

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра «Автоматизация производственных процессов в металлургии»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ Т. В. Донцова  
подпись  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Автоматизация процесса кальцинации при производстве глинозёма

Направление 15.03.04 Автоматизация технологических процессов  
и производств

Профиль подготовки 15.03.04.01 Автоматизация технологических  
процессов и производств (в металлургии)

Руководитель \_\_\_\_\_ доцент, канд. техн. наук А. А. Дружинина  
подпись, дата должность, ученая степень

Выпускник \_\_\_\_\_ Б. К. Янг  
подпись, дата

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ А. А. Дружинина  
подпись, дата

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра «Автоматизация производственных процессов в металлургии»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ Т. В. Донцова  
подпись

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
в форме бакалаврской работы**

Студенту

Янг Баурон Клиф

фамилия, имя, отчество

Группа ЦМ16-16Б Направление (специальность) 15.03.04

Автоматизация технологических процессов и производств

Тема выпускной квалификационной работы «Автоматизация процесса кальцинации при производстве глинозёма»

Утверждена приказом по университету № 7434/с от 09.06.2020 г.

Руководитель ВКР А. А. Дружинина, канд. техн. наук, доцент каф. АППМ  
инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: материалы производственной и преддипломной практик; техническая, справочная, учебная, научная литература; интернет-ресурсы.

Перечень разделов ВКР Введение; 1 Технология процесса кальцинации; 2 Автоматизация процесса кальцинации; 3 Расчет АСР температуры в печи; 4 Разработка автоматической системы контроля качества глинозема

Перечень графического материала Схема автоматизации процесса кальцинации

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_

подпись

А. А. Дружинина

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_

подпись

Б. К. Янг

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Технология процесса кальцинации .....	6
1.1 Минералы и руды алюминия .....	6
1.2 Методы получения глинозема .....	8
1.3 Описание технологического процесса кальцинации.....	11
1.4 Технология и оборудование процесса кальцинации .....	12
2 Автоматизация процесса кальцинации .....	17
2.1 Вращающаяся печь как объект управления .....	17
2.2 Выбор и обоснование контролируемых и регулируемых параметров процесса кальцинации .....	19
2.3 Структура АСУ ТП кальцинации .....	21
2.4 Выбор средств автоматизации процесса кальцинации .....	25
2.5 Выбор микропроцессорного контроллера для АСУ ТП кальцинации .....	38
2.6 Выбор ЭВМ.....	42
2.7 Описание схемы автоматизации процесса кальцинации .....	43
3 Расчет АСР температуры в печи .....	47
3.1 Выбор закона регулирования для АСР температуры.....	53
3.2 Определение настроек регулятора АСР температуры .....	55
3.3 Исследование АСР на устойчивость .....	60
3.4 Проверка системы на оптимальность .....	63
3.5 Проверка АСР на грубость.....	64
4 Разработка автоматической системы контроля качества глинозема .....	66
4.1 Требования, предъявляемые к качеству глинозема.....	66
4.2 Анализ факторов, влияющих на качество глинозема в процессе кальцинации.....	67
4.3 Определение качества глинозема по углу естественного откоса .....	69
4.4 Разработка устройства для измерения угла естественного откоса сыпучего материала в печи .....	73
Заключение .....	77
Список использованных источников .....	78

## ВВЕДЕНИЕ

Глинозем – технический оксид алюминия  $Al_2O_3$  – белый кристаллический порошок, состоящий из модификаций  $\alpha-Al_2O_3$  и  $\gamma-Al_2O_3$ .

Глинозем получают из алюминийсодержащих руд, преимущественно из бокситов, и используют в качестве сырья для получения алюминия.

Заключительным этапом при производстве глинозема является кальцинация. Цель процесса кальцинации – обезвоживание гидроксида алюминия и получение из него практически негигроскопичного металлургического глинозема. Это достигается нагреванием гидроксида алюминия до 1150-1250 °С.

Под действием высокой температуры гидроксид алюминия испытывает следующие превращения: при 110-120 °С начинается удаление из гидроксида внешней влаги; при 200-250 °С гиббсит теряет две молекулы кристаллизационной воды и превращается в бемит; при температуре около 500 °С бемит превращается в безводный  $\gamma-Al_2O_3$  и при температуре выше 850 °С происходит превращение  $\gamma-Al_2O_3$  в практически негигроскопичный  $\alpha-Al_2O_3$ . Все эти превращения идут с поглощением значительного количества тепла (эндотермический процесс), кроме превращения  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$  (экзотермический процесс). Основное количество тепла затрачивается при нагревании материала до 500-600 °С, когда происходит разложение гиббсита и испарение выделяющейся влаги.

Эффективное и экономичное ведение процесса кальцинации в настоящее время невозможно без комплексной автоматизации.

Автоматизация – это использование машин, систем управления и информационных технологий для оптимизации производительности при производстве товаров и оказании услуг. Правильным стимулом для применения автоматизации является повышение производительности и/или качества сверх того, что возможно при текущем уровне человеческого труда, чтобы реализовать экономию ресурсов и/или получить необходимое качество готовой

продукции. В рамках индустриализации автоматизация – это шаг за пределы механизации. В то время как механизация обеспечивает людей-операторов механизмами, помогающими им справляться с мышечными потребностями работы, автоматизация значительно снижает потребность в сенсорных и ментальных потребностях человека, одновременно увеличивая грузоподъемность, скорость и повторяемость процессов. Автоматизация играет все более важную роль в мировой экономике и в повседневной жизни.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом кальцинации в трубчатой вращающейся печи при производстве глинозема.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ вращающейся печи как объекта управления;
- разработать схему автоматизации процесса кальцинации в трубчатой вращающейся печи;
- выполнить расчет АСР температуры в печи кальцинации;
- разработать автоматическую систему контроля качества глинозема.

# 1 Технология процесса кальцинации

## 1.1 Минералы и руды алюминия

Наиболее распространенный среди металлов в земной коре (8,13 %) алюминий, как никакой другой из металлов, широко представлен в ней различными соединениями. По данным академика А. Е. Ферсмана, в природе насчитывается более 250 минералов алюминия [1]. Наиболее распространённые из них представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Минералы алюминия

Минерал	Содерж. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Формула
Корунд	100	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Диаспор, бёмит	85	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O
Гиббсит	65,4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O
Андалузит, дистен, силлиманит	63	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub>
Каолинит	39,5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O
Гидрослюда (мусковит)	38,5	K <sub>2</sub> O·3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6 SiO <sub>2</sub> ·2 H <sub>2</sub> O
Шамозит	21,1-27,7	(Mg, Al, Fe <sup>2+</sup> Fe <sup>3+</sup> )(Si, Al) <sub>4</sub> (OH, F) <sub>4</sub>
Алунит	37	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·4Al(OH) <sub>3</sub>
Нефелин	32,3-36	(Na, K) <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2 SiO <sub>2</sub>
Лейцит	23,5	K <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·4 SiO <sub>2</sub>
Ортоклаз	18	K <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6 SiO <sub>2</sub>
Альбит	20	Na <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6 SiO <sub>2</sub>

Минералы делятся на две примерно равные по количеству видов группы. К первой из них относятся первичные минералы – образующиеся при кристаллизации магмы и ее производных. Среди них главная роль принадлежит алюмосиликатам, типичные представители которых ортоклаз, альбит, лейцит и нефелин. Значительно меньшее, но все же заметное распространение имеют

силикаты алюминия (дистен, силлиманит, андалузит). Относительно редкими являются шпинели и свободный оксид алюминия – корунд.

Под воздействием процессов выветривания в земной коре образуются различные вторичные соединения алюминия: каолинит –  $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ ; гиббсит –  $Al(OH)_3$ ; бёмит и диаспор –  $AlOOH$ . К этой же группе относится алунит –  $K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 4Al(OH)_3$ .

К основным алюминиевым рудам относятся бокситы, нефелины, алуниты, глины, каолины и кианиты.

Месторождения бокситов по своему генезису делятся на остаточные и осадочные. Первые из них образовались в результате выветривания алюмосиликатов. К этому типу относится большинство месторождений в мире. В настоящее время запасы бокситов превышают 50 млрд. т, что позволяет говорить об обеспеченности алюминиевой промышленности сырьем до конца XXI века. Основная часть этих запасов приходится на страны тропического и субтропического пояса – Австралию, Гвинею, Бразилию, Индию и Центральноамериканский регион (Ямайка, Суринам, Гайана).

В таблице 1.2 приведены характеристики основных российских и мировых бокситовых месторождений.

Таблица 1.2 – Характеристика бокситовых месторождений

Месторождение	Содержание, %			Кремниевый модуль $\mu_{Si}$
	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$SiO_2$	
Северо-Уральское	48-54	21-23	2-8	6-22
Южно-Уральское	50-53	21-22	5-20	5-11
Тургайское	42-44	16-20	9-21	4-5
Северо-Онежское	51-54	6-9	17-19	2,5-3
Висловское	48-52	-	7-9	5-8
Средне-Тиманское	45-50	5	5-12	4-7
Гвинейское	43-45	25-27	1,6-2,6	17-28
Ямайское	27-28	17-18	0,5-0,8	34-58



Огромные запасы нефелинов в мире и наличие в них (кроме алюминия) щелочных металлов – натрия и калия – делают этот вид сырья ценным и перспективным для комплексной переработки. Природный нефелин выражается формулой  $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2 + n)\text{SiO}_2$ , где  $n = 0-0,5$ . Нефелиновые породы, которые могут представлять интерес для промышленной переработки, имеются в России, Норвегии, Канаде, Южной Гренландии и других странах. В России в настоящее время перерабатываются два источника нефелинового сырья: хвосты обогащения Кольского полуострова, содержащие 28-30 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 19-20 %  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ; 43-44 %  $\text{SiO}_2$ , 2-4 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 2-3 %  $\text{CaO}$ ; Кияшалтырские (Кемеровская область) руды, содержащие 32-36 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 38-42 %  $\text{SiO}_2$ ; около 20 %  $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O}$  [2].

В мировой практике не имеется достоверных данных об общих запасах небокситового алюминиевого сырья. В настоящее время только в России в крупных промышленных масштабах перерабатывается нефелиновое сырье. Экономическая эффективность этих технологий, как показывают расчеты, значительно уступает эффективности технологии переработки бокситов. И это, прежде всего, по причине их более высокой энергоемкости.

## **1.2 Методы получения глинозема**

Глинозем в промышленности получают различными способами в зависимости от свойств и состава исходного сырья.

