

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Институт Автоматики и Информационных технологий

Кафедра Автоматизация и управления

Гилева Ольга Юрьевна

Автоматизация процесса восстановления тетрахлорид титана (на базе УТКМК)

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Специальность 5В070200 – Автоматизация и управление

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Институт Автоматики и Информационных технологий

Кафедра Автоматизация и управления



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой АиУ
кандидат физ-мат наук,
ассоциированный профессор
Алдияров Н. У.
«18» мая 2022 г

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Автоматизация процесса восстановления тетрахлорид титана (на базе УТКМК)»

По специальности: 5В070200 – Автоматизация и управление

Выполнил

Гилева О. Ю.

Рецензент
зав. каф. ИИ и Big Data
КазНУ им. Абыл-Фараби
канд. физ-мат. наук, доцент

Мансурова М. Е.
«16» мая 2022

Научный руководитель
канд. техн. наук, доцент,
ассистент-профессор

Кошимбаев Ш.К.
«16» сәуір 2022

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Институт Автоматики и Информационных технологий

Кафедра Автоматизация и управление

5B070200 - Автоматизация и управления



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АиУ
кандидат физ-мат наук,
ассоциированный профессор
Алдияров Н. У.

«18» мая 2022 г

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Гилева О. Ю.

Тема: «Автоматизация процесса восстановления тетрахлорид титана (на базе УТКМК)».

Утвержден приказом ректора Университета № 489-П/О от «24» января 2021 г.

Срок сдачи законченной работы: «__» _____ 2022 г.

Исходные данные дипломной работы: техническая документация к оборудованию реактора восстановления, документация по технологическому процессу восстановления.

Перечень подлежащих разработке в дипломной работе вопросов или краткое содержание дипломной работы:

а) описание технологический процесс восстановления тетрахлорид титана; б) разработка математической модели; в) разработка функциональной схема технологического процесса; г) исследование влияния типовых регуляторов на объект управления;

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): функциональная схема процесса восстановления четырёххлористого титана;

Рекомендуемая основная литература:

1) Тарасов А. В. Металлургия титана. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003.

2) Полоцкий Л. М., Лапшенков Г. И. Автоматизация химических производств. – М.: Химия, 1982.

3) Самсонов Г. В., Перминов В. П. Магниетермия. – М.: Металлургия, 1971.

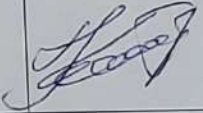


ГРАФИК

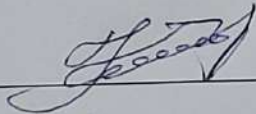
Подготовки дипломной работы

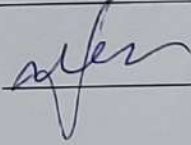
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Технологическая часть	10.03.22	
Расчетная часть	20.04.22	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Научный руководитель, консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологическая часть	канд. техн. наук, доцент, ассистент-профессор Кошимбаев Ш. К.	16.05.22	
Расчетная часть	канд. техн. наук, доцент, ассистент-профессор Кошимбаев Ш. К.	16.05.22	
Нормоконтролер	канд. техн. наук, ассистент профессор Сарсенбаев Н.С.	17.05.22	

Научный руководитель  Кошимбаев Ш. К.

Задание принял к исполнению обучающийся  Гилева О. Ю.

Дата

«20» мая 2022 г.

АНДАТПА

Дипломдық жұмыста Өскемен титан-магний комбинаты зауытында титанды тотықсыздандыру процесін автоматты басқару жүйесі зерттелді. Басқару объектісі ретінде тотықсыздандыру аппараты таңдалды, функционалды схема, автоматты қысымды басқару жүйесінің математикалық моделі жасалды.

Дипломдық жұмыстың математикалық моделі, өтпелі процесс графиктерін алу, жүйенің өтпелі процессінің сапаларына тікелей және жанама баға алу құрылған. Осы нәтижелер негізінде жалпы процесті жақсарту мақсатында Циглер-Никольс №2 тәсілі ПИД-реттегіш салынды. Жүйенің сапасын бағалауды Циглер-Никольс №2 тәсілі және автонастройка функциясымен MATLAB-та салыстырды.

АННОТАЦИЯ

В дипломной работе рассмотрена автоматизация процесса восстановления четырёххлористого титана на базе УТКМК. В дипломной работе исследован технологический процесс восстановления тетрахлорид титана магнием. В качестве объекта управления рассмотрен аппарат восстановления, разработана функциональная схема, математическая модель системы автоматического управления давлением.

Произведен анализ математической модели. Определены устойчивость, запасы устойчивости и оценки качества системы. На основе результатов моделирования для синтеза типового регулятора был применен метод Циглера-Никольса №2. Произведено сравнение оценок качества систем с регулятором настроенным методом Циглера-Никольса №2 и функцией автонастройки в MATLAB.

ANNOTATION

The thesis reviews the automation process of recovery of tetrachloride titanium on the basis of UKTMK. Technological process of titanium tetrachloride recovery by magnesium was investigated in the thesis. Recovery machine was chosen as a controlled object. Furthermore, there were developed functional scheme and mathematical model of the system of automatic pressure control.

The analysis of the mathematical model has been carried out. Stability, and quality of the system has been determined. Based on the results of the simulation, the Ziegler-Nichols №2 method was used for the synthesis of regulator. The qualities of the systems were compared with the Ziegler-Nichols №2 method and the AutoConfiguration function in MATLAB.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Технологическая часть	10
1.1 Описание технологического процесса	10
1.2 Описание аппаратуры процесса восстановления	11
1.3 Анализ технологического процесса как объекта управления	13
1.4 Задачи управления процессом восстановления тетрахлорид титана	14
1.5 Технологическое обеспечение АСУТП	15
2 Расчетная часть	17
2.1 Разработка системы автоматического управления	17
2.2 Анализ разомкнутой и замкнутой систем управления	21
2.3 Исследование влияния типовых регуляторов на объект управления. Анализ устойчивости и точности	29
2.4 Настройка ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса №2	32
Заключение	37
Список принятых сокращений	38
Список использованной литературы	39
Приложение А	40
Приложение Б	41
Приложение В	42
Приложение Г	43

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация производства — процесс в развитии машинного производства, при котором функции управления и контроля, выполняемые ранее человеком, передаются автоматическим управляющим устройствам.

Внедрение система автоматизации не только повышает уровень эффективности и производительности труда, но и повышает качество выпускаемой продукции.

На сегодняшний день автоматизация процессов охватила многие отрасли промышленности и сферы деятельности. Высокая актуальность АСУТП отмечается в отраслях со сложными техпроцессами и где сбой работы комплекса приводят к значительным финансовым потерям. К таким процессам относится титано-магниева промышленность.

Титановая промышленность Республики Казахстан представлена единственным предприятием – АО «Усть-Каменогорский титано-магний комбинат», производство которого базируется до настоящего времени на привозном из-за границы сырье. Основными видами товарной продукции комбината являются: титан губчатый, магний первичный в слитках, титановые слитки и сплавы.

Актуальность дипломной работы заключается в потребности современных предприятий автоматизировать промышленные процессы.

Целью данной дипломной работы является исследование автоматизации процесса восстановления четыреххлористого титана в условиях УТКМК.

Задачами дипломной работы являются:

- 1) Описание технологического процесса восстановления тетрахлорид титана магнетермическим способом.
- 2) Получение математической модели, определение запасов устойчивости и оценок качества системы.
- 3) Исследование влияния типовых регуляторов на объект управления.

1 Технологическая часть

1.1 Описание технологического процесса

В производстве титана особое место занимает процесс металлотермического восстановления четыреххлористого титана.

Технологический процесс восстановления заключается в прерывной и непрерывной подаче тетрахлорид титана с постоянной и переменной скоростью на зеркало расплавленного магния.

Восстановления ТХТ магнием построено на основе ниже приведенной химической реакции.



Восстановление проводится в реакторах периодического действия ограниченных размеров и сложной конструкции. На сегодняшний день в промышленности применяют аппараты произвольностью 3–5 т и более титана за цикл. Аппараты могут конструктивно отличаться, но все должны состоять из основных частей и узлов: печи, реактора, узла ввода тетрахлорид титана, узла ввода магния, узла слива хлорида магния, приборов контроля и регулирования процесса [1]. Реакторы занимают большие производственные площади и требуют значительных затрат труда на обслуживание. Поэтому усовершенствование процесса восстановления и создание высокопроизводительного автоматизированного оборудования важны для развития титановой промышленности.

Производственный процесс состоит из отдельных операция, периодически повторяющихся для каждого цикла.

Для проведения первого этапа процесса восстановления TiCl_4 магнием используют реторту, которую устанавливают в электрическую печь, откачивают и заполняют аргоном. После подсоединяют к соответствующим коммуникациям: узел питания тетрахлоридом титана и узел управления сливом хлорида магния.

На втором этапе заливают магний и разогревают его до 800–850 С. Затем в реторту подают тетрахлорид титан. В этот период происходит расплавление конденсата. Для рафинирования магния пропускают 150 кг TiCl_4 , делают выдержку от 30–80 мин в зависимости от состава конденсата, сливают образовавшейся хлористый магний.

Третий этап считается основным. На этом этапе подача четыреххлористого титана в аппарат осуществляется в двух режимах (300 кг/ч до коэффициента использования магния 45%, 200 кг – до 58%) и слив хлористого магния. В течение процесса делается 48–50 сливов через каждые 72 минуты.

Задача четвертый этап это - достижения коэффициента использования магния 58%. После этого прекращается подача TiCl_4 и производится 1,5 часовая выдержка при 850 С процентов по всем зонам и слив хлористого магния.

По окончании процесса восстановления реторту охлаждают, извлекают из печи и передают на следующий передел, где полученный губчатый титан отделяют от остатков магния и хлорида магния методом вакуумной сепарации.

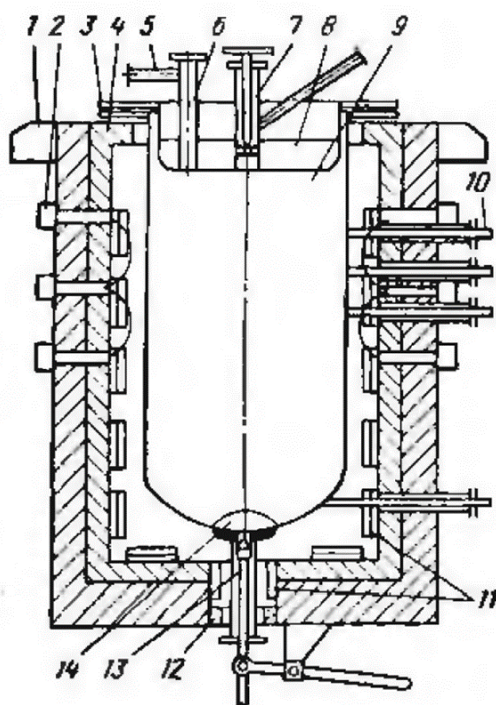
Таким образом, в промышленном аппарате восстановления четырёххлористого титана магнием протекают сложные и многообразные физико – химические процессы, которые затрудняют получение количественных оценок влияние на ход процесса основных технологических параметров и режимов.

Особенности процесса восстановления: высокая температура, агрессивность и токсичность вещества, многообразие физико-химических взаимодействия, наличие нестационарных тепловых полей, невозможность измерения качества продукции по ходу процесса и периодичность затрудняют разработку и внедрение высокоэффективных локальных систем контроля и автоматического регулирования и требуют перехода к принципиально новым системам автоматического управления.

1.2 Описание аппаратуры процесса восстановления

Аппарат восстановления – реактор является основным технологическим оборудованием процесса.

Опишем устройство аппарата восстановления, показанного на рисунке 1.



