

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления

Каракулов Талгат Навиоллович

Разработка системы автоматического регулирования котельного агрегата

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к дипломному проекту

Специальность 5В070200 – Автоматизация и управление

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой АиУ
канд. физ.-мат.наук, проф.
Алдияров Н.У.
«16» мая 2022 г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Разработка системы автоматического регулирования котельного агрегата»

по специальности: 5В070200 – Автоматизация и управление

Выполнил

Каракулов Т.Н.

Рецензент
канд. техн. наук, доц.
Юничева Н. Р.
(подпись)
«16» мая 2022 г.



Научный руководитель
канд. техн. наук, проф.
Ширяева О. И.
(подпись)
«12» мая 2022 г.

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления

5B070200 – Автоматизация и управление



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АиУ
канд. физ.-мат.наук, проф.

Алдияров Н.У.

«16» мая 2022 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Обучающемуся Каракулову Т.Н.

Тема: «Разработка системы автоматического регулирования котельного агрегата».

Утверждена приказом Ректора Университета № 489-П/Ө от "24" декабря 2021 г.

Срок сдачи законченной работы: "20" апреля 2022 г.

Исходные данные к дипломному проекту: руководство по эксплуатации и схемы автоматизации котла № 3, исходные данные для математической модели, данные с преддипломной практики.

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов или краткое содержание дипломного проекта: а) Описание технологических процессов в котельном агрегате на ГРЭС «Топар». б) Применение параметрических методов синтеза типового регулятора для САР котельного агрегата.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): функциональная схема автоматизации САР питания парового котла Е-250-9,8-545 КТ, принципиальная схема САР уровня воды в барабане котла.




Рекомендуемая основная литература: Бойко Е.А. Паровые котлы. Учебное пособие, Красноярск: КГТУ, 2005. – 134 с.; Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп.– С-П.: «Профессия», 2004. – 752 с.

ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Описание технологического процесса.	Январь 2022 г.	
Процедуры анализа САУ	Февраль 2022 г.	
Процедуры синтеза САУ	Март 2022 г.	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект с указанием относящихся к ним разделов проекта

Наименования разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	канд.техн.наук, ассоц. профессор Ширяева О.И.	12.05.2022	
Специальный раздел	канд.техн.наук, ассоц. профессор Ширяева О.И.	12.05.2022	
Нормоконтролер	канд.техн.наук, ассистент профессор Сарсенбаев Н.С.	12.05.2022	

Научный руководитель



Ширяева О.И.

Задание принял к исполнению обучающийся



Каракулов Т.Н.

Дата

«5» января 2022 г

АҢДАТПА

Бұл дипломдық жоба "Топар" МАЭС қазандық агрегатын автоматты реттеу жүйесін әзірлеу міндетін қарастырылады.

Жоба қазандық агрегатының егжей-тегжейлі сипаттамасы, құрылымы, жұмыс істеу қағидасы және басқару қамтиды. №3 ҚА ТП АБЖ зерттеу барысында реттеу контуры таңдалды – оны іске қосу кезінде қазандық барабанындағы су деңгейін реттеу. Оны автоматтандыру схемасы құрастырылды. Контурдың қағидатты, функционалды және құрылымдық схемалары жасалды. ҚА АРЖ математикалық моделі құрылды. Жүйенің алынған моделінің жеткіліктілігі тексерілді. Жүйені талдағаннан кейін ПД реттегішін параметрлік әдістермен синтездеу міндеті қойылды. Бірінші әдіс ретінде Циглер – Никольс 2 эмпирикалық әдісі қолданылады. Бірінші әдіспен алынған сапалардың қанағаттанарлық емес бағалауына байланысты "Fine – Tuning" әдісіне негізделген ПД – реттегішінің параметрлерін сандық іздеудің жаңа алгоритмі құрылды. Алгоритмде бағдарламаның ашық листинг және оның жұмысының логикасын сипаттайтын блок-схема берілген. Шешімді орындау кезінде ол модальды реттегішке ұқсас. Алгоритмді толығымен салыстыру үшін контроллерді теңшелетудың үшінші әдісі ретінде MATLAB ортасында "Auto – tune" қолданылады. Барлық үш әдіспен реттеушіні теңшелету әрекеттердің толық сипаттамасымен бірге жүріледі.

Жұмыстың соңында реттеушіні синтездеудің барлық әдістеріне салыстырмалы талдау жасалады және қорытынды беріледі.

Түйінді сөздер: қазандық агрегатының АРЖ, қазанды іске қосу кезіндегі қоректік су реттегіші, модальді синтез, ПД – реттегіш, Циглер - Никольс 2, "Fine – tuning".

АННОТАЦИЯ

В данном дипломном проекте рассматривается задача разработки системы автоматического регулирования котельного агрегата на ГРЭС «Топар».

Проект содержит развернутое описание устройства, принципа работы и управления котельного агрегата. В ходе изучения АСУ ТП КА № 3, был выбран контур регулирования – регулирование уровня питательной воды в барабане котла при его пуске. Построена схема его автоматизации. Составлены принципиальная, функциональная и структурная схемы контура. Сформирована математическая модель САР КА. Была проверена адекватность полученной модели системы. После анализа системы была поставлена задача синтеза ПД – регулятора параметрическими методами. В качестве первого метода используется эмпирический метод Циглера – Никольса 2. Ввиду неудовлетворительных оценок качеств, полученным первым методом, был сформирован новый алгоритм численного поиска параметров ПД – регулятора на базе метода «Fine – Tuning». Алгоритм имеет открытый листинг программы и блок схему описывающее логику его работы. По исполнению решения он схож с модальным регулятором. Для полного сравнения алгоритма в качестве третьего метода настройки регулятора используется «Auto – tune» в среде MATLAB. Настройка регулятора во всех трех методах сопровождается подробным описанием действий.

В конце работы приводится сравнительный анализ всех методов синтеза регулятора и дается заключение.

Ключевые слова: САР котельного агрегата, растопочный регулятор питания котла, модальный синтез, ПД – регулятор, Циглер - Никольс 2, «Fine – tuning».

ABSTRACT

In this diploma project, the task of developing an automatic control system for a boiler unit at the «Topar» SDPP is considered.

The project contains a detailed description of the device, the principle of operation and control of the boiler unit. In the course of studying the APCS of BU № 3, a control loop was chosen - regulation of the feed water level in the boiler drum during its startup. The piping and instrumentation diagram is constructed. The principal, functional and structural diagrams of this loop are drawn up. A mathematical model of ACS has been formed. The adequacy of the resulting system model was checked. After analyzing the system, the task of synthesis a PD - controller by parametric methods was set. As the first method, the empirical method of Ziegler - Nichols 2 is used. In view of the unsatisfactory assessments of the qualities obtained by the first method, a new algorithm for the numerical search for the parameters of the PD - controller based on the "Fine - Tuning" method was formed. The algorithm has an open listing of the program and a block diagram describing the logic of its work. In terms of solution execution, it is similar to a modal controller. For a complete comparison of the algorithm, "Auto - tune" in the MATLAB environment is used as the third method for tuning the controller. Tuning the regulator in all three methods is accompanied by a detailed description of the actions.

At the end of the work, a comparative analysis of all methods of controller synthesis is given and a conclusion is presented.

Key words: ACS of the boiler unit, boiler feed water startup regulator, modal synthesis, PD - regulator, Ziegler - Nichols 2, "Fine - tuning".

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Технологическая часть	10
1.1	Котельный агрегат и его роль в составе электростанции	10
1.2	Описание технологических процессов в котельном агрегате	12
1.3	Котел как объект управления	16
1.4	ЛСУ уровнем питательной воды в барабане парового котла	19
2	Расчетная часть	22
2.1	Формирование математической модели системы управления	22
2.2	Анализ системы управления	30
2.3	Синтез системы управления	41
	Заключение	59
	Список использованной литературы	61
	Приложение А	62
	Приложение Б	63
	Приложение В	64
	Приложение Г	65
	Приложение Д	66
	Приложение Е	67
	Приложение Ж	68
	Приложение И	69
	Продолжение приложения И	70

ВВЕДЕНИЕ

В ходе прохождения преддипломной практики в компании «ZeinetSSE», был изучен и доработан проект «Подключение ГРЭС Топар к центральной системе автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности». Были промоделированы основные принципы управления КА и ТА, разработаны алгоритмы распределения мощности для турбоагрегатов и тепловой нагрузки котлоагрегатов. Были выявлены ряд особенностей их управления, после которых было решено взять в качестве объекта изучения для дипломного проекта - КА № 3.

Цель дипломного проекта. Описание технологических процессов в АСУ ТП КА № 3 и разработка САР для одного из контуров управления с использованием параметрических методов синтеза типового регулятора.

Актуальность. В составе главной распределительной электростанции «Топар», далее ГРЭС, на данный момент находятся 16 котельных и 8 турбинных агрегатов. Из них имеют полную АСУ ТП лишь КА № 3 и ТА № 2. В связи с чем данная работа может быть использована при проектировании АСУ ТП других котельных, а также поможет в будущем в продолжении работы над проектом.

Новизна работы. Разработка нового алгоритма поиска параметров регулятора на базе метода «Fine – Tuning» по принципу модального управления.

Задачи для выполнения. Необходимо описать технологические процессы в котельном агрегате, сформировать математическую модель для выбранного контура, провести анализ и синтез САР КА.

Общая характеристика. Дипломный проект состоит из двух частей: технологическая часть, расчетная часть.

В первой части дается описание устройства котельного агрегата, его роли в составе электростанции и котельной установки, описываются технологические процессы внутри агрегата. Рассматривается принцип управления котельным агрегатом, взаимосвязи основных параметров установки и состав АСУ ТП КА № 3. Выделяется контур ЛСУ питания – контур регулирования уровня в барабане котла при его пуске. Составляется схема автоматизации и описывается принцип его регулирования.

Во второй части в соответствии со схемой автоматизации строится его математическая модель, составляются принципиальная, функциональная и структурная схемы. Производится проверка адекватности полученной модели. Определяются устойчивость системы и оценки его качества. На основании анализа системы выбирается необходимый тип регулятора и методы его настройки. В конце данной части дается сравнительный анализ всех используемых методов и выделяется лучший из них.

В заключении подводятся итоги выполненной работы, обосновывается преимущества расчета параметров ПД-регулятора новым алгоритмом.

Используемые методы. «Ziegler Nichols», «Fine – Tuning», «Auto – tune».

1 Технологическая часть

1.1 Котельный агрегат и его роль в составе электростанции

Котельный агрегат (паровой котел) – основной элемент котельной установки [1].

Котельная установка – сложное техническое сооружение, состоящее из котельного агрегата и котельно – вспомогательного оборудования, связанное между собой линиями трубопроводов, предназначенное для выработки перегретого пара в случае, если котел паровой или подогрева воды, если котел в установке водогрейный.

Котельный агрегат – это конструктивно целое устройство, состоящее из систем труб поверхностей нагрева, объединенных между собой барабанами и камерами, каркаса с лестницами и площадками, топочных устройств, пароперегревателя, водяного экономайзера, воздухоподогревателя, обмуровки, арматуры и гарнитуры.

Каркас котла – металлическая конструкция, с помощью которой отдельные элементы котла объединяются в заданной компоновке [2]. Под компоновкой понимают порядок расположения основных элементов котла. Существуют различные компоновки котельных агрегатов, однако самыми часто используемыми являются компоновки котла П, Т, Н и Г-образного типов. Топочные устройства – это комплекс горелочных или механических устройств, предназначенный для превращения энергии топлива в тепловую энергию продуктов сгорания. Пароперегреватель служит для превращения насыщенного пара в перегретый. Водяной экономайзер — это устройство, обеспечивающее предварительный нагрев воды до барабана котла. Барабан – резервуар используемый для отделения пара от воды. Воздухоподогреватель – элемент котла, необходимый для увеличения интенсивности и стабильности процессов в топке. Обмуровка – внешняя часть котла, предназначенная для отделения газоходов и топочной камеры котла от окружающей среды. Арматура предназначена для управления работой и обеспечения нормальных условий эксплуатации котла. Примерами арматуры являются различные задвижки, вентили, клапана и т.д. Гарнитура – это устройства, используемые при обслуживании топки и газоходов котла. К гарнитуре можно отнести следующие элементы: лазы, люки, гляделки, взрывные клапана и др.

Котельно – вспомогательное оборудование предназначено для подачи в топку воздуха и отсоса продуктов сгорания топлива, приготовления и транспортирования топлива, очистки дымовых газов, удаления золы и шлака, водоподготовки и питания котла водой [2].

Трубопроводы в котельных установках используются для транспортировки пара, воды, мазута, химических реагентов и других веществ.

Котельный агрегат (котлоагрегат) является одним из ключевых элементов любой электростанции, работающей на принципе получения электричества от сжигания жидкого, газообразного или твердого топлива. В ГРЭС «Топар» в

качестве источника перегретого пара для нагрузки турбин используются паровые котельные агрегаты.

Для лучшего понимания принципа работы котельного агрегата необходимо разобраться с общим принципом работы ГРЭС [3]. Электростанция работает по тепловой схеме с поперечными связями. Это означает, что котельные агрегаты и турбоагрегаты соединены в один общий паропровод, с помощью которого происходит распределение пара между турбинами, поступивших от котлов. Схема подключения котлоагрегатов и турбоагрегатов указана в Приложении А.

Рассмотрим работу упрощенной версии станции, оставив всего три КА и два ТА. Упрощенная принципиальная схема показана на рисунке 1.1, все сокращения которой указаны в Перечне принятых сокращений. Для упрощения схемы намеренно были убраны ПВД и ПНД. Полная схема показана в Приложении Б.

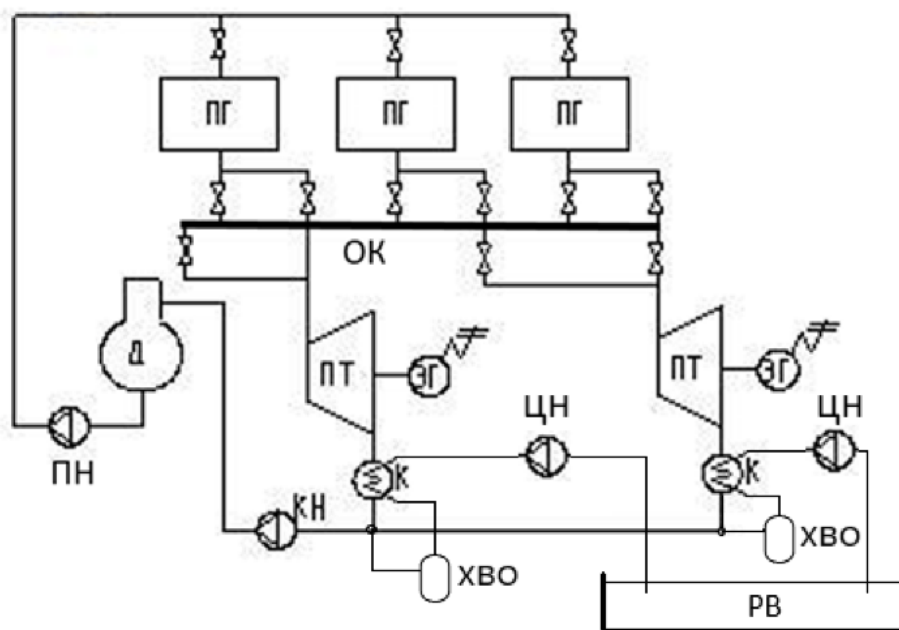


Рисунок 1.1 – Упрощенная принципиальная схема ГРЭС

В первом приближении примем котельный агрегат как парогенератор. Питательная вода с помощью питательного насоса поступает к парогенераторам, где превращается в перегретый пар. Далее, пар со всех парогенераторов поступает в общий коллектор, откуда после отправляется к паровым турбинам. Проходя через паровую турбину, пар расширяясь, понижает свою температуру стремясь сохранить скорость потока и совершает работу по вращению вала турбины, которая в свою очередь вращает ротор электрогенератора. Электрогенератор же при вращении его ротора, вырабатывает на обмотке статора электрический ток, который после отправляется к повышающим трансформаторам. На выходе трансформаторов образуется высокое напряжение порядка 35 кВ, которое далее отправляется уже непосредственно к

потребителям. Пар на выходе из турбин, поступает к конденсаторам, где конденсируясь, образует конденсированную воду. Конденсация происходит за счёт теплообмена между горячим паром и охлаждающей воды от естественного источника (водохранилище). Пар проходит сквозь трубы, в которых циркуляционным насосом протекает охлаждающая вода. Эта вода, повысив свою температуру в конденсаторе, поступает в устройства химводоочистки для удаления механических примесей и растворённых в ней солей. Очищенная вода поступает в общий трубопровод, где смешивается с водой полученной в ходе конденсации пара с турбин. Полученная вода, с помощью конденсатных насосов попадет в деаэратор, в котором очищается от растворенных в ней газов. С выхода деаэратора, очищенная (питательная) вода, нагнетаясь в питательном насосе, вновь поступает в парогенераторы и цикл продолжается.

1.2 Описание технологических процессов в котельном агрегате

Теперь, зная роль котельного агрегата в составе электростанции, попытаемся разобраться с технологическими процессами существующие в котельном агрегате. Для этого будет рассматривать котельный агрегат в составе именно установки, так как АСУ ТП КА в качестве объекта берет именно установку, а не только агрегат.

Принципиальная схема установки изображена на рисунке 1.2. В данном разделе в связи с отсутствием искажений в логике описании принципа работы, были намеренно не расписаны некоторые конструктивные особенности (спецификации) установки. Такие, например, как количество, тип и расположение оборудования.

С данными особенностями можно ознакомиться в литературе [4] и [5].

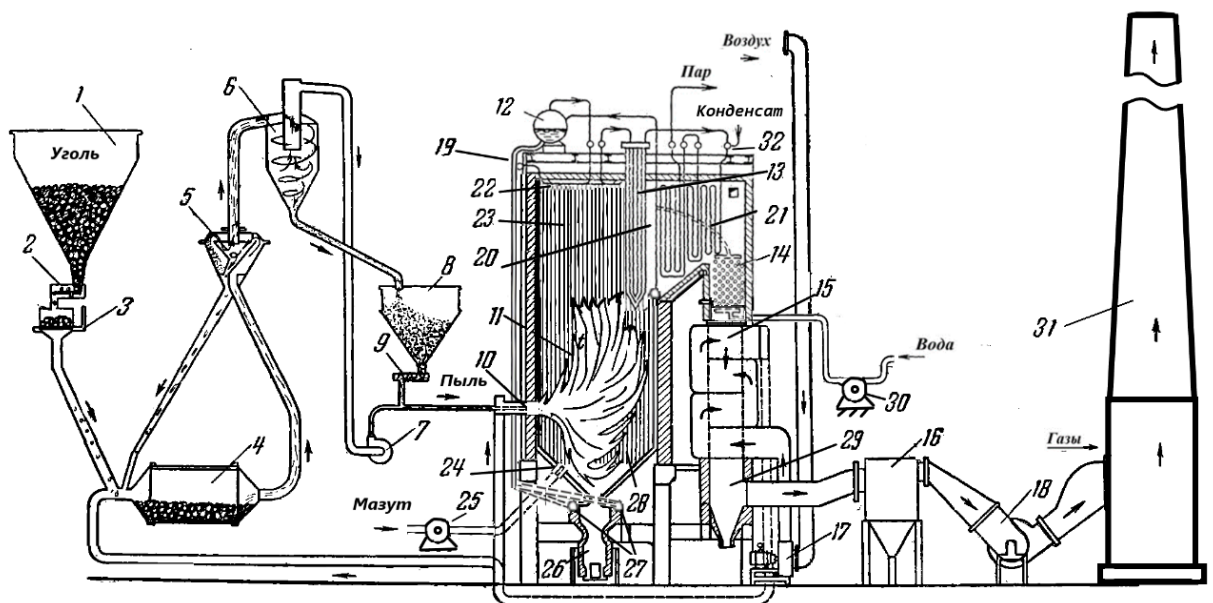


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема котельной установки

Здесь,

- 1 – Бункер сырого топлива;
- 2 – Питатель сырого угля;
- 3 – Автовесы;
- 4 – Барабанная шаровая мельница;
- 5 – Сепаратор пыли;
- 6 – Циклон;
- 7 – Мельничный вентилятор;
- 8 – Бункер угольной пыли;
- 9 – Питатель пыли;
- 10 – Угольная горелка;
- 11 – Топка;
- 12 – Барабан;
- 13 – Радиационно – конвективный пароперегреватель;
- 14 – Водяной экономайзер;
- 15 – Воздухоподогреватель;
- 16 – Батарейный циклон (золоулавливающее устройство);
- 17 – Дутьевой вентилятор;
- 18 – Дымосос;
- 19 – Спускные трубы;
- 20 – Горизонтальный газоход;
- 21 – Конвективный пароперегреватель;
- 22 – Потолочные экраны;
- 23 – Топочные экраны;
- 24 – Мазутная горелка;
- 25 – Мазутный насос;
- 26 – Устройство непрерывного шлакоудаления;
- 27 – Нижние коллекторы экранов;
- 28 – Холодная воронка;
- 29 – Конвективная шахта;
- 30 – Питательный насос;
- 31 – Дымовая труба;
- 32 – Пароохладитель.

Как было ранее описано, котельная установка состоит из парового котла и котельно–вспомогательного оборудования.

Для того, чтобы было легче различать эти две части на рисунке 1.2, распишем какие из элементов котельной установки относятся к той или иной группе:

– к паровому котлу относятся элементы под номерами: 10–15, 19–24 и 27–29;

– остальные же элементы: 1–9, 16–18, 25, 26, 30, 31, относятся к котельно – вспомогательному оборудованию.

Входные и выходные параметры котлоагрегата указаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры котельного агрегата

Входные параметры	Выходными параметры
Мазут	Перегретый пар
Угольная пыль	Ненужные газы, полученные в процессе сгорания
Питательная вода	Шлаки
Воздух	

Котельная установка может работать в трех режимах. Это пуск, нормальный режим и останов.

Разберемся с работой установки в нормальном режиме. При нормальном режиме работы, в топке котла 11, уже происходит горение основного топлива, в связи с чем надобность в работе мазутных горелок, предназначенные для розжига растопочного топлива, отпадает. Основным топливом установки является угольная пыль.

Опишем принцип получения основного топлива. Вагонами по железной дороге, каменный уголь доставляется в топливно – транспортный цех, в котором производится складирование угля и первичное его дробление в дробильных отделениях. Далее, раздробленный сырой уголь поступает в бункер сырого топлива 1, котельной установки, находящаяся в котельном цеху. С помощью питателя сырого угля 2, уголь поступает на автовесы 3, где накопившая необходимая масса сбрасывается по трубам в барабанную шаровую мельницу 4. В ней уголь за счет вращения барабана и находящихся в ней шаров, диаметром 25–60 мм, размалывается на мелкие кусочки и пыль. Дутьевой вентилятор 17, нагнетая холодный воздух по трубе, отправляет его в воздухоподогреватель 15, где нагретый до температуры около 250–300 °С, воздух поступает в шаровую мельницу. В мельнице за счет горячего потока воздуха, образовавшиеся в результате дробления мелкие кусочки угля и пыли сдуваются в верх в сепаратор 5, в котором происходит отделение мелких кусочков от угольной пыли. Мелкие кусочки угля отправляются обратно в мельницу на домол, а угольная пыль поступает в циклон 6, где происходит отделение его от сушильного агента (горячего воздуха). Отделившаяся пыль по течке поступает самотеком в бункер угольной пыли 8. Откуда далее через питатель пыли 9, она за счет мельничного вентилятора 7 под давлением отправляется в топку котла. Вместе с пылью за счет работы дутьевого вентилятора, в топку, поступает и воздух. Он необходим для осуществления горения внутри изолированного пространства, ввиду наличия в составе воздуха кислорода. Получившаяся смесь угольной пыли и воздуха (аэрозоль) пройдя через горелку 10 за счет высокой температуры внутри топки воспламеняется.

Для дальнейшего объяснения необходимо понимание следующих терминов:

– Излучение – один из способов передачи тепловой энергии за счет электромагнитных волн.

– Конвекция – способ передачи тепла (тепловой энергии) за счет переноса энергии частицами газа или жидкости.

– Теплопроводность – способ передачи тепла путем переноса энергии за счет движения молекул внутри неподвижного вещества.

При сгорании смеси выделяется большое количество тепловой энергии, которая за счет излучения и конвекции передается топочным экранам 23, радиационно–конвективному пароперегревателю 13, конвективному пароперегревателю 21, потолочным экранам 22, водяному экономайзеру 14 и воздухоподогревателю. Важно отметить, что пылеугольная воздушная смесь сгорает не в полном объеме. Основная его часть сгорает, превращаясь в тепло, попутно выделяя ненужные газы, такие как CO₂, NOX и т.д. Остальная же меньшая часть угля в виде шлака оседает на стенках холодной воронки котла 28. Вследствие чего здесь появляется два тракта: газовый и шлаковый.