Метод Байера (мокрый метод, метод выщелачивания) является наиболее распространенным методом производства глинозема. В основе метода лежит обратимый процесс взаимодействия гидратированного оксида алюминия с водным раствором гидроксида натрия с образованием алюмината натрия [3-6].

Метод применяется для выделения глинозема из бокситов с малым (менее 5 %) содержанием оксида кремния. При большем содержании последнего метод

становится экономически невыгодным вследствие высокого расхода дорогой щелочи на взаимодействие с оксидом кремния.

Полученный по методу Байера глинозем представляет собой смесь  $\alpha$ -модификации (корунд) и  $\gamma$ -модификации оксида алюминия. Технический продукт представляет собой белое кристаллическое вещество и выпускается нескольких марок, различающихся чистотой. Наиболее вредными примесями в глиноземе являются оксид кремния, оксид железа (II) и оксид титана (IV). Кроме того, в глиноземе регламентируется содержание оксидов калия, натрия и фосфора (V).

В основе метода спекания лежит процесс образования алюминатов натрия (и калия в случае нефелинов) в результате взаимодействия оксида алюминия руды с карбонатами металлов при высокой температуре с последующим выщелачиванием алюминатов водой и разложением их оксидом углерода (IV) [7].

Природа карбоната зависит от содержания в руде натриевого компонента: для спекания бокситов используют смесь карбонатов натрия и кальция, а для спекания нефелинов, содержащих в своем составе оксиды натрия и калия, только оксид кальция. Карбонат кальция при спекании бокситов связывает присутствующий в них оксид кремния и позволяет существенно снизить расход дорогого карбоната натрия.

Процесс производства глинозема методом спекания универсален и пригоден для переработки всех видов алюминиевого сырья. На практике его применяют для нефелинов и бокситов с высоким (более 5 %) содержанием оксида кремния.

Технологическая схема производства глинозема из нефелиновых руд предполагает наличие следующих переделов: сырьевого, спекания, гидрохимии, кальцинации (рисунок 1.1).

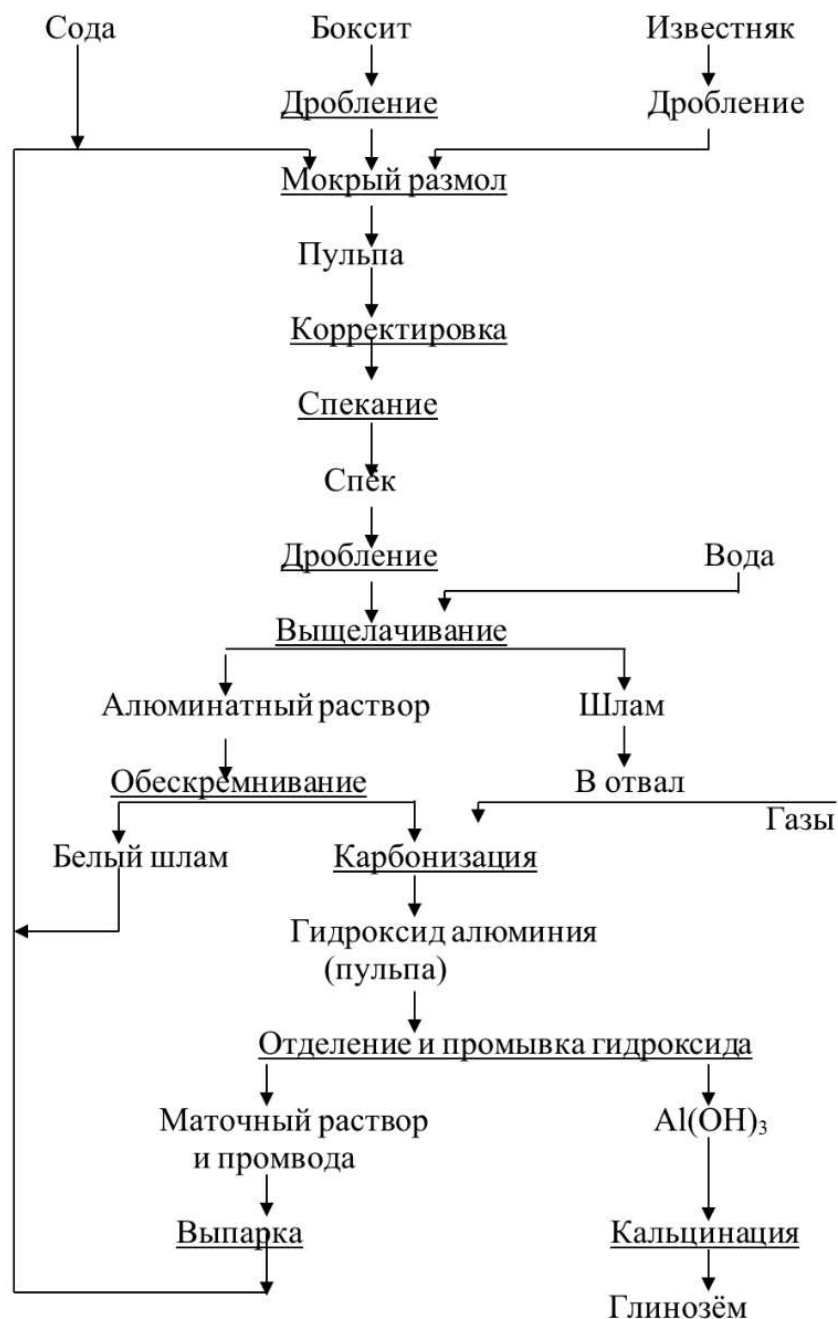


Рисунок 1.1 – Технологическая цепочка глинозёмного производства [8]

Заключительным переделом всех технологических схем производства глинозема является кальцинация [3-10]. Цель кальцинации – перевод исходного гидроксида алюминия в товарную продукцию – технический глинозем.

### 1.3 Описание технологического процесса кальцинации

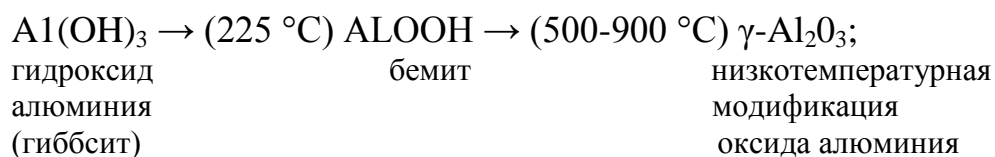
Кальцинация – это процесс прокаливания гидроксида алюминия при температуре выше 1100 °С с получением технического оксида алюминия – металлургического глинозёма для электролитического производства алюминия и неметаллургического глинозёма для различных отраслей промышленности (электротехнической, электровакуумной, автомобильной, керамической и т. д.).

При обжиге материала последовательно протекают процессы сушки и дегидратации алюминия и прокалка оксида алюминия, сопровождающаяся перекристаллизацией промежуточных форм оксида алюминия в  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (корунд).

Кальцинация гидроксида алюминия осуществляется во вращающихся печах. Двигаясь навстречу топочным газам, материал проходит в печи ряд температурных зон:

- в зоне сушки температура материала составляет от 70 до 200 °С, происходит полное удаление гигроскопической влаги [11];

- в зоне обезвоживания или дегидратации температура материала поднимается от 200 до 900 °С, полностью удаляется кристаллизационная влага и гидроксид алюминия превращается в глинозём [12]:



- в зоне прокаливания глинозём нагревается до температуры 1200-1250 °С, происходит частичная перекристаллизация гамма-глинозёма в альфа-глинозём:



- в зоне охлаждения температура материала падает до температуры 900-1000 °С [11].

Охлаждение происходит за счёт теплообмена между глинозёмом и поступающим воздухом. Дальнейшее охлаждение осуществляется в холодильниках кипящего слоя (КС).

При кальцинации гидроксида алюминия во вращающихся печах имеет место большой пылевынос.

Снижение потерь глинозёма с отходящими газами достигается многоступенчатой системой очистки дымовых газов, в которую входят:

- пылевая камера в холодной головке печи;
- батарейные циклоны с двумя группами циклонов;
- электрофильтры.

Пыль, осажденная в циклонах, подаётся в печь отдельно от гидроксида алюминия через пылевую течку под встроенную обечайку печи. Пыль электрофильтров через пневмотранспортный аппарат «Рубинчик» откачивается в пылесборник, откуда также подаётся под встроенную обечайку в печь кальцинации.

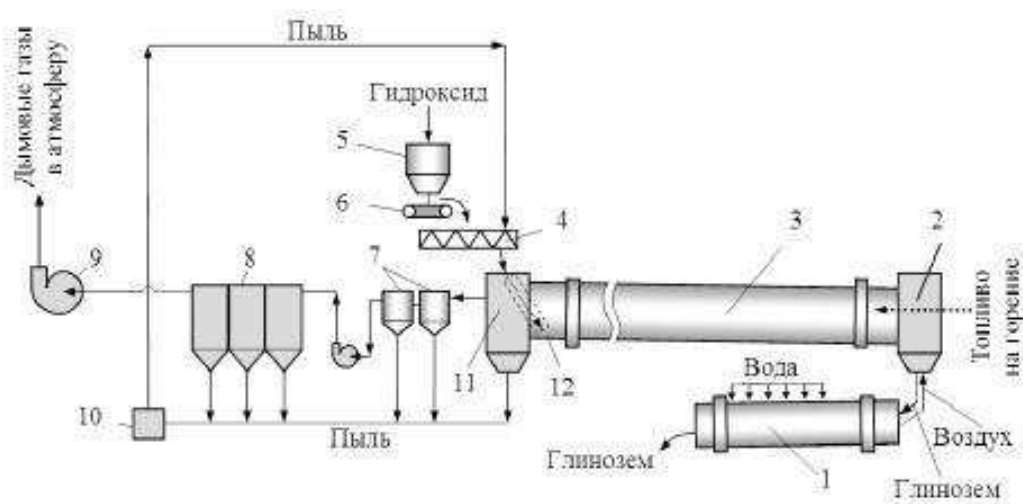
Глинозём из холодильников подаётся в пневмокамерные насосы, откуда по системе трубопроводов распределяется по силосам склада глинозёма.

Склад глинозёма состоит из восьми силосов, расположенных попарно вдоль фронта железнодорожного пути. Глинозём загружается в железнодорожные вагоны типа «Хоппер» или цистерны, которые отправляются потребителю.

