

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления

Мырзамуратов Азамат Аскарлович

**Информационное обеспечение АСУ металлургическим комплексом (цехом)
медного завода с использованием SCADA-системы**

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Специальность 5В070200 – Автоматизация и управление

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой АиУ
к.ф.-м.н., ассоц. профессор
Алдияров Н.А.
« 15 » мая 2022 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Информационное обеспечение АСУ металлургическим комплексом
(цехом) медного завода с использованием SCADA-системы»

По специальности: 5В070200 – Автоматизация и управление

Выполнил

Мырзамуратов А.А.

Рецензент
доктор техн. наук,
профессор

Биттеев Ш.Б.
(подпись)

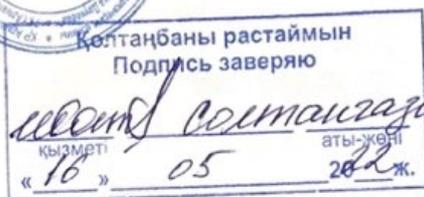
« 15 » 05 2022 г.



Научный руководитель
канд.техн. наук,
ассистент-профессор

Кошимбаев Ш.К.
(подпись)

« 15 » 05 2022 г.



Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления

5B070200 – Автоматизация и управление



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АиУ

к.ф.-м.н., ассоц. профессор

 Алдияров Н.А.

« 16 » 05 2022 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Обучающемуся Мырзамуратов А.А.

Тема «Информационное обеспечение АСУ металлургическим комплексом (цехом) медного завода с использованием SCADA-системы».

Утвержден Ученым советом института № 489-П/Ө от «24» декабря 2021 г.

Срок сдачи законченного проекта: «20» мая 2021 г.

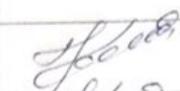
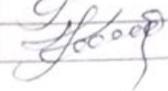
Исходные данные дипломной проекту: руководство для операторов технологического процесса в Жезказганском горно-металлургическом комбинате, техническая литература, данные преддипломной практики.

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов или краткое содержание дипломной работы: а) описание технологического процесса медного завода; б) исследование и синтез АСУ ТП системы управления печью; в) применение Smart-технологий (клонального алгоритма отбора) настройки типового регулятора АСУ ТП печи; г) сравнение полученного Smart-регулятора с рядом расчетных регуляторов.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): технологическая схема автоматизации системы управления печью; структурная схема; математические модели.

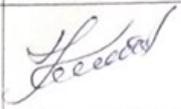
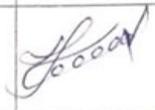
Рекомендуемая основная литература: техническая литература по автоматизации технологических процессов и математическому моделированию в металлургической промышленности из 14 наименований.

ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

| Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов | Сроки представления научному руководителю и консультантам | Примечание |
|--|---|--|
| Технологический раздел | 1 марта 2022 г. |  |
| Специальный раздел | 20 марта 2022 г. |  |

Подписи

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

| Наименования разделов | Научный руководитель, консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание) | Дата подписания | Подпись |
|------------------------|--|-----------------|--|
| Технологический раздел | к.т.н., ассистент-профессор Ш.К. Кошимбаев | 28.04.2022 |  |
| Специальный раздел | к.т.н., ассистент-профессор Ш.К. Кошимбаев | 28.04.2022 |  |
| Нормоконтролер | к.т.н., ассистент-профессор Н.С. Сарсенбаев | 12.05.2022 |  |

Научный руководитель  Кошимбаев Ш.К.

Задание принял к исполнению бакалавра, обучающийся  Мырзамуратов А.А.

Дата "25" января 2022 г.

АҢДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста металлургиялық кешеннің технологиялық процесін автоматты басқару жүйесін зерттеу міндеті қарастырылған. Бұл жұмыста металлургиялық кешеннің технологиялық процесінің сипаттамасы, ақпараттық қамтамасыз етудің сипаттамасы, электрмен балқыту және конверсиялау процестерін басқару, сонымен қатар технологиялық режимді бақылау сипатталады. Оңтайлы SCADA-жүйесі таңдалды, оның артықшылықтары мен кемшіліктері сипатталады.

Жұмыстың есептік бөлімінде пештің технологиялық процесін басқарудың автоматтандырылған жүйесін модельдеу жүргізілді. Пешті басқару жүйесін модельдеу нәтижелері алынды. Жүйенің тұрақтылығы, тұрақтылық шегі, сапаны тікелей және жанама бағалаулар анықталады. CLONALG пакетін қолдану арқылы жасанды иммундық жүйені таңдаудың клондық алгоритмі негізінде реттегіштің оңтайлы синтезі жүргізілді. Алынған контроллермен салыстыру үшін PI контроллерінің коэффициенттері Циглер-Никольс параметрлік әдісімен, MatLab Autotune контроллерін баптаумен және контроллерді қолмен баптаумен есептелді.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе рассматривается задача исследования автоматической системы управления технологического процесса металлургического комплекса. В данной работе приведено описание технологического процесса металлургического комплекса, описание информационного обеспечения, описание управления процессами электроплавки и конвертирования, а также управление технологическим режимом. Подобрана оптимальная SCADA–система, описаны её преимущества и недостатки.

В расчетной части работы произведено моделирование автоматизированной системы управления технологическим процессом печи. Были получены результаты моделирования системы управления печью. Определены устойчивости системы, запас устойчивости, прямые и косвенные оценки качества. На основе клонального алгоритма отбора искусственных иммунных систем с использованием пакета CLONALG выполнен оптимальный синтез регулятора. Для сравнения с полученным регулятором рассчитаны коэффициенты PI–регулятора параметрическим методом Циглера–Никольса, настройка регулятора MatLab Autotune, и настройка регулятора вручную.

ANNOTATION

In this thesis, the task of studying the automatic control system of the technological process of the metallurgical complex is considered. This paper provides a description of the technological process of the metallurgical complex, a description of information support, a description of the control of the processes of electric smelting and converting, as well as control of the technological regime. The optimal SCADA-system is selected, its advantages and disadvantages are described.

In the calculation part of the work, modeling of the automated control system for the technological process of the furnace was carried out. The results of simulation of the furnace control system were obtained. The stability of the system, the margin of stability, direct and indirect quality assessments are determined. Based on the clonal algorithm for the selection of artificial immune systems using the CLONALG package, the optimal synthesis of the regulator was performed. For comparison with the resulting controller, the coefficients of the PI controller were calculated by the Ziegler–Nichols parametric method, the MatLab Autotune controller tuning, and the controller tuning manually.

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|-----|--|----|
| | Введение | 9 |
| 1 | Управление технологическим процессом металлургического комплекса и описание информационного обеспечения | 10 |
| 1.1 | Описание функционирования автоматизированной системы управления технологическим комплексом металлургического комплекса | 10 |
| 1.2 | Характеристика электроплавки медных концентратов | 14 |
| 1.3 | Управление процессом электроплавки медных концентратов | 15 |
| 1.4 | Управление технологическим режимом | 16 |
| 1.5 | Управление процессом конвертирования | 16 |
| 1.6 | Информационное обеспечение | 18 |
| 1.7 | Experion Process Knowledge System (PKS), как наиболее подходящая SCADA–система | 20 |
| 2 | Расчётная часть | 26 |
| 2.1 | Описание, разбор структурной схемы и получение математической модели АСУ ТП печи | 26 |
| 2.2 | Исследование динамических свойств АСУ ТП электропечи. | 31 |
| 2.3 | Оценки качества переходного процесса АСУ ТП электропечи | 35 |
| 2.4 | Синтез регулятора системы управления печью на основе различных методов | 40 |
| | Заключение | 55 |
| | Список использованной литературы | 57 |
| | Приложение А | 58 |
| | Приложение Б | 59 |
| | Приложение В | 60 |

ВВЕДЕНИЕ

Из года в год стремительное развитие страны привело к высокому росту потребности металлургических материалов и металлургических изделий. Данный рост потребности вынуждает металлургические комплексы расширяться и преумножать свои производства. Из всего металлургического комплекса большая доля производительности выпала на медный завод. Медная промышленность в Республике Казахстан показывает интенсивный рост, доказательством тому можно привести статистические данные с 1990 года по 2019 год добытая медная руда увеличилась с 38,56 миллионов до 119,73 миллионов тонн, иными словами рост добычи увеличился в 3,1 раз. Понимание того, что расширение медного завода, требует обновлений и установки современных технологий, в том числе автоматизированных систем управления. Для контроля автоматизированных систем управления современный комплекс или завод требует информационное обеспечение автоматизированных систем управления с использованием SCADA-системы.

Общая характеристика. Данная дипломная работа содержит два раздела: технологическая часть, расчетная часть и дополнительная часть.

В технологической части описывается полное функционирование автоматизированная система управления медного завода, информационное обеспечение металлургического комплекса и подобрана SCADA-система для информационного обеспечения автоматизированной системы управления металлургического комплекса.

В технологической части исследовалась оптимизация целевой функции методом искусственных иммунных систем, вычислены математические модели, произведён анализ динамических свойств, синтез интеллектуального PI-регулятора и регуляторов, вычисленных параметрическим методом для АСУ ТП печи металлургического комплекса.

Цель работы. Исследование информационного обеспечения металлургическим комплексом медного завода с использованием SCADA-системы.

Актуальность. Актуальность заключается в том, что с каждым годом идёт интенсивный рост потребности металлургических материалов и изделий, металлургические комплексы вынуждены расширяться и увеличивать свои производства, а для качественной работы и управления необходимо информационное обеспечение, в частности для этого применяют SCADA-системы.

Задачи для выполнения. Необходимо исследовать медный завод, провести анализ системы управления, оптимизировать отдел электроплавки для лучшего информационного обеспечения.

Используемые методы. Основными методами являются математическое моделирование объектов автоматизации, линейные системы автоматического регулирования, оптимизация системы с помощью различных методов.

1 УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И ОПИСАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

1.1 Описание функционирования автоматизированной системы управления технологическим комплексом металлургического комплекса

Информационное и алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы управления технологическим комплексом в соответствии с представленными данными будут описаны позже, но следует отметить, что основой алгоритмического обеспечения являются математические модели объектов и алгоритмы управления. Математические модели имея неполную информацию об объекте управления максимально приближенно прогнозируют и выдают адаптивное, обеспечивающее работоспособность и функционирование системы управленческое решение. В свою очередь алгоритмы управления гарантируют поиск и поддержание наиболее оптимальных режимов работы объектов управления. В данном подразделе описано функционирование АСУ ТП МК по подсистемам управления металлургическим цехом, то есть управления процессами электроплавки и конвертирования.

Подсистема управления металлургическим комплексом. Систему подключает к работе оператор за сутки перед началом смены или в любое другое время при необходимости с целью устранения неполадок, возникающего в процессе работы комплекса:

- количество агрегатов, находящиеся в работе;
- общие нормативные характеристики;
- плановые задания;
- качественные и количественные характеристики сырья;
- технологические и другие ограничения;
- график ППР основного оборудования;
- состояние;
- состояние процесса в агрегатах на начальный момент графика.

На основе введенной исходной информации в соответствии с алгоритмом работ системы осуществляется формирование оптимальных графиков печного (ПО) и конверторного (КО) отделений. При этом используются методы теории расписаний, математические модели объектов и эвристические процедуры получения оптимального расписания.

Оптимальные план-графики работы ПО и КО выводятся в виде бланков установленной формы и передаются на участки для исполнения сменным мастером.

Копия выданного план-графика работы КО хранится в оперативной памяти и используется при решении задачи формирования оптимального графика конвертированной плавки.

На основе информации, полученной в результате формирования, план-графика работы КО и содержащий следующие позиции для каждой плавки:

- время начала и окончания периодов процесса;
- количество загруженного штейна;
- количество флюсовой руды;
- средний расход воздуха в каждом периоде плавки, данная задача формирует оптимальный график для всех плавков, перечисленных в план-графике работы КО.

При этом используются методы нелинейного программирования и математические модели процесса конвертирования для соответствующих конверторов.

Сформированный оптимальный график плавки содержит информацию для каждой из продувок первого и второго периодов:

- время и начала окончания;
- количество загруженного штейна;
- количество загруженной руды;
- количество загруженного воздуха дутья;
- средний расход дутья;
- количество слитого шлака.

Таким образом, задача формирует такой график плавки, который обеспечивает переработку заданного количества штейна в заданное на плавку время с минимальным количеством меди в конвертированных шлаках, получаемых в цело за плавку, при стабилизации температуры расплава в конверторе и содержания кремнезема в шлаках около заданных значений.

Полученный график выдается в виде бланка установленной формы и передается на участок старшим конверторщикам для реализации.

Информация, полученная в результате формирования графиков плавков, сохраняется и используется при формировании плана-заявки на выдачу штейна.

Данная задача на основе информации о времени начала каждой продувки всех плавков планируемого периода с учетом ППР и периодов снижения нагрузки на электропечах формирует упорядоченную последовательность моментов выдачи штейна печным отделением с указанием принадлежности выдаваемого ковша штейна агрегату конверторного участка.

Сформированный план-заявка на выдачу штейна выводится в виде бланка установленной формы и передаются на печной участок сменному мастеру для реализации [1].

Подсистема управления процессом электроплавки. Оптимальное управление технологическим режимом процесса электроплавки определяется с помощью определения химического состава и расхода входных материальных потоков на каждую печь, которые минимизируют потери меди с отвальными шлаками. Так как данная задача является сложной, она разделена на две подзадачи:

- определение оптимального состава на интервал его закладки;

– распределение материальных потоков по электропечам и определение количества химического состава подшихтовых материалов.

В отличие от второй подзадачи первая не требует ежедневного решения перед началом каждой смены, а решается с интервалом от одного до шести суток при закладке штабеля. Для решения задач необходима актуальная информация поступающих с датчиков, которую непрерывно собирает система управления. И решаются они благодаря полученным математическим моделям процесса электроплавки, критериям управления и ограничениям. Полученные решения выдаются сменным мастерам БЦПШ и электропечного отделения в виде задания.

Существует задача оптимизации энергетического режима, которая включает в себя определение управлений по фазным напряжениям и проводимости расплава под электродами. Смысл задачи заключается в минимизации содержания ценных компонентов в отвальном шлаке и удельного расхода электроэнергии на плавку при заданных значениях плава. Решение к этой задаче осуществляется с помощью серийных технических средств автоматики и вычислительной техники. То есть основой для решения этой задачи являются математические модели процесса электроплавки, ограничения на управляющие и входные переменные и критерии оптимизации.

Для работоспособности системы необходимо решение нескольких подзадач:

- оптимальное управление энергетическим режимом процесса электроплавки;
- цифровое управление заглублением электродов в электропечах;
- создание информационной базы системы.

В приоритете являются задачи создания информационной базы системы и цифрового управления заглублением электродов в электропечах.

Создание информационной базы системы заключается в централизованном контроле и включает в себя сбор информации о параметрах математической модели, штейна и чаш выпущенного отвального шлака, химическом составе загружаемых в печь, а также заданных допустимых значениях электрических и технологических параметров. Подзадача централизованного контроля включается операционной системой каждый час.

Расчет проводимостей расплава под электродами и сравнение с полученным заданием оптимального управления осуществляется алгоритмом обработки аналоговых сигналов в процессе создания первичных информационных массивов.

При запуске задачи оптимального управления энергетическим режимом процесса электроплавки последовательно выполняются операции:

- расчет электрических и технологических переменных, которая включает в себя:

1. Количество электроэнергии, потребляемое печью;
2. Общая мощность печи;
3. Проплав материалов в зоне каждого электрода;
4. Фазные напряжения.

- расчет управления материального баланса печи;
- адаптацию математических моделей, с помощью вероятных итеративных алгоритмов;
- расчет оптимальных управляющих переменных, с помощью универсальных алгоритмов оптимизации;
- выдачу оптимальных значений проводимостей расплава под электродами;
- выдачу оптимальных значений фазных напряжений для реализации вручную на щите.

Существует регистрация периодическая и по отклонению. Регистрируются текущие, интегрированные и усреднённые значения расхода шихты, содержание меди в штейне, удельный расход электроэнергии, содержание меди в отвальном шлаке и т.п.

Подсистема управления процессом конвертирования. Подсистема в основном предназначена для:

- предоставления актуальной информации оперативному персоналу. Информация о технологических переменных процесса конвертирования, которые невозможно измерить доступными в настоящее время средствами контроля. То есть такие переменные как, количество руды загруженном с начала продувки, информация о фактическом среднем расходе дутья с начала продувки и заданном расходе дутья;

- выдачи команд и рекомендации по управлению процессом. Исходная информация способствует функционированию подсистемы, она поступает в виде позиционных и аналоговых сигналов от датчиков, также дискретных сигналов. Без данной информации работоспособность подсистемы невозможна [2].

Конвертор работает циклически, то есть после окончания очередной плавки подсистема подготавливается к управлению процессом следующей плавки, обнуляет информационные массивы (количество руды дутья, загруженного штейна) связанные с предыдущей плавкой. Это необходимо для точной адаптации математической модели для следующей плавки, а для этого необходимо интегрировать новые данные в массив.

Как только поступают сигналы «Рабочее положение конвертора» и «Расходы дутья» начинается управление процессом конвертирования. Далее из графика плавки считываются данные заданные на первую продувку количества дутья и руды средний на продувку, расход дутья и длительность продувки. Данные дискретных сигналов и периодического опроса и данные инициативных сигналов непрерывно обрабатываются, и информация интегрируется в рабочие массивы. После начала продувки первые пять минут выбирается программа управления, которая, основываясь математическую модель и имеющуюся информацию процесса выдаёт:

– вычисления переменных текущего состояния процесса, недоступных для измерения, это температура массы шлака в ванне конвертора, количество, химический состав и т.п.;

– анализ текущего состояния процесса, принятие решений на основе анализа и проведение определенных технологических операции или принятие решения на прекращение либо продолжение продувки.

Если решается продолжить продувку, то на последующие 5 минут рассчитывается какое количество руды необходимо загрузить и средний расход дутья. Расчет происходит на основе математической модели процесса и программной оптимизации. Условиями оптимизации являются содержание кремнезема в шлаке и минимизация отклонения от заданной значений температуры процесса. В итоге вычислений, полученные значения расходов руды и дутья вводятся в табло на пульте управления конвертором.

По мере необходимости, можно вывести на индикационное табло пульта управления информацию о текущем состоянии процесса, для этого нужно участие оператора. Управление процессом второй продувки начинает при поступлении сигналов «рабочее положение конвертора» и «расход сырья», то есть естественно после завершения первой продувки и слива шлака. Во время второй продувки выполняется те же операции, что и во время первой продувки, так как считывающийся задание из графика плавки одинаковы. И так подсистема работает до момента получения чистой черной меди, если описать вкратце, то после окончания плавки происходит подготовка подсистемы к следующей плавке и так циклическая работа до получения поставленного результата.

1.2 Характеристика электроплавки медных концентратов

Процесс электроплавки в технологической цепи металлургического производства меди является непосредственно важным звеном, так как в основном именно это звено определяет протекание процессов в последующих пределах. Для электроплавки используется гранулированная шихта, которая характеризуется влажностью, гранулометрическим, химическим, минералогическим составами и т.д. Шихта состоит из отборных материалов, концентратов и флюсов, в нашем случае гранулированная шихта, которую загружают в основные и вспомогательные бункера печи состоит из 32-35% окиси кальция, 26-30% меди, 24-29% двуокиси кремния, 10-13% серы и 7-10% железа. Из бункера печи материал поступает в ванну печи, и вокруг электродов образуются откосы шихты. В ванну электропечи промежутками времени сливают жидкий конверторный шлак в качестве отборного материала, потому что он оказывает значительное воздействие на процесс шлакообразования и является источником магнетитовых настывей на лещади печи. В печи плавят штейн, содержащий 50-55% меди и отвальный шлак, содержащий 10-15% железа, 14-20% оксида кальция и 50-55% диоксида кремния.

В зависимости от состояния плавания и потребности конверторного отделения через шпурсы печи производится выпуск штейна. Также по мере накопления и поддержания заданного уровня шлака в шлаковые чаши выпускается отвальный шлак. От теплового и технологического режимов плавки с отвальным шлаком существует вероятность потери до 1% меди шихты. По некоторым исследованиям в отвальных шлаках содержится медь в форме механической взвеси и в растворённом состоянии, а концентрация определяется содержанием меди в штейне или химическим составом шлаков. Печь имеет шесть электродов, которые разделены по два электрода питаются от одного однофазного трансформатора. То есть три однофазных трансформатора преобразуют ток высокого напряжения 35000 вольт в рабочий ток низкого напряжения до 500 вольт. Электроплавку медных концентратов по существующей классификации электротермических печей относят к многошаговым процессам.