1 – опора печи; 2 – коллекторы подачи и отвода воздуха; 3 – водоохлаждаемое фланцевое соединение; 4 – футеровка печи; 5 – штуцер вакуумирования и подачи аргона; 6 – узел заливки магния; 7 – узел подачи $TiCl_4$; 8 – крышка реактора; 9 – реторта; 10 – контактные термометры (термошуппы); 11 – нагреватели; 12 – песочный затвор; 13 – шток сливного приспособления; 14 – ложное днище

Рисунок 1.1 – Схема аппарата восстановления, помещенного в печь

Реактор – это цилиндрическая стальная реторта с фланцем и сферическим днищем. Данная конструкция имеет ряд преимуществ в виде устойчивости, технологичности в изготовлении и удобства в эксплуатации.

Реторту изготавливают из легированной стали, которая уменьшает окисление наружных стенок реторты. Кроме этого, снижает риск загрязнения титана железом. Изготовление реактора из хромоникелевых сталей обеспечивает получение высококачественного металла и длительный срок эксплуатации реактора.

Крышка служит средством для герметизации реактора. Крышка выполняет роль теплового экрана при нагреве реактора и теплоотводящего элемента в течении реакции. Резиновая прокладка зажатая между водоохлаждаемыми фланцами крышки и реактора реализует герметизацию соединения крышки с реактором. На рисунке 1 показана вогнутая крышка, преимущества конструкции которой позволяют отводить из реактора большие количества тепла, что позволяет в значительной степени ускорить процесс.

Узел загрузки магния предназначен для загрузки магния в реактор в твердом и жидком виде. Жидкий магний загружают в разогретый реактор, находящийся в печи. Из всех способов загрузки жидкого магния самым простым является заливка из тигля с нижним сливом.

Узел слива хлорида магния предназначен для прочного перекрытия отверстия, через которое хлорид магния сливают из реактора. Ложное дно устанавливается под сливным приспособлением для устранения возможности попадания титановой губки на запирающие контактные поверхности. После установки реактора в печь и заполнения его аргоном запорный шток соединяют с узлом управления сливом – пневмоцилиндром.

Печь — это необходимая часть аппарата восстановления тетрахлорид титана и основное технологическое оборудование. Печь осуществляет подвод тепла в реактор, если температура загрузки недостаточна высокая и для подогрева сливного приспособления [1].

Обдув стенок реактора воздухом через фурмы в футеровке печи выполняет функцию отвода тепла. Расположенные на одной высоте фурмы подсоединены к одному из коллекторов, приваренных к кожуху печи. Через эти коллекторы воздух нагнетается в печь или отводится из нее.

К вспомогательному оборудованию относятся все остальные приспособления необходимые для обслуживания аппаратов восстановления. В частности, это ковши для загрузки расплавленного магния, монтажные стенды с вакуумной системой, демонтажные стенды с вытяжной вентиляцией, холодильники для охлаждения реакционной массы до комнатной температуры, грузоподъемные механизмы, ковши для слива из реактора и транспортировки хлорида магния в другие цеха.

1.3 Анализ технологического процесса как объекта управления

Аппарат, система аппаратов, машина или другое устройство, в котором одна или несколько химико-технологических величин, характеризующих его состояние, поддерживаются автоматическими регуляторами на заданном значении или изменяются по определенному закону, называется объектом химической технологии [2].

В качестве объекта управления в данном технологическом процессе принят реактор восстановления. Воздействия влияющие на процесс восстановления четырёххлористого титана классифицируются на:

- задающие - команды управляющему устройству (регулятору);
- управляющие (регулирующие) - изменяют параметры, определяющие состояние объекта;
- возмущающие - случайные воздействия окружающей среды на объект управления.

Общая структурная схема управления без обратной связи представлена на рисунке 1.2.

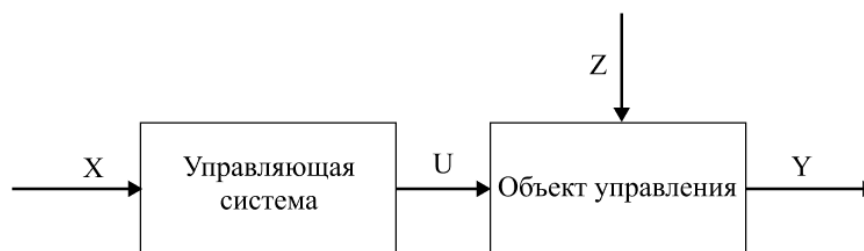


Рисунок 1.2 – Общая структурная схема управления без обратной связи

Структурная схема управления процесса восстановления тетрахлорид титана показана на рисунке 1.3.

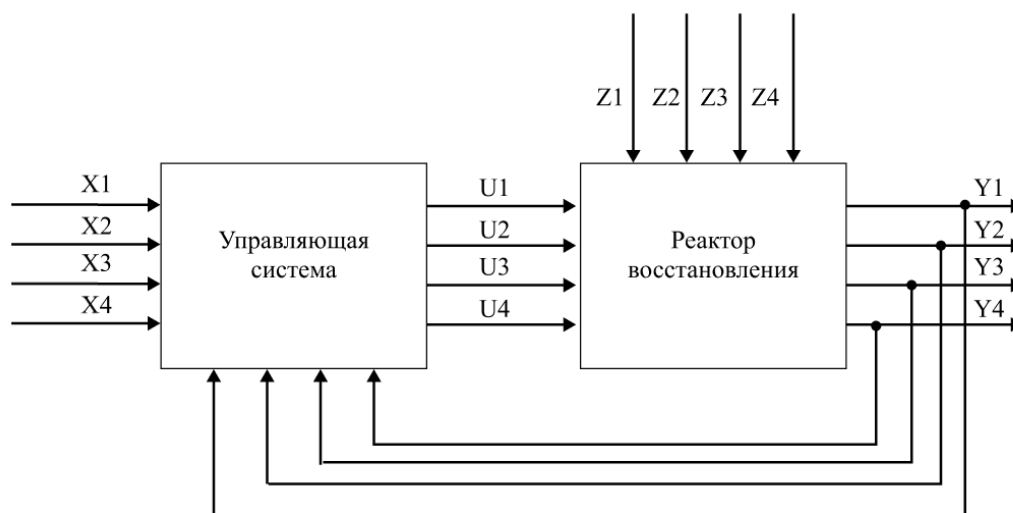


Рисунок 1.3 – Структурная схема управления процесса восстановления ТХТ

где **Задающее воздействие:**

X1 - количество $TiCl_4$;

X2 - количество Mg;

X3 - качество Mg;

X4 - качество Ar.

Управляющее (регулирующее) воздействие:

U1 – скорость подачи $TiCl_4$;

U2 – температурный режим восстановления;

U3 – режим слива;

U4 – давление в реакторе.

Возмущающее воздействие:

Z1 - присутствие случайных примесей в магнезии, тетрахлориде титана, аргоне;

Z2 - износ оборудования и аппаратуры;

Z3 - влияние неконтролируемых переменных процесса;

Z4 - изменения окружающей среды;

Выходные переменные:

Y1 – производительность;

Y2 – содержание Cl.

1.4 Задачи управления процессом восстановления тетрахлорид титана

Задача оптимального управления технологическим процессом восстановления титана магнием сформулирована следующим образом: необходимо управлять процессом восстановления тетрахлорид титана таким образом, чтобы получить максимальную производительность аппарата при получении продукции заданного качества и выполнении соответствующих технологических ограничений.

Технологический режим восстановления губчатого титана определяется следующими параметрами:

- 1) Управление скоростью подачи $TiCl_4$
- 2) Управление температурным режимом процесса восстановления
- 3) Управление режимом давления в аппарате
- 4) Контроль режима слива из аппарата восстановления

Периодичность процесса восстановления, недостаточная точность контроля материальных потоков и сложность взаимосвязей параметров могут вызвать некоторые трудности при автоматизации восстановления тетрахлорид титана.

1.5 Технологическое обеспечение АСУТП

Выбор конкретных средств контроля и автоматизации производится с учетом специфики и характера технологического процесса, экономических, экологических требований, а также требованиям надежности и безопасности.

В системах автоматического управления для измерения (регистрации) текущих значений величин химико-технологических процессов используются различные измерительные устройства, к ним относятся измерительные приборы и измерительные преобразователи [2]. Устройство автоматической системы управления или регулирования, воздействующее на процесс в соответствии с получаемой командной информацией, называется исполнительным устройством.

Перечень измерительных приборов, измерительных преобразователей, исполнительных устройств приведены ниже в таблице 1.1. Функциональная схема процесса восстановления ТХТ представлена в Приложении Г.

Таблица 1.1 – Спецификация приборов процесса восстановления четыреххлористого титана

№ п/п	№ позиции	Наименование приборов	Тип прибора	Кол-во	Примечание
1	1а	Термопара	ТХК	1	
2	1б	Электронный потенциометр	ТХКУ	1	
3	1в	Мост	КСМ	1	
4	1г	Автоматический регулятор		1	
5	2а, 4а, 7а	Расходомер	Расходомер перепада давления	3	
6	2б, 4б, 7б	Преобразователь перепада давления		3	
7	2в, 4в, 7в	Вторичный прибор регистр. расхода		3	
8	2г, 4г, 7г	Автоматический регулятор		3	
9	2д, 4д, 7д, 5д	Исполнительный механизм		4	
10	3а, 6а	Манометр		2	
11	3б, 6б	Преобразователь давления		2	

Продолжение таблицы 1.1.

1	2	3	4	5	6
12	3в, 6в	Вторичный прибор, показывающий		2	
13	3г, 6г	Автоматический регулятор		2	
14	5а	Поплавковый уровнемер	BM25	1	
15	5б	Вторичный прибор измерения уровня		1	
16	5в	Вторичный прибор регистр.		1	
17	5г	Автоматический регулятор		1	
18	8а	Ручное управления скоростью, сигнализ.		1	
19	8б	Ручное управление		1	

Для управления исследуемым технологическим процессом выбран модульный программируемый логический контроллер S7-1200 и модули ввода-вывода «SIEMENS». Контроллер предназначен для построения систем автоматизации средней и высокой сложности. Контроллер отличается высоким быстродействием, функциональностью и удобством обслуживания.

2 Расчетная часть

2.1 Разработка системы автоматического управления

В качестве примера анализа системы управления была выбрана САУ давления в химическом реакторе.

При определении передаточных функций звеньев системы давления в химическом реакторе периодического действия следует использовать следующие уравнения.

Электронный усилитель

$$T_{\text{ЭУ}} \cdot \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} + U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{ЭУ}} \cdot U_{\text{ВХ}}, \quad (2.1)$$

где $T_{\text{ЭУ}}$ - постоянная времени электронного усилителя, с;

$U_{\text{ВЫХ}}$ - выходное напряжение, В;

$U_{\text{ВХ}}$ - входное напряжение, В;

$K_{\text{ЭУ}}$ - коэффициент усиления.

Электродвигатель постоянного тока

$$T_{\text{Я}} \cdot T_{\text{М}} \frac{d^2w}{dt^2} + T_{\text{М}} \frac{dw}{dt} + w = K_{\text{Д}} \cdot U_{\text{Д}}, \quad (2.2)$$

где $T_{\text{Я}}$ - электромагнитная постоянная времени якоря, с;

$T_{\text{М}}$ - электромеханическая постоянная двигателя, с;

w - угловая скорость, с-1;

$K_{\text{Д}}$ - коэффициент передачи электродвигателя, 1/сВ;

$U_{\text{Д}}$ - напряжение якоря, В.

Механический редуктор

$$W_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{Р}} \cdot W_{\text{ВХ}}, \quad (2.3)$$

где $W_{\text{ВЫХ}}$ - соответственно угловая скорость и угол поворота выходного звена редуктора;

$W_{\text{ВХ}}$ - соответственно угловая скорость и угол поворота входного звена редуктора;

$K_{\text{Р}}$ - коэффициент передачи.