Для начала опишем процессы, происходящие в газовом тракте. Как было ранее сказано, выделившиеся во время сгорания угля, газы с топки за счет дымососа поднимаются вверх и проходят через горизонтальный газоход 20 и конвективную шахту 29. Попутно проходя через все камеры котельного агрегата, газы передают свою энергию находящимся в этих камерах конвективным элементам: пароперегревателю, водяному экономайзеру и воздухоподогревателю. Таким образом, температура газов снижается с 1000–1100 °С до 90–110 °С. В составе топочных газов существует достаточное количество золы. Зола представляет собой остаток сгоревшего угля в виде следующих химических элементов: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO), которые оказывает губительное влияние на экологию в случае не удаления их из состава уходящих газов в атмосферу. В связи с чем, после конвективной шахты, дымовые газы поступают в золоулавливающее устройство 16, в котором происходит отделение газов от золы. Далее, очищенные топочные газы, пройдя через дымосос, поступают в дымовую трубу 31, где после уходят в атмосферу.

Шлак в котельном агрегате удаляется по средству обмывки водой. За счет обмывки, шлак попадает в устройство непрерывного шлакоудаления 26, откуда далее отправляется в склады хранения шлака.

Питательная вода, как ранее было описано в разделе 1.1, поступает от деаэратора с помощью питательного насоса 30 в водяной экономайзер, где, подогреваясь выделившимся газом с топки до температуры около 200 °С, попадает в барабан котла 12. Далее, питательная вода за счет силы тяжести стекает по спускным трубам 19 в нижние коллекторы экранов 27. Откуда после, вода перетекает в топочные экраны. За счет теплопроводности нагретые стенки топочных экранов отдают свою энергию воде. Вода же в свою очередь, является хорошим теплопередатчиком ввиду большого значения её теплоемкости. Это означает, что 1 кг воды может принять больше тепла чем другие возможные жидкости. Так как внутри труб давление намного выше атмосферного, температура кипения также повышается, тем самым вода внутри топочных

экранов превращается в пар при температуре около 320 °С. Это обеспечивает воде способность передать больше энергии чем, если бы вода вскипала при 100 °С, так как повышается его диапазон температуры. Нагретая до температуры кипения, вода вскипает и образует пароводяную смесь. Получившаяся смесь в топочных экранах за счет меньшей плотности поднимается вверх, попадая вновь в барабан. В барабане котла пароводяная смесь, пройдя через слой воды, отделяется друг от друга. Таким образом, в верхней части барабана начинает скапливаться пар. Данный пар называется насыщенным, так как температура воды и пара одинаковое. Однако, полученный пар в барабане, в связи с его низкой температурой и слабым давлением, не подходит для работы современных турбин. В следствие чего, после барабана, пар отправляется в потолочные экраны топки для его первичного нагрева. После потолочных экранов, пар поступает в радиационно–конвективный пароперегреватель, который является также первой ступенью пароперегревателя котла. Здесь пар нагревается от температуры, равной около 400 градусов Цельсия. Далее, пар отправляется в пароохладитель 32, внутрь которого, для регулирования его температурой, впрыскивается конденсат. Для повышения температуры пара до номинальных значений, пар затем отправляют во вторую ступень пароперегревателя, где он нагреваясь превращается в перегретый пар с температурой 545 градусов.

Кроме того, нельзя забывать о том, что, для поддержания горения внутри топки необходимо наличие разрежения или по–другому тяги. Разрежение — это разность давление в нижней и верхней части топочной камеры. Для его осуществления в котельном агрегате существует дымосос 18 и дутьевой вентилятор.

Мазут используется в котельной установке в качестве растопочного топлива. При пуске котельного агрегата, с мазутного хозяйства топливно–транспортного цеха, мазут поступает с температурой 115 – 135 °С к мазутным горелкам 24, за счет работы специального насоса 25. Далее, включается запально–сигнальное устройство в мазутных горелках и топливо начинает гореть. После достижения параметров пара 30 процентов от их номинальных значений, в топку поступает основное топливо и мазутные горелки отключаются.

1.3 Котел как объект управления

В данной дипломном проекте объектом изучения является котельный агрегат номер 3 ГРЭС «Топар» Е–250–9,8–545 КТ. Расшифровка названия агрегата состоит в следующем:

- Е – естественная циркуляция (тип циркуляции воды в котле);
- 250 – номинальная производительность пара (т/ч);
- 9,8 – рабочее давление перегретого пара (МПа);
- 545 – рабочая температура перегретого пара (°С);
- КТ – каменный уголь (основное топливо).

Паровой котел типа Е–250–9,8–545 КТ, производства ОАО ТКЗ «Красный котельщик», однобарабанный, вертикально – водотрубный, с естественной циркуляцией, с уравновешенной тягой, газоплотный, с мембранными экранами предназначен для получения пара при сжигании каменных угля Борлинского месторождения, разрез «Молодежный» с твердым шлакоудалением. Растопочное топливо – мазут марки М 100. Компоновка котла выполнена по П – образной схеме [4].

Котел имеет диапазон изменения производительности с сохранением параметров пара 60 –100 процентов от номинальной.

Конструктивный вид котельного агрегата Е–250–9,8–545 КТ указан в Приложении В.

Основная цель АСУ ТП парового КА заключается в управлении технологическими процессами в установке так, чтобы обеспечить поддержание требуемых параметров пара. К параметрам пара относится его давление, температура и расход.

Все основные параметры КА можно разделить на 3 группы:

- входные;
- промежуточные;
- выходные.

Данные параметры находятся в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные параметры котельного агрегата

Входные	Промежуточные	Выходные
Расход топлива, Q_t	Давление разрежения в топке, P_t	Температура перегретого пара, $t_{п.п.}$
Расход воздуха, Q_v	Давление пара в барабане, P_b	Расход перегретого пара, $Q_{п.п.}$
Расход воды на впрыск, $Q_{впр}$	Расход насыщенного пара, $Q_{н.п.}$	Давление перегретого пара, $P_{п.п.}$
Расход воды на продувку, $Q_{пр}$	Избыток воздуха за пароперегревателем, α	Солесодержание котловой воды, $NaCl$
Расход питательной воды, $Q_{п.в.}$		Уровень в барабане, H_b
Расход дымовых газов, Q_g		

Их расположение внутри котла изображено на рисунке 1.3 [6]. Все наименования параметров рисунков 1.3 и 1.4 указаны в таблицы 1.2

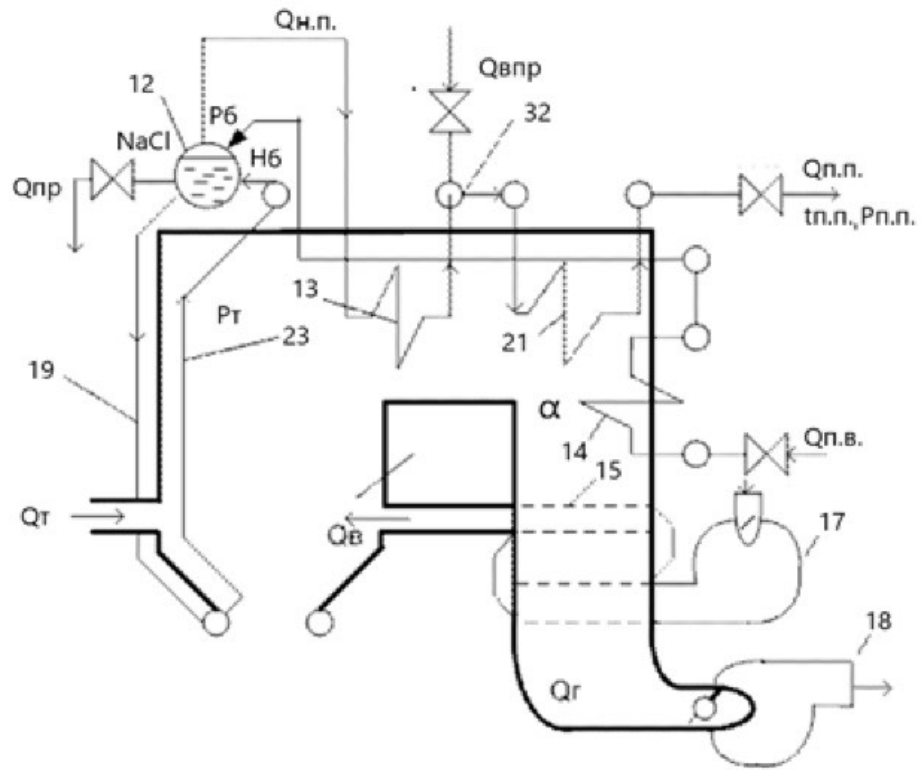


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема контроля АСУ ТП КА

Все номера элементов рисунка 1.3 были ранее указаны для рисунка 1.2. Входные параметры котельного агрегата влияют на промежуточные, а последние на выходные параметры. Взаимосвязи между ними указаны на рисунке 1.4 [6].

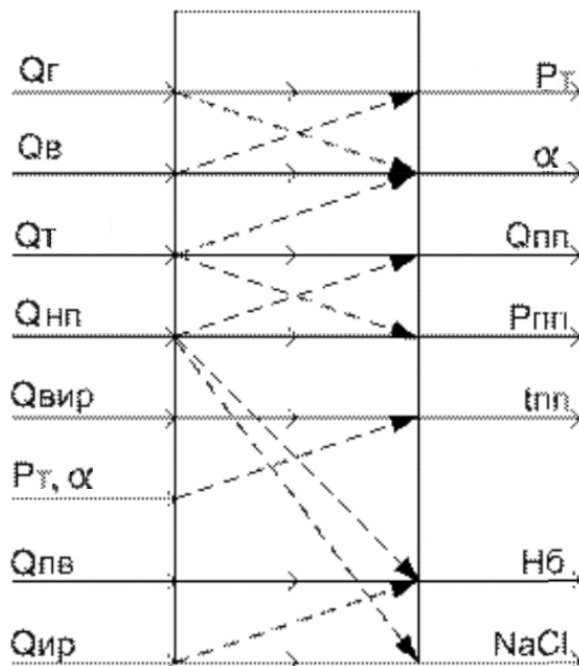


Рисунок 1.4 – Схема связей между параметрами котла

Из приведенных влияний параметров между собой, можем сделать вывод, что АСУ ТП котельного агрегата номер 3 функционально состоит следующих локальных систем управления:

- ЛСУ питания (основной, растопочный);
- ЛСУ непрерывной продувки;
- ЛСУ температуры пара первой ступени;
- ЛСУ температуры пара второй ступени;
- ЛСУ давления перегретого пара;
- ЛСУ тепловой нагрузкой;
- ЛСУ расходом топлива нижнего яруса;
- ЛСУ расходом топлива верхнего яруса;
- ЛСУ разрежения в топке;
- ЛСУ общего воздуха (основной, растопочный);
- ЛСУ содержанием кислорода в уходящих газах;
- ЛСУ расходом воздуха на верхнее дутье;
- ЛСУ расходом воздуха на нижнее дутье;
- ЛСУ рециркуляции горячего воздуха;
- ЛСУ температуры дымовых газов перед дымососами;
- ЛСУ давления мазута;
- ЛСУ разрежения перед мельницей;
- ЛСУ температуры аэросмеси;
- ЛСУ загрузки мельницы;
- ЛСУ температуры аэросмеси при пуске.

Так как уровень является показателем баланса рабочих тел (пара и жидкости) и его поддержание обеспечивает надежную работу котельного агрегата, в данном дипломном проекте в качестве изучения была выбрана локальная система управления питания (основной, растопочный).

1.4 ЛСУ уровнем питательной воды в барабане парового котла

В ЛСУ питанием воды входят два контура управления:

- Первый контур, растопочный, используется при запуске котлоагрегата и принципиально работает по одноимпульсному управлению.
- Второй контур, основной, используется во время нормальной работы котла и работает по трехимпульсному управлению.

Так как в рамках бакалавриата изучение многомерных систем не входило в программу, в качестве контура управления выберем первый контур ЛСУ питания.

В данном контуре управляемой величиной является уровень питательной воды (feed water) в барабане (drum). Возмущающими воздействиями считаются расход пара на выходе из котла (steam) и расход воды на продувку (purge water),

однако их влияние в контуре не учитывается. Управляющим воздействием является расход питательной воды.

Функциональную схему автоматизации для данного контура составили на основании алгоритма работы растопочного регулятора питания котла, представленный в Приложении Д и схем автоматизации котла номер 3 [5].

Упрощенная схема автоматизации данного контура изображена на рисунке 1.5. В Приложении Г указана развернутая схема автоматизации САР КА, сформированная согласно ГОСТ [7].

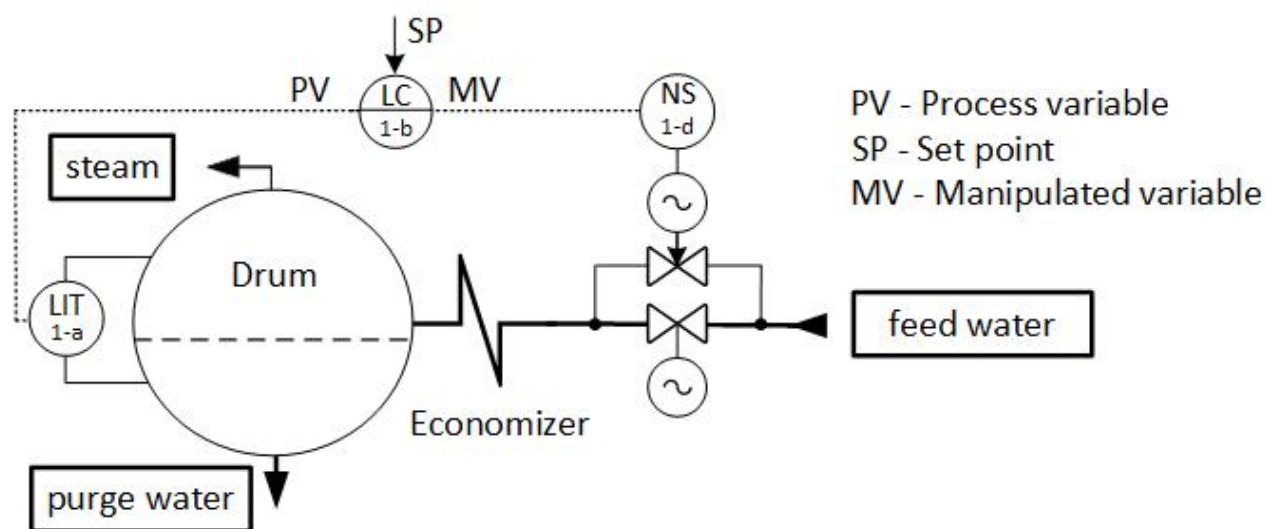


Рисунок 1.5 – Упрощенная схема автоматизации контура расход питательной воды – уровень в барабане при пуске

Рассмотрим принцип регулирования уровня питательной воды. Сигнал с датчика уровня LIT идет на вход регулятора LC. Регулятор LC сравнивает текущее значение PV с желаемым значением SP уровня и отправляет сигнал управления MV на исполнительный механизм через усилитель мощности NS. Исполнительный механизм в свою очередь меняет положение РК на байпасной линии узла питания к котлу, тем самым меняя и входной расход питательной воды в барабан. Во время работы растопочного регулятора LC, питание котла осуществляется только через байпасную линию.

На рисунке 1.6, изображены снятые данные сигналов расхода пара, воды и уровня. На основании их будем оценивать адекватность будущей модели системы.

Постановка задачи: сформировать математическую модель системы управления уровня в барабане котла на основании функциональной схемы автоматизации растопочного регулятора, указанной в Приложении Г. В качестве критерия возьмём данные снятые с КА № 4, имеющий схожие характеристики с объектом изучения данного дипломного проекта. В случае наличия сходства между результатами моделирования системы и снятых данных с объекта,

математическую модель будем считать адекватной. Сравнение будем проводить на основании характера изменения уровня питательной воды при пуске котла.

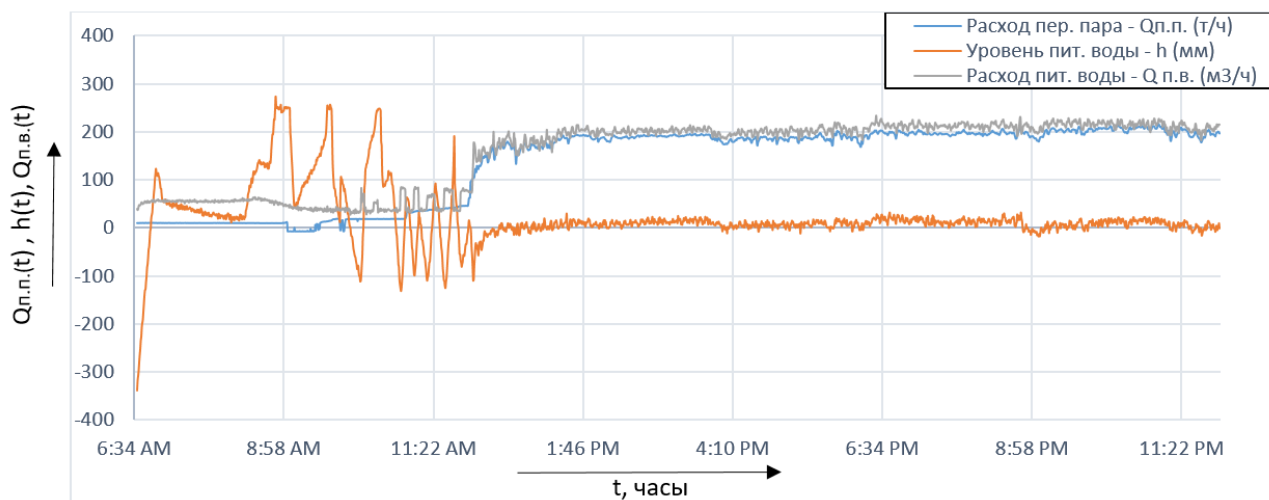


Рисунок 1.6 – Снятые данные сигналов контура уровня жидкости в барабане

2 Расчетная часть

2.1 Формирование математической модели системы управления

По функциональной схеме автоматизации, построили принципиальную схему системы автоматического регулирования уровня воды в барабане парового котла без регулятора, которая указана на рисунке 2.1.

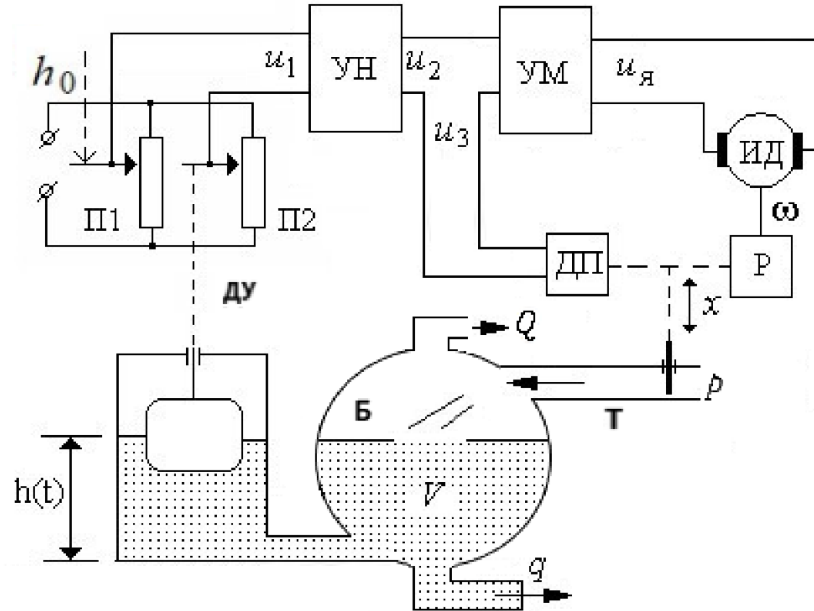


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема САУ уровня воды в барабане парового котла

Здесь,

Т – трубопровод;

Б – барабан;

П1 – задающий потенциометр;

П2 – потенциометр обратной связи;

УН – усилитель напряжения;

УМ – усилитель мощности;

ДП – датчик положения задвижки;

Р – понижающий редуктор;

ИД – исполнительный двигатель;

ДУ – датчик уровня жидкости;

Пунктирные линии – система рычагов;

$u_1, u_2, u_я$ – напряжения постоянного тока;

u_1 – напряжение на выходе ДУ;

u_2 – напряжение на выходе УН;

u_3 – напряжение на выходе ДП;

$u_я$ – якорное напряжение двигателя постоянного тока;

h_0, h – заданное и текущее значения уровня жидкости в барабане;
 p – расход питательной воды;
 q – расход воды на непрерывную продувку;
 Q – расход перегретого пара;
 V – объем барабана;
 ω – угловая скорость двигателя;
 x – перемещение заслонки.

Система автоматического регулирования уровня питательной воды в барабане, далее просто САР, представляет собой совокупность элементов, позволяющие контролировать регулируемый параметр – уровень воды. В САР присутствует два объекта управления – трубопровод и барабан. Связь между ними прямая, то есть один объект создает управляющее воздействие для второго, поэтому в дальнейшем объединим их в единый объект управления – барабан с трубопроводом. Входным сигналом объекта является расход поступающей жидкости, а выходным соответственно её уровень. В системе есть также два возмущающих сигнала – расход перегретого пара и расход воды на непрерывную продувку. Однако оба возмущения в математической модели учитывать не будем.

Так как водяной экономайзер конструктивно состоит только из трубопроводов, то его физику работы будет включать трубопровод.

Элементы устройства управления указаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Элементы УУ САР с её реальными прототипами

Название элемента	Название примера использования (в данной системе)
ИД	Двигатель постоянного тока
УМ	Тиристорный преобразователь
УН	Операционный усилитель
РО	Червячный редуктор
ДУ	Поплавковый датчик
ДП	Реостатный датчик

Разберем принцип работы всей системы. В реостатном датчике, изображенный на рисунке 2.2, потенциометром П1 задается желаемое значение регулируемой величины h_0 , путем изменения его сопротивления. Рычажная система с поплавком фиксирует положение ползунка (контакта) потенциометра П2, задавая тем самым текущее значение регулируемой переменной h , путем изменения сопротивления в П2. Питается датчик от постоянного напряжения E . На его выходе образуется сигнал u_1 , который равен разности напряжений на первом и втором потенциометрах — это сигнал ошибки по уровню ε . Таким образом данный датчик, изображенный на рисунке 2.3, представляет собой

одновременно три функциональных блока – задающее устройство, вычитающий элемент и усилитель.

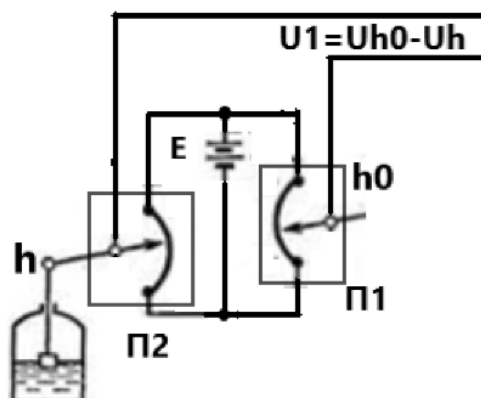


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема реостатного датчика

Сигнал ошибки поступает в УН, откуда далее усиливаясь идет в сравнивающее устройство в виде сигнала u_2 . Для того чтобы продолжить логическую цепочку описания, необходимо знать положение задвижки, то есть насколько она открыта/закрыта. Данную функцию выполняет датчик положения задвижки, который схематически может представляться также потенциометрическим или реостатным датчиком, электрическая схема которого указана в Приложении Е. Работает он по следующему принципу: линейное перемещение заслонки, за счет рычагов будет изменять положение ползунка в потенциометре, тем самым изменяя его сопротивление, а в следствие и напряжение снимаемого с датчика. Данное напряжение u_3 , сравнивается с сигналом от УН u_2 и образуется сигнал ошибки по положению задвижки, который поступает на вход УМ. Откуда далее, сигнал $u_я$ идет на исполнительный механизм. Меняя напряжение на якоре двигателя $u_я$, можно изменять частоту вращения вала ω . Исполнительный механизм соединен с регулирующим органом, который представлен в виде понижающего редуктора. Редуктор понижает угловую скорость и в следствие повышает крутящий момент. Данный момент, с помощью систем рычагов и механизмов, приводит к линейному перемещению задвижки, опуская/приподнимая её, стремясь привести задвижку в такое положение, при котором ошибка была бы равна нулю. При этом изменяется расход поступающей жидкости p и следовательно, уровень h также меняется, стараясь прийти к заданному значению h_0 .