В тепловых ваннах в шлаковом слое электрическая энергия преобразуется в тепловую. Под тепловой энергией рассматривают электротермическую печь с толстым шлаковым слоем. В печь подводят электроэнергию через электроды в шлаковом слое.

Деформация шлаков, в частности, вязкости, осуществляют незначительное влияние для коррекции параметров температурного поля. Первичными параметрами электротермических печей являются электрическое сопротивление печи на единицу электрода и интенсивность смешивания получаемого расплава под воздействием конвективных и электромагнитных сил.

1.3 Управление процессом электроплавки медных концентратов

Рециклинг сырья и выпуск штейна при определенных заданных показателях штейна и отвального шлака с учетом обеспечения лучших технико-экономических данных процесса является главной задачей электропечного отделения на сутки.

Основным критерием оценивания состава штейна, является содержание серы и меди. Существуют определенные условия удельного веса, температуры плавления, доли от веса шихты и вязкости к чему должен удовлетворять отвальный шлак. Процесс электроплавки осуществляется оператором и технологом, они выбирают и приводят в действие технологический и энергетический режим плавки. Энергетическим режимом печи управляют и дают оценку теплового состояния печи мастера. Благодаря локальным системам автоматического регулирования мощности печи реализуется электрический режим печи.

На рисунке 1.1 изображен процесс электроплавки с входными и выходными параметрами.

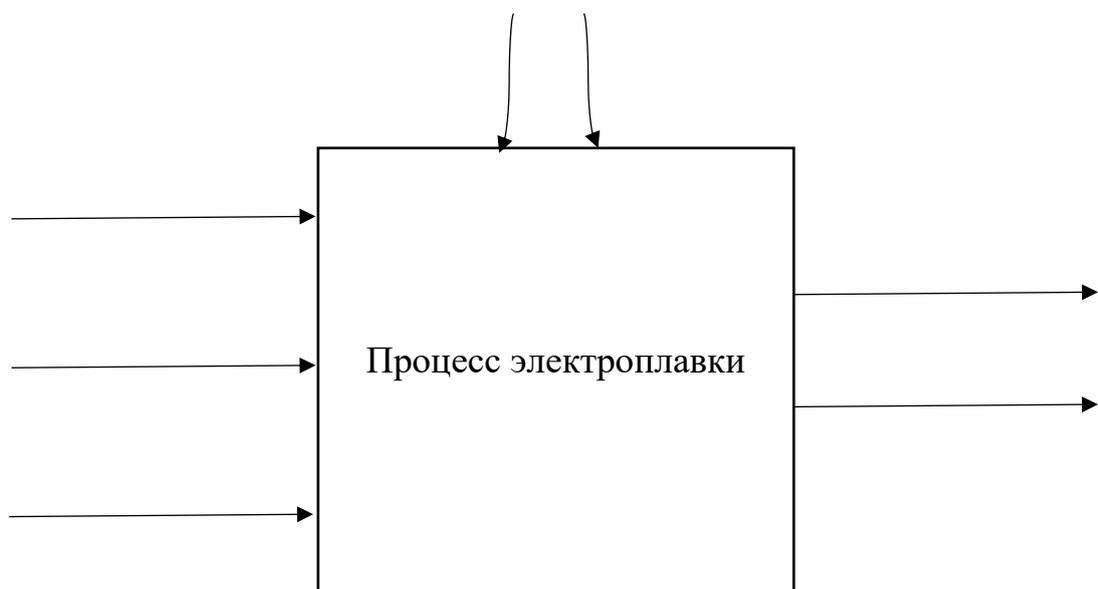


Рисунок 1.1 – Процесс электроплавки с входными и выходными параметрами

Сложное управление электроплавкой возникает из-за наличия большого количества входных и выходных данных. Здесь возникает вторая проблема, это отклонение переменных от начального технологического режима, рост потерь меди с отвальными шлаками, колебания химического состава штейна, увеличение энергозатрат [3].

1.4 Управление технологическим режимом

Количественные и качественные характеристики штейна и отвального шлака выражаются как входной поток данных, которые как раз-таки определяет технологический режим электроплавки. Также технологический режим электроплавки имеет существенное воздействие на технико-экономические показатели процесса.

От формы разделения продуктов плавки, от химического состава шихты, поступающей в печь и от взаимодействия физических и химических процессов её составляющих при плавке зависят необходимость стабилизации состава для нормального конвертирования, потеря ценных металлов с отвальными шлаками, энергетические затраты на процесс. Также химический состав определяет жидкую текучесть шлака, электропроводность и вязкость, которые являются существенным для процесса параметром.

Соотношением и химическим составом материальных потоков, как известняк, пирит, гранула и т.д., определяют химический состав шихты. Гранул составляет 75-79% шихты и является основным элементов в химическом составе.

Задачу управления технологическим режимом электроплавки делят на две, и они должны решаться в разных временных интервалах:

- определение оптимального состава (занимает в среднем 5 суток);
- оперативное разделение потоков по печам, которая определяет оптимальные расходы подшихтовой смеси и гранул.

Задача решается на основе математической модели комплекса «шихта, черновая медь», которая определяет связь качественных характеристик продуктов плавки на отделение с составом шихты, а также формализуется задачей нелинейного программирования.

1.5 Управление процессом конвертирования

По результатам исследований, проведенных с медеплавильными производствами в ряде небольшого анализа, можно увидеть, что значительное влияние на технические и экономические показатели производства осуществляет технологическая обратная связь по конверторному шлаку. То есть от количества меди в конверторном шлаке зависит добыча меди по металлургическому цеху.

От содержания кремнезёма в шлаке, содержания меди в конверторной массе и температуры шлака зависит содержание меди в шлаке. На продолжительность или работоспособность конвертора существенно влияют скорость изменения температуры, температура расплава в ванне и содержание кремнезёма в шлаке, так как они влияют на износ огнеупорной кладки. Опираясь на вышеописанную информацию, нельзя не отметить её важность, благодаря чему определяются необходимость управления и контроля в процессе продувки температуры расплава.

Степень обогащения массы меди в продувке определяет количество шлака за продувку и содержание меди в шлаке. От неё зависит количество меди в конверторном шлаке за плавку и температура расплава в течении плавки. За организованную работу технологических агрегатов и плавку определенного количества черновой меди определяется необходимость управления, иными словами составление графика, поочередностью продувок конвертора с определением времени продувки, расхода и количества перерабатываемых материалов на каждую продувку.

Опираясь на вышеописанное, возникают две задачи, это управление конверторной плавкой и управление процессом в ходе продувки.

Для решения задачи с управлением конверторной плавкой необходимо определить конструктивные и технологические ограничения, расход руды и дутья на определенный интервал управления, учесть отклонения от заданных значений температуры расплава, расхода дутья и содержания кремнезёма в шлаке.

Для решения задачи с управлением процесса в ходе продувки нужно определить график конверторной плавки, которая фиксирует длительность продувки, количество руды, штейна и средний расход дутья на продувку, учесть

количество меди в шлаке и отклонение от определенных параметров содержания кремнезёма в шлаке и температуры расплава [4].

1.6 Информационное обеспечение

На рисунке 1.2 показаны виды обеспечения АСУ ТП.



Рисунок 1.2 – Виды обеспечения АСУ ТП

Так как мы рассматриваем информационное обеспечение АСУ, опишем её подробнее. Информационное обеспечение выражается, как единая система шифрования и разделения информации, включающая в себя информационные массивы и систему документации. В свою очередь, информационное обеспечение автоматизированных систем управления формируется описанием информации, обрабатываемой и хранимой в системе.

В автоматизации систем управления технологических производств важнейшая ответственность полагается на отображении информации, которая описывает теоретические и физические сущности благодаря описанию их отношений или свойств. Принципы системного подхода информационного обеспечения:

- создание внутри машинной единой информационной базы по отношению к автоматизированной системе управления технологическим производством;
- реализация передачи данных между оперативным и системным персоналом, и внесение корректировок в информационную базу;
- отвязка времени решения и количества решаемых задач от одноразового ввода данных;
- реализация единой внутрисистемной схемы обеспечения и хранения задач исходными данными;

– создание возможности динамического способа формирования информационной базы;

Основываясь на вышеперечисленные принципы, можно увидеть, что основными задачами информационного обеспечения учитывая взаимосвязь с иными видами обеспечения работоспособности системы являются: состав и структура информации, определение информационного представления процессов, создание установленного стандартами словаря для обозначения свойств объектов [5].

Состав информационного обеспечения. Машинная информационная база данных является важнейшей составляющей информационной базы автоматизированной системы управления технологическими производствами металлургического комплекса. В состав машинной информационной базы для нашего металлургического цеха входит:

- объекты телемеханизации для обмена данными с PLC контроллерами;
- PLC контроллеры;
- волоконно-оптические линии связи и его оборудование;
- ethernet, для кабельной связи;
- коммутаторы и концентраторы;
- отделение электроплавки для хранения, визуализации и обработки информации;
- отделение конвертирования для хранения, визуализации и обработки информации;
- отделение огневого рафинирования для хранения, визуализации и обработки информации.

Отделения электроплавки, конвертирования и огневого рафинирования называют АРМ диспетчерские, где хранится вся телемеханическая информация, как текущая, так и архивная.

Информационное обеспечение всегда работают на базе SCADA систем, и предназначаются для сбора данных, визуализации контролируемых параметров и оперативного диспетчерского управления. Вся информация приходит в специализированные диспетчерские, которые уже оснащены SCADA системами. В основном SCADA состоит из двух видов данных: конфигурационные данные и совокупность данных о состоянии объекта.

Конфигурационные данные. Конфигурационные данные содержат информацию не только о модели объекта телемеханизации, но и о сетевой конфигурации информационной программным и техническим комплексом. Объект телемеханизации включает в себя набор визуальных форм, состав и свойства сигналов и т.п. В конфигурационных файлах подсистема АСУТП фиксируются такие конфигурационная информация о модели объекта как: подсистема сбора данных, подсистема отображения динамики процессов, подсистема визуализации, подсистема доступа в АСУ ТП, подсистема архивирования и подсистема сигнализации.

Для того, чтобы настроить параметры используют визуальный интерфейс. При наличии доступа визуальный интерфейс позволяет конфигурировать АСУ ТП в процессе эксплуатации, не полагаясь на помощь системных разработчиков.

Также существует другая часть конфигурационных данных, к которым имеет доступ только администраторы операционной системы. Эти данные хранятся в системных файлах операционной системы [6].

Данные о состоянии объекта. Информация о текущем состоянии и истории функционирования объекта содержится в данных о состоянии объекта.

Система обрабатывает и передаёт информацию о сигналах в трех видах:

- данные о мгновенных значениях, то есть значения параметров в данный момент;

- данные исторических значений, другими словами, значения параметров за определенный длительный промежуток;

- данные в архивированных значениях на съемных носителях.

База данных мгновенных значений реализована в виде тегов подсистемы сбора информации с контроллера телемеханики, где тег включает в себя имя сигнала, признак использования тега, тип, значение и диапазон. Теги могут использоваться как для получения, так и для передачи значений в контроллер. Отсюда становится известно, что количество значений сигналов на прямую зависит от количества используемых контроллеров и от протокола обмена данными. Система регистрирует параметры, которые возникли при циклическом обновлении и опросе датчиков, далее записывает обновленные значения в контроллеры. При этом количество параметров и состав описывается в массиве информации.

База данных исторических значений содержат старые сообщения и данные о действиях персонала, и даже значения сигналов. База данных исторических значений создается на основе мгновенных значений, которые со временем становятся неактуальными. Исторические значения реализуются на таблицах и в файлах базы данных SCADA. На основном диске базы данных хранится информация за период от 3 до 12 месяцев. Раз в три месяца данные из таблицы базы данных копируются на съемный носитель информации. Актуальная суточная таблица фиксируется на внешней памяти при смене конфигурационных данных, которые влияют на сохранение информации по расчётным, аналоговым и дискретным сигналам или же на интерпретацию. Для продолжения работы и архивирования данных создается новая таблица и новая информация пишется туда.

Для подготовки ведомостей и протоколов подсистемами визуализации и печати используют таблицы протоколов. Они размещаются в базе данных исторических значений, пополняются по мере возникновения сообщений с отметкой времени в формате выбранной системой данных [7].

1.7 Experion Process Knowledge System (PKS), как наиболее подходящая SCADA–система

Распределенные системы управления (PCY) — это сложные системы, предназначенные для управления крупными промышленными процессами, включающие несколько контроллеров, устройств ввода-вывода и человеко-машинные интерфейсы (ЧМИ). Эти системы обычно используются на крупных предприятиях, где требуется высокая доступность и непрерывная работа.

На рисунке 1.3 показана как выглядит распределенная система управления Honeywell Experion PKS.

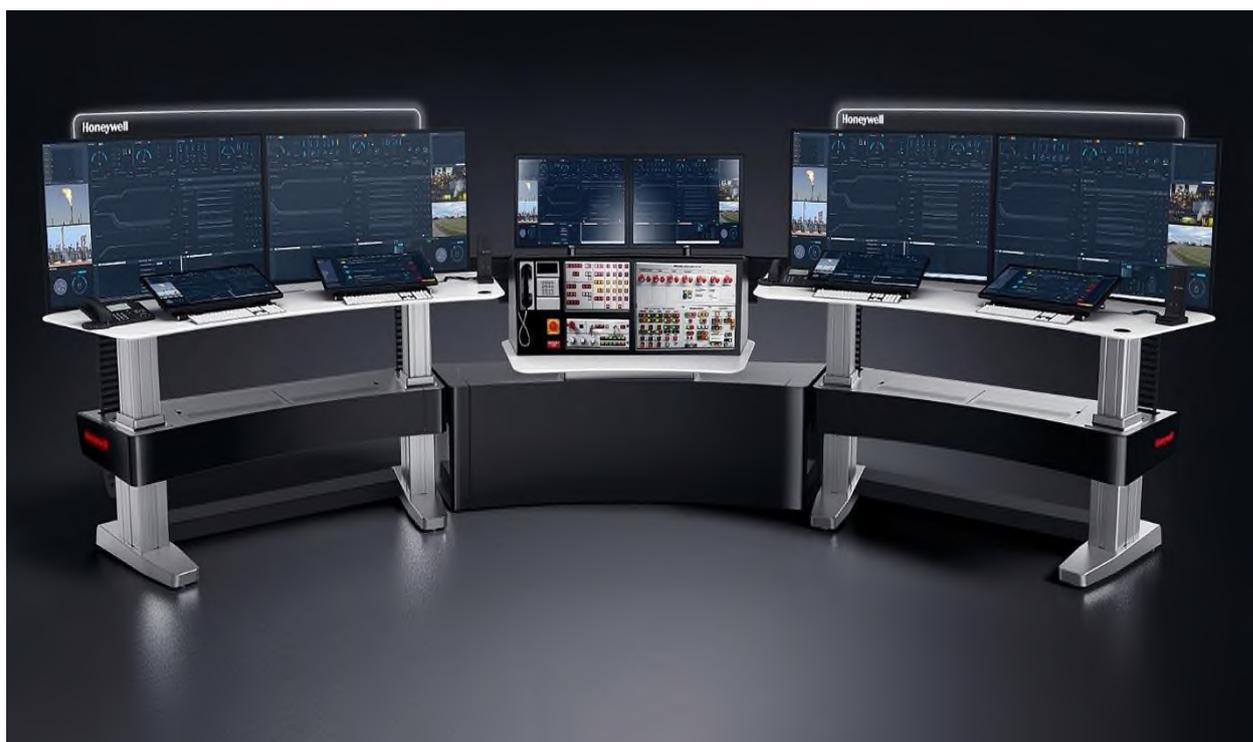


Рисунок 1.3 – Распределенные системы управления Honeywell Experion PKS

Honeywell Experion Process Knowledge System (PKS) — это открытое, интегрированное и гибкое решение, предназначенное для автоматизации крупных PCY и небольших производств, широко применяемая во всем мире и в различных отраслях, в зависимости от масштаба производства применяется HS/LS/PKS. Эта обширная платформа автоматизации интегрирует данные от контроллеров по всей среде, обеспечивая централизованное представление процессов в масштабе всего предприятия. В системе в основном используются контроллеры C200, C300 и ACE, которые можно запрограммировать с помощью Experion PKS Configuration Studio, программного обеспечения инженерной рабочей станции Honeywell. Логика, разработанная в виде блок-схем, затем

может быть загружена с инженерной рабочей станции в различные компоненты PCS.

Исследователи кибербезопасности часто рассматривают распределенные системы управления как черный ящик. Относительно мало уязвимостей DCS раскрыто, потому что оборудование трудно получить. Как и многие другие типы промышленного оборудования, его нельзя купить в Интернете, и его покупка и настройка могут быть чрезвычайно дорогими. Это часто происходит с промышленными системами управления и оборудованием SCADA, и это представляет собой значительный барьер для входа на рынок новых активных исследователей безопасности АСУ ТП, которые с гораздо большей вероятностью будут изучать товарное оборудование от ведущих поставщиков рынка [8].

На рисунке 1.4 изображен контроллер Honeywell Experion Process Knowledge System.



Рисунок 1.4 – Контроллер Honeywell Experion PKS

Техническое описание. Контроллеры и симуляторы Honeywell Experion PKS взаимодействуют с инженерным программным обеспечением Experion PKS Configuration Studio для целей программирования через TCP-порты 55553 и

55555. Эти порты используются для связи с программным пакетом Experion PKS Configuration Studio с использованием собственного инженерного протокола Honeywell. Одним из приложений в этом пакете является Honeywell Experion Control Builder (contbldr.exe), который отвечает за программирование логики, работающей в контроллере. На рисунке 1.5 показана скриншот Honeywell Experion PKS с процесса АСУ ТП.

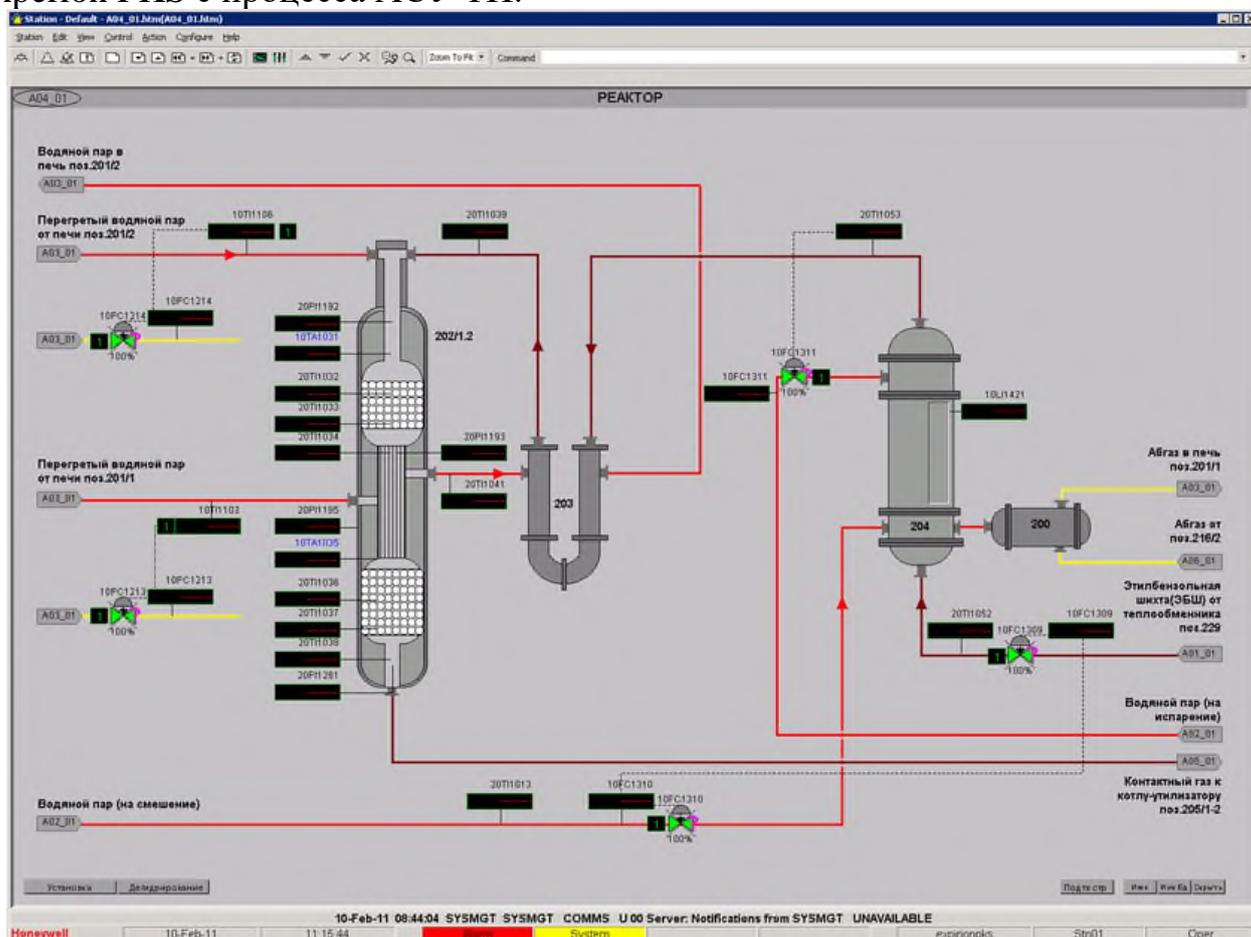


Рисунок 1.5 – скриншот главного экрана Honeywell Experion PKS

Как и в случае любого контроллера SCADA/DCS, можно изменить текущую логику, выполнив процедуру загрузки кода. В рамках этого механизма программное обеспечение Honeywell Experion Control Builder передает скомпилированную логику на устройство, а затем выполняет ее.

