

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления

Джайлаубеков Алихан Асқарұлы

Разработка системы управления компрессорной станции по подготовке  
сжатого воздуха

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

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



**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

На тему: “Разработка системы управления компрессорной станции по  
подготовке сжатого воздуха”

по специальности: 5В070200 – Автоматизация и управление

Выполнил

Джайлаубеков А. А.

Рецензент

PhD,

Руководитель ЦКиТТвОАиМ ВКГТУ

 Порубов Д. А.

(подпись)

"6" мая 2022 г.

Научный руководитель

PhD,

сениор-дектор

 Кулакова Е. А.

(подпись)

"13" мая 2022 г.

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления

5B070200 – Автоматизация и управление



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АиУ

к.ф.м.н., ассоц. профессор

Алдияров Н. У.

"13" мая 2022 г

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломного проекта**

Обучающемуся Джайлаубекову А. А.

Тема: “Разработка системы управления компрессорной станцией по подготовке сжатого воздуха”.

Утвержден приказом ректора Университета № 489-п/0 от “24” 12.2021 г.

Срок сдачи законченной работы: “5” мая 2022 г.

Исходные данные дипломного проекта: технологическая схема компрессорной установки, кривая разгона по производительности турбокомпрессора.

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов или краткое содержание дипломного проекта: а) анализ технологического процесса; б) разработка функциональной схемы автоматизации и структурной схемы системы управления; в) решение задач анализа и синтеза системы. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): принципиальная схема компрессора, функциональная схема автоматизации компрессорной станции.

Рекомендуемая основная литература: 1) Парамонов А. М. Технологические энергоносители предприятий. – М.: ОмГТУ, 2017. 2) Блейхер И. Г., Лисеев В. П. Компрессорные станции. – М.: Машгиз, 2015.

**ГРАФИК**  
подготовки дипломного проекта

| Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов | Сроки представления научному руководителю и консультантам | Примечание |
|--|---|------------|
| Технологический раздел                                   | 02.03.2022 г.   |            |
| Специальный раздел                                       | 15.04.2022 г.   |            |

**Подписи**

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

| Наименования разделов  | Научный руководитель, консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание) | Дата подписания | Подпись   |
|------------------------|--|-----------------|---|
| Технологический раздел | PhD, сениор-лектор<br>Кулакова Е. А.                             | 3.03.22         |  |
| Специальный раздел     | PhD, сениор-лектор<br>Кулакова Е. А.                             | 18.04.22        |  |
| Нормоконтролер         | Ассистент-профессор<br>Сарсенбаев Н. С.                          | 4.05.22         |  |

Научный руководитель \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ Кулакова Е. А.

Задание принял к исполнению обучающийся \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ Джайлаубеков А. А.

Дата

"26" 01 2022 г.

## АНДАТПА

Бұл дипломдық жобада компрессорлық станцияны басқару жүйесін жасау процесі талданған. Дипломдық жоба екі бөлімнен тұрады.

Бірінші бөлімде сығылған ауаның өндірісте қолданылуы, сонымен қатар компрессорлық станцияда қолданылатын орталықтан тепкіш компрессордың жұмыс істеу принципі сипатталған. Сонымен қатар, бұл бөлімде тау-кен байыту комбинатында қолданылатын компрессорлық станцияның құрамы зерттеледі.

Екінші бөлімде басқару нүктелерін анықтау және автоматтандырудың функционалдық схемасын құру. Сондай-ақ компрессорды басқару жүйесінің математикалық моделі есептелді және талданды, оның ішінде өтпелі процестің тұрақтылығы мен басқарылуы.

ПИД-контроллері үшін параметрлер Циглер-Никольс әдісімен есептелді, ал параметрлер Simulink-те баптау арқылы таңдалды, содан кейін контроллермен өтпелі процестер бір-бірімен, сондай-ақ бақылаусыз процесспен салыстырылды. Өтпелі процестерді талдау негізінде реттегіштердің үздіктері таңдалды.

## АННОТАЦИЯ

В данном дипломном проекте был разобран процесс разработки системы управления компрессорной станцией. Дипломный проект состоит из двух разделов.

Описано применение сжатого воздуха на производстве, а также принцип работы центробежного компрессора, применяющегося на компрессорной станции. Кроме того, в данном разделе изучен состав компрессорной станции, применяющейся на горно-обогатительной фабрике.

Также были определены точки контроля и составлена функциональная схема автоматизации. Рассчитана и проанализирована математическая модель системы управления компрессором, в том числе устойчивость и управляемость переходного процесса.

Рассчитаны параметры для ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса, и произведён подбор параметров с помощью тюнинга в Simulink, далее переходные процессы с регулятором сравнены между собой, как и с процессом без регулирования. Выбран наилучший из регуляторов на основе анализа переходных процессов.

## ANNOTATION

In this diploma project, the process of developing a control system for a compressor station was analyzed. The diploma project consists of two sections.

The first section describes the use of compressed air in production, as well as the principle of operation of a centrifugal compressor used in a compressor station. In addition, in this section, the composition of the compressor station used at the mining and processing plant is studied.

The second section is the definition of control points and drawing up a functional diagram of automation. Also, a mathematical model of the compressor control system was calculated and analyzed, including the stability and controllability of the transient process.

The parameters for the PID controller were calculated by the Ziegler-Nichols method, and the parameters were selected using tuning in Simulink, then the transients with the controller were compared with each other, as well as with the process without control. The best of the regulators was selected based on the analysis of transient processes.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение  | 9  |
| 1 Технологическая часть   | 11 |
| 1.1 Применение сжатого воздуха на производстве                    | 11 |
| 1.2 Принцип работы компрессоров сжатого воздуха, их классификация | 12 |
| 1.3 Выбор метода управления компрессором                          | 17 |
| 1.4 Описание структуры и работы компрессорной станции             | 18 |
| 2 Разработка оптимальной системы управления                       | 25 |
| 2.1 Определение структуры АСУ ТП                                  | 25 |
| 2.2 Разработка функциональной схемы автоматизации                 | 26 |
| 2.3 Исследование компрессорной станции как объекта управления     | 29 |
| 2.3.1 Составление функциональной схемы управления компрессором    | 29 |
| 2.3.2 Анализ динамических свойств системы без регулятора          | 34 |
| 2.3.3 Выбор наилучшего регулятора                                 | 38 |
| 2.3.4 Прямые оценки качества системы с ПИ-регулятором             | 42 |
| Заключение  | 45 |
| Список использованной литературы                                  | 46 |
| Приложение А  |    |

## ВВЕДЕНИЕ

Сжатый воздух повсеместно используется как в повседневной жизнедеятельности, так и в промышленности, где можно практически на каждом цеху встретить какую-либо операцию, связанную с пневматикой. Это связано с тем, что воздух сам по себе не обладает какими-либо вредными свойствами, будь то едкость, специфический запах, а самое главное, он огнебезопасен и не ядовит, как, к примеру, аммиак. Устройства, производящие его - компрессоры - способны обеспечивать сжимаемость воздуха в разных объемах и значениях давления, но имеют некоторые недостатки, в частности эргономичность.

Компрессорные станции состоят из компрессоров, различного вспомогательного оборудования, пожарной сигнализации, а также встроенных систем отопления и вентиляции. Они обеспечивают подготовленным и очищенным сжатым воздухом не только кабинет стоматолога или пневмоинструмент на стройке, но и таких известных поставщиков руды и минералов, как «КазЦинк», «КазАтомПром», «КазакМыс», «KazMinerals», и в других сферах производства, как машиностроительная, пищевая и химическая промышленность. Не секрет, что большинство производственных мощностей нашей страны заточены под обогащение или иную обработку полезных ископаемых, которые приносят не только очищенный продукт и солидную выручку, но и рабочие места, а следовательно, для дальнейшего развития этой отрасли необходимы исследования в таком ключе.

Самая значительная задача автоматизации – эффективное и безопасное управление как простейшими, так и комплексными процессами, потребность корректной и качественно разработанной структуры по доставке сжатого воздуха неоспорима. **Актуальность работы** состоит в том, что большинство проблем современного производства будут значительно менее влиятельны – эффективность подачи воздуха возрастет, при этом затраты на обслуживание и ремонт сократятся, а самое главное - значительно увеличится безопасность на предприятиях не только на поломку компрессора или части структуры, с ним связанной, но и взрывобезопасность всего предприятия. Так, персонал будет более уверен в сохранности жизни и здоровья, а инвесторы - в сохранности вложенного капитала. Не стоит забывать и об энергоэффективности автоматизации, ведь производство сжатого воздуха является весьма энергозатратным процессом, требующим много энергии. Таким образом, автоматизация компрессорных станций является обоснованной как для безопасности, так и в плане экономии ресурсов.

В данном дипломном проекте **целью** является разработка системы управления компрессорной станции по подготовке сжатого воздуха.

**Задачами дипломного проекта являются:**

- описание процесса подготовки сжатого воздуха, а также структуры и состава компрессорной станции;
- описание точек контроля АСУ ТП, разработка функциональной схемы автоматизации;
- нахождение передаточных функций всех элементов системы, разработка структурной схемы;
- проведение исследований над САР без регулятора на устойчивость;
- сравнение и выбор наилучшего регулятора на основе метода Циглера-Никольса, а также тюнинга в среде Simulink.

## 1 Технологическая часть

### 1.1 Применение сжатого воздуха на производстве

Сжатый воздух используется в абсолютном большинстве предприятий, ведь он не имеет каких-либо опасных свойств и применяется во множестве операций, которые иначе практически невыполнимы. Компрессоры, производящие его, стоят как на малых заводах, так и на огромных производственных цехах и обогатительных фабриках, где таких энергетических машин может быть больше десятка. Использование сжатого воздуха не ограничивается на упаковочном оборудовании, что показано в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сферы применения сжатого воздуха

| №  | Отрасль                      | Процесс  |
|----|------------------------------|--|
| 1  | Горно-обогатительная         | Транспортировка, обдув и охлаждение, обогащение сырья, распыление реагентов, аффинаж, флотация     |
| 2  | Машиностроительная           | Формировка, штамповка, привод для инструментов   |
| 3  | Химическая, фармацевтическая | Фракционирование, дегидратация, окисление, очистка от побочных материалов, сушка и выделение азота |
| 4  | Пищевая                      | Розлив, вакуумная упаковка и напыление покрытий  |
| 5  | Мебельная                    | Очистка древесины, обдув продукта, обработка давлением   |
| 6  | Нефтегазовая                 | Вывод попутных газов из системы, питание приборов КИПиА  |
| 7  | Целлюлозно-бумажная          | Очистка сырой целлюлозы, обдув готового продукта, напыление реагентов                              |
| 8  | Стекольная                   | Обдув и охлаждение стекла  |
| 9  | Текстильная                  | Зажим и транспортировка, питание для пневмоинструментов, текстурирование                           |
| 10 | Добывающая                   | Вентиляция труднодоступных помещений под давлением   |

Использование пневмоинструментов, к примеру, необходимо в машиностроении, а также в некоторых особо опасных участках производства, поскольку хоть они и менее энергоэффективны, нежели электрические инструменты, их преимуществом является малое тепловыделение и отсутствие искр при работе. В химической и лекарственной деятельности сжатый воздух нужен для процессов окисления, фракционирования, дегидратации и т. д. В пищевой отрасли, как ранее отмечалось, необходимость в упаковывании или обработке мясных изделий, смешивании ингредиентов никуда не отпадает. В стекольной компании - обдув и охлаждение стекла, в древесинном цеху и мебельной мастерской - процесс очистки и обдува древесины, в целлюлозно-бумажной фабрике - очистка целлюлозы и обдув готового продукта. Но все же лучшим примером является горно-обогатительная отрасль, где так или иначе все процессы зависят от подготовки и подачи сжатого воздуха, прямо от выдачи сырья к производственной линии и печам, а затем и охлаждения полученного продукта, заканчивая аффинажем и распылением реагентов.

## **1.2 Принцип работы компрессоров сжатого воздуха, их классификация**

В первую очередь, компрессоры разделяют по развиваемому давлению, что показано в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Компрессоры по развиваемому давлению

| Классификация | Значение давления, МПа |
|---------------|------------------------|
| Низкого       | < 1,5                  |
| Среднего      | 1,5–10                 |
| Высокого      | 10–100                 |
| Сверхвысокого | > 100                  |

Нагнетатели дают малое сжатие, зачастую они применяются в обжарке и обдуве металла, к примеру. Те, что дают средние значения в 1,5–10 мега паскаль, используются в основном на предприятиях, связанных с процессами очистки и охлаждения, а при больших показателях – для подачи воздуха в труднодоступные глубокие шахты, а также в машиностроении и нефтегазовой отраслях.

Также, сжимающие газ машины разделяют по типу питания (на электрические, дизельные и питаемые турбиной), по наличию масляного блока (масляные и безмасляные) и по мобильности (стационарные и передвижные).

Кроме того, компрессоры действуют в разное количество ступеней. Разница между ними в том, во сколько этапов они сжимают газ до необходимого состояния. Одноступенчатые компрессоры – первые из всех с исторической перспективы, и понятное дело сжимают газ сразу, а мощность сжатия не превышает 12–13 атм. В основном их используют на малых предприятиях, так как они компактны, потребляют мало электроэнергии, и на самом деле, довольно стары, что точно не играет им на руку. Двухступенчатые компрессоры более современны, соответственно в них две ступени сжатия, что позволяет более равномерно распределять нагрузку, что означает длительное использование и достижение большей мощности сжатия. Единственными недостатками, относительно ранее озвученного вида, являются цена и много занимаемого места. Многоступенчатые установки имеют более двух ступеней сжатия, и являются самыми современными. Впрочем, это не всегда можно назвать преимуществом, поскольку они требуют пространство размером с комнату, и более шумные по сравнению с двухступенчатыми, а следовательно, и неудобными для персонала. Также, они самые дорогие, а значит требуют бережного отношения [1].

Но, пожалуй, самое главное, что компрессоры можно разделить по принципу сжатия на два вида – объемные и динамические. В объемных газ, в том числе и воздух, втягивается в камеру сжатия, которую плотно изолируют. Поршень, пара винтов, спираль или иной механизм сокращают объем камеры, из-за чего и сжимается газ.