Электромагнитный клапан

$$T_{\text{КЛ}} \frac{dP}{dt} + P = K_{\text{КЛ}} \cdot Q, \quad (2.4)$$

где $T_{\text{КЛ}}$ - постоянная времени;

$K_{\text{КЛ}}$ - коэффициент передачи.

Химический реактор

$$T_0 \frac{dF_{\text{ВЫХ}}}{dt} + F_{\text{ВЫХ}} = kF_{\text{ВХ}}, \quad (2.5)$$

где $F_{\text{ВЫХ}}$ - концентрация вещества на выходе;

$F_{\text{ВХ}}$ - концентрация вещества на входе;

T_0 - постоянная времени объекта.

Математические модели звеньев САУ давления в химическом реакторе во временной и операторной области представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Математические модели звеньев САУ

$T_{\text{ЭУ}} \cdot \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} + U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{ЭУ}} \cdot U_{\text{ВХ}}$	$G_{\text{ЭУ}}(s) = \frac{K_{\text{ЭУ}}}{T_{\text{ЭУ}}s + 1}$	$G_{\text{ЭУ}}(s) = \frac{100}{0 \cdot s + 1} = 100$
$T_{\text{Я}} \cdot T_{\text{М}} \frac{d^2w}{dt^2} + T_{\text{М}} \frac{dw}{dt} + w = K_{\text{Д}} \cdot U_{\text{Д}}$	$G_{\text{Д}}(s) = \frac{K_{\text{Д}}}{T_{\text{Я}}T_{\text{М}}s^2 + T_{\text{М}}s + 1}$	$G_{\text{Д}}(s) = \frac{0.00014}{0.018s^2 + 1.51s + 1}$
$W_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{Р}} \cdot W_{\text{ВХ}}$	$G_{\text{Р}}(s) = K_{\text{Р}}$	$G_{\text{Р}}(s) = 0.6947$
$T_{\text{КЛ}} \frac{dP}{dt} + P = K_{\text{КЛ}} \cdot Q$	$G_{\text{КЛ}}(s) = \frac{K_{\text{КЛ}}}{T_{\text{КЛ}}s + 1}$	$G_{\text{КЛ}}(s) = \frac{10.62}{0.6s + 1}$
$T_0 \frac{dF_{\text{ВЫХ}}}{dt} + F_{\text{ВЫХ}} = kF_{\text{ВХ}}$	$G_{\text{Х}}(s) = \frac{K}{T_0s + 1}$	$G_{\text{Х}}(s) = \frac{0.537}{0.4629s + 1}$

Для системы автоматического управления давлением в химическом реакторе построены функциональная и структурные схемы, показанные на рисунках 2.1 и 2.2.

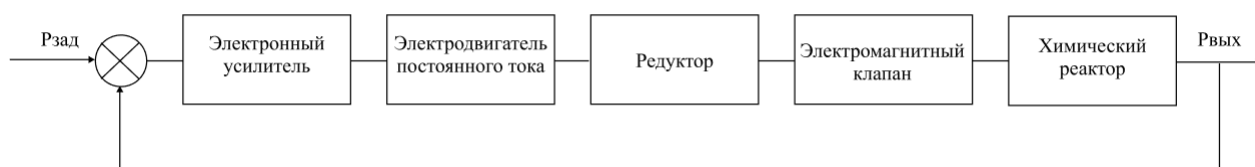


Рисунок 2.1 – Функциональная схема САУ давления в химическом реакторе

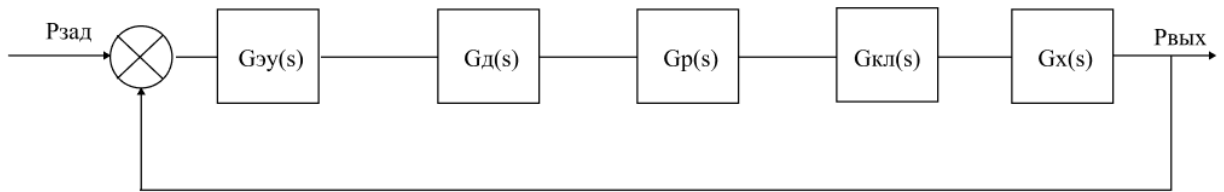


Рисунок 2.2 – Структурная схема САУ давления в химическом реакторе

На основе правил преобразования структурных схем получим эквивалентную передаточную функцию разомкнутой САУ давления в химическом реакторе:

$$G(s) = G_{эу}(s) \cdot G_{д}(s) \cdot G_{р}(s) \cdot G_{кл}(s) \cdot G_{х}(s) \\ = K_{эу} \cdot \frac{K_{д}}{T_{я}T_{м}s^2 + T_{м}s + 1} \cdot K_{р} \cdot \frac{K_{кл}}{T_{кл}s + 1} \cdot \frac{K}{T_{о}s + 1} \quad (2.6)$$

При подстановке значений параметров перепишем математическую модель (2.6) в виде:

$$G(s) = 100 \cdot \frac{0.00014}{0.018s^2 + 1.51s + 1} \cdot 0.6947 \cdot \frac{10.62}{0.6s + 1} \cdot \frac{0.537}{0.4629s + 1} \quad (2.7)$$

$$G(s) = \frac{0.05547}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1} \quad (2.8)$$

На основе правил преобразования структурных схем получим эквивалентную передаточную функцию замкнутой САУ давления в химическом реакторе:

$$T(s) = \frac{G(s)}{G(s) + 1} \quad (2.9)$$

$$T(s) = \frac{0.05547}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1.05547} \quad (2.10)$$

На рисунке 2.3 представлены результаты моделирования, полученные в MATLAB Simulink, разомкнутой САУ давления в химическом реакторе. Получены результаты моделирования исходной и эквивалентной схем – переходные процессы, которые совпадают.

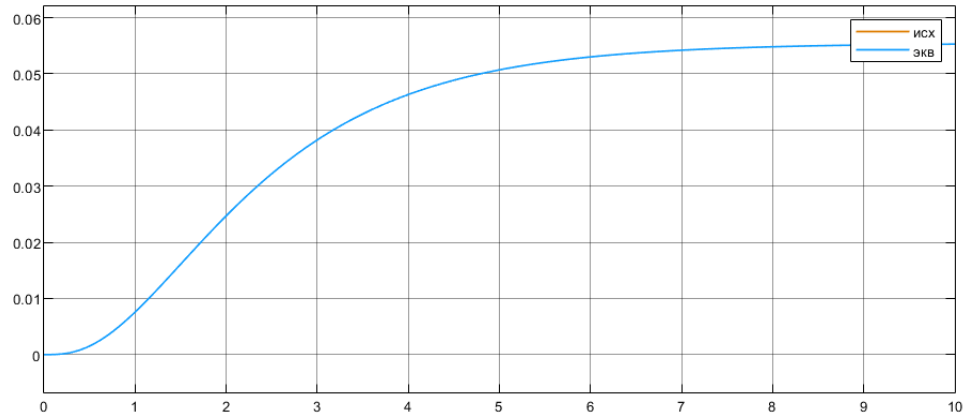
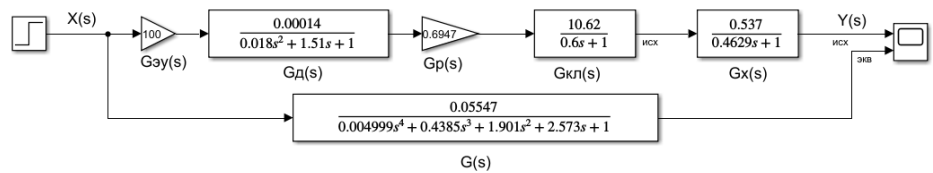


Рисунок 2.3 – Результат моделирования разомкнутой системы

На рисунке 2.4 представлены результаты моделирования, замкнутой САУ давления в реакторе– переходные процессы совпадают.

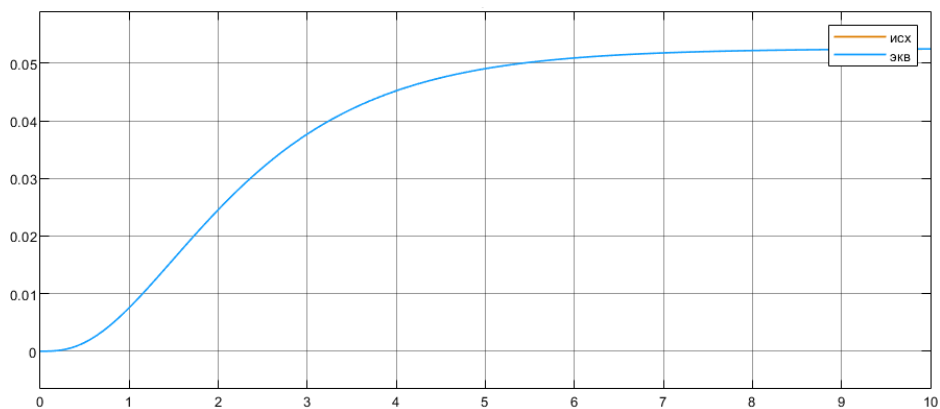
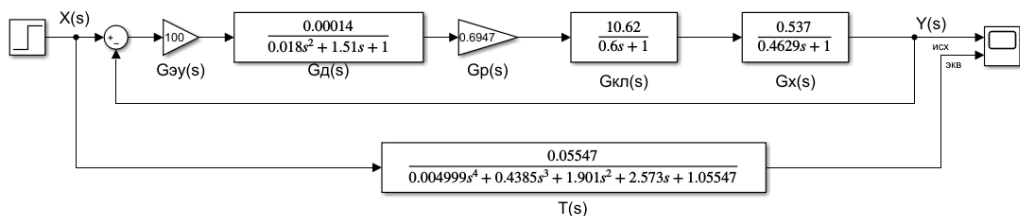


Рисунок 2.4 – Результат моделирования замкнутой системы

В соответствии с графиками, переходные процессы исходных и эквивалентных систем идентичны.

2.2 Анализ разомкнутой и замкнутой систем управления

Первый метод Ляпунова для определения устойчивости системы. Исследуем устойчивость разомкнутой и замкнутой САУ первым методом Ляпунова.

В среде MATLAB определим исходную передаточную функцию разомкнутую (2.8) и замкнутую (2.10) как LTI-model с обозначением G, G1 найдем полюса передаточной функции.

```
>> G1 = tf([0.05547],[0.004999 0.4385 1.901 2.573 1]) >> pole(G1)
G1 = ans =
-----
0.05547 -83.2221
-----
0.004999 s^4 + 0.4385 s^3 + 1.901 s^2 + 2.573 s + 1 -2.1646
-1.6632
-0.6677
Continuous-time transfer function.

>> G = tf([0.05547],[0.004999 0.4385 1.901 2.573 1.05547]) >> pole(G)
G = ans =
-----
0.05547 -83.2221
-----
0.004999 s^4 + 0.4385 s^3 + 1.901 s^2 + 2.573 s + 1.055 -2.2973
-1.4210
-0.7772
Continuous-time transfer function.
```

Рисунок 2.5 – Нахождение полюсов передаточных функций

Полюса передаточной функции G1:

-83.2221
-2.1646
-1.6632
-0.6677

Полюса передаточной функции G:

-83.2221
-2.2973
-1.4210
-0.7772

Полюса разомкнутой и замкнутой систем имеет отрицательные действительные части. Система устойчива в соответствии с первым методом Ляпунова.

