

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

## ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

## КАФЕДРА АВТОМАТИКИ

## На правах рукописи

УДК 681.5

## КУНАЧ ДЖАН БЕРК

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРА ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ RYC-02 ВВЭР-1000 НА БАЗЕ ПТК ТПТС НТ

## Выпускная квалификационная работа специалиста

Специальность 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

Выпускная квалификационная работа  
защищена «\_\_\_» \_\_\_\_ 2022 г.

## Оценка

## Секретарь ГЭК

Секретарь ГЭК \_\_\_\_\_

Секретарь ГЭК \_\_\_\_\_

Секретарь ГЭК \_\_\_\_\_

Секретарь ГЭК \_\_\_\_\_

г. Москва

2022

Студент-дипломник

(подпись)

Кунач Джан Берк

(ФИО)

\*Руководитель ВКР

доцент

(должность)

Кулло И.Г.

(ФИО)

М.П.

Консультант

(должность)

(подпись)

(ФИО)

\*Рецензент

(должность)

(подпись)

(ФИО)

М.П.

Зав. кафедрой, д.т.н.

(подпись)

Кишкин В.Л.

(ФИО)

\*Подписи руководителя и рецензента заверяются отделом кадров соответствующего предприятия.

Институт ядерной физики и технологий (ИЯФиТ)

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 14.05.02 «Атомные  
станции: проектирование, эксплуатация и  
инжиниринг»

КАФЕДРА «Автоматика»  
ГРУППА С16-162

«УТВЕРЖДАЮ»  
И.о. зам. зав. кафедрой «Автоматика»

\_\_\_\_\_ И.Г. Кулло  
« \_\_\_\_\_ » 2021 г.

## ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

(заполняется в 2-х экземплярах)

1. Фамилия, имя, отчество студента Кунач Джан Берк

2. Тема выпускной квалификационной работы \_\_\_\_\_

Разработка и исследование модели системы управления регулятора технической системы  
RYC-02 ВВЭР-1000 на базе ПТК ТПТС НТ

3. Срок сдачи работы: собеседование:

защита:

4. Руководитель выпускной квалификационной работы \_\_\_\_\_

Кулло Иван Геннадьевич, НИЯУ МИФИ, доцент  
(Ф.И.О. полностью, ученая степень, место работы, должность)

5. Рецензент выпускной квалификационной работы \_\_\_\_\_

(Ф.И.О. полностью, ученая степень, место работы, должность)

Москва, 2021 г.

1. Предметная область (например, автоматизация физико-энергетических установок, автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС, автоматизация физических установок и научных исследований, системы физической защиты ядерных материалов и установок) \_\_\_\_\_

Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС

---

---

2. Исходные данные:

а) объект исследования \_\_\_\_\_

Технологические системы реактора ВВЭР-1000

---

---

б) предмет разработки \_\_\_\_\_

Система управления поддержания заданного технологического параметра в контуре регулирования реактора ВВЭР-1000.

---

---

в) ссылки на нормативно-техническую документацию \_\_\_\_\_

Выговский С. Б. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР, Зверков, В. В. Автоматизированная система управления технологическими процессами АЭС, Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии», Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций»: НП-001-15

---

---

г) общие требования к результату ВКР \_\_\_\_\_

Полученные характеристики должны соответствовать реальным контурам регулирования реактора ВВЭР-1000

---

---

д) условия на выполнение работы (ограничения) \_\_\_\_\_

Модель объекта управления реализуется в виде разностных уравнений в системе реального времени. Модель системы управления реализуется на базе ПТК ТПТС в среде MWBridge.

---

---

3. Содержание ВКР:

- а) обзор работ, связанных с темой ВКР
- б) техническое задание
- в) расчетно-конструкторская, теоретическая, технологическая часть \_\_\_\_\_

Необходимо разработать структурные математические модели объекта управления, регулирующего органа и системы управления.

---

---

- г) экспериментальная часть \_\_\_\_\_

Реализация модели объекта управления в системе реального времени, реализация системы управления на базе ПТК – ТПТС НТ в системе MWBridge

---

---

- д) экономико-организационная и информационная часть \_\_\_\_\_
- 
- 

- е) охрана труда и техника безопасности, экологическая часть \_\_\_\_\_
- 
- 

4. Отчетный материал:

- а) пояснительная записка (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2017 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления»).
- б) презентация в формате PowerPoint.

в) макетно-экспериментальная часть  
временные диаграммы работы модели объекта управления, работы регулятора по поддержанию заданного параметра используя архивные данные системы управления в режиме реального времени.

5. Консультанты ВКР

КОНСУЛЬТАНТ (Ф.И.О., место работы должность)	Пункт(ы) задания

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

№ п/п	Наименование этапов работы	Сроки выполнения этапов
1	Получение задания на ВКР	13.10.2021 г
2	Ознакомление с исходными данными задания на ВКР. Разработка структурных математических моделей объекта управления и исполнительного механизма.	20.10.2021 г
3	Разработка и реализация модели объекта управления в системе Matlab. Проведение исследований системы управления. Выбор закона регулирования.	01.11.2021 г
4	Разработка и реализация модели объекта управления в системе реального времени.	30.11.2021 г
5	Проверка алгоритмов функционирования системы управления и человеко-машинного интерфейса.	15.12.2021 г
6	Оформление отчета и защита ВКР	20.01.2022 г.

\*\* Руководитель выпускной квалификационной работы \_\_\_\_\_ Кулло И.Г.  
(подпись) (ФИО)  
+7 916 9419462, [IGKullo@mephi.ru](mailto:IGKullo@mephi.ru)  
(контактная информация: тел., e-mail)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ Кунач Джан Берк  
(подпись) (ФИО)

«\_\_\_\_» 2021 г.

\*\* Если руководитель ВКР не является сотрудником НИЯУ МИФИ, его подпись заверяется печатью отдела кадров по месту работы.

## РЕФЕРАТ

Объём пояснительной записи 77 с., 56 рис., 2 табл., 11 источн., 1 прил.  
ВВЭР-1000, РАСШИРИТЕЛЬ ПРОДУВКИ ПАРОГЕНЕРАТОРА, АСУТП,  
RYC-02, ПТК, MWBRIDGE, MikBASIC, MATLAB, SIMULINK, АлгоВУ,  
ЧМИ

Объектом исследования является регулятор давления в расширителе продувки парогенератора.

Цель работы – разработка и исследование модели системы автоматического управления регулятора технической системы RYC-02 на базе ПТК ТПТС НТ и в среде MWBridge.

В основу работы положен сравнительный анализ динамических свойств различных схем автоматической системы регулирования. По результатам исследований сделаны выводы и выбрана наиболее эффективная и подходящая схема с определенными параметрами.

В процессе подготовки данной работы исследованы и реализованы математическая модель объекта управления и исполнительного механизма, алгоритм работы регулятора, моделирование системы управления давления в расширителе продувки ПГ.

В результате исследования был создан регулятор, поддерживающий давление в расширителе продувки парогенератора на уровне 8 кгс/см<sup>2</sup>.

Объект управления и исполнительный механизм реализованы на ПК MWBridge/MikBASIC в виде разностных уравнений. При создании ЧМИ в Display разработана визуальная форма системы управления и проверены выводы исследования.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	8
ВВЕДЕНИЕ .....	9
1 Литературный обзор .....	12
1.1 Общая характеристика реактора ВВЭР-1000.....	12
1.2 Парогенератор в первом контуре ВВЭР-1000 .....	12
1.3 Система продувки ПГ .....	14
1.3.1 Назначение системы продувки ПГ .....	14
1.3.2 Расширители продувки ПГ RY10B01,02 .....	15
1.4 Основные понятия теории автоматического управления.....	16
1.4.1 Основные элементы автоматического регулирования .....	18
1.4.2 Реакция систем автоматического управления.....	19
1.4.3 Законы регулирования .....	21
1.5 Системы автоматического регулирования на АЭС с реактором ВВЭР-1000 .....	26
1.5.1 Система контроля и управления на АЭС.....	28
1.5.2 Основные характеристики регулирования давления в 1-м контуре .....	31
1.5.3 Регулирование уровня воды в парогенераторе (ПГ).....	31
1.5.4 Основные характеристики регулирования давления в 2-м контуре .....	32
1.5.5 Регуляторы СКУ РО.....	32
1.6 Регулятор давления в расширителе продувки парогенератора.....	34
1.7 Постановка задачи .....	36
2 Описание технических средств .....	38
2.1 Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП).....	38
2.1 Функциональная структура АСУ ТП .....	39
2.2 Программно-технические средства ТПТС .....	42
2.3 Программно-технический комплекс ТПТС-НТ.....	42

2.4 Компоненты ТПТС-НТ .....	47
2.4.1 Приборные стойки .....	47
2.4.2 Стойки питания (СП) .....	48
2.4.3 Стойки сопряжения(СС).....	48
3 Построение модели давления в расширителях продувки парогенератора	50
3.1 Разработка модели объекта управления.....	50
3.1.1 Общее сведения при описании аналитических моделях ОУ .....	50
3.1.2 Условия и ограничения математической модели ОУ .....	52
3.2 Составление математической модели ОУ.....	53
3.3 Исполнительный механизм .....	54
3.4 Реализация и проверка модели ОУ и ИМ в MatLab/Simulink .....	55
4 Исследование модели системы управления в реальном времени .....	60
4.1 Системы управления с базами данных в реальном времени.....	60
4.2 База данных программы MWBridge .....	60
4.3 Кодификация ОУ и ИМ в среде MikBASIC .....	61
4.4 Синтез регулятора в среде программирования Алго ВУ.....	64
4.5 Настройка и исследование влияния регулятора на качество регулирования .....	65
4.6 Разработка и описание ЧМИ .....	71
4.6.1 Создание мнемосхемы .....	71
4.6.2 Исследование системы регулирования с разными коэффициентами .....	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	81
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	82
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	83

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АСУ ТП	– автоматизированная система управления технологическими процессами
АЭС	– атомная электростанция
БД	– база данных
ВВЭР	– водо-водяной энергетический реактор
ИМ	– исполнительный механизм
НЭ	– нормальная эксплуатация
ОУ	– объект управления
ПГ	– парогенератор
ПТК	– программно-технический комплекс
РО	– реакторное отделение
САР	– система автоматического регулирования
САУ	– система автоматического управления
СКУ	– система контроля и управления
ТПТС	– типовые программно-технические средства
ЧМИ	– человеко-машинный интерфейс

## ВВЕДЕНИЕ

После пуска первой атомной электростанции (АЭС) в г. Обнинск атомная энергетика доказала, что энергию атома можно использовать в мирных целях. В настоящее время атомная энергетика является одним из лучших способов производства энергии и считается одним из самых безопасных источников энергии для экологии.

Для производства электрической энергии большое значение имеют следующие типы реакторов: ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор), РБМК (реактор большой мощности канальный) и БН (реактор на быстрых нейтронах). К настоящему времени накоплен большой опыт производства электроэнергии с использованием данных типов реакторов, подтверждающий эффективность и безопасность их эксплуатации.

Кроме применения в энергетике, ядерная энергия также внедряется в разных областях. Ядерную энергию используют в медицине, промышленных и исследовательских целях, сельском хозяйстве, транспортных средствах, и т.д.

С развитием технологии системы управления и безопасности в АЭС, во-первых, их количество стало больше, во-вторых, они стали более технически сложными и быстродействующими. Накопленный опыт показывает, что для безопасного использования ядерной энергии требуется внедрение технологических систем с большой степенью автоматизации и контроля. На данный момент новые проекты (АЭС-2006) российской атомной промышленности имеют современные технологические системы управления, что повышает безопасность и эффективность эксплуатации АЭС.

В ядерном реакторе и в другом техническом оборудовании наблюдаются различные физические явления и процессы; и эти явления требуют периодического или постоянного мониторинга и контроля. С помощью автоматического регулирования проводятся мониторинг и контроль технической системы. Автоматические регуляторы обеспечивают

поддержание основных технологических параметров блока в допустимых пределах или изменение их по заданному закону в проектных режимах без автоколебаний. Основная цель регулирования – достижение сбалансированной динамики этих процессов и поддержания параметров в допустимых пределах для безопасной эксплуатации АЭС и их элементов.

Функциональная структура АСУ ТП определена в соответствии с задачами, которые необходимо выполнять, и подразделяется на основные системы и подсистемы. Все подсистемы имеют средства мониторинга и управления компонентами и устройствами, например, датчики, клапаны, двигатели.

В состав АСУ ТП входят следующие подсистемы: СКУ (система контроля и управления), СУЗ (система управления и защиты), АСРК (автоматизированная система радиационного контроля), СВБУ (система верхнего блочного уровня) и другие. Например, СКУ НЭ (система контроля и управления нормальной эксплуатации) обеспечивает контроль и управление 40 и более технологическими системами, которые реализуют свои алгоритмы срабатывания [1]. Каждая система и подсистема предназначены для выполнения определенной задачи в атомной станции.