Таким образом, в системе регулирования уровнем жидкости в барабане котла присутствуют две отрицательные обратные связи:

- Местная связь – обеспечивает регулирование расхода поступающей жидкости. Данную связь дает датчик положения задвижки. Его наличие необходимо для точного управления.

- Глобальная связь – дает возможность контролировать уровень жидкости в барабане. Реализована эта связь за счет поплавкового датчика.

Для упрощения составления математической модели системы регулирования составим её функциональную схему с помощью блоков. Данная схема отображена на рисунке 2.3.

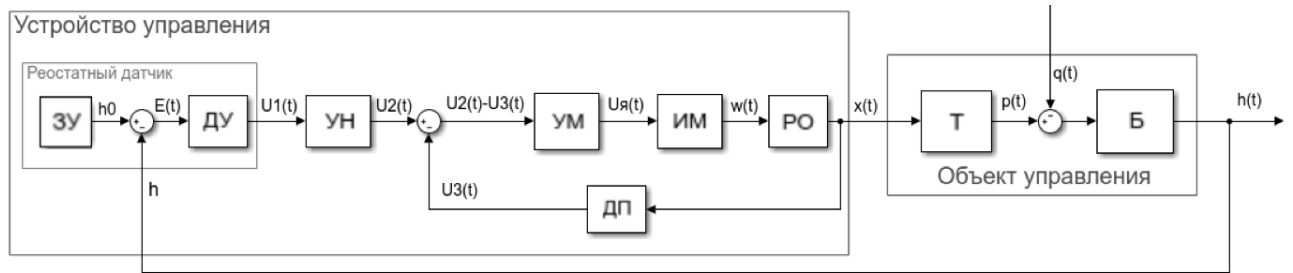


Рисунок 2.3 – Функциональная схема САР уровня воды в барабане

Теперь можем приступить к составлению математической модели. Математическое описание каждого элемента системы представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Математические модели элементов САР

№	Сокр. название элемента	Полн. название элемента	Математическая модель	
			Дифференциальное уравнение	Передаточная функция
1	ЗУ	Задающее устройство	h_0	–
2	–	Устройство сравнения	$\varepsilon = h_0 - h$	–
3	ДУ	Датчик уровня	$u_1 = k\varepsilon$	$W_{ду}(s) = k$
4	УН	Усилитель напряжения	$u_2 = k_u \cdot u_1$	$W_{ун}(s) = k_u$
5	УМ	Усилитель мощности	$u_я = k_m \cdot (u_2 - u_3)$	$W_{ум}(s) = k_m$
6	ИМ	Исполнительный механизм	$T_{дв} \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_{дв} \cdot u_я$	$W_{им}(s) = \frac{k_{дв}}{T_{дв}s + 1}$
7	РО	Регулирующий орган	$\frac{dx}{dt} = k_p \cdot \omega$	$W_{ро}(s) = \frac{k_p}{s}$
8	ДП	Датчик положения задвижки	$u_3 = k_{oc}x$	$W_{дп}(s) = k_{oc}$
9	Т	Трубопровод	$T_3 \frac{dp}{dt} + p = k_3x$	$W_T(s) = \frac{k_3}{T_3s + 1}$
10	Б	Барабан котла	$\frac{dh}{dt} = k_2 \cdot (p - q)$	$W_б(s) = \frac{k_2}{s}$

На основе построенной ранее функциональной схемы, изображенной на рисунке 2.3, составим математическую модель системы регулирования:

УМ, ИМ и РО соединены последовательно, поэтому можем заменить их одной эквивалентной передаточной функцией, назовем её $W1$.

$$W1(s) = W_{ум}(s) * W_{им}(s) * W_{ро}(s) = \frac{k_m * k_{дв} * k_p}{(T_{дв}s + 1) * s} = \frac{k_m * k_{дв} * k_p}{(T_{дв}s^2 + s)} \quad (1)$$

Как видно полученная передаточная функция (1) описывается реально интегрирующим звеном.

Учтём местную отрицательную обратную связь и получим следующую передаточную функцию:

$$\begin{aligned} W2(s) &= \frac{W1(s)}{(1 + W1(s) * W_{дп}(s))} = \frac{\frac{k_m * k_{дв} * k_p}{(T_{дв}s^2 + s)}}{1 + \frac{k_m * k_{дв} * k_p}{(T_{дв}s^2 + s)} * k_{ос}} = \\ &= \frac{\frac{k_m * k_{дв} * k_p}{(T_{дв}s^2 + s)}}{\frac{(T_{дв}s^2 + s) + k_m * k_{дв} * k_p * k_{ос}}{(T_{дв}s^2 + s)}}} = \frac{k_m * k_{дв} * k_p}{T_{дв}s^2 + s + (k_m * k_{дв} * k_p * k_{ос})} \end{aligned} \quad (2)$$

В результате получаем передаточную функцию второго порядка (2).

Найдем эквивалентную функцию для устройства управления.

$$W_{уу}(s) = W_{ду}(s) * W_{ун}(s) * W2(s) = \frac{k * k_u * k_m * k_{дв} * k_p}{T_{дв}s^2 + s + (k_m * k_{дв} * k_p * k_{ос})} \quad (3)$$

Объект управления описывается передаточной функцией реально интегрирующего звена:

$$W_{оу}(s) = W_{т}(s) * W_{б}(s) = \frac{k_3}{(T_3s + 1)} * \frac{k_2}{s} = \frac{k_3 * k_2}{(T_3s^2 + s)} \quad (4)$$

Для получения передаточной функции прямой ветви найдем функцию последовательно соединенного устройства управления (3) с объектом (4):

$$G(s) = W_{уу}(s) * W_{оу}(s) = \frac{k * k_u * k_m * k_{дв} * k_p}{[T_{дв}s^2 + s + (k_m k_{дв} k_p k_{ос})]} * \frac{k_3 * k_2}{[T_3s^2 + s]} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{k * k_u * k_m * k_{дв} * k_p * k_3 * k_2}{(T_{дв} T_3) s^4 + T_3 s^3 + (k_m k_{дв} k_p k_{oc} T_3) s^2 + T_{дв} s^3 + s^2 + (k_m k_{дв} k_p k_{oc}) s} = \\
&= \frac{k * k_u * k_m * k_{дв} * k_p * k_3 * k_2}{(T_{дв} T_3) s^4 + (T_3 + T_{дв}) s^3 + (k_m k_{дв} k_p k_{oc} T_3 + 1) s^2 + (k_m k_{дв} k_p k_{oc}) s} \quad (5)
\end{aligned}$$

Сократим запись, внося новые параметры передаточной функции (5):

$$G(s) = \frac{K}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s}, \quad (6)$$

где

$$K = k * k_u * k_m * k_{дв} * k_p * k_3 * k_2, \quad (7)$$

$$a_0 = T_{дв} * T_3, \quad (8)$$

$$a_1 = T_3 + T_{дв}, \quad (9)$$

$$a_2 = k_m * k_{дв} * k_p * k_{oc} * T_3 + 1, \quad (10)$$

$$a_3 = k_m * k_{дв} * k_p * k_{oc}. \quad (11)$$

Учтем глобальную единичную отрицательную обратную связь и получим итоговую математическую модель САР уровня питательной воды:

$$\begin{aligned}
T(s) &= \frac{G(s)}{1 + G(s) * H(s)} = \frac{\frac{K}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s}}{1 + \frac{K}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s}} = \\
&= \frac{\left[\frac{K}{(a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s)} \right]}{\left[\frac{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + K}{(a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s)} \right]} = \frac{K}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + K} \quad (12)
\end{aligned}$$

Таким образом математическая модель САР уровня жидкости в барабане описывается передаточной функцией четвертого порядка (12).

Таблица 2.3 – Исходные данные для схемы

k	k_u	k_m	$k_{дв}$	$T_{дв}$	k_p	k_3	T_3	k_{oc}	k_2
В/м	–	–	рад/В	с	м/рад	м2	с	В/м	м/(с*л)
0,2	15	50	10	0,2	0,001	0.5	5	0.1	0.01

Найдем значения параметров системы, подставляя исходные данные из таблицы 2.3 в уравнения (7–11):

$$\begin{aligned}
K &= 0.0002, \\
a_0 &= 1, \\
a_1 &= 5.2, \\
a_2 &= 1.025, \\
a_3 &= 0.005.
\end{aligned}$$

Подставив вычисленные параметры системы в уравнения 6 и 12, получим итоговые передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы соответственно.

Так, передаточная функция разомкнутой системы имеет следующий вид:

$$G(s) = \frac{0.0002}{(s^4 + 5.2s^3 + 1.025s^2 + 0.005s)} \quad (13)$$

Приведем функцию РСАР (13) к нормальному виду, разделив числитель и знаменатель на коэффициент усиления, K .

$$G(s) = \frac{1}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s} \quad (14)$$

Передаточная функция замкнутой системы же выглядит следующим образом:

$$T(s) = \frac{0.0002}{(s^4 + 5.2s^3 + 1.025s^2 + 0.005s + 0.0002)} \quad (15)$$

Проведем аналогичную операцию по приведению функции к нормальному виду с ЗСАР (15). Конечный вид математической модели ЗСАР выглядит так:

$$T(s) = \frac{1}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s + 1} \quad (16)$$

Найдем итоговую передаточную функцию для объекта управления:

$$W_{\text{оу}}(s) = \frac{k_3 * k_2}{(T_3s^2 + s)} = \frac{0.005}{5s^2 + s}$$

Найдем также и передаточные функции всех звеньев системы с учетом данных с таблицы 2.3:

$$W_{\text{ду}}(s) = 0.2,$$

$$W_{\text{ун}}(s) = 15,$$

$$W_{ум}(s) = 50,$$

$$W_{им}(s) = \frac{10}{0.2s + 1},$$

$$W_{р}(s) = \frac{0.001}{s},$$

$$W_{дп}(s) = 0.1,$$

$$W_{т}(s) = \frac{0.5}{5s + 1},$$

$$W_{б}(s) = \frac{0.01}{s}.$$

Составим структурную схему САР. Для этого в функциональной схеме, указанной на рисунке 2.3, все элементы переведем из временной в комплексную область, введя строгие буквенные обозначения сигналов.

В результате получили структурные схемы САР без возмущения изображенной на рисунке 2.4 и САР с одним возмущением, продемонстрированный на рисунке 2.5.

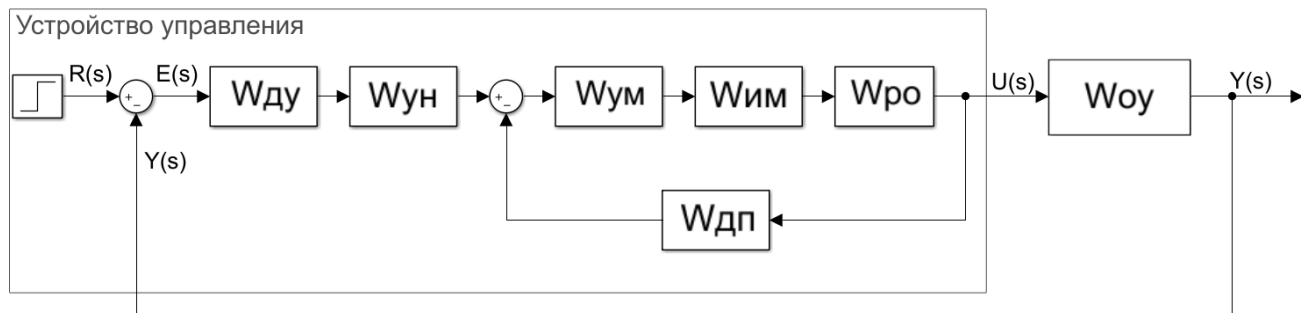


Рисунок 2.4 – Структурная схема САР уровня жидкости (без учёта возмущений)

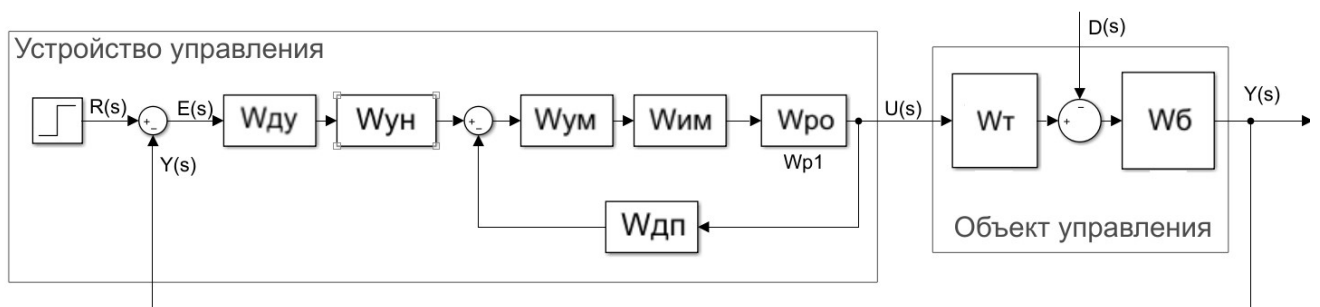


Рисунок 2.5 – Структурная схема САР уровня жидкости (с учётом одного из возмущений)

Здесь,
 $Y(s)$ – регулируемый сигнал;
 $R(s)$ – задающий сигнал;
 $E(s)$ – ошибка управления;
 $U(s)$ – сигнал управления;
 $D(s)$ – случайное возмущение.

2.2 Анализ системы управления

После получения математической модели необходимым условием перед синтезом регулятора является её анализ. Для анализа будем работать с временной и комплексной областью.

Результаты моделирования систем. Получим результаты моделирования разомкнутой (14) и замкнутой (16) систем и сделаем предварительный вывод об их устойчивости. Для этого, с помощью задающего устройства подадим на систему единичное ступенчатое воздействие.

На рисунке 2.6 изображена реакция разомкнутой системы на данное возмущение.

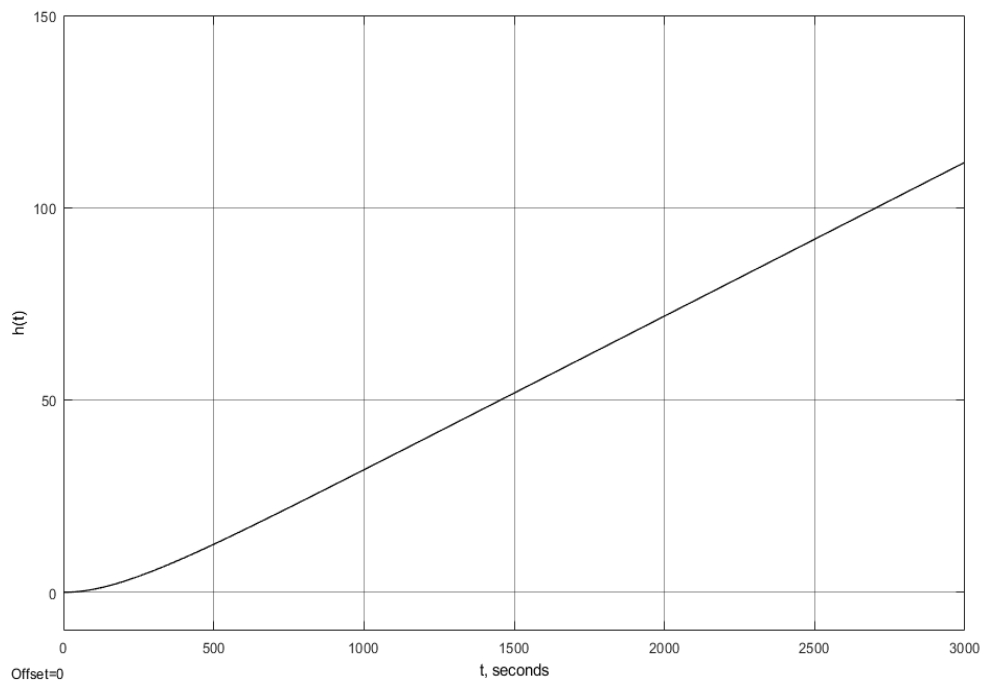


Рисунок 2.6 – Переходная характеристика разомкнутой системы

По переходному процессу, изображенному на рисунке 2.6, видно монотонное и пропорциональное увеличение уровня воды относительно времени. Данная особенность поведения характерна системе, находящейся на нейтральной границе устойчивости.

Результат моделирования замкнутой системы представлен на рисунке 2.7.

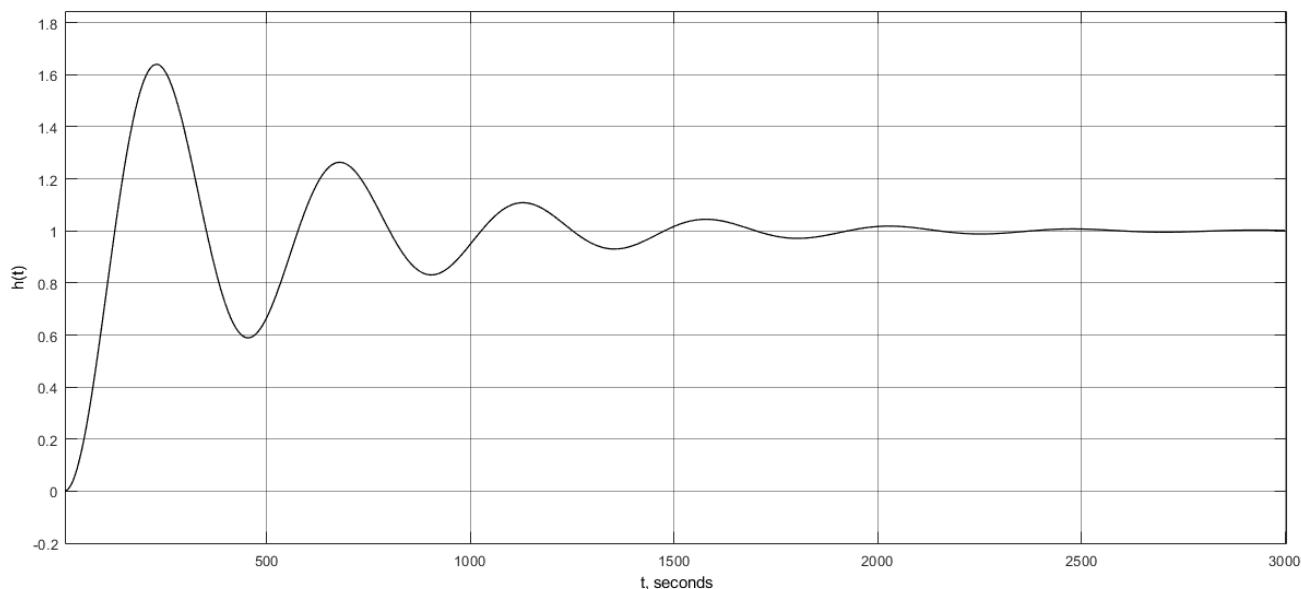


Рисунок 2.7 – Переходная характеристика замкнутой системы

По графику, указанному на рисунке 2.7, видно, что переходной процесс у системы колебательно сходящийся. Вследствие чего можем утверждать, что замкнутая система автоматического регулирования (16) устойчива.

Адекватность системы управления. По рисунку 2.7 видно, что получившая математическая модель системы управления (16) имеет большие колебания в начале своего переходного процесса. Аналогичную картину можно наблюдать и с характером изменения уровня в барабане котла во время его пуска, изображение которого было ранее показано на рисунке 1.6. Вследствие чего, делаем вывод об адекватности полученной модели.

Исследование устойчивости систем первым методом Ляпунова. Для проверки вышеописанных выводов об устойчивости систем воспользуемся первым методом Ляпунова [8]. Исследуем устойчивость РСАР (14).

Алгоритм метода:

1 Шаг. – Характеристический полином РСАР имеет следующий вид:

$$(n = 4) \quad D(s) = 5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s \quad (17)$$

2 Шаг. – Определим корни характеристического полинома (17), т.е. полюса.

Так как, степень у полинома n превышает число 2, вручную вычислить полюса системы не предоставляется возможным. В связи с этим, воспользуемся программным обеспечением MATLAB. С помощью команды «roots» получим корни характеристического полинома:

```
>> roots([5000 26000 5125 25 0])
```

ans =

0
-4.9950
-0.2000
-0.0050

3 Шаг – Делаем выводы по результатам.

Вывод: так как у Разомкнутой САР присутствует один нулевой полюс, при отрицательности действительных частей остальных полюсов, то согласно первому методу Ляпунова, РСАР находится на нейтральной границе устойчивости. Таким образом, доказали вышеописанное утверждение. На данное положение РСАР повлияло отсутствие параметра a_4 . В таких случаях, при дальнейшем замыкании глобальной обратной связи, необходимо как можно дальше «отодвинуть» полюса от границы устойчивости, так как это не желательное состояние системы, которое нужно устранять еще при проектировании.

Графическое изображение расположения полюсов РСАР на комплексной области можно рассмотреть на рисунке 2.9. Для получения данного графика в MATLAB необходимо было внести передаточную функцию нашей замкнутой системы с помощью команды «tf()», а затем в командном окне прописать вызов функции «ltiview()» как это показано на рисунке 2.8. Далее, в открывшемся окне нажать на правую кнопку, навести мышь на «Plot Type» и выбрать «Pole/Zero».

```
>> T=tf([1],[5000 26000 5125 25 1])

T =

          1
-----
5000 s^4 + 26000 s^3 + 5125 s^2 + 25 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> ltiview(T)
```

Рисунок 2.8 – Ввод передаточной функции для анализа в MATLAB

Ввиду близости по значениям двух из них, на плоскости были указаны координаты точек каждого из полюсов.

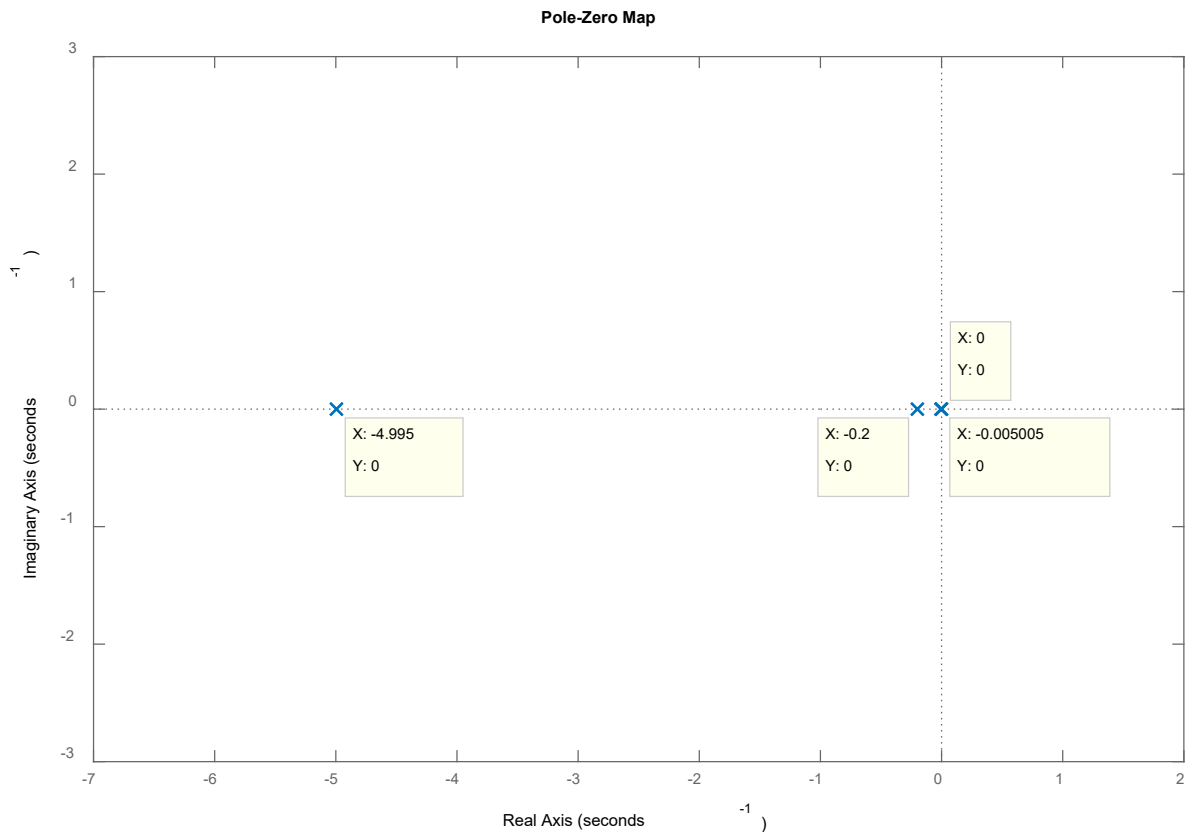


Рисунок 2.9 – Комплексная область РСАР для отображения нулей и полюсов

Аналогично, исследуем на устойчивость замкнутой системы (16).