Стоит отметить, что логика компилируется в машинный код ЦП контроллера (например, байт-код x86), что может представлять угрозу безопасности. Обычно используется песочница или какой-либо другой тип контроля безопасности, который предотвращает выполнение собственного кода. В этом случае в Experion PKS отсутствует песочница, защита памяти или другие ограничения на вредоносный код перед его выполнением.

Песочницы, например, являются важнейшими элементами управления кибербезопасностью, особенно в домене ICS; исполняемые файлы выполняются в изолированной области, что ограничивает его возможности, такие как доступ

к системным ресурсам, до минимума. Они являются важным инструментом для предотвращения влияния непроверенного или ненадежного кода на процессы, а также для ограничения распространения вредоносных программ и эксплойтов, нацеленных на известные и неизвестные уязвимости.

Однако даже песочницы не всегда надежны. Ранее в этом году Team82 опубликовала исследование ПЛК Siemens SIMATIC, в котором были продемонстрированы уязвимости, позволяющие обходить защиту памяти в песочнице и запускать нативный код в защищенных областях памяти.

В случае с Experion PKS команда Team82 обнаружила, что можно имитировать процедуру загрузки кода и использовать эти запросы для загрузки произвольных файлов DLL/ELF (для симуляторов и контроллеров соответственно). Затем устройство загружает исполняемые файлы без выполнения проверок или очистки, что дает злоумышленнику возможность загружать исполняемые файлы и удаленно запускать неавторизованный собственный код без аутентификации.

Как правило, порты 55553 и 55555 не подключены к Интернету. Злоумышленнику придется найти другой способ закрепиться в сети ОТ, чтобы атаковать эти уязвимости. В таком сценарии две уязвимости, обнаруженные Team82, могут быть использованы для выполнения собственного кода без ограничений. Имея такой доступ к DCS, злоумышленник может серьезно нарушить работу, изменив значения процессов, или использовать DCS в качестве базы для запуска дальнейших атак на сеть с использованием вредоносных программ или эксплойтов.

На рисунке 1.6 показан скриншот Honeywell Experion PKS с процесса АСУ ТП печи.

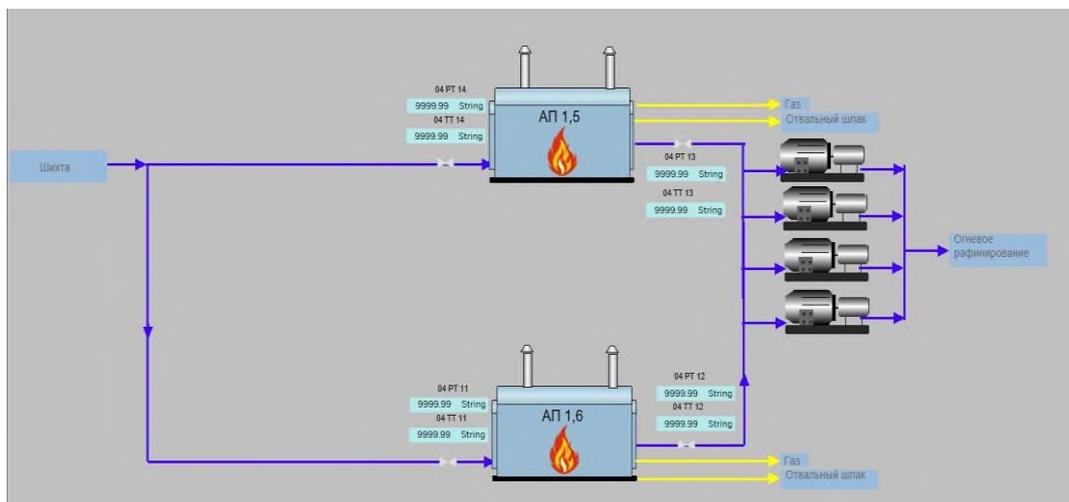


Рисунок 1.6 – скриншот системы Honeywell Experion PKS для АСУ ТП печи

Уязвимости. Библиотека компонентов управления (CCL) — это библиотека компонентов управления, которая загружается в контроллер для выполнения определенных функций. Мы можем думать о библиотеках CCL как о расширениях, которые позволяют разработчикам использовать специфичные

для приложения функции с внешними функциональными блоками, которые не поддерживаются стандартной библиотекой.

Формат SCL представляет собой оболочку для файлов DLL/ELF. Его первые четыре байта — это CRC32 исполняемого файла (DLL/ELF). Следующие 128 байт представляют собой имя библиотеки (обернутое нулями), а остальная часть файла представляет собой собственно обернутый файл DLL/ELF. Завернутые файлы DLL/ELF представляют собой библиотеки блочных кодов, используемые в программном обеспечении Control Builder. При анализе файлов SCL проверки безопасности, такие как проверка подписи или очистка имен библиотек, не выполняются. Таким образом, злоумышленник может выполнить атаку с обходом каталога и загрузить любые файлы DLL/ELF в произвольные места на удаленном контроллере.

Более того, в ходе нашего исследования мы обнаружили, что в некоторых случаях файлы SCL, отправляемые на конечные устройства, выполняются мгновенно, без выполнения проверок безопасности (например, проверки подписи). Протокол не требует аутентификации, что предотвратит выполнение действий загрузки неавторизованными пользователями. Поэтому любой злоумышленник может использовать эту функцию загрузки библиотеки для удаленного выполнения кода без аутентификации. Для этого злоумышленник может загрузить DLL/ELF по своему выбору в контроллер/симулятор с помощью протокола, и он будет мгновенно выполнен на конечном устройстве.

Преимущества и недостатки Honeywell Experion PKS. Одной из главных причин выбора именно Honeywell Experion PKS является то, что он имеет существенно весомые преимущества, а недостатки кажутся ничтожными на фоне преимуществ.

- преимуществами является:
- широкий спектр применения;
- большое количество интегрируемого оборудования;
- удобный интерфейс;
- возможность добавления различных софтов;
- создание и настройка виртуальных тегов;
- многоуровневая архитектура платформы;
- надежность и полнофункциональность;
- применение инновационных и программных решений.

В то время, как главным недостатком является очень дорогая цена, далеко не каждое предприятие может себе это позволить, но имея данную SCADA-систему предприятие лишает себя многих проблем и забот [9].

2 РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Описание, разбор структурной схемы и получение математической модели АСУ ТП печи

В исследуемом металлургическом комплексе, в процессе электроплавки используется шестиэлектродная руднотермическая электропечь, из чего получают чистый штейн. Разберемся с понятием шестиэлектродная руднотермическая электропечь, по-иному называется рудовосстановительная или электрическая дуговая печь, применяется в металлургии для черной и цветной меди, химической промышленности. Имеет возможность применения для производства кремния, силикомарганца и ферромарганца, разных видов ферросилиция, силикокальция, сплавов хрома, желтого фосфора и многих других видов материалов. Дуговая печь является очень популярной среди видов печи, особенно закрытые рудотермические электропечи. Мощность таких современных печей варьируется до 75-150 МВА. Существует несколько видов дуговой руднотермической печи, например: дуговая руднотермическая электропечь с уплотненными электродами, куда осуществляют подачу шихты через загрузочные труботочки; дуговая руднотермическая электропечь с ванной, в которую погружены уплотненные в своде электроды, осуществляется подача шихты через свод. Принцип работы дуговой руднотермической печи начинается с загрузки шихты в ванну через труботочки, при том, что конусы шихты появившиеся под труботочкой расположены от электродов на некотором расстоянии из-за наличия уплотнений электрод – свод, поверхность колошника понижается. Шихта, поступающая через труботочки поднимает уровень колошника, благодаря чему происходит эффективный теплообмен между горячим газом, которая поднимается из ванны и холодной шихтой, которая опускается из системы загрузки. Для повышения технико-экономических показателей, в частности снизить удельный расход электроэнергии увеличивают стойкость свода благодаря снижению температуры подсводового пространства. Для улучшения технологии сплава периодически в активную зону ванны подают корректирующие добавки через дополнительные труботочки. При различных технологических расстройках корректирующие добавки быстро приводят печь в нормализованное состояние, что позволяет удерживать от ненужных снижений удельного расхода электроэнергии. Печные газы не поступают в атмосферу, потому что труботочки уплотнены на своде.

На рисунке 2.1 изображена функциональная схема системы управления шестиэлектродная руднотермическая электропечь



Рисунок 2.1 – Функциональная схема системы управления шестиэлектродная руднотермическая электропечь

Описание автоматизированной системы управления технологическим производством печи и построение её функциональной схемы.

Шестиэлектродная руднотермическая электропечь (П) – электропечь, позволяющий плавить металл от тепла электрической дуги, которая горит между электродами или металлом и электродом.

Исполнительный двигатель (ИД) – механизм, функцией которого является непосредственное влияние на регулируемый орган, с помощью вариации электрического сигнала и углового перемещения вала.

Термометр сопротивления (ТС) – простейший датчик измерения температуры, функционирует на основе зависимости сопротивления металлов от температуры замеряемой среды.

Усилитель (У) – элемент, который повышает входной сигнал входной сигнал до поступления в исполнительный двигатель [10].

На рисунке 2.2 показана функциональная схема системы управления печью.



Рисунок 2.2– Функциональная схема системы управления печью

Передаточная функция АСУ ТП печи.

Печь:

$$\Delta\theta = \theta_3 - \theta, \tag{2.1}$$

$$T_0 \frac{d}{dt} \Delta\theta + \Delta\theta = k_0 * \mu - k * f. \tag{2.2}$$

Усилитель двигателя:

$$T_m * \frac{d}{dt} u_u + u_u = k_m * u_m. \quad (2.3)$$

Потенциометрический мост:

$$u_m = k_d * \theta. \quad (2.4)$$

Двигатель с использованием редуктора:

$$T_{дв} * \frac{d^2}{dt^2} \mu + \frac{d}{dt} \mu = k_{дв} * u_u. \quad (2.5)$$

где, θ – регулируемая температура печи;
 θ_3 – заданная температура печи;
 $\Delta\theta$ – отклонение температуры печи;
 u_0 – напряжение моста;
 u_m – выходное напряжение моста;
 μ – передвижение клапана;
 f – ошибка.

В таблице 2.1 приведены исходные данные для расчётов.

Таблица 2.1 – Таблица данных

| № | T_0 | k_0 | k_d | T_m | k_m | $T_{дв}$ | $k_{дв}$ |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
| СИ | С | см | см | С | см | С | см/Вс |
| 1 | 1.4 | 7.7 | 0.01 | 0.03 | 16 | 0.1 | 0.25 |

Подставив данные значения, можно вычислить звена передаточной функции печи.

Печь: (апериодическое звено первого порядка)

$$G_{п}(s) = \frac{k_0}{T_0 s + 1} = \frac{7.7}{1.4s + 1}. \quad (2.6)$$

Усилитель двигателя: (апериодическое звено первого порядка)

$$G_{у}(s) = \frac{k_m}{T_m s + 1} = \frac{16}{0.03s + 1}. \quad (2.7)$$

Потенциометрический мост: (пропорциональное звено)

$$G_M(s) = \frac{u_m}{\theta} = k_d = 0.01. \quad (2.8)$$

Двигатель с использованием редуктора: (звено интегрирования)

$$G_{ИД}(s) = \frac{k_{ДВ}}{T_{ДВ}s+1} = \frac{0.25}{0.1s+1}. \quad (2.9)$$

Составление структурной схемы замкнутой и разомкнутой системы управления печью (СУП).

Системой является множество элементов тесно связано между собой и функционируют для одной общей цели, система подразумевает в себя определённую целостность, в нашем случае системой является система управления печью. Для начало построим структурную схему разомкнутой системы управления печью, так как разомкнутая система управления является системой без обратной связи, где управление $u(t)$ зависит только от внешних воздействия и осуществляется без контроля результата. Чаще всего разомкнутые системы служат для минимизации зависимости выходной величины объекта от возмущающего воздействия с помощью изменения самого воздействия. То есть в разомкнутой системе управления задающее устройство не получает обратной связи о фактическом режиме работы системы, а замкнутая система управления характеризуется наличием обратной связи, и имеет информацию о выходном сигнале. От сюда можно сделать вывод, что именно в замкнутых системах применяются регуляторы, для корректной работы и управления системой автоматического регулирования [11].

На рисунке 2.3 показана структурная схема разомкнутой СУП.

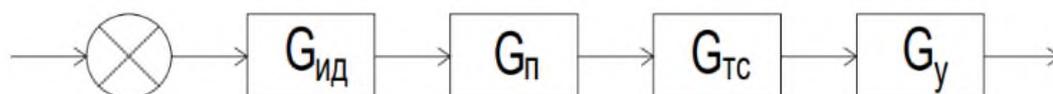


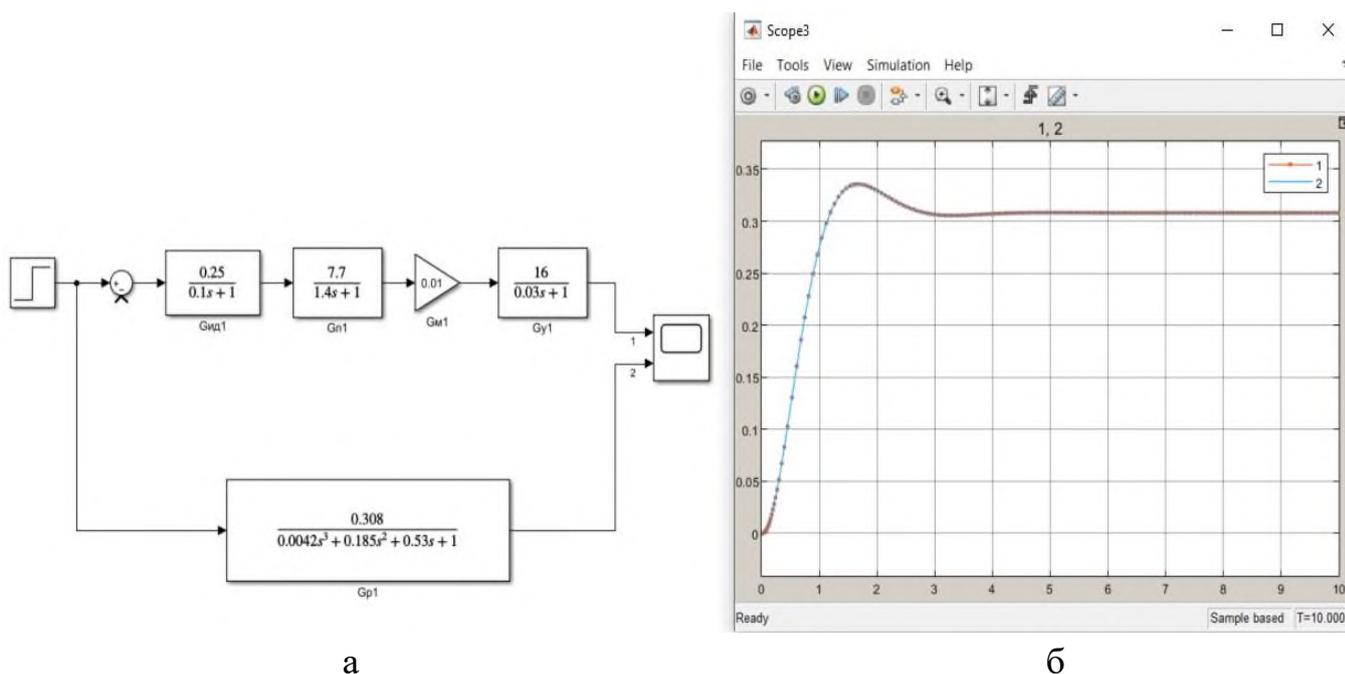
Рисунок 2.3 – Структурная схема разомкнутой СУП

Рассчитаем передаточную функцию разомкнутой системы опираясь на структурную схему:

$$G_p(s) = G_{ИД}(s) * G_{П}(s) * G_M(s) * G_У(s). \quad (2.10)$$

$$G_p(s) = \frac{0.25}{0.1s+1} * \frac{7.7}{1.4s+1} * 0.01 * \frac{16}{0.03s+1} = \frac{0.308}{0.0042s^3+0.185s^2+0.53s+1}. \quad (2.11)$$

На рисунке 2.4 показана структурная схема разомкнутой СУП и вычисленная передаточная функция, их сравнительный переходной процесс.



а) структурная схема; б) график переходного процесса
 Рисунок 2.4 – Переходной процесс разомкнутой СУП и вычисленной передаточной функции

Необходимо построить замкнутую систему управления печью.

На рисунке 2.5 показана структурная схема замкнутой СУП.

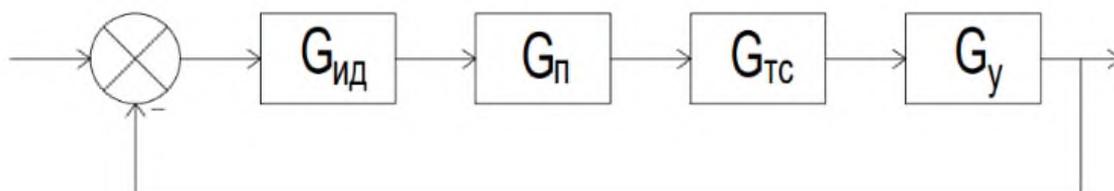


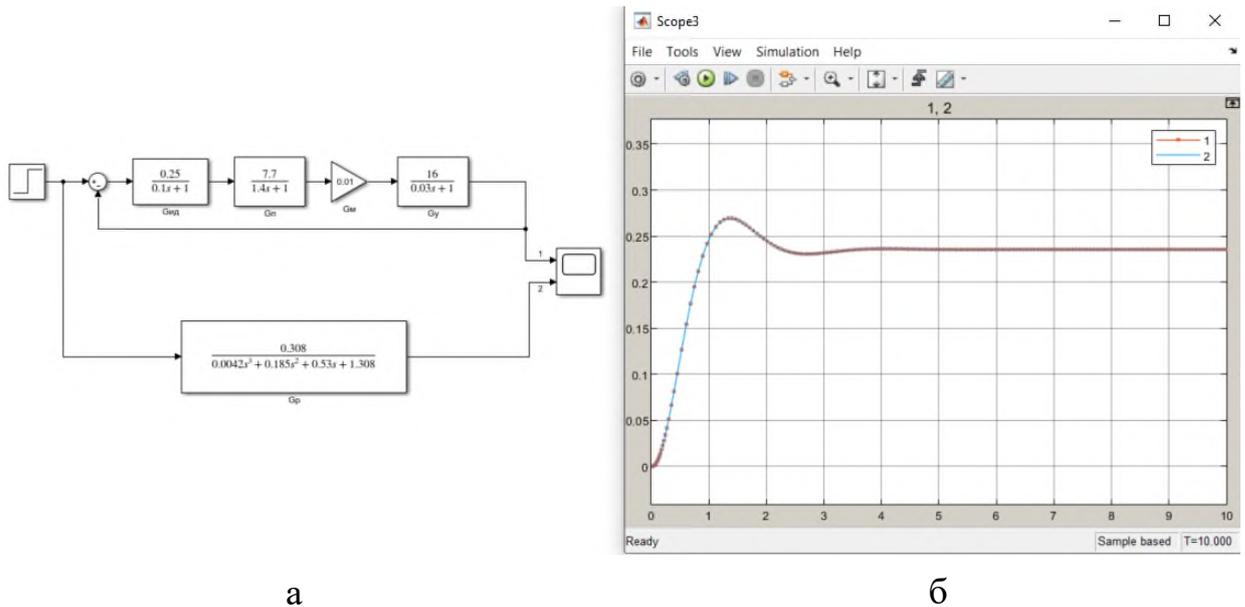
Рисунок 2.5 – Структурная схема замкнутой СУП

Вычислим передаточную функцию для замкнутой системы управления печью:

$$G_3(s) = \frac{G_p(s)}{1 + G_p(s)} \quad (2.12)$$

$$G_3(s) = \frac{0.308}{0.0042s^3 + 0.185s^2 + 0.53s + 1.308} \quad (2.13)$$

На рисунке 2.6 показана структурная схема замкнутой СУП и вычисленная передаточная функция, их сравнительный переходной процесс.