Критерий Гурвица. Характеристическое уравнение, полученное по функции (2.8), имеет вид:

$$0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1 = 0 \quad (2.11)$$

Матрица Гурвица, в соответствии с характеристическим уравнением (2.11):

$$H_T = \begin{vmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 & 0 \\ 0.005 & 1.901 & 1 & 0 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0 & 0.005 & 1.901 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.12)$$

Для реализации критерия Гурвица используем инструментальный CST MATLAB. В соответствии с критерием Гурвица разобьем матрицы Гурвица (2.12) на диагональные миноры и найдем их определители:

```
>> H44=[0.4385 2.573 0 0; 0.004999 1.901 1 0; 0 0.4385 2.573 0; 0 0.004999 1.901 1];
>> H33=[0.4385 2.573 0; 0.004999 1.901 1; 0 0.4385 2.573];
>> H22=[0.4385 2.573; 0.004999 1.901];
>> det(H44)

ans =

    1.9194

>> det(H33)

ans =

    1.9194

>> det(H22)

ans =

    0.8207
```

Рисунок 2.6 – Нахождение определителей матрицы Гурвица

По результатам вычислений в среде MATLAB показанных на рисунке 2.6 определители главных диагональных миноров равны:

$$\Delta_{4 \times 4} = 1.9194$$

$$\Delta_{3 \times 3} = 1.9194$$

$$\Delta_{2 \times 2} = 0.8207$$

Определители главных диагональных миноров матрицы Гурвица с положительным знаком, в соответствии с критерием Гурвица разомкнутая система устойчива.

Рассмотрим задачу определения условия устойчивости замкнутой системы по критерию устойчивости Гурвица.

Характеристическое уравнение:

$$0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1 + k = 0 \quad (2.13)$$

Матрица Гурвица, в соответствии с характеристическим уравнением (2.13) примет вид:

$$H_T = \begin{vmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 & 0 \\ 0.005 & 1.901 & 1+k & 0 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0 & 0.005 & 1.901 & 1+k \end{vmatrix} \quad (2.14)$$

В соответствии с критерием Гурвица для устойчивости замкнутой системы необходимо выполнение следующих соотношений:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.005 > 0 \\ a_1 &= 0.4385 > 0 \\ a_2 &= 1.901 > 0 \\ a_3 &= 2.573 > 0 \\ a_4 &= 1 + k > 0 \end{aligned}$$

Найдем определители главных диагональных миноров матрицы Гурвица

$$\begin{aligned} \Delta_{4 \times 4} &= -0.4385k^2 + 1.727k + 1.917 \\ \Delta_{3 \times 3} &= 19.1863 - 1.922k \end{aligned}$$

Отсюда, коэффициент усиления удовлетворяет неравенствам:

$$\begin{aligned} a_4 = 1 + k > 0, & \Rightarrow k < -1 \\ 19.1863 - 1.922k, & \Rightarrow k < 9.9824 \end{aligned}$$

Замкнутая система устойчива, если удовлетворяется соотношение:

$$-1 < k < 9.9824 \quad (2.15)$$

Критерий Михайлова. Получим выражение комплексного характеристического полинома – годографа Михайлова:

$$\begin{aligned} D(j\omega) &= 0.005(j\omega)^4 + 0.4385(j\omega)^3 + 1.901(j\omega)^2 + 2.573(j\omega) + 1 + k \\ &= 1.555 \cdot 10^{-8}\omega^4 + 8.96 \cdot 10^{-7}\omega^3 + 0.014\omega^2 + 0.2\omega + 1 + k \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} X(\omega) &= (0.005\omega^4 - 1.901\omega^2 + 1 + k) \\ Y(\omega) &= (-0.4385\omega^3 + 2.573\omega) \end{aligned}$$

В среде MATLAB можно промоделировать $X(\omega)$ и $Y(\omega)$ как функции от частоты $\omega = [0, +\infty)$:

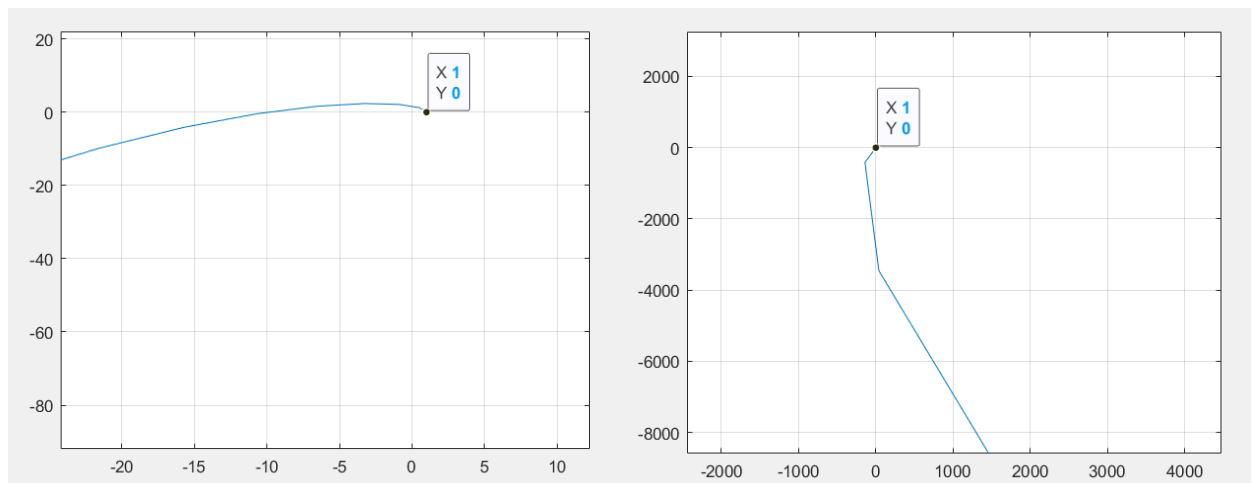


Рисунок 2.7 – Годограф Михайлова устойчивой системы 4-го порядка в разных масштабах

Годограф Михайлова начинается на положительной действительной полуоси. Не обращается в ноль, охватывает в положительном направлении 4 квадранта. В соответствии с частотным критерием Михайлова разомкнутая система устойчива.

Определение запасов устойчивости системы по фазе и амплитуде. Используя критерии Найквиста, исследуем устойчивость замкнутой САУ по АФЧХ разомкнутой системы:

$$G(s) = \frac{0.05547}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1} \quad (2.17)$$

На основе оператора нуquist получен график АФЧХ разомкнутой системы (2.13).

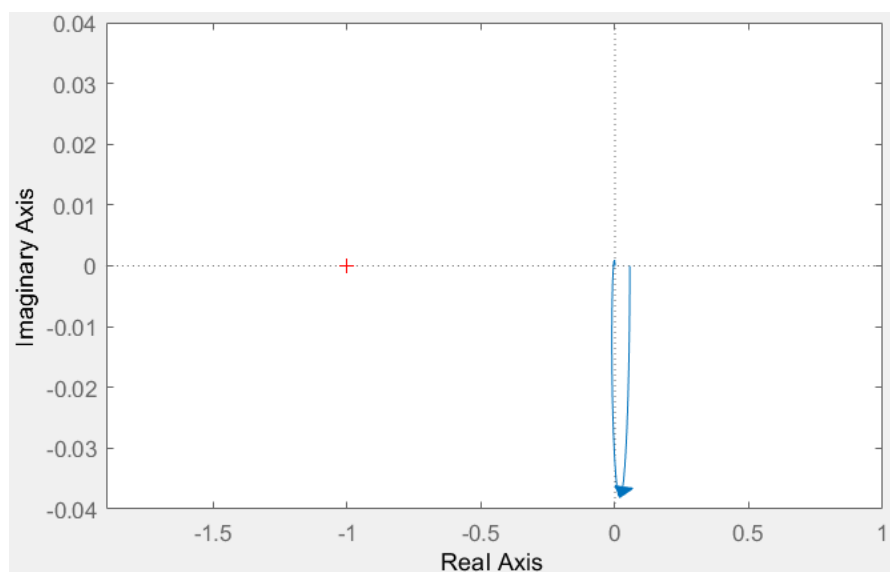


Рисунок 2.8 – АФЧХ разомкнутой системы

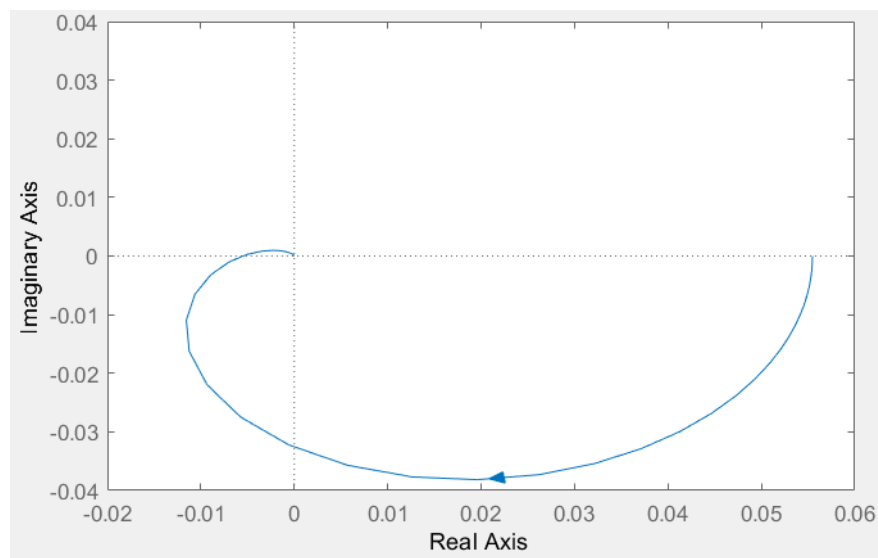


Рисунок 2.9 – Увеличенный рисунок АФЧХ разомкнутой системы

АФЧХ устойчивой разомкнутой системы не охватывает точку $(-1; j0)$, следовательно замкнутая система устойчива.

Используя критерии Найквиста, определим запас устойчивости по амплитуде (GM) и по фазе (PM) замкнутой САУ (2.10) по АФЧХ разомкнутой системы в среде MATLAB.

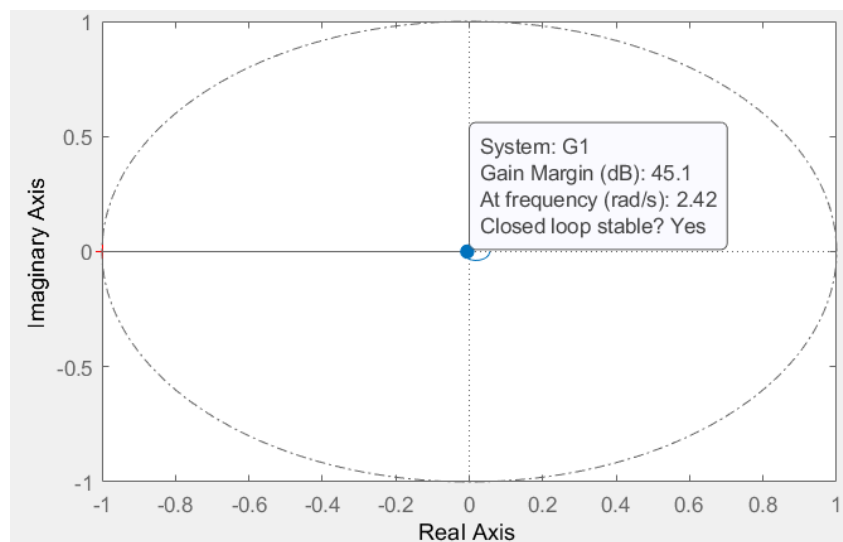


Рисунок 2.10 – Определение запасов устойчивости, GM и PM

Запасы устойчивости GM=45.1dB, PM=inf.

