, что способствует снижению выбросов вредных веществ в атмосферу и повышению эксплуатационных характеристик топлива.

Во-вторых, современные нефтеперерабатывающие предприятия сталкиваются с необходимостью повышения энергоэффективности и снижения затрат на производство. В условиях ограниченных ресурсов и роста цен на энергоносители оптимизация технологических процессов становится важнейшей задачей для улучшения экономической эффективности производства. Разработка усовершенствованной системы управления технологическим процессом гидроочистки бензина позволит не только повысить качество продукта, но и сократить затраты на производство за счет более точного контроля параметров процесса и снижения энергопотребления.

Кроме того, внедрение такой системы способно повысить надежность и безопасность работы оборудования, что также является важным аспектом для обеспечения стабильности производственных процессов и предотвращения аварийных ситуаций. Таким образом, усовершенствование управления процессом гидроочистки бензина отвечает актуальным вызовам отрасли и имеет значительное практическое значение для повышения эффективности, экологичности и безопасности работы нефтеперерабатывающих заводов.

Очистка различных бензиновых фракций на заводе от органических соединений, содержащих серу, кислород, азот и металлы, которые являются отравляющими веществами для катализаторов в процессах риформинга и изомеризации, осуществляется посредством их разложения с преобразованием в углеводороды, сероводород, воду и аммиак [1].

Этот процесс проводится методом гидрирования на алюмокобальтмолибденовом катализаторе при повышенном давлении 32–35 кгс/см<sup>2</sup> и температуре не выше 345°С, с использованием избытка водорода. Количество водорода по

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Қабдолова Іңкәр Нұрлыбекқызы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Магистерская диссертация

**Название работы:** Разработка системы усовершенствованного управления технологическим процессом гидроочистки бензина НПЗ

**Научный руководитель:** Ольга Ширяева

**Коэффициент Подобия 1:** 5.5

**Коэффициент Подобия 2:** 2

**Микропробелы:** 11

**Знаки из других алфавитов:** 10

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата



Заведующий кафедрой

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Қабдолова Іңкәр Нұрлыбекқызы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Магистерская диссертация

**Название работы:** Разработка системы усовершенствованного управления технологическим процессом гидроочистки бензина НПЗ

**Научный руководитель:** Ольга Ширяева

**Коэффициент Подобия 1:** 5.5

**Коэффициент Подобия 2:** 2

**Микропробелы:** 11

**Знаки из других алфавитов:** 10

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата

10.06.2025г.

*Ширяева*

проверяющий эксперт

**ОТЗЫВ  
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на магистерскую диссертацию  
Қабдолова Іңкәр Нұрлыбекқызы  
7М07101 – Автоматизация и роботизация

Тема: «Разработка системы усовершенствованного управления  
технологическим процессом гидроочистки бензина НПЗ»

Перед магистрантом ставилась задача разработки системы усовершенствованного управления технологическим процессом гидроочистки бензина НПЗ.

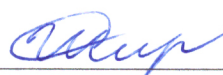
В ходе выполнения магистерской диссертации был изучен технологический процесс гидроочистки бензина. Были собраны материалы, на основе которых была разработана функциональная схема автоматизации объекта исследования.

Для разработанной системы управления была получена математическая модель сложной системы управления реактором путем структурной и параметрической идентификации с помощью инструментария MatLAB Identification Toolbox в операторной форме и в пространстве состояний. Проведя анализ оценок качества полученной системы, был разработан многомерный модальный регулятор, также синтезирован модельно-предиктивный МРС-контроллер. Была разработана развязывающая система управления для устранения перекрёстных связей между каналами. Получены сравнительные характеристики до и после введения развязывающего устройства.

В процессе работы автор диссертации показал себя дисциплинированным, исполнительным и трудолюбивым с высоким уровнем теоретической подготовки.

Заключение: Считаю, что магистрант справился с поставленной задачей, магистерская диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям по специальности 7М07101 – Автоматизация и роботизация. На основании характеристики выполненных исследований, уровня и качества выполненных результатов, магистрант Қабдолова Іңкәр Нұрлыбекқызы допускается к защите.

**Научный руководитель**  
ассоциированный профессор, канд.техн.наук

 Ширяева О. И.

«16» июня 2025 г.

## РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию  
Қабдоловой Іңкәр Нұрлыбекқызы  
7М07101 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка системы усовершенствованного управления технологического процессом гидроочистки бензина НПЗ

Выполнено:

- а) презентация на 25 слайдах
- б) пояснительная записка на 70 страницах

## ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Диссертационная работа, представленная на рецензирование, посвящена актуальной теме разработке системы усовершенствованного управления технологического процессом гидроочистки бензина НПЗ. Диссертационная работа состоит из введения, заключения и четырех разделов.

В первом разделе проведен литературный обзор современных методов усовершенствованного управления. Особое внимание уделено архитектуре APC-систем и их роли в оптимизации производственных процессов.

Во втором разделе подробно описан технологический процесс установки гидроочистки бензина, вследствие чего была разработана функциональная схема автоматизации объекта исследования, приведено описание реактора как многомерного и многосвязного объекта управления.

В третьем разделе получена математическая модель объекта с несколькими входами и выходами (ММО-система) путем структурной и параметрической идентификации использованием пакета MatLAB Identification Toolbox. Модель создана на основе экспериментальных данных. На основе полученной модели показан полный анализ системы, а именно выполнена проверка на устойчивость, управляемость и наблюдаемость системы, также определены прямые и косвенные оценки качества для выявления основных требований для регулятора.

Одной из особенностей работы является синтез модального регулятора и модельно-предиктивного контроллера (МРС) с учётом перекрёстных связей в системе. В работе выполнено моделирование переходных процессов, анализ устойчивости по ЛАЧХ и ЛФЧХ, определены запасы устойчивости, построена модель в пространстве состояний.

В четвертом разделе представлен алгоритм разработки развязывающей системы управления, позволившей устранить перекрёстные связи между каналами и повысить точность и стабильность регулирования. Даны сравнительные характеристики до и после введения развязывающего блока.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке и реализации комплексного подхода к управлению многомерным технологическим объектом, основанного на интеграции модального, усовершенствованного и развязывающего методов управления. Такое сочетание современных методов позволило обеспечить высокие показатели устойчивости, точности и динамической производительности системы управления, а также эффективно компенсировать перекрёстные связи между управляющими каналами.

Результаты работы были представлены на научных конференциях, а также опубликованы в научных сборниках.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
СӨТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Графический и текстовый материал оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ, предъявляемыми к оформлению учебных работ.

Данная магистерская диссертация отличается проработанностью, научно-исследовательский подход и полноту изложенного теоретического материала. Приведённые исследования доказывают отличную теоретическую подготовку магистранта.

**Оценка работы**

Учитывая вышеизложенное, считаю, что магистерская диссертация заслуживает оценки « 95 » ( отлично ), а магистрант Қабдолова Іңкәр Нұрлыбекқызы присвоения академической степени магистра технических наук по специальности 7М07101 – Автоматизация и роботизация.

**Рецензент**

доцент, канд.техн.наук,

ведущий научный сотрудник РГП на ПВХ

«Институт информационных и вычислительных технологий»

КН МОН РК

Юничева Н. Р.

« 16 » июня 2025 г.





*PolyTech is the best!*



# СЕРТИФИКАТ

## Certificate

«SATBAYEV INTERNATIONAL CONFERENCE - 2024. INTEGRATION OF SCIENCE AND TECHNOLOGY:  
THE PATHWAY TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT»

жоғарғы деңгейлі  
on the topic

«Мұнай өнімдерін тасымалдауды басқару жүйелері саласында  
операторларды оқыту үшін тренажер кешендерін қолдану»  
«Development of an advanced control system for the technological process  
of gasoline hydrotreatment at the refinery»  
(І. Қабдолова, О. Ширяева)

атты мазмұнды баяндама ұсынғаны үшін беріледі  
for providing a high-level semantic report



*М.Бегентаев*

2024 ж.



# CERTIFICATE



Кабдолова Инкар Нурлыбеккызы  
Ширяева Ольга Ивановна

«XVI Торайгыров оқулары» атты Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциясы

Международная научно-практическая конференция «XVI Торайгыровские чтения»

The International Scientific and Practical Conference «16th Toraighyrov Readings»

конференцияға қатысқаны үшін | за участие в конференции | for participating in the conference

б.ғ.д., профессор,  
«Торайгыров университеті» КсАҚ  
Ғылым жұмыс және халықаралық  
ынтымақтастық жөніндегі  
Басқарма мүшесі-проректор



Н. Ермаков

№ 14209

2024  
Павлодар