а) структурная схема; б) график переходного процесса
Рисунок 2.6 – Переходной процесс замкнутой СУП и вычисленной передаточной функции.

Из рисунка 2.6 можно увидеть, что система приходит к установившемуся значению, но существует ряд нежелательных колебаний, тем ни менее система является устойчивой. В следующем разделе можно увидеть доказательства.

2.2 Исследование динамических свойств АСУ ТП электропечи

Определим устойчивость разомкнутой системы по первому методу Ляпунова.

Из передаточной функции разомкнутой системы управления печью:

$$G_p(s) = \frac{0.308}{0.0042s^3 + 0.185s^2 + 0.53s + 1}$$

выпишем характеристическое уравнение:

$$0.0042s^3 + 0.185s^2 + 0.53s + 1 = 0. \quad (2.14)$$

Вычислим корни характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} s_1 &= -41.120, \\ s_2 &= -1.464 - 1.9i, \end{aligned}$$

$$s_3 = -1.464 + 1.9i.$$

Разомкнутая система является на границе устойчивости по первому методу Ляпунова, которая гласит, что если все корни отрицательные и только один корень равен нулю, то система на границе устойчивости.

Перепроверим и подтвердим устойчивость разомкнутой системы по критерию Гурвица.

Выпишем характеристическое уравнение разомкнутой системы:

$$0.0042s^3 + 0.185s^2 + 4.5s + 1 = 0$$

Выпишем параметры характеристического уравнения:

$$a_0 = 0.0042,$$

$$a_1 = 0.185,$$

$$a_2 = 0.53,$$

$$a_3 = 1.$$

Построим матрицу Гурвица, по полученным параметрам:

$$H_k = \begin{bmatrix} 0.185 & 1 & 0 \\ 0.0042 & 0.53 & 0 \\ 0 & 0.185 & 1 \end{bmatrix}$$

Вычислим определители главных миноров:

$$\Delta_1 = 0.185,$$

$$\Delta_2 = 0.0938,$$

$$\Delta_3 = 0.0938.$$

Все элементы характеристического уравнения положительны, что данная разомкнутая система устойчива, ибо закон Гурвица гласит, что если все корни отрицательные (даже комплексные), то система является устойчивой. Что и требовалось доказать [12].

Определим устойчивость замкнутой системы по первому методу Ляпунова.

Из передаточной функции замкнутой системы управления печью:

$$G_3(s) = \frac{0.308}{0.0042s^3 + 0.185s^2 + 0.53s + 1.308}$$

выпишем характеристическое уравнение:

$$0.0042s^3 + 0.185s^2 + 0.53s + 1.308 = 0. \quad (2.15)$$

Вычислим корни характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} s_1 &= -41.166, \\ s_2 &= -1.44 - 2.3i, \\ s_3 &= -1.44 + 2.3i. \end{aligned}$$

Замкнутая система является устойчивой по первому методу Ляпунова, которая гласит, что если все корни отрицательные (даже комплексные), то система является устойчивой.

Перепроверим и подтвердим устойчивость замкнутой системы по критерию Найквиста.

Критерием Найквиста исследуем устойчивость замкнутой СУП, для этого нам надо исследовать АФЧХ разомкнутой системы и разобрать устойчивость разомкнутой системы управления печью. По предыдущим исследованиям мы знаем, что наша разомкнутая системы управления печью находится на границе устойчивости. Опираясь на данную информацию, мы должны исследовать устойчивость замкнутой СУП для разомкнутой системы на границе устойчивости.

На рисунке 2.7 показана амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы.

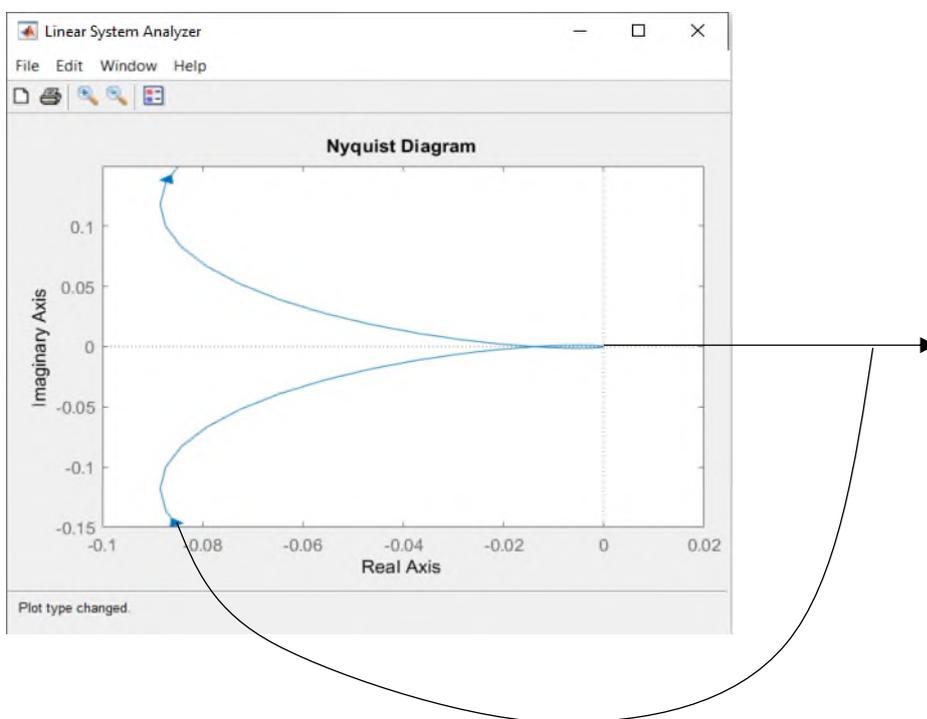


Рисунок 2.7 Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой СУП

Учитывая, что наша разомкнутая система на границе устойчивости по данному графику АФЧХ разомкнутой системы управления печью можно определить, что замкнутая система является устойчивой, так как не охватывает точку $(-1; j0)$.

Перепроверим и подтвердим устойчивость замкнутой системы по логарифмическому критерию Найквиста.

Исследуем устойчивость замкнутой СУП логарифмическим критерием Найквиста. Мы можем исследовать устойчивость замкнутой СУП логарифмическим критерием Найквиста с помощью ЛФЧХ и ЛАЧХ. Заметим, что замкнутая система управления печью будет устойчива только в том случае, когда логарифмическая амплитудная частотная характеристика разомкнутой системы пересекает частоту среза (амплитуда равна 1) раньше, чем логарифмическая фаза-частотная характеристика пересечёт ось -180° . В других остальных случаях, когда ЛАЧХ разомкнутой пересекает частоту среза позже, чем ЛФЧХ пересекает ось -180° система является не устойчивой, а в случае, когда ЛАЧХ и ЛФЧХ пересекают ось абсцисс в одной и той же частоте, замкнутая система автоматического регулирования находится на границе устойчивости. На рисунке 2.8 показана логарифма-амплитудная и логарифма-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы.

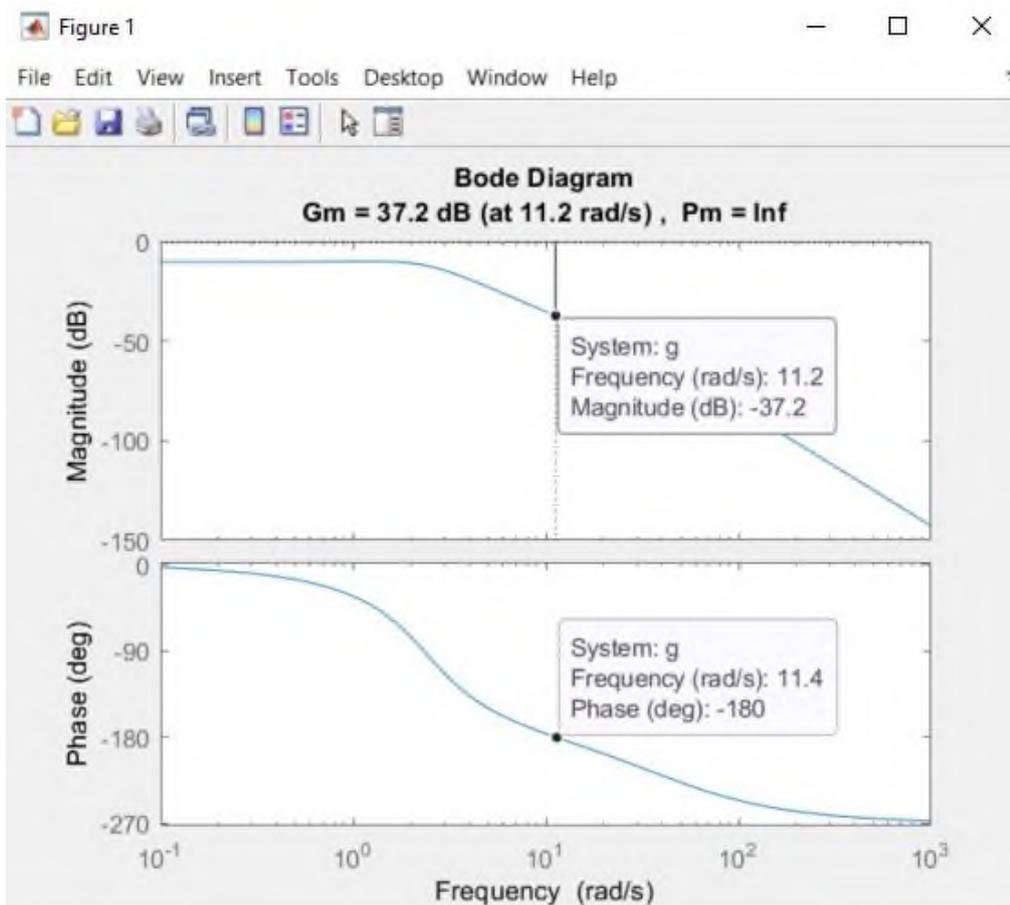


Рисунок 2.8 – ЛАЧХ и ЛФЧХ, разомкнутой СУП

По полученному графику ЛАЧХ и ЛФЧХ нашей разомкнутой системы управления печью мы можем сказать, что разомкнутая система является устойчивой, так как логарифмическая амплитудная частотная характеристика разомкнутой системы пересекает частоту среза в 11.2 рад/с., а логарифмическая фаза-частотная характеристика пересекает ось -180° в бесконечности рад/с. То есть ЛАЧХ пересекает ось абсцисс раньше, чем ЛФЧХ. Что и требовалось доказать [13].

2.3 Оценки качества переходного процесса АСУ ТП электропечи

Вычислим прямые оценки качества переходного процесса СУП.

На рисунке 2.9 выявлены прямые оценки качества переходного процесса замкнутой СУП.

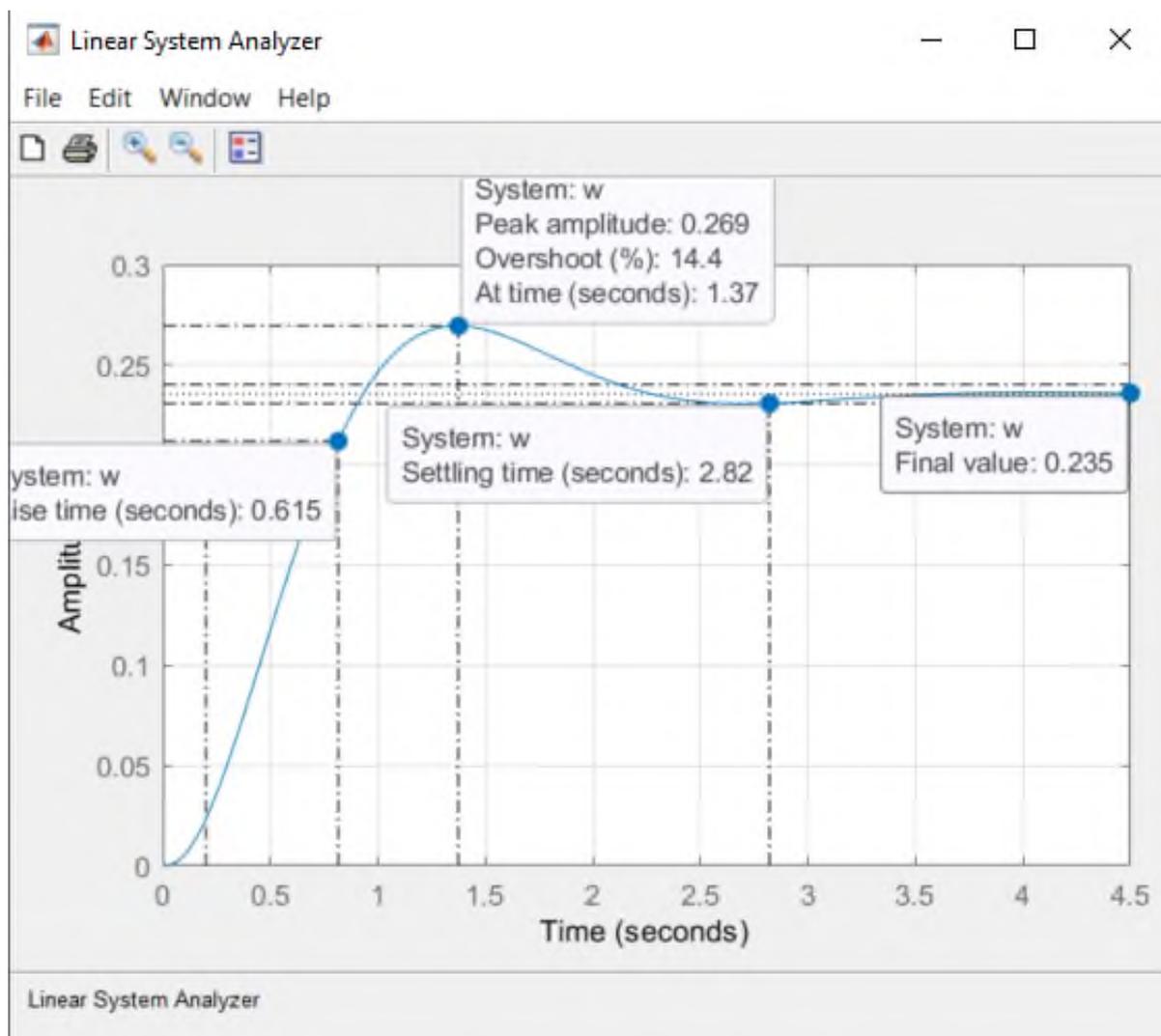


Рисунок 2.9 – Переходной процесс замкнутой СУП

Прямые оценки качества переходного процесса замкнутой системы управления пещью:

1. Время регулирования – 2.82 секунды;
2. Перерегулирование – 14.4%;
3. Число колебаний – 1;
4. Колебательность – $\mu = \frac{\Delta y_{max2}}{\Delta y_{max1}} * 100\% = 0\%$;
5. Частота колебаний – $\omega_{osc} = \frac{2\pi}{T_{osc}} = 0.2$;
6. Время достижения первого максимума – 1.37 секунды;
7. Время нарастания – 0.61 секунды;
8. Декремент затухания – $\chi = \frac{|y_{max1} - y_{ss}|}{|y_{max2} - y_{ss}|} = \frac{0.034 - 1}{0 - 1} = 0.966$.

Косвенные оценки качества переходного процесса замкнутой СУП.

Частотные оценки качества:

На рисунке 2.10 построен график АЧХ замкнутой системы, благодаря которому, получим косвенные оценки качества.

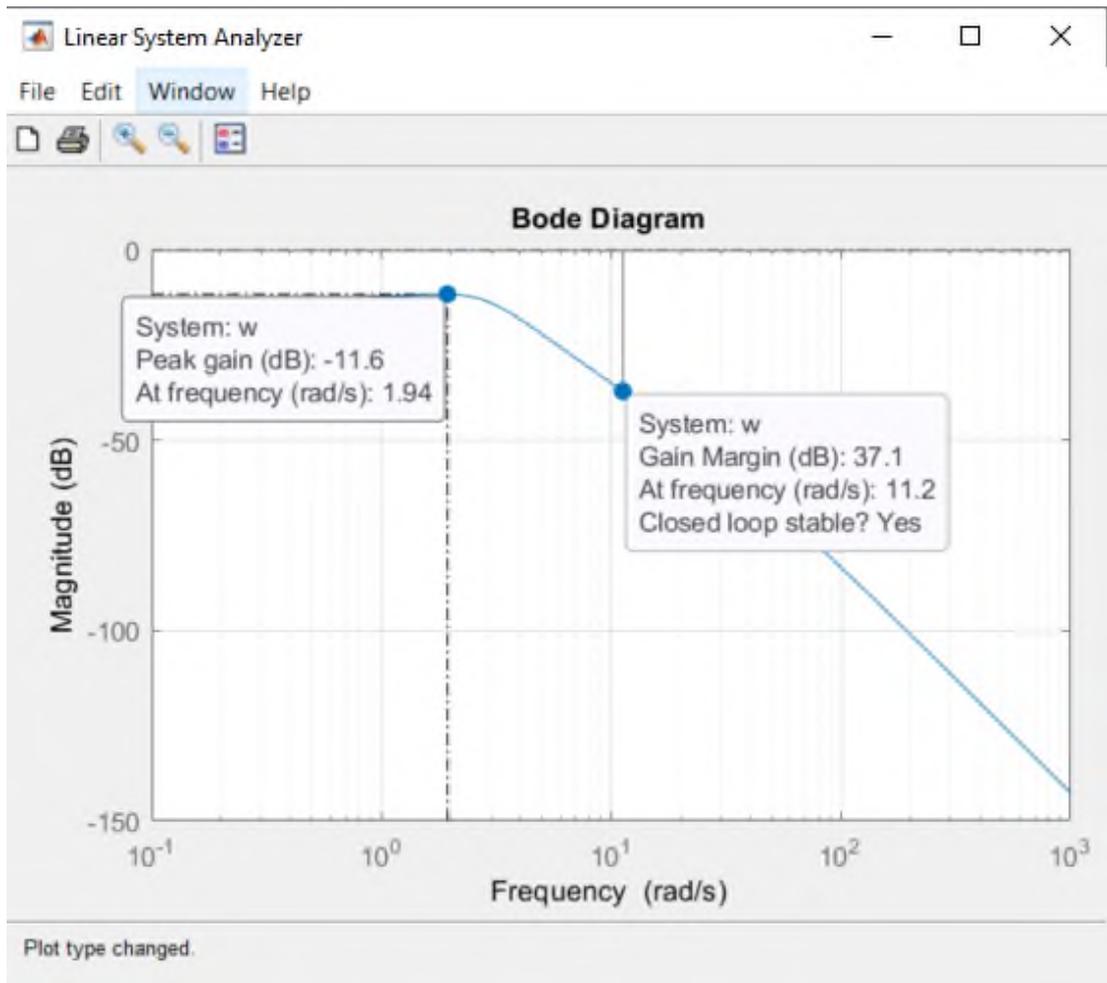


Рисунок 2.10 – Косвенные оценки качества замкнутой СУП

1. Показатель колебательности:

$$\mu = \frac{M_{max}(\omega)}{M(0)} = 0.$$

2. Полоса пропускания: $\omega_{bandwidth} = [0; 11.2]$;

3. Резонансная частота: $\omega = 1.94$;

4. Частота среза: $\omega_{cf} = 2.39$.