АСУ ТП энергоблока имеет иерархическую структуру, состоящую из трех уровней, каждый из которых имеет собственные функции и средства: уровень связи с технологическими объектами управления (ТОУ), нижний уровень эксплуатации и верхний уровень. На уровне связи с ТОУ обеспечивается подготовка и проведение автоматических измерений физических и технологических параметров технологического процесса. Реализация алгоритмов управления системами осуществляется в нижнем уровне АСУ ТП. В верхнем уровне обрабатывается информация и обеспечивается её архивирование.

Для построения АСУ ТП существуют специальные программно-аппаратные комплексы средств автоматизации, называемые ТПТС. ТПТС включает в себя набор аппаратных и программных средств для контроля и

управления технологическими объектами. На сегодняшний день разработаны несколько поколений ТПТС: ТПТС-НТ, ТПТС-СБ и ТПТС-ЕМ и другие.

В рамках настоящей выпускной квалификационной работы по направлению «автоматизированные системы управления» произведены моделирование в разных средах в MATLAB/Simulink и разработка компонентов САУ для регулирования давления в расширителях продувки парогенераторов в реальном времени.



## 1 Литературный обзор

### 1.1 Общая характеристика реактора ВВЭР-1000

ВВЭР-1000 является водо-водяным реактором корпусного типа. Вода является теплоносителем и замедлителем в реакторе ВВЭР-1000.

В реакторах ВВЭР-1000 есть двухконтурная структура, первый и второй контур. Вода, очищенная от примесей циркулирует через реактор, который находится в первом контуре. Вода нагревается до 320 °C проходя активную зону вследствие цепной ядерной реакции.

Для того чтобы вода оставалась в жидком состоянии, её необходимо держать под давлением 16,2 МПа. После корпуса реактора нагретая вода поступает в парогенератор (ПГ) и отдает тепло воде второго контура и генерируется насыщенный пар. Затем пар вращает турбину и генерируется электричество.

### 1.2 Парогенератор в первом контуре ВВЭР-1000

Парогенератор (ПГВ-1000) предназначен для выработки насыщенного пара давлением 64 кгс/см<sup>2</sup> с влажностью 0.2% при температуре 220 °C и являются составной частью циркуляционного контура.

Общий вид парогенератора ПГВ-1000 показан на рисунке 1.

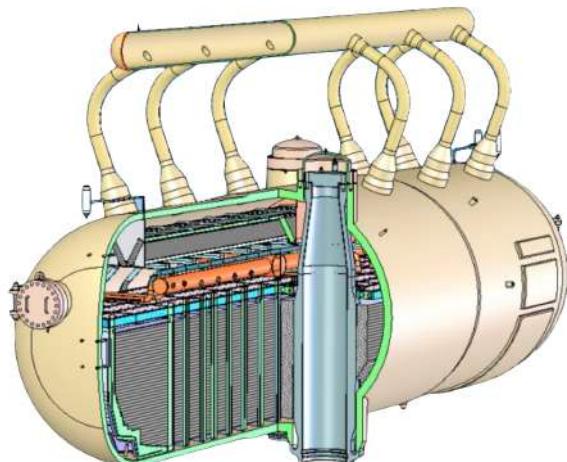


Рисунок 1 - Общий вид парогенератора ПГВ-1000

Основные характеристики парогенератора представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные характеристики парогенератора ПГВ-1000

<b>Основные характеристики ПГВ-1000</b>	
Тепловая мощность на 1 ПГ	750 МВт
Число ПГ на 1 реактор	4
Электрическая мощность на 1 ПГ	250 МВт
Паропроизводительность	1470+103 т/час
Расход теплоносителя 1 к через ПГ, т/час при работе на 4-х петлях при работе на 2-х петлях	21200 (+1000) (-1200) 26000
Сопротивление ПГ по 1 контуру при ном. расходе	1.25 кгс/см <sup>2</sup>
Сопротивление ПГ по 2 контуру при ном. параметрах	1.1 кгс/см <sup>2</sup>
Средняя длина теплообменной трубки	11.1 м
Число/диаметр теплообменных труб	11500/16x1.5мм
Скорость теплоносителя в трубках	4.89 м/сек
Объем воды для заполнения ПГ до рабочего уровня	81.5 м <sup>3</sup>
Поверхность нагрева	6115 м <sup>2</sup>
Внутренний диаметр корпуса	4000 м
Длина	13.84 м
Объем воды 1 контура в ПГ	20.5 м <sup>3</sup>
Толщина корпуса в средней части/на днищах	145/120 мм
Материал корпуса и коллекторов	сталь 10ГН2МФА
Материал теплообменных труб	сталь 08Х18Н10Т
Материал коллектора питательной воды	сталь 20

В парогенераторе вода из реактора поступает в горячий коллектор проходя теплопередающих труб, отдает тепло воде второго контура и

образуется пар. Потом входит в холодный коллектор и на всас главного циркуляционного насоса (ГЦН).

Пар осушается в паровом объеме и поступает в сепаратор. Отсепарированный конденсат собирается в корыто и отводится системой трубок под уровень воды. Осущенный пар выходит из парогенератора через 10 паровых патрубков в коллектор пара и по паропроводам подается на турбину [2].

### **1.3 Система продувки ПГ**

#### **1.3.1 Назначение системы продувки ПГ**

Система продувки парогенератора предназначена для поддержания норм водно -химического режима котловой воды ПГ. Система продувки ПГ представляет собой систему нормальной эксплуатации.

Требованиями системы продувки ПГ являются следующие [3]:

- обеспечение непрерывной продувки с расходом 7,5 т/час от каждого ПГ;
- обеспечение возможности проведения режима периодической продувки с расходом 30 т/час и суммарный расход продувочной воды от всех парогенераторов должен составлять 60 т/час;
- обеспечение возможности дренирования каждого парогенератора с расходом не менее 30 т/час при температуре котловой воды менее 100 °C.

В системе продувки ПГ есть две технологических подгруппы: RY10 – подгруппа продувки ПГ и RY30 – подгруппа дренирования парогенераторов. RY10 предназначена для поддержания качества воды ПГ и состоит из следующих компонентов:

- расширители продувки RY10B01,02;
- регуляторы уровня и давления в расширителях продувки с регулирующими клапанами RY10S05 и RY10S17;
- регенеративный теплообменник продувки RY10W01;
- доохладитель продувки RY10W02;

- трубопроводы непрерывной и периодической продувки с дроссельными устройствами;
- арматура, трубопроводы и контрольно-измерительные приборы (КИП).

Расположение оборудования системы продувки ПГ показано на рисунке 2.



1 - расширители продувки RY10B01,02; 2 - регенеративный теплообменник продувки RY10W01; 3 - доохладитель продувки RY10W02; 4 - бак RY30B01; 5 - охладители дренажей RY30W01,02; 6 - насосгидроиспытаний парогенератора; 7 - насос RY30D01

Рисунок 2 - Расположение оборудования системы продувки ПГ

### 1.3.2 Расширители продувки ПГ RY10B01,02

Расширители продувки ПГ предназначены для разделения продувочной воды на пар и воду. Разделение продувочной воды происходит за счет расширения и центробежного эффекта. Отсепарированный пар направляется в паровую магистраль деаэраторов турбинного отделения по трубопроводу Ду250, и отсепарированная вода из расширителей продувки поступает в регенеративный теплообменник продувки парогенератора [3].

Давление в расширителях продувки ПГ поддерживается регулирующим клапаном RY10S17 на уровне 8 кгс/см<sup>2</sup>. Этот клапан установлен на трубопроводе отвода пара в деаэраторы турбинного отделения. Предохранительный клапан типа СППК-4Р-16 Ду200 Ру16 защищает расширители продувки от превышения давления и настроен на срабатывание при давлении 8.8 кгс/см<sup>2</sup>.

#### **1.4 Основные понятия теории автоматического управления**

В состав автоматизированных систем управления входят основные элементы, представленные в целом блоками функций, организованными определенным образом, в соответствии с технологическими процессами, которые необходимо контролировать.

Существует два наиболее распространенных принципа регулирования для систем автоматического управления (САУ): принцип компенсации (управление по возмущению) и принцип обратной связи (регулирование по отклонению).

*Принцип компенсации (управление по возмущению):* разомкнутая цепь не обеспечивает требуемой точности выполнения алгоритма функционирования при больших возмущающих воздействиях. Измерив возмущение, можно внести корректиды в алгоритм управления для повышения точности, которые компенсировали бы отклонения алгоритма функционирования. При построении САУ по этому принципу регулирующее воздействие вырабатывается регулятором в зависимости от величины возмущения. Системы регулирования по этому принципу являются разомкнутыми, поскольку обратная связь в них отсутствует. Если система может компенсировать все возмущения в системе, то регулируемая величина не будет отклоняться от заданного значения и компенсация достигается только по измеряемым возмущениям.

*Принцип обратной связи (регулирование по отклонению):* автоматическая система регулирования по отклонению называется

системой, в которой измеряется отклонение регулируемой величины от заданного значения, и в зависимости от измеренного отклонения подается такое воздействие на регулирующий орган, которое уменьшает величину отклонения [4].

Структурная схема контура принципов компенсации и обратной связи показана на рисунке 3.

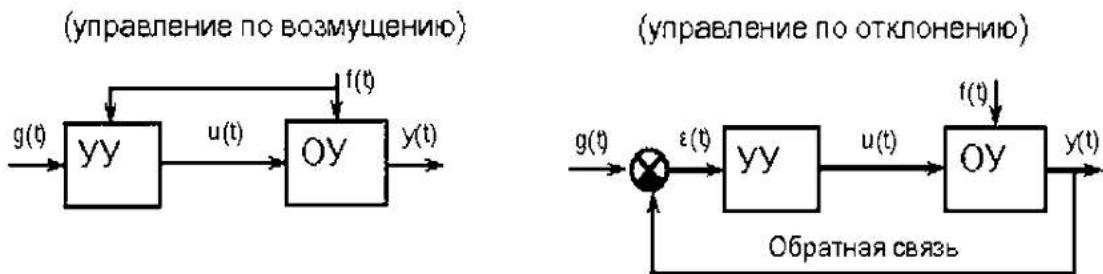


Рисунок 3 - Структурная схема контура двух принципов регулирования

Проектирование регулятора производилось с учетом следующих характеристик:

- регулятор должен реагировать на отклонение контролируемого параметра, независимо от его причины;
- регулятор должен обеспечивать стабильную долгосрочную эксплуатацию объекта и стабилизацию контролируемого параметра с приемлемой точностью;
- автоматическая система управления должна наблюдать и реагировать в соответствии с результатами мониторинга его параметра вывода.

С учетом указанных характеристик в целях проектирования системы управления в соответствии с требованиями был выбран принцип обратной связи (регулирование по отклонению).

#### 1.4.1 Основные элементы автоматического регулирования

Поддержание технологических параметров (аналоговых или дискретных сигналов) в соответствии с заданными значениями является одной из основных задач автоматических систем регулирования замкнутого цикла (с обратной связью).

В общем системы автоматического управления с обратной связью состоят из нескольких элементов (блоков), по которым циркулируют рассматриваемые сигналы.

Автоматизированные системы управления состоят из следующих основных элементов:

- регулятор;
- исполнительный механизм;
- объект управления;
- датчики.

Для того, чтобы показать взаимосвязи этих блоков, используют структурные схемы. На них каждый элемент изображается в виде прямоугольника, внутри которого записывается его передаточная функция. Вход и выход блока показывают соответственно «входящей» и «выходящей» стрелками.

Структурная схема контура автоматического регулирования с основными элементами управления приведена ниже на рисунке 4.



Рисунок 4 - Структурная схема контура автоматического регулирования с основными элементами управления

*Устройство управления или регулятор* контролирует состояние объекта управления и производит необходимые сигналы управления  $u(t)$ . Устройство управления собирает данные с измерительного устройства (датчики), сравнивает их, после этого реагирует на их изменение по специальным алгоритмам (законы управления) с указанным качеством регулирования.

*Исполнительный механизм* представляет собой устройства, предназначенные для перемещения регулирующего органа (РО) в системах автоматического регулирования (САР), непосредственно осуществляющие механическое перемещение (или поворот). Изменения положения регулирующего органа вызывают изменение потока энергии или материала, поступающего на объект управления  $u'(t)$ , устранивая отклонения регулируемой величины от заданного значения. Исполнительные механизмы усиливают и преобразовывают сигнал управления.