На рисунке 1.1 приведено разделение объемных компрессоров по типам, наиболее часто использующимся в производстве.



Рисунок 1.1 - Типы объемных компрессоров

Впрочем, отличает их не только вид механизма, сокращающего объем. В таблице 1.3 предоставлены основные преимущества и недостатки различных типов объемных компрессоров.

Таблица 1.3 – Преимущества и недостатки объемных компрессоров

| Тип         | Преимущества  | Недостатки  |
|-------------|---|---|
| Винтовой    | <ul style="list-style-type: none"> <li>– низкий коэффициент трения, из-за чего высокий КПД,</li> <li>– долговечность,</li> <li>– тихая работа,</li> <li>– небольшой размер установки</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– достаточно сложная конструкция,</li> <li>– дорогие запчасти,</li> <li>– нельзя использовать с опасными газами</li> </ul>               |
| Поршневой   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- сравнительная дешевизна,</li> <li>- ремонтпригодность и простота конструкции</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– крайне шумный,</li> <li>– неравномерная подача сжатого воздуха,</li> <li>– большое количество занимаемого пространства</li> </ul>      |
| Ротационный | <ul style="list-style-type: none"> <li>– прост в использовании,</li> <li>– высокая надёжность,</li> <li>– сравнительно высокое давление</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– низкий процент КПД,</li> <li>– быстрый износ некоторых элементов,</li> <li>– вероятность заклинивания при постоянной работе</li> </ul> |

В динамических же компрессорах газ разгоняют до высокой скорости турбиной или вращением лопастей, после чего пропускают через диффузор, и его кинетическая энергия превращается в компрессионную. Их типы показаны на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Типы динамических компрессоров

У таких компрессоров также имеется множество плюсов и минусов, как видно в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Преимущества и недостатки динамических компрессоров

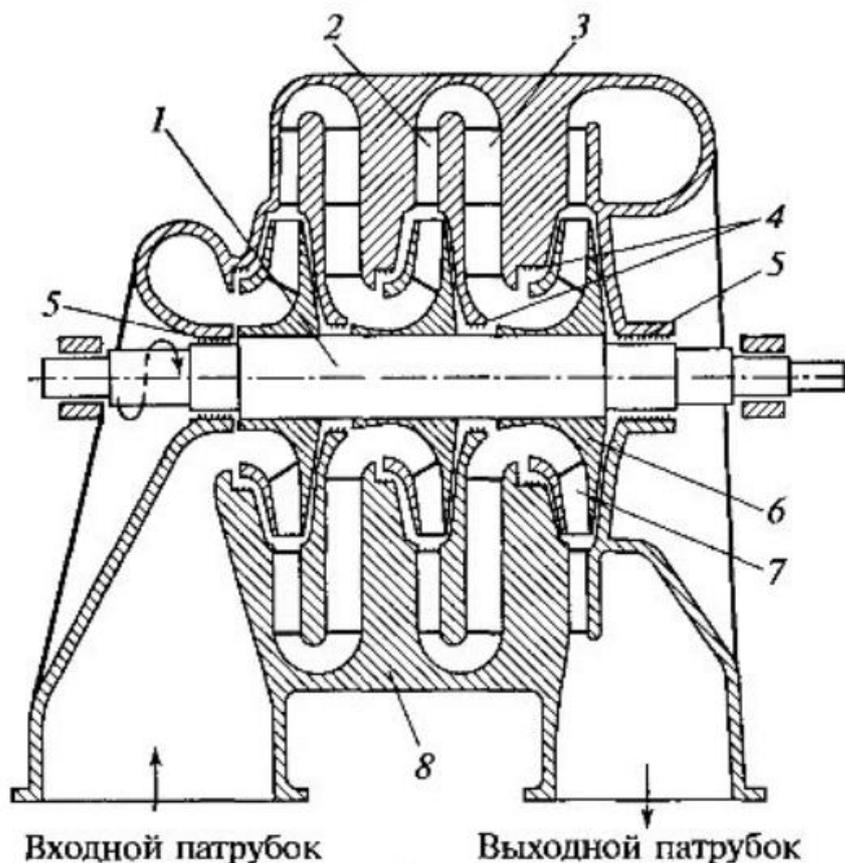
| Тип          | Преимущества  | Недостатки   |
|--------------|---|--|
| Центробежные | <ul style="list-style-type: none"> <li>– низкий уровень шума и тепловыделение,</li> <li>– долговечность,</li> <li>– ремонтпригодность,</li> <li>– способны подавать воздух постоянно</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– не способны на высокое сжатие воздуха,</li> <li>– высокий уровень вибрации при работе</li> </ul>                            |
| Осевые       | <ul style="list-style-type: none"> <li>– высокий КПД,</li> <li>– компактность</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– быстрый износ некоторых элементов,</li> <li>– сравнительно низкий показатель сжатия газа,</li> <li>– дороговизна</li> </ul> |

Более подробно нужно описать принцип действия центробежного компрессора, поскольку в горно-обогажительных комплексах пользуется популярностью именно этот тип устройств из-за описанных выше преимуществ, а также метода управления, представленном далее.

Центробежный компрессор как подвид динамических в основе своей сжимает воздух благодаря силе инерции, которая заставляет воздух внутри рабочего колеса перемещаться к его краям, попутно наращивая скорость, а затем после ее снижения - воздух отправляется в диффузор для дополнительного сжатия и приведения к стандарту давления всего воздуха, чтобы не возникало

неравномерных участков. В процессе происходит переход от кинетической в потенциальную энергию, и после этого процесса продукт идёт к потребителю [2].

На рисунке 1.3 видно, что воздух после прохода к рабочему колесу в процессе работы тянется лопастями к краям колеса, тем самым и обеспечивая сжатие. Ключевым элементом конструкции является ротор, обеспечивающий вращение вала, и зачастую он связан муфтой с электродвигателем, соответственно увеличивая частоту вращения двигателя, увеличивается частота вращения ротора.



1 Вал; 2 Диффузор; 3 Лопатки ОНА; 4 Уплотнение 1; 5 Уплотнение 2; 6 Рабочее колесо; 7 Рабочие лопатки; 8 Корпус

Рисунок 1.3 - Схема продольного разреза центробежного компрессора

В общем, вышеописанные устройства не сильно различаются по устройству, но ключевым преимуществом первых является относительно большая степень сжатия, ведь принцип управления дросселированием, который будет описан далее, неэффективен с осевыми компрессорами в полной мере, ведь они зачастую не применяются в промышленности. Вот по этой причине в большинстве компрессорных станций на обогатительных фабриках стоят турбокомпрессоры.

### 1.3 Выбор метода управления компрессором

Управление компрессорами необходимо в первую очередь для снижения затратности предприятия, а следовательно увеличения доходов и большей финансовой стойкости при возможном кризисе или сокращении потребления продуктом производителя. Что еще важнее, растет время бесперебойной работы компрессора, он меньше изнашивается, ведь перестает перерабатывать впустую полный объем подаваемого воздуха.

В целом, больше всего пользы в теории это принесет для обогатительных фабрик, где множество процессов связано со сжатием воздуха под разным давлением, для чего используются компрессорные станции.

В качестве принципа управления локальной системой был выбран метод дросселирования, используемый в турбокомпрессорах, ведь в них вся суть сжатия воздуха осуществляется с помощью его инерционности. При дросселировании воздух проходит через дроссель и следовательно, понижается его потребление в компрессоре, а вместе с тем у воздуха понижаются давление и температура, что также полезно для безопасности дальнейшего процесса сжатия. С точки зрения управления дросселирование полезно тем, что при постепенном закрытии заслонки можно регулировать количество поступающего воздуха в систему, и соответственно, производительность компрессора. На рисунке 1.4 представлена схема процесса дросселирования [3].

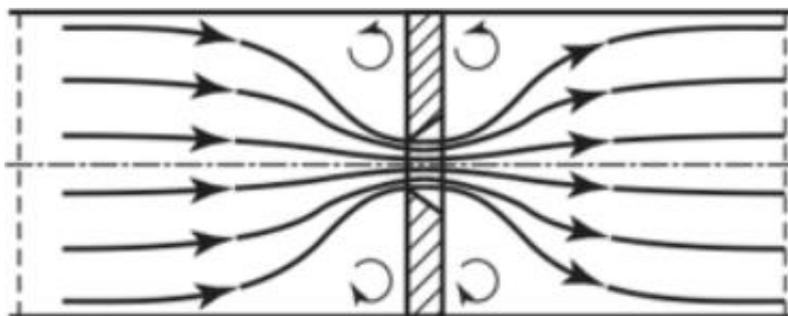


Рисунок 1.4 – Процесс дросселирования

Также, при необходимости, вместо полного отключения компрессора зачастую используют процесс глубокого дросселирования. В таком состоянии помпаж пока не наступает, воздух минимально всасывается компрессором, и соответственно нагрузка на него падает, если сравнивать с режимом холостого хода.

При нем соблюдаются условия, описанные в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Условия метода управления глубоким дросселированием

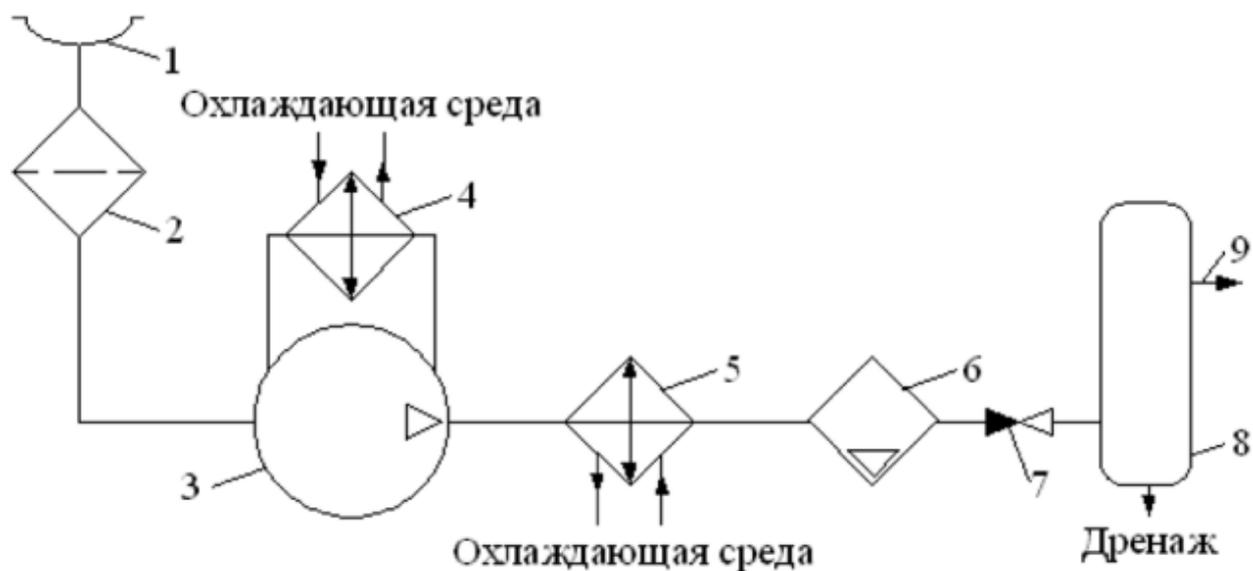
| Элемент компрессора | Условие          |
|---------------------|------------------|
| Задвижка            | Закрыта          |
| Помпажный клапан    | Полностью открыт |
| Дроссель            | Закрыта          |

Также одним из главных преимуществ можно назвать пуск, происходящий проще с данной системой управления. Пуск компрессора, на глазок, не видится большой проблемой, поскольку происходит недолго (менее минуты), но при каждом режиме пуска возникают большие нагрузки на конструкцию компрессора из-за прогрева и ненормированных пусковых моментов, которые больше номинальных в несколько раз. Потому при снижении нагрузки на рабочие колёса можно осуществлять эту операцию каждый день без потери ресурсоспособности, а в режиме холостого хода и вовсе экономить до половины истрачиваемой энергии в пересчете на один компрессор [4].

#### 1.4 Описание структуры и работы компрессорной станции

У любой компрессорной станции по подготовке сжатого воздуха общая структура одинакова, меняется лишь количество элементов в зависимости от отрасли, где она используется и необходимого создаваемого объема сжатого воздуха. Все компрессорные станции так или иначе состоят из одного и более компрессоров, систем трубопроводов, отопления и вентиляции, пожарной сигнализации, электрооборудования, а также вспомогательного оборудования по очистке, охлаждению, осушке и воздушных резервуаров.

На рисунке 1.5 показана общая принципиальная схема компрессорной станции.



1 Воздухозаборник; 2 Воздушный фильтр; 3 Компрессор; 4 Промежуточный воздухоохладитель; 5 Концевой воздухоохладитель; 6 Водомаслоотделитель; 7 Обратный клапан; 8 Воздухосборник; 9 Магистральный нагнетательный трубопровод

Рисунок 1.5 – Общая принципиальная схема компрессорной станции

Воздух из внешней среды втягивается воздухозаборником, затем проходит через воздушный фильтр, где очищается от различных загрязнителей: микрочастиц и конденсатов, способных как испортить качество сжатого воздуха, так и привести к неисправности компрессора. Затем, воздух подаётся в компрессор, где происходит его сжатие, и в промежуточный воздухоохладитель, чтобы немного снизить его температуру. В конечном воздухоохладителе происходит доведение нагретого сжатого воздуха к нужным показателям. Снижение температуры происходит из-за охлаждающей среды, в которой находятся охладители, и производится в два этапа ради быстроты и экономии электроэнергии. Далее идет блок водомаслоотделения. В нем сжатый и доведённый до нужной температуры воздух очищается от масла и воды, полученных в ходе компрессии и охлаждения. Обратный клапан не позволяет воздуху просочиться обратно, и он поступает в воздухосборник, откуда далее идёт в воздухопровод на предприятие. На этой схеме отсутствуют электродвигатель и системы отопления и сигнализации, поскольку они обычно подключаются отдельно [5].

Как было выше замечено, больше всего такие установки нашли применение в горно-обогатительной отрасли, потому необходимо подробное описание элементов компрессорной станции, предназначенной для таких

фабрик, а также дальнейшее построение технологических и функциональной схем.