Используя критерии Найквиста определим запас устойчивости по амплитуде (GM) и по фазе (PM) замкнутой САУ по ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы с использованием оператора margin.

Результаты моделирования в MATLAB представлены на рисунке 2.11.

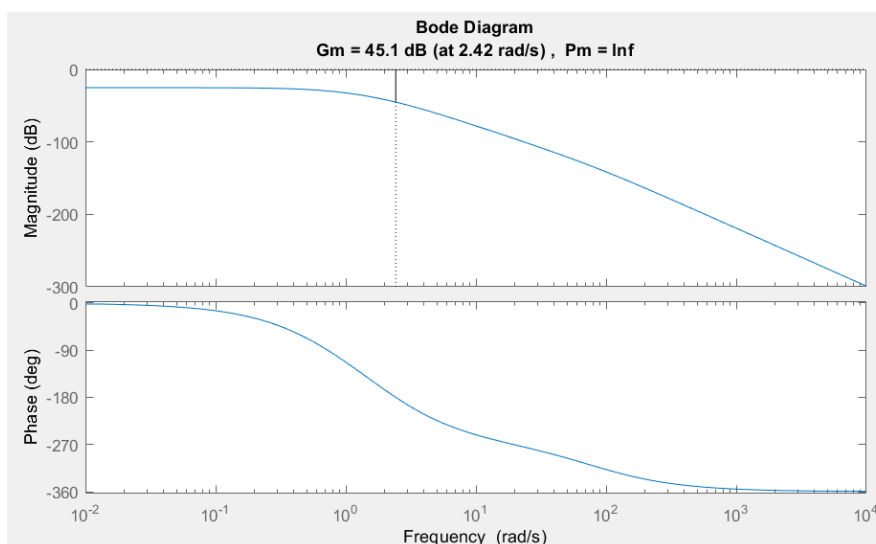


Рисунок 2.11 – Запасы устойчивости по амплитуде (GM), по фазе (PM)

Запасы устойчивости по амплитуде GM = 45.1 dB, по фазе PM = inf deg.

Оценки качества. Сравним прямые и косвенные оценки качества системы. На рисунке 2.9 показан прямые оценки качества системы:

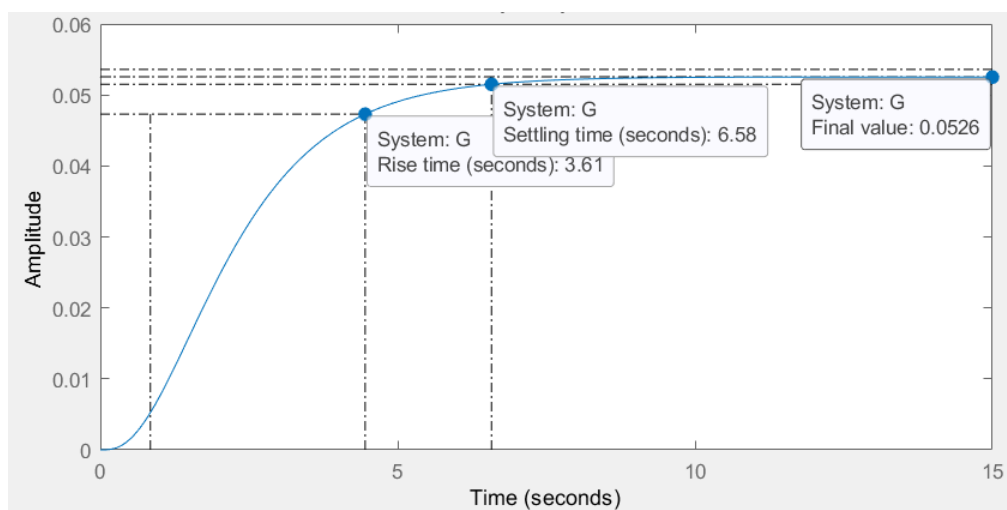


Рисунок 2.12 – Прямые оценки качества системы в MATLAB

По рисунку установившееся состояние $y_{ss} = 0.0526$, время регулирования $T_{set} = 6.58$ с, время нарастания $T_R = 3.61$ с.

Значение перерегулирования $P_{ov} = 0\%$.

Число колебаний, $M = 0$.

Время достижения первого максимума $T_{max} = 8.23$.

Найдем значение установившейся ошибки:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \cdot \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{0.05547}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1.05547}} \right)$$

$$= \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \cdot \frac{\frac{1}{s}}{\frac{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1.11094}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1.05547}} \right) = \frac{1.05547}{1.11094}$$

$$= 0.94 \approx 1$$

Опишем косвенные оценки качества системы. Косвенные оценки качества (частотные) оценивают качество переходных процессов по другим характеристикам системы, таким как частотные характеристики, характер и расположение корней характеристического уравнения (полюсов передаточной функции), интегралы временной функции переходного процесса.

На рисунке 2.13 представлен график АЧХ, полученный в среде MATLAB на основе оператора `>>bode`.

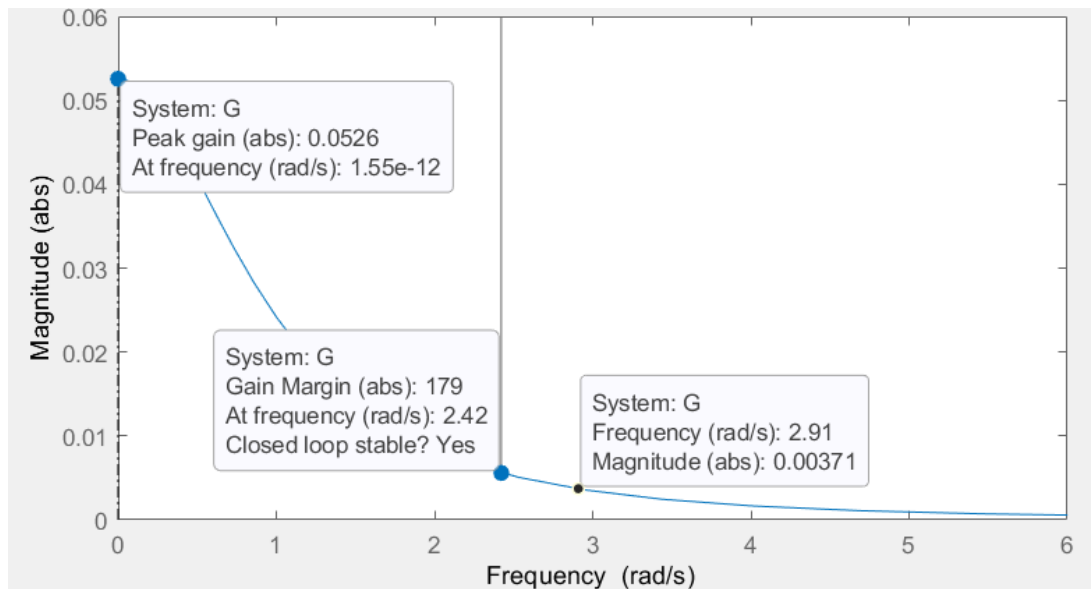


Рисунок 2.13 – Косвенные оценки качества по АЧХ системы

Для получения косвенных оценок качества отметим на графике АФЧХ следующие амплитуды:

- Амплитуда $M(0)$, полученная при частоте $\omega = 0$ определяет полосу пропускания $0.707 \cdot M(0) = 0.707 \cdot 0.0526 = 0.00371 \Rightarrow [0; 2.91]$.
- Амплитуда $M = 1$, определяющая частоту среза $\omega_{CF} = 2.41$.
- Амплитуда $M_{max} = 0.0526$, определяющая резонансную частоту $\omega_p = 1.55 \cdot 10^{-12}$.

Определим показатель колебательности $\mu = \frac{M_{max}(\omega)}{M(0)} = 1$.

Получим косвенные оценки качества замкнутой системы на основе корневых методов. На рисунке 2.14 отобразим полюса и нули.

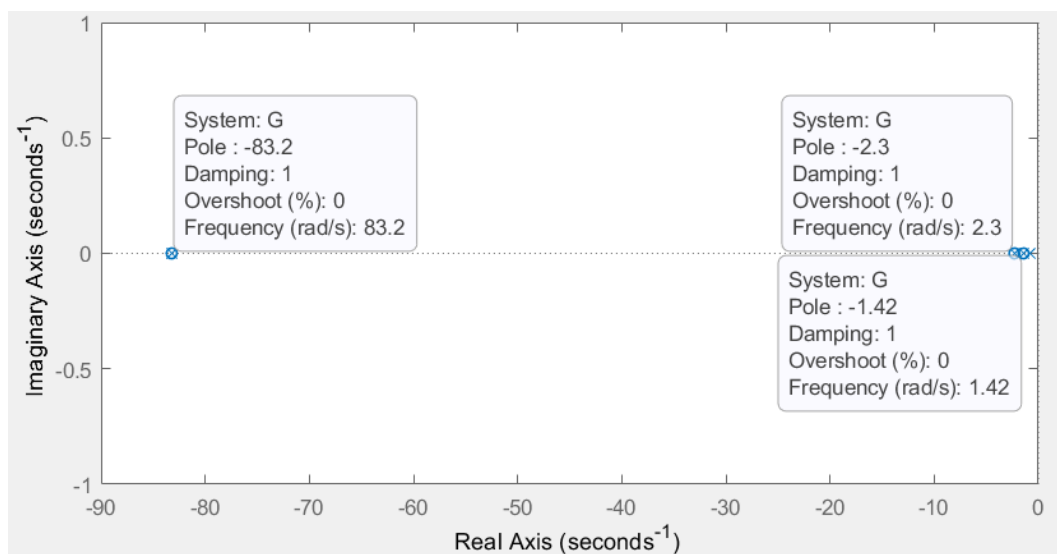


Рисунок 2.14 – График полюсов и нулей в MATLAB

Получим в среде MATLAB собственные значения (pole), собственную частоту (natural frequencies) и коэффициент демпфирования (damping factors) на основе команды >>damp.

```
>> damp(G)

      Pole          Damping      Frequency      Time Constant
      (rad/seconds)      (seconds)

-7.77e-01    1.00e+00    7.77e-01    1.29e+00
-1.42e+00    1.00e+00    1.42e+00    7.04e-01
-2.30e+00    1.00e+00    2.30e+00    4.35e-01
-8.32e+01    1.00e+00    8.32e+01    1.20e-02
```

Рисунок 2.15 – Получение косвенных оценок качества на основе корневых методов в MATLAB

Данные позволяют получить следующие значения:

- собственная частота: $\omega_n = 8.31$;
- коэффициент демпфирования: $\xi = 1$;
- коэффициент затухания: $\sigma = -8.32$;
- действительная частота: $\omega_d = 8.32$.

Тогда:

- 1) Степень колебательности, $\mu = \frac{\omega_d}{\sigma} = 1$
- 2) Степень устойчивости, $\eta = |\sigma_{min}| = 1.42$

В таблице 2.2 представлены прямые оценки переходного процесса.

Таблица 2.2 – Прямые оценки качества переходного процесса

1	Время регулирования	$T_{set} = 6.58$ с
2	Перерегулирование	$P_{ov} = 0\%$.
3	Число колебаний	$M = 0$
4	Колебательность	$\mu = 0$
5	Установившиеся ошибка	$e_{ss} = 1$
6	Время достижения первого максимума	$T_p = 6.58$ с
7	Время нарастания	$T_R = 3.61$ с

2.3 Исследование влияния типовых регуляторов на объект управления. Анализ устойчивости и точности

Для регулирования объектами управления, обычно используют типовые регуляторы, названия которых соответствуют названиям типовых звеньев. Регуляторы формируют управляющий сигнал с целью получения необходимой точности и качества переходного процесса.

1) П-регулятор, пропорциональный регулятор. Принцип действия заключается в том, что регулятор вырабатывает управляющее воздействие на объект пропорционально величине ошибки.