#### **1.4 Технология и оборудование процесса кальцинации**

Процесс кальцинации на большинстве заводов осуществляется в трубчатых вращающихся печах (ТВП), а охлаждение прокаленного глинозёма – в барабанных холодильниках (БХ) или холодильниках кипящего слоя.

Аппаратурно-технологическая схема процесса кальцинации показана на рисунке 1.2.



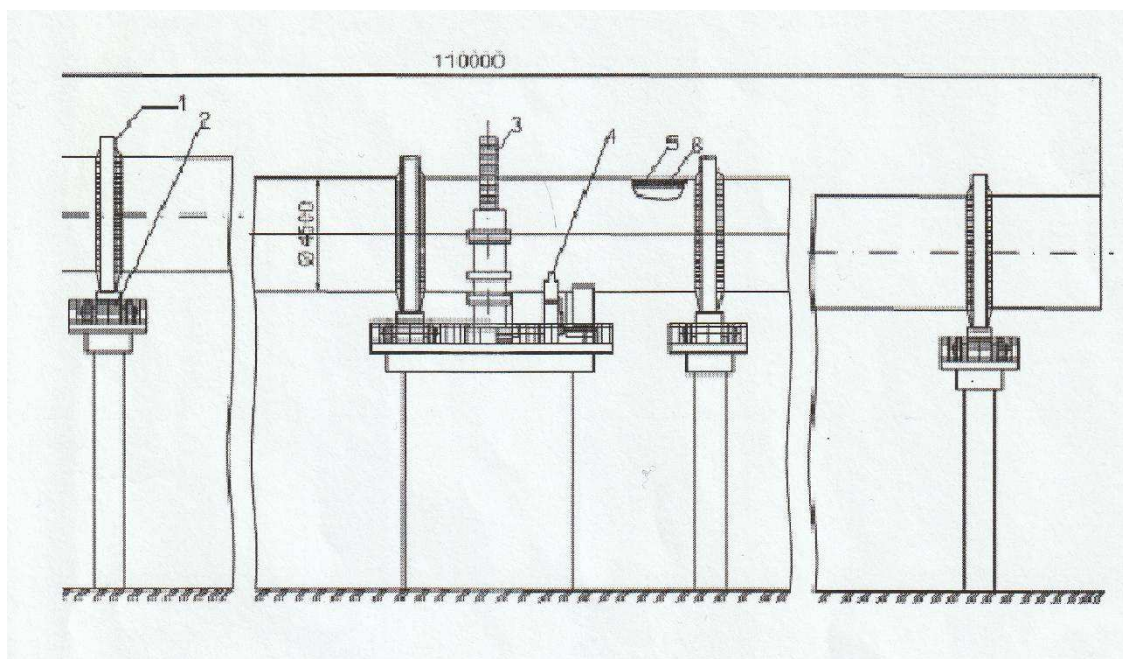
- 1 – барабанный холодильник (БХ); 2 – топочная камера; 3 – трубчатая вращающаяся печь;  
 4 – шнековый смеситель; 5 – загрузочный бункер; 6 – пластинчатый питатель;  
 7 – мультициклоны; 8 – электрофильтр; 9 – дымосос; 10 – насосы; 11 – загрузочная головка;  
 12 – течка для подачи гидроксида в печь

Рисунок 1.2 – Аппаратурно-технологическая схема процесса кальцинации [13]

Каждая печь (рисунок 1.2) состоит из следующих основных частей: корпуса (барабана), опор, привода, упорного устройства, загрузочного и разгрузочного устройств.

Наклон печей в пределах 2-3 % от длины в сторону разгрузки материала позволяет обеспечить работу печи по противоточной схеме: навстречу загруженному гидроксиду алюминия снизу движутся горячие газы.

Корпус – основная часть вращающейся печи. От его прочности, прямолинейности и жесткости зависит устойчивая бесперебойная работа печи в условиях нормального ведения технологического процесса и правильного обслуживания.



1 – бандаж; 2 – опорный ролик; 3 – венцовая шестерня; 4 – привод печи;  
5 – корпус печи; 6 – футеровка.

Рисунок 1.3 – Вращающаяся печь

Корпус сварен из отдельных обечаек. Материал корпуса – листовой прокат из углеродистой конструкционной стали. Для повышения прочности корпуса крупных печей изготавливают из легированной конструкционной стали.

Бандажи современных печей устанавливают на обечайках большей толщины листа, чем толщина листа всего корпуса.

Бандажи крупных печей по условиям транспортирования поставляют составными из двух полуколец.

Полукольца соединяют электрошлаковой сваркой при монтаже. По техническим условиям завода-изготовителя сварочный шов должен подвергаться термообработке; допускается местная термообработка шва и прилегающих участков. Наплывы швов снимают, поверхности очищают.

Опорные ролики установлены под углом  $30^\circ$  к вертикальной оси. Подшипники роликов монтируют на стальных рамах, устанавливаемых на массивных железобетонных фундаментах.

Привод вращающихся печей состоит из электродвигателя, редуктора и зубчатой открытой передачи. Привод крупных печей двусторонний, что обеспечивает уменьшение параметров привода и рассредоточение нагрузки от окружного усилия зубчатой пары на барабан. Вспомогательный привод предназначен для медленного подворачивания барабана во время ремонта, длительных остановок, а также при отключении электроэнергии. Этот привод должен иметь независимый источник энергии (аккумуляторные батареи и др.). скорость вращения барабана от вспомогательного привода в пределах 0,05-0,06 об/мин. Редуктор привода подключают к первому валу главного редуктора через муфту. При нормальной работе муфта отключена.

Зубчатый венец имеет разъемную конструкцию. Диаметр его составляет 1,4-1,8 диаметра барабана. По расположению главной оси печь кальцинации относится к горизонтальной печи; по форме поперечного сечения – к прямоугольной; по организации процесса прокалики – к непрерывной.

Корпус печи должен иметь значительную жесткость, быть правильной цилиндрической формы, неизменной в процессе работы при вращении ее на опорах. Необходимость сочленения вращающегося цилиндрического корпуса с неподвижными конструкциями головок печи, привела к созданию различных конструкций уплотнений, которые весьма усложняются с увеличением диаметра корпуса. Внутреннюю поверхность корпуса печи футеруют огнеупорным материалом в виде хромомagneзитовых и шамотных кирпичей.

Основными параметрами печи являются диаметр, длина барабана и скорость вращения. Длина печи кальцинации может составлять 50-150 м, диаметр – 2,5-5 м. Большие вращающиеся печи кальцинации устанавливают вне зданий, но в отдельных пристройках помещают головки печи и привода.

Загрузка гидроксида алюминия в печь осуществляется с верхнего конца, там же отводятся печные газы. Гидроксид алюминия медленно перемещается в печи благодаря ее вращению и наклону навстречу горячим газам, медленно теряет влагу и превращается в глинозем. Пройдя всю печь, глинозем пересыпается в холодильник. Там глинозем охлаждается воздухом,



просасываемым через холодильник, и водой, которая орошает снаружи кожух холодильника.

Термообработка порошкообразной шихты гидроксида алюминия во вращающихся печах при максимальной температуре до 1150–1250 °С сопровождается образованием значительного количества пыли, которая улавливается в электрофилтрах.

Образующаяся в процессе работы вращающихся печей пыль, проникает в сопряжения деталей, узлы трения и попадает во внешнюю среду даже при хорошем уплотнении.

Техническое обслуживание печи и устранением мелких неисправностей проводят раз в месяц при нормативной продолжительности от нескольких до 20 часов. Текущий ремонт выполняют один раз в три месяца. При текущем ремонте осуществляют ревизию узлов, ремонт и регулирование уплотнений, замену отдельных деталей, регулирование положения опорных и контрольных роликов и другие операции.

[изъят раздел 2]

### 3 Расчет АСР температуры в печи

Расчет АСР начинается с составления математического описания объекта управления, при котором определяются его статические (коэффициент усиления –  $K_{об}$ ) и динамические (время запаздывания –  $\tau$ , постоянные времени –  $T$ ) параметры.

Расчет ведется при максимальном внешнем возмущающим воздействии:  $\Delta X_{вх.мах} = 7\% \text{ ХРО}$  (процентов хода регулирующего органа). Показатели качества регулирования, определяемые технологическим процессом:

- статическая ошибка  $\Delta T_{ст} = 0$ ;
- максимальное динамическое отклонение  $\Delta T_1 \leq 13 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- время регулирования  $t_{рег} \leq 600 \text{ с}$ ;
- требуемый характер переходного процесса – с 20 % перерегулированием.

Исходные экспериментальные данные кривой разгона объекта представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Данные кривой разгона

t, с	0	100	200	300	400	500	600	700	800
$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	0	0	7	13	20	25	29	31	32

Данные кривой разгона получены при изменении хода регулирующего органа на 3 %. По данным таблицы 1 построим кривую разгона объекта управления (рисунок 3.1).

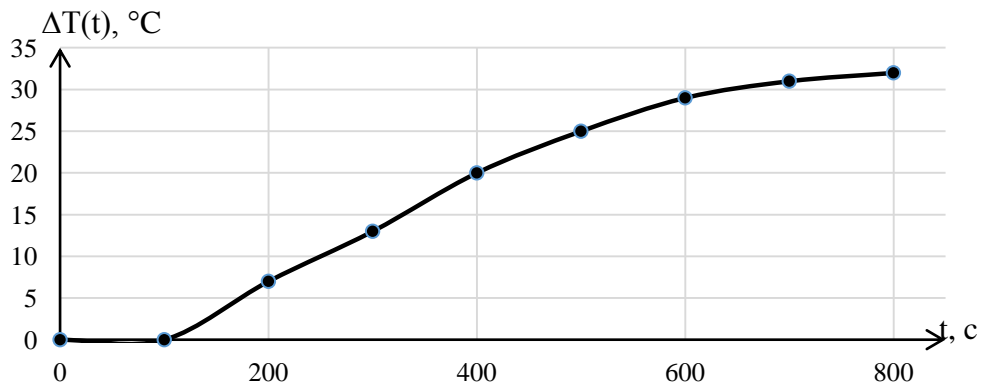
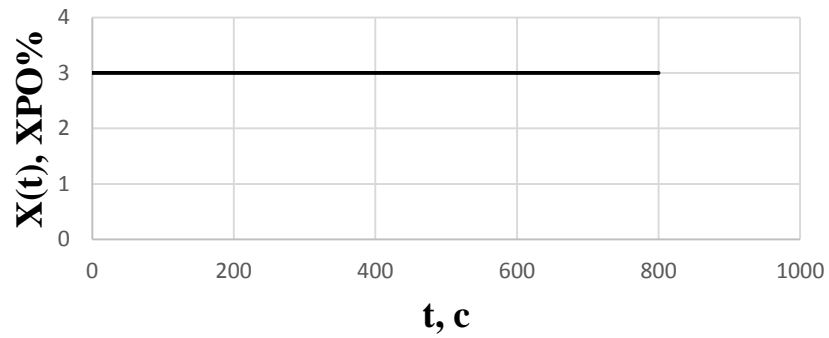


Рисунок 3.1 – Кривая разгона объекта, снятая при скачкообразном возмущающем воздействии  $A=3\%$  XPO

Расчетные данные для построения единичной и нормированной переходных характеристик приведены в таблице 3.1. Из зависимости  $\Delta T^0(t)$  находим величину коэффициента усиления объекта  $K_{об} = 10,67\text{ }^{\circ}\text{C}$  и запаздывание  $\tau = 100\text{ c}$ .