*Объект управления* — это физический объект, которым необходимо управлять для получения требуемого результата. Взаимодействие с объектом управления происходит путём подачи на его условный вход управляющего воздействия (которое корректирует процессы протекающие в ОУ), при этом на выходе получается изменённый параметр (который является процессом-следствием).

#### **1.4.2 Реакция систем автоматического управления**

Автоматизированные системы управления обычно состоят из отдельных блоков, каждый из которых описывается уравнениями низкого порядка (первого или второго). Чтобы понимать работу системы в целом необходимо хорошо представлять, как ведут себя её отдельные элементы. Математическая модель элемента, соединения элементов или любой части системы называется *звеном*. Звенья, как и системы, могут описываться дифференциальными уравнениями довольно высокого порядка и их можно

представить в виде передаточных функций с помощью преобразования Лапласа.

Звенья классифицируются в соответствии с характером их временных ответов и дают представление о реакции системы управления. Различные типовые звенья представлены ниже.

*Ответ первого порядка:*

- устойчивая апериодическая реакция;
- неустойчивая апериодическая реакция.

*Ответ второго порядка:*

- устойчивая колебательная реакция;
- неустойчивая колебательная реакция;
- консервативная (колебательная вырожденная) реакция.

*Ответ высшего порядка:*

- системы более высокого порядка могут быть изучены путем их приближения к их доминирующему полюсам, поскольку их переходный ответ имеет сходные характеристики.

Для контроля параметра давления в расширителях продувки парогенератора (ПГ), в зависимости от процесса, который необходимо контролировать, проектирование осуществляется в соответствии со следующими требованиями.

Системы управления нацелены на вычисление значения сигнала ошибки  $\varepsilon(t)$  относительно разности, которая существует с опорным значением  $g(t)$  и значением, полученным контролируемым параметром  $y(t)$ . Эта разница  $\varepsilon(t)$  определяет величину действия регулятора  $u(t)$ , который отправляется исполнительному механизму, который генерирует управляющее действие  $u'(t)$  для регулирования контролируемого параметра.

Чтобы определить характеристики каждого из выполняемых процессов, необходимо учитывать следующие критерии:

- процесс, представленный объектом управления, имеет апериодический характер;
- значение реакции САУ должно быть пропорционально заданной уставке;
- временная реакция САУ должна быть стабилизирована в соответствующее время.

В соответствии с этими повышенными условиями можно предположить, что передаточная функция по отношению к контролируемому параметру может представлять собой апериодическое звено 1-го порядка, неколебательный (апериодический) характер переходного процесса.

#### **1.4.3 Законы регулирования**

Регулирование является одной из основных задач, которые выполняют оборудование и инструменты на АЭС. Функция регулирования связана с технологическим параметром, который необходимо контролировать. Закон регулирования имеет разные характеристики при разных требованиях, которые относятся к системам.

Регуляторы образуют управляющий сигнал согласно различным алгоритмам. В зависимости от используемого алгоритма регуляторы подразделяются на:

- пропорциональные (П);
- интегральные (И);
- пропорционально-интегральные (ПИ);
- пропорционально-дифференциальные (ПД);
- пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД);
- релейные (двух- или трехпозиционные);
- регуляторы на базе нечеткой логики;
- регуляторы на базе искусственных нейронных сетей.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный  
регулятор является наиболее часто используемым в АСУ.

(ПИД)

ПИД формирует управляющий сигнал, состоящий из трех типовых регуляторов: пропорциональный, интегральный и дифференциальный.

Общий вид системы с регулятором показан ниже на рисунке 5:

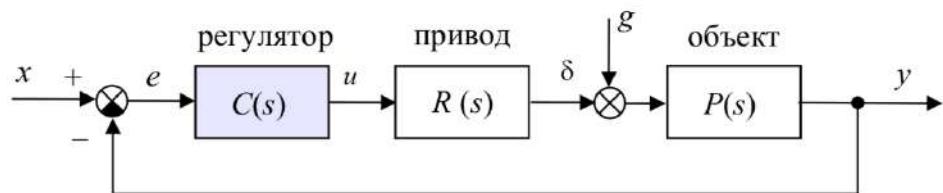


Рисунок 5 - Общий вид системы управления с регулятором

### **Пропорциональный закон (П-Закон) регулирования**

Регулятор представляет собой простой усилитель с передаточной функцией  $C(s) = K_{рег}$ , и его выход – ошибка регулирования  $e(t)$ , умноженная на коэффициент  $K_{рег}$ . Поэтому П-регуляторы перемещают регулирующий орган САР пропорционально ошибке регулирования  $e(t)$ . Коэффициент  $K_{рег}$  является коэффициентом передачи регулятора и численно равен величине перемещения регулирующего органа САР. П-регулятор дает относительно медленные переходные процессы и ненулевую статическую ошибку. Структурная схема П-регулятора показана ниже на рисунке 6.



Рисунок 6 - Структурная схема П-регулятора

Преимущества П-регулятора:

- простота реализации;
- можно достичь высокого быстродействия;

- обеспечивается необходимый уровень выходного сигнала.

Недостатки П-регулятора:

- практически неустранимая ошибка регулирования;
- если устранить ошибку регулирования, теряется устойчивость и качество.

### **Интегральный закон (И-Закон) регулирования**

И-регуляторы перемещают регулирующий орган САР пропорционально интегралу от ошибки регулирования  $e(t)$ . Схема И-регулятора приведена ниже на рисунке 7:

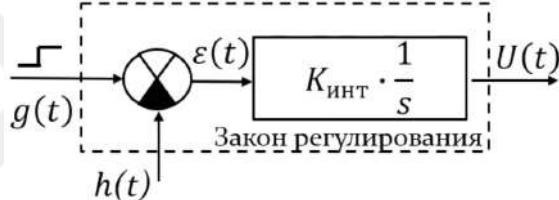


Рисунок 7 - Структурная схема И-регулятора

И-регулятор накапливает ошибку регулирования и позволяет контроллеру устранить статическую ошибку. Коэффициент Кинт является коэффициентом передачи регулятора и численно равен скорости перемещения регулирующего органа САР.

Преимущества И-регулятора:

- простота реализации;
- отсутствует ошибка регулирования.

Недостатки И-регулятора:

- переходные процессы, преимущественно, колебательные;
- часто применяется только для объектов с самовыравниванием.

## **Пропорционально-интегральный закон (ПИ-Закон) регулирования**

Регулятор на основе ПИ-закона регулирования называется ПИ-регулятором. В ПИ-регуляторе скорость перемещения регулирующего органа пропорциональна ошибке регулирования и скорости изменения регулируемой величины. В таком регуляторе переходной процесс несколько замедляется, так как интегратор выдает сигнал, который пропорционален накопленной ошибке. Но в установившемся состоянии при возмущении за счет интегрального канала обеспечивается нулевая ошибка.

Структурная схема ПИ-регулятора показана на рисунке 8.

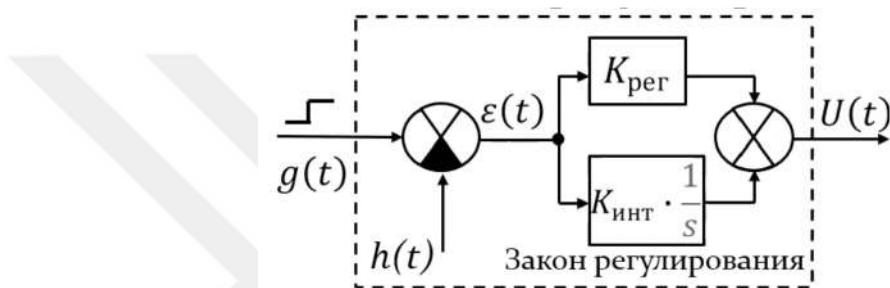


Рисунок 8 - Структурная схема ПИ-регулятора

Преимущества ПИ-регулятора:

- простота реализации;
- несложно настроить параметры подбором;
- высокая точность.

Недостатки ПИ-регулятора:

- не обеспечиваются высокие показатели качества (из-за большого времени регулирования и перерегулирования);
- для большого диапазона ставок не пригоден.

## **Пропорционально-дифференциальный закон (ПД-Закон) регулирования**

Регулятор на основе ПД-закона регулирования называется ПД-регулятором. ПД-регуляторы перемещают регулирующий орган САР пропорционально ошибке регулирования  $e(t)$  и скорости её изменения. Из-за

того, что ПД регулятор физически нереализуем, в его состав добавляется апериодическое звено. Д-составляющая полезна при резком увеличении уставки и устраниет резкий рост регулируемой величины до минимизации ошибки.

На рисунке 9 изображена схема ПД-регулятора.

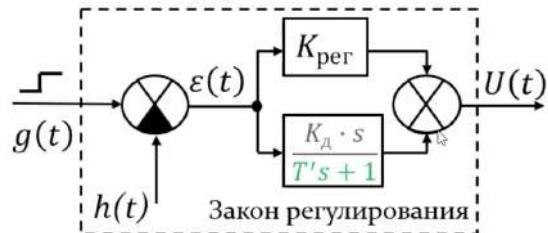


Рисунок 9 - Структурная схема ПД-регулятора

Преимущества ПД-регулятора:

- по сравнению с п-регулятором быстродействие улучшается благодаря д-составляющей;
- подавление колбасных переходных процессов происходит.

Недостатки ПД-регулятора:

- неустранимая статическая ошибка;
- точная настройка необходима;
- физически нереализуемый в чистом виде.

### **Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-Закон) регулирования**

Регулятор на основе ПИД-закона регулирования называется ПИД-регулятором. В ПИД-регуляторах скорость перемещения регулирующего органа пропорциональна ошибке регулирования, интегралу и скорости изменения регулируемой величины. ПИД-регулятор оказывает регулирующее воздействие на объект управления, которое позволяет уменьшить время регулирования и добиться наименьшего перерегулирования без статической ошибки.

На рисунке 10 приведена схема ПИД-регулятора.

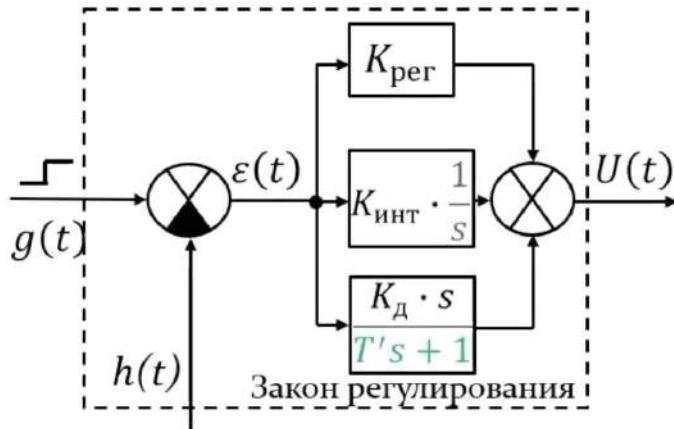


Рисунок 10 - Структурная схема ПИД-регулятора

Преимущества ПИД-регулятора:

- регулятор может справляться со скачкообразно изменяющейся уставкой;
- обеспечиваются наилучшие показатели качества;
- высокая точность.

Недостатки ПИД-регулятора:

- сложная реализация;
- сложность настройки.

Принимая во внимание характеристики процесса, подлежащего контролю (контроль параметра давления в расширителях продувки парогенератора), конструкция регулятора была рассмотрена в соответствии с типом ПИ-регулятора.

## 1.5 Системы автоматического регулирования на АЭС с реактором ВВЭР-1000

В заранее установленных пределах стабильность и поддержание технологических параметров контролируются САУ в любое время. Регуляторы на атомных станциях связаны в соответствии с подсистемой принадлежности и параметром, который они регулируют, и могут оказывать прямое влияние на производство энергии.

Регулирование определенного параметра вызывает реакцию или изменение другого параметра в зависимости от физического процесса, который их включает.

На атомной электростанции существует достаточное контрольно-измерительные оборудование для мониторинга и контроля значений наиболее важных параметров (нейтронный поток, давление, температура, уровень охлаждающей жидкости в корпусе реактора и т.д.) как в активной зоне, так и в остальной части установки и ее узлов. Для нормальных организаций и управления регулирующими органами мониторинг и контроль указанных параметров может осуществляться на основе устройств с базой данных в реальном времени типовых программно-технических средств (ТПТС).

Приборы и оборудование, используемые на АЭС, должны удовлетворять ключевым требованиям безопасной эксплуатации. Управляющие системы безопасности (УСБ) должны соответствовать следующим принципам безопасности [1]:

- 1) принцип разнообразия – принцип повышения надежности систем путем применения в разных системах (либо в пределах одной системы в разных каналах) различных средств и/или аналогичных средств, основанных на различных принципах действия, для осуществления заданной функции;
- 2) принцип независимости – принцип повышения надежности системы путем применения функционального и/или физического разделения элементов (каналов), для которых отказ одного элемента не приводит к отказу другого элемента;
- 3) принцип резервирования – принцип повышения надежности систем путем применения структурной, функциональной, информационной и временной избыточности по отношению к минимально необходимому и достаточному для выполнения системой заданных функций объему.