2) И-регулятор, интегрирующий регулятор. Управляющее воздействие пропорционально интегралу от ошибки.

3) Д-регулятор, дифференцирующий регулятор. Д-регулятор генерирует управляющее воздействие только при изменении регулируемой величины.

Исследуем влияние типовых регуляторов на объект управления.

Влияние на устойчивость Р-регулятора

Передаточная функция замкнутой системы с регулятором:

$$T(s) = \frac{P \cdot G(s)}{1 + P \cdot G(s)} = \frac{0.05547P}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1 + 0.05547P} \quad (2.18)$$

Характеристическое уравнение на основе передаточной функции (4) имеет вид:

$$0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1 + 0.05547P = 0 \quad (2.19)$$

Тогда вычислим предел P:

$$1 + 0.05547P > 0 \Rightarrow P > -18 \quad (2.20)$$

Вычисление пределов изменения P на основе критерия Гурвица:

$$H = \begin{vmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 & 0 \\ 0,005 & 1.901 & 1 + 0.05547P & 0 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0 & 0,005 & 1.901 & 1 + 0.05547P \end{vmatrix} \Rightarrow$$

$$\det_{3 \times 3}(H) = 1,91 - 0,01P \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P < 191$$

$$-18 < P < 2191 \quad (2.21)$$

Влияние на точность Р-регулятора

Передаточная функция замкнутой системы с регулятором относительно заданного сигнала по ошибке:

$$T_E(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + P \cdot G(s)} \quad (2.22)$$

Динамическая ошибка:

$$E(s) = \frac{1}{1 + P \cdot G(s)} \cdot R(s) \quad (2.23)$$

Вычислим значение статической ошибки:

$$\begin{aligned} E_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \cdot \frac{R(s)}{1 + P \cdot G(s)} \right) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \cdot \frac{\frac{1}{s}}{1 + P \cdot \frac{0.05547}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1}} \right) \\ &= \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\frac{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1 + 0.05547P}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1}} \right) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1 + 0.05547P} \right) \\ &= \frac{1}{1 + 0.05547P} \\ E_{ss} &= \frac{1}{1 + 0.05547P} \quad (2.24) \end{aligned}$$

Влияние на устойчивость I-регулятора

Передаточная функция замкнутой системы с регулятором:

$$\begin{aligned} T_E(s) &= \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{I \cdot \frac{1}{s} \cdot G(s)}{1 + I \cdot \frac{1}{s} \cdot G(s)} \quad (2.25) \\ &= \frac{0.05547I}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 0.05547I} \end{aligned}$$

Характеристическое уравнение и предел измерения I:

$$0.005s^4 + s^3 + 1.901s^2 + 2.57s + 0.05547I = 0 \quad (2.26)$$

$$0.05547I > 0 \Rightarrow I > 0$$

Вычисление пределов изменения I на основе критерия Гурвица:

$$\begin{aligned} H &= \begin{vmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 & 0 \\ 0.005 & 1.901 & 0.05547I & 0 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0 & 0.005 & 1.901 & 0.05547I \end{vmatrix} \Rightarrow \\ & \det_{2 \times 2}(H) = 2.11 - 0.01I \Rightarrow \\ & \Rightarrow I < 211 \\ 0 &< I < 211 \quad (2.27) \end{aligned}$$

Влияние на точность I-регулятора

Передаточная функция замкнутой системы с регулятором относительно заданного сигнала по ошибке:

$$T_E(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + I \cdot \frac{1}{s} \cdot G(s)} \quad (2.28)$$

Динамическая ошибка:

$$E(s) = \frac{1}{1 + I \cdot \frac{1}{s} \cdot G(s)} \cdot R(s) \quad (2.29)$$

Статическая ошибка:

$$\begin{aligned} E_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \cdot \frac{R(s)}{1 + I \cdot \frac{1}{s} \cdot G(s)} \right) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \cdot \frac{\frac{1}{s}}{1 + I \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{0.05547}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1}} \right) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\frac{s \cdot (0.014s^2 + 0.2s + 1) + 0.05547I}{s \cdot (0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1)}} \right) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{s \cdot (0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1)}{s \cdot (0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1) + 0.05547I} \right) = 0 \\ E_{ss} &= 0 \end{aligned} \quad (2.30)$$

Влияние на устойчивость D-регулятора

Передаточная функция замкнутой системы с регулятором:

$$T(s) = \frac{Ds \cdot G(s)}{1 + Ds \cdot G(s)} = \frac{0.05547Ds}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 0.05547Ds + 1} \quad (2.31)$$

Характеристическое уравнение:

$$\begin{aligned} 0.005s^4 + s^3 + 1.901s^2 + 2.57s + 0.05547Ds + 1 &= 0 \\ 2.573 + 0.05547D &> 0 \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$D > -0.04638 \quad (2.33)$$

Влияние на точность D-регулятора

Вычислим статистическую ошибку:

$$\begin{aligned} E_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \cdot \frac{R(s)}{1 + Ds \cdot G(s)} \right) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \cdot \frac{\frac{1}{s}}{1 + Ds \cdot \frac{0.05547}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1}} \right) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1 + 0.05547Ds} \right) = \frac{1}{1} = 1 \\ E_{ss} &= 1 \end{aligned} \quad (2.34)$$

На основе проведенных исследований влияния регуляторов на устойчивость и точность замкнутой системы можно сделать следующие выводы:

- 1) Пропорциональный и дифференциальный регуляторы на устойчивость не влияют.
- 2) Интегральный регулятор существенно влияет на устойчивость.
- 3) Пропорциональный и дифференциальный регуляторы не обеспечивают замкнутой системе точности.
- 4) Интегральный регулятор обеспечивает точность замкнутой системы.

2.4 Настройка ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса №2

Метод Циглера-Никольса №2 предназначен для систем порядка выше второго порядка. Вместо переходной характеристики объекта, использует параметры, определяемые по переходной характеристике замкнутой системы управления в режиме автоколебаний, а затем по формулам определяют параметры регулятора.

Задана передаточная функция разомкнутого объекта управления:

$$G(s) = \frac{0.05547}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1} \quad (2.35)$$

Включим в схему Р-регулятор с неизвестным параметром K_{cr} и получим передаточную функцию замкнутой системы:

$$T(s) = \frac{K_{cr}}{0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1 + K_{cr}} \quad (2.36)$$

Определим K_{cr} в соответствии с критерием Гурвица. Характеристическое уравнение:

$$0.005s^4 + 0.4385s^3 + 1.901s^2 + 2.573s + 1 + K_{cr} = 0 \quad (2.37)$$

$1 + K_{cr} \Rightarrow K_{cr} = -1$ (предельный коэффициент усиления, соответствующий нейтральной границе устойчивости)

По матрице Гурвица:

$$H_T = \begin{vmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 & 0 \\ 0.005 & 1.901 & 1 + K_{cr} & 0 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0 & 0.005 & 1.901 & 1 + K_{cr} \end{vmatrix} \quad (2.38)$$

$1.9194 - 0.1922 \cdot K_{cr} \Rightarrow K_{cr} = 9.9824 \approx 10$ (предельный коэффициент усиления, соответствующий колебательной границе устойчивости)

Необходимо изменять параметр Р-регулятора таким образом, чтобы у системы появились колебания с постоянной амплитудой и частотой показанные на рисунке 2.16.

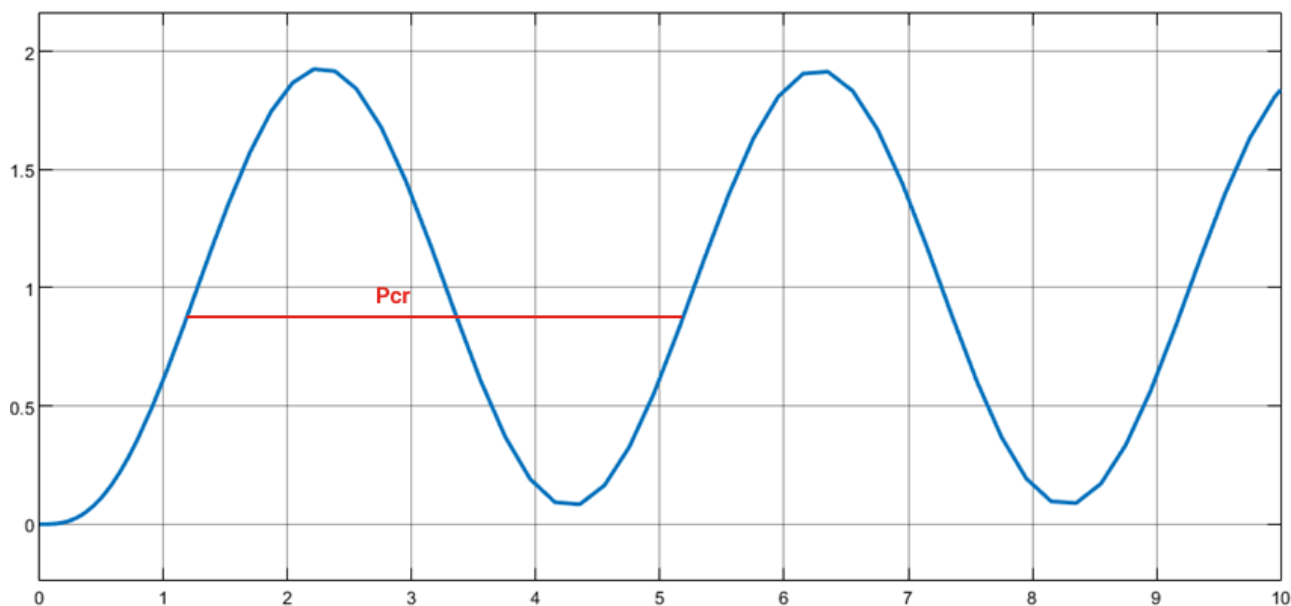


Рисунок 2.16 – Переходный процесс с колебаниями с постоянной амплитудой и частотой при изменении параметра Р-регулятора

По колебательному процессу $P_{cr} = 4$.

Параметры типового регулятора посчитаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3 Параметры типового регулятора

	P	I	D
P	$0.5 \cdot K_{cr} = 0.5 \cdot 10 = 5$	-	-
PI	$0.45 \cdot K_{cr} = 0.45 \cdot 10 = 4.5$	$P_{cr}/1.2 = 4/1.2 = 3.33$	-
PID	$0.6 \cdot K_{cr} = 0.6 \cdot 10 = 6$	$P_{cr}/2 = 4/2 = 2$	$P_{cr}/8 = 4/8 = 0.5$

На рисунке показано моделирование P, PI, PID – регуляторов в среде MATLAB Simulink с параметрами, найденными методом ЦН №2. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.18.