Определяем единичную  $\Delta T^0(t)$  и нормированную  $\Delta T^H(t)$  переходные функции:

$$\Delta T^0(t) = \frac{\Delta T(t)}{A},$$

$$\Delta T^H(t) = \frac{\Delta T^0(t)}{\Delta T^0(T_y)},$$

где  $A$  – скачкообразное возмущающее воздействие, при котором снята переходная характеристика ( $A = 3 \% \text{ XPO}$ );

$\Delta T^0(t)$  – установившееся значение переходной характеристики ( $\Delta T^0(T_y) = 10,67 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Как видно из графика, запаздывание  $\tau$  составляет 100 с. Результаты расчетов сводим в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Нахождение переходных функций

$t, \text{ c}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800
$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	0	0	7	13	20	25	29	31	32
$\Delta T^0(t), \text{ }^\circ\text{C} / \% \text{ XPO}$	0.00	0.00	2.33	4.33	6.67	8.33	9.67	10.33	10.67
$\Delta T^H(t)$	0	0	0.218	0.4061	0.625	0.781	0.90	0.968	1,000

По результатам таблицы 3.2 строим на одном графике единичную, нормированную и реальную переходные функции (рисунок 3.2).

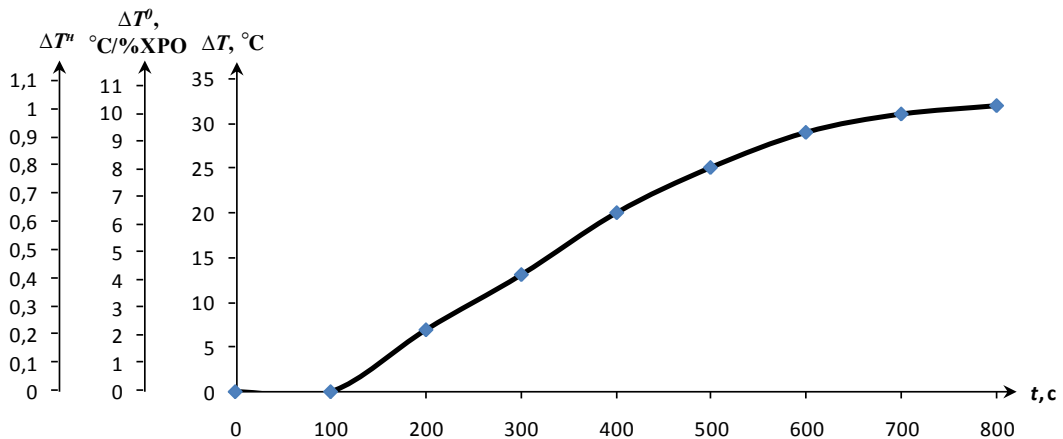


Рисунок 3.2 – Переходные исходная, единичная и нормированная характеристики

При определении динамических свойств объекта сам объект представляется последовательным соединением нескольких инерционных звеньев первого порядка и одного звена чистого запаздывания. Исходя из экспериментальных данных, величина запаздывания объекта составляет 100

секунд. Уточним это значение, рассчитав величину дополнительного запаздывания  $\tau_d$ . Для этого возьмем на графике нормированной переходной функции (рисунок 3.3) точки  $T_A$  и  $T_B$ , причем:

$$0,1T^H(T_y) \leq T_A \leq 0,15T^H(T_y),$$

$$0,7T^H(T_y) \leq T_B \leq 0,8T^H(T_y).$$

Таким образом:

$$0,1 \leq T_A \leq 0,15,$$

$$0,7 \leq T_B \leq 0,8.$$

Пусть  $T_A = 0,1$  и  $T_B = 0,7$ . Покажем это на графике (рисунок 3.3).

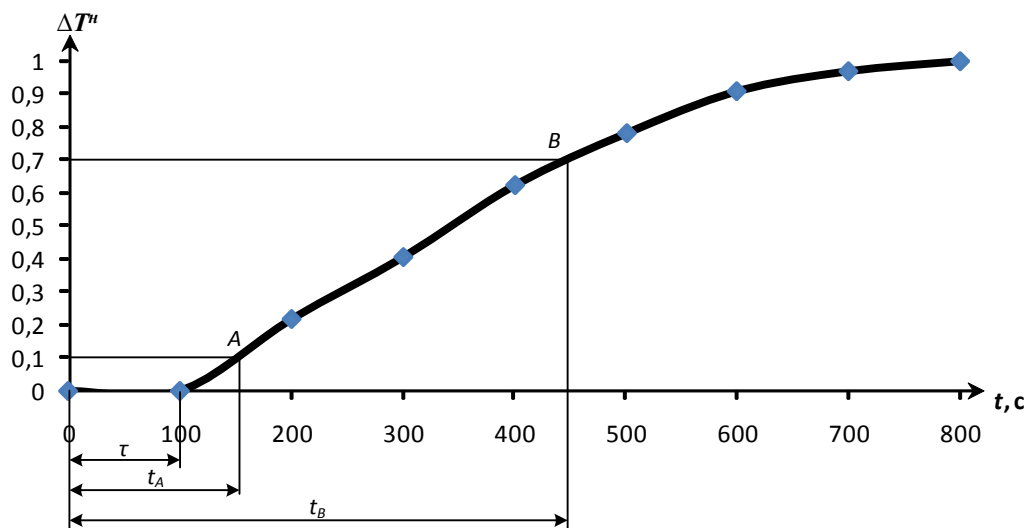


Рисунок 3.3 – Анализ нормированной переходной характеристики

Определим динамические характеристики объекта при аппроксимации его последовательным соединением аperiодического звена и звена запаздывания. Определим величину дополнительного запаздывания:

$$\tau_d = \frac{t_B \ln(1 - T_A) - t_A \ln(1 - T_B)}{\ln(1 - T_A) - \ln(1 - T_B)},$$

где  $t_{A(B)} = t_{A(B)} - \tau$ ,

$$\begin{aligned} \tau_d &= \frac{340 \ln(1 - 0,1) - 55 \ln(1 - 0,7)}{\ln(1 - 0,1) - \ln(1 - 0,7)} = \\ &= \frac{340(-0,105) - 55(-1,204)}{-0,105 - (-1,204)} = 27,7 \text{ с.} \end{aligned}$$

Общее запаздывание объекта  $\tau_{об}$ :

$$\tau_{об} = \tau + \tau_d = 100 + 27,7 = 127,7 \text{ с.}$$

Определим постоянную времени  $T_{об}$ :

$$T_{об} = -\frac{t_A - \tau_d}{\ln(1 - T_A)} = -\frac{55 - 27,7}{-0,105} = 260 \text{ с.}$$

Таким образом, передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{K_{об}}{T_{об}p + 1} \cdot e^{-\tau_{об} \cdot p} = \frac{10,667}{260p + 1} \cdot e^{-127,7 \cdot p}.$$

Для оценки точности аппроксимации экспериментальной переходной функции решением дифференциального уравнения первого порядка с запаздывающим аргументом рассчитываются ординаты аппроксимирующей кривой:

$$\Delta T_{a1}^H = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_{об}, \\ 1 - e^{-\frac{t-\tau_{об}}{T_{об}}} & \text{при } t > 127,7; \end{cases}$$

$$\Delta T_{a1}^H = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq t \leq 127,7, \\ 1 - e^{-\frac{t-127,7}{360}} & \text{при } t > 127,7. \end{cases}$$

Для нахождения среднеквадратической ошибки аппроксимации вычислим отношение

$$d_{a1} = \left( \frac{\Delta T^H(t) - \Delta T_{a1}^H(t)}{\Delta T^H(T_y)} \right)^2.$$

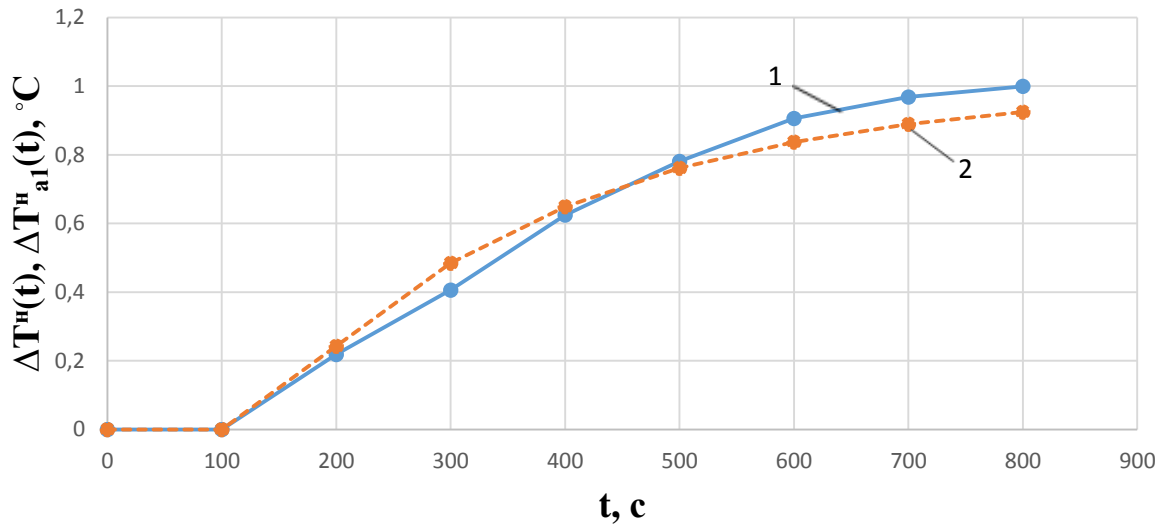
Результаты расчетов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Расчетные значения аппроксимирующей переходной функции

t, с	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$\Delta T^0, ^\circ\text{C}$	$\Delta T^H(t)$	$\Delta T_{a1}^H(t)$	$d_{a1}$
0	0	0,00	0,000	0,000	0,000000
100	0	0,00	0,000	0,000	0,0000000
200	7	2,33	0,218	0,243	0,0000051
300	13	4,33	0,406	0,485	0,000054
400	20	6,67	0,625	0,649	0,0000052
500	25	8,33	0,781	0,766	0,0000035
600	29	9,67	0,906	0,837	0,000041
700	31	10,33	0,968	0,889	0,000055
800	32	10,67	1,0	0,925	0,000049

Используя данные таблицы 3.3, строим исходную и аппроксимирующую единичные переходные функции (рисунок 3.4) и визуально оцениваем степень их близости.