1 Шаг. – Характеристический полином ЗСАР имеет следующий вид:

$$(n = 4) \quad D(s) = 5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s + 1$$

2 Шаг. – Определим полюса системы.

```
>> roots([5000 26000 5125 25 1])
ans =
```

```
-4.9950 + 0.0000i
-0.2011 + 0.0000i
-0.0020 + 0.0140i
-0.0020 - 0.0140i
```

3 Шаг – Делаем выводы по результатам:

Вывод: так как все четыре полюса системы имеют отрицательные действительные части, т.е. все полюса «левые», то основываясь на первой теореме Ляпунова, можем утверждать, что замкнутая система устойчива.

Графическое изображение расположения полюсов ЗСАР на комплексной области можно рассмотреть на рисунке 2.10.

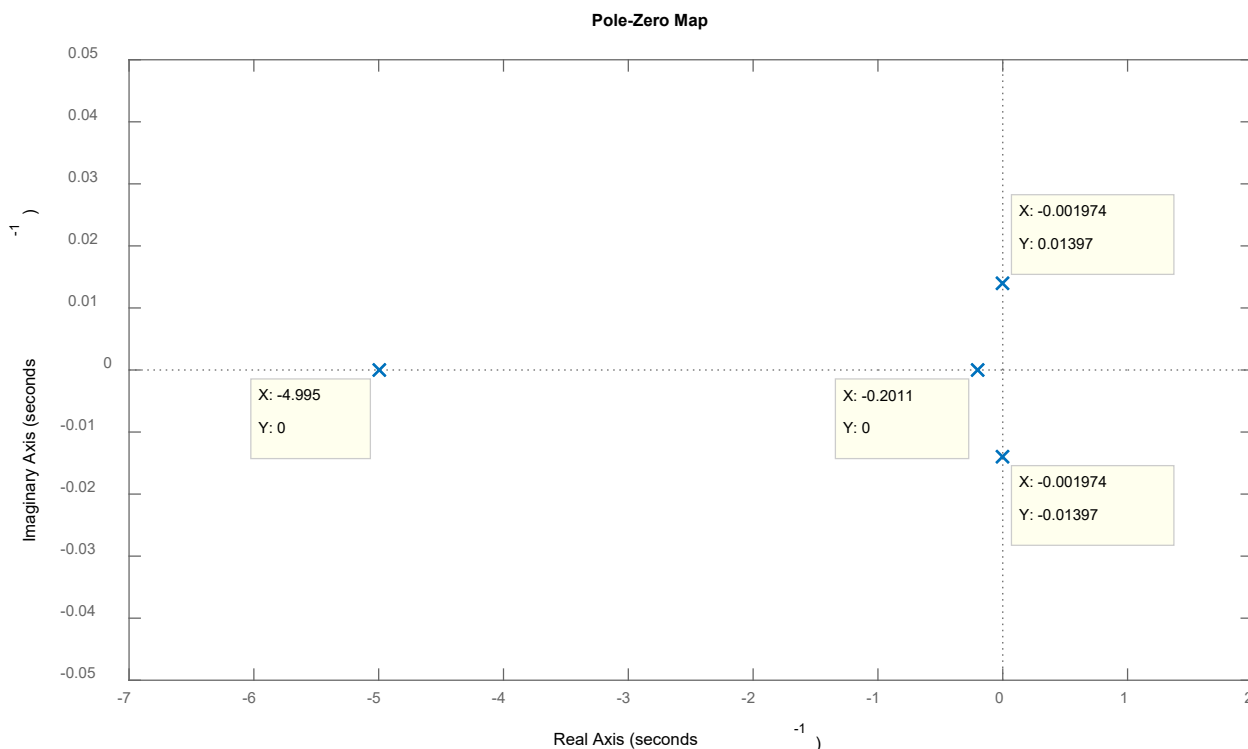


Рисунок 2.10 – Комплексная область для отображения нулей и полюсов

Так как ЗСАР устойчива, следующим этапом анализа является определение её прямых оценок качества.

Оценки качества системы управления. Существуют два типа оценок качества:

- Прямые оценки качества;
- Косвенные оценки качества.

Прямые оценки качества замкнутой системы анализируются по переходной характеристике [9].

Ввиду наличия в пакете MATLAB «Linear System Analyzer» возможности расчета четырех оценок качества, а именно: время регулирования, время нарастания, время достижения первого максимума и перерегулирование, расчеты с данными характеристиками проводится не будет или будут сведены к минимуму. Все полученные результаты будем вносить в таблицу 2.4.

Для работы с MATLAB «Linear System Analyzer», необходимо было произвести аналогичные действия как было показано на рисунке 2.8. Далее, в открывшемся окне нажать правой кнопке на любое место в области, затем навести на «Characteristics» и выбрать все пункты: «Peak Response», Rise Time, Settling Time, Steady State».

Характеристика 1. Время регулирования (settling time), T_{set} – это время требуемое для достижения системы установившегося значения, т.е. u_{ss} .

Для определения времени регулирования, допустимое отклонение принято брать как 2 процента.

В связи с чем убедимся в том, что в MATLAB «LTI Viewer» выставлено именно это значение. Открываем «Linear System Analyzer», как это было описано ранее, затем после нажатия правой кнопки мыши по графику переходим в пункт «Properties». Внутри появившегося окна заходим в «Options», где после надписи «Show settling time within», на рисунке 2.11 видим наше число 2.

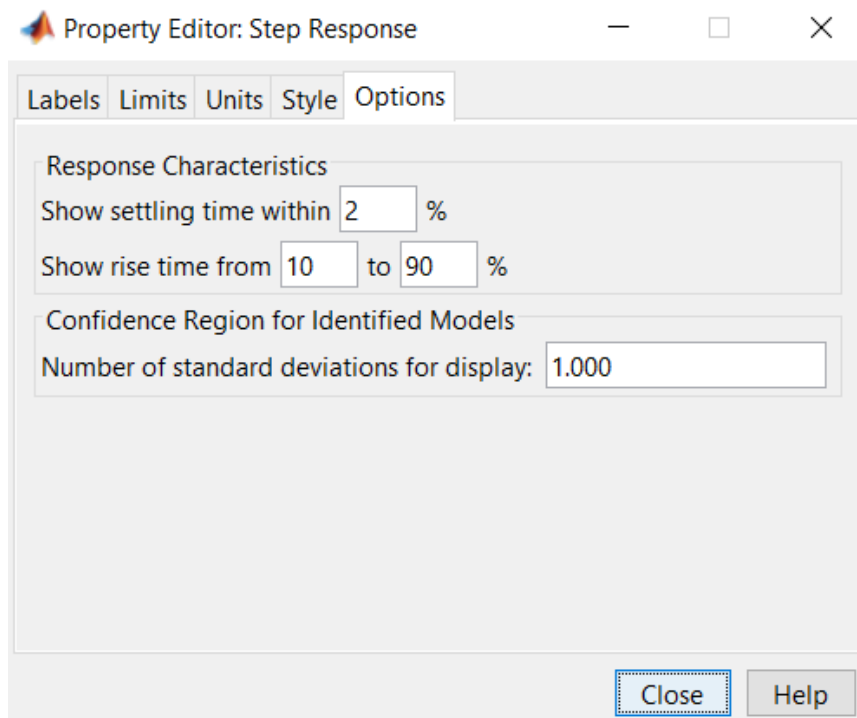


Рисунок 2.11 – Настройки MATLAB LTI Viewer

MATLAB автоматически выставляет границы допустимого значения и отображает точку в которой происходит вхождения сигнала в эти границы, время совершения данного события и есть время регулирования. В нашем случае он равен:

$$T_{set} = 128 \text{ с}$$

Характеристика 2. Перерегулирование (overshooting), P_{ov} – это оценка, показывающая максимальную степень превышения от желаемого значения в процентах.

Для нахождения перерегулирования необходимо знать максимальное значение выходного сигнала y_{max1} . На рисунке 2.14, видно, что его значение равно 1,64. Желаемое значение равно единице. Само же перерегулирование вычисляется согласно формуле:

$$P_{ov} = \frac{y_{max1} - y_{ss}}{y_{ss}} * 100\% = \frac{1.64 - 1}{1} * 100\% = 64\%$$

Характеристика 3. Число колебаний, M – это число колебаний переходного процесса в течении времени регулирования T_{set} .

Для определения данной оценки существуют два способа: первый – графический, второй – аналитический. Воспользуемся сначала первым способом. На рисунке 2.14, видно, что количество всех колебаний, не входящих в границы допустимого значения составляет 4. В этом можно убедиться применив второй способ. Число колебаний в этом случае рассчитывается следующей формулой:

$$M = \frac{T_{set}}{T_{osc}} \quad (18)$$

Так как на данный момент, значение T_{osc} мы не знаем, оставим его вычисление до того момента когда получим его, а пока перейдем к следующим оценкам качества.

Характеристика 4. Колебательность, μ – оценка характеризующая степень затухания колебаний у системы в процентах.

Рассчитывается она по следующей формуле:

$$\mu = \frac{\Delta y_{max2}}{\Delta y_{max1}} * 100\% = \frac{|y_{max2} - y_{ss}|}{|y_{max1} - y_{ss}|} * 100\% \quad (19)$$

По графику определим значения первого и второго пикового значения y_{max1} и y_{max2} соответственно. Таким образом их значения равны:

$$\begin{aligned} y_{max1} &= 1.64 \\ y_{max2} &= 0.26 \end{aligned}$$

Тогда, согласно формуле (19), колебательность системы равна:

$$\mu = \frac{\Delta y_{max2}}{\Delta y_{max1}} * 100\% = \frac{|0.26 - 1|}{|1.64 - 1|} * 100\% = 40.63\% \sim 41\%$$

Характеристика 5. Период колебаний T_{osc} и частота колебаний ω_{osc} определяются графически. Период колебаний – это минимальное расстояние между соседними вершинами. Его значение равно:

$$T_{osc} = 671.4 - 223 = 448.4 \text{ с}$$

Частота колебаний рассчитывается по следующей формуле:

$$\omega_{osc} = \frac{2\pi}{T_{osc}} = 0.014 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Теперь зная период колебаний, можем определить значение M аналитически. Для этого воспользуемся формулой (18) и вычислим значение характеристики 3:

$$M = \frac{T_{set}}{T_{osc}} = \frac{1860}{448.4} = 4.1481 \sim 4$$

Таким образом, графический и аналитический методы по нахождению количества колебаний M дали одинаковый результат, который составил 4.

Характеристика 6. Установившаяся ошибка, e_{ss} – оценка, численно равная пределу от динамической ошибки $e(t)$ при времени t стремящейся к бесконечности.

Задающий сигнал – ступенчатое воздействие. Схема для определения установившейся ошибки изображена на рисунке 2.12.

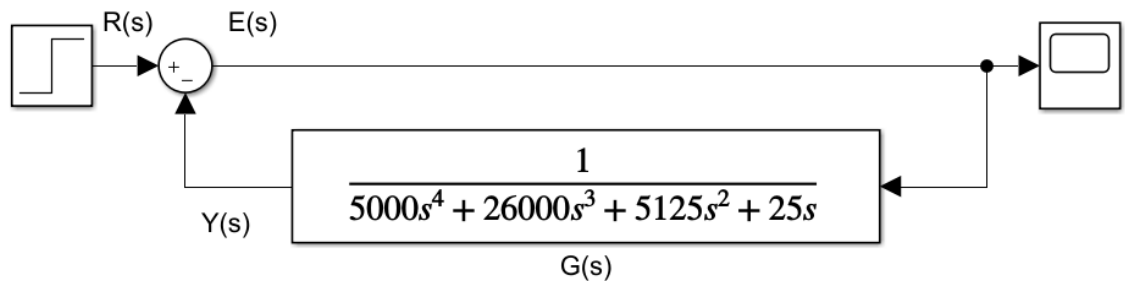


Рисунок 2.12 – Схема для исследования точности системы

Для нахождения статической ошибки необходимо выполнить следующее шаги:

1 Шаг. Получим передаточную функцию замкнутой системы по ошибке относительно задающего воздействия.

$$\begin{aligned} T(s) = \frac{E(s)}{R(s)} &= \frac{1}{1 + G(s)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s}} = \\ &= \frac{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s + 1} \end{aligned}$$

2 Шаг. Получим выражение динамической ошибки в форме Лапласа:

$$\begin{aligned} \frac{E(s)}{R(s)} &= \frac{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s + 1} \\ E(s) &= \frac{1}{s} * \frac{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s + 1} \end{aligned}$$

3 Шаг. Определим статическую ошибку:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} [s * E(s)] =$$
$$= \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{s}{s} * \frac{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s + 1} \right] = \frac{0}{1} = 0$$

Характеристика 7. Время достижения первого максимума, T_p – время при котором процесс достигает своего пикового значения.

По рисунку 2.14 видно, что его значение равно:

$$T_p = 223 \text{ с}$$

Характеристика 8. Время нарастания (rise time), T_R – время, которое требуется для того, чтобы переходной процесс пересек установившееся значение выходного сигнала.

Так как, ЗСАР (16) имеет колебательный процесс, в MATLAB для отображения правильного значения, T_R необходимо выставить диапазон от 0 до 100 процентов от y_{ss} , как это показано на рисунке 2.13.

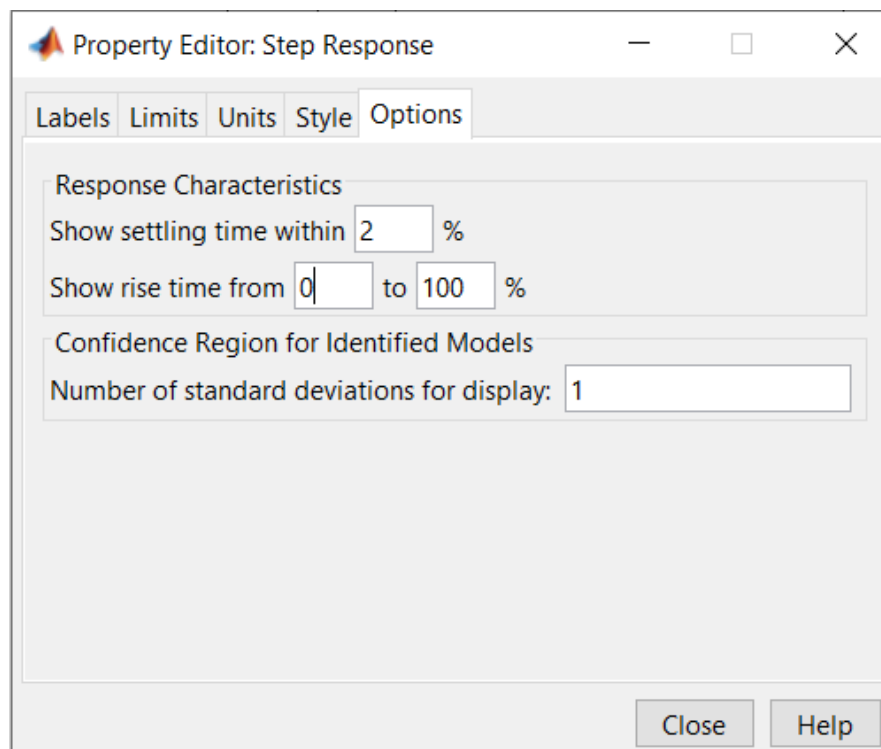


Рисунок 2.13 – Окно настроек LTI Viewer

После изменения настроек получили значение времени нарастания:

$$T_R = 128 \text{ с}$$

Характеристика 9. Декремент затухания, χ – отношение модулей двух смежных перегулирований. Вычисляется данная оценка по следующей формуле:

$$\chi = \frac{|y_{max1} - y_{ss}|}{|y_{max2} - y_{ss}|} = \frac{|1.64 - 1|}{|0.26 - 1|} = 2.4615 \sim 2.46$$

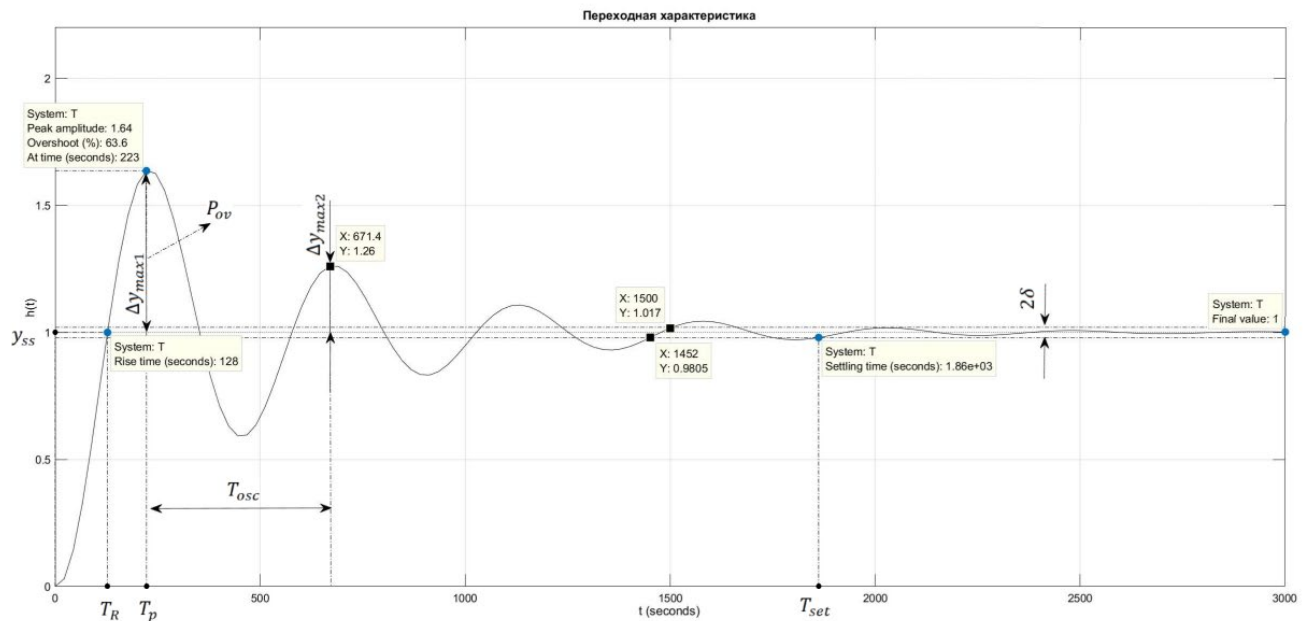


Рисунок 2.14 – Переходная характеристика с прямыми оценками качества

Косвенные оценки качества определяются по:

- полюсам (корневые);
- частотным характеристикам (частотные).

Косвенные оценки качества позволяют определить все прямые оценки без переходной характеристики. Из дополнительных косвенных оценок качества, которых нельзя определить «прямо», является степень устойчивости. Данная оценка качества показывает на сколько система устойчива. Находится же степень устойчивости η путем нахождения абсолютного значения минимальной действительной части, σ из всех полюсов системы:

$$s_{1,2} = \sigma \pm j\omega_d$$

$$\eta = |\sigma_{min}|$$

Так, степень устойчивости системы (16) равна 0.002. В этом можно убедиться посмотрев на рисунок 2.10.

Вследствие чего, можем сделать вывод, что система близка к границе устойчивости. Это плохой показатель.

Таблица 2.4 – Прямые оценки качества без регулятора

	№	Оценка качества	Обозначение	Значение	Норма	Соответствие требованиям
Прямые оценки качества						
Основные	1	Время регулирования	T_{set}	1860	–	–
	2	Перерегулирование	P_{ov}	63,6	10–30%	Не соответствует
	3	Число колебаний	M	4	1–2	Не соответствует
	4	Колебательность	μ	41%	–	–
	5	Частота колебаний	ω_{osc}	0.0022	–	–
	6	Установившаяся ошибка	ε_{ss}	0	0	Соответствует
Дополнительные	7	Время достижения первого максимума	T_p	223	–	–
	8	Время нарастания	T_R	128	–	–
	9	Декремент затухания	χ	2,46	–	–
Косвенные оценки качества						
	1	Степень устойчивости	η	0.002	–	–

Вывод: у замкнутой системы без регулятора значение перерегулирования составило 63.6 процентов, что превышает норму в 30 процентов для проектирования систем. Другим недостатком системы является его число колебаний. Это число составило 4, что также не соответствует желаемым требованиям к системе. Главной особенностью системы регулирования уровня в барабане парового котла является его инерционность. Тому подтверждение его время регулирования, которое составило 1860 секунд или 31 минута. Установившаяся ошибка у системы равна нулю, поэтому можем утверждать, что замкнутая система без регулятора точная. Ввиду того, что остальные прямые оценки качества не поддаются стандартизации, т.е. не имеют своих норм, анализ этих оценок не представляется возможным и вследствие чего при синтезе регулятора из них будут вычисляться только некоторые. Подводя итоги по анализу прямых оценок качества системы делаем заключение о необходимости синтеза типового регулятора. С целью улучшения перерегулирования в регулятор введем пропорциональную, а с целью же уменьшения количества

колебаний добавим дифференциальную составляющие. Так как система без регулятора точная, добавление интегрирующей составляющей избыточно. Таким образом будущий регулятор должен быть – ПД регулятор.

2.3 Синтез системы управления

Постановка задачи: для математической модели разомкнутой системы управления (14) необходимо синтезировать типовой ПД–регулятор на основе эмпирического метода Циглера–Никольса 2 (ZN#2) – «The closed Loop Tuning method» для достижения желаемой динамики системы:

- Перерегулирование: необходимо уменьшить минимум до 10 процентов;
- Число колебаний: количество колебаний должно быть меньше 2.

Закон управления ПД –регулятора имеет вид:

$$u(t) = k_p * e(t) + k_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

Передаточная функция ПД –регулятора:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + k_d * s \quad (21)$$

Для настройки растопочного регулятора на производстве в основном используется метод настройки в режиме реального времени. Недостатками такого метода является большие колебания уровня питательной воды во время пуска котла, которые можно было наблюдать на рисунке 1.6 и его периодическая перенастройка.

В данном дипломном проекте попытаемся предложить альтернативу данному методу с помощью следующих двух методов настройки регуляторов:

- Метод Циглера – Никольса 2;
- Автоматическая настройка «Auto-tune» MATLAB.

Метод Циглера Никольса 2. Причиной выбора настройки регулятора методом Циглера – Никольса 2 (ZN#2) послужил колебательный переходной процесс нашей системы и его большой порядок.

Алгоритм метода содержит следующие шаги:

Шаг 1. Включим в схему П – регулятор с неизвестным параметром, K_{cr} . Данная схема изображена на рисунке 2.15.