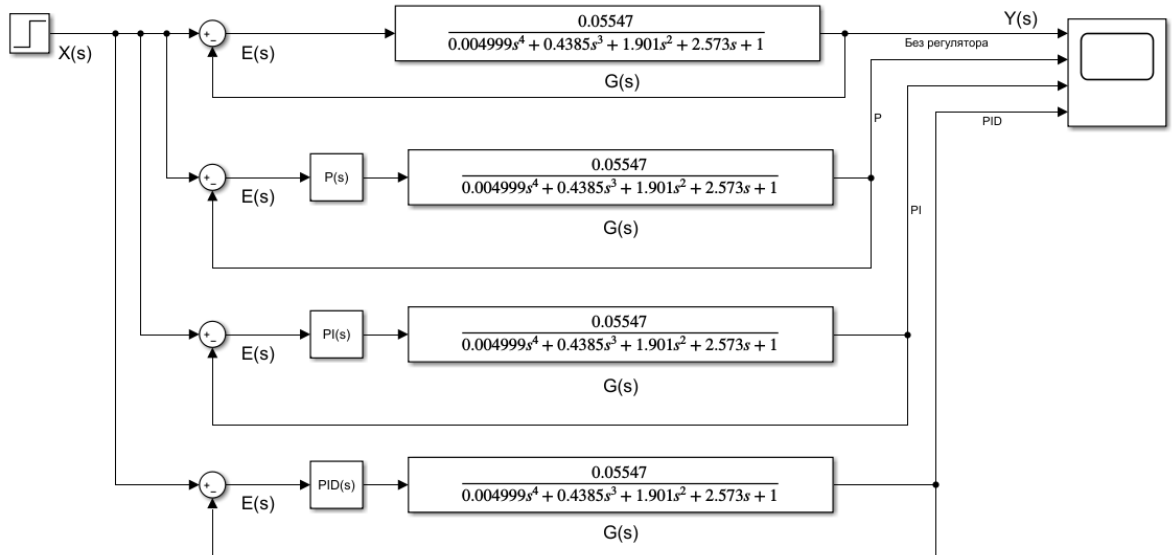


Рисунок 2.17 – Структурная схема сравнения переходных процессов с регулятором и без регулятора

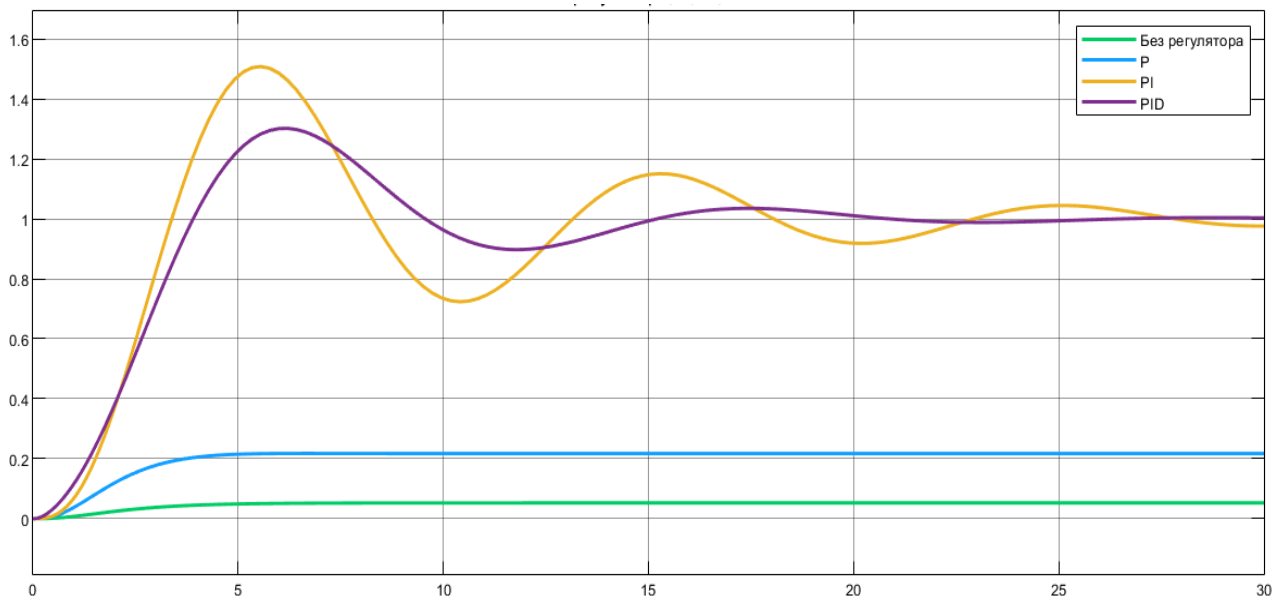


Рисунок 2.18 – Результаты моделирования

Воспользуемся функцией Tune в программе MATLAB Simulink. Результаты моделирования продемонстрированы на рисунке 2.19.

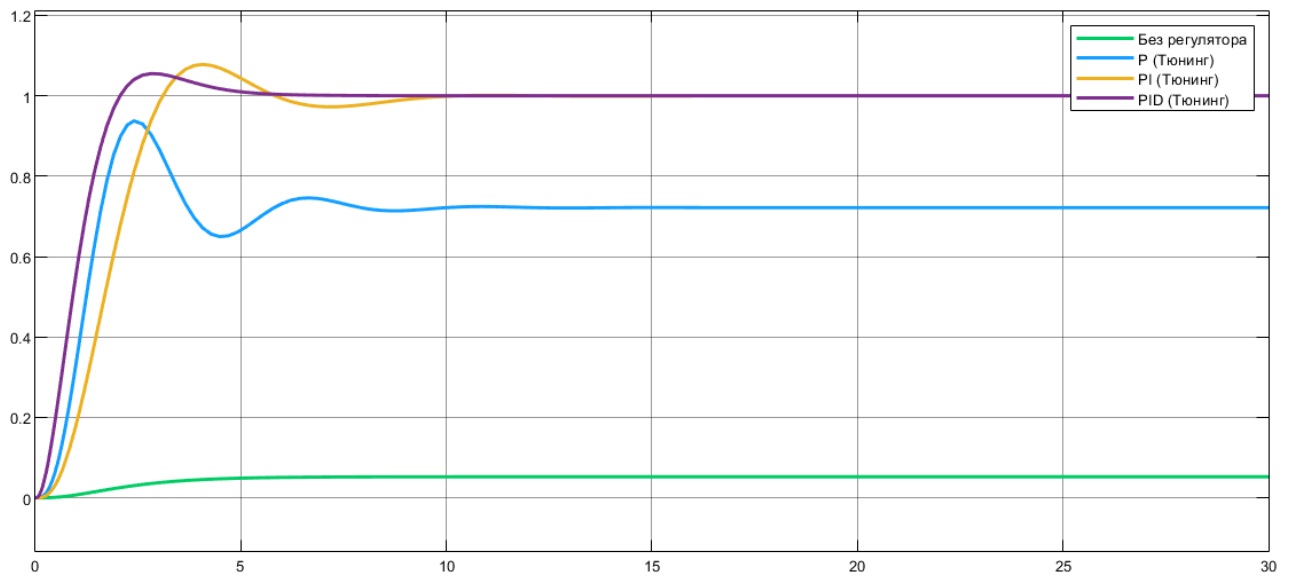


Рисунок 2.19 – Результаты моделирования системы с помощью функции Tune P, PI, PID – регуляторов

Для сравнения смоделируем в среде MATLAB исходную систему, систему с PID-регулятором на основе метода Циглера-Никольса №2 и с регулятором, полученным в результате тюнинга в MATLAB.

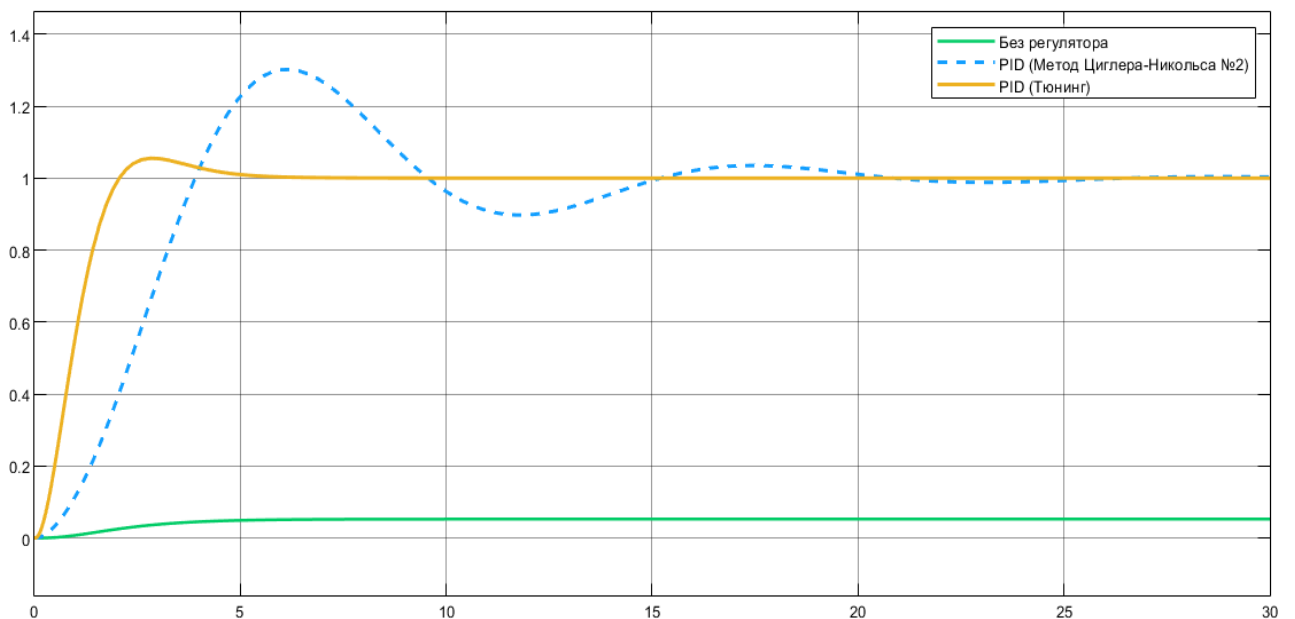


Рисунок 2.20 – График сравнения переходных процессов

По результатам сравнения переходных процессов можно сделать вывод, что метод Циглера-Никольса №2 уступает перед авто-настройкой. Тюнинг MATLAB показал значительные изменения в системе.

Для более наглядного сравнения системы с PID-регулятором на основе метода Циглера-Никольса №2, PID-регулятором авто-настройки и без PID-

регулятора составим таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Значения оценок качества и запасов устойчивости системы

	Без регулятора	PID-регулятор (метод Циглера-Никольса №2)	PID-регулятор (Тюнинг)
Время регулирования	6.58 с	19.3 с	4.35 с
Время нарастания	3.61 с	2.64 с	1.33 с
Перерегулирование	0%	30.2%	5.53%
Запас устойчивости (по амплитуде)	36.4 dB	49.2 dB	33 dB

По данным, представленным в таблице, можно сделать вывод, что система с PID - регулятором авто-настройки обладает лучшим временем регулирования – 4.35 с, перерегулирования 5.53%, система монотонна. Система с PID-регулятором метод Циглера-Никольса №2 обладает большим временем регулирования 19.3 с по сравнению с системами без регулятора и PID - регулятором авто-настройки. Также присутствует перерегулирование 30.2%.

В данном эксперименте предпочтительнее использовать систему с PID - регулятором авто-настройки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная дипломная работа была посвящена исследованию автоматизации процесса восстановления четыреххлористого титана на базе УТКМК.

В первой главе был описан технологический процесс восстановления четыреххлористого титана. Приведено описание аппарата восстановления и технологическое описание АСУТП. Затем реактор восстановления был описан как объект управления.

Во второй части были разработаны функциональная и структурные схемы управления давления в химическом реакторе. Проанализированы динамические свойства разомкнутой и замкнутой систем и получены результаты моделирования. Проведено исследование влияния типовых регуляторов на объект управления. Результаты исследования показали, что пропорциональный (P) и дифференциальный (D) регуляторы не влияют на устойчивость системы. Интегральный (I) регулятор существенно повлиял на устойчивость. Пропорциональный и дифференциальный регуляторы не обеспечили точность системы. В свою очередь интегральный регулятор обеспечил точность системы.