1 – исходная, 2 – аппроксимирующая

Рисунок 3.4 – Переходные характеристики

Далее вычисляем среднюю ошибку аппроксимации  $\delta$ , используя данные таблицы 3.3:

$$\delta = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} d_{\text{ап}}}{k+1}} = 100 \sqrt{\frac{0,00545}{10}} = 2,33 \text{ \%}.$$

Так как средняя ошибка аппроксимации менее 3 %, значит расчеты проведены верно, погрешность аппроксимации удовлетворительная.

Передаточная функция объекта будет иметь вид:

$$W(p) = \frac{10,667}{260p + 1} e^{-127,7}.$$

### 3.1 Выбор закона регулирования для АСР температуры

Тип регулятора ориентировочно выбираем по величине отношения  $\tau_{об}/T_{об}$  в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Типы регуляторов

$\tau_{об}/T_{об}$	Тип регулятора
<0,2	релейный
<1,0	непрерывный
>1,0	импульсный или непрерывный

Тогда  $\tau_{об}/T_{об} = 127,7/260 = 0,491$ .

Так как  $0,2 < \tau_{об}/T_{об} < 1$ , выбираем непрерывный тип регулятора.

Для выбора закона регулирования рассчитываем динамический коэффициент регулирования  $R_d$ :

$$R_d = \frac{\Delta y_1}{K_{об} \cdot \Delta X_{вх.мах}} = \frac{13}{10,667} \cdot 7 = 0,1741.$$

По рисунку 3.5 определяем, что только ПИД-регулятор может обеспечить значение  $R_d = 0,1741$ .

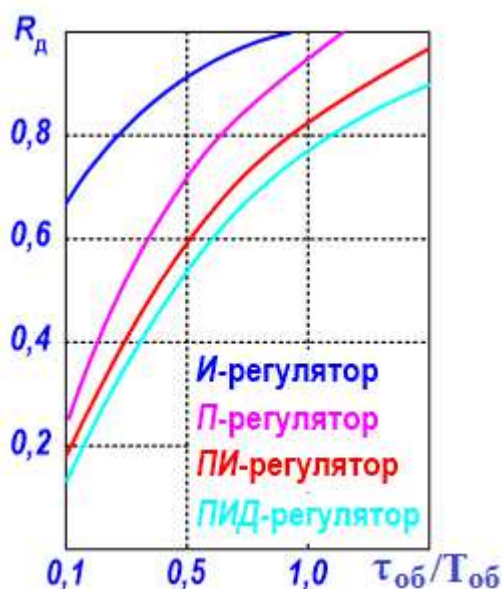


Рисунок 3.5 – График для подбора регулятора по динамическому коэффициенту регулирования на статических объектах с 20%-ым перерегулированием

Далее необходимо провести проверку, обеспечит ли выбранный регулятор допустимое время регулирования  $t_p$ . По графику (рисунок 34 б, приведенному в [28, с. 120], для ПИД-закона регулирования при переходном процессе с 20 %-ным перерегулированием отношение  $t_{\text{рег}}/\tau_{\text{об}} = 8$ , откуда находим время регулирования

$$t_{\text{рег}} = 8 \cdot \tau_{\text{об}} = 8 \cdot 127,7 = 1021,6 \text{ с},$$

что превышает допустимое время регулирования  $t_p = 600 \text{ с}$ , однако более сложного серийного регулятора не существует, поэтому окончательно выбираем ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$W_p(p) = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{и}p}} + T_{\text{д}p} \right),$$

где  $K_p$  – коэффициент усиления регулятора;

$T_{\text{и}}$  – время изодрома;

$T_{\text{д}}$  – время предварения.

Выбранный закон регулирования гарантирует отсутствие статической ошибки, т.е.  $\Delta T_{\text{ст}} = 0$ .

### **3.2 Определение настроек регулятора АСР температуры**

Расчет настроек выбранного регулятора выполняют следующими способами:

- графоаналитическим на основе амплитудно-фазовой характеристики объекта и М-критерия (показателя колебательности);
- по расширенным амплитудно-фазовым характеристикам;
- по приближенным формулам;
- с помощью математического моделирования.

Настройки ПИД-регулятора определяем по приближённым формулам (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Параметры настройки регуляторов для статических объектов первого порядка с запаздыванием

Регулятор	Параметры настройки	Тип переходного процесса		
		апериодический	с 20%-м перерегулированием	с $\min \int y^2 dt$
ПИД	$K_{\Pi}$	$\frac{0,95 \cdot T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$	$\frac{1,2 \cdot T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$	$\frac{1,4 \cdot T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$
	$T_{И}$	$2,4 \cdot \tau_{об}$	$2 \cdot \tau_{об}$	$2 \cdot \tau_{об}$
	$T_{Д}$	$0,4 \cdot \tau_{об}$	$0,4 \cdot \tau_{об}$	$0,5 \cdot \tau_{об}$

Настройки регулятора, рассчитанные по приближенным формулам, имеют следующие значения:

$$K_{\Pi} = \frac{1,2 \cdot T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}} = \frac{1,2 \cdot 260}{10,667 \cdot 127,7} = 0,229 \frac{\% \text{ XPO}}{^{\circ}\text{C}};$$

$$T_{И} = 2 \cdot \tau_{об} = 2 \cdot 127,7 = 255,4 \text{ с};$$

$$T_{Д} = 0,4 \cdot \tau_{об} = 0,4 \cdot 127,7 = 51,08 \text{ с}.$$

Полученные значения подставляем в модель, построенную в среде Matlab с помощью встроенного пакета Simulink.

Для задания настроек встроенного в Simulink ПИД-регулятора переведем значения времени интегрирования и времени предварения в значения коэффициентов интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-закона регулирования по формулам:

$$K_p = K_{\Pi}, \% \text{ XPO} / ^{\circ}\text{C},$$

$$K_I = K_P / T_I, \text{ с},$$

$$K_D = K_P \cdot T_D, \text{ с}.$$

Получаем:

$$K_p = 0,229 \text{ \%XPO /}^\circ\text{C},$$

$$K_I = 0,000896632 \text{ с},$$

$$K_D = 11,6732 \text{ с}.$$

Модель системы, полученная в Simulink, представлена на рисунке 3.6, переходной процесс с исходными настройками регулятора – на рисунке 3.7.

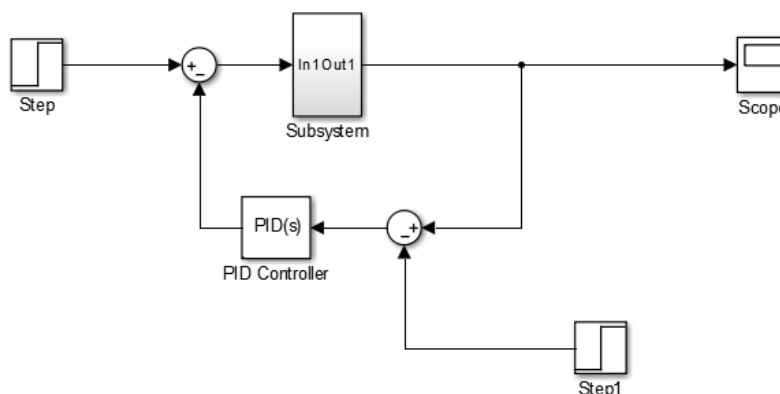


Рисунок 3.6 – Модель автоматической системы регулирования в Simulink

Как видно из рисунка 3.7, полученный переходный процесс не удовлетворяет требуемым показателям качества, так как время регулирования  $t_p \approx 1200$  с, что значительно превышает заданные 600 с; максимальное динамическое отклонение  $\Delta T_1 = 2,39 \cdot 7 = 16,73$  °C, что больше 13 °C.

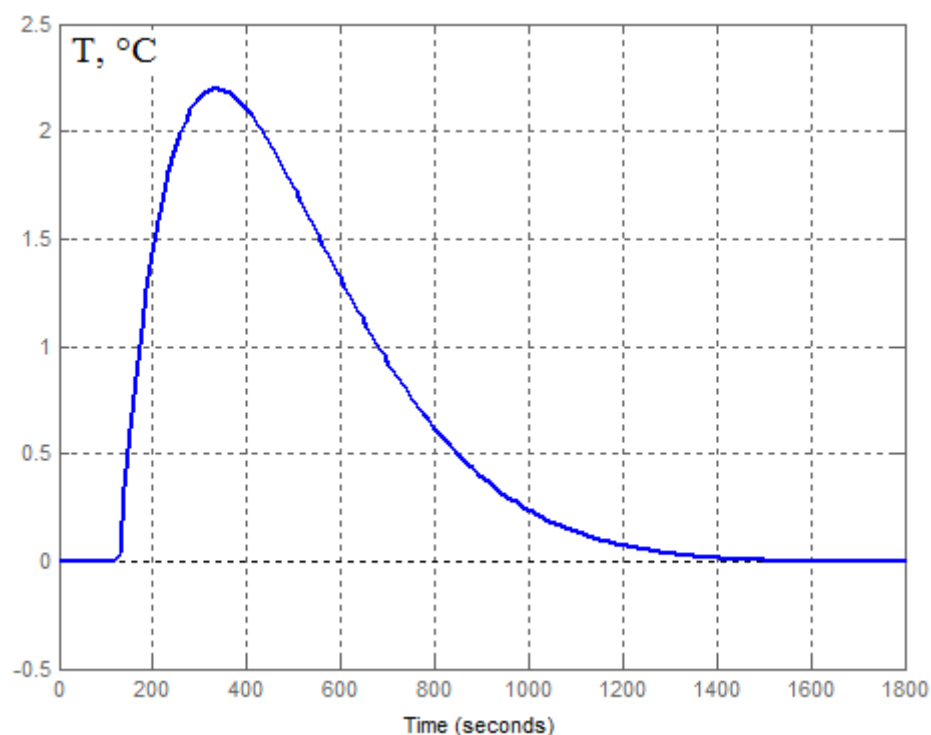


Рисунок 3.7 – Переходный процесс системы до оптимизации

Для оптимизации настроек регулятора необходимо в блоке PID-tuner задать параметры, соответствующие требуемым. В результате получается переходной процесс, изображенный на рисунке 3.8, для которого настройки регулятора имеют следующие значения

$$K_p = 0,251 \% \text{ XPO}/^{\circ}\text{C},$$

$$K_I = 0,002079703 \text{ с},$$

$$K_D = 13,5384882 \text{ с}.$$

Как видно из рисунка 3.8, полученный переходной процесс в большей степени удовлетворяет требуемым показателям качества, так как время регулирования  $t_p \approx 900 \text{ с}$ ; максимальное динамическое отклонение  $\Delta T_1 = 1,75 \cdot 7 = 12,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , что меньше  $13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; статическая ошибка  $\Delta T_{\text{ст}} = 0$ ; вид