Для горно-обогатительных комплексов, очищающих от вторичных примесей металлы, используется компрессорная станция, основными элементами которой являются: два нагнетателя Н-1050-13-1 и два турбокомпрессора ТВ-300-1,6 (по одному из них всегда в резерве), турбокомпрессор К-250-61-5, а также электродвигатели, питающие их и блоки охлаждения и маслоопыления, а также системы сигнализации, и трубопроводов, ведущих к потребителю. У каждого компрессора есть сфера применения для разных процессов. Еще стоит отметить, что все компрессоры центробежные вследствие вышеописанных преимуществ и метода управления.

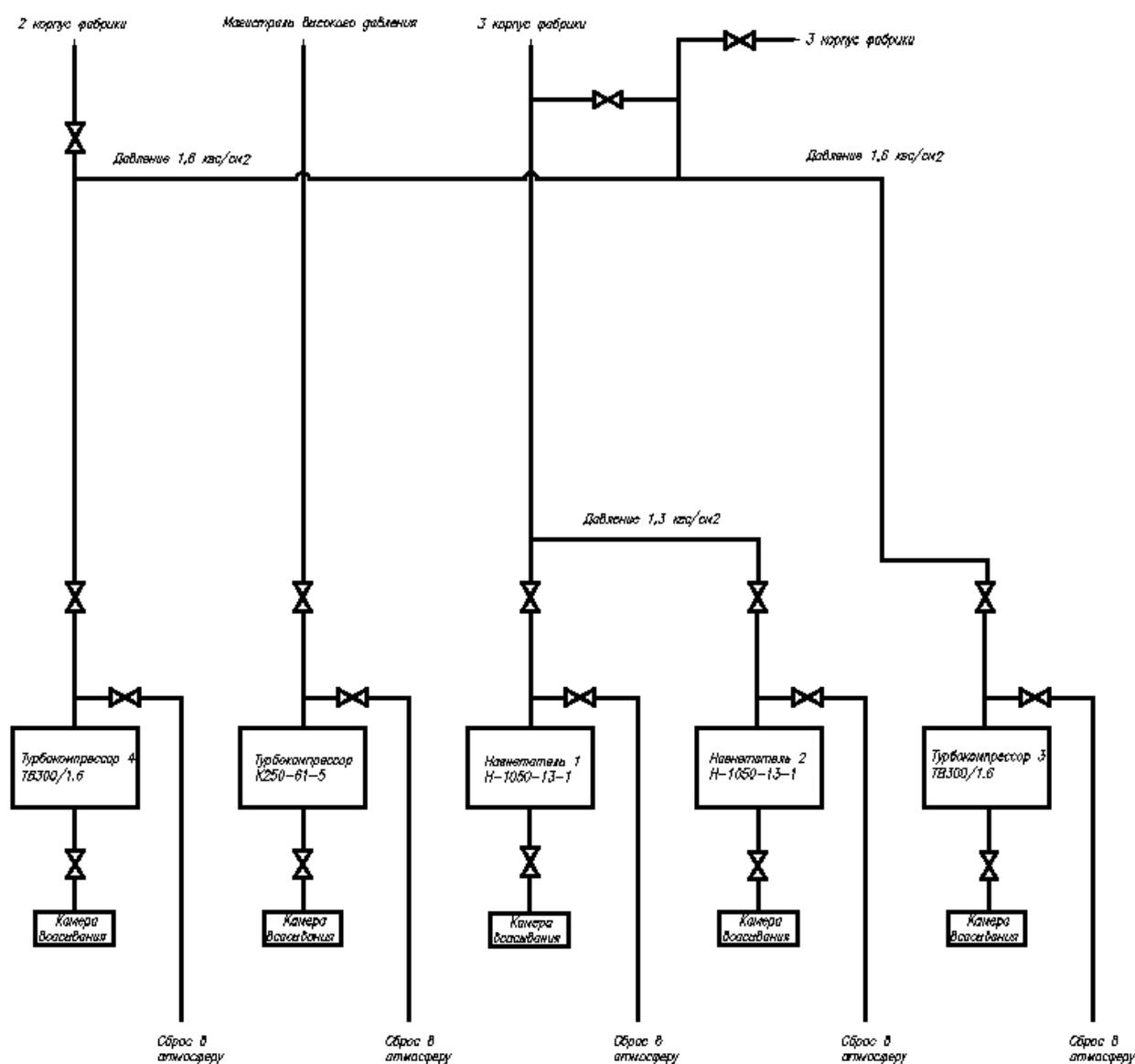


Рисунок 1.6 – Технологическая схема компрессорной станции

На рисунке 1.6 показана технологическая схема данной компрессорной станции, и находятся компрессоры рядом территориально, для удобства персонала при регулировании и ремонте. Далее идет описание элементов и их предназначение на фабрике.

Нагнетатели Н-1050-13-1 предназначены для пневмооборудования и опыления, охлаждения сырья. Один из нагнетателей всегда стоит в резерве, тогда как другой функционирует, и работая поочередно, они снижают вероятность поломки нагнетателя от постоянного функционирования. Данная модель нагнетателя является центробежной, одноступенчатой и с приводом [6].

Технические характеристики этого нагнетателя показаны на таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Технические характеристики Н-1050-13-1

| Характеристика                          | Значение |
|---|----------|
| Конечное давление, кг/см <sup>2</sup>   | 1,3      |
| Производительность, м <sup>3</sup> /мин | 1080     |
| Потребляемая мощность, кВт              | 470      |

Воздух снаружи идет трубопроводу через фильтр в камеру всасывания, где далее попадает на рабочий вал и нагнетается благодаря центробежной силе, получаемой при движении лопатками в валу, и далее через обратный клапан идет в 3 корпус фабрики, где потом распределяется на нужды производства. Нагнетатели приводятся в действие электродвигателем, технические характеристики которого даны в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Технические характеристики электродвигателя, питающего Н-1050-13-1

| Характеристика           | Величина                        |
|--------------------------|---------------------------------|
| Тип и название двигателя | Асинхронный, 4АЗМ-630/6000 УХЛ4 |
| КПД, %                   | 95,7                            |
| Мощность, кВт            | 630                             |

Нагнетатели и привод связаны муфтой двигателя, охлаждение которой осуществляется циркуляцией масла, как и в подшипниках двигателя. Охлаждение масла происходит с помощью проточной воды в маслоохладителе. При необходимости, небольшие излишки сжатого воздуха, оставшиеся после завершения работы нагнетателя, сбрасываются в атмосферу, чтобы не привести к возможной поломке при следующем запуске.

ТВ-300-1,6 похож на Н-1050-13-1 приводным управлением, но в отличии от Н-700-13-1, конечное давление на выходе больше из-за того, что он многоступенчатый. Также стоит отметить, что в отличии от нагнетателя, данный турбокомпрессор не рекомендуется использовать для сжатия некоторых газов, в целях безопасности и энергоэффективности, что отмечено в названии, ведь для других газов существует тип ТГ-300 [7].

Воздух из атмосферы по трубопроводу через камеру всасывания проходит в турбокомпрессор, где за счет движения внутри каналов ротора происходит сжатие. Лопатки, приваренные к рабочему диску, также способствуют ускорению потока. Технические характеристики ТВ-300-1,6 представлены на таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Технические характеристики ТВ-300-1,6

| Характеристика                          | Значение |
|---|----------|
| Конечное давление, кг/см <sup>2</sup>   | 1,6      |
| Производительность, м <sup>3</sup> /мин | 300      |
| Потребляемая мощность, кВт              | 315      |

Необходимость турбокомпрессора ТВ-300-1,6 обусловлена тем, что ее конечное давление выше, а потребляемая мощность меньше, но производительность значительно ниже, по сравнению с нагнетателем. Данный компрессор используется для флотации масс, когда воздух из него под давлением идет во второй отсек предприятия.

Этот турбокомпрессор также питается от электродвигателя, технические характеристики которого даны в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Технические характеристики электродвигателя, питающего ТВ-300-1,6

| Характеристика           | Величина                           |
|--------------------------|------------------------------------|
| Тип и название двигателя | Асинхронный трехфазный, ВАО2-560S6 |
| КПД, %                   | 94,8                               |
| Мощность, кВт            | 400                                |

Данный электродвигатель является взрывозащищенным, что важно отметить, ведь турбокомпрессор ТВ-300-1,6 не так хорошо охлаждается, а подшипники электродвигателя смазывают специальной смазкой “литол”,

которая предварительно заливается в картеры с водяными камерами. Охлаждение самого электродвигателя воздушное.

В турбокомпрессоре К-250-61-5 развивается самое высокое давление, и забегая вперед, именно этот компрессор в станции будет объектом управления. Данный центробежный компрессор является приводным, а также многоступенчатым, как и ТВ-300-1,6, но в отличии от него, хорошо охлаждается благодаря промежуточным и конечному воздухоохладителям, которые соединены патрубками с отсеками компрессора. То есть, когда из внешнего мира воздух попадает в рабочее колесо, после каждого такого, он, нагретый и под давлением остывает и идет дальше. Так, сжатый воздух проходит три секции, после которых идет к магистрали, где далее используется для плотного обдува продукта и шахтной вентиляции. Технические характеристики данного компрессора даны ниже в таблице 1.10 [8].

Таблица 1.10 – Технические характеристики К-250-61-5

| Характеристика                          | Значение   |
|---|------------|
| Конечное давление, кг/см <sup>2</sup>   | 8,0        |
| Производительность, м <sup>3</sup> /мин | 240        |
| Потребляемая мощность, кВт              | 1500       |
| Напряжение, В                           | 6000/10000 |

По данным о потребляемой мощности видно, что эта компрессорная установка самая затратная из всех, и более того, самая небезопасная, ведь чем выше развиваемое давление, тем больше рисков, вдобавок именно это устройство в станции в единственном экземпляре, что не способствует его моментальной ремонтоспособности. А один он в станции по той причине, что занимает очень много места, что отрицательно сказывается на работоспособности всей станции, ведь при любой малейшей поломке на К-250 она будет простаивать.

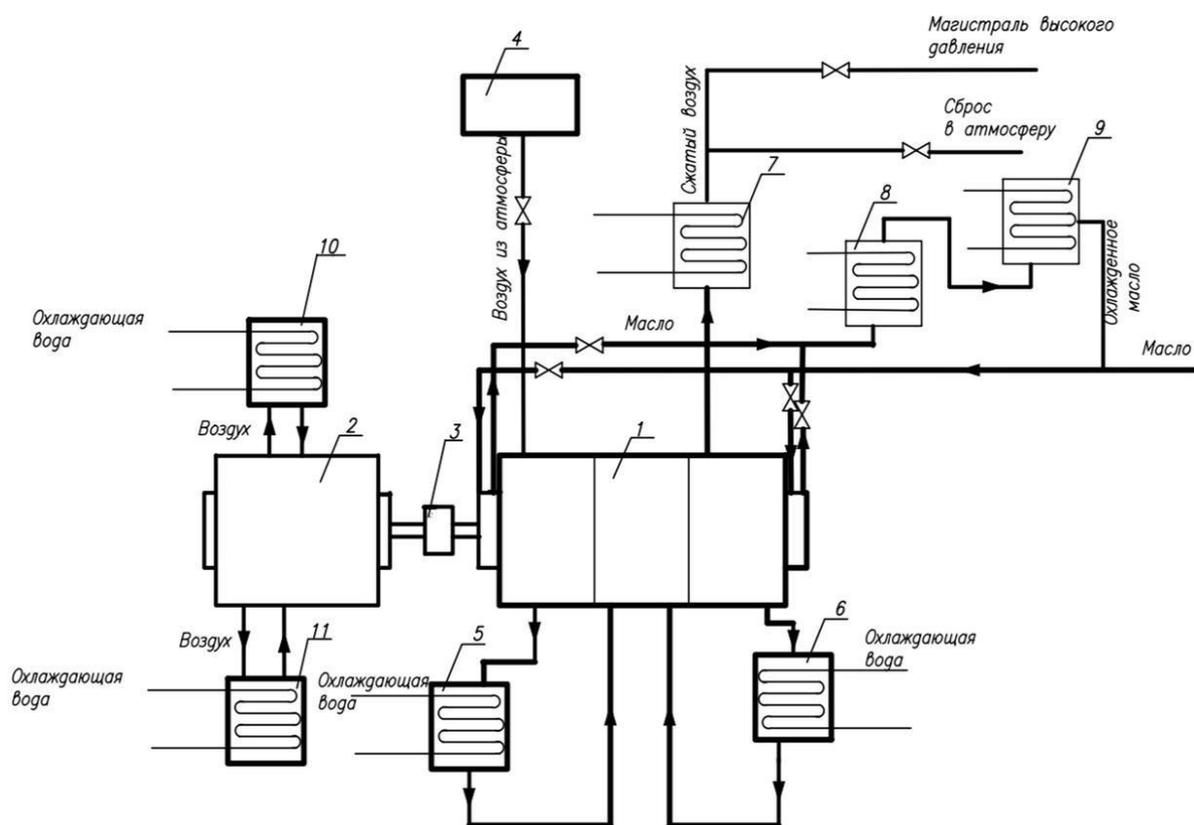
К-250-61-5 также приводится в действие двигателем, в качестве которого выбран СТД-1600-2УХЛ4. Турбокомпрессор, а также подшипники и редуктор электродвигателя охлаждаются маслом принудительно-циркулярно, а масло, подаваемое в них – проточной водой в маслоохладителе. Статор электродвигателя же охлаждается воздухом, который также охлаждается проточной водой в воздухоохладителе [9].

Технические параметры двигателя показаны в таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Технические характеристики электродвигателя СТД-1600-2УХЛ4, который питает К-250-61-5

| Характеристика                             | Величина                              |
|--|---------------------------------------|
| Тип и название двигателя                   | Синхронный трехфазный, СТД-1600-2УХЛ4 |
| КПД, %                                     | 97,1                                  |
| Мощность, кВт                              | 1600                                  |
| Частота вращения, об/мин                   | 3000                                  |
| Электромеханическая постоянная времени, мс | 2                                     |
| Степень защиты, IP                         | 44                                    |

По описанию выше составлена принципиальная схема К-250-61-5 с двигателем на рисунке 1.7.