Разнообразие, независимость и резервирование должны быть такими, чтобы любые единичные отказы в УСБ не нарушали их работоспособность, а также обеспечивалась защита от отказов по общей причине.

### **1.5.1 Система контроля и управления на АЭС**

Система контроля и управления является достаточно сложной и функционирует с большой скоростью, что позволяет управлять процессами и оборудованием атомной станции. Система контроля и управления нормальной эксплуатации (СКУ НЭ) предназначена для того, чтобы контролировать и управлять оборудованием нормальной эксплуатации соответствующих технологических систем во всех предусмотренных режимах работы энергоблока.

Система контроля и управления обеспечивает автоматизацию технологических процессов работы систем нормальной эксплуатации, которые важны для безопасности:

- защиту оборудования и персонала при нарушениях нормальной эксплуатации, включая отказы оборудования;
- экономичность и устойчивость технологических процессов.

В режиме штатного функционирования СКУ НЭ выполняет следующие функции:

- сбор, обработка информации и формирование сигналов о выходе параметров за установленные пределы;
- контроль за состоянием технологического оборудования и представление информации оперативному персоналу;
- автоматическое регулирование;
- непрерывной контроль исправности технических средств системы и периодические проверки её функционирования с участием персонала;
- дистанционное управление;

- реализация локальных технологических защит и блокировок нормальной эксплуатации систем с выдачей управляющих воздействий на технологическое оборудование.

СКУ НЭ состоит из оборудования и программно-технических комплексов (ПТК) [1]:

- ПТК СКУ НЭ;
- датчиков;
- средств оперативно-диспетчерского управления (ОДУ);
- кабелей.

ПТК СКУ НЭ состоят из следующих подразделений, обеспечивающих удобство производства пуско-наладочных работ и эксплуатации:

- ПТК СКУ РО для контроля и управления оборудованием реакторного отделения;
- ПТК СКУ ТО для контроля и управления оборудованием турбинного отделения;
- ПТК СКУ СВО для контроля и управления оборудованием спецводоочистки;
- ПТК СКУ вентиляции для контроля и управления системами вентиляции;
- ПТК СКУ ТГ для контроля и управления оборудованием охлаждения генератора;
- ПТК ЭЧСР для контроля и управления системой регулирования турбины.

СКУ РО состоит из многих подсистем. Например:

- система подпитки-продувки;
- система очистки воды бассейна выдержки;
- система газовых сдувов;

- система сжигания водорода и другие.

СКУ ТО состоит из многих подсистем. Например:

- система паропроводов свежего пара;
- система основной питательной воды;
- подогреватели высокого давления;
- система основного конденсата и другие.

СКУ В состоит из следующих подсистем:

- вентиляция реакторного отделения;
- вентиляции турбинного отделения;
- системы вентиляции зданий.

СКУ СВО состоит из следующих подсистем:

- системы очистки воды первого контура;
- системы хранения и переработки теплоносителя;
- системы очистки продувочной воды парогенераторов;
- системы переработки трапных вод;
- системы спецканализации и другие.

Необходимо учитывать, что процесс деления ядер приводит к выделению радиоактивных продуктов. В этом процессе используются ядерное топливо, теплоноситель, который активируется при прохождении через активную зону. Чтобы избежать от выброса радиоактивных материалов и обеспечить безопасность окружающей среды, данный процесс должен проводиться в полностью герметичном закрытом контуре.

Регулирование в полностью замкнутом контуре является сложной задачей для проектных решений и систематизации атомных электростанций. САУ с целью регулирования технологических параметров должна иметь определенные характеристики для их внедрения в автоматизированные процессы управления:

- высокая степень точности;

- надежность;
- стабильность.

### **1.5.2 Основные характеристики регулирования давления в 1-м контуре**

Взаимодействия между физическими параметрами в первом контуре должны тщательно контролироваться, поскольку отклонение одного из них может иметь значительное влияние на изменение другого параметра и может быстро выйти из-под контроля.

Назначение регулирования давления в первом контуре заключается в выполнении заданной программы регулирования давления в первом контуре. Регулируемым параметром является давление на выходе из реактора. Закон регулирования степени открытия регулирующего клапана впрыска – пропорциональный. Регулятор работает с входными сигналами, указывающими давление на выходе из реактора и степень открытия регулирующего клапана впрыска.

Регулирующий клапан на линии впрыска теплоносителя в КД открывается при увеличении давления выше 16,5 МПа при работе на мощности. При давлении 16,7 МПа клапан полностью открывается, а при давлении 16,5 МПа происходит полное закрытие.

### **1.5.3 Регулирование уровня воды в парогенераторе (ПГ)**

Основной регулятор уровня воды в парогенераторе предназначен для поддержания номинального уровня воды в ПГ при расходах питательной воды от 15-20 до 100% от номинального значения. Кроме этого, пуско-остановочный регулятор работает при расходах питательной воды менее 15-20%.

За счет реализации обратной связи по массовому балансу расхода питательной воды и расхода пара определяется закон регулирования

основного регулятора уровня: пропорционально-интегральный регулятор. Входными сигналами для регулятора уровня являются:

- уровень воды в ПГ;
- заданный уровень воды в ПГ;
- расход питательной воды;
- расход пара из ПГ.

#### **1.5.4 Основные характеристики регулирования давления в 2-м контуре**

Одна из наиболее важных особенностей регулирования во втором контуре связана с аспектами регулирования параметра давления пара. Пар является основным средством передачи энергии, поэтому регулирование указанного физического параметра имеет большую значимость во втором контуре. В этом контуре турбинные системы преобразуют тепловую энергию водяного пара в кинетическую энергию ротора электрического генератора.

Для регулирования давления пара в главном паровом коллекторе (ГПК) используется БРУ-К за счет сброса свежего пара в конденсатор турбины. Исполнительный орган – это регулирующий клапан БРУ-К. Закон регулирования – пропорциональный. При давлении пара выше заданного на 0,4 МПа и более клапан полностью открывается. Полное закрытие клапана происходит, когда давление равно заданному и менее заданного значения. В режиме авторегулирования регулятор БРУ-К поддерживает заданное давление пара в ГПК 6,9 МПа со статической неравномерностью 0,4 МПа.

#### **1.5.5 Регуляторы СКУ РО**

Автоматические системы регулирования энергоблока предназначены для поддержания заданных значений основных технологических

параметров блока, определяющих оптимальное протекание технологического процесса производства электроэнергии.

Автоматизированные системы управления выполняют свои задачи регулирования в АЭС с помощью подсистем и регуляторов, которые связаны с определенным технологическим параметром. Этими технологическими параметрами могут быть давление, температура, расход теплоносителя, впрыск химических добавок, измерение радиации, положение стержней и другие.

Регуляторы СКУ РО и их описание приведены ниже:

- УР04, регулятор разности температур между теплоносителем в горячих нитках петель и в компенсаторе давления в режиме планового расхолаживания;
- УРС01, регулятор давления в I контуре над активной зоной;
- YPC02, регулятор уровня в компенсаторе давления, штатный;
- YPC03, регулятор уровня в компенсаторе давления, пусковой;
- YPC04, регулятор давления в I контуре;
- YPC05, регулятор давления в I контуре над активной зоной;
- ТКС01, регулятор расхода продувочной воды на фильтры СВО низкого давления;
- ТКС02, регулятор давления перед клапанами продувки (гидравлика);
- ТКС13, регулятор уровня в деаэраторе подпитки в нормальном режиме;
- ТКС14, регулятор уровня в деаэраторе подпитки в режиме заполнения;
- ТКС20, регулятор уровня в деаэраторе подпитки в режиме борного регулирования;
- ТКС10 и ТКС12, регуляторы давления пара в деаэраторе подпитки;
- ТКС70, регулятор давления пара в деаэраторе борного регулирования;

- ТКС71, регулятор уровня в деаэраторе борного регулирования;
- ТКС21, ТКС22 и ТКС23, регуляторы перепада давления между напорным трубопроводом подпиточных насосов и давлением в I контуре;
- ТКС24, ТКС25 и ТКС26, регуляторы расхода подпиточного насоса;
- YDC11, YDC12, YDC13 и YDC14, регуляторы перепада давления на уплотнения ГЦН;
- RYC01, регулятор уровня в расширителе продувки парогенераторов;
- RYC02, регулятор давления в расширителе продувки парогенераторов;
- ТВС01, регулятор дозировки аммиака;
- ТВС02, регулятор щелочности теплоносителя;
- ТЕС10 и ТЕС20, регуляторы давления за фильтрами установки;
- TS10C01, регулятор концентрации кислорода перед контактным аппаратом;
- TS21C01, TS22C01 и TS23C01, регуляторы давления газа на всасе газодувки;
- ТYC01, ТYC02 и ТYC03, регуляторы уровня в приемнике организованных протечек;
- UV06, UV06C01 и UV06C03, регуляторы температуры приточного воздуха системы.

## **1.6 Регулятор давления в расширителе продувки парогенератора**

Функция этого регулятора состоит в том, чтобы обеспечивать необходимое давление посредством действия регулирующего клапана для поддержания заданного давления в расширителях продувки 8 кгс/см<sup>2</sup>.

Регулятор давления в расширителе продувки включается в работу переводом переключателя БРУ-32 в положение автоматического управления.

При включении регулятор безударно включается на текущее значение давления в расширитеle, после чего с установленным темпом приводит регулируемый параметр в соответствие с заданным давлением.

Во всех режимах эксплуатации система обеспечивает:

- непрерывную продувку всех четырех парогенераторов с расходом  $7,5-16 \text{ м}^3/\text{ч}$  от каждого ПГ;
- периодическую продувку одного парогенератора с расходом  $20-30 \text{ м}^3/\text{ч}$  и непрерывную продувку всех четырех парогенераторов. При этом суммарный расход всех четырех продуваемых ПГ не должен превышать  $50-80 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- режим дренирования каждого ПГ с расходом не менее  $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- поддержание заданных значений уровня и давления в расширителях продувки RY10B01 и RY10B02 во всех режимах работы ПГ.

Ниже на рисунках 11-12 приведены техническое описание регулятора RYC02 и структурная схема автоматизации продувки ПГ [5]..