переходного процесса – с перерегулированием; перерегулирование составляет  $\eta = (\Delta T_2 / \Delta T_1) \cdot 100 = (0,15 / 1,75) \cdot 100 = 8,6 \%$ .

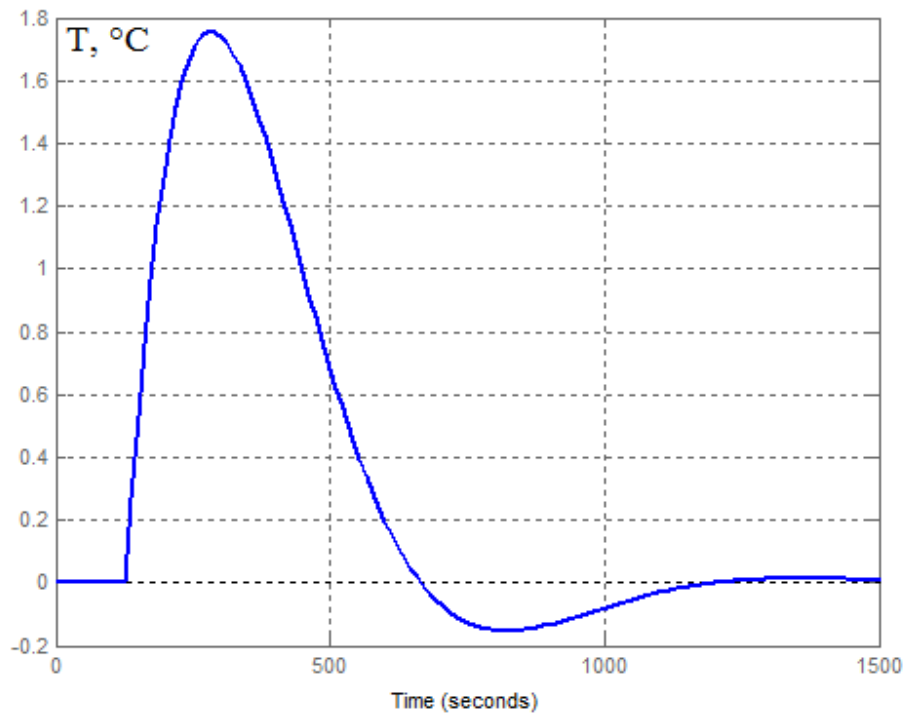


Рисунок 3.8 – Переходный процесс в системе после оптимизации настроек регулятора в ПП Matlab

В результате оптимизации были получены следующие настройки ПИД-регулятора:

- коэффициент усиления регулятора  $K_{\Pi} = K_p = 0,251 \text{ \% XPO /}^\circ\text{C}$ ;
- время издрорма  $T_{\text{И}} = K_p / K_{\text{И}} = 120,6903 \text{ с}$ ;
- время предварения  $T_{\text{Д}} = K_{\text{Д}} / K_p = 53,9382 \text{ с}$ .

Окончательная передаточная функция регулятора будет иметь вид

$$W_{\text{пид}}(p) = 0,251 \cdot \left( 1 + \frac{1}{120,6903p} + 53,9382p \right).$$

### 3.3 Исследование АСР на устойчивость

После определения настроек регулятора необходимо исследовать устойчивость АСР, а также определить запас устойчивости системы по модулю и по фазе, используя частотный критерий Найквиста. Для этого сначала рассчитывается амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) объекта [29]. Её получают подстановкой  $p = j\omega$  в передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W_{об}(p) = \frac{10,667}{260p + 1} \cdot e^{-127,7p};$$

$$W_{об}(j\omega) = \frac{10,667}{260j\omega + 1} \cdot e^{-127,7j\omega}.$$

Сначала находим АФХ объекта без учета запаздывания

$$\begin{aligned} W_{об}(j\omega) &= \frac{10,667}{260j\omega + 1} = \frac{10,667}{260j\omega + 1} \cdot \frac{-260j\omega + 1}{-260j\omega + 1} = \\ &= \frac{10,667}{1 + (260\omega)^2} - j \frac{10,667 \cdot 260\omega}{1 + (260\omega)^2}; \end{aligned}$$

$$P(\omega) = \frac{10,667}{1 + (260\omega)^2},$$

$$Q(\omega) = - \frac{10,667 \cdot 260\omega}{1 + (260\omega)^2}.$$

Учтем запаздывание в системе:

$$W_3(j\omega) = e^{-127,7j\omega} = \cos(127,7\omega) - j \cdot \sin(127,7\omega) = P_3(\omega) + jQ_3(\omega).$$



Тогда АФХ объекта будет

$$W(j\omega) = W_{06}(j\omega) \cdot W_3(j\omega) = \\ [P_{06}(\omega) \cdot P_3(\omega) - Q_{06}(\omega) \cdot Q_3(\omega)] + j[Q_{06}(\omega) \cdot P_3(\omega) + P_{06}(\omega) \cdot Q_3(\omega)].$$

Найдем АФХ регулятора:

$$W_p(j\omega) = K_p \cdot \left[ 1 + \frac{1}{T_{И}j\omega} + T_{Д}j\omega \right],$$

$$W_{пид}(p) = 0,251 \cdot \left( 1 + \frac{1}{120,6903p} + 53,9382p \right).$$

Разделим  $W_p(j\omega)$  на вещественную и мнимую части, получим:

$$P_p(\omega) = 0,251,$$

$$Q_p(\omega) = 0,251 \cdot \left[ 53,9382\omega - \frac{1}{120,6903\omega} \right].$$

АФХ разомкнутой системы получается как произведение АФХ объекта  $W(j\omega)$  и регулятора  $W_p(j\omega)$ :

$$W_{раз}(j\omega) = W(j\omega) \cdot W_p(j\omega) = [P(\omega) + jQ(\omega)] \cdot [P_p(\omega) + jQ_p(\omega)].$$

Разделив  $W_{раз}(j\omega)$  на вещественную и мнимую части, получим:

$$P_{раз}(\omega) = P(\omega)P_p(\omega) - Q(\omega)Q_p(\omega),$$

$$Q_{\text{раз}}(\omega) = Q(\omega)P_p(\omega) + P(\omega)Q_p(\omega).$$

Значения  $P_{\text{раз}}(\omega)$  и  $Q_{\text{раз}}(\omega)$  приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Значения АФХ объекта, регулятора и разомкнутой АСР

$\omega$	$P(\omega)$	$Q(\omega)$	$P_p(\omega)$	$Q_p(\omega)$	$P_{\text{раз}}(\omega)$	$Q_{\text{раз}}(\omega)$
0	10,667	0	0,251	$-\infty$	$-\infty$	$-\infty$
0,001	9,57937	-3,8491	0,251	-2,066	-5,54848	-20,759
0,0012	9,14389	-4,4811	0,251	-1,717	-5,39824	-16,823
0,017	-2,188	0,86786	0,251	0,108	-0,64277	-0,0181
0,019	-1,6774	1,29051	0,251	0,148	-0,61173	0,07604
0,021	-1,1492	1,5402	0,251	0,185	-0,57381	0,17367
0,022	-0,8892	1,60746	0,251	0,203	-0,55	0,22269
0,023	-0,6365	1,64017	0,251	0,221	-0,52218	0,27104
0,024	-0,3942	1,64125	0,251	0,238	-0,49	0,31804
0,025	-0,1647	1,61361	0,251	0,255	-0,45326	0,36296
0,027	0,24681	1,48395	0,251	0,289	-0,36619	0,44368
0,029	0,58445	1,27486	0,251	0,321	-0,26241	0,50754
0,031	0,83973	1,00986	0,251	0,353	-0,14531	0,54957
0,033	1,00911	0,71178	0,251	0,384	-0,01986	0,5659
0,035	1,0936	0,4021	0,251	0,414	0,107854	0,55415
0,037	1,09832	0,1003	0,251	0,445	0,231075	0,51362
0,039	1,03187	-0,1767	0,251	0,475	0,342881	0,44545
0,041	0,90568	-0,4151	0,251	0,504	0,436692	0,35259
0,043	0,73323	-0,6046	0,251	0,534	0,506744	0,23965
0,045	0,52925	-0,7383	0,251	0,563	0,548514	0,11266
0,047	0,30887	-0,8133	0,251	0,592	0,559067	-0,0213
0,049	0,08683	-0,8302	0,251	0,621	0,537295	-0,1545
0,053	-0,3095	-0,7073	0,251	0,678	0,402085	-0,3875
0,057	-0,575	-0,4303	0,251	0,735	0,172032	-0,5307
0,061	-0,6658	-0,0852	0,251	0,792	-0,09967	-0,5485
0,065	-0,5834	0,23804	0,251	0,848	-0,34829	-0,435
0,067	-0,4887	0,36733	0,251	0,876	-0,44445	-0,3359
0,069	-0,3683	0,46564	0,251	0,904	-0,51338	-0,216
0,071	-0,2312	0,52867	0,251	0,932	-0,55071	-0,0827
0,075	0,05535	0,5435	0,251	0,988	-0,5229	0,19108
0,079	0,29922	0,42371	0,251	1,043	-0,36691	0,41851
$\infty$	0	0	0,251	$\infty$	0	0

АФХ разомкнутой системы строим на комплексной плоскости (рисунок 3.9).