1 Компрессор К-250-61-5; 2 Электродвигатель СТД-1600-2УХЛ4; 3 Редуктор; 4 Камера всасывания К-250-61-5; 5-7 Воздухоохладители компрессора; 8-9 Маслоохладители; 10-11 Воздухоохладители электродвигателя

Рисунок 1.7 – Принципиальная схема компрессора К-250-61-5

## 2 Разработка оптимальной системы управления

### 2.1 Определение структуры АСУ ТП

Наиболее подходящей для системы управления компрессорной станцией является централизованная АСУ ТП, позволяющая осуществлять все управляющие процессы с единого центра, что наиболее важно при немалых размерах как обогатительной фабрики, где будет стоять станция, так и самой станции. В таблице 2.1 представлены основные достоинства и недостатки такой структуры.

Таблица 2.1 – Достоинства и недостатки централизованной АСУ ТП

| Достоинства   | Недостатки   |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>– более простая реализация ПО, относительно других методов,</li><li>– единое управление всеми процессами с одного центра,</li><li>– возможность быстрой коррекции входных параметров,</li><li>– достижение максимальной эффективности системы при минимальном количестве средств управления</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>– нужда в высоконадежных и производительных технических средствах,</li><li>– невысокая, относительно других систем, быстрота реагирования на управляющие сигналы</li></ul> |

Поскольку так или иначе, компрессорная станция является далеко не самой быстрореагирующей системой вследствие своей громоздкости и инерционность компрессоров самих по себе, можно пренебречь главным недостатком централизованной АСУ ТП, а учитывая многочисленные преимущества, подобрать все средства измерения и детектирования с унифицированным выходным сигналом, чтобы сигнал с датчика к контроллеру шёл быстро и без искажений, которые могут появиться из-за преобразователей. Также это поможет упростить задачу по составлению программного комплекса [10].

В качестве датчиков подбирались такие, которые будут не только измерять, но и сразу преобразовывать сигнал в 4-20мА, что сильно сократит затраты на эксплуатацию и ремонт АСУ ТП, а также уменьшит размер и количество щитов КИПиА на производстве.

Для температурного контроля на К-250-61-5 будет использоваться ОВЕН ДТС335М, который полностью соответствует требуемым рабочим

температурным диапазонам в разных частях компрессора, так как он работает от нуля до плюс двух ста градусов по Цельсию, а сам платиновый термопреобразователь обладает отличным классом точности в 0,5%. Для удобства данный прибор будет использоваться на всех участках компрессора.

Для контроля расхода в компрессоре будет использоваться врезной расходомер для сжатого воздуха VA 420, идеально подходящий для компрессора благодаря малому размеру, и способный выдерживать перепады температуры и объема, скорости воздуха, и что также немаловажно, тоже выводит сигнал в 4-20мА.

Для детектирования давления на компрессорной станции выбран датчик давления OT-1, способный работать как с газами, так и с жидкостями, в диапазоне 0–10 бар, и все с тем же необходимым выходным сигналом.

Ядро АСУ ТП должно будет выдерживать резкие изменения всех вышеперечисленных изменяемых параметров, а потому, целесообразнее всего взять промышленный контроллер, способный на долгое использование в жестких условиях. Таким является SIMATIC S7-300 от西门енса, который заодно обладает удобным программным комплексом, с подключением и управлением с ПК, который даже может быть включён при необходимости в локальную сеть и транслировать и документировать весь процесс [11].

## **2.2 Разработка функциональной схемы автоматизации**

В подразделе 2.1 были определены структура АСУ ТП и приборы, которые будут применяться на станции. Для составления функциональной схемы необходимо вначале определить точки контроля для контроля и регулирования параметров в компрессоре, чтобы при управлении его локальной системой не возникало аварий или перебоя в подготовке сжатого воздуха.

Сначала стоит определить, как на компрессорной станции будет регулироваться давление. У каждого компрессора свой диапазон компрессии воздуха, потому, стоит установить датчики на каждом по-отдельности, но для всех подоцдет одна модель прибора, описанная выше.

Кроме того, надо определить места в компрессоре, где будет сигнализироваться температура, а также происходить аварийная остановка. Это различные подшипники, которые быстро изнашиваются при превышении допустимой температуры, а также воздух, прибывающий на компрессор.

В таблицах 2.2 и 2.3 показано, как регулируется давление по производительности на станции и сигнализация параметров на К-250-61-5.

Таблица 2.2 – Регулирование производительности компрессоров

| Наименование компрессора | Регулирование давления | Диапазон значений, кг/см <sup>2</sup> |
|--------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Н-1050-13-1              | Воздуха на нагнетание  | 0...1,3                               |
| ТВ-300-1,6               | Воздуха на нагнетание  | 0...1,6                               |
| К-250-61-5               | Воздуха на нагнетание  | 0...8                                 |

Таблица 2.3 – Сигнализация и аварийная остановка на К-250-61-5

| Название параметра                                  | Диапазон значений |
|---|-------------------|
| Сигнализация по температуре, °С                     |                   |
| – подшипника №1 компрессора                         | 70                |
| – подшипника №2 компрессора                         | 70                |
| – подшипника №3 компрессора                         | 70                |
| – подшипника №4 редуктора                           | 70                |
| – подшипника №5 редуктора                           | 70                |
| – подшипника №6 редуктора                           | 70                |
| – подшипника №7 редуктора                           | 70                |
| – подшипника №8 двигателя                           | 70                |
| – подшипника №9 двигателя                           | 70                |
| – воздуха на нагнетание                             | 100               |
| Аварийная остановка по температуре, °С              |                   |
| – подшипника №1 компрессора                         | 75                |
| – подшипника №2 компрессора                         | 75                |
| – подшипника №3 компрессора                         | 75                |
| – подшипника №4 редуктора                           | 75                |
| – подшипника №5 редуктора                           | 75                |
| – подшипника №6 редуктора                           | 75                |
| – подшипника №7 редуктора                           | 75                |
| – подшипника №8 двигателя                           | 75                |
| – подшипника №9 двигателя                           | 75                |
| Аварийная остановка по давлению, кг/см <sup>2</sup> |                   |
| – воды для охлаждения                               | 0                 |
| – воздуха на нагнетание                             | 8,2               |

Теперь же можно определить, где на компрессоре будет осуществляться контроль параметров, что показано на таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Контроль параметров К-250-61-5

| Название параметра                               | Диапазон значений |
|--|-------------------|
| Контроль температуры, °С                         |                   |
| – воздуха перед концевым воздухоохладителем      | +50...+150        |
| – воздуха перед первым воздухоохладителем        | +20...+150        |
| – воздуха после первого воздухоохладителя        | +10...+100        |
| – воздуха перед вторым воздухоохладителем        | +20...+150        |
| – воздуха после второго воздухоохладителя        | +5...+100         |
| – воздуха после концевого воздухоохладителя      | +5...+70          |
| – воды после первого воздухоохладителя           | +30...+50         |
| – воды после второго воздухоохладителя           | +30...+50         |
| – воды после первого маслоохладителя             | +30...+50         |
| – воды после второго маслоохладителя             | +30...+50         |
| – воды после первого воздухоохладителя двигателя | +30...+50         |
| – воды после второго воздухоохладителя двигателя | +30...+50         |
| – подшипника №1 компрессора                      | +10...+75         |
| – подшипника №2 компрессора                      | +10...+75         |
| – подшипника №3 компрессора                      | +10...+75         |
| – подшипника №4 редуктора                        | +10...+75         |
| – подшипника №5 редуктора                        | +10...+75         |
| – подшипника №6 редуктора                        | +10...+75         |
| – подшипника №7 редуктора                        | +10...+75         |
| – подшипника №8 двигателя                        | +10...+75         |
| – подшипника №9 двигателя                        | +10...+75         |
| – масла до маслоохладителя                       | +10...+75         |
| – масла после маслоохладителя                    | +30...+50         |
| – воды после концевого охладителя                | +10...+50         |
| – обмоток двигателя                              | +30...+150        |
| Контроль давления, кг/см <sup>2</sup>            |                   |
| – воды для охлаждения                            | 0...8             |
| Контроль расхода, м <sup>3</sup> /мин            |                   |
| – воздуха на нагнетание                          | 0...500           |

По данным из вышеописанных таблиц, а также по рисункам 1.6 и 1.7, где изображены технологическая схема компрессорной станции и принципиальная

схема компрессора, была составлена функциональная схема, представленная в приложении А.

## 2.3 Исследование компрессорной станции как объекта управления

### 2.3.1 Составление функциональной схемы управления компрессором

Для составления функциональной схемы управления компрессором К-250-61-5 необходимо для начала определить, какие составные элементы в ней присутствуют.

В данной системе управления присутствуют:

- а) регулятор – П, ПИ, ПИД-регуляторы;
- б) ИМ – привод двигателя;
- в) РО – дроссельная заслонка;
- г) ОУ – К-250-61-5.

По этим данным была сформирована функциональная схема системы, показанная на рисунке 2.1.

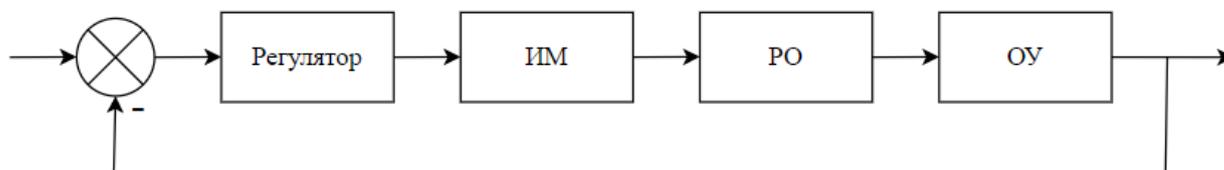


Рисунок 2.1 – Функциональная схема системы

Функциональная схема описывает функции элементов и их расположение в системе, но не их математическое описание, а потому кроме функциональной схемы необходимо также составить структурную. Для ее создания опишем математически с помощью передаточных функций каждого элемента, не включая регулятор, так как структурная схема с различными их вариациями будет описана в синтезе системы.

Регуляторы – классические П, ПИ, ПИД-регуляторы, использующиеся на производстве, которые далее сравнены между собой для выбора наилучшего.

В качестве исполнительного механизма взят привод двигателя, поскольку от него питается компрессор. Привод двигателя можно описать апериодическим звеном первого порядка

$$G_{np}(s) = \frac{k_{np}}{T_M s + 1}, \quad (2.1)$$

Коэффициент передачи привода находится по формуле

$$k_{np} = \frac{n}{60 M_{\partial\epsilon}}, \quad (2.2)$$

где  $n$  – частота вращения;

$M_{\partial\epsilon}$  – крутящий момент двигателя;

$T_M$  – электромеханическая постоянная двигателя.

Из таблицы 1.11 узнается значение  $n$ , а также мощность  $P$  для крутящего момента по формуле ниже

$$M_{\partial\epsilon} = \frac{P \cdot 9550}{n} = \frac{1600 \cdot 9550}{3000} = 5093, \quad (2.3)$$

По формуле 2.2 находим искомое  $k_{np}$

$$k_{np} = \frac{3000}{60 \cdot 5093} = 0,01. \quad (2.4)$$

Из той же таблицы 1.11 находим  $T_M$ , и применив формулу 2.1, находится численное значение передаточной функции привода

$$G_{np}(s) = \frac{k_{np}}{T_M s + 1} = \frac{0,01}{2s + 1}. \quad (2.5)$$

Регулирующий орган – дроссельная заслонка, которая описывается как пропорциональное звено с коэффициентом дросселирования  $k_{\partial p}$ , так как при изменении пропускного объема дросселя  $V_{\partial p}$  сразу изменяется и объемный расход  $F$  [12]

$$k_{\partial p} = \frac{F}{V_{\partial p}}, \quad (2.6)$$

Взяв данные по объемному расходу К-250-61-5 с таблицы 1.10, и беря как базовый пропускной объем 100%, по вышеописанному уравнению получаем

$$G_{op}(s) = k_{op} = \frac{240}{100} = 2,4 . \quad (2.7)$$

Для нахождения передаточной функции ОУ – компрессора, взяты данные по кривой разгона. В таблице 2.5 предоставлена экспериментальная кривая разгона по производительности К-250-61-5, которая определяет реакцию на изменение пропускаемого воздуха изменением его объемного расхода, без учета значения транспортного запаздывания,  $\tau = 10$  секунд [13].

Таблица 2.5 – Кривая разгона по производительности К-250-61-5

|                                   |   |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
|-----------------------------------|---|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| <i>t</i> , сек                    | 0 | 5   | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 55 |
| <i>F</i> ,<br>м <sup>3</sup> /сек | 0 | 2,2 | 3,17 | 3,42 | 3,56 | 3,67 | 3,75 | 3,84 | 3,88 | 3,98 | 3,99 | 4  |

Как известно, общая формула передаточной функции имеет вид

$$W = \frac{1}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a \cdot p + a_0} , \quad (2.8)$$

Для определения степени передаточной функции компрессора необходимо вычислить площади Симою, определяющие коэффициенты  $a_n$ , находятся так

$$F_1 = \Delta t \left( \sum_{i=0}^n (1 - \sigma(i\Delta t)) - 0,5(1 - \sigma(0)) \right) , \quad (2.9)$$

$$F_2 = F_1^2 \Delta \theta \left( \sum_{i=0}^n (1 - \sigma(i\Delta \theta)) \cdot (1 - i\Delta \theta) - 0,5(1 - \sigma(0)) \right) , \quad (2.10)$$

где  $\Delta t$  – интервал разбиения времени в кривой разгона;

$\sigma$  – безразмерная кривая разгона, без учета запаздывания;

$\theta$  – безразмерное время.