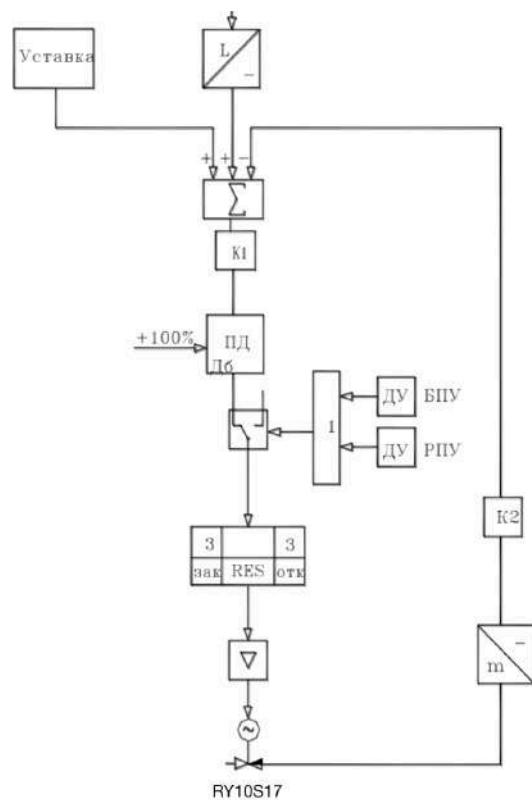


Рисунок 11 - Техническое описание регулятора RYC02

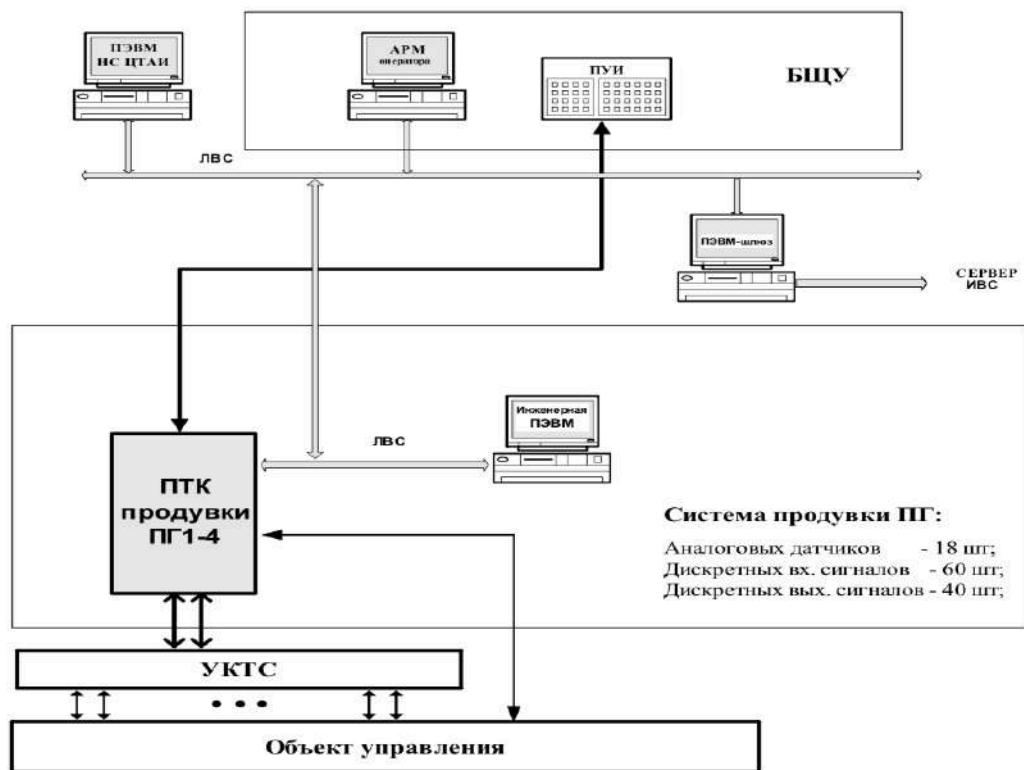


Рисунок 12 - Структурная схема автоматизации продувки ПГ

### 1.7 Постановка задачи

Целью настоящей работы является исследование моделирования регулятора давления в расширительном продувке парогенератора реактора ВВЭР-1000.

Для выполнения исследовательской работы определены следующие этапы разработки:

- необходимо определить свойства и характеристики объекта управления, изучить его свойства и физические параметры процесса;
- определить свойства и характеристики исполнительного механизма;
- установить характеристики регулятора, а также спроектировать его функциональную структуру;
- моделировать САУ в компьютерной среде;

- моделировать САУ в программируемой технологической среде с базой данных в реальном времени.

Для этой цели должна быть предложена реализация математической модели САУ (регулятор, объект управления, исполнительный механизм), разрабатывая дифференциальные уравнения всего процесса.

Моделирование проводилось в компьютерной среде с помощью программы «MATLAB» и его инструмента моделирования «Simulink».

После моделирования в среде «Simulink/MATLAB», необходимо определить дифференциальные уравнения системы, которые описывают характеристику системы. Затем эти дифференциальные уравнения нужно ввести в MikBASIC с кодированием и смоделировать систему в программном комплексе MWBridge с базой данных в реальном времени.

В MWBridge существует программный интерфейс системы технологического комплекса называемый АлгоВУ, с помощью которого осуществляется программирование регулятора.

Последний этап исследовательской работы – это создание человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) с мнемосхемами на платформе Display.

## **2 Описание технических средств**

### **2.1 Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП)**

АСУ ТП предназначена для того, чтобы [1]:

- управлять всеми технологическими объектами АЭС;
- проводить диагностику основного оборудования;
- контролировать технологические объекты управления и автоматическое регулирование параметров этих технологических объектов управления, автоматизированное ведение режимов, защиту оборудования;
- предоставлять информационное обеспечение персонала.

Контроль и управление технологическими процессами и оборудованием с помощью АСУ ТП осуществляется в целях обеспечения:

- ядерной и радиационной безопасности;
- экономичности производственных процессов;
- надежности выработки электроэнергии.

В состав АСУ ТП входят следующие элементы для выполнения своих задач:

- датчики;
- стены и элементы для установки датчиков;
- импульсные трубные проводки за отсечными устройствами или коренными вентилями;
- программно-технические средства обработки, хранения и передачи информации;
- средства оперативно-диспетчерского и местного дистанционного управления, блокировок, защит, сигнализации и авторегулирования;
- средства отображения и регистрации информации (вторичные приборы, табло, дисплеи, индикаторы и т.п.);

- средства приема и выдачи информационных и управляющих дискретных сигналов на исполнительные устройства;
- местные посты и посты центрального управления с оперативно-командными элементами;
- кабели, кабельные коммуникации и проходки;
- средства автоматизации, поставляемые комплектно с технологическим оборудованием;
- средства электропитания средств АСУ ТП, включая устройства пониженного напряжения;
- средства радиационного контроля;
- аппаратура, стенды, оборудование и инструменты, обеспечивающие обслуживание, ремонт и метрологическое обеспечение средств ТС АСУ ТП;
- низковольтные комплектные устройства электропитания арматуры.

## **2.1 Функциональная структура АСУ ТП**

В состав АСУ ТП входит большое количества подсистем, выделенных по технологическому или функциональному назначению. Все системы объединяются в единую систему с помощью системы верхнего блочного уровня (СВБУ), которая обеспечивает сбор и обмен информации и дистанционное управление оборудованием.

В основе АСУ ТП лежит иерархический принцип построения в соответствии с разделением энергоблока на технологические функциональные части как объекта управления.

АСУ ТП включает в себя следующие подсистемы [6]:

- система верхнего блочного уровня (СВБУ);
- исполнительная часть управляющей системы безопасности (УСБТ);

- система управления и защиты (СУЗ) реактора, которая состоит из инициирующей части (АЗ – УСБИ) и исполнительной части (КЭ СУЗ);
- система контроля, управления и диагностики реакторной установки (СКУД);
- система контроля и управления оборудованием нормальной эксплуатации реакторного отделения (СКУ РО);
- система контроля и управления оборудованием нормальной эксплуатации турбинного отделения (СКУ ТО);
- система контроля и управления вентиляционным оборудованием (СКУ В);
- система контроля и управления оборудованием специальной водоочистки (СКУ СВО);
- система контроля и управления оборудованием электрической части (СКУ ЭЧ);
- система контроля и управления оборудованием турбогенератора (СКУ ТГ);
- система контроля и регулирования турбины (СКРТ);
- система радиационного контроля (СРК);
- система автоматической противопожарной защиты (САППЗ);
- система регистрации важных параметров эксплуатации (СРВПЭ);
- пункты управления (блочный пункт управления (БПУ), резервный пункт управления (РПУ), местный пункт управления МПУ).

В АСУ ТП предусмотрено несколько режимов работы:

- первоначальный запуск;
- штатное функционирование;
- вывод компонентов АСУ ТП из работы и ввод в работу;
- реконфигурация при неисправностях.

На рисунках 13 и 14 приведена основная функциональная структура АСУ ТП и функциональная структура в части контроля и управления системами безопасности.

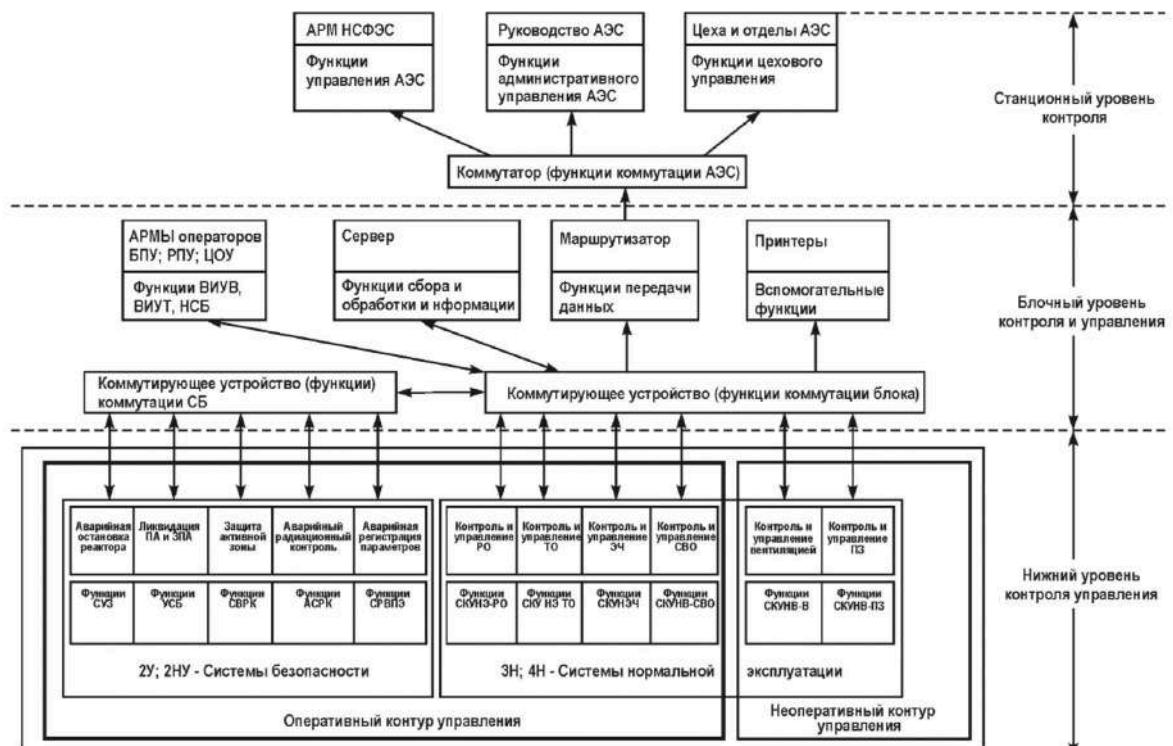


Рисунок 13 - Функциональная структура АСУТП



Рисунок 14 - Функциональная структура АСУ ТП в части контроля и управления системами безопасности

## **2.2 Программно-технические средства ТПТС**

Система автоматизации ТПТС предназначена для реализации функций контроля и управления технологическими процессами на тепловых и атомных электростанциях и других объектах энергетики.

В структуре общей системы контроля и управления энергоблоком система автоматизации ТПТС занимает уровень низовой автоматики. Имеет связи с технологическим процессом через датчики и исполнительные механизмы, позволяет производить прием и выдачу аналоговых и дискретных сигналов, по заданным алгоритмам выполнять преобразование и обработку полученной информации, формировать необходимые воздействия на управляемый объект и обмениваться информацией с информационно-управляющей системой.

В системе ТПТС выполняется непрерывный самоконтроль работающих компонентов, позволяющий оперативно выявлять дефекты и заменять отказавшие узлы, не выводя систему из работы.

Существуют разные поколения ТПТС:

- поколение – ТПТС – НТ;
- поколение – ТПТС – ЕМ;
- поколение – ТПТС – СБ.

Каждое из этих поколений все еще обновляется для того, чтобы использовать на атомных станциях для различных целей. Для достижения цели данной исследовательской работы был описан программно-технический комплекс ТПТС-НТ.

## **2.3 Программно-технический комплекс ТПТС-НТ**

Комплекс средств автоматизации ТПТС-НТ предназначен для построения программно-технических комплексов систем контроля и управления атомных и тепловых электростанций, а также объектов промышленности.

ТПТС-НТ включает в себя набор аппаратных и программных средств, необходимых для реализации функций контроля и управления АСУ ТП, а также средства диагностики и конфигурирования. ТПТС-НТ построена по модульному принципу и позволяет создавать, в зависимости от требований, различные по степени избыточности структуры путем резервирования функционально важных элементов.

В состав ТПТС-НТ входят следующие основные компоненты [6]:

- станция ввода-вывода (СВВ);
  - процессор автоматизации (ПА);
  - блок шлюза сопряжения (БШС);
  - инженерная станция (ИС);
  - приборная стойка (ПС);
  - стойка питания (СП);
  - стойка сопряжения (СС).

Структурная схема комплекса средств автоматизации ТПТС-НТ показана на рисунке 15.