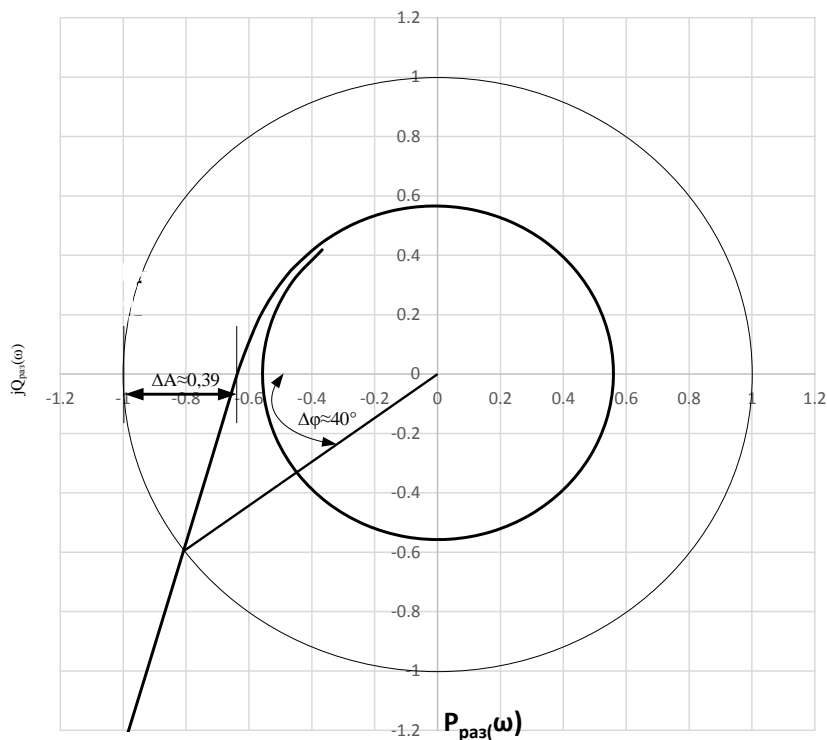
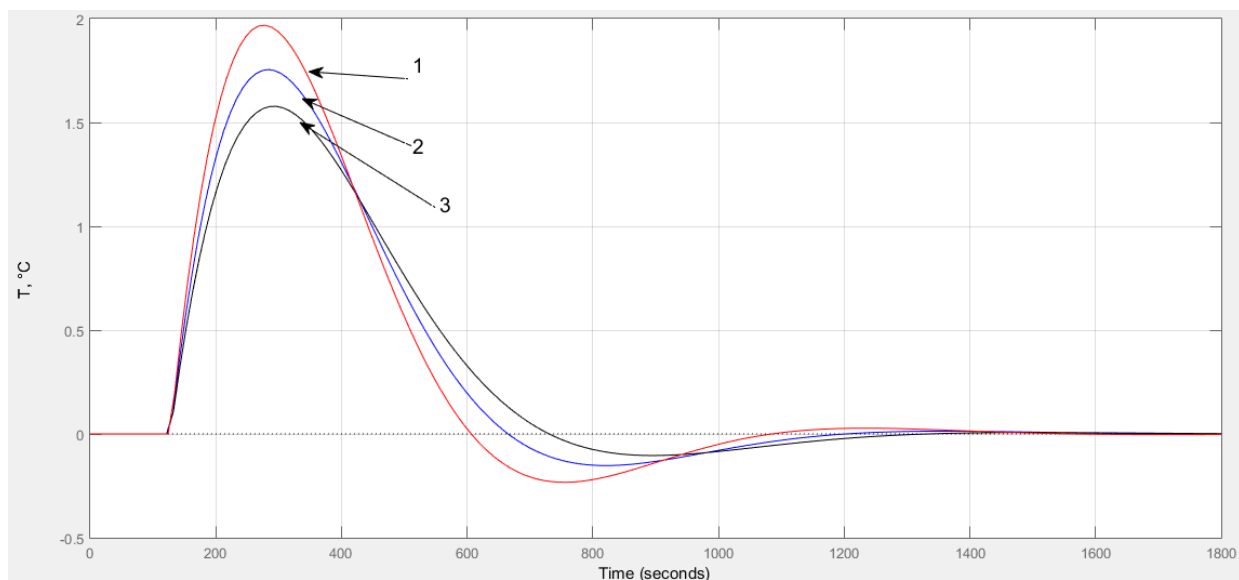


Рисунок 3.9 – АФХ разомкнутой системы

Так как годограф Найквиста – АФХ разомкнутой системы (рисунок 3.9) не охватывает точку с координатами  $(-1; j\omega)$  на комплексной плоскости, значит система в замкнутом состоянии устойчива и имеет достаточные запасы устойчивости по амплитуде ( $\Delta A \approx 0,39$ ) и по фазе ( $\Delta \varphi \approx 40^\circ$ ).

### 3.4 Проверка системы на оптимальность

Для того, чтобы убедиться в правильности нахождения настроек регулятора, изменим настройки ПИД-регулятора на 20 % в большую ( $K_p = 0,3012$  % ХРО;  $T_{И} = 144,82836$  с;  $T_{Д} = 64,72584$  с), и в меньшую сторону ( $K_p = 0,2008$  % ХРО;  $T_{И} = 96,55224$  с;  $T_{Д} = 43,15056$  с) (рисунок 3.10).



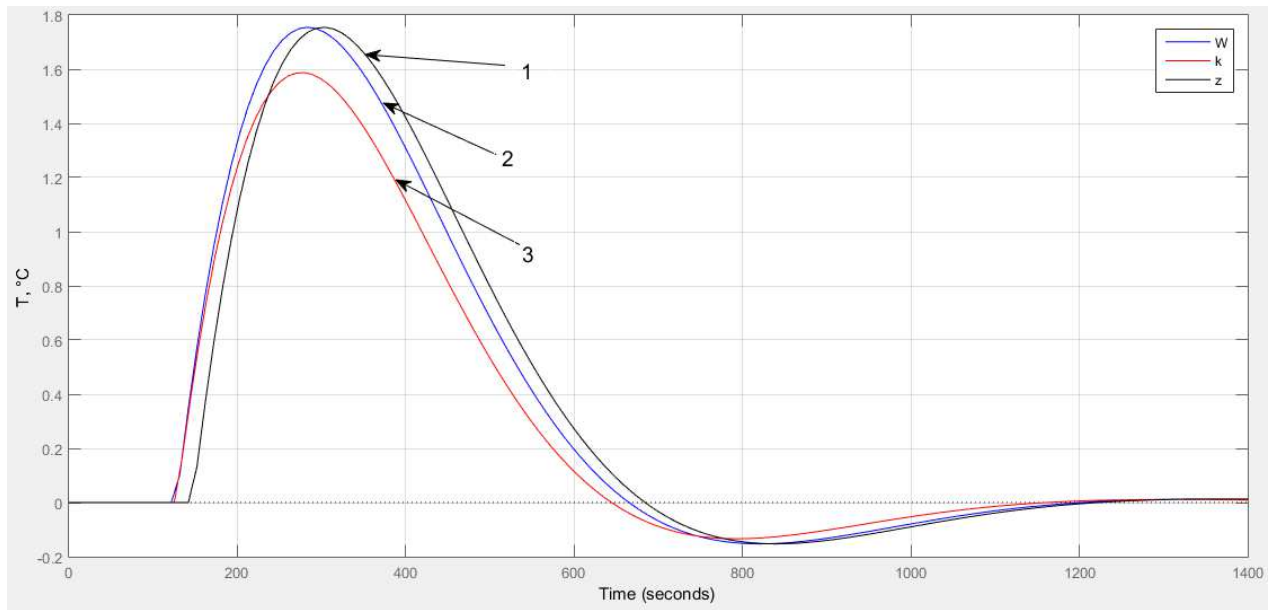
- 1 – переходная характеристика с настройками регулятора, уменьшенным на 20 %;
- 2 – переходная характеристика с оптимальными настройками регулятора;
- 3 – переходная характеристика с настройками регулятора, увеличенными на 20 %

Рисунок 3.10 – Проверка системы на оптимальность в ПП Matlab

Из графиков на рисунке 3.10 видно, что при уменьшении настроек ПИД-регулятора увеличивается динамическое отклонение и время регулирования, при увеличении – уменьшается динамическое отклонение, а перерегулирование и время регулирования увеличиваются. Отсюда делаем вывод, что система устойчива при изменении параметров регулятора, но качество процесса регулирования ухудшается, следовательно, найденные параметры регулятора оптимальны.

### 3.5 Проверка АСР на грубость

Зачастую параметры объекта управления определены с ошибкой или изменяются во времени. В этих условиях необходимо проверять рассчитанную систему на грубость к возможным вариациям параметров системы для наихудших условий. Для этого изменим величину коэффициента усиления и время запаздывания объекта на 15 % в большую сторону (рисунок 3.11).



1 – с увеличением запаздывания на 15 %, 2 – с исходными параметрами,

3 – с увеличением коэффициента усиления на 15 %

Рисунок 3.11 – Проверка системы на грубость

Из графиков, представленных на рисунке 3.11, видно, что при увеличении параметров объекта (коэффициента усиления и времени запаздывания) переходной процесс устойчивый (не расходящийся), следовательно, система является грубой к изменениям параметров объекта.

[изъят раздел 4]

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Ферсман, А. Е. Очерки по минералогии и геохимии: монография / А. Е. Ферсман. Москва: Наука, 1977. – 194 с.

2 Производство глинозема / А. И. Лайнер, Н. И. Еремин, Ю. А. Лайнер, И. З. Певзнер. – Москва: Металлургия, 1978. – 344 с.

3 Пат. 2361815 Российская Федерация, МПК7 С 01 F 7/14. Способ переработки глиноземсодержащего сырья / Логинова И.В., Логинов Ю.Н., Овчинникова М.Н. № 2007144790/15; заявл. 03.12.2007; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 13. – 4 с.

4 Пат. 2447023 Российская Федерация, МПК7 С 01 F 7/06, С 01 F 7/14. Способ переработки глиноземсодержащего сырья / Логинова И.В., Логинов Ю.Н., Шопперт А.А. № 2010153549/05; заявл. 27.12.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10. – 6 с.