И для нахождения этих площадей была использована программа в Excel, где вбивались данные из таблицы 2.5 [14].

| Время  | Реакция | Модель | Ошибка $\delta$ |
|--------|---------|--------|-----------------|
| 0,000  | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000          |
| 5,000  | 2,2000  | 1,8301 | 0,3699          |
| 10,000 | 3,1700  | 2,8229 | 0,3471          |
| 15,000 | 3,4200  | 3,3615 | 0,0585          |
| 20,000 | 3,5600  | 3,6536 | 0,0936          |
| 25,000 | 3,6700  | 3,8121 | 0,1421          |
| 30,000 | 3,7500  | 3,8981 | 0,1481          |
| 35,000 | 3,8400  | 3,9447 | 0,1047          |
| 40,000 | 3,8800  | 3,9700 | 0,0900          |
| 45,000 | 3,9800  | 3,9837 | 0,0037          |
| 50,000 | 3,9900  | 3,9912 | 0,0012          |
| 55,000 | 4,0000  | 3,9952 | 0,0048          |

Рисунок 2.2 – Ввод данных в Excel

Эта программа вычислила точки модели и ошибку между ними, а также нашла коэффициенты  $s^1$  и  $s^0$  с помощью метода Симою, найдя значения соответствующих площадей  $F_1$  и  $F_2$ .

**Передаточная функция**

|       |       |       |       |       |        |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|       |       |       |       |       | 1,0000 |
|       |       |       |       |       | 8,1750 |
|       |       |       |       |       | 1,0000 |
| $s^4$ | $s^3$ | $s^2$ | $s^1$ | $s^0$ |        |

Рисунок 2.3 – Нахождение коэффициентов

Таким образом, передаточная функция компрессора может быть описана апериодическим звеном первого порядка. Также, в программе был построен график кривой разгона по значениям таблицы 2.5, а также по известным по ней данным шага по времени, установившегося значения и числа точек она смоделировала на основе вычислений дополнительную кривую и сравнила их между собой, что видно на рисунке 2.4.

## Кривая разгона

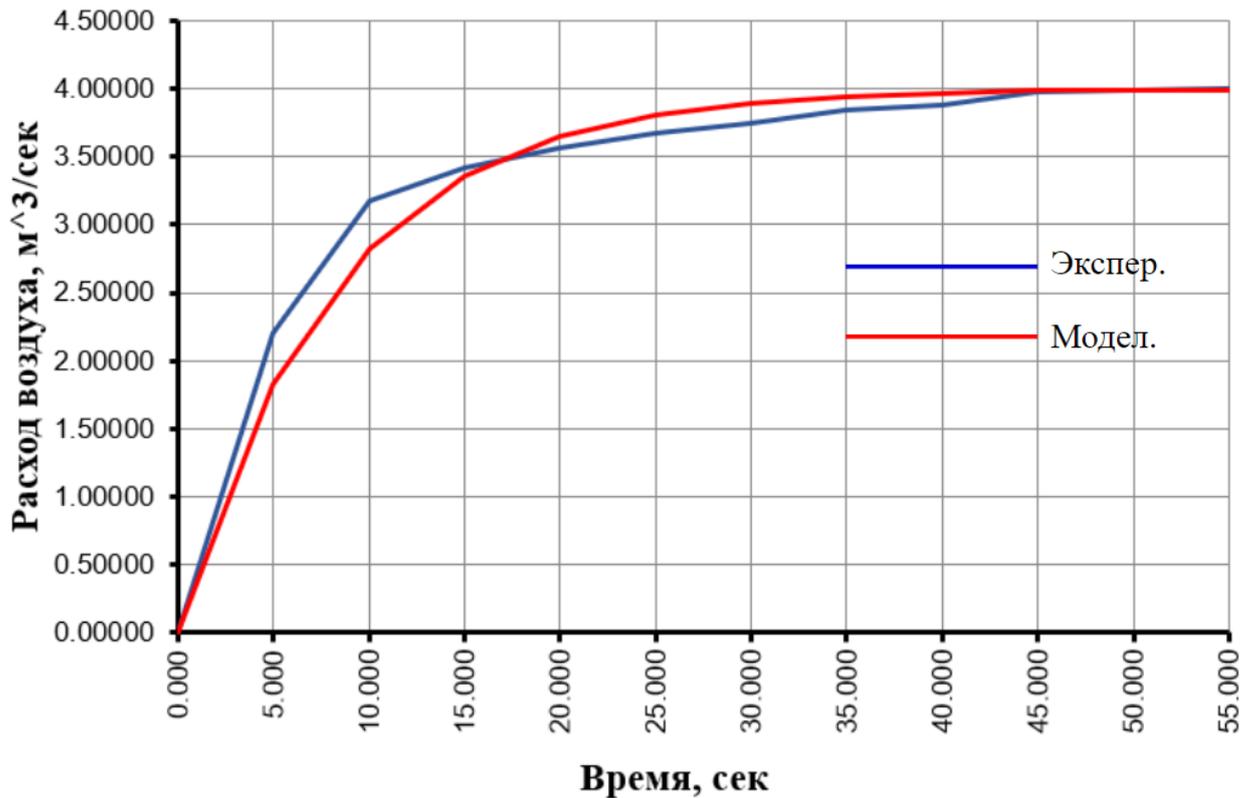


Рисунок 2.4 – График кривой разгона

Расчет по кривой разгона также не учитывает транспортное запаздывание, описываемое в виде  $e^{-st}$ , которое безусловно имеет место быть в виде инерционности компрессора. Для окончательного нахождения передаточной функции также необходимо вычислить коэффициент передачи объекта,  $k_{n.o.}$ , который находится по формуле

$$k_{n.o.} = \frac{\Delta Y_{\infty}}{\Delta U}, \quad (2.11)$$

где  $\Delta Y_{\infty}$  – установившееся значение выходной величины;

$\Delta U$  – значение входного воздействия.

Как видно по рисунку 2.4, выходная величина равна четырем, а входное воздействие – единичный ступенчатый сигнал, следовательно, равно единице.

$$k_{n.o.} = \frac{\Delta Y_{\infty}}{\Delta U} = \frac{4}{1} = 4. \quad (2.12)$$

Тогда, окончательный вид передаточной функции будет иметь вид

$$G_{\text{компр}}(s) = k_{n.o.} \cdot \frac{e^{-s \cdot \tau}}{F_1 s + F_0} = \frac{4 \cdot e^{-10s}}{8,175s + 1}. \quad (2,13)$$

По данной передаточной функции в программе Simulink был построен график переходного процесса. В блоке Transport Delay ставим соответствующее значение  $\tau = 10$  секунд, а Stop Time для удобства на минуту.

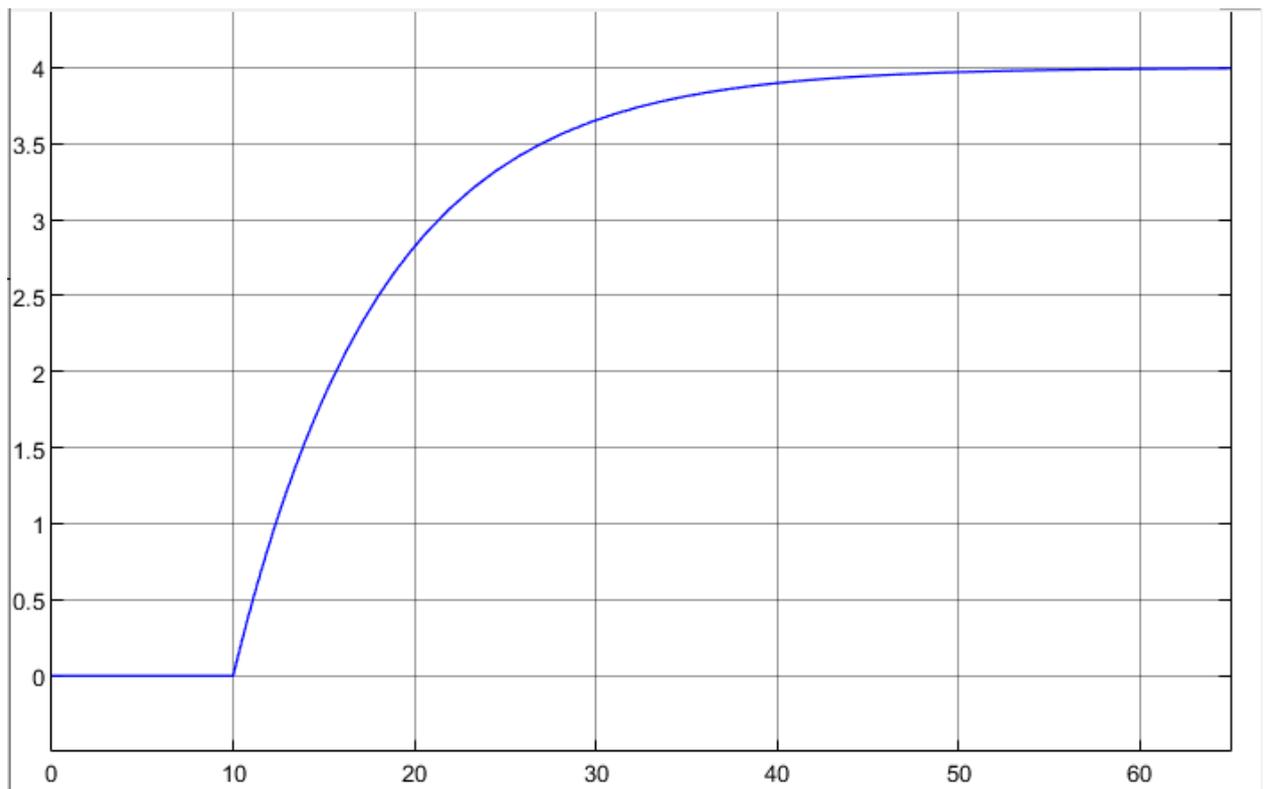


Рисунок 2.5 – Переходной процесс компрессора в Simulink

Как видно по графику переходного процесса с транспортным запаздыванием, значения расхода по времени совпадают с экспериментальной кривой разгона, если добавить десять секунд этого самого запаздывания, а следовательно, передаточная функция К-250-61-5 найдена верно.

### 2.3.2 Анализ динамических свойств системы без регулятора

Структурная схема, составленная в Simulink, показана на рисунке 2.6.

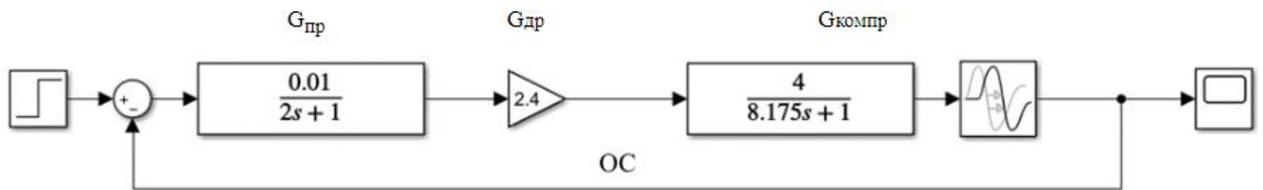


Рисунок 2.6 – Структурная схема системы без регулятора

По этой структурной схеме получен график переходного процесса на рисунке 2.7.

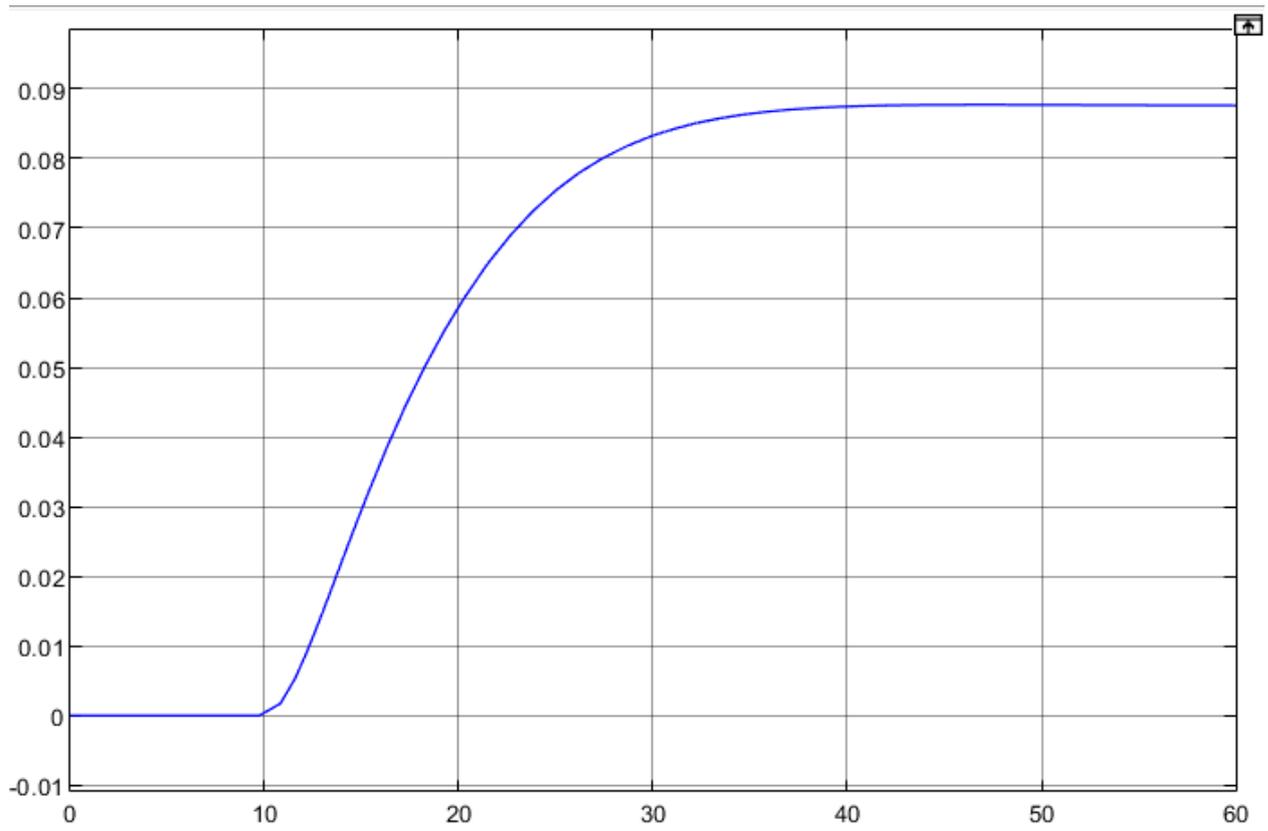


Рисунок 2.7 – Переходной процесс без регулятора

По полученному графику переходного процесса можно сказать, что САР устойчива, но стоит проверить это одним из многочисленных аналитических методов – первым методом Ляпунова. Но есть проблема в виде звена запаздывания, которое необходимо преобразовать, и для этого используется разложение в ряд Паде, по формуле

$$ke^{-s\tau} = \frac{k}{e^{s\tau}} \approx \frac{k}{1 + s\tau} , \quad (2.14)$$

Согласно этой формуле,  $k = 1$ ,  $\tau = 10$

$$e^{-10s} = \frac{1}{1+10s} \quad (2.15)$$

Тогда преобразованная  $G_{комп}(s)$  будет выглядеть следующим образом

$$G_{комп}(s) = \frac{4}{8,175s+1} \cdot \frac{1}{10s+1} = \frac{4}{81,75s^2+18,175s+1} \quad (2.16)$$