Настройка PID-регулятора была произведена методом Циглера-Никольса №2 и функцией Tune MATLAB Simulink. Выполнено сравнение значений оценок качества и запасов устойчивости без регулятора, PID-регулятором автонастройки MATLAB и PID-регулятором с параметрами, найденными методом Циглера-Никольса №2.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

GM	–	gain margin (запас устойчивости по амплитуде)
PM	–	phase margin (запас устойчивости по фазе)
АСУТП	–	автоматизированная система управления технологическим процессом
АФЧХ	–	амплитудно-фазовая частотная характеристика
ЛФЧХ	–	логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика
САУ	–	система автоматического управления
ТХК	–	преобразователь термоэлектрический хромель-копелевый (термопара хромель-копель)
ТХКУ	–	термопреобразователи с унифицированным выходным сигналом
ТХТ	–	тетрахлорид титан
УТКМК	–	Усть-Каменогорский титано-магниевого комбинат
ЦН	–	метод Циглера-Никольса

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Тарасов А. В. Металлургия титана. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 328 с.
- 2 Полоцкий Л. М., Лапшенков Г. И. Автоматизация химических производств. – М.: Химия, 1982. – 296 с.
- 3 Самсонов Г. В., Перминов В. П. Магниетермия. – М.: Металлургия, 1971. – 176 с.
- 4 Харазов В. Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Издательство «Профессия», 2009. – 592 с.
- 5 Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. – СПб: Издательство «Профессия», 2003. – 752 с.
- 6 ГОСТ 21.404–85 Уловные обозначения приборов и средств автоматизации в схемах.
- 7 Пупков К. А., Егупов Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 656 с.
- 8 Мирошник И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы. – СПб.: Питер, 2005. – 347 с
- 9 Айнштейн В. Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. – М.: Химия, 1999. – 888 с.
- 10 Волошенко А. В., Горбунов Д. Б. Проектирование функциональных схем систем автоматического контроля и регулирования. –Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 109 с.
- 11 Бородин И. Ф., Андреев С. А. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления. – М.: Юрайт, 2019. – 386 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Математическое описание реакции восстановления тетрахлорид титана в химическом реакторе.

$$\begin{aligned}V &= 5 \text{ м}^3 \\F &= 5.8 \text{ м}^3/\text{ч} \\k &= 1\end{aligned}$$

Запишем передаточную функцию реактора через постоянную времени и коэффициент усиления системы:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{K}{Ts + 1}$$

Где

$$\begin{aligned}K &= \frac{1}{\frac{kV}{F} + 1} = \frac{1}{\frac{5 \cdot 1}{5.8} + 1} = 0.537 \\T &= \frac{\frac{V}{F}}{1 + \frac{kV}{T}} = \frac{\frac{5}{5.8}}{1 + \frac{5 \cdot 1}{5.8}} = 0.4629\end{aligned}$$

Передаточная функция имеет вид:

$$G_x(s) = \frac{0.537}{0.4629s + 1}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Определение матриц четвертого порядка в Live Script MATLAB:

```

1  syms p
2  H44=["0.4385" "2.573" 0 0; "0.004999" "1.901" 1+"0.05547"*p 0; 0 "0.4385" "2.573" 0; 0 "0.004999" "1.901" 1+"0.05547"*p]
3  H33=["0.4385" "2.573" 0; "0.004999" "1.901" 1+"0.05547"*p; 0 "0.4385" "2.573"]
4  H22=[0.4385 2.573; 0.004999 1.901]
5  det(H44)
6  det(H33)
7  det(H22)

8  H44=["0.4385" "2.573" 0 0; "0.004999" "1.901" 1+p 0; 0 "0.4385" "2.573" 0; 0 "0.004999" "1.901" 1+p]
9  H33=["0.4385" "2.573" 0; "0.004999" "1.901" 1+p; 0 "0.4385" "2.573"]
10 H22=[0.4385 2.573; 0.004999 1.901]
11 det(H44)
12 det(H33)
13 det(H22)

14 H44=["0.4385" "2.573" 0 0; "0.004999" "1.901" "0.05547"*p 0; 0 "0.4385" "2.573" 0; 0 "0.004999" "1.901" "0.05547"*p]
15 H33=["0.4385" "2.573" 0; "0.004999" "1.901" "0.05547"*p; 0 "0.4385" "2.573"]
16 H22=[0.4385 2.573; 0.004999 1.901]
17 det(H44)
18 det(H33)
19 det(H22)

```

$$\begin{aligned}
 &H44 = \begin{pmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 & 0 \\ 0.004999 & 1.901 & 0.05547 p + 1 & 0 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0 & 0.004999 & 1.901 & 0.5547 p + 1 \end{pmatrix} \\
 &H33 = \begin{pmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0.004999 & 1.901 & 0.05547 p + 1 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 \end{pmatrix} \\
 &H22 = 2 \times 2 \\
 &\quad \begin{matrix} 0.4385 & 2.5730 \\ 0.0050 & 1.9010 \end{matrix} \\
 &ans = -0.00591637273724025 p^2 + 1.0540507641968463 p + 1.919445935829 \\
 &ans = 1.919445935829 - 0.0106658964075 p \\
 &ans = 0.8207 \\
 &H44 = \begin{pmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 & 0 \\ 0.004999 & 1.901 & p + 1 & 0 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0 & 0.004999 & 1.901 & p + 1 \end{pmatrix} \\
 &H33 = \begin{pmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0.004999 & 1.901 & p + 1 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 \end{pmatrix} \\
 &H22 = 2 \times 2 \\
 &\quad \begin{matrix} 0.4385 & 2.5730 \\ 0.0050 & 1.9010 \end{matrix} \\
 &ans = -0.19228225 p^2 + 1.727163685829 p + 1.919445935829 \\
 &ans = 1.919445935829 - 0.19228225 p \\
 &ans = 0.8207 \\
 &H44 = \begin{pmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 & 0 \\ 0.004999 & 1.901 & 0.05547 p & 0 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0 & 0.004999 & 1.901 & 0.05547 p \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Продолжение листинга определения матриц:

$$H33 = \begin{pmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0.004999 & 1.901 & p+1 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 \end{pmatrix}$$

$$H22 = 2 \times 2 \begin{pmatrix} 0.4385 & 2.5730 \\ 0.0050 & 1.9010 \end{pmatrix}$$

$$\text{ans} = -0.19228225 p^2 + 1.727163685829 p + 1.919445935829$$

$$\text{ans} = 1.919445935829 - 0.19228225 p$$

$$\text{ans} = 0.8207$$

$$H44 = \begin{pmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 & 0 \\ 0.004999 & 1.901 & 0.05547 p & 0 \\ 0 & 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0 & 0.004999 & 1.901 & 0.05547 p \end{pmatrix}$$

$$H33 = \begin{pmatrix} 0.4385 & 2.573 & 0 \\ 0.004999 & 1.901 & 0.05547 p \\ 0 & 0.4385 & 2.573 \end{pmatrix}$$

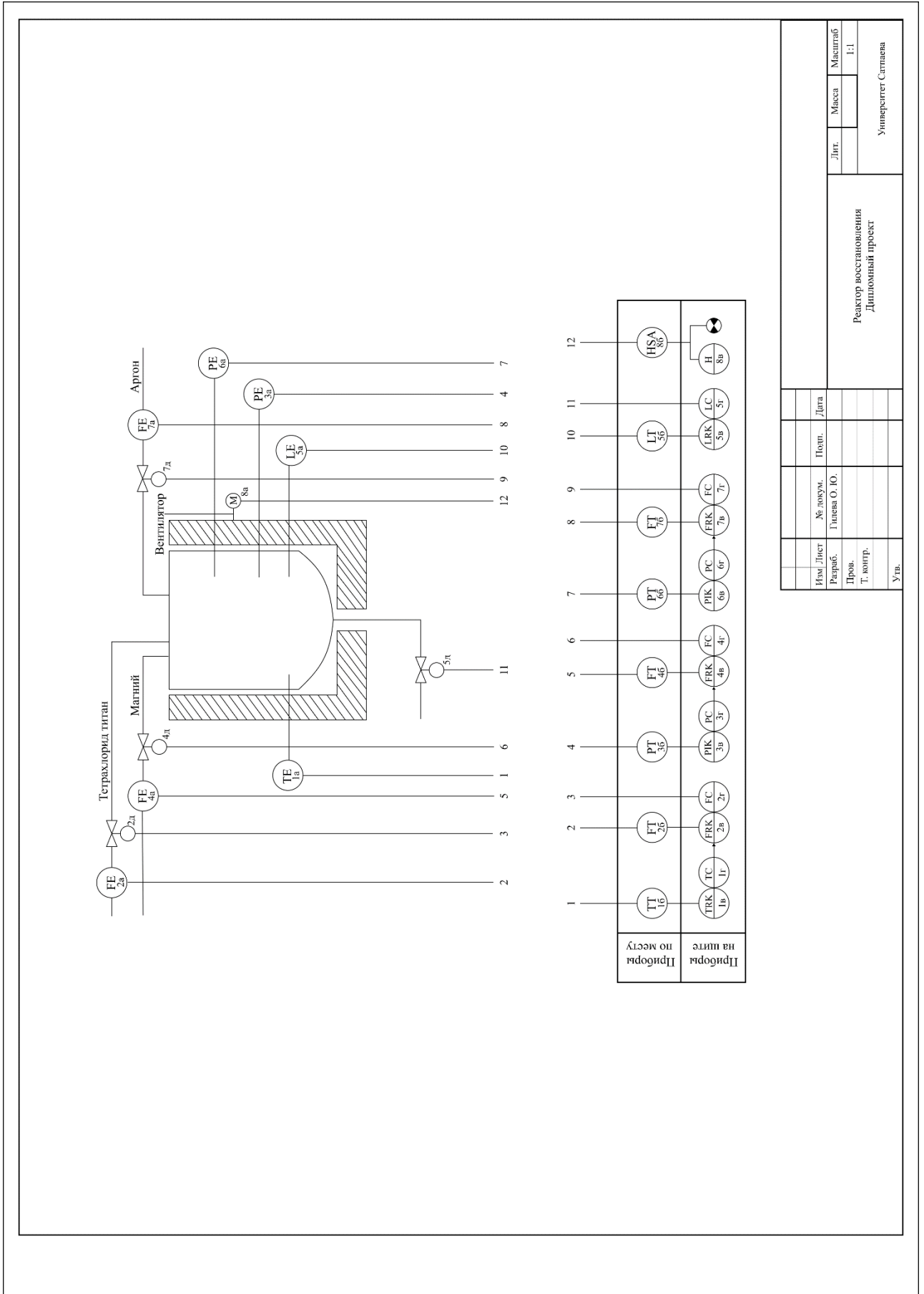
$$H22 = 2 \times 2 \begin{pmatrix} 0.4385 & 2.5730 \\ 0.0050 & 1.9010 \end{pmatrix}$$

$$\text{ans} = 0.11713756246793463 p - 0.000591637273724025 p^2$$

$$\text{ans} = 2.111728185829 - 0.0106658964075 p$$

$$\text{ans} = 0.8207$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



Изм.	Лист	№ докум.	Полп.	Дата
Резаб.	Г	И	Ю	
Пров.				
Т. контр.				
У/в.				

Реактор восстановления
Дипломный проект

Масса
Лит.
Масштаб
1:1
Университет Самсена

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Гилева О. Ю

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Автоматизация процесса восстановления тетрахлорид титана (на базе УТКМК)

Научный руководитель: Шамиль Кошимбаев

Коэффициент Подобия 1: 20.8

Коэффициент Подобия 2: 4.7

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 4

Интервалы: 0

Белые Знаки: 17

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, являются законными и не являются плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата

Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Гилева О. Ю

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Автоматизация процесса восстановления тетрахлорид титана (на базе УТКМК)

Научный руководитель: Шамиль Кошимбаев

Коэффициент Подобия 1: 20.8

Коэффициент Подобия 2: 4.7

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 4

Интервалы: 0

Белые Знаки: 17

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

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

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

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

Обоснование:

Дата

проверяющий эксперт