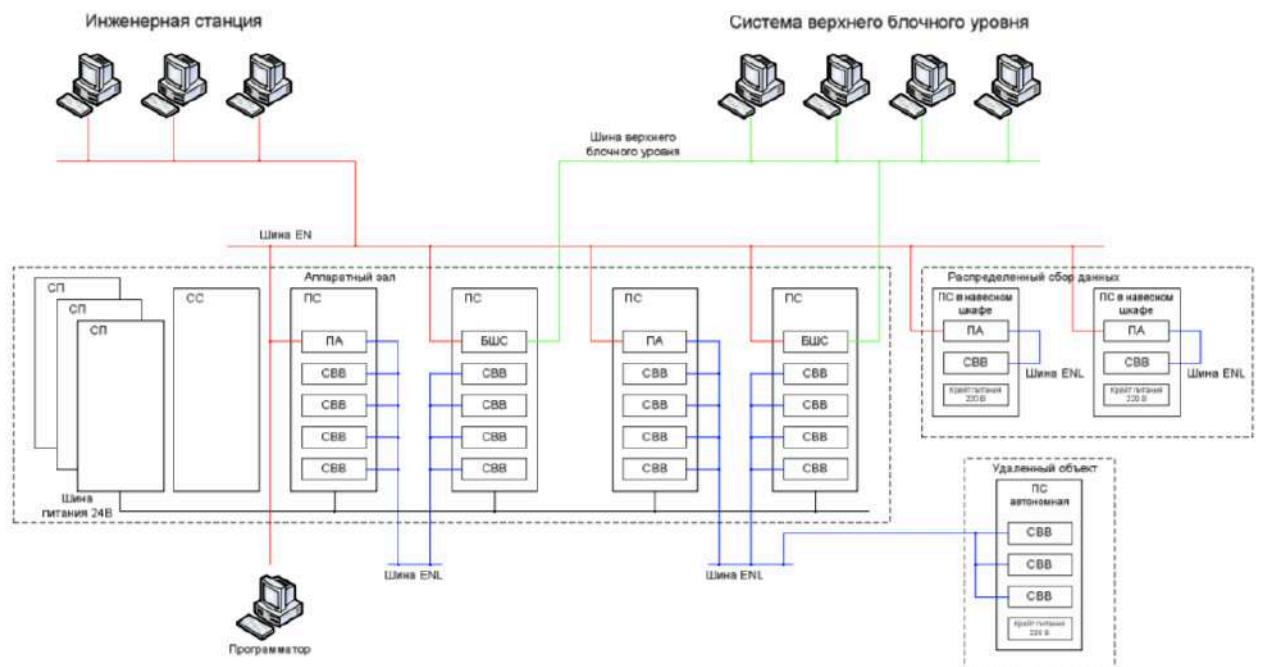


Рисунок 15 - Структурная схема комплекса средств автоматизации ТПТС-НТ

ТПТС-НТ имеет двухуровневую организацию.

На нижнем уровне реализуются сбор данных, ряд базовых стандартных функций (регулирование, фильтрация и другие) и выдача управляющих воздействий в станциях ввода-вывода (СВВ).

В СВВ существует набор модулей в связи с процессом (СПМ), которые обеспечивают прием и выдачу сигналов и выполнение базовых функций автоматизации.

Вся информация из СПМ собирается интерфейсным модулем (ИМ) и передается через локальную шину ENL на высший уровень обработки. Информация, которая приходит СВВ по шине ENL, распределяется теми же ИМ по СПМ в соответствии с адресацией [7].

Рисунок 16 иллюстрирует функциональную структуру резервирования.

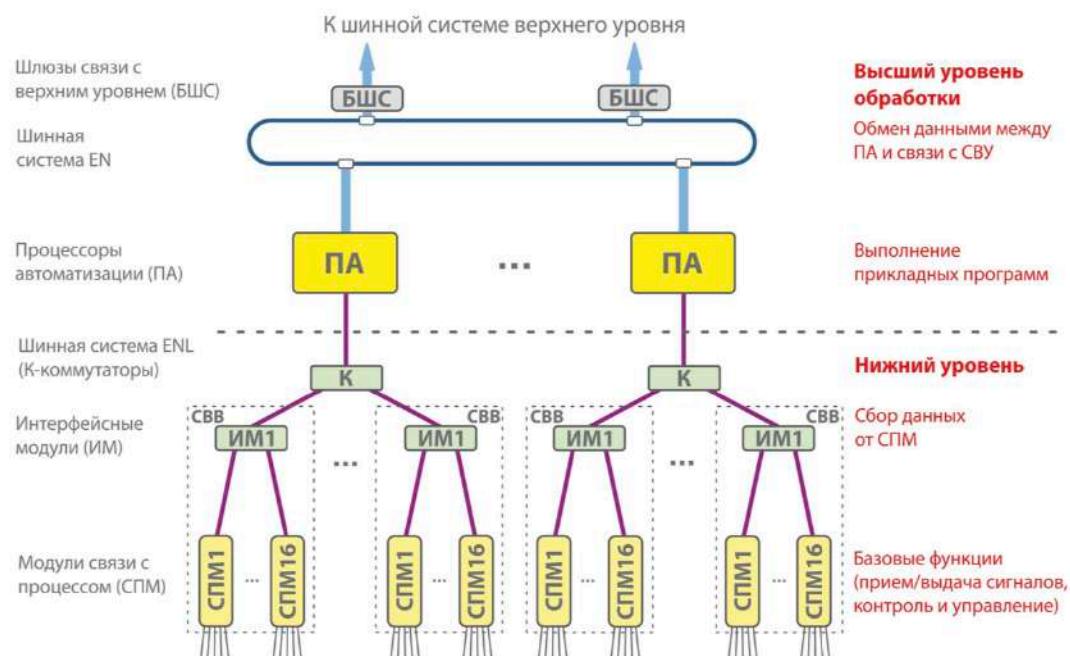


Рисунок 16 - Функциональная структура резервирования

Связь ИМ и СПМ в пределах СВВ осуществляется по шине ввода-вывода (ШВВ), имеющей радиально-последовательную структуру, обеспечивающую высокую скорость обмена информацией. Станции ввода-вывода связаны с процессорами автоматизации (ПА) через локальные шины ENL (100 мГц).

Процессоры автоматизации являются программируемыми и выполняют прикладные функции управления. ПА выполняют прикладные алгоритмы, функции защит, сигнализации, блокировок, функционально-групповое управление и пр. ПА связаны друг с другом локальной сетью EN, построенной на технологии Industrial Ethernet. Связь с верхним уровнем АСУ ТП осуществляется через шлюзы, которые связывают шину EN и локальную сеть СВУ.

Комплекс средств автоматизации на базе платформы ТПТС-НТ обеспечивает работу в режиме резервирования на всех уровнях:

- процессоров автоматизации;
- интерфейсных модулей;
- шлюзов;
- модулей процесса;
- шины ENL;
- шины ввода-вывода.

Разработка комплекса средств автоматизации имеет следующие основные цели:

- сокращение до 100...200 мс времени реакции алгоритмов, использующих сигналы;
- обеспечение возможности территориального распределения аппаратуры, решающей задачи сбора и первичной обработки информации и индивидуального управления;
- обеспечение возможности решения локальных задач с ограниченным количеством входных сигналов (10...30) со временем реакции до 5...10 мс;
- сокращение цикла измерения унифицированных аналоговых сигналов до 5...20 мс и улучшить качество измерений в условиях значительного технологического шума;

- обеспечение возможности решения задач автоматизации технологических процессов, как с большим, так и с малым количеством сигналов и исполнительных механизмов;
- обеспечение возможности взаимодействия с интеллектуальными устройствами по полевым шинам;
- обеспечение возможности подключения всех типов полевых кабелей, применяемых в промышленной автоматизации.

Программно-технические комплексы, построенные на базе ТПТС-НТ, имеют общую цифровую коммуникационную оптоволоконную шину ЕН, которая обеспечивает обмен данными между отдельными ПТК, связи с СВУ и с устройством конфигурирования – инженерной станцией (ИС).

Связь с интеллектуальными датчиками и исполнительными механизмами осуществляется с помощью специализированных модулей по шинам RS485 с протоколами MODBUS RTU, MODBUS ASCII и Ethernet с протоколом мЭК 61850.

Реализация ПТК на базе ТПТС-НТ показана на рисунке 17.

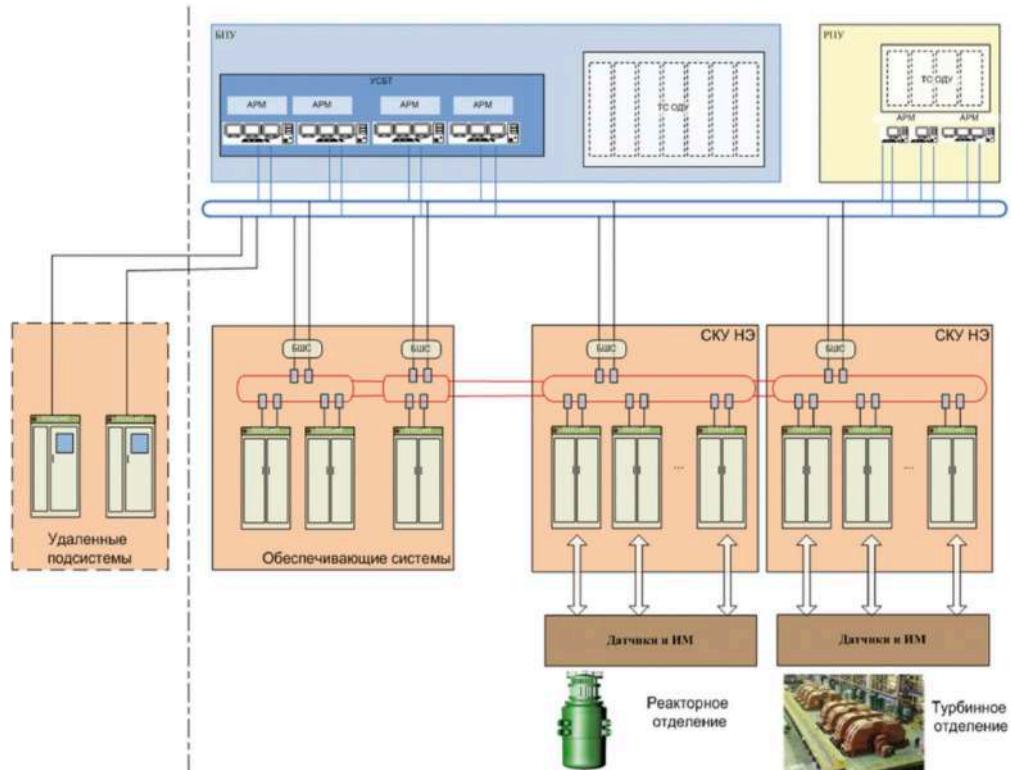


Рисунок 17 - Реализация ПТК на базе ТПТС-НТ

## 2.4 Компоненты ТПТС-НТ

### 2.4.1 Приборные стойки

Приборные стойки (ПС) ТПТС55.2010 представляют собой шкаф, в котором установлены следующие элементы:

- станции ввода-вывода (СВВ) (включают в себя модули связи с процессом (СПМ) и интерфейсный модуль (ИМ));
- процессор автоматизации (ПА);
- блок шлюза сопряжения (БШС);
- комплект распределения питания, который содержит автоматические выключатели 24 В клеммники;
- соединители, которые обеспечивают подключение электрических сигнальных кабелей от преобразователей и датчиков;
- коммуникационное оборудование шин EN, ENL (включает коммутаторы, оптические кроссы, волоконно-оптические кабели, экранированные витые пары) [7].

Приборная стойка и её компоненты показаны на рисунке 18.



1 - СВВ, 2 - крейт ПА, 3 - автоматические выключатели и клеммники, 4 - коммутаторы, 5 - набор соединителей

Рисунок 18 - Приборная стойка.

## 2.4.2 Стойки питания (СП)

Стойка питания (СП) ТПТС52.2320 также является шкафом и предназначена для преобразования внешнего сетевого напряжения переменного или постоянного тока, 220/24 В. Блоки питания (БПМ) являются основными функциональными устройствами стойки питания.

Стойки питания могут применяться для электропитания приборных стоек ТПТС и пультов управления технических средств оперативно-диспетчерского управления (ТС ОДУ) и других устройств [].

Стойка питания изображена на рисунке 19.



Рисунок 19 - Стойка питания

## 2.4.3 Стойки сопряжения(СС)

Стойка сопряжения (СС) ТПТС52.2110 является шкафом с установленными устройствами сопряжения компонентами, необходимыми для организации сигнализации, элементами, предназначенными для закрепления и подключения кабелей.

С помощью стойки сопряжения обеспечиваются:

- гальваническое разделение цепей ПС ТПТС и подключаемых цепей периферийных устройств
- размножение общих сигналов
- преобразование вида электрического сигнала
- переход с одного типа кабеля на другой и т.д.

Стойка сопряжения имеет релейные модули, усилители, преобразователи, модули подгрузки и другие устройства [7]. Стойка сопряжения представлена на рисунке 20.



Рисунок 20 - Стойка сопряжения

### **3 Построение модели давления в расширителях продувки парогенератора**

#### **3.1 Разработка модели объекта управления**

##### **3.1.1 Общее сведения при описании аналитических моделях ОУ**

Система представляет собой совокупность компонентов, упорядоченных определенным образом, которые действуют вместе для достижения конкретной цели.