Передаточная функция П – регулятора выглядит следующим образом:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_{cr}$$

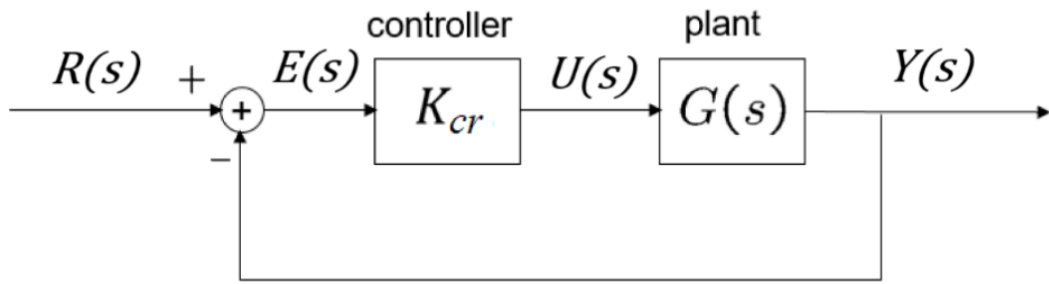


Рисунок 2.15 – Схема замкнутой системы с П–регулятором

Получим передаточную функцию замкнутой системы:

$$\begin{aligned}
 T(s) &= \frac{G(s) * C(s)}{1 + G(s) * C(s)} = \frac{\frac{K_{cr}}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s}}{1 + \frac{K_{cr}}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s}} = \\
 &= \frac{K_{cr}}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s + K_{cr}} \quad (22)
 \end{aligned}$$

Шаг 2. Определим значение K_{cr} , в соответствии с критерием Гурвица [10]. Характеристическое уравнение системы (22) имеет вид:

$$(n = 4) \quad 5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s + K_{cr} = 0$$

Его параметры равны:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 5000 \\
 a_1 &= 26000 \\
 a_2 &= 5125 \\
 a_3 &= 25 \\
 a_4 &= K_{cr}
 \end{aligned}$$

Построим матрицу Гурвица:

$$H_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 26000 & 25 & 0 & 0 \\ 5000 & 5125 & K_{cr} & 0 \\ 0 & 26000 & 25 & 0 \\ 0 & 5000 & 5125 & K_{cr} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Найдем все определители миноров по главной диагонали матрицы (23):

$$\Delta_{11} = 26000$$

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} 26000 & 25 \\ 5000 & 5125 \end{vmatrix} = 133125000$$

$$\Delta_{33} = \begin{vmatrix} 26000 & 25 & 0 \\ 5000 & 5125 & K_{cr} \\ 0 & 26000 & 25 \end{vmatrix} = 3328125000 - 676000000K_{cr}$$

$$\Delta_{44} = \begin{vmatrix} 26000 & 25 & 0 & 0 \\ 5000 & 5125 & K_{cr} & 0 \\ 0 & 26000 & 25 & 0 \\ 0 & 5000 & 5125 & K_{cr} \end{vmatrix} = -125000K_{cr}(5408K_{cr} - 26625)$$

Применим критерий Гурвица для тех уравнений, где присутствует K_{cr} и объединим все в одну систему:

$$\begin{cases} K_{cr} > 0 \\ 3328125000 - 676000000K_{cr} > 0 \\ -125000K_{cr}(5408K_{cr} - 26625) > 0 \end{cases} \quad (24)$$

Найдем общее решение системы (24):

$$\begin{cases} K_{cr} > 0 \\ -676000000K_{cr} > -3328125000/(-676000000) \\ K_{cr} > 0 \text{ и } (-125000 * 5408K_{cr} + 125000 * 26625) > 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_{cr} > 0 \\ K_{cr} < 4.9233 \\ K_{cr} > 0 \text{ и } 125000 * 26625 > 125000 * 5408K_{cr}/(125000 * 5408) \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_{cr} > 0 \\ K_{cr} < 4.9233 \\ K_{cr} > 0 \text{ и } 4.9233 > K_{cr} \end{cases} \rightarrow 0 < K_{cr} < 4.9233$$

$$K1 < K_{cr} < K2,$$

где

$K1$ – нижний предел коэффициента усиления;

$K2$ – верхний предел коэффициента усиления.

Таким образом нижнее предельное значение равно 0, а верхнее 4.9233:

$$K1 = 0 \text{ и } K2 = 4.9233$$

По методу Циглера – Никольса 2 в качестве K_{cr} необходимо выбрать верхний предел коэффициента усиления, который соответствует колебательной границе устойчивости. В соответствии с этим, его значение равно

:

$$K_{cr} = 4.9233$$

Шаг 3. Построим переходной процесс с K_{cr} , изображенный на рисунке 2.16.

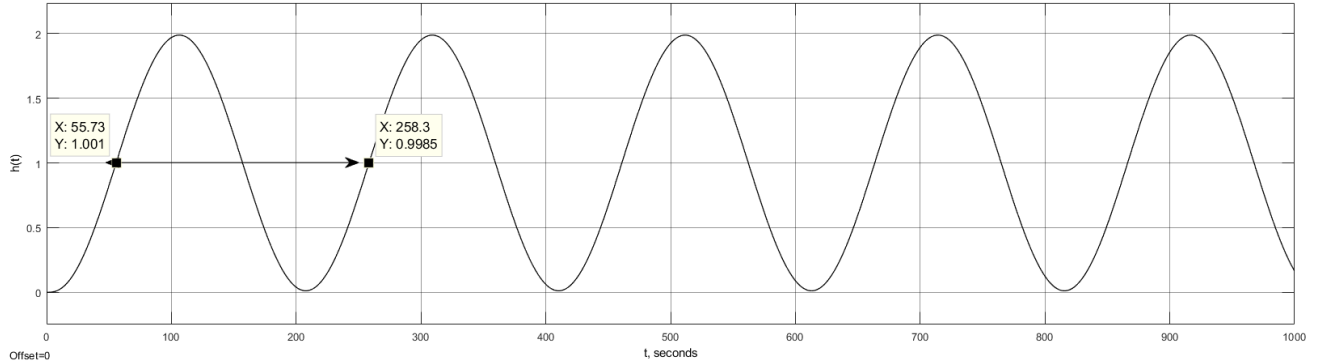


Рисунок 2.16 – Переходной процесс с постоянной амплитудой и частотой

Шаг 4. Определим период колебаний T_{cr} по колебательному процессу. Его значение равно:

$$T_{cr} = 258,3 - 55,73 = 202.57 \text{ с}$$

Шаг 5. Рассчитаем параметры типового ПД регулятора согласно таблице 2.5.

Для привычной работы с коэффициентами таблица 2.5 была взята с заменой переменных из статьи [11].

Таблица 2.5 – Параметры типового регулятора

Тип регулятора	K_P	K_I	K_D
P	$0.5 * K_{cr}$	–	–
PI	$0.45 * K_{cr}$	$\frac{K_P}{0.85 * T_{cr}}$	–
PD	$0.8 * K_{cr}$	–	$K_P * (0.12 * T_{cr})$
PID	$0.6 * K_{cr}$	$\frac{K_P}{0.5 * T_{cr}}$	$K_P * (0.12 * T_{cr})$

Таким образом, параметры ПД регулятора (21), равны:

$$\begin{cases} K_P = 0.8 * K_{cr} = 0.8 * 4.9233 = 3.9386 \\ K_D = 3.9386 * (0.12 * 202.57) = 95.7411 \end{cases} \quad (25)$$

Согласно выражению (20), закон управления ПД - регулятора имеет вид:

$$u(t) = 3.9386 * e(t) + 95.7411 * \frac{de(t)}{dt}$$

Получим результаты моделирования системы с ПД регулятором. Переходной процесс системы изображен на рисунке 2.17.

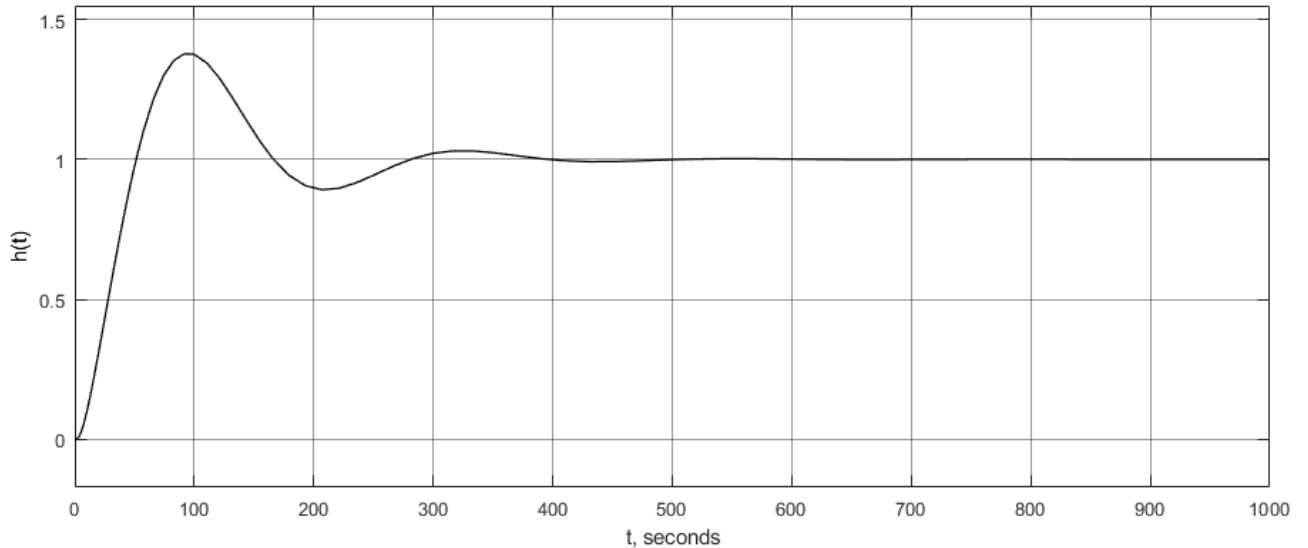


Рисунок 2.17 – Переходная характеристика системы

Степень устойчивости определим по полюсам системы, расположенных в комплексной области, изображенной на рисунке 2.18. Причина появления пятого, дополнительного полюса в системе описана в следующем пункте.

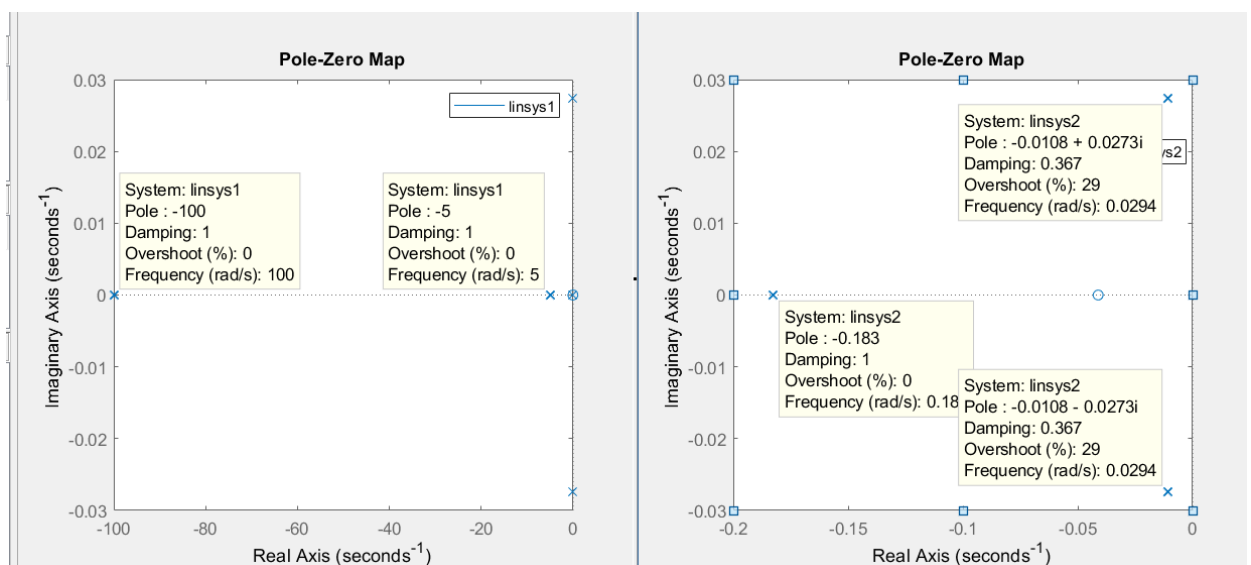


Рисунок 2.18 – Полюса системы с ПД регулятором настроенным методом Циглера–Никольса 2

По рисунку 2.18 видно, что степень устойчивости системы с регулятором составило 0.0108.

Для проверки выполнения регулятором поставленной задачи, получим прямые оценки качества системы. Прямые оценки можно получить напрямую с модели в MATLAB «Simulink», схема которой отображена на рисунке 2.19.

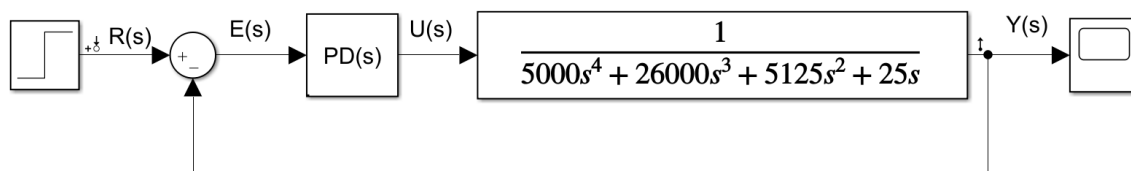


Рисунок 2.19 – Схема системы с ПД регулятором в MATLAB «Simulink»

Для это нужно нажать правой кнопкой мыши по линии входа и выхода системы и в выпадающем списке выбрать «Input Perturbation» для входного и «Output Measurement» для выходного сигналов. Затем, перейти по иконке «Analysis» и выполнить следующий переход, как это показано рисунке 2.20:

Control Design → Linear Analysis → Step response

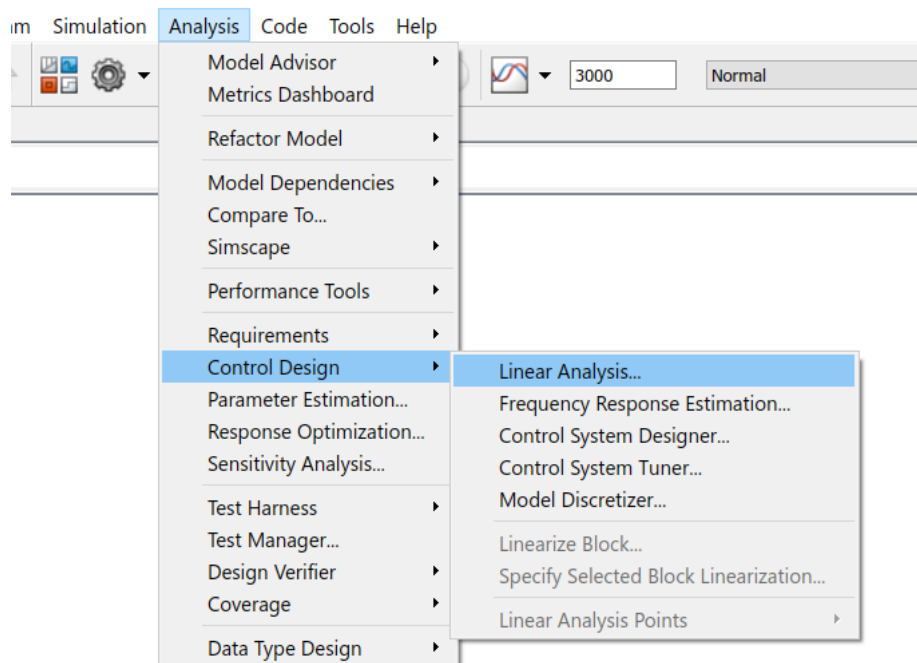


Рисунок 2.20 – Переход к получению прямых оценок качества

Далее, в открывшемся окне выставить все доступные оценки качества, как это было ранее показано в подразделе «Анализ системы управления», а именно в пункте «Оценки качества системы управления». В итоге, получили переходной процесс с прямыми оценками качества, изображенный на рисунке 2.21.

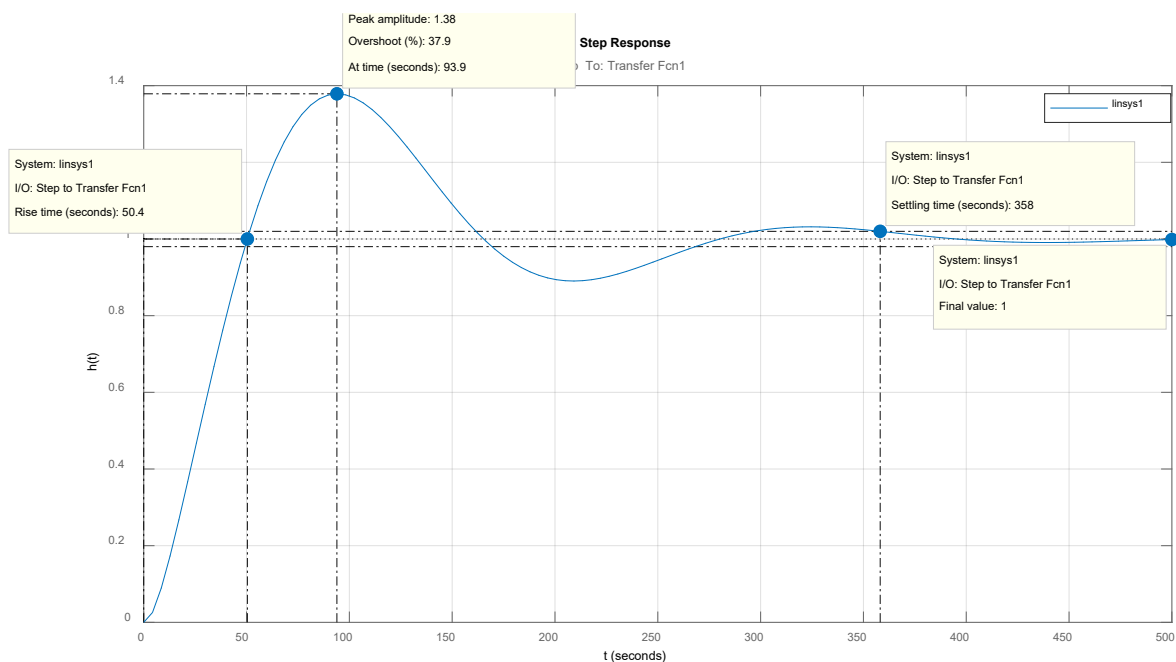


Рисунок 2.21 – Прямые оценки качества системы с ПД регулятором настроенным методом Циглера–Никольса 2

Полученные оценки внесем в сравнительную таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Сравнительная таблица оценок качеств

Оценка качества	Система без регулятора	Система с регулятором	Желаемые
Время регулирования (Settling Time)	1860 с	358 с	—
Перерегулирование (Overshot)	63.6 %	37.9 %	10 %
Установившаяся ошибка (Steady–State Error)	0	0	—
Время нарастания (Rise Time)	128 с	50.4 с	—
Время достижения первого максимума (Peak Response)	223 с	93.9 с	—
Число колебаний	4	2	0–1
Степень устойчивости	0.002	0.0108	—

Выводы: при сравнениях прямых оценок качества между системой с ПД регулятором и без выяснилось, что в системе с регулятором:

- уменьшилось время регулирования почти в 6 раз;
- снизилось перерегулирование, однако не достигло желаемого значения;
- увеличилась степень устойчивости почти в 5 раз;
- уменьшилось время нарастания и время достижения первого максимума почти в 2 раза;
- снизилось количество колебаний, но не достигло желаемого значения.

Так как полученный ПД регулятор не обеспечивает системе желаемой динамики, воспользуемся численным методом подбора параметров регулятора – «Fine Tuning».

Метод «Fine Tuning». Метод «Fine Tuning» предполагает наличие экспертных знаний в области теории управления и технологического процесса. Принцип данного метода заключается в пошаговых изменениях параметров регулятора и проверки отклика изменений по переходному процессу.

Он схож с обычной настройкой регуляторов в режиме реального времени, пользующейся большой популярностью на практике. Достоинства и недостатки данного метода расписаны в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Плюсы и минусы метода «Fine –tuning»

Достоинства	Недостатки
Простота	Медленный поиск параметров
Универсальность	

Для устранения основного недостатка метода попытаемся автоматизировать поиск параметров регулятора.

Так как перерегулирование и число колебаний в совокупности присуще только колебательной системе, постановку задачи можем интерпретировать следующим образом – необходимо изменить тип переходного процесса системы с ПД регулятором из колебательного в монотонный процесс или процесс с перерегулированием.

Из теории управления знаем, что наличие среди полюсов системы комплексных чисел говорит о наличии колебаний в системе. В следствии чего, делаем вывод, что для устранения колебаний необходимо подобрать такие параметры регулятора, при которых система будет иметь только вещественные полюса.

Заметка: ввиду наличия у ПД регулятора дифференцирующей составляющей, помимо полюсов на колебания влияют и существование нулей у системы. Вследствие чего, заранее можем сказать, что добиться монотонного процесса данным методом не удастся. Однако, улучшить динамику по логике размышления возможно. Проверим это на нашей системе.

Распишем алгоритм поиска параметров ПД – регулятора.

1 шаг – Определение начальных значений параметров регулятора. В качестве стартовой точки (K_{p0} , K_{d0}) примем параметры, найденные методом Циглера–Никольса 2 (25).

2 шаг – Для упрощения поиска примем, что D – составляющая является постоянной величиной, численно равно начальному значению, K_{d0} . Таким образом при поиске будет меняться лишь пропорциональная часть.

3 шаг – Определимся с направлением изменения Π составляющей.

Для этого сначала необходимо определить характеристический полином замкнутой системы с ПД регулятором. Структурная схема контура управления с ПД регулятором изображена на рисунке 2.22.

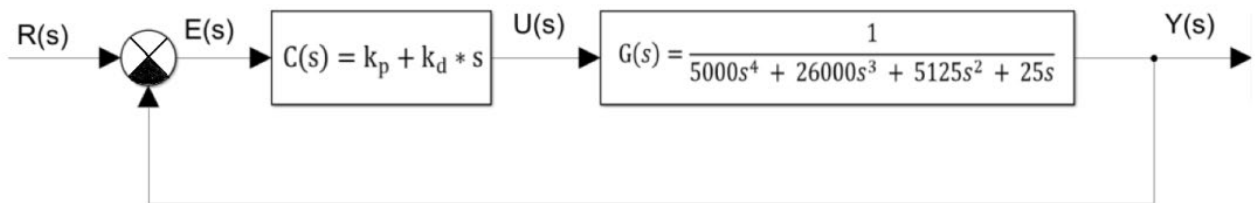


Рисунок 2.22 – Структурная схема контура управления с ПД регулятором

Передаточная функция системы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 T(s) &= \frac{G(s) * C(s)}{1 + G(s) * C(s)} = \frac{\frac{k_p + k_d * s}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s}}{1 + \frac{k_p + k_d * s}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + 25s}} = \\
 &= \frac{k_d * s + k_p}{5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + (25 + k_d)s + k_p} \quad (26)
 \end{aligned}$$

С выражения (26) видно, что характеристический полином системы равен:

$$D(s) = 5000s^4 + 26000s^3 + 5125s^2 + (25 + k_d)s + k_p \quad (27)$$

Теперь, зная выражение характеристического полинома (27), напишем цикл, в котором пропорциональная часть будет увеличиваться в диапазоне от « K_{p0} » до удвоенного значения « K_{p0} ». При этом в каждом цикле будет отслеживаться характер изменения полюсов, а именно уменьшаются ли их мнимые части. В случае если условие соблюдается, то в качестве направления изменения параметра взять его увеличение. В противном случае при поиске коэффициента « K_p » будем его уменьшать.

4 Шаг. Перебор параметров.

Напишем цикл, в котором, как и в предыдущем пункте будем изменять Π – составляющую с шагом 0.0001 (допустимая точность) до бесконечности, в случае если за направлением взято его увеличение или до нуля в противном

исходе. Помимо, проверки полюсов на отсутствие мнимой составляющей, будем проверять на отрицательность всех их действительных частей. Это необходимо для сохранения устойчивости системы.

Цикл остановится в двух случаях: если найдется такой коэффициент, при котором все полюса отрицательные и вещественные или если количество итераций достигнет максимального значения, определяющая средой программирования.

Всю данную логику перенесем в среду MATLAB. Листинг кода указан в Приложении И. Кроме того, для лучшего пояснения алгоритма поиска была создана его блок схема. Данную блок схему можно найти в Приложении Ж.

Запустим получившую программу и получим результат поиска параметров, который показан на рисунке 2.23.

```
ans =  
  
-4.9958 + 0.0000i  
-0.1781 + 0.0000i  
-0.0131 + 0.0001i  
-0.0131 - 0.0001i  
  
ans =  
  
-4.9958|  
-0.1781  
-0.0131  
-0.0130  
  
Result Kp=0.7605  
fx>> |
```

Рисунок 2.23 – Результат перебора параметров

Таким образом получили следующие значения параметров ПД регулятора:

$$\begin{cases} K_P = 0.7605 \\ K_D = 95.7411 \end{cases} \quad (28)$$

Полученные коэффициенты регулятора (28) внесем в математическую модель, схема которой указана на рисунке 2.22. Заметим, что по умолчанию передаточная функция в блоке ПД регулятора, имеет нестандартный вид, изображенный на рисунке 2.24.

☐ Compensator formula

$$P + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Рисунок 2.24 – Форма передаточной функции ПД регулятора с фильтром N

Здесь,

P – пропорциональная часть ПД регулятора, K_P ;

D – дифференциальная часть ПД регулятора, K_D .

Приведем данную форму к привычному нам виду:

$$C(s) = P + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} = P + D \frac{Ns}{s + N} = P + D \frac{Ns}{N(\frac{s}{N} + 1)} = P + D \frac{s}{(\frac{s}{N} + 1)} \quad (29)$$

Как видно из формулы (29), при увеличении значения фильтра N, его запись приходит к теоретической параллельной форме (21). В связи с чем, в качестве значения фильтра поставим число сто, как это показано на рисунке 2.25.

Хотелось также отметить, что пятый полюс у систем с регулятором, на комплексных областях, получается из – за наличия фильтра N в передаточной функции регулятора (29). Кроме того, после нескольких экспериментов было выявлено, что данный полюс, всегда равен значению минус N. В этом можно убедиться, посмотрев на комплексные плоскости, изображенные на рисунках 2.18 и 2.23. Так, в первом случае, вследствие того, что значение фильтра была равна сто, пятый полюс также был равен сто. Во втором это значение составило 0,373.