Далее, пользуясь преобразованием, выводится эквивалентная передаточная функция разомкнутой САР

$$G_{РСАР}(s) = \frac{4}{81,75s^2+18,175s+1} \cdot 2,4 \cdot \frac{0,01}{2s+1} = \frac{0,096}{163,5s^3+118,1s^2+20,175s+1} \quad (2.17)$$

Согласно теории Ляпунова, если все корни характеристического уравнения меньше нуля, то система устойчива. В MATLAB была введена  $G_{РСАР}(s)$  и найдены полюса, как видно на рисунке 2.8.

```
>> raz=tf([0.096], [163.5 118.1 20.175 1])
```

```
raz =
```

```
0.096
```

```
-----  
163.5 s^3 + 118.1 s^2 + 20.18 s + 1
```

```
Continuous-time transfer function.
```

```
>> pole(raz)
```

```
ans =
```

```
-0.5000
```

```
-0.1223
```

```
-0.1000
```

Рисунок 2.8 – Полюса передаточной функции РСАР

Как видно, все полюса отрицательны, а значит разомкнутая система устойчива. Теперь по разомкнутой САР находится и передаточная функция замкнутой САР, по формуле

$$G_{ЗСАР}(s) = \frac{G_{РСАР}(s)}{1 + G_{РСАР}(s)} = \frac{0,096}{163,5s^3 + 118,1s^2 + 20,175s + 1 + 0,096}. \quad (2.18)$$

Аналогично проводится проверка на устойчивость по Ляпунову. Как видно на рисунке 2.9, характеристический полином не сильно будет отличаться от такового у РСАР.

```
>> zam=tf([0.096], [163.5 118.1 20.175 1.096])

zam =

          0.096
-----
163.5 s^3 + 118.1 s^2 + 20.18 s + 1.096

Continuous-time transfer function.

>> pole(zam)

ans =

-0.5038 + 0.0000i
-0.1093 + 0.0370i
-0.1093 - 0.0370i
```

Рисунок 2.9 – Полюса передаточной функции ЗСАР

Тем не менее, значения полюсов сильно поменялись, но все действительные их части отрицательны, а значит и ЗСАР устойчива.

Убедившись, что передаточная функция устойчива в достаточной степени в замкнутом и разомкнутом виде, все же следует добавить в систему регулятор, так как без него система, получая на входе заданный сигнал  $U = 1$ , на выходе дает лишь  $Y = 0,088$  из-за коэффициентов передачи объектов.

### 2.3.3 Выбор наилучшего регулятора

Структурная схема системы с ПИД-регулятором показана на рисунке 2.10.

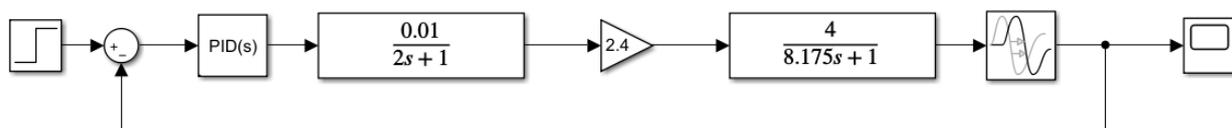


Рисунок 2.10 – Структурная схема с ПИД-регулятором

В качестве эмпирического метода будет первый метод Циглера-Никольса, поскольку предназначен в первую очередь для монотонных процессов разомкнутой функции с запаздыванием.

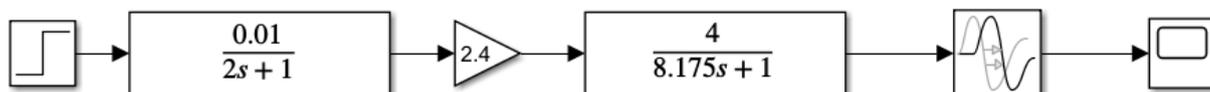


Рисунок 2.11 – Структурная схема РСАР без регулятора

По этой схеме был построен переходной процесс, на котором также отмечены коэффициенты для дальнейшего подбора параметров регулятора [15].

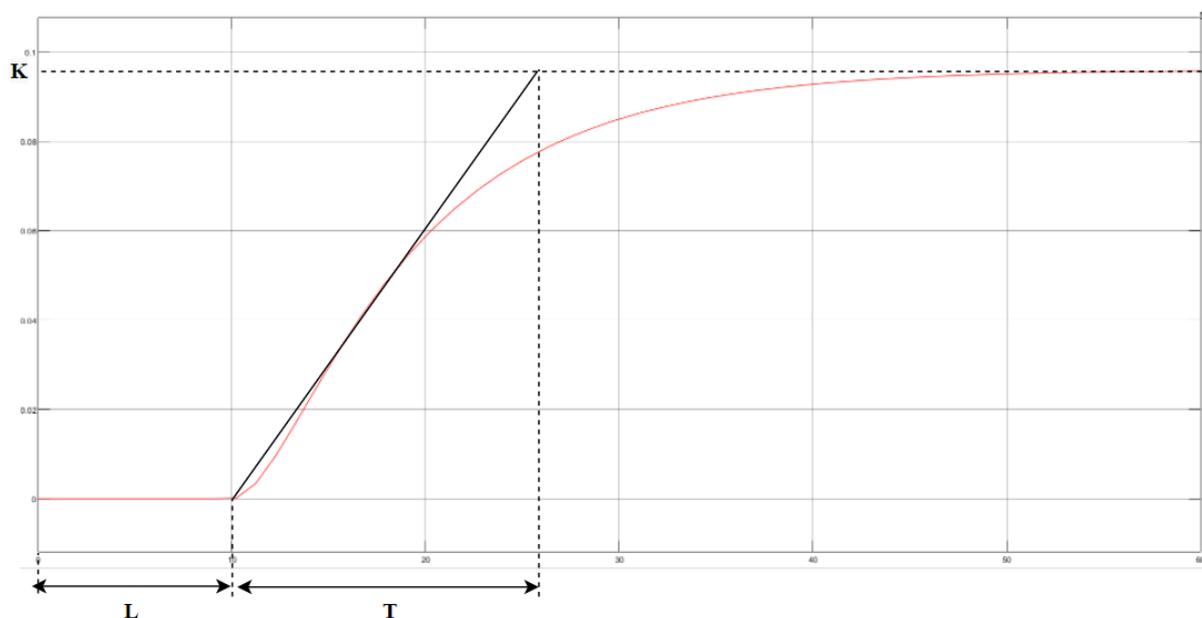


Рисунок 2.12 – Переходной процесс РСАР с отмеченными коэффициентами

По рисунку 2.12 видно, что  $K = 0,096$ ,  $L = 10$ , а  $T = 17$

По этим данным была составлена таблица 2.6, где показано, как подбирались параметры для ПИД-регулятора.

Таблица 2.6 – Вычисление параметров ПИД-регулятора

|     | P                                       | I                                       | D                 |
|-----|---|---|-------------------|
| P   | $\frac{T}{KL} = \frac{17}{0,96} = 17,7$ | -                                       | -                 |
| PI  | $0,9 \cdot \frac{T}{KL} = 15,93$        | $\frac{0,3}{L} = \frac{0,3}{10} = 0,03$ | -                 |
| PID | $1,2 \cdot \frac{T}{KL} = 21,24$        | $\frac{1}{2L} = \frac{1}{20} = 0,05$    | $0,5 \cdot L = 5$ |

Согласно теоретическим сведениям, данный метод способен дать удовлетворительные результаты, по следующей формуле

$$\frac{L}{T} = \frac{10}{17} \approx 0,588, \quad (2.19)$$

Тогда как пределы от 0,15 до 0,6.

На производстве чаще всего используется ПИД-регулятор, поэтому следует провести сравнение между переходными процессами без регулирования, и с ПИД-регуляторами, где параметры были подобраны с помощью вышеописанного метода и с помощью тюнинга в Simulink.

На рисунке 2.13 показана схема сравнения.

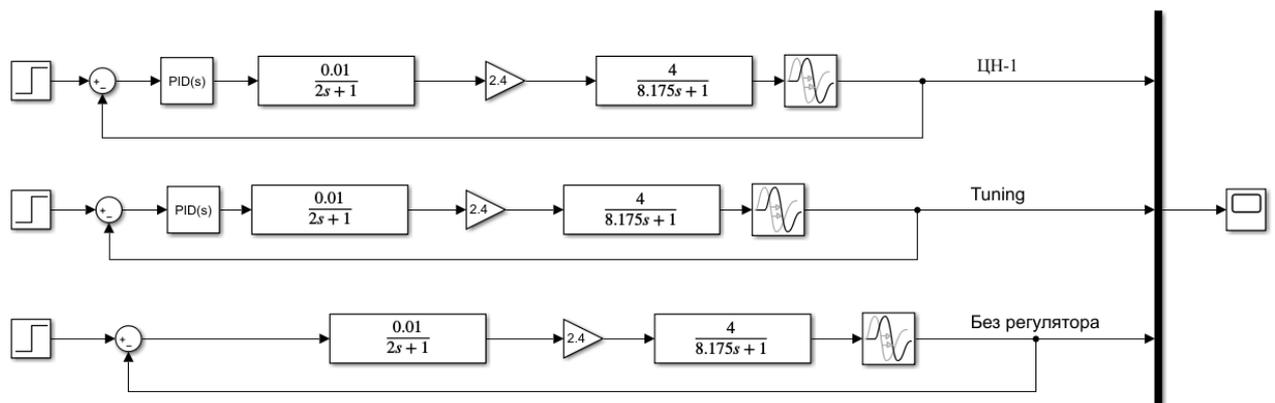


Рисунок 2.13 – Схема сравнения метода подбора параметров регулятора

По этой схеме был построен график переходных процессов, показанный на рисунке 2.14.

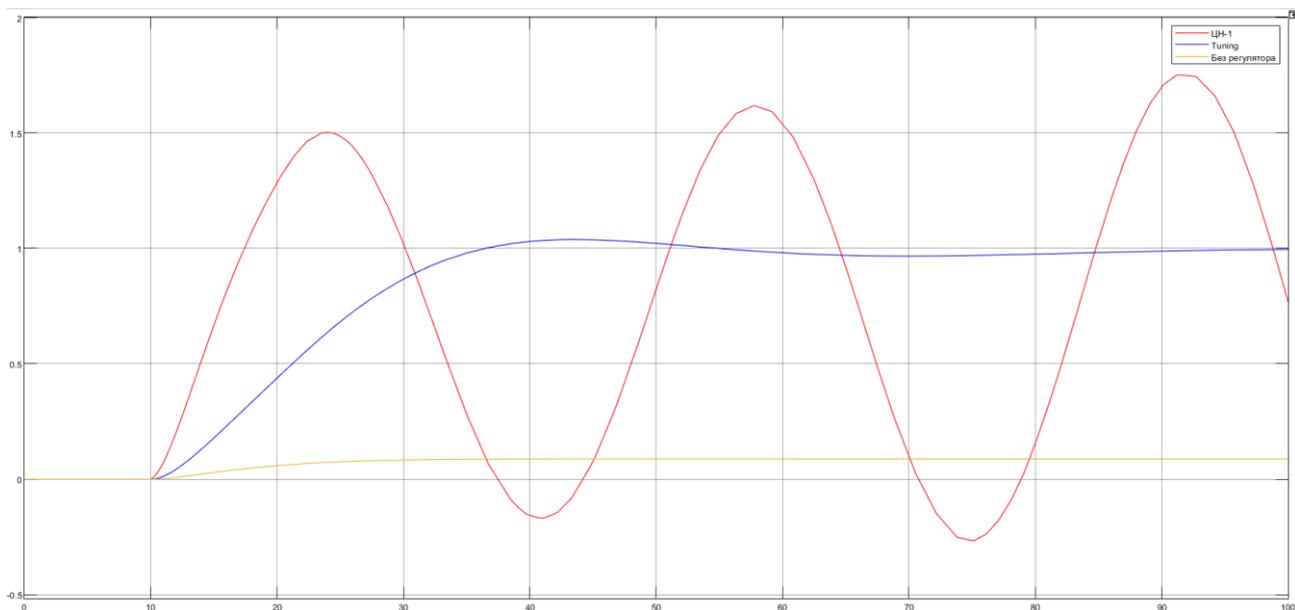


Рисунок 2.14 – Переходные процессы без регулирования и с ПИД-регулятором

При сравнении графиков ПИД-регулятора видно, что регулятор, настроенный с помощью тюнинга, в системе позволяет прийти до установившегося значения, тогда как при подборе с помощью эмпирического метода Циглера-Никольса система и вовсе неустойчива. Можно заявить, что для данной системы с ПИД-регулятором этот метод непригоден.

Но ПИД-регулятор делает процесс колебательным и создает перерегулирование, и является ли он лучшим выбором из возможных? Для сравнения были построены следующие структурные схемы с основными видами регуляторов и без регулирования, где все параметры настраивались с помощью тюнинга.