Для разработки математической модели системы необходимо установить условия равновесия системы, провести анализ параметров и развития системы, а также взаимодействия физических факторов.

Чтобы установить исходную математическую модель, нужно рассмотреть следующие концепции:

- создать упрощенную модель;
- рассмотреть реакцию системы на большее влияние;
- поддерживать баланс в соответствии с поставленными целями между точностью и простотой системы.

После построения математической модели необходимо перейти во временную область и описать систему через дифференциальные уравнения, чтобы исследовать объект управления в реальном времени. Таким образом, следствия каждой переменной в системе способствуют изменению системы в зависимости от степени помех. Такие уравнения могут быть представлены в виде линейной комбинации переменных, рассматриваемых в системе.

На рисунках 21, 22, которые приведены ниже, представлены схема продувки парогенераторов и конструкция расширителей продувки (СП-1,5У).

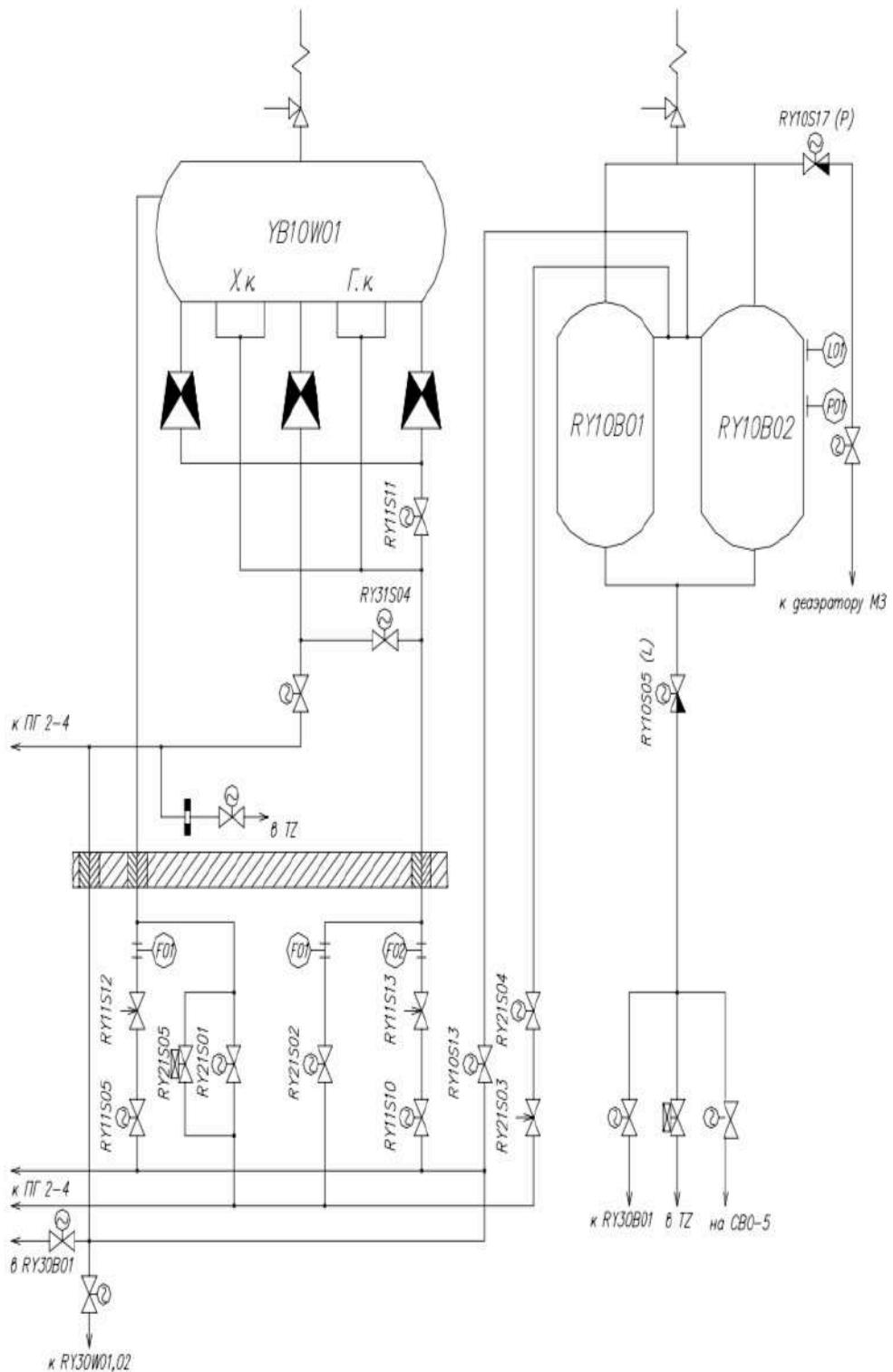


Рисунок 21 - Схема продувки парогенератора

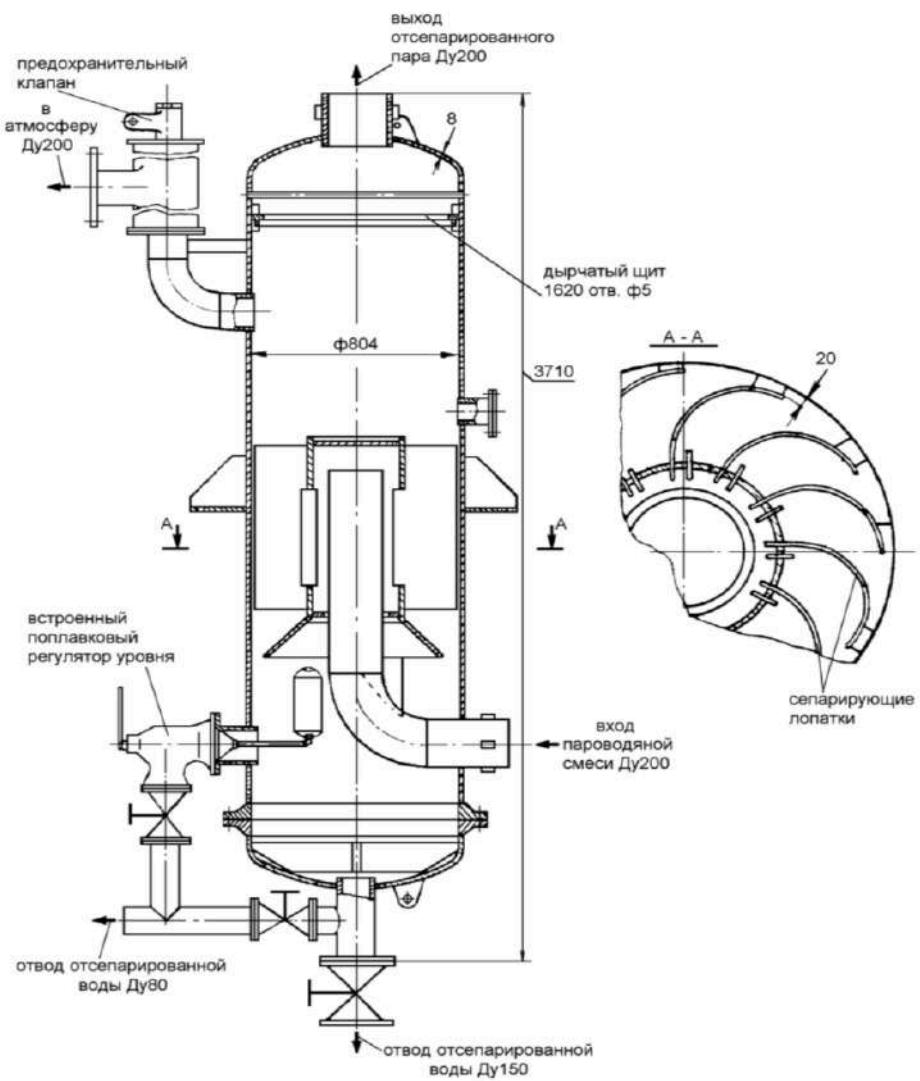


Рисунок 22 - Конструкция расширителя продувки типа СП-1,5У

### 3.1.2 Условия и ограничения математической модели ОУ

Расширители продувки РY10B01,02 предназначены для разделения на пар и воду продувочной воды, подвод которой производится через тангенциально расположенные парубки. За счет расширения, а также центробежного эффекта происходит разделение продувочной воды на пар и воду. Отсепарированный пар по трубопроводу Ду250 направляется в паровую магистраль деаэраторов турбинного отделения.

Давление в расширителях продувки ПГ поддерживается на уровне 8 кгс/см<sup>2</sup> регулирующим клапаном РY10S17, установленном на трубопроводе отвода пара в деаэраторы турбинного отделения. От превышения давления

каждый расширитель продувки ПГ защищен одним предохранительным клапаном, настроенным на срабатывание при давлении 8.8 кгс/см<sup>2</sup>. Уровень продувочной воды в расширителях продувки ПГ поддерживается 700 мм при помощи регулирующего клапана RY10S17, установленного на линии отвода продувочной воды от расширителей продувки ПГ [3].. Техническая характеристика расширителя продувки RY10B01,02 приведена в таблице 2:

Таблица 2 - Техническая характеристика расширителя продувки RY10B01,02

Техническая характеристика расширителя продувки RY10B01,02	
Рабочее давление, кгс/см <sup>2</sup>	8.0
Давление гидроиспытаний, кгс/см <sup>2</sup>	11.0
Температура среды, °С	170
Полный объем корпуса, м <sup>3</sup>	1.5

### 3.2 Составление математической модели ОУ

Динамическая характеристика описывается системой дифференциальных уравнений и дает возможность исследовать поведение системы и рассчитать для неё переходные процессы. Преобразование Лапласа связывает систему дифференциальных уравнений с переходной функцией и частотной характеристикой. Можно определить свойства объекта путем аналитических расчетов или экспериментально.

Чтобы составить математическую модель ОУ, необходимо провести аналитические расчеты коэффициентов придаточной функций регулируемого участка. Расчеты приведены ниже [8]:

$$W(s) = b_{rk} \frac{K_1 + (1-\beta)T_1 s}{T_1 s + 1} = K_2 \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1}$$

$$\text{где } T_2 = \frac{(1-\beta)T_1}{K_1} \quad K_2 = b_{rk}K_1 \quad T_1 = \frac{a_{nn}}{a_l + a_{pk}} \quad K_1 = (1 - \alpha) \frac{a_l}{a_l + a_{pk}}$$

Коэффициенты дифференциального уравнения:

$$a_{pk} = \frac{2K_{po}M}{S_{po}^2} \quad a_{bk} = \frac{2K_{bk}M}{S_{bk}^2} \quad a_l = 2K_lM \quad a_n = \frac{l}{S_l}$$

$$b_{pk} = \frac{2K_{po}M}{S_{po}^3}$$

Коэффициенты, характеризующие потери в линии и клапанах:

$$K_{pk} = \frac{\xi_{po}}{2p} \quad K_{bk} = \frac{\xi_{bk}}{2p} \quad K_l = \frac{\xi_{po}}{2pS_l^2}$$

После расчетов необходимо упростить математическую функцию и определить коэффициент передачи и постоянную времени объекта управления:

$$K_{OY} = 30.4 \quad T_{OY} = 0.9 \quad W_{OY} = \frac{30.4}{0.9s + 1}$$

### 3.3 Исполнительный механизм

Исполнительным механизмом является регулирующий клапан RY10S17, изображенный на рисунке 23. Регулятор RY10S17 регулирует давление в расширителе продувки ПГ.



Рисунок 23 - Регулирующий клапан RY10S17

Входные сигналы в ИМ являются степенью открытия проходного сечения клапана, с размерностью %, и выходные сигналы представляют собой расход воды (м<sup>3</sup>/ч).

Передаточная функция исполнительного механизма имеет только коэффициент передачи.

$$W_{IM} = K_{IM} = 0.0083$$

### 3.4 Реализация и проверка модели ОУ и ИМ в MatLab/Simulink

Для того, чтобы исследовать возможности использования регулирующего клапана, в Simulink было проведено моделирование с различными коэффициентами исполнительного механизма. Схема моделирования изображена на рисунке 24.

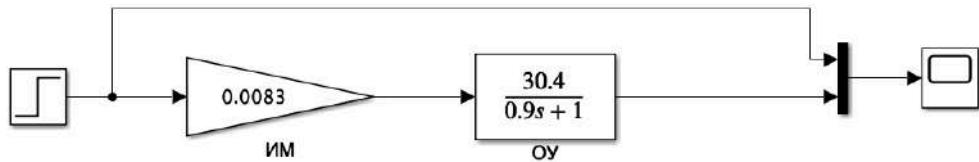


Рисунок 24 - Схема моделирования ИМ и ОУ в Simulink

После сборки ОУ и ИМ, необходимо добавить в систему регулирующий орган ПИ-регулятор. Чтобы определить коэффициент пропорциональности и интегрирования регулятора используется элемент в библиотеке называемый «PID Controller». Затем необходимо повторно рассмотреть поведение системы. Структурная схема системы показана на рисунке 25.