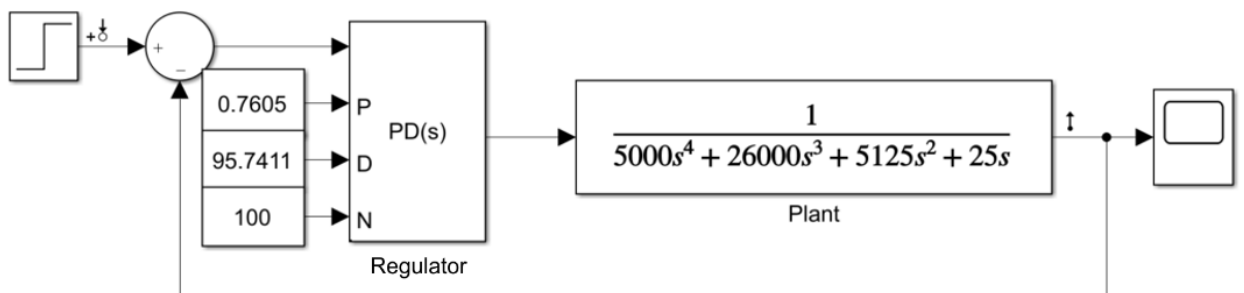


Рисунок 2.25 – Схема САР с ПД Регулятором

После завершения моделирования полученной системы, для проверки выполнения поставленной задачи синтеза регулятора, получим его прямые оценки. Пояснение их получения в «Simulink» было ранее описано в пункте нахождения параметров регулятора методом Циглера Никольса 2.

Прямые оценки качества системы изображены на рисунке 2.26.

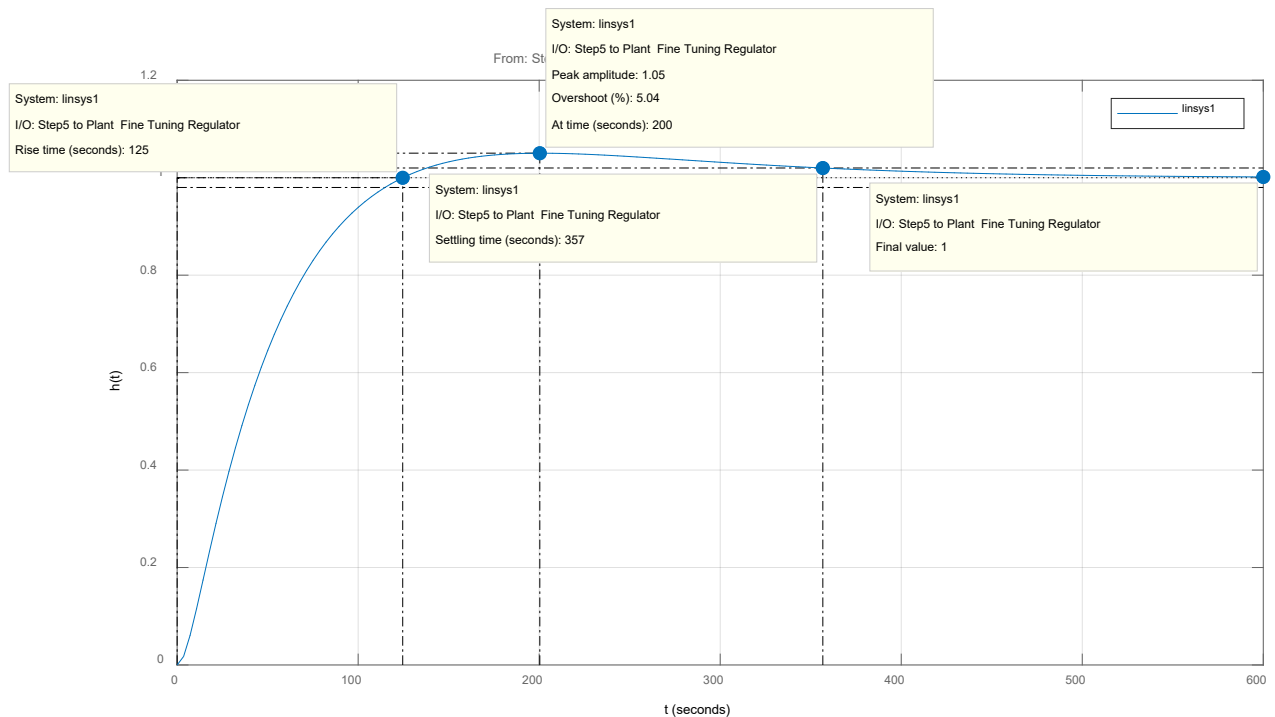


Рисунок 2.26 – Прямые оценки качества системы, настроенный методом «Fine-tuning»

Степень устойчивости определим по корням системы, указанных на рисунке 2.23. Все оценки качества внесем в таблицу 2.8 для сравнительного анализа полученных результатов. По рисунку 2.26, видно, что система сменила свой процесс с колебательного до процесса с перерегулированием, вследствие чего можем предварительно утверждать, что была решена поставленная задача синтеза регулятора.

Касательно колебаний, как было ранее упомянуто достичь монотонного процесса данным методом не предоставляется возможным. В качестве доказательства, получим переходной процесс передаточной функции системы (26) без нулей, его выражение можно увидеть на рисунке 2.27.

```

Result Kp=0.7605
>> tf([1],[5000 26000 5125 (25+Kd0) Kp])

ans =

          1
-----
5000 s^4 + 26000 s^3 + 5125 s^2 + 120.7 s + 0.7605

Continuous-time transfer function.

```

Рисунок 2.27 – Передаточная функция

Данный переходной процесс изображен на рисунке 2.28.

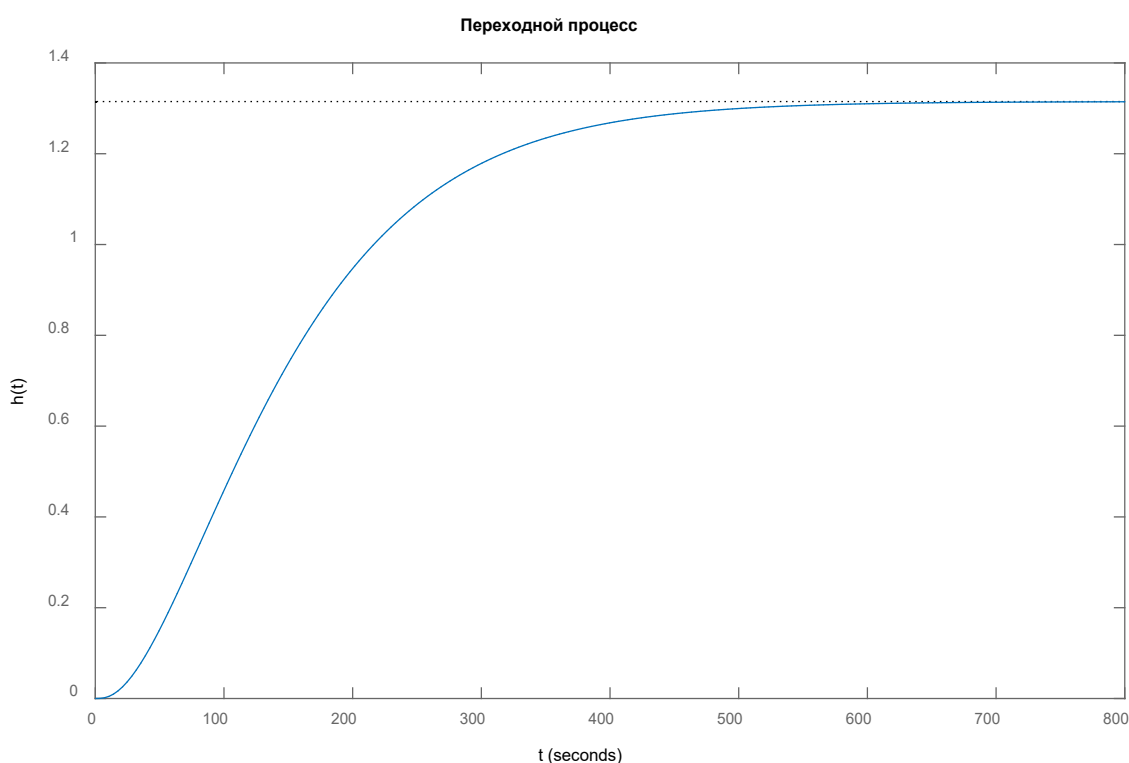


Рисунок 2.28 – Переходная характеристика системы

Как видно из рисунка 2.28, метод «Fine – Tuning» может гарантированно избавить систему от колебаний, но только в случае если система не имеет нулей. Однако несмотря на это, метод имеет целесообразность применяться при любых системах, так как влияние нулей на колебания не столь велики, в отличие от полюсов. Тому подтверждение, использованная в данной работе система.

Метод «Auto-tune» MATLAB. Для сравнения метода «Fine-tuning» воспользуемся автоматической настройкой регулятора в MATLAB. Алгоритм метода следующий:

1 шаг – Из библиотеки MATLAB в схему добавим ПД регулятор. Данный шаг продемонстрирован на рисунке 2.29.

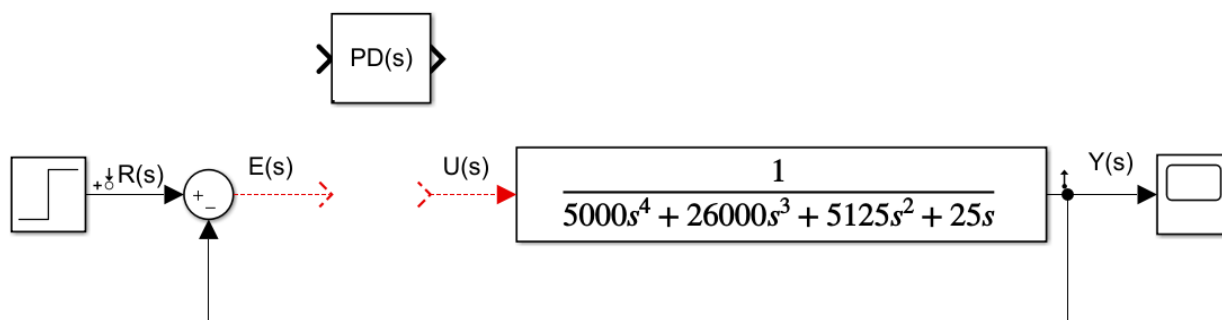


Рисунок 2.29 – Схема системы без регулятора

2 шаг – занесем регулятор в прямую цепь системы как это показано на рисунке 2.30.

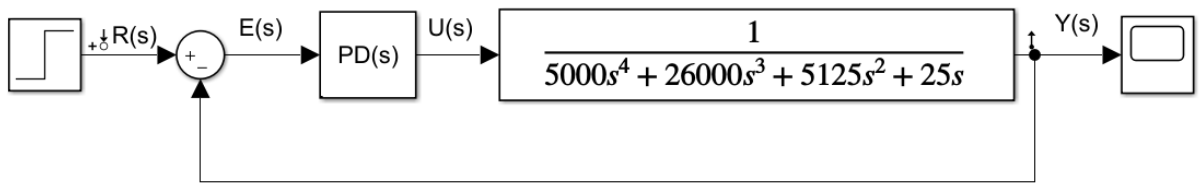


Рисунок 2.30 – Схема системы с регулятором

3 шаг – откроем блок ПД регулятора и нажмем на иконку «Tune» чтобы запустить «PID tuning tool», как на рисунке 2.31.

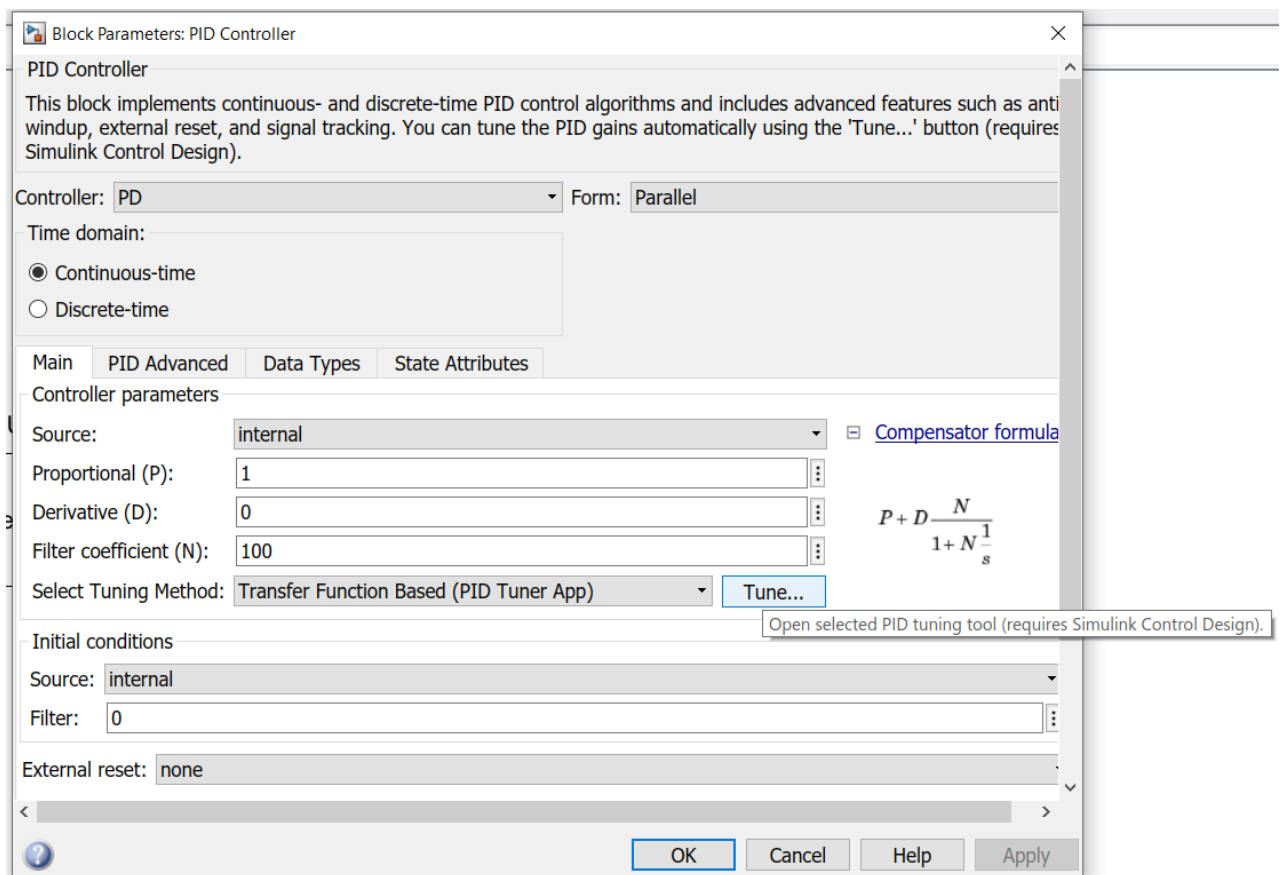


Рисунок 2.31 – Окно ПД регулятора

В нижней части открывшегося окна, изображенного на рисунке 2.32, после надписи «Controller Parameters», записаны готовые параметры регулятора, настроенные PID Tuner.

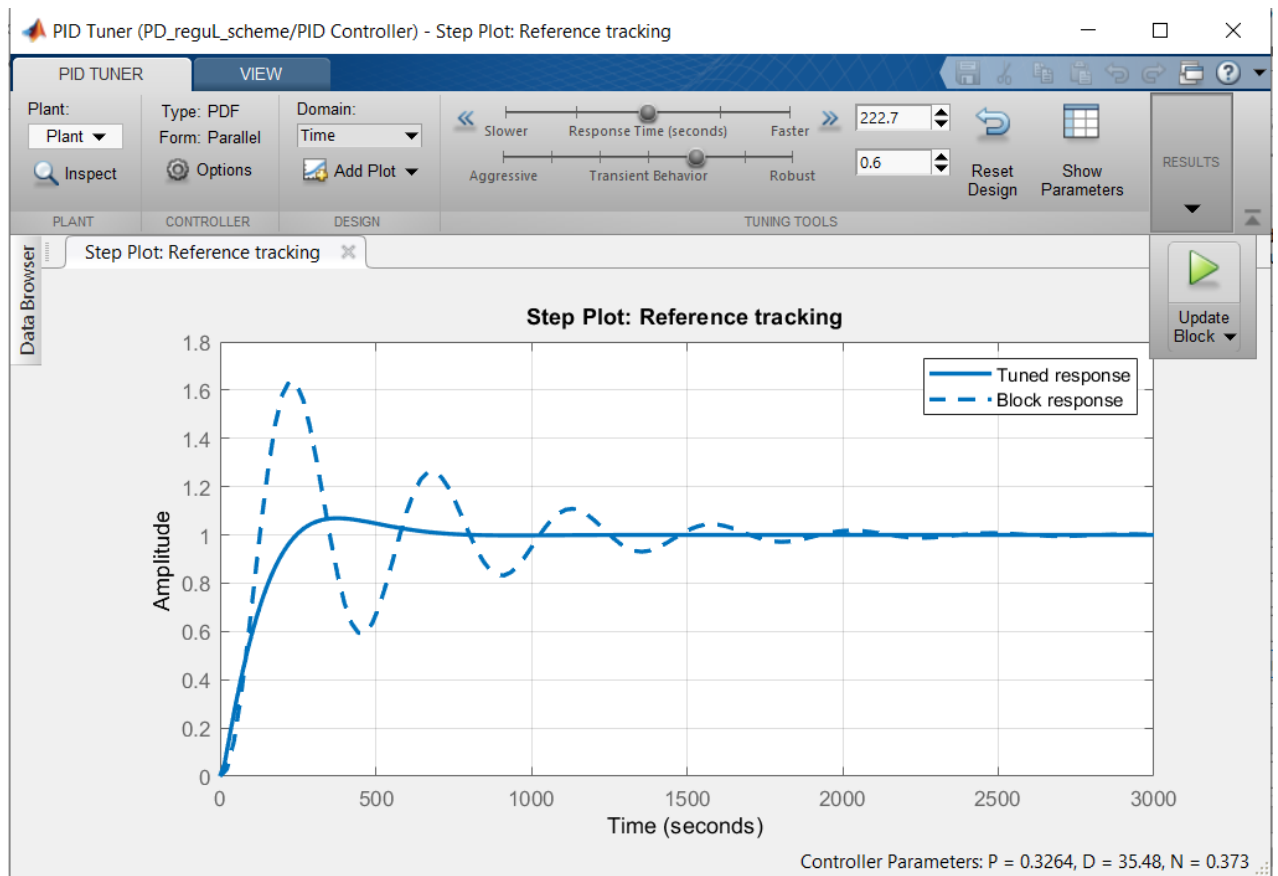


Рисунок 2.32 – Окно PID Tuner

Таким образом, параметры ПД регулятора, полученные методом автоматической настройки имеют вид:

$$\begin{cases} K_P = 0.3264 \\ K_D = 35.48 \end{cases} \quad (30)$$

Значение фильтра N, равна 0.373, как это было ранее упомянуто, при объяснении появления пятого полюса системы четвертого порядка (26).

Полюса системы, изображенной на рисунке 2.30, отображены на рисунке 2.34. Один из данных полюсов, равный 0.381, как раз и был создан вследствие отсутствия фильтра в регуляторе системы, так как их значения почти одинаковы. Об этом было сказано ранее.

Однако, без наличия фильтра в передаточной функции готового блока «PID regulator», пакета программного обеспечения MATLAB, «Simulink» было бы невозможно моделировать системы с регуляторами, имеющие дифференциальную составляющую. Вследствие чего, при моделировании схем имеющие Д, ПД или ПИД регуляторы, просто необходимо обращать в первую очередь на значение фильтра, затем найдя близкий к нему полюс, не учитывать его. Так как, он не является полюсом передаточной функции системы с регулятором составленной в форме без компенсатора (21).

Теперь, аналогично предыдущим методам, получим прямые оценки. Переходной процесс с прямыми оценками качества показан на рисунке 2.33.

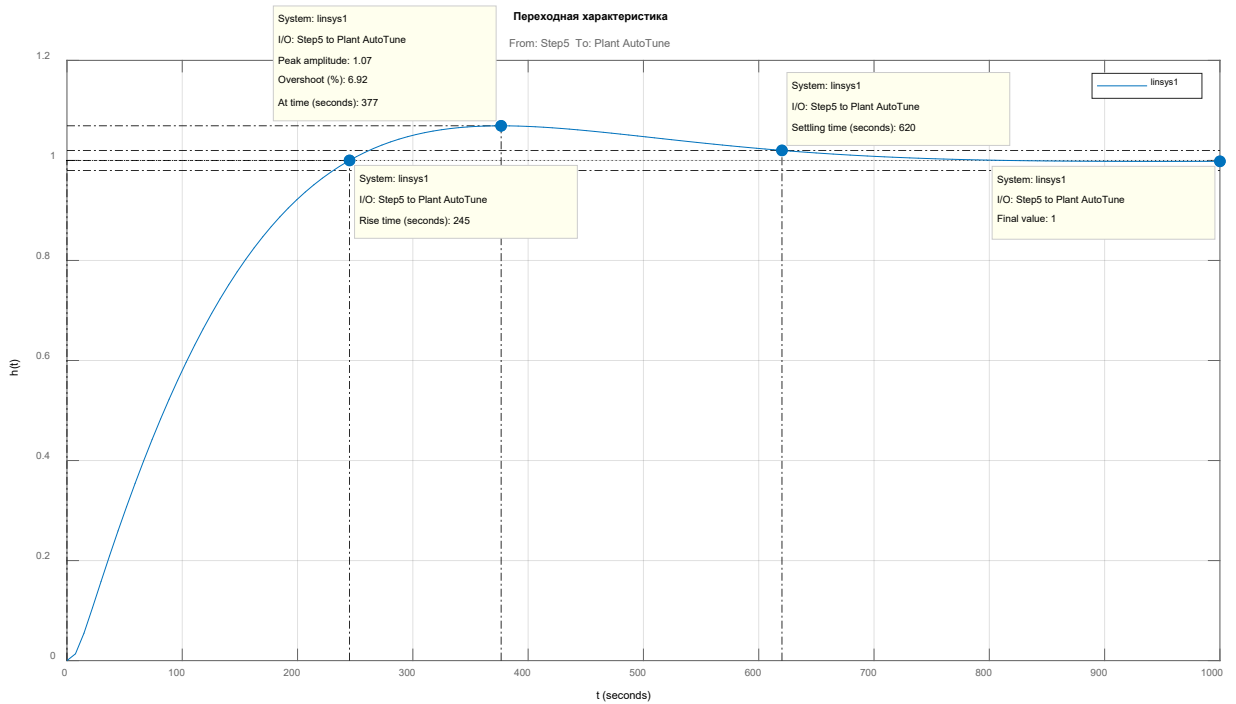


Рисунок 2.33– Прямые оценки качества

По комплексной области с полюсами системы, изображенной на рисунке 2.34, определим его степень устойчивости, а результат запишем в таблицу 2.8.