Корневые оценки качества:

На рисунке 2.11 показана комплексная плоскость, на которой отмечены полюса передаточной функции.

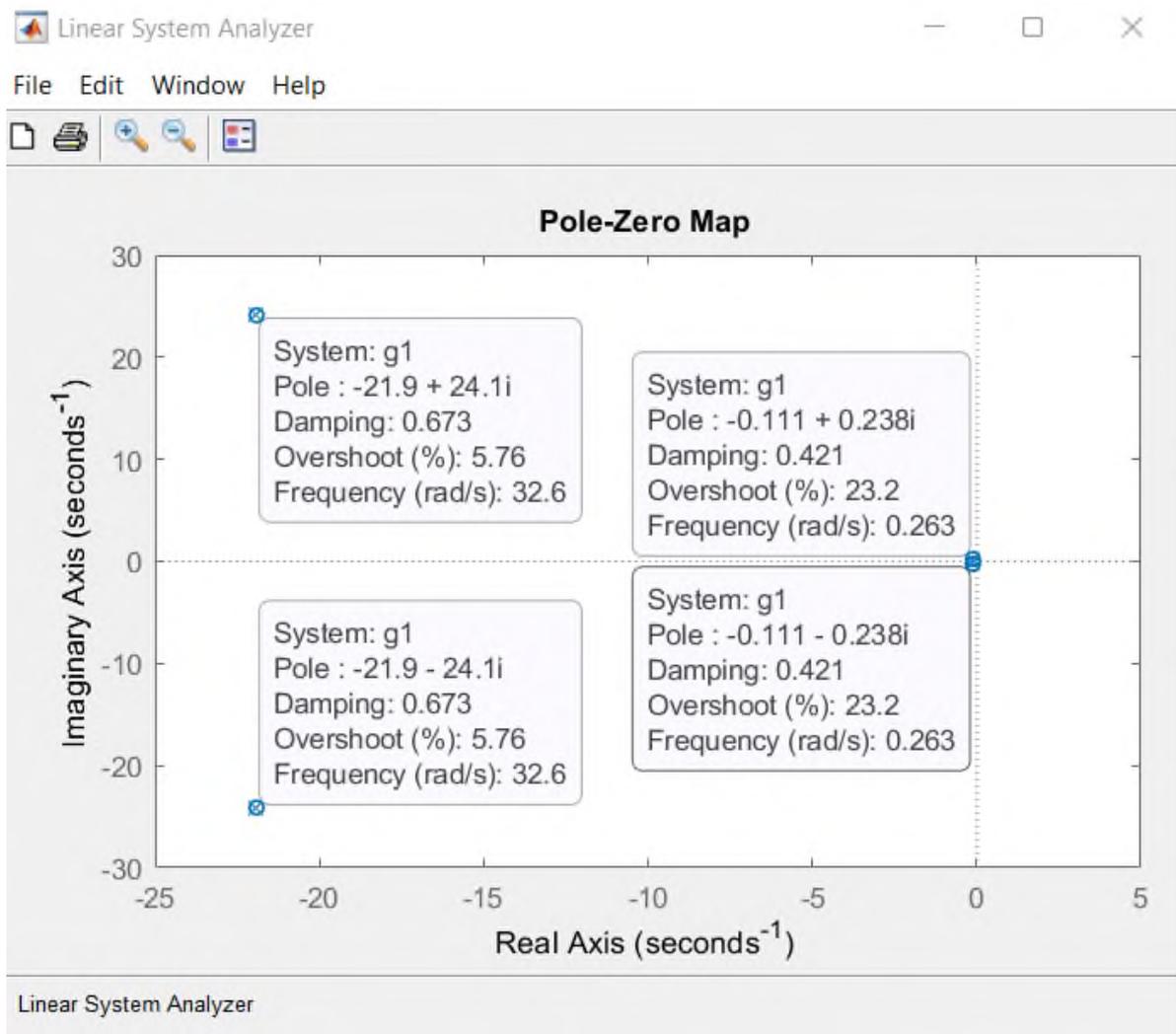


Рисунок 2.11 – Полюса замкнутой ЗСУП на комплексной плоскости

По рисунку 2.11 можно выписать полюса передаточной функции замкнутой системы управления печью:

$$s_1 = -41.2;$$
$$s_{2/3} = -1.44 \pm 2.34i;$$

1. Время регулирования:

$$T_{set} = \frac{4}{|\sigma|} = \frac{4}{1.44} = 2.7;$$

2. Перерегулирование:

$$P_{ov} = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} = e^{-1.95} * 100\% = 14.22\%;$$

3. Максимальное значение y_{max} :

$$y_{max} = y_{ss} \left(1 + \frac{P_{ov}}{100}\right) = 0.04;$$

4. Степень колебательности:

$$\mu = \frac{\omega_d}{\sigma} = \frac{0.238}{1.44} = 0.16;$$

5. Частота колебаний:

$$\omega_{osc} = \omega_n * \sqrt{1 - \xi^2} = 0.211 * \sqrt{1 - 0.435^2} = 0.19 \text{ c};$$

6. Время достижения первого максимума:

$$T = \frac{\pi}{\omega_n * \sqrt{1 - \xi^2}} = 1.3;$$

7. Быстродействие и степень устойчивости:

$$\eta = |\sigma_{min}| = 1.44.$$

В таблице 2.3 заполним все ячейки вычисленными данными.

Таблица 2.3 – Оценки качества переходного процесса замкнутой системы управления печью

| № | Оценки качества | Прямые | Косвенные | Соответствие |
|---|--------------------------------|--------|-----------|--------------|
| 1 | Время регулирования, T_{set} | 2.82 | 2.7 | + |
| 2 | Перерегулирование, P_{ov} | 14.4% | 14.22% | + |
| 3 | Число колебаний, M | 1 | 1 | + |
| 4 | Колебательность, M | 0 | 0.16 | + |
| 5 | Частота колебаний, w_{osc} | 0.2 | 0.19 | + |
| 6 | Время первого максимума, T_p | 1.37 | 1.3 | + |
| 7 | Время нарастания, T_R | 0.61 | | |

С минимальной погрешностью у нас совпадают прямые и косвенные оценки качества, перерегулирование менее 30% и всего одно колебание, а также запас устойчивости по амплитуде больше 6 децибел, а по частоте больше 30 градусов. Возможно, вызовет вопрос времени регулирования, но для дуговой печи это является нормальным временем. Отсюда может показаться, что данная система не нуждается в каком-либо контроллере, так как система является полностью устойчивой и параметры являются благополучными, но с целью модернизации времени регулирования и перерегулирования нам необходимо добавить регулятор. Так как причиной добавления регулятора является такие оценки качества, как перерегулирование и точность системы, соответственно для данной системы подойдёт PI-регулятор, и нет необходимости использовать D-регулятор, потому что система довольно быстро приходит к установившемуся значению [14].

2.4 Синтез регулятора системы управления печью на основе различных методов

ПИД – регулятор является самым распространенным типом регуляторов, так как является очень простым и понятен принцип действия, имеет относительно низкую цену и применяется в любой отрасли производства, а расшифровывается он как Пропорциональный – Интегральный – Дифференциальный регулятор.

Пропорциональное звено предназначено для регулирования скорости системы, представляет собой разность входного сигнала от сигнала рассогласования. Интегральное звено предназначено для точности системы, представляет из себя интеграл сигнала рассогласования. Дифференциальное звено необходим для уменьшения затухания системы, представляет собой производную сигнала рассогласования. В свою очередь сигнал рассогласования $e(t)$ может быть представлена в виде интегральных оценок качества.

На рисунке 2.11 показана графическая схема ПИД-регулятора, где входным сигналом является ошибка $e(t)$, а выходным сигналом является управляющее воздействие $u(t)$.

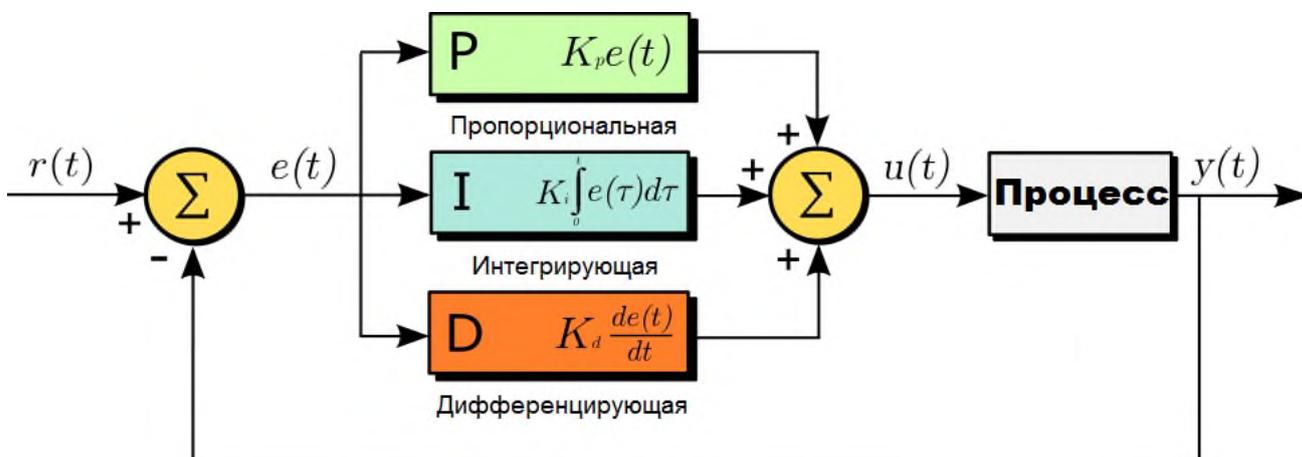


Рисунок 2.11 – схема ПИД-регулятора

Общей формулой ПИД-регулятора является сумма трёх составляющих:

$$u(t) = k_p e(t) + k_I \int_0^t e(\tau) dt + k_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.16)$$

где, k_p – коэффициент усиления пропорциональной составляющей;

k_I – коэффициент усиления интегральной составляющей;

k_D – коэффициент усиления дифференциальной составляющей;

Выше приведенной системе необходимо улучшить точность и уменьшить колебательность, для этого мы синтезируем ПИ-регулятор.

Метод клонального алгоритма отбора.

Необходимо рассчитать предельные коэффициенты пропорциональности и дифференциальности, потому что от них зависит поиск области допустимых значений, которые нужны для клонального алгоритма.

На рисунке 2.12 показана структурная схема передаточной функции системы с ПИ-контроллером.

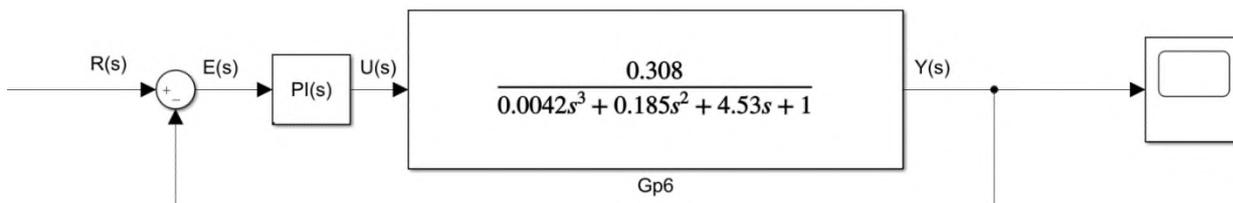


Рисунок 2.12 – Структурная схема системы с регулятором

$$\begin{aligned}
T(s) &= \frac{G_p(s)C(s)}{1+G_p(s)C(s)} = \frac{\frac{0.308}{0.0042s^3+0.185s^2+0.53s+1} * (k_p+k_I\frac{1}{s})}{1+\frac{0.308}{0.0042s^3+0.185s^2+0.53s+1} * (k_p+k_I\frac{1}{s})} = \\
&= \frac{0.308k_p s + 0.308k_I}{0.0042s^4 + 0.185s^3 + 0.53s^2 + (1+0.308k_p)s + 0.308k_I}.
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Выпишем характеристическое уравнение передаточной функции системы с ПИ-контроллером:

$$0.0042s^4 + 0.185s^3 + 0.53s^2 + (1 + 0.308k_p)s + 0.308k_I$$

Выпишем параметры характеристического уравнения:

$$\begin{aligned}
a_0 &= 0.0042 > 0, \\
a_1 &= 0.185 > 0, \\
a_2 &= 0.53 > 0, \\
a_3 &= 1 + 0.308k_p > 0, \\
k_p &= -3.24; \\
a_4 &= 0.308k_I > 0, \\
k_I &= 0.
\end{aligned}$$

Построим матрицу Гурвица, по полученным параметрам:

$$H_k = \begin{bmatrix} 0.185 & 1+0.308k_p & 0 & 0 \\ 0.0042 & 4.5 & 0.308k_I & 0 \\ 0 & 0.185 & 1+0.308k_p & 0 \\ 0 & 0.0042 & 4.5 & 0.308k_I \end{bmatrix}$$

Вычислим определители главных миноров:

$$\begin{aligned}
\Delta_1 &= 0.185, \\
\Delta_2 &= 0.8283 - 0.0013k_p > 0, \\
\Delta_3 &= 0.8283 + 0.2538k_p - 0.0105k_I - 0.0004k_p > 0, \\
\Delta_4 &> 0.
\end{aligned}$$

Все элементы характеристического уравнения положительны, отсюда следует, что данная система будет устойчива, по закону Гурвица, если коэффициент пропорциональности будет в пределах $(-3.24; +\infty)$, а коэффициент интегрирования регулятора $(0; +\infty)$ [15].

Постановка задачи. Основываясь на клональный алгоритм отбора при квадратичной интегральной оценке необходимо синтезировать ПИ-регулятор для выявления математической модели объекта управления.

Вычислим квадратичную интегральную оценку.

$$I = \int_0^{\infty} e^2(t)dt \rightarrow \min. \quad (2.18)$$

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t)dt = \frac{1}{2a_n^2\Delta} (B_m\Delta_m + B_{m-1}\Delta_{m-1} + \dots + B_1\Delta_1 + B_0\Delta_0) - \frac{b_m b_{m-1}}{a_n^2} \quad (2.19)$$

Для системы с $n=4, m=1$:

$$J = \frac{1}{2a_4^2\Delta} (B_1\Delta_1 + B_0\Delta_0) - \frac{b_1 b_0}{a_4^2}$$

где, $a_4 = 0.308k_I, b_0 = 0.308k_P, b_1 = 0.308k_I$ из передаточной функции с регулятором (2.17).

Вычислим необходимые нам параметры данного преобразователя:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_4 & -a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & a_3 & -a_1 & 0 \\ 0 & -a_4 & a_2 & -a_0 \\ 0 & 0 & -a_3 & a_1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 0.308k_I & -4.5 & 0.0042 & 0 \\ 0 & 1+0.308k_P & -0.185 & 0 \\ 0 & -0.308k_I & 4.5 & -0.0042 \\ 0 & 0 & -1-0.308k_P & 0.185 \end{vmatrix} =$$

$$= 0.308k_I * \begin{vmatrix} 1+0.308k_P & -0.185 & 0 \\ -0.308k_I & 4.5 & -0.0042 \\ 0 & -1-0.308k_P & 0.185 \end{vmatrix} -$$

$$-(-4.5) * \begin{vmatrix} 0 & -0.185 & 0 \\ 0 & 4.5 & -0.0042 \\ 0 & -1-0.308k_P & 0.185 \end{vmatrix} +$$

$$+0.0042 * \begin{vmatrix} 0 & 1+0.308k_P & 0 \\ 0 & -0.308k_I & -0.0042 \\ 0 & 0 & 0.185 \end{vmatrix} - 0 =$$

$$= 0.308k_I * (0.8283 + 0.2538k_P - 0.0004k_P^2 - 0.0105k_I) + 4.5 * 0 +$$

$$+0.0042 * 0 - 0 = -0.0032k_I^2 - 0.0001k_Ik_P^2 + 0.0781k_Ik_P + 0.2551k_I.$$

$$B_0 = b_0^2 = 0.308k_P^2 = 0.095k_P^2$$

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} a_3 & -a_2 & a_0 & 0 \\ a_4 & a_3 & -a_1 & 0 \\ 0 & -a_4 & a_2 & -a_0 \\ 0 & 0 & -a_3 & a_1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 1+0.308k_P & -4.5 & 0.0042 & 0 \\ 0.308k_I & 1+0.308k_P & -0.185 & 0 \\ 0 & -0.308k_I & 4.5 & -0.0042 \\ 0 & 0 & -1-0.308k_P & 0.185 \end{vmatrix} =$$

$$= (1+0.308k_P) * \begin{vmatrix} 1+0.308k_P & -0.185 & 0 \\ -0.308k_I & 4.5 & -0.0042 \\ 0 & -1-0.308k_P & 0.185 \end{vmatrix} =$$

$$= (1+0.308k_P) * (0.8283 + 0.2538k_P - 0.0004k_P^2 - 0.0105k_I) =$$

$$= -0.0001k_P^3 + 0.0777k_P^2 + 0.5089k_P - 0.0032k_Pk_I - 0.0105k_I + 0.8283.$$

$$B_1 = b_1^2 = 0.308k_I^2 = 0.095k_I^2$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_4 & a_3 & a_0 & 0 \\ 0 & a_4 & -a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 & -a_0 \\ 0 & 0 & -a_3 & a_1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 0.308k_I & 1+0.308k_P & 0.0042 & 0 \\ 0 & 0.308k_I & -0.185 & 0 \\ 0 & 0 & 4.5 & -0.0042 \\ 0 & 0 & -1-0.308k_P & 0.185 \end{vmatrix} =$$

$$= 0.308k_I * \begin{vmatrix} 0.308k_I & -0.185 & 0 \\ 0 & 4.5 & -0.0042 \\ 0 & -1-0.308k_P & 0.185 \end{vmatrix} -$$

$$-(1+0.308k_P) * \begin{vmatrix} 0 & -0.185 & 0 \\ 0 & 4.5 & -0.0042 \\ 0 & -1-0.308k_P & 0.185 \end{vmatrix} +$$

$$\begin{aligned}
& +0.0042 * \begin{vmatrix} 0 & 0.308k_I & 0 \\ 0 & 0 & -0.0042 \\ 0 & 0 & 0.185 \end{vmatrix} - 0 = \\
& = 0.308k_I * (0.2551k_I - 0.0004k_I k_P) - 0 + 0 - 0 = \\
& = 0.0785k_I^2 - 0.0001k_P k_I^2.
\end{aligned}$$

Получив данные решений, подставим все полученные данные в выражение интегральной квадратичной ошибки:

$$\begin{aligned}
J &= \frac{1}{2a_4^2 \Delta} (B_1 \Delta_1 + B_0 \Delta_0) - \frac{b_1 b_0}{a_4^2} \\
J &= \frac{1}{2(0.308k_I)^2 (-0.0032k_I^2 - 0.0001k_I k_P^2 + 0.0781k_I k_P + 0.2551k_I)} * \\
& * (0.095k_I^2 * (0.0785k_I^2 - 0.0001k_P k_I^2) + \\
& + 0.095k_P^2 * (-0.0001k_P^3 + 0.0777k_P^2 + 0.5089k_P - \\
& - 0.0032k_P k_I - 0.0105k_I + 0.8283)) - \frac{0.308k_I * 0.308k_P}{0.308k_I^2}.
\end{aligned}$$

Полученное выражение введем в МатЛАБ m.file и создадим функцию, для кода клонального алгоритма, чтобы рассчитать коэффициенты k_P и k_I при которых система минимальна в погрешности интегральных ошибок.

Начальные параметры алгоритма задаются по умолчанию, это N(размер популяции)=100, Ag(антитела), которые генерируются в популяции по равномерному закону распределения, gen(число интеграций)=50, β (параметр клонирования)=0.5, μ (параметр мутации)=0.5, d(размер количества клеток)=0.3. Задача на поиск экстремума, является простой и удовлетворяющий результаты данных параметров. В итоге проделанной работы получаем значения коэффициентов, $k_P = 26.1465$ и $k_I = 3.4587$.