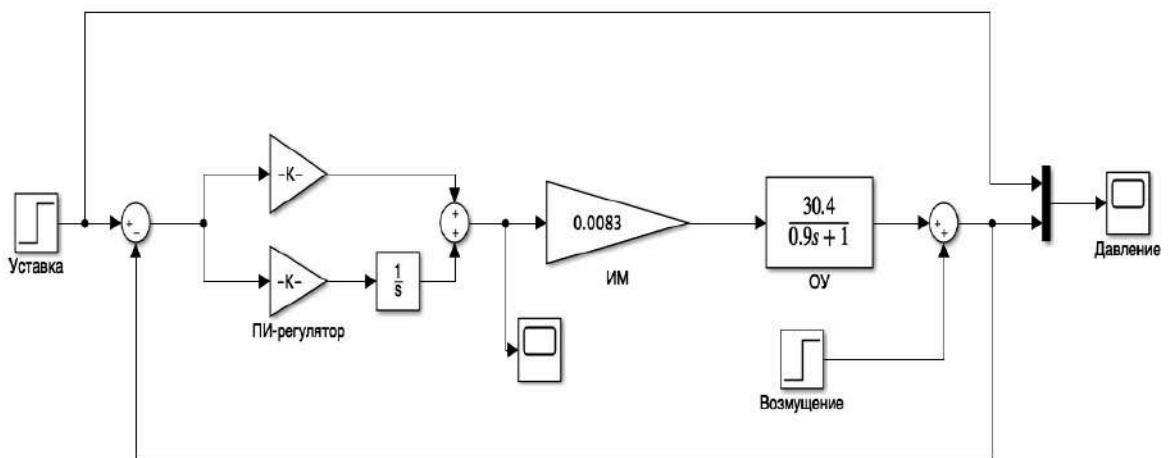


Рисунок 25 - Структурная схема системы с ПИ-регулятором

Для лучшего качества регулирования выбраны следующие коэффициенты пропорциональности и регулирования:

$$K_{\Pi} = 1.7794 \quad K_{\text{И}} = 4.0548$$

Эти коэффициенты использованы в Simulink, а также для конфигурирования в MWBridge ниже в настоящей работе. Реакция системы на ступенчатую функцию проиллюстрирована на рисунке 26.

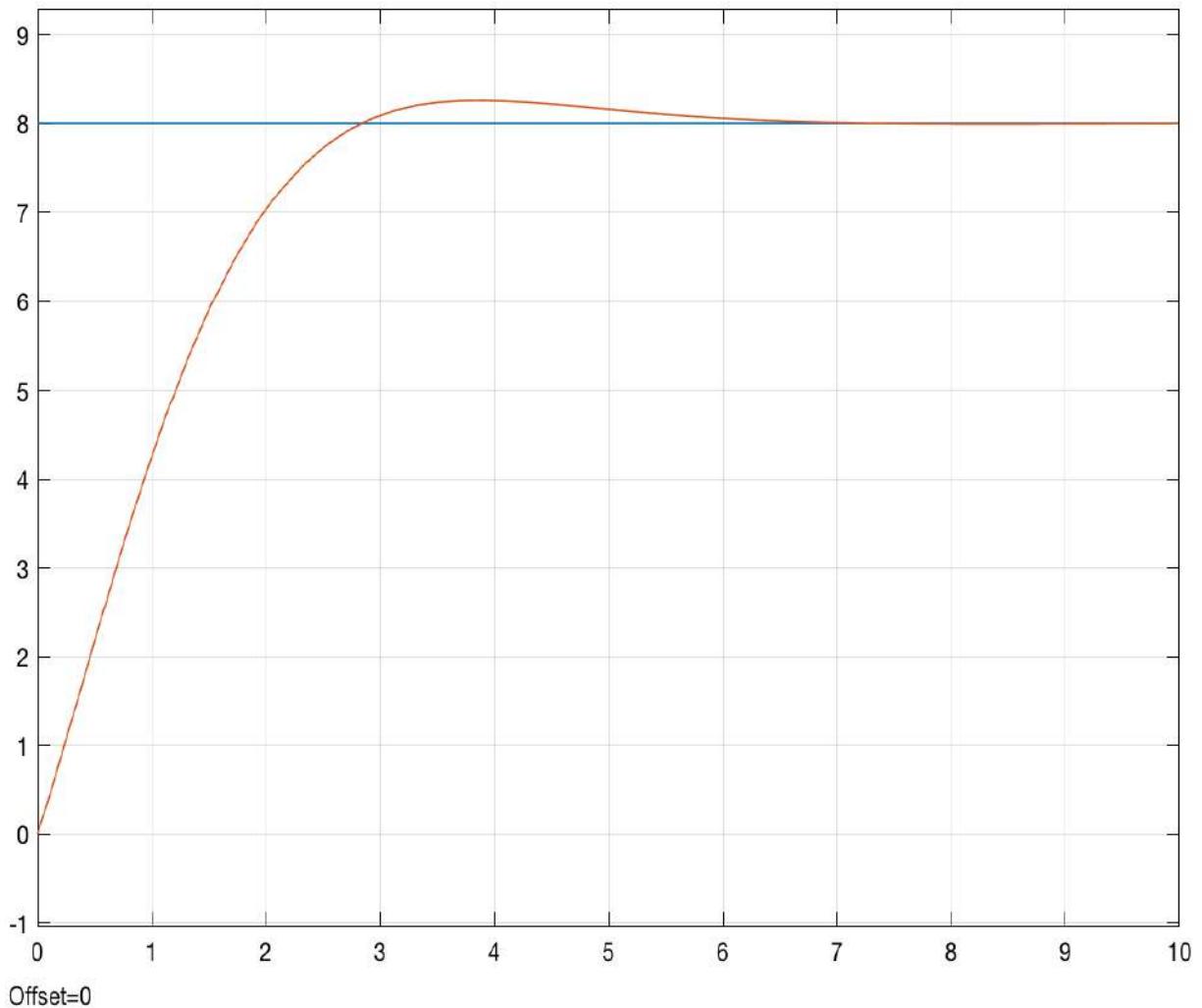


Рисунок 26 - Реакция системы на ступенчатую функцию (step response)

На рисунке 27 показана реакция системы с величиной перерегулирования, которая составляет 3.15%. Максимальное значение выхода системы – 8.25 кгс/см<sup>2</sup>.

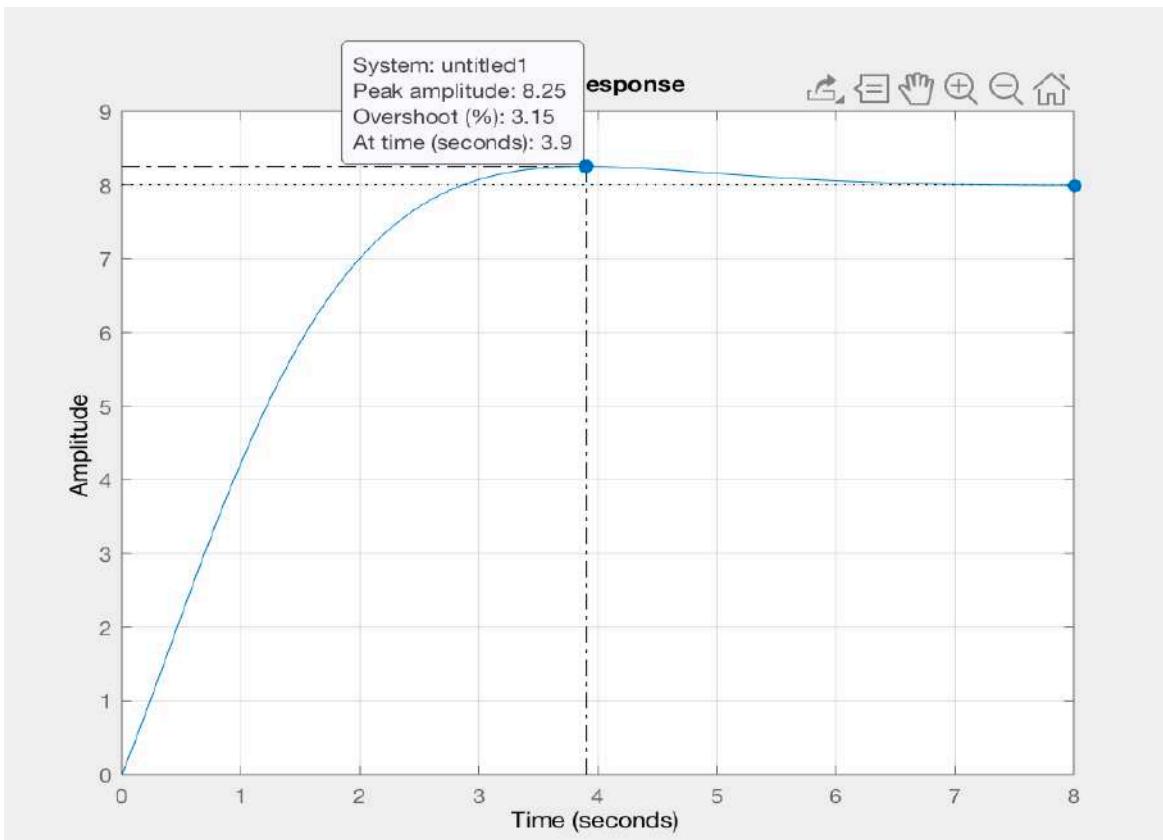


Рисунок 27 - Реакция системы с величиной перерегулирования

Рисунок 28 иллюстрирует реакцию системы при различных коэффициентах регулятора.

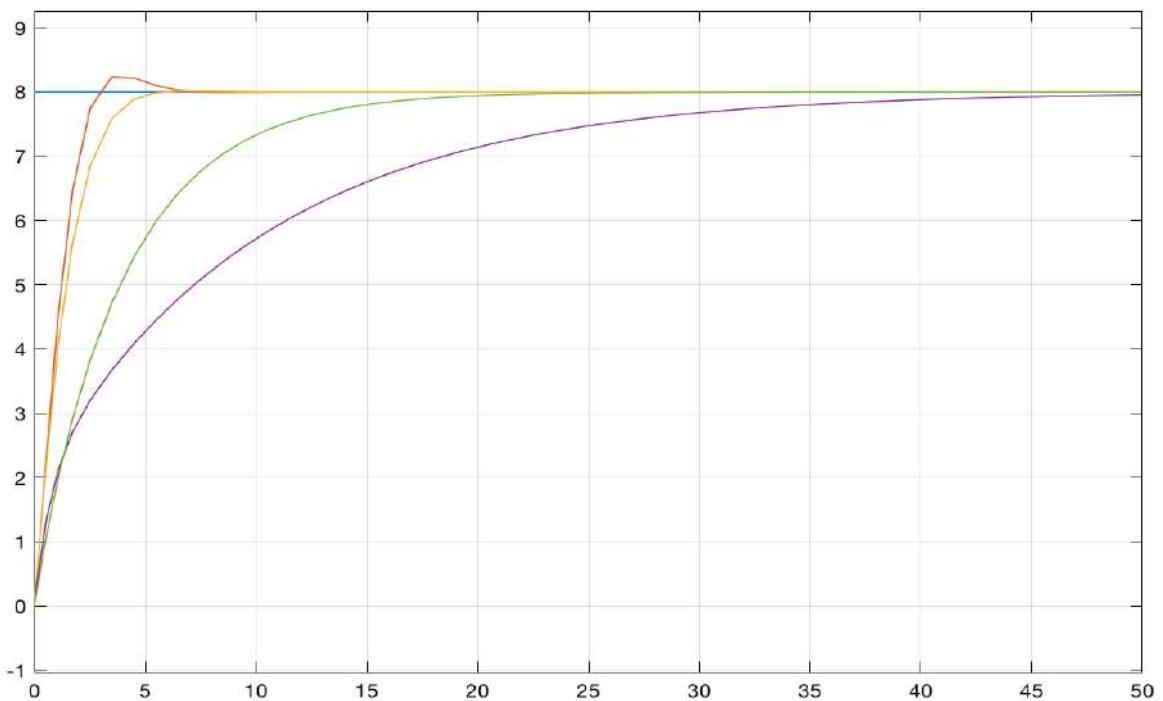


Рисунок 28 - Реакции системы при различных коэффициентах регулятора

На рисунке 29 можно наблюдать, что собранная модель с ПИ-регулятором справляется с возмущающим воздействием, значение выхода системы при помощи регулятора становится установленным значением еще раз.