5 Пат. 2489354 Российская Федерация, МПК7 С 01 F 7/06, С 01 F 7/14. Способ переработки глиноземсодержащего сырья / Логинова И.В., Логинов Ю.Н., Шопперт А.А. № 2012107997/05; заявл. 01.03.2012; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 22. – 8 с.

6 Пат. 2494965 Российская Федерация, МПК7 С 01 F 7/06, С 01 F 7/14. Способ переработки бокситов / Логинова И.В., Логинов Ю.Н., Кырчиков А.В. № 2012107941/02; заявл. 01.03.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. – 6 с.

7 Пат. 2381992 Российская Федерация, МПК7 С 01 F 7/14. Способ получения песчаного глинозема при переработке глиноземсодержащего сырья способом спекания / Пихтовников А.Г., Аникеев В.И., Ананьева Н.Н., Чащин О.А., Котлягин Е.Г. № 2005129818/15; заявл. 26.09.2005; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5. – 8 с.

8 Производство глинозема и экономические расчеты в цветной металлургии: учебное пособие / А. В. Кырчиков, И. В. Логинова, Д. А. Рогожников, А. А. Шопперт.– Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2016. – 253 с.

9 Пат. 2257347 Российская Федерация, МПК7 7С 01 F 7/06 А, 7С 01 F 7/38 В. Способ комплексной переработки бокситов / Ибрагимов А.Т., Поднебесный Г.П., Сынкova Л.Н., Амбарникова Г.А., Михайлова О.И. № 2004104099/15; заявл. 11.02.2004; опубл. 27.07.2005, Бюл. № 21. – 10 с.

10 Иванов, М.А. Разработка комплексной технологии получения глинозема из российского низкокачественного высококремнистого сырья / М.А. Иванов // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2016. – № 3 (25). – С. 28–31.

11 Беляев, А. И. Металлургия лёгких металлов : учеб. пособие / А. И. Беляев. – Москва: Metallurgy, 1970. – 368 с.

12 Москитии, В. И. Металлургия лёгких металлов : учеб. для вузов / В. И. Москитии, И. В. Николаев, Б. А. Фомин. – Москва: Интернет Инжиниринг, 2005. – 416 с.

13 Аппаратурное оформление передела кальцинации (ТВП+БХ) [Электронный ресурс] // Всё о металлургии. – Режим доступа: <http://metal-archive.ru/proizvodstvo-glinozema/2470-apparaturnoe-oformlenie-peredela-kalcinacii-tvpbh.html>.

14 АСУТП и MES глиноземного производства: отчёт по обследованию / АО «РУСАЛ Ачинск», 2018. – 29 с.

15 Расходомеры на базе диафрагмы 405 [Электронный ресурс]: Краткое руководство по установке // Официальный сайт компании Emerson. – Режим доступа: <https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides-405-rosemount-ru-1630532.pdf>.

16 Преобразователи термоэлектрические Метран-2000 [Электронный ресурс]: Каталог // Официальный сайт компании Emerson. – Режим доступа: <https://www.emerson.com/documents/automation/catalog--2000--metran-ru-61342.pdf>.

17 Метран-2000. Термопары [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Emerson. – Режим доступа: <https://www.emerson.ru/ru-ru/catalog/metran-2000tc-ru-ru>.



18 Клапаны регулирующие с электроприводами [Электронный ресурс]: Каталог // ТЕХМАРКЕТ. – Режим доступа: <https://www.techmarcet.ru/klapan-y-reguliruyushchie/klapan-y-s-ehlektroprivodami/klapan-sedelnyy25nzh947nzhreguliruyuschiynerzh-stalflancevyyPN-16-40-bar/>.

19 Механизмы исполнительные электрические однооборотные [Электронный ресурс]: руководство по эксплуатации // ООО «ПКП «Чебоксарыэлектропривод». – Режим доступа: [https://chep.nt-rt.ru/images/manuals/meo\\_meof\\_630\\_1600.pdf](https://chep.nt-rt.ru/images/manuals/meo_meof_630_1600.pdf).

20 Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-2М [Электронный ресурс]: Руководство по эксплуатации // ОАО Рязский авторемонтный завод. – Режим доступа: <http://tl52.ru/pbr-2m.html>.

21 Анализатор влажности SONO-VARIO Standard [Электронный ресурс]: Каталог // РусАвтоматизации. – Режим доступа: <https://rusautomation.ru/analizatory-vlazhnosti/sono-vario-standart>.

22 Конвейерные весы [Электронный ресурс]: Каталог // Симатик-Маркет. – Режим доступа: <http://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10018036/info/>.

23 Конвейерные весы Milltronics MSI и MMI [Электронный ресурс]: Каталог // Симатик-Маркет. – Режим доступа: <http://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10018039/info/>.

24 Сенсон-СВ-5024 стационарный газоанализатор [Электронный ресурс]: Каталог // Газ-Анализ. – Режим доступа : <https://gas-analiz.ru/senson-sv-5024.html>.

25 Газоанализатор стационарный Сенсон-СВ-5024 [Электронный ресурс]: Каталог // ООО НЕРКОН. – Режим доступа: <https://nerkon.ru/catalog/gazoanalizator/gasanalyzers-stationary/gazoanalizator-staczionarnyj-senson-sv-5024.html>.

26 Siemens S7-300 Программируемый контроллер [Электронный ресурс]: Каталог // ООО ПромЭнерго Автоматика. – Режим доступа: <https://www.siemens-pro.ru/components/s7-300.htm>.

27 Компьютеры KODIAK-620 [Электронный ресурс]: Каталог продукции // Digital Systems Engineering. – Режим доступа: <https://www.digitalsys.com/product/kodiak-620/>.

28 Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов: учеб. пособие для вузов / Г. М. Глинков, В. А. Маковский, С. Л. Лотман, М. Р. Шапировский. – Москва: Металлургия, 1986. – 352 с.

29 Теория автоматического управления: учеб. для вузов по спец. «автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч.1 Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова и др.; Под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 1986. – 367 с.

30 Пятернева, А. А. Повышение степени улавливания летучих фторсодержащих компонентов в производстве алюминия на высокоамперных электролизерах: дис. ... канд. тех. наук: 05.16.02 / Пятернева Александра Алексеевна. – Санкт-Петербург, 2016. – 157 с.

31 ГОСТ 30558-2017 Глинозем металлургический. Технические условия. – Введ. 1.08.2018. – Москва: Стандартинформ, 2002. – 6 с.

32 Кафаров, В. А. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. А. Кафаров, М. В. Глебов. – Москва: Высшая школа, 2011. – 400 с.

33 Ходоров, Е. И. Печи цементной промышленности / Е. И. Ходоров. – Москва: Изд-во лит. по строительству, 1998. – 512 с.

34 Лисиенко, В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление, экология: справочное издание / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. – Москва: Теплотехник, 2009. – 448 с.

35 Бурибаев, Б. Б. Оптимизация процесса обжига сыпучих материалов во вращающейся печи / Б. Б. Бурибаев, Б. Т. Темирбеков // Статистика, учет и аудит. – 2018. – № 1 (68). – С. 225–233.

36 Производство алюминия: ИТС. – Москва: Бюро НДТ, 2019. – 247 с.

37 Шумихин, А. Г. Анализ особенностей оперативного управления процессом стадии обезвоживания карналлита во вращающихся печах в производстве магнезия / А. Г. Шумихин, С. Н. Кондрашов, А. В. Малышенко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2018. – № 3. – С. 24–41.

38 Салихов, З. Г. Компьютерная система автоматического управления процессами обжига материалов в трубчатых вращающихся печах / З. Г. Салихов, А. А. Бекаревич // Цветные металлы. – 2003. – № 5. – С. 89–91.

39 Пат. 2232959 Рос. Федерация, МПК7 F 27 В 7/42, F 27 D 19/00. Система управления процессом обжига материала во вращающейся печи / З. Г. Салихов, В. И. Шубин, А. А. Бекаревич, К. З. Салихов – № 2002102511/02, заявл. 01.02.2002; опубл. 20.07.2004. – 5 с.

40 Шубин, М. В. Автоматическая система упреждения аварий (разрушения огнеупорной футеровки) мощных вращающихся печей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Шубин Михаил Владимирович. – Москва, 2010. – 28 с.

41 Гельфанд, Я. Е. Управление цементным производством с использованием вычислительной техники / Я. Е. Гельфанд. – Ленинград: Стройиздат, 1973. – 178 с.

42 Салихов, З. Г. Разработка бесконтактного метода автоматического контроля температуры обжигаемого материала по всей длине вращающейся печи / З. Г. Салихов // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2002. – № 6. – С. 67–73.

43 Салихов, З. Г. Алгоритм расчета установок регуляторов стабилизации температурного профиля обжигаемого материала в функции длины корпуса вращающейся печи / З. Г. Салихов // Цветные металлы. – 2003. – № 3. – С. 92–96.

44 Беккер, В. Ф. Решение технологических проблем действующего производства средствами автоматизации: моногр.: в 2 т. / В. Ф. Беккер. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – Т. 2. – 176 с.

45 Гринман, И. Г. Усовершенствование термографического метода анализа / И. Г. Гринман, Б. Б. Бурибаев // Материал I Республиканского научно-технического совещания по прикладной минералогии. – Алма-Ата: ИМиО, 1986.

46 Титовский, А. В. Технические измерения и приборы. Термометры. Манометры. Расходомеры. Уровнемеры: учеб. пособие / А. В. Титовский, А. А. Дружинина // Красноярск: ГАЦМиЗ, 2003. – 116 с.

47 Емкостной датчик уровня Solicap FTI77 [Электронный ресурс]: Каталог // Официальный сайт ООО «Эндресс+Хаузер». – Режим доступа: <https://www.ru.endress.com/ru/Tailor-made-field-instrumentation/uroven/Solicap-FTI77>.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра «Автоматизация производственных процессов в металлургии»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 Т. В. Донцова  
подпись

« 8 » июля 2020 г.

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Автоматизация процесса кальцинации при производстве глинозёма

Направление 15.03.04 Автоматизация технологических процессов  
и производств

Профиль подготовки 15.03.04.01 Автоматизация технологических  
процессов и производств (в металлургии)

Руководитель  30.06.2020 доцент, канд. техн. наук А. А. Дружинина  
подпись, дата должность, ученая степень

Выпускник

  
подпись, дата

Б. К. Янг

Нормоконтролер

 30.06.2020  
подпись, дата

А. А. Дружинина

Красноярск 2020