На рисунке 2.13 выведен процесс поиска минимума благодаря Clonalg.

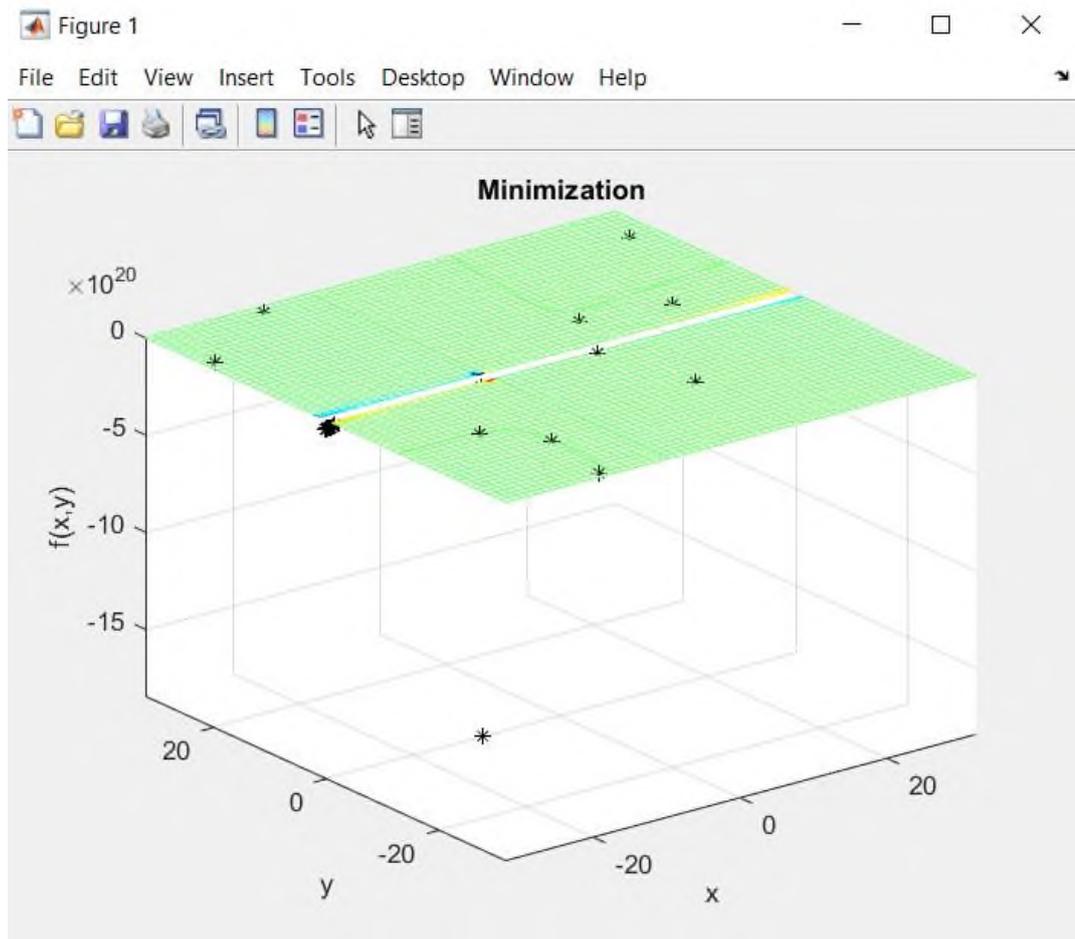


Рисунок 2.13 – Процесс поиска минимума

Закон управления примет вид:

$$u(t) = 26.1465e(t) + 3.4587 \int_0^t e(t)dt$$

На рисунке 2.14 показана переходная характеристика системы с ПИ-регулятором Clonalg, как мы видим точность в несколько раз, улучшилась и перерегулирование уменьшилось, но время прихода к установившемуся значению стала хуже на десять секунд.

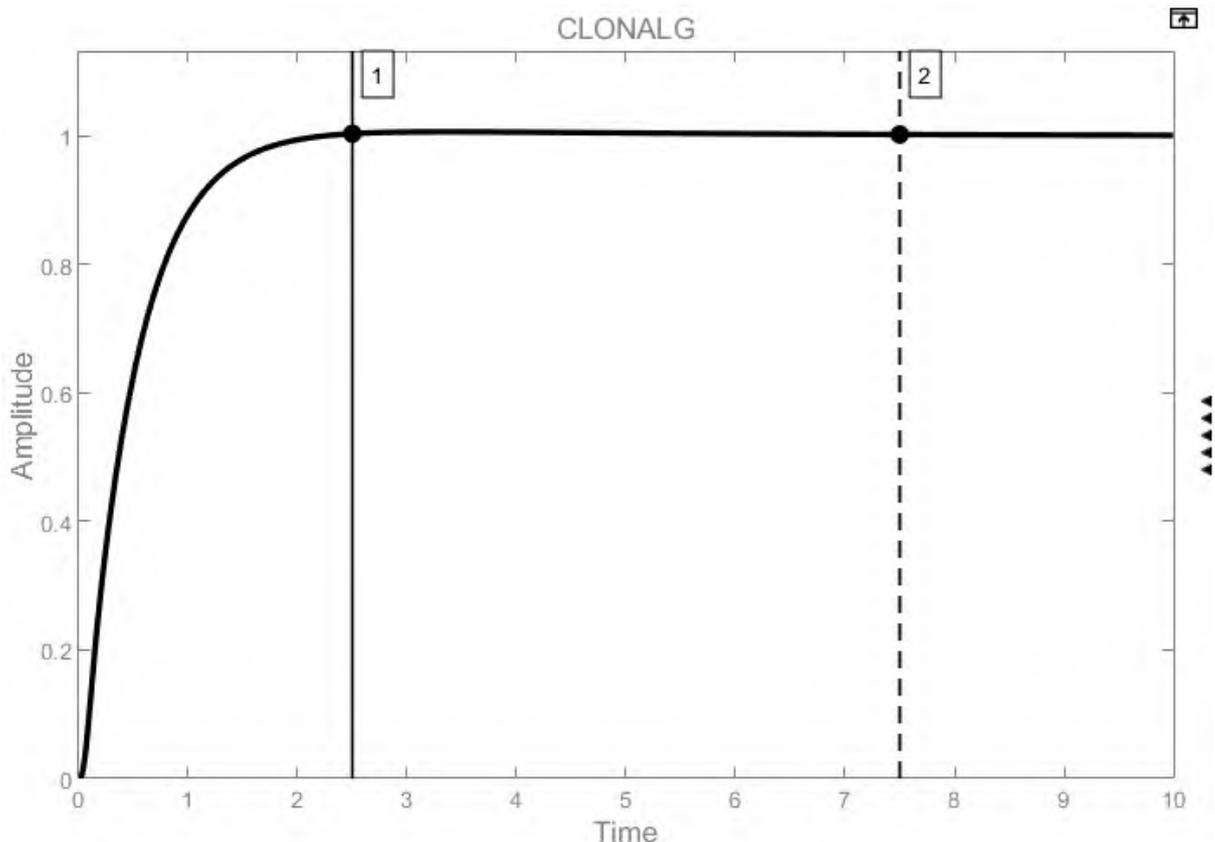


Рисунок 2.14 – Система с ПИ-регулятором Clonalg

Второй метод Циглера-Никольса.

Для построения системы с регулятором на основе второго метода Циглера-Никольса необходимо:

1. Построить структурную схему с Р-регулятором с неизвестным параметром $K_{сг}$.
2. Рассчитать $K_{сг}$ замкнутой системы, которая входит в границы устойчивости, с помощью любого критерия устойчивости.
3. Показать, что правильно рассчитали $K_{сг}$, благодаря графику $K_{сг}$ колебания с постоянной амплитудой и частотой.
4. Определить $P_{сг}$ по колебательному процессу и посчитать параметры типового регулятора.

На рисунке 2.15 показана структурная схема системы с Р-регулятором с неизвестным параметром $K_{сг}$.

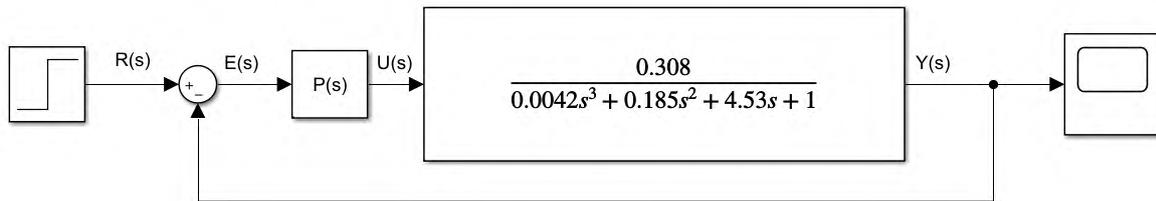


Рисунок 2.15 Структурная схема системы с Р-регулятором

Рассчитаем передаточную функцию системы с Р-регулятором с неизвестным параметром K_{cr} :

$$K(s) = \frac{K_{cr}}{0.0042s^3 + 0.185s^2 + 0.53s + 1.308 + K_{cr}} \quad (2.20)$$

Выпишем характеристическое уравнение системы с Р-регулятором с неизвестным параметром K_{cr} :

$$0.0042s^3 + 0.185s^2 + 4.5s + 1.308 + K_{cr} = 0,$$

Выпишем параметры характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.0042, \\ a_1 &= 0.185, \\ a_2 &= 0.53, \\ a_3 &= 1.308 + K_{cr}. \end{aligned}$$

Построим матрицу Гурвица, по полученным параметрам:

$$H_{K_{cr}} = \begin{bmatrix} 0.185 & 1.308 + K_{cr} & 0 \\ 0.0042 & 0.53 & 0 \\ 0 & 0.185 & 1.308 + K_{cr} \end{bmatrix}$$

Вычислим определители главных миноров:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 0.185, \\ \Delta_2 &= 0.098 - 0.0055K_{cr}, \\ \Delta_3 &= 0.121 + 0.08706K_{cr} - 0.0042K_{cr}^2. \end{aligned}$$

Рассчитаем из полученных определителей матрицы чему равен K_{cr} :

$$K_{cr} \approx 22.03596$$

Построим переходной процесс с коэффициентом K_{cr} , чтобы показать, что правильно ее рассчитали и далее по графику найдём коэффициент P_{cr} .

$$K(s) = \frac{22.03596}{0.0042s^3 + 0.185s^2 + 0.53s + 1.308 + 23.34396}$$

На рисунке 2.16 показан переходной процесс системы с учётом коэффициента K_{cr} , при правильном расчёта данная система должна быть на границе устойчивости.

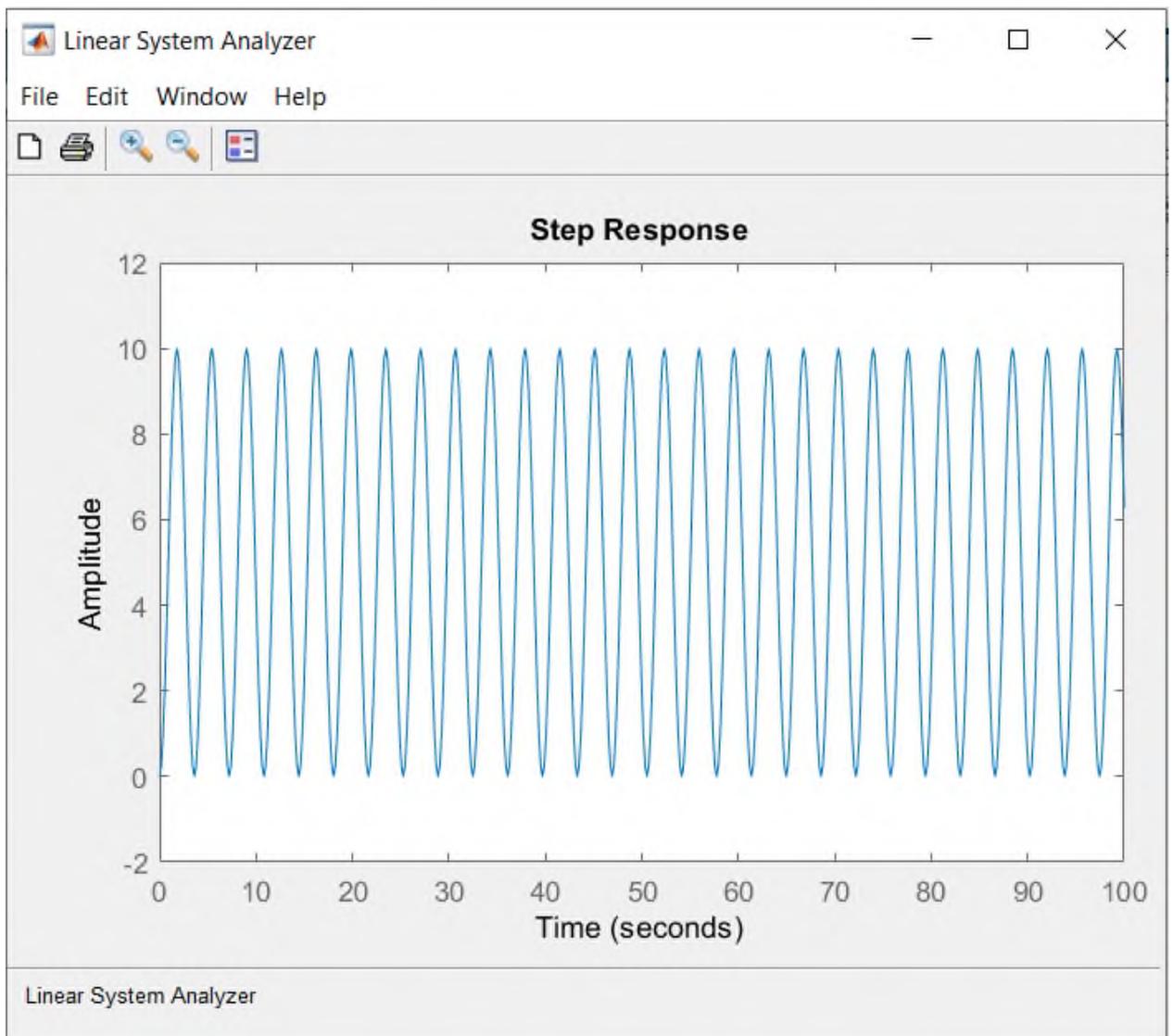


Рисунок 2.16 – Переходной процесс системы с учётом K_{cr}

По переходному процессу рассчитали $P_{cr} \approx 2.5$.

Таблица 2.4 – Параметры типового регулятора.

| | P | 1/I | D |
|-----|------------------------------|---------------------|--------|
| P | $0.5 * 22.03596 = 11.01798$ | - | - |
| PI | $0.45 * 22.03596 = 9.916182$ | $2.5 / 1.2 = 2.083$ | - |
| PID | $0.6 * 22.03596 = 13.221576$ | $2.5 / 2 = 1.25$ | 0.3125 |

Смоделируем полученные регуляторы и выведем их графики переходных процессов, чтобы сравнить их между собой. На рисунках 2.17 и 2.18 показаны структурные схемы и графики рассчитанных методом Циглера – Никольса регуляторов.

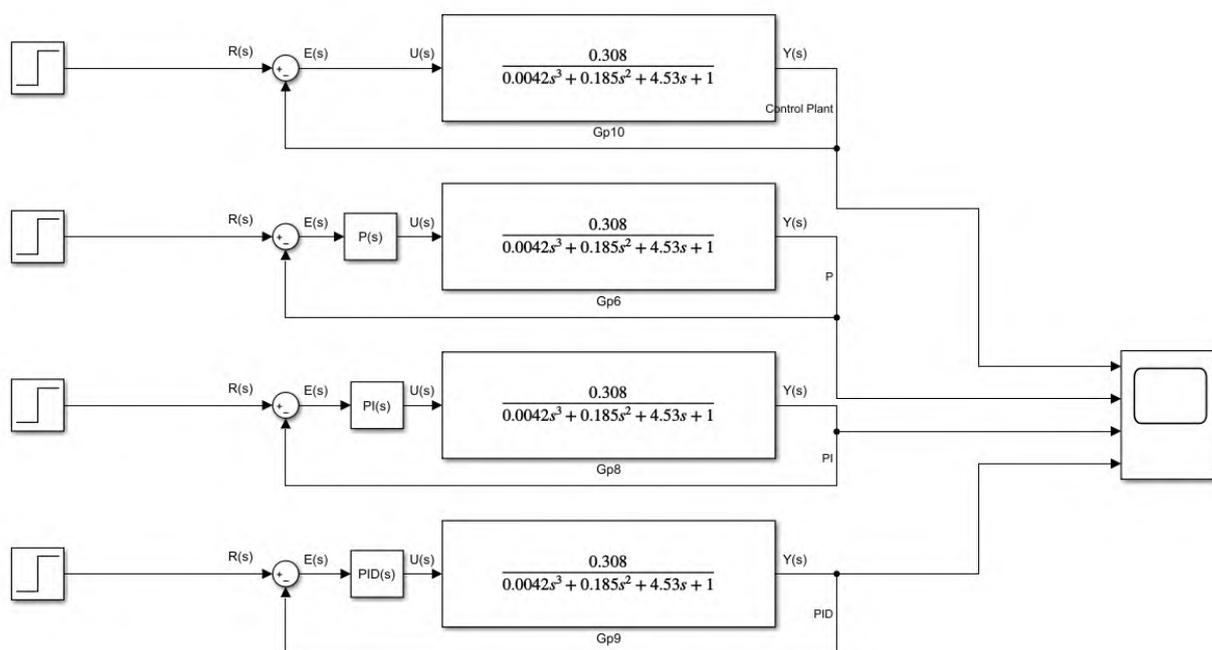


Рисунок 2.17 – Структурные схемы регуляторов

Конечной целью использования данного метода является построение ПИ–регулятора, так как он необходим нам для сравнения с нашим Smart–регулятором для объективной оценки. По рисунку 2.17 можно увидеть, что при использовании метода Циглера–Никольса мы строим структурные схемы нескольких (обычно трёх) регуляторов, как и в нашем случае П–регулятор, ПИ–регулятор и ПИД–регулятор, чтобы сравнить их между собой, выводим все полученные графики переходного процесса в один включая основной переходной процесс, а также задаем для всех четырёх структурных схем на нашем рисунке одинаковый входной сигнал и сморим как влияет каждый регулятор на нашу замкнутую систему управления печью. По графику переходных процессов регуляторов, рассчитанных методом Циглера–Никольса на рисунке 2.18 можно прийти к выводу, что самым оптимальным из трёх

регуляторов является ПИ–регулятор, как раз таки который нам нужен для сравнения, так как время регулирования и точность относительно П–регулятора и ПИД–регулятора является наивысше приспособленным к нашей системе управления печью.