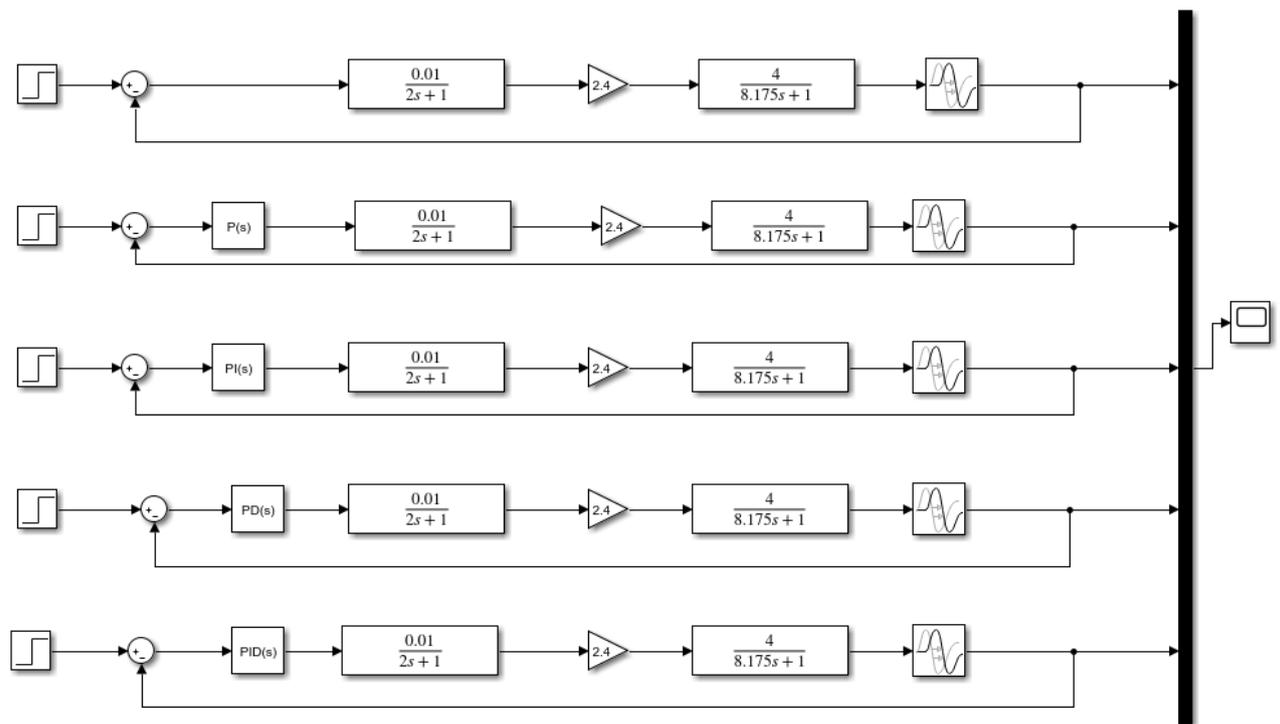


Рисунок 2.15 – Структурные схемы в Simulink

По этим схемам были выведены переходные процессы со сравнением всех видов регуляторов, а также процесса без них. Подбор параметров осуществлялся с помощью тюнинга.

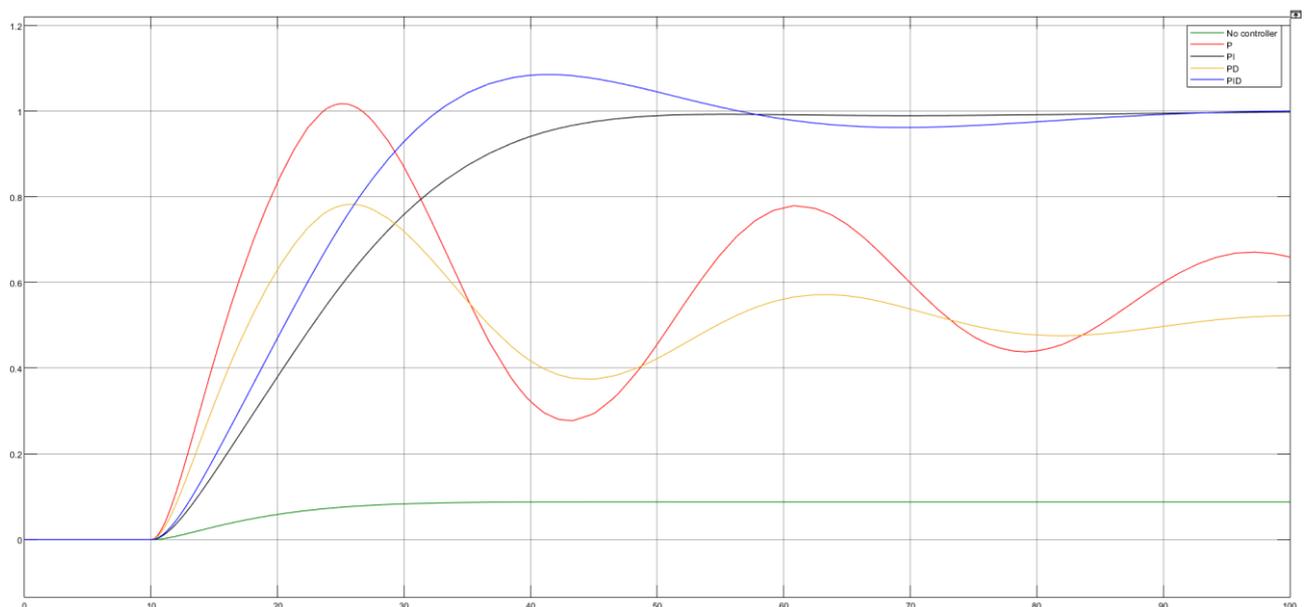


Рисунок 2.16 – Сравнение переходных процессов

На рисунке выше видно, что наилучший процесс дает именно ПИ-регулятор, поскольку несмотря на более длительное время нарастания, процесс при ПИ-регуляторе монотонный, в отличие от прочих. Применяя П и ПД-регулятор, и вовсе оказывается, что процесс теряет устойчивость [16].

Вывод: Эмпирический метод Циглера-Никольса не дает оптимальные параметры для ПИД-регулятора, в отличие от тюнинга в среде Simulink. При сравнении с помощью тюнинга всех наиболее популярных регуляторов самым подходящим для САР компрессором является ПИ-регулятор, поскольку он быстрее всех прочих приходит к установившемуся значению, и его переходная характеристика монотонна.

### 2.3.4 Прямые оценки качества системы с ПИ-регулятором

Для окончательной проверки неработоспособности метода Циглера-Никольса был выведен график переходных процессов ПИ-регулятора с подбором коэффициентов этим методом и тюнингом, а также системы без регулирования, на рисунке 2.17.

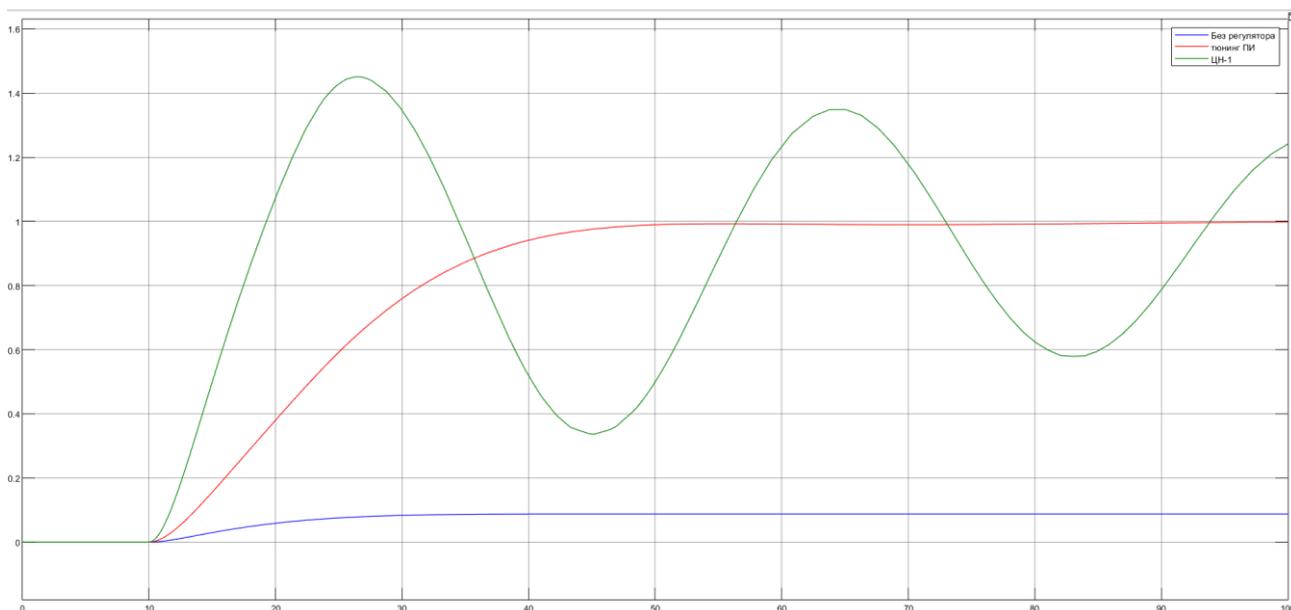


Рисунок 2.17 – Переходные процессы без регулирования и с ПИ-регулятором

Опять же, на рисунке выше видно, что эмпирический метод Циглера-Никольса крайне неточен, потому целесообразнее использовать именно встроенный тюнинг Simulink.

У монотонного процесса коим является переходная характеристика ЗСАР с ПИ-регулятором, есть лишь несколько из всех прямых оценок качества, а

именно время регулирования  $T_{set}$ , установившаяся ошибка  $\varepsilon_{ss}$  и время нарастания  $T_R$ . На рисунке 2.18 более подробно показан переходной процесс ПИ-регулятора с помощью тюнинга, с выделенными оценками качества монотонного процесса [17].

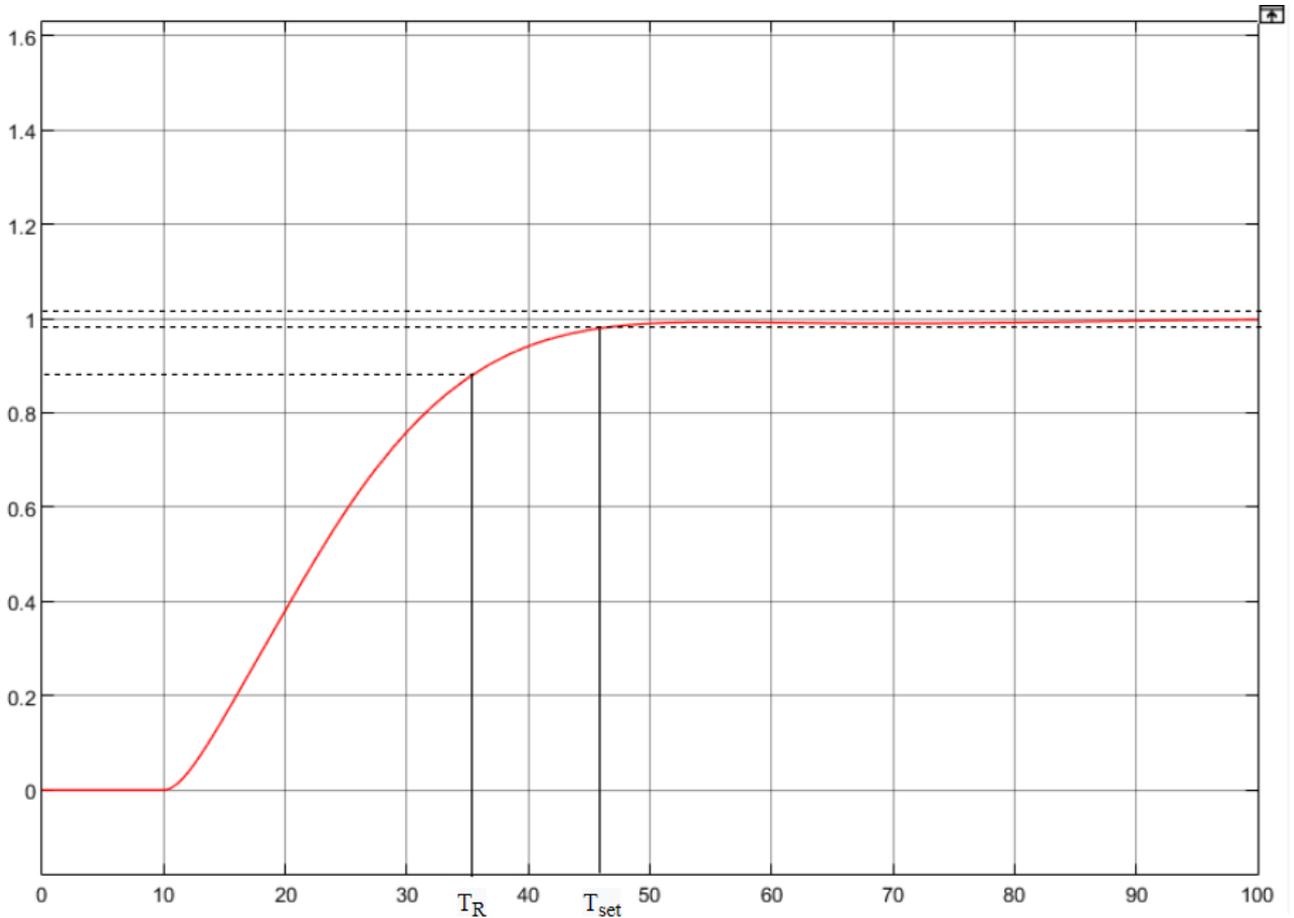


Рисунок 2.18 – Прямые оценки качества монотонного процесса

Для вычисления времени регулирования  $T_{set}$  необходимо вычислить  $\delta$  и провести на графике относительно  $y_{ss}$  по формуле

$$\delta = \frac{2 \cdot 1}{100} = 0,02 . \quad (2.20)$$

Таким образом, на рисунке 2.18 видно, что  $T_{set} = 47$  секунд.

Установившаяся ошибка равна нулю, так как  $\varepsilon_{ss}$  определяется как разница между установившимся значением выходной величины и статической ошибкой, которая равна нулю.

Время нарастания, согласно теории, для монотонных процессов равна 90% от  $y_{ss}$ , тогда  $T_R = 36$  секунд.