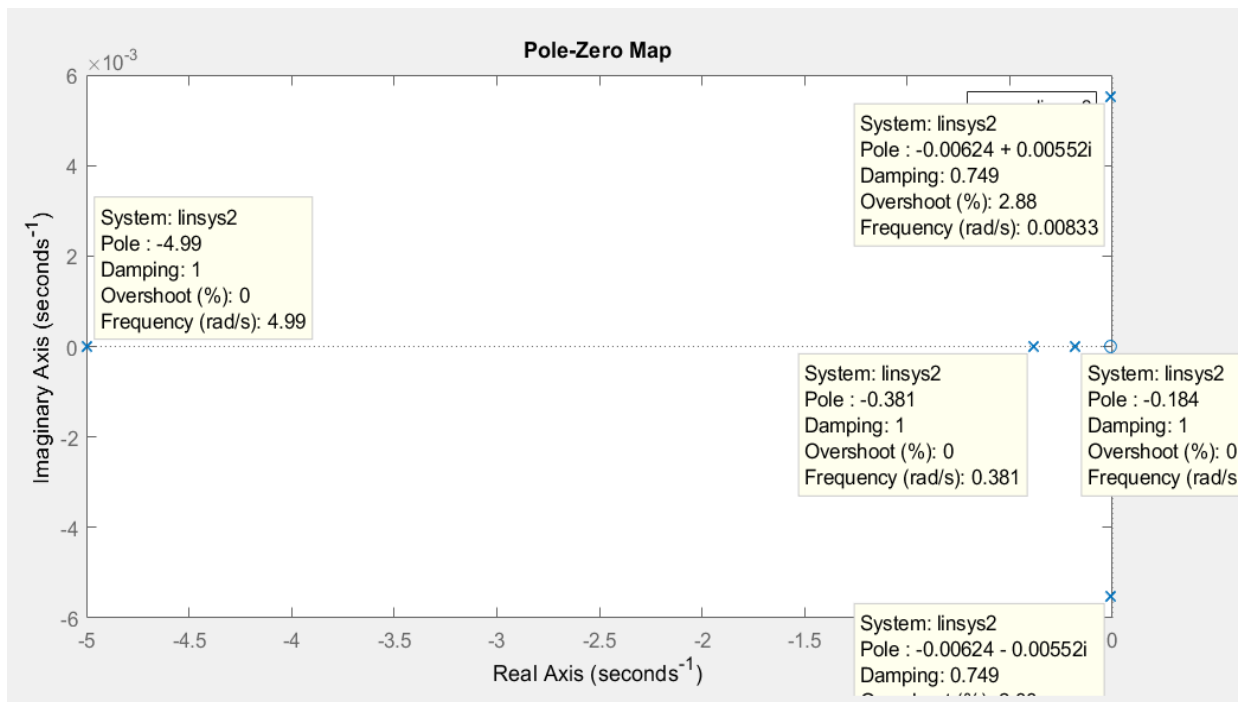


Рисунок 2.34 – Комплексная область с полюсами системы

Сравнительный анализ всех методов. Для анализа методов настройки регулятора, составим схему в «Simulink», которая показана на рисунке 2.35.

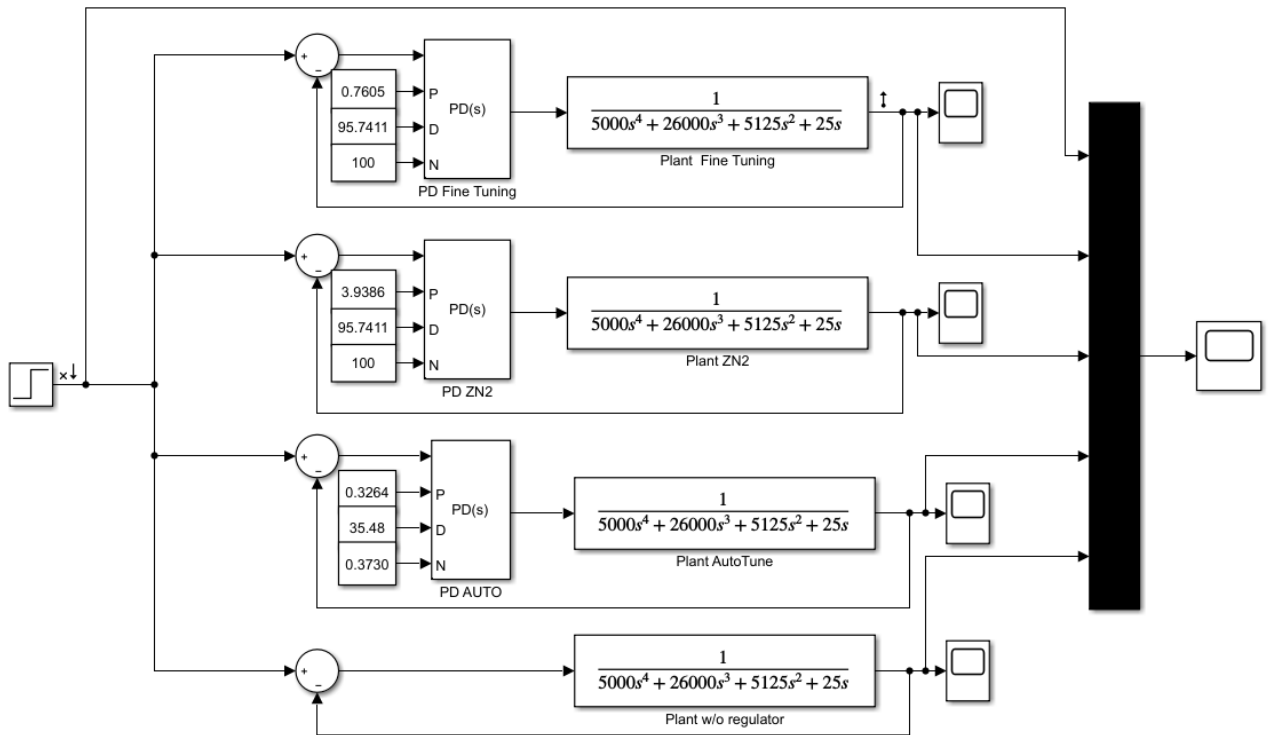


Рисунок 2.35 – Схема для сравнений методов настройки регулятора

В качестве результата синтеза регулятора, изобразим все использованные в данной работе методы вместе с системой без регулятора. Результат моделирования схемы, указанной на рисунке 2.35, изображена на рисунке 2.36.

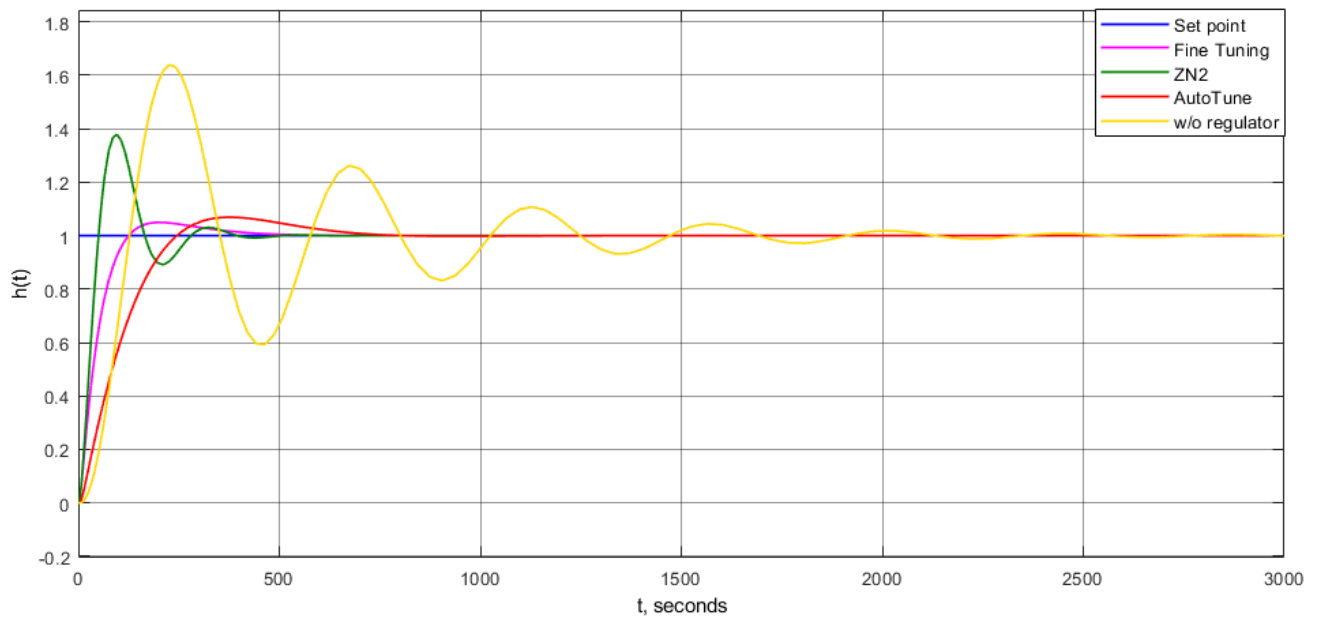


Рисунок 2.36 – Сравнительный график переходных процессов

В таблицу 2.8 помимо метода «Fine – tuning» и «Auto - tune», из таблицы 2.6 добавим оценки качества системы без регулятора (w/o regulator) и системы с регулятором, настроенным «ZN#2».

Таблица 2.8 – Сравнительная таблица методов настройки регуляторов

Оценка качества	w/o regulator	ZN#2	Auto – Tune	Fine – Tuning	Желаемые	Соответствие требованиям
Settling Time	1860 с	358 с	620 с	357 с	–	–
Overshot	63.6 %	37.9 %	6.92 %	5.04 %	10 %	Соответствует
Steady–State Error	0	0	0	0	–	
Rise Time	128 с	50.4 с	245 с	125 с	–	–
Peak Response	223 с	93.9 с	377 с	200 с	–	–
Число колебаний	4	2	0	0	1	Соответствует
Степень устойчивости	0.002	0.0108	0.0062	0.013	–	

Выводы: из таблицы 2.8 видно, что из трех только два метода обеспечили желаемую динамику системы, а именно:

- «Auto - tune»;
- «Fine – tuning».

Причем, оба метода дали хорошие результаты, так к примеру, в обоих случаях перерегулирование составило менее 10 процентов, а количество колебаний снизилось до нуля. Однако, если сравнивать два эти метода между собой, выбор останется за методом «Fine – tuning».

Причины:

- Наименьшее время регулирования;
- Наименьшее перерегулирование;
- Наименьшее время нарастания;
- Наименьшее время достижения первого максимума;
- Наибольшая степень устойчивости.

Таким образом, растопочный ПД регулятор питания, настроенный методом «Fine–tuning» решил поставленную задачу синтеза регулятора, снизив значение перерегулирования с 63,6 до 5,04 процентов и количества колебаний с 4 до 0. Результаты остальных прямых оценок качества является следствием улучшения двух данных оценок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данного дипломного проекта была рассмотрена задача разработки системы автоматического регулирования котельного агрегата. В качестве объекта изучения был выбран котельный агрегат Е – 250 – 9.8 – 545 КТ, являющийся действующим КА № 3 на ГРЭС «Топар».

В первой части было изложено описание устройства котельного агрегата и его роли в составе электростанции. Так как АСУ ТП КА №3 управляет процессами в масштабе котельной установки, а не только агрегата, был предоставлен принцип работы и описание технологических процессов котельного агрегата именно в её составе. Были описаны взаимосвязи основных параметров котлоагрегата. На их основании было определено из каких ЛСУ состоит АСУ ТП. Поскольку одним из ключевых условий стабильной работы парового котла является поддержание уровня питательной воды в его барабане, из всех локальных систем в качестве рассмотрения была выбрана ЛСУ питания котла. Было решено взять в качестве контура управления - растопочный контур ЛСУ питания. Составлена его схема автоматизации. В конце главы, была поставлена задача формирования математической модели САР уровня в барабане котла при его пуске.

Во второй части на основе сформированной схемы автоматизации была разработана принципиальная схема САР. Согласно этой схемы была описана работа системы управления контура и получена его функциональная схема в виде блоков. По последней схеме, была получена математическая модель разомкнутой и замкнутой систем регулирования уровня воды в барабане котла при его пуске. Была проверена адекватность полученной системы на основе данных снятых с соседнего КА №4. Была решена задача её анализа. Устойчивость системы исследовали по переходной характеристике и первым методом Ляпунова. Как результат, замкнутая система устойчива. Были получены её оценки качества. На их основе, была поставлена задача синтеза ПД регулятора эмпирическим методом Циглера-Никольса 2 с целью улучшения динамики системы. После его синтеза, выяснилось, что данный метод не справился с поставленной задачей и в качестве замены, на базе основ ТАУ, был создан новый алгоритм поиска параметров регулятора метода «Fine-Tuning». В качестве сравнений был также использован метод автоматической настройки регулятора в MATLAB «Auto-tune». Была составлена сравнительная таблица всех полученных методов синтеза регулятора. Наилучший результат дал ПД регулятор, настроенный новым алгоритмом метода «Fine - Tuning», который решил задачу синтеза регулятора, обеспечив тем самым желаемую динамику системы и увеличив его степень устойчивости.

Модернизированный метод «Fine - Tuning» как показала практика способна улучшать оценки качества системы, при этом он производит автоматический поиск параметров, что устраняет главный недостаток оригинального метода.

Перечень принятых сокращений

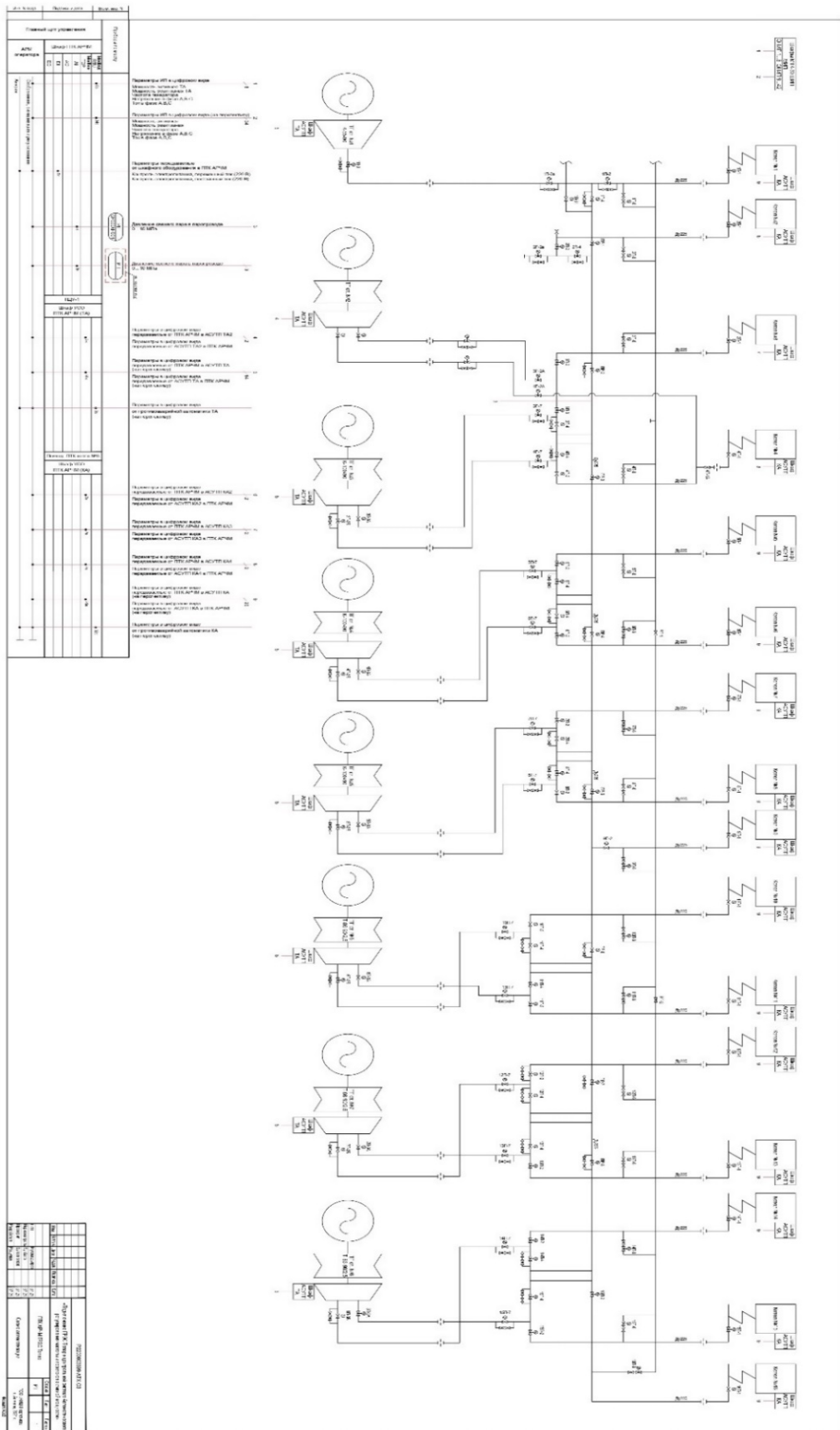
- МАЭС – мемлекеттік аймақтық электростанциясы
ТП АБЖ – технологиялық процестердің автоматтандырылған басқару жүйесі
- ҚА – қазандық агрегат
АРЖ – автоматты реттеу жүйесі
SDPP – state district power plant
APCS – automated process control system
BU – boiler unit
ACS – automatic control system
ГРЭС – государственная районная электростанция
АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическими процессами
- КА – котельный агрегат
САР – система автоматического регулирования
ТА – турбинный агрегат
ДС – дымосос
ДВ – дутьевой вентилятор
ПВД – подогреватель высокого давления
ПНД – подогреватель низкого давления
КН – конденсатный насос
К – конденсатор
ЭГ – электрогенератор
ПТ – паровая турбина
ПГ – парогенератор
Д – деаэратор
ПН – питательный насос
ОК – общий коллектор
ХВО – химводоочистка
ЦН – циркуляционный насос
РВ – резервуар (естественный источник)
ЗСАР – замкнутая система автоматического регулирования
РСАР – разомкнутая система автоматического регулирования
РК – регулирующий клапан
ТАУ – теория автоматического управления
УУ – устройство управления
Д регулятор – дифференцирующий регулятор
ПД регулятор – пропорционально – дифференцирующий регулятор
ПИД регулятор – пропорционально – интегрально – дифференцирующий регулятор

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Обливин А.Н., Воскресенский А.К., Семенов Ю.П. Основы гидравлики и теплотехники, М.: «Лесная промышленность», 1976. – 408 с.
- 2 Бойко Е.А. Паровые котлы. Учебное пособие, Красноярск: КГТУ, 2005. – 134 с.
- 3 Классификация ТЭС. Защита окружающей среды. Типы тепловых электростанций // Электронная версия на сайте: <https://studfile.net/preview/1761672/>
- 4 А.И. Качев. Руководство по эксплуатации котельной установкой с котлом Е-250 – 9,8 – 545 КТ. 79.00.000 РЭ, Барнаул: ГРЭС ТОО «Kazakhmys Energy», 2016. – 85 с.
- 5 С.И. Шкарлет, А.А. Ковальчук. Рабочая документация. Схемы автоматизации котла ст.3. «45 ГИП-15-01-АТХ1», Барнаул: ГРЭС ТОО «Kazakhmys Energy», 2016. – 26 с.
- 6 Системы автоматического регулирования паровых котлов. Барабанный котел как объект управления. // Электронная версия на сайте: <https://studopedia.org/12-2680.html>
- 7 ГОСТ 21.208-2013. Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Условные обозначения приборов и средств автоматизации в схемах. – М.: Изд-во стандартов, 2013 – 30 с.
- 8 Топчиев Ю.И., Цыпляков А.П. Задачник по теории регулирования. Учебное пособие для вузов - М.: «Машиностроение», 1977. – 592 с.
- 9 Ширяева О.И. Конспект лекций. Лекция #13. Прямые оценки качества системы, Алматы: КазНИТУ им. К.И.Сатпаева, 2021. – 35 с.
- 10 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп.– С-П.: «Профессия», 2004. – 752 с.
- 11 Boulent Bate. PID – Einstellregeln Spezialgebiete der Steuer-und Regelungstechnik WS 2008/2009. Dortmund Schriftliche Ausarbeitung, 2009. – P. 23.

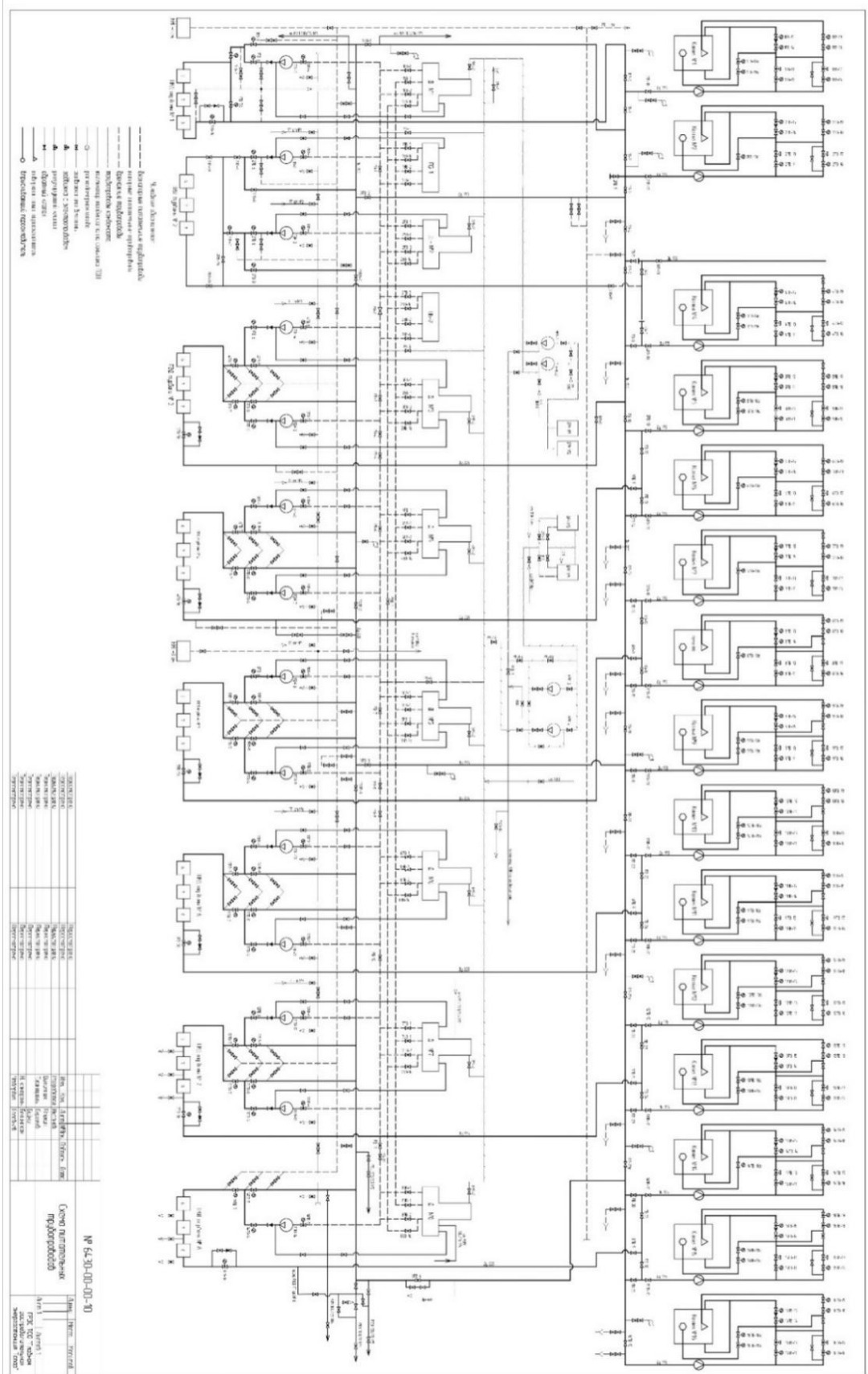
Приложение А

Схема подключения котлоагрегатов и турбоагрегатов на ГРЭС «Топар»