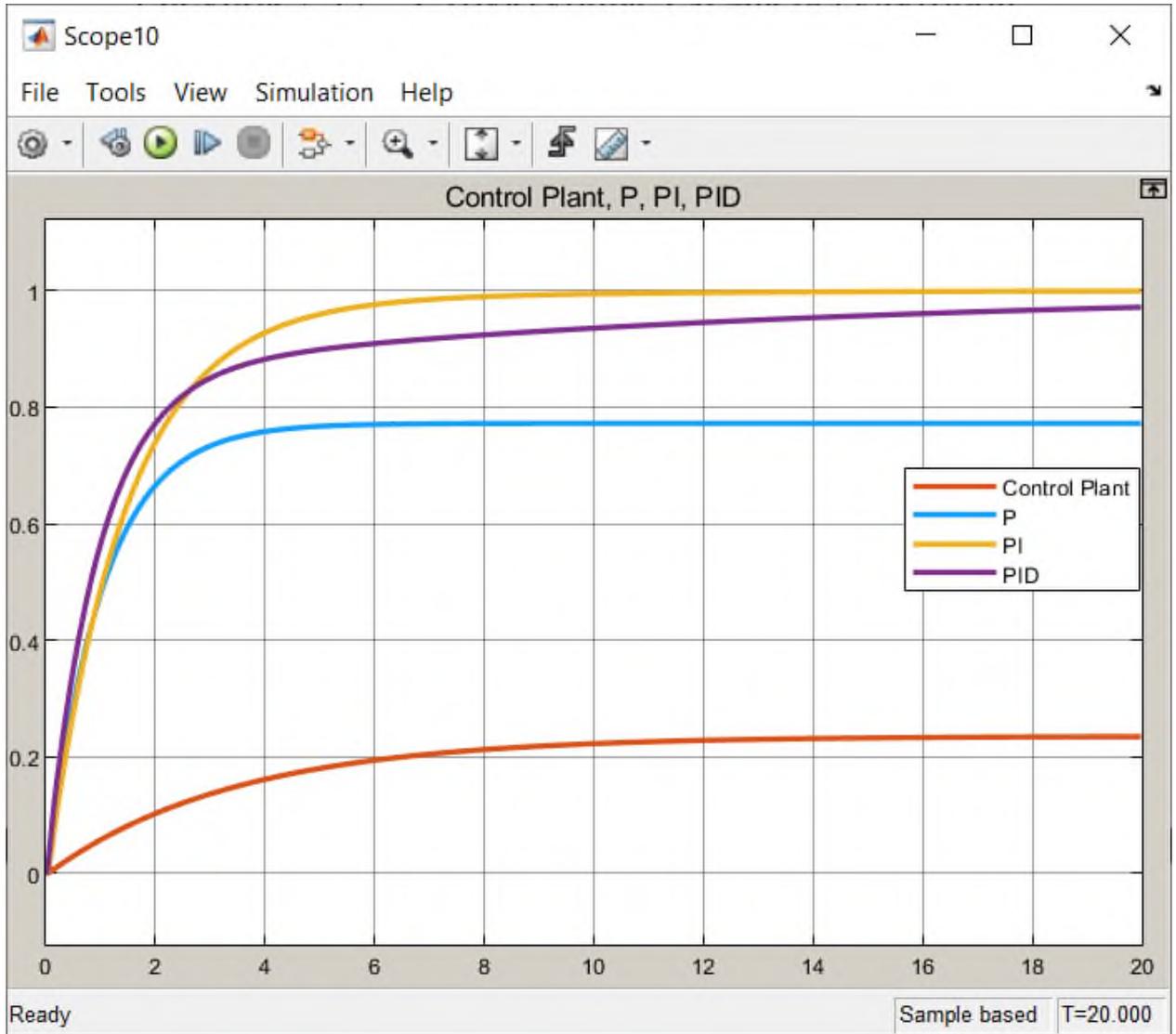


Рисунок 2.18 – Графики переходных процессов регуляторов

По выведенным графикам регуляторов можно сказать, что самой оптимальной является PI-регулятор [15].

Подбор регулятора с помощью Autotune.

Simulink является пакетом MatLab для сборки и виртуального тестирования схем электрики, автоматизации в том числе структурных схем. Simulink предоставляет возможность настраивать ПИД–регуляторы автоматически, он сам рассчитывает и показывает на графике самый оптимальный по его решению переходной процесс. Данный метод нам необходим, также как и предыдущий, чтобы сравнить настройку регулятора по решению Autotune с нашим Smart–регулятором, что и мы собственно сделали. На рисунке 2.19 показана

структурная схема нашей системы в MatLab и добавлен PI-регулятор, теперь мы настроим данную систему с помощью функции Autotune.

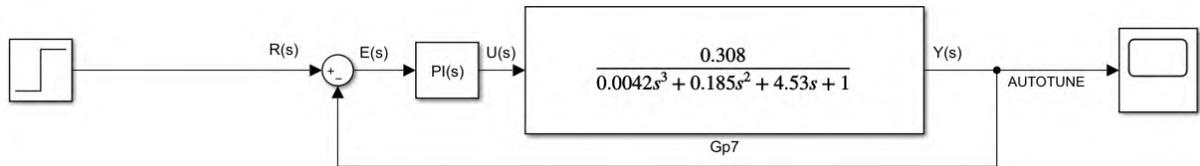


Рисунок 2.19 – Структурная схема системы с PI-регулятором

На рисунке 2.20 и 2.21 показана версия переходного процесса системы и параметры регулятора, которую предлагает MatLab с помощью функции Autotune.

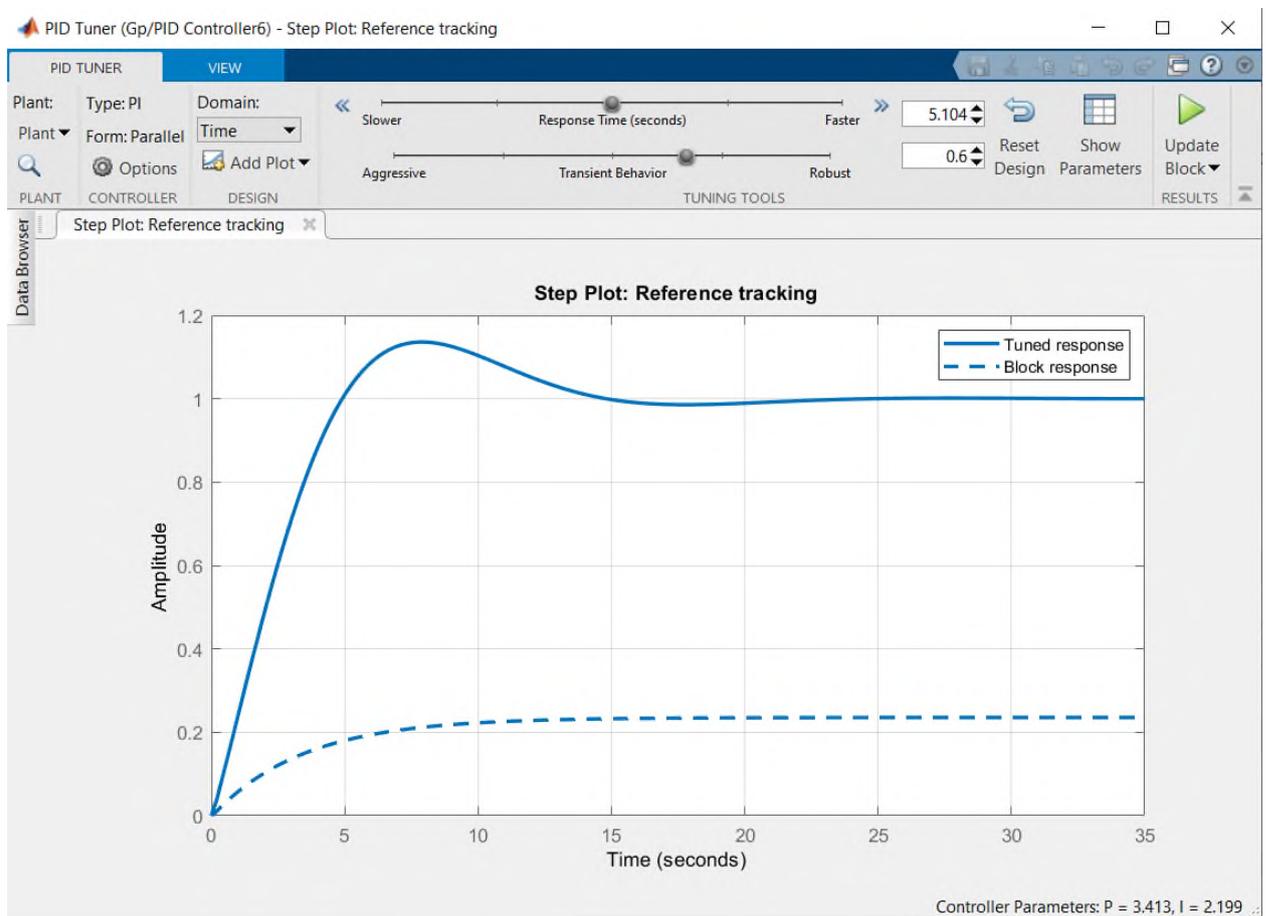


Рисунок 2.20 – Переходной процесс системы настройка MatLab

ПИ-регулятор, настроенный с помощью Autotune, сделал наш выходной сигнал системы управления печью точным, но добавил некое перерегулирование, которое в принципе меньше 30%, что полностью подходит под мировые стандарты, сигнал приходит к установившемуся значению приблизительно в 15 секунде, что является также хорошим результатом.

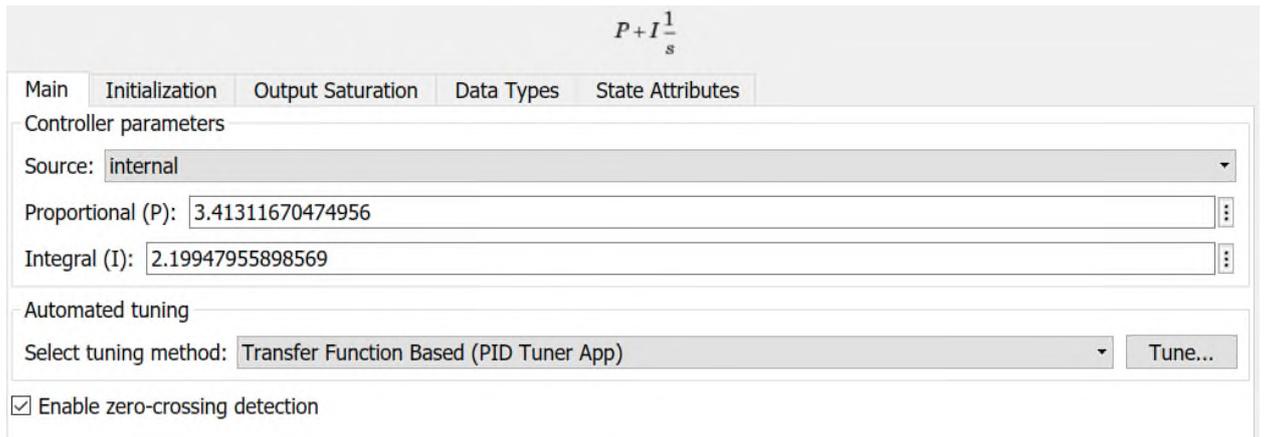


Рисунок 2.21 – Параметры регулятора Autotune MatLab

Autotune настроил регулятор очень точно, но появилась небольшое перерегулирование и увеличилось время регулирования, приблизительно 15с.

Переходной процесс предлагаемый MatLab с помощью функции Autotune не является самым оптимальным, на рисунке 2.22 и 2.23 показана версия переходного процесса системы и параметры регулятора, настроенные вручную.

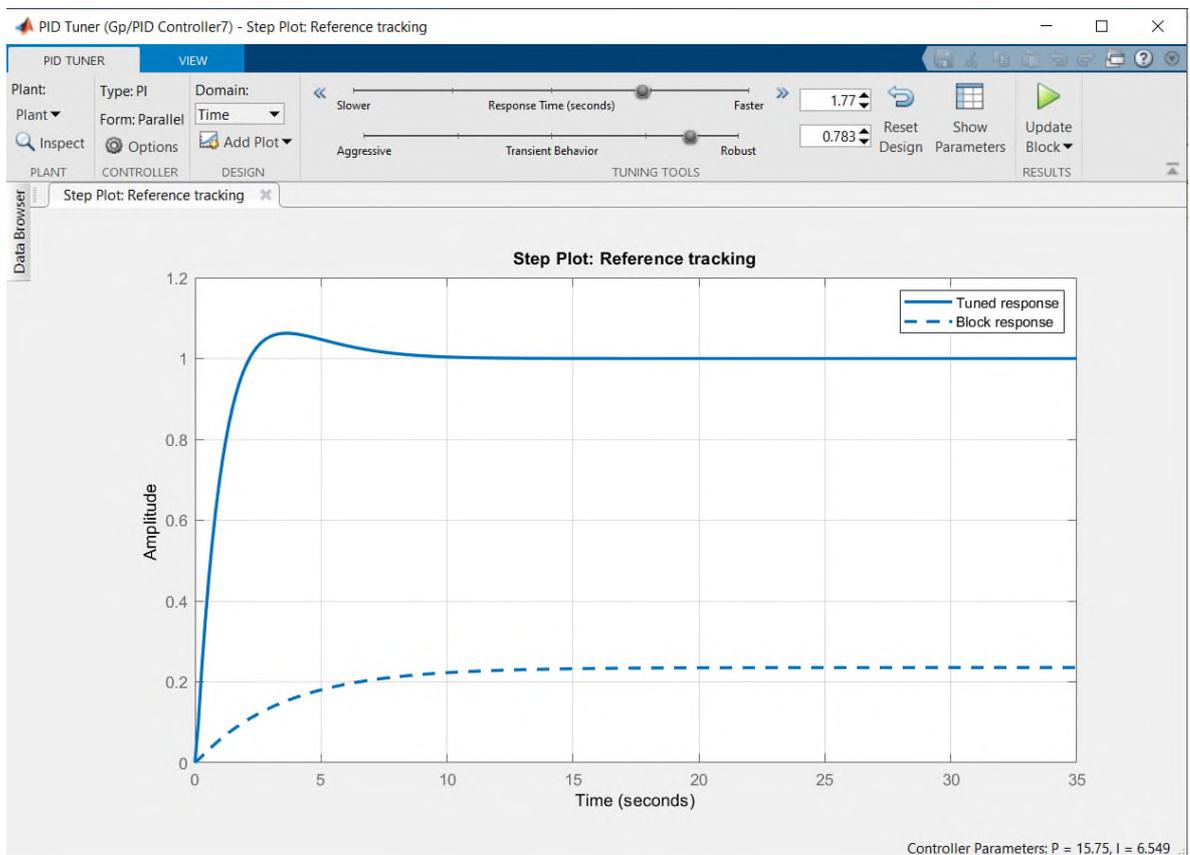


Рисунок 2.22 – Переходной процесс системы настройка вручную

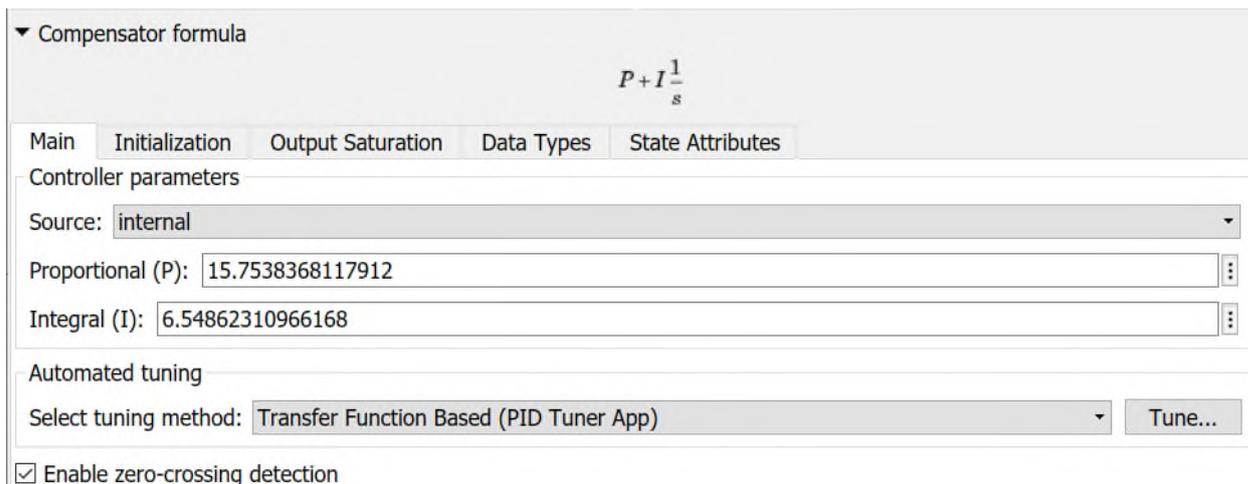


Рисунок 2.23 – Параметры регулятора ручная настройка

Настройка вручную оказалась намного оптимальнее настройки Autotune, точность стала лучше, время регулирования 8 секунд, почти вдвое быстрее, перерегулирование уменьшилось.

Сравним все рассчитанные регуляторы в данной работе, это PI-регулятор на основе клонального алгоритма отбора, PI-регулятор, рассчитанный методом Циглера–Никольса, PI-регулятор Autotune и настроенный вручную.

На рисунке 2.24 показаны графики переходного процесса всех регуляторов и произведено их сравнение, если анализировать и сравнить полученный график, включающий себя все переходные процессы рассчитанных и полученных PI-регуляторов, то придём к выводу, что PI-регулятор полученный на основе клонального алгоритма отбора, является идеальным регулятором и приводит системы к 100% КПД, лучше регулятор не может быть в теории, потому что системы является абсолютно точной, приходит к установившемуся значению менее, чем за 3 секунды, почти 0% перерегулирование, но к сожалению такой регулятор не может быть создан физически, современные технологии ещё не дошли до такого уровня развития. По полученному графику самым оптимальным и реалистичным регулятором является регулятор настроенный вручную, его параметры также очень близки к идеальному регулятору, перерегулирование менее 3%, что является почти идеальным, время прихода к установившемуся значению равен приблизительно 7 секундам, системы также является точной. На третьем месте PI-регулятор, рассчитанный методом Циглера–Никольса, он вообще не имеет перерегулирования, точность системы не подводит, приходит к установившемуся значению примерно за 9 секунд, что и поставило её после PI-регулятора, настроенного вручную. Завершает наше исследование и сравнение PI-регулятор, настроенный самим MatLab, благодаря функции Autotune, имеет он перерегулирование 7%, что также является незначительным, время прихода к установившемуся значению приблизительно 15 секунд, также система является точной [16].

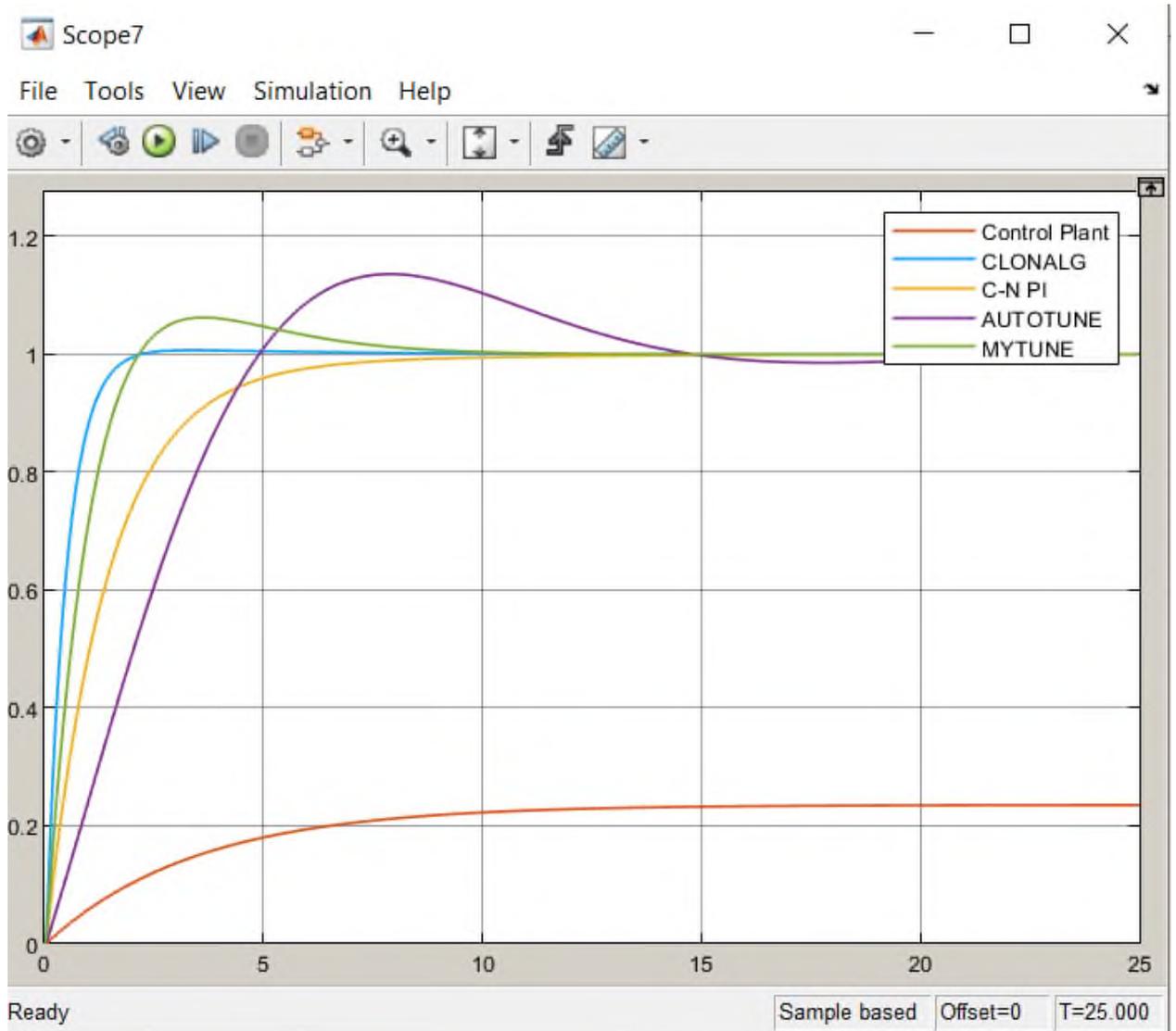


Рисунок 2.24 – Графики переходных процессов всех регуляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс исследования данной дипломной работы был тщательно изучен и разделен на две большие части.