Вывод: Как и в случае с ПИД-регулятором, метод Циглера-Никольса не дает оптимальных параметров для ПИ-регулятора, а при тюнинге достигается монотонный процесс, который соответствует всем требованиям современных инженерных решений на производстве, так как переходной процесс достаточно быстро нарастает, а после этого менее чем за минуту достигает установившегося значения, несмотря на инерционность компрессора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном дипломном проекте была разработана система управления компрессорной станцией по подготовке сжатого воздуха.

Было рассмотрено применение сжатого воздуха на производстве, а также описаны основные типы компрессоров, их преимущества и недостатки, и детально рассмотрен принцип работы центробежного компрессора, применяющегося в компрессорной станции на обогатительной фабрике. Был выбран и описан принцип управления – дросселирование, применяющийся в центробежных компрессорах. Была разработана принципиальная схема компрессора К-250-61-5, а также функциональная схема автоматизации всей станции. Была описана структура АСУ ТП.

Была выведена передаточная функция САР, а также функциональная и структурная схема системы, и далее проверена на устойчивость первым методом Ляпунова.

Был произведен расчет настроек для регуляторов методом Циглера-Никольса, и сравнен с синтезом с помощью тюнинга в среде Simulink, а также сравнены основные виды регуляторов с системой без регулирования. Был выбран оптимальный для системы регулятор, произведены расчеты по прямым оценкам качества переходного процесса.

С регулятором система смогла достичь установившегося значения достаточно быстро, при этом достигнув более высокой эффективности работы на производстве.

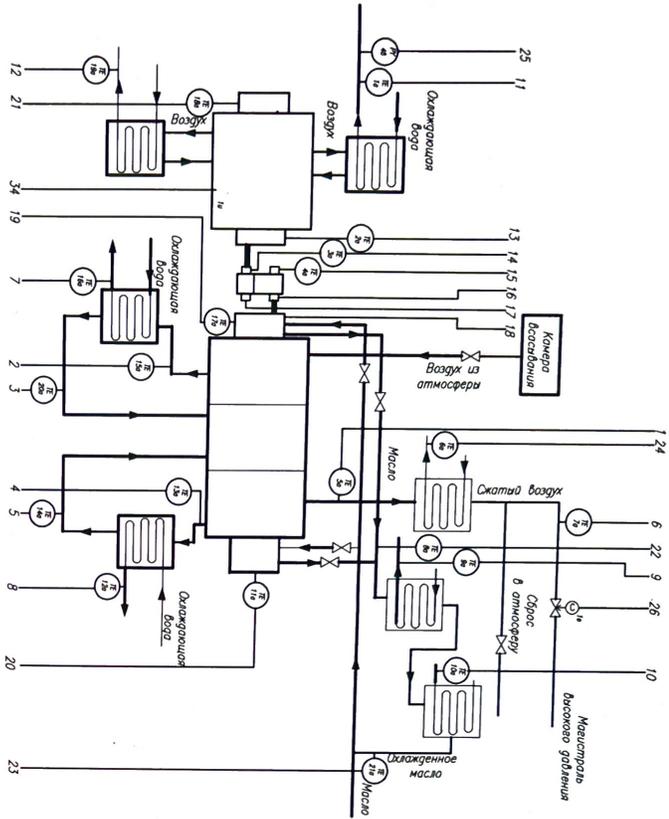
## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Применение многоступенчатых компрессоров // Электронная версия на сайте [https://www.pnevmo-sklad.ru/blog/vidy\\_vozdushnyh\\_kompr](https://www.pnevmo-sklad.ru/blog/vidy_vozdushnyh_kompr)
- 2 Быстрицкий Г. Ф. ТЕПЛОТЕХНИКА И ЭНЕРГОСИЛОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ // Электронная версия на сайте [https://m.studme.org/137896/tehnika/tsentrobezhnnye\\_kompressory](https://m.studme.org/137896/tehnika/tsentrobezhnnye_kompressory)
- 3 Манойло В. М. УПРАВЛЕНИЕ ДРОССЕЛЬНОЙ ЗАСЛОНКОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО ДВИГАТЕЛЯ // Электронная версия на сайте <https://studfile.net/preview/16408125/>
- 4 Блейхер И. Г., Лисеев В. П. Компрессорные станции. – М.: Машгиз, 2015. – 363 с.
- 5 Парамонов А. М. Технологические энергоносители предприятий: Учеб. текстовое электрон. изд. локального распространения : учеб. пособие / А. М. Парамонов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. – 7 с.
- 6 Технические характеристики Н-1050-13-1 // Электронная версия на сайте <https://svechel.ru/news/121/>
- 7 Применение ТВ-300 на производстве // Электронная версия на сайте <https://ogcm.uz/catalog/turbomashiny/>
- 8 Технические характеристики К-250-61-5 // Электронная версия на сайте <https://kompres.ru/kompressory/oaodalenergomash/k250-61-1-2-5/>
- 9 Система охлаждения электродвигателя СТД-1600-2УХЛ4 // Электронная версия на сайте <https://www.ruselprom.ru/products/vysokovoltnyye-elektrodvigateli/std-1600-2uhl4/>
- 10 Линьков В. А. ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ АСУ ТП. СОСТАВ И СТРУКТУРА АСУ ТП // Международный студенческий научный вестник. – 2019. – № 6. ; URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19847/>
- 11 Siemens. Компоненты для комплексной автоматизации. Информация и цены– 2016. М.: ООО «Siemens», 2016. – 271 с.
- 12 Mishaal A. A. Experimental Investigation and Mathematical Modelling of Pressure Transfer Function for Air Compressor // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. № 4.19 ; URL: <https://www.sciencepubco.com/>
- 13 Яковлев Ю. С. Локальные системы автоматики: Текст лекций. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1993. – 176 с.
- 14 Бороденко В. А. Программа Ident\_4 - Идентификация объекта управления // Электронная версия на сайте <https://www.twirpx.com/file/564496/>
- 15 Вадутов О. С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера-Никольса // Электронная версия на сайте <https://portal.tpu.ru/>

16 Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID Control // Электронная версия на сайте <https://aiecp.files.wordpress.com/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf>

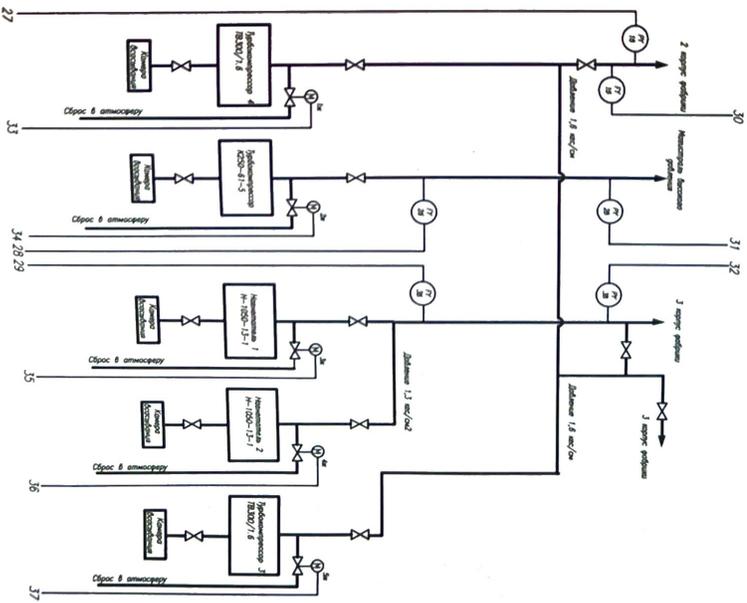
17 Golnaraghi F., Kuo B. Automatic Control Systems. - 9th Edition, Willey, 2009. – 257 с.

Турбокомпрессор К-250-61-5



| Назначение | Шкала контроллера |      | Проверка по метру | Замер по манометру | Проверка по манометру |
|------------|-------------------|------|-------------------|--------------------|-----------------------|
|            | Воздух            | Вода |                   |                    |                       |
| 1          | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 2          | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 3          | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 4          | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 5          | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 6          | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 7          | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 8          | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 9          | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 10         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 11         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 12         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 13         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 14         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 15         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 16         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 17         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 18         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 19         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 20         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 21         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 22         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 23         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 24         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 25         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 26         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 27         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 28         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 29         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 30         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 31         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 32         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 33         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 34         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 35         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 36         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 37         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 38         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 39         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 40         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 41         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 42         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 43         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 44         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 45         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 46         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 47         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 48         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 49         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |
| 50         | 0                 | 0    |                   |                    |                       |

Схема воздухооборота



| Поз.    | Наименование                             | Кол. | Примечание |
|---------|--|------|------------|
| 1а, 21а | Контрольно-измерительные приборы         | 21   |            |
| 1б, 21б | Объем ДТЗСМ                              |      |            |
| 1в, 21в | Время расхода ИА20                       | 3    |            |
| 1г, 21г | Контрольный преобразователь давления ОТ1 | 4    |            |
| 1д, 21д | Огнезащитная прокладка                   | 1    |            |
| 1е, 21е | Пневматический исполнительный механизм   | 1    |            |
| 1ж, 21ж | Сетчатый фильтр                          | 1    |            |
| 1з, 21з | Электродвигатель СДЭ-1800-23 ИМ 4        | 5    |            |
| 1и, 21и | Электродвигатель СДЭ-1800-23 ИМ 4        | 1    |            |

|  |  |
|--|--|
| 58070200 ЛП                                  |  |
| Администрация предприятия (Свое предприятие) |  |
| Подписание А                                 |  |
| Копия  |  |

## РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента  
Джайлаубекова Алихана Асқарұлы  
5B070200 – Автоматизация и управление

На тему: Разработка системы управления компрессорной станции по подготовке сжатого воздуха

выполнено:

- а) графическая часть на 16 листах;
- б) пояснительная записка на 75 страницах.

### ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В пояснительной записке, представленной на рецензирование, показана разработка системы управления компрессорной станции по подготовке сжатого воздуха.

В первой главе приведен детальный обзор сфер применения сжатого воздуха на производстве, а также особенности основных видов компрессоров. Описан принцип работы центробежного компрессора, выбран метод управления дросселированием. Кроме того, описана структура компрессорной станции, составлена принципиальная схема компрессора К-250-61-5.

Во второй части определена структура АСУ ТП, выбраны датчики и ядро системы, определены точки контроля, сигнализации и аварийной остановки, по которым далее была составлена функциональная схема. Было произведено исследование компрессора К-250-61-5 как объекта управления, по данной кривой разгона найдена передаточная функция САР, произведено исследование на устойчивость. Был произведен синтез регуляторов на основе эмпирического метода Циглера-Никольса, а также тюнинга в Simulink, выбран наилучший из них. Для системы с регулятором найдены прямые оценки качества переходного процесса.

В результате моделирования в Simulink были получены переходные характеристики и графики ЗСАР без регулирования, а также с П, ПД, ПИ, ПИД-регуляторами.

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 «отлично», а студент Джайлаубеков А. А. присуждения академической степени бакалавра по специальности 5B070200 – Автоматизация и управление.

#### Рецензент

руководитель центра компетенций и трансфера технологий в области автоматизации и мехатроники ВКТУ им. Серикбаева  
доктор PhD

«6» мая 2022г.

Ф КазНИТУ 706-17. Рецензия



Торубов Д.А.

**ОТЗЫВ  
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

На дипломный проект студента

Джайлаубекова Алихана Асқарұлы

5B070200 – Автоматизация и управление

Тема: «Разработка системы управления компрессорной станцией по  
подготовке сжатого воздуха»

Перед дипломантом ставилась задача разработки системы управления компрессорной станцией по подготовке сжатого воздуха.

В ходе выполнения дипломного проекта был выполнен значительный объем работы по сбору материала для описания технологической схемы автоматического управления компрессорной станцией. На основе данного материала, а также предоставленных сведений по кривой разгона по производительности компрессора К-250-61-5 была разработана принципиальная и функциональная схемы управления компрессором, а также станцией.

По разработанным схемам управления компрессором найдена передаточная функция компрессора К-250-61-5, переходные процессы разомкнутой и замкнутой САР проверены на устойчивость. Составлены принципиальная и функциональная схемы САР.

В среде MATLAB получены результаты моделирования ЗСАР без регулирования, далее произведен синтез регуляторов с нахождением оптимальных параметров по первому методу Циглера-Никольса. Графики сравнены, выбран наиболее подходящий для системы регулятор.

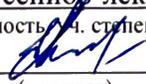
В процессе работы автор проекта показал себя дисциплинированным, исполнительным и трудолюбивым, с высоким уровнем теоретической подготовки.

Заключение: Считаю, что дипломант справился 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 Джайлаубеков Алихан Асқарұлы допускается к защите.

**Научный руководитель**

PhD, сениор-лектор

(должность, ч. степень, звание)

  
\_\_\_\_\_

Кулакова Е. А.

«13» мая  
(подпись)

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:** Джайлаубеков Алихан Аскарұлы

**Название:** Разработка системы управления компрессорной станции по подготовке сжатого воздуха

**Координатор:** Кулакова Елена Александровна

**Коэффициент подобия 1:** 0.00

**Коэффициент подобия 2:** 0.00

**Коэффициент цитирования:** 0.09

**Замена букв:** 13

**Интервалы:** 0

**Микропробелы:** 0

**Белые знаки:** 0

**Парафразы:** 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 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 не допускаю работу к защите.

Обоснование:

.....  
..... 04.05.22 .....  
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:** Джайлаубеков Алихан Аскарұлы

**Название:** Разработка системы управления компрессорной станции по подготовке сжатого воздуха

**Координатор:** Кулакова Елена Александровна

**Коэффициент подобия 1:** 0.00

**Коэффициент подобия 2:** 0.00

**Коэффициент цитирования:** 0.09

**Замена букв:** 13

**Интервалы:** 0

**Микропробелы:** 0

**Белые знаки:** 0

**Парафразы:** 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:

.....  
.....  
.....  
.....

04.05.22

Дата

Смирнов Н.И.



Подпись заведующего кафедрой /  
начальника структурного подразделения

**Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:**

.....  
.....  
.....  
.....

04.05.22

Дата



Подпись заведующего кафедрой /  
начальника структурного подразделения