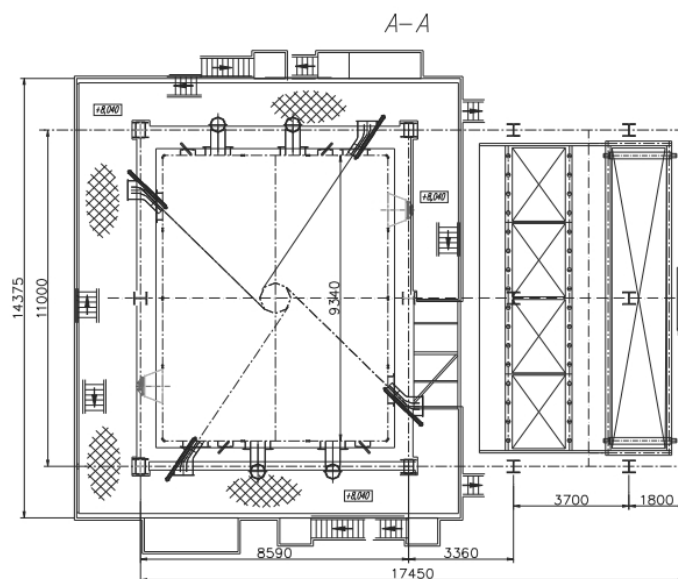
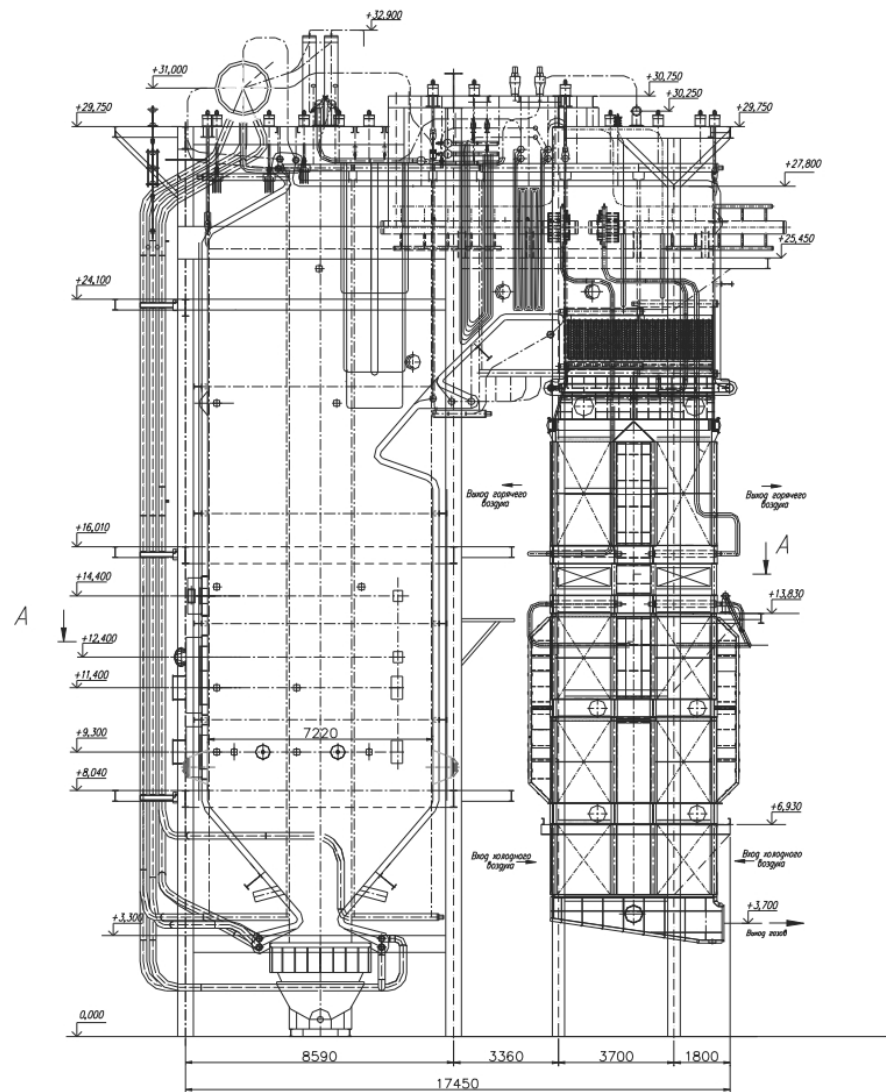
Приложение Б

Схема питательных трубопроводов



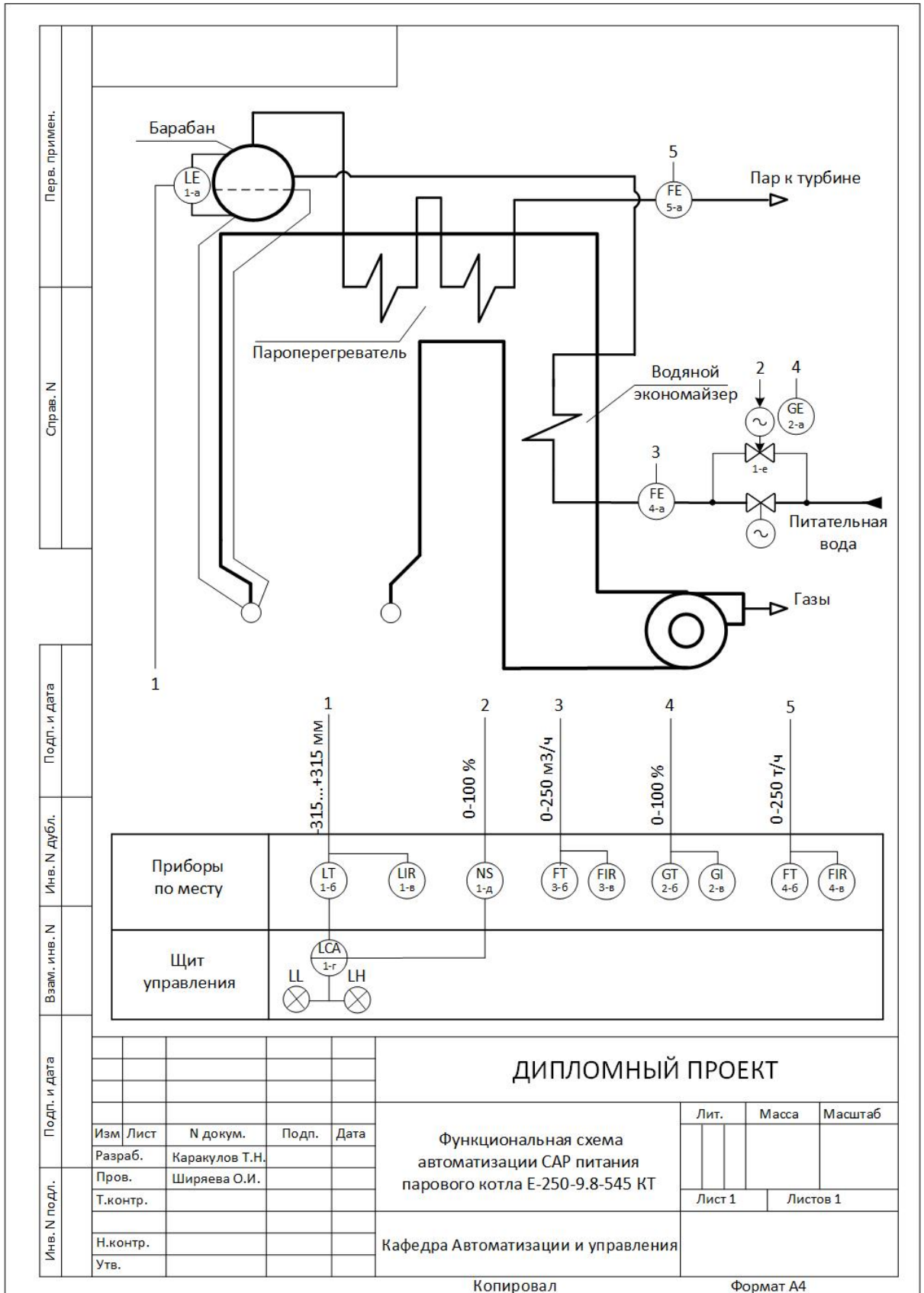
Приложение В

Общий вид парового котла Е-250-9,8-545 КТ



Приложение Г

Функциональная схема автоматизации (P&ID)



ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Функциональная схема автоматизации САП питания парового котла E-250-9.8-545 КТ

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Каракулов Т.Н.		
Пров.		Ширяева О.И.		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Лит.	Масса	Масштаб
Лист 1	Листов 1	

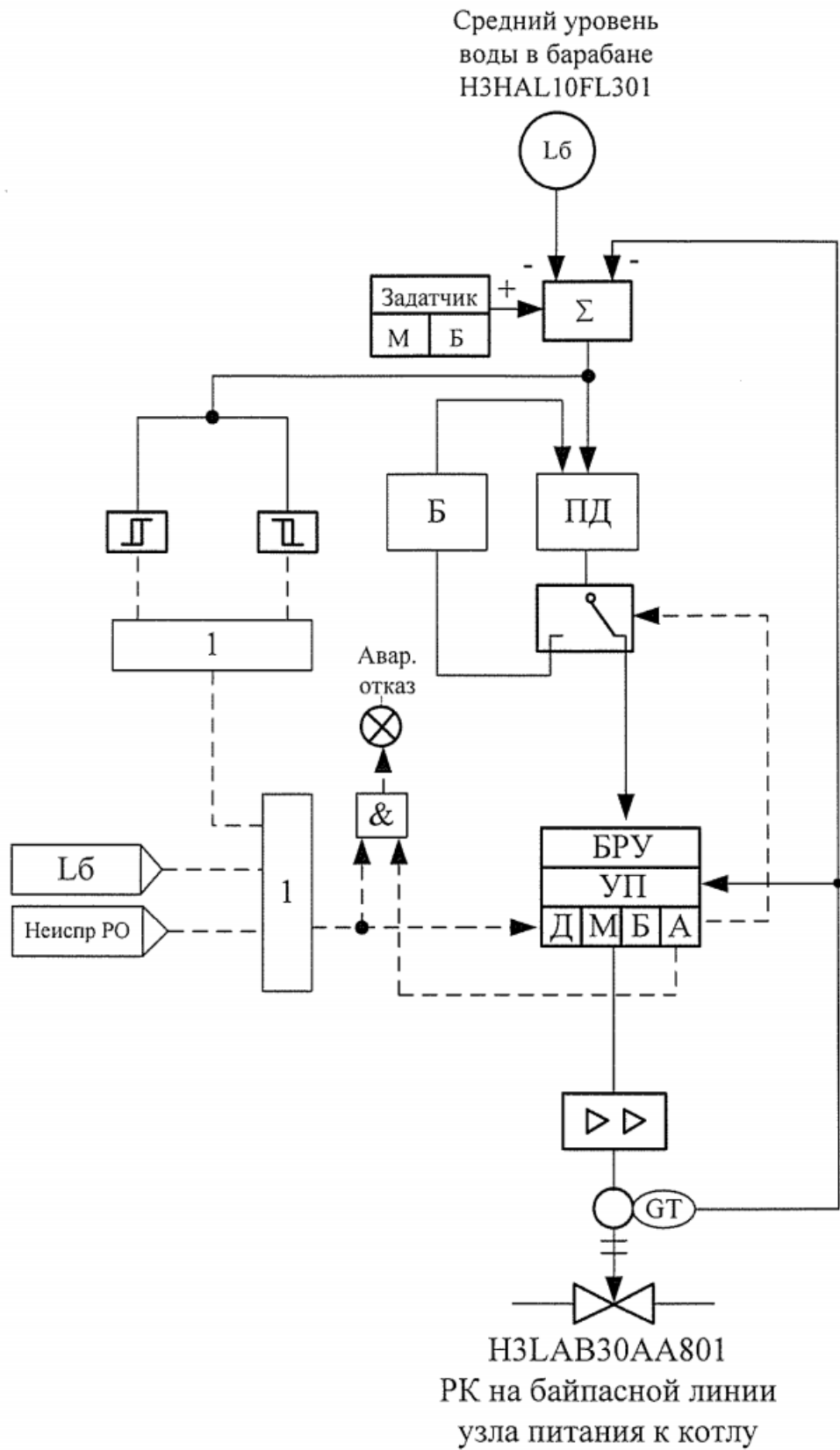
Кафедра Автоматизации и управления

Копировал

Формат А4

Приложение Д

Регулятор питания котла растопочный



Приложение Е

Электрическая схема реостатного датчика

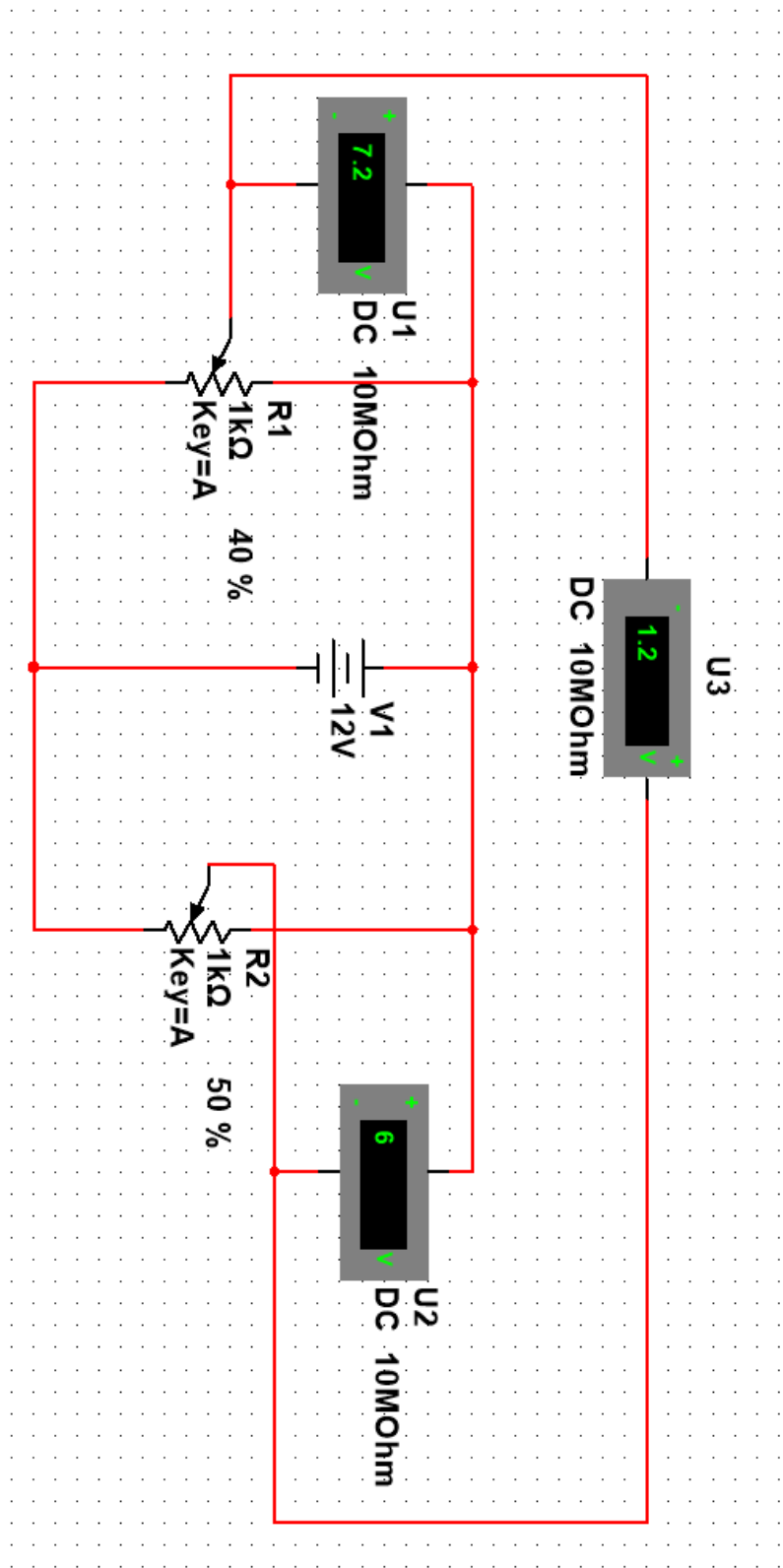
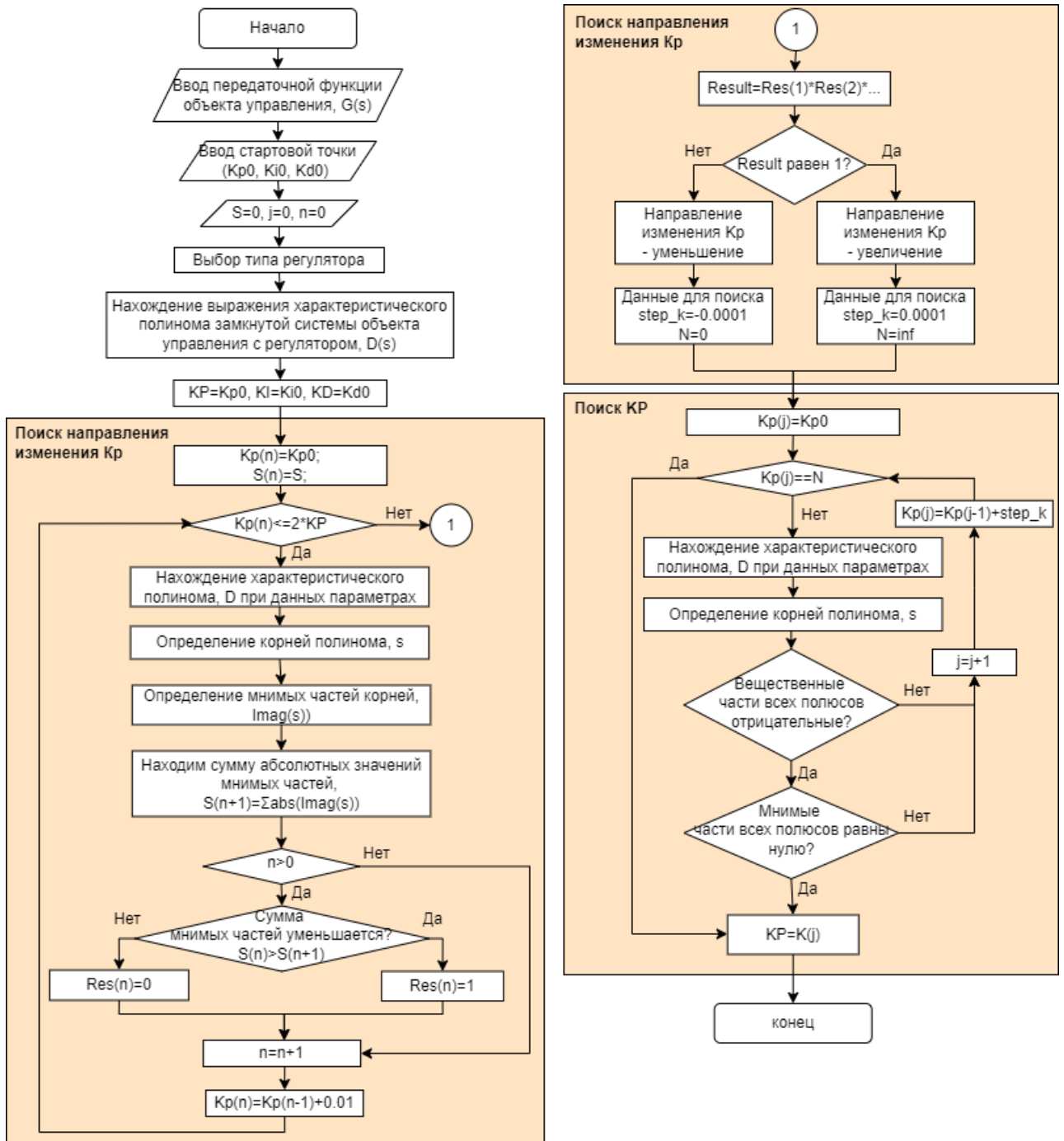


Рисунок Е.1 - электрическая схема потенциометрического(реостатного) датчика (симулятор - Multisim)

Приложение Ж

Блок схема алгоритма для метода «Fine-tuning»



Приложение И

Листинг алгоритма метода «Fine – tuning»

```
%start point (get from ZN#2):
Kp0=3.9386; %initial value of proportional part of PD-
regulator
Kd0=95.7411; %initial value of differential part of PD-
regulator

n=0;%index
S=zeros(1,1); %initals value of sum #imaginary parts of
all poles#
Res=zeros(1,1); %result value that show - imaginary parts
are decreasing

%Lets make Kdo as the constant and Kp will change.
%Define way - decrease or inscrease Kp.

%Loop of inscreasing Kp

for Kp=Kp0:0.01:2*Kp0 %step is 0.01
    D=[5000 26000 5125 (25+Kd0) Kp];
    I=imag(roots(D));
    S(n+1)=sum(abs(I));
    if n>0
        if S(n)>S(n+1)
            Res(n)=1;
        end
    end
    n=n+1;
end

%Choose the way - decrease or increase
if prod(Res)==1
    step_k=0.0001;
    N=inf; %end value of Kp
else
    step_k=-0.0001;
    N=0; %end value of Kp
end
```

Продолжение приложения И

```
%Main part of method
for Kp=Kp0:step_k:N
    D=[5000 26000 5125 (25+Kd0) Kp]; %polynom of
denominator closed loop system with PD-regulator
    roots(D)
    I=imag(roots(D))==0;
    R=real(roots(D))<0;
    if prod(R)==1 %check the condition for stable system
        if prod(I)==1 %check the criteria of finding
            KP=Kp; %Result
            fprintf('Result Kp=%.4f\n',KP) %gives the Kp
with accuracy of 0.0001
            break
        end
    end
end
end
```

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

На дипломный проект
Каракулова Талгата Навиолловича
5B070200 – Автоматизация и управление

Тема: «Разработка системы автоматического регулирования котельного агрегата»

Перед дипломантом ставилась задача разработки системы автоматического регулирования котельного агрегата.

В ходе выполнения дипломного проекта была выполнена большая работа по сбору материала для описания функционирования системы автоматического управления котельного агрегата (ст.3) на ГРЭС "Топар". На основе данного материала была разработана схема автоматизации одного из САР котельного агрегата.

Для разработанной системы управления построена математическая модель, описывающая процесс изменения уровня жидкости в барабане котла при его пуске. На основании анализа полученной системы была поставлена задача синтеза типового регулятора параметрическими методами. Был получен регулятор, настроенный эмпирическим методом Циглера Николса 2. В частности, разработан новый алгоритм синтеза типового регулятора на основе модального управления, модернизированный метод Fine-tuning. Получен регулятор, синтезированный методом Auto - tune в среде MATLAB.

В среде MATLAB получены результаты моделирования процесса парообразования в виде графика изменения уровня питательной воды в барабане котла. Графики получены, в том числе, для системы управления регулятором, синтезированным тремя методами.

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

Заключение: Считаю, что дипломант справилась с поставленной задачей, дипломный проект соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным проектам по специальности 5B070200 – Автоматизация и управление. На основании характеристики выполненных исследований, уровня и качества выполненных результатов студент Каракулов Талгат Навиоллович допускается к защите.

Научный руководитель
ассоциированный профессор, канд.техн.наук

 Ширяева О.И.

(подпись)

«16» мая 2022 г.

Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Каракулов Талгат Навиоллович

Название: Разработка системы автоматического регулирования котельного агрегата

Координатор: Ольга Ширяева

Коэффициент подобия 1: 2.79

Коэффициент подобия 2: 1.17

Замена букв:17

Интервалы:0

Микропробелы:1

Белые знаки: 0

После анализа Отчета подобия констатирую следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите.

Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 2,79 и Коэффициент подобия 2: 1,17. Коэффициент подобия 1,2 объясняется тем, что в дипломной работе были использованы общепринятые термины теории управления. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. Обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и имеются ссылки. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

03.05.2022

Дата



Подпись Научного руководителя

**Протокол анализа Отчета подобия
Заведующего кафедрой / Начальника структурного подразделения**

Заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения заявляет, что ознакомился(-ась) с полным отчетом подобия, который был сгенерирован системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Каракулов Талгат Навиоллович

Название: Разработка системы автоматического регулирования котельного агрегата

Координатор: Ширяева Ольга Ивановна

Коэффициент подобия 1: 2.79

Коэффициент подобия 2: 1.17

Замена букв:17

Интервалы:0

Микропробелы:1

Белые знаки: 0


После анализа Отчета подобия заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения констатирует следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем работа признается самостоятельной и допускается к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы, по существу, и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем работа должна быть вновь отредактирована и с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем работа не допускается к защите.

Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены практически нулевые коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 2.79 и Коэффициент подобия 2: 1.17. Не нулевые коэффициенты подобия объясняются тем, что в дипломном проекте были использованы общепринятые термины теории управления. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, работа признается самостоятельной и допускается к защите.

03.05.2022

Дата



Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:
Дипломный проект допускается к защите

Дата

Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента
Каракулова Талгата Навиолловича
5B070200 – Автоматизация и управление

На тему: Разработка системы автоматического регулирования котельного агрегата
выполнено:

- а) презентация дипломного проекта представлена на 38 слайдах;
- б) пояснительная записка на 70 страницах.

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В пояснительной записке, представленной на рецензирование, показана разработка системы автоматического регулирования котельного агрегата.

В первой главе приведен расширенный обзор котельного агрегата его устройства, роли в электростанции «Топар» и технологических процессов в АСУ ТП КА 3. Была построена схема автоматизации контура САР питания котла при пуске.

Во второй главе формируется математическая модель контура. Производится анализ системы, на основе которой ставится задача синтеза ПД регулятора параметрическими методами. Проведен синтез растопочного регулятора питания котла методами «Циглера Николса 2», «Auto-tune» MATLAB. Для решения поставленной задачи был разработан новый алгоритм поиска параметров регулятора по принципу модального управления на базе метода «Fine – tuning». В результате моделирования в среде MATLAB были получены переходные характеристики системы. Произведен сравнительный анализ и выявлен лучший метод.

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

Данный дипломный проект отличает проработанность, научно-исследовательский подход и полноту изложенного теоретического материала. Приведенные исследования доказывают отличную теоретическую подготовку дипломанта.

Оценка работы

Считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «А» (отлично), а студент Каракулов Т.Н. присуждения академической степени бакалавра по специальности 5B070200 – Автоматизация и управление.

Рецензент

канд. техн. наук, доц.

(должность, уч. степень, звание)

Юничева Н. Р.

(подпись)

«16» мая 2022 г.