В первой части были описаны ряд технологических процессов в металлургическом цехе, порядок функциональности металлургического цеха, функциональность металлургического цеха, изучены этапы производства меди и рассмотрены технические решения и технологические приемы производства меди (углубленно описаны печное отделение и конверторное отделение), была описана конструкция современной шестиэлектродной руднотермической печи, была подобрана наиболее подходящая SCADA–система, это Honeywell Experion PKS с описанием ее преимуществ и недостатков.

Во второй главе была подробно описана функционирование шестиэлектродной руднотермической печи, разработана структурная и функциональная схема, получена математическая модель дуговой печи, являющаяся апериодическим звеном четвертого порядка. Проанализировав динамические свойства автоматизированной системы управления технологического производства печи, была вычислена и определена устойчивость по первому методу Ляпунова, по критерию Найквиста и по критерию устойчивости Гурвица. По критерию Гурвица, разомкнутая система управления печью находится на границе устойчивости, потому что один (последний) определитель равен нулю. По критерию Найквиста замкнутая система управления печью также находится на границе устойчивости, ибо АФЧХ разомкнутой системы управления печью проходит через особую точку $(-1,0j)$, а разомкнутая система управления печью по теореме Ляпунова находится на границе устойчивости. Исследование замкнутой системы управления печью показало, что замкнутая система устойчива, потому что по первому методу Ляпунова для устойчивости необходимо чтобы все полюса имели отрицательные действительные части, что подходит под нашу систему.

Исследовав разомкнутую и замкнутую систему управления печью и получив явные результаты о устойчивости систем мы рассчитали прямые и косвенные оценки качества переходного процесса автоматизированной системы управления технологическим процессом печи. В результате полученных данных мы сравнили несколько критерий прямых и косвенных оценок:

- время регулирования;
- перерегулирование;
- число колебаний;
- частота колебаний;
- колебательность;
- время первого максимума.

Появились ряд проблем, которые необходимо решить, и решит её только регулятор. Система управления технологическим процессом печи оказалось не точной и с перерегулированием, естественно здесь не обойтись без PI–регулятора, что мы, собственно, и добавили в нашу систему управления.

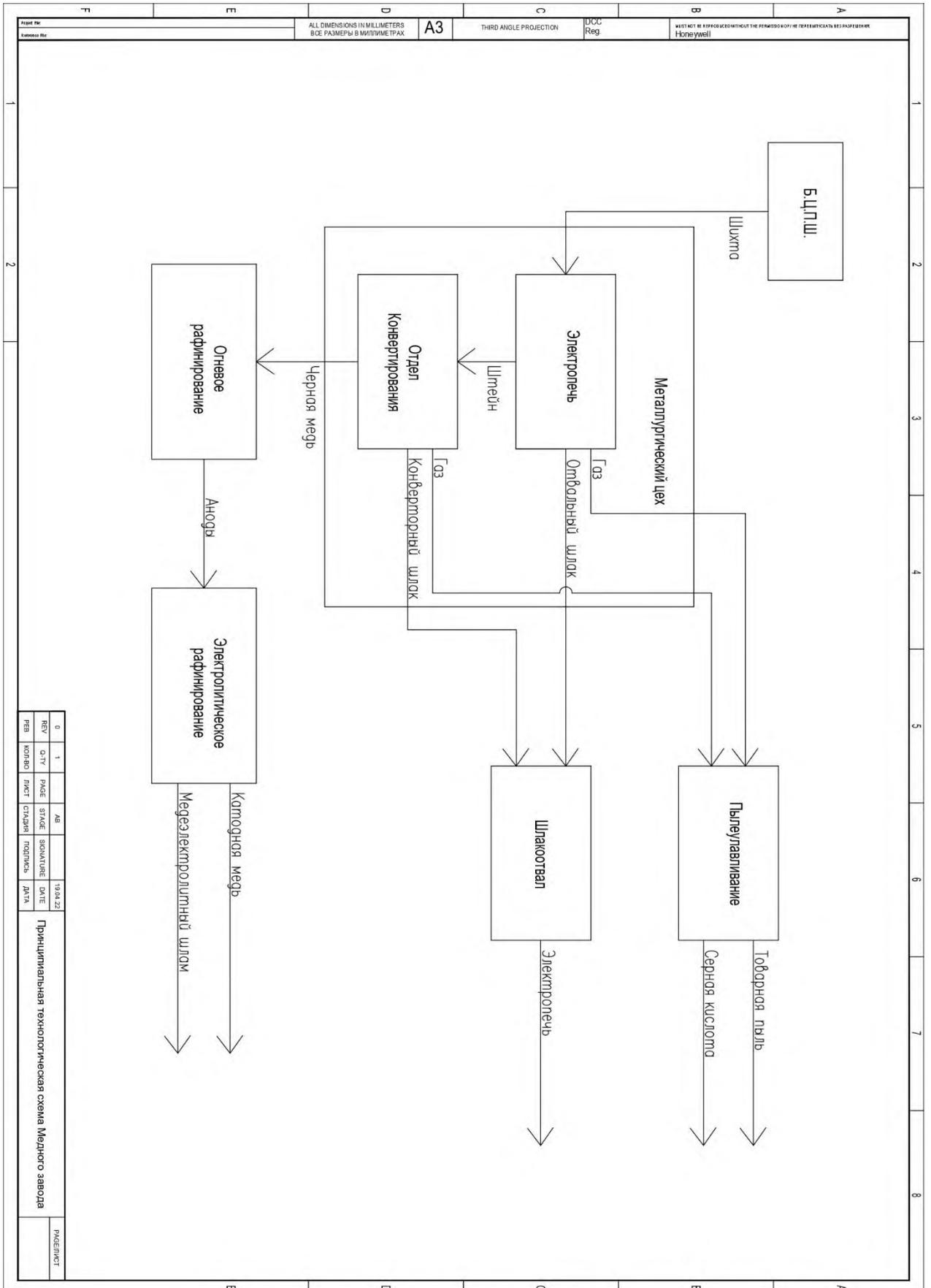
Благодаря многочисленным функциям MatLab, смогли промоделировать и сгенерировать PI-регулятор различными способами и определили, что PI-регулятор, сгенерированный методом клонального алгоритма отбора, является чуть ли не идеальным, что в реальной практике не может существовать, самым оптимальным и в тоже время реалистичным регулятором является PI-регулятором настроенный вручную.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Каганов В.Ю., Блинов О.М., Беленький А.М. Автоматизация управления металлургическими процессами: Учебник. – М.: Металлургия, 1974. - 416с.
- 2 Гронь Д.Н., Горенский Б.М. Основы построения тренажеров для исследования процессов электролитического рафинирования меди // Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании: сборник работ XX Международной научнотехнической конференции. – Пенза, 2007.
- 3 Глинков Г.М., Климовицкий М.Д. Теоритические основы автоматического управления металлургическими процессами: Учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. - 304с.
- 4 Гронь Д.Н. Компьютерный тренажер для исследования электролиза никеля // Совершенствование методов поиска и разведки, технологии добычи и переработки полезных ископаемых: сборник материалов Межрегиональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / сост. В.В. Сувейзда; ГОУ ВПО «ГУЦМиЗ». – Красноярск, 2006. – 289 с.
- 5 Грейвер Н.С. Основы металлургии: в 2 т. – М.: Металлургия, 2002. – Т.1.
- 6 Гронь Д.Н., Горенский Б.М. Компьютерный тренажер для имитирования процесса электролитического рафинирования меди // Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании: сборник работ XX Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2007.
- 7 Горенский Б.М. Автоматизированные системы имитационного управления объектами цветной металлургии: монография / КГАЦМиЗ. – Красноярск, 2002.
- 8 Горенский Б.М., Годовицкая Т.А., Даныкина Г.Б. Информационные технологии в металлургии: учебное пособие // ГОУ ВПО “Гос. ун-т цвет. металлов и золота”. – Красноярск, 2006.
- 9 Уткин Н.И. Цветная металлургия (технология отрасли): учебник. – М.: Металлургия, 2009.
- 10 Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. - 712с.
- 11 Мусаев А.А. Интеллектуальный анализ данных: учебное пособие. - СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2018. - 56с.
- 12 Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.К. Поисксовая адаптация: теория и практика. – М.: Физматлит, 2006 – 272с.
- 13 Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие / А.П.Карпенко-2-е изд. - Москва: Издательство МГГУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 446с.
- 14 Смирнов А.Н. Металлургические мини-заводы / Смирнов А.Н., В.М. Сафонов., Л.В. Дорохова., А.Ю. Цупрун. – Донецк: Норд- Пресс, 2005. - 449с.
- 15 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. С - П.: Профессия., 2004. - 752с
- 16 Воронов А.А. Теория автоматического управления Часть первая "Высшая школа",1986. – 377с

Приложение А

Схема Metallургического комплекса



| REV | QTY | PKGE | STAGE | SIGNATURE | DATE |
|-----|--------|------|--------|-----------|---------|
| 0 | 1 | | AW | | 1804.22 |
| REV | КОЛ-ВО | ЛИСТ | СТАДИЯ | ПОДПИСЬ | ДАТА |

Принципиальная технологическая схема Медного завода

РАСЧЕТ

Приложение В

Листинг программы для реализации клонального алгоритма отбора в MatLab

```
rng('default')

N = 100; % Population size
Ab = cadeia(N,44); % Antibody population
gen = 50; % Number of generations
pm = 0.5; % Mutation probability
d = 0.3; % Population to suffer random reshuffle
beta = 0.5; % Proportion of clones

% Function to optimization
f=@aza
varMin = -28; % Lower bound
varMax = 200; % Upper bound
varMiny = 0;
varMaxy = 50;
fbest = 0; % Global f best (minimum)
x = meshgrid(linspace(varMin, varMax, 61));
y = meshgrid(linspace(varMiny, varMaxy, 61))';
vxp = x;
vyp = y;
vzp = f([x(:),y(:)])
vzp = reshape(vzp,size(x));
x = decode(Ab(:,1:22),varMin,varMax);
y = decode(Ab(:,23:end),varMiny,varMaxy);
fit = f([x(:),y(:)]);
figure
imprime(1,vxp,vyp,vzp,x,y,fit)

% Hypermutation controlling parameters
pma = pm;
itpm = gen;
pmr = 0.8;

% General defintions
vfx = zeros(gen,1);
PRINT = 1;

% Generations
for it = 1:gen

    % Decode (Step 2)
    x = decode(Ab(:,1:22),varMin,varMax);
    y = decode(Ab(:,23:end),varMiny,varMaxy);
    fit = f([x(:),y(:)]);
```

Продолжение приложения В

```
[a,ind] = sort(fit);

% Select (Step 3)
valx = x(ind);
valy = y(ind);
imprime(PRINT,vxp,vyp,vzp,x,y,fit);

% Clone (Step 4)
[T,pcs] = reprod(N,beta,ind,Ab);

% Decode (Step 6)
x = decode(T(:,1:22),varMin,varMax);
y = decode(T(:,23:end),varMiny,varMaxy);
fit = f([x(:),y(:)]);
pcs = [0 pcs];
for i = 1:N

% Re-Selection (Step 7)
[~,bcs(i)] = min(fit(pcs(i)+1:pcs(i+1)));
bcs(i) = bcs(i) + pcs(i);
end

% Insert
Ab(fliplr(ind),:) = T(bcs,:);

% Editing (Repertoire shift)
nedit = round(d*N);

% Replace (Step 8)
Ab(ind(end-(nedit-1):end),:) = cadeia(nedit,44);
pm = pmcont(pm,pma,pmr,it,itpm);
vfx(it) = a(1);

% fprintf('%2d f(%6.2f,%6.2f):
%7.2f\n',it,valx(1),valy(1),vfx(it))
end

% Minimization problem
x = valx(1);
y = valy(1);
fx = vfx(end);

% Plot
figure
semilogy(vfx)
```

Продолжение приложения В

```
title('Minimization')
xlabel('Iterations')
ylabel('Best f(x,y)')
grid on
txt2 = ['F Best: ', num2str(fbest)];
text(0,1,txt2,'Units','normalized',...
     'HorizontalAlignment','left','VerticalAlignment','bottom');
txt3 = ['F Found: ', num2str(fx)];
text(1,1,txt3,'Units','normalized',...
     'HorizontalAlignment','right','VerticalAlignment','bottom');
function [T,pcs] = reprod(N,beta,ind,Ab)

% N -> number of clones
% beta -> multiplying factor
% ind -> best individuals
% Ab -> antibody population

% T -> temporary population

% pcs -> final position of each clone

T = [];
for i = 1:N
    cs(i) = round(beta*N);
    pcs(i) = sum(cs);
    T = [T; ones(cs(i),1) * Ab(ind(end-i+1),:)];
end
end

function z=aza(xx)
z=(0.095.*(xx(:,2).^2).*0.0785.*(xx(:,2).^2)-
0.0001.*xx(:,1).*xx(:,2))./( (2*0.308^2.*(xx(:,2).^2)).*(-
0.0032.*(xx(:,2).^2)-
0.0001.*(xx(:,1).^2).*xx(:,2)+0.0721.*xx(:,1).*xx(:,2)+0.2551
.*xx(:,2)))+(0.095.*(xx(:,1).^2)*(-
0.0001.*(xx(:,1).^3)+0.0777.*(xx(:,1).^2)+0.5089.*xx(:,1)-
0.0032.*xx(:,1).*xx(:,2)-0.0105.*xx(:,2)+0.8283)-
((0.308.*xx(:,2)*0.308.*xx(:,1))/(0.308.*(xx(:,2).^2)))
end

function Ab = cadeia(n1,s1)
% Antibody (Ab) chains
Ab = 2 .* rand(n1,s1) - 1;
Ab = hardlim(Ab);
end
```

Продолжение приложения В

```
function z = decode(Ab,varMin,varMax)
% x -> real value (precision: 6)
% v -> binary string (length: 22)
Ab = fliplr(Ab);
s = size(Ab);
aux = 0:1:21;
aux = ones(s(1),1)*aux;
x1 = sum((Ab.*2.^aux),2);
% Keeping values between bounds
z = varMin + x1' .* (varMax - varMin)/(2^22 - 1);
end
```

```
function [T,pcs] = reprod(N,beta,ind,Ab)
% N -> number of clones
% beta -> multiplying factor
% ind -> best individuals
% Ab -> antibody population

% T -> temporary population
% pcs -> final position of each clone

T = [];
for i = 1:N
cs(i) = round(beta*N);
pcs(i) = sum(cs);
T = [T; ones(cs(i),1) * Ab(ind(end-i+1),:)]];
end
end
```

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

На дипломную работу

Мырзамуратова Азамата Аскаровича

5В070200 – Автоматизация и управление

Тема: «Информационное обеспечение АСУ металлургическим комплексом (цехом) медного завода с использованием SCADA-системы»

Перед дипломантом ставилась задача исследования информационного обеспечения АСУ металлургическим комплексом медного завода с использованием SCADA-системы.

В первом разделе данной дипломной работы был описан ряд технологических процессов в металлургическом комплексе, функциональность и порядок функциональности металлургического комплекса, этапы производства меди и рассмотрены технические решения и технологические приемы производства меди (углубленно описаны печное отделение и конверторное отделение), была подобрана и описана с преимуществами и недостатками наиболее подходящая SCADA-система, Honeywell Experion PKS.

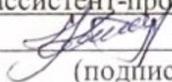
Во втором разделе подробно описано функционирование шестиэлектродной руднотермической печи, произведена проверка на устойчивость и анализ системы автоматического регулирования дуговой пещью и составлены требования на нужный регулятор. Был проанализирован клональный метод отбора искусственных иммунных систем и реализован для получения минимума целевой функции в прикладной программе Matlab. Синтезирован ПИ-регулятор на основе ИИС, минимизирующий интегральную квадратичную оценку, который имеет более высокую точность и скорость в сравнении с другими методами синтеза, которые тоже были исследованы в ходе данной работы.

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

Заключение: Считаю, что дипломант отлично справился с поставленной задачей, дипломная работа соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным работам по специальности 5В070200 – Автоматизация и управление. На основании характеристики выполненных исследований, уровня и качества выполненных результатов студент Мырзамуратов А.А. допускается к защите.

Научный руководитель

ассистент-профессор, канд.техн.наук

 Кошимбаев Ш.К.

(подпись)

«12» мая 2022 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента
Мырзамуратова Азамата Аскаревича
5B070200 – Автоматизация и управление

На тему: Информационное обеспечение АСУ металлургическим комплексом (цехом) медного завода с использованием SCADA-системы
Выполнено: пояснительная записка на 62 страницах

В рецензируемом дипломном проекте рассматривается актуальная задача разработки информационного обеспечения автоматизированной системы управления медного завода с использованием SCADA-системы.

В первой части дипломного проекта представлено описание ряда технологических процессов в металлургическом комплексе, функциональность и порядок функциональности металлургического комплекса, этапы производства меди и рассмотрены технические решения и технологические приемы производства меди (углубленно описаны печное отделение и конверторное отделение), была подобрана и описана с преимуществами и недостатками наиболее подходящая SCADA-система, Honeywell Experion PKS.

Во второй части подробно описано функционирование шестиэлектродной руднотермической печи, выполнен анализ системы автоматического регулирования дуговой печи, произведено исследование устойчивости различными способами, вычислены прямые и косвенные оценки качества переходного процесса замкнутой системы регулирования. В систему внедрён PI-регулятор, сгенерированный и рассчитанный различными методами, произведён сравнительный анализ работы системы с каждым из PI-регуляторов и в виде самого оптимального выбран PI-регулятор, сгенерированный методом клонального алгоритма отбора.

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

Оценка работы

Считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «отлично», а студент Мырзамуратов А.А. присвоения академической степени бакалавра по специальности 5B070200 – Автоматизация и управление.

Рецензент

Доктор технических наук, профессор

Биттеев Ш. Б.

(подпись)

«12» мая 2022 г.



Қолтаңбаны растаймын
Подпись заверяю

**Протокол анализа Отчёта 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: Мырзамуратов А.

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Информационное обеспечение АСУ металлургическим комплексом медного завода с использованием SCADA-системы

Научный руководитель: Шамиль Кошимбаев

Коэффициент Подобия 1: 0.7

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

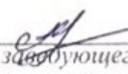
Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

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

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрывтия 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: В результате проверки на антиплагиат были получены практически нулевые коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 0,7 и Коэффициент подобия 2: 0. Не нулевой коэффициент подобия 1 объясняется тем, что в дипломной работе были использованы общепринятые термины теории управления: устойчивость, регулятор и пр. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, работа признается самостоятельной и допускается к защите.

12.05.2022
Дата


Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:
Дипломная работа допускается к защите.

12.05.2022
Дата

Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

Протокол анализа Отчёта подобия Научным руководителем

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

Автор: Мырзамуратов А.

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Информационное обеспечение АСУ металлургическим комплексом медного завода с использованием SCADA-системы

Научный руководитель: Шамиль Кошимбаев

Коэффициент Подобия 1: 0.7

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из здругих алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

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

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

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрывтия 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: В результате проверки на антиплагиат были получены практически нулевые коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 0,7 и Коэффициент подобия 2: 0. Не нулевой коэффициент подобия 1 объясняется тем, что в дипломной работе были использованы общепринятые термины теории управления: устойчивость, регулятор и пр. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, работа признается самостоятельной и допускается к защите.

12.05.2022
Дата

Подпись научного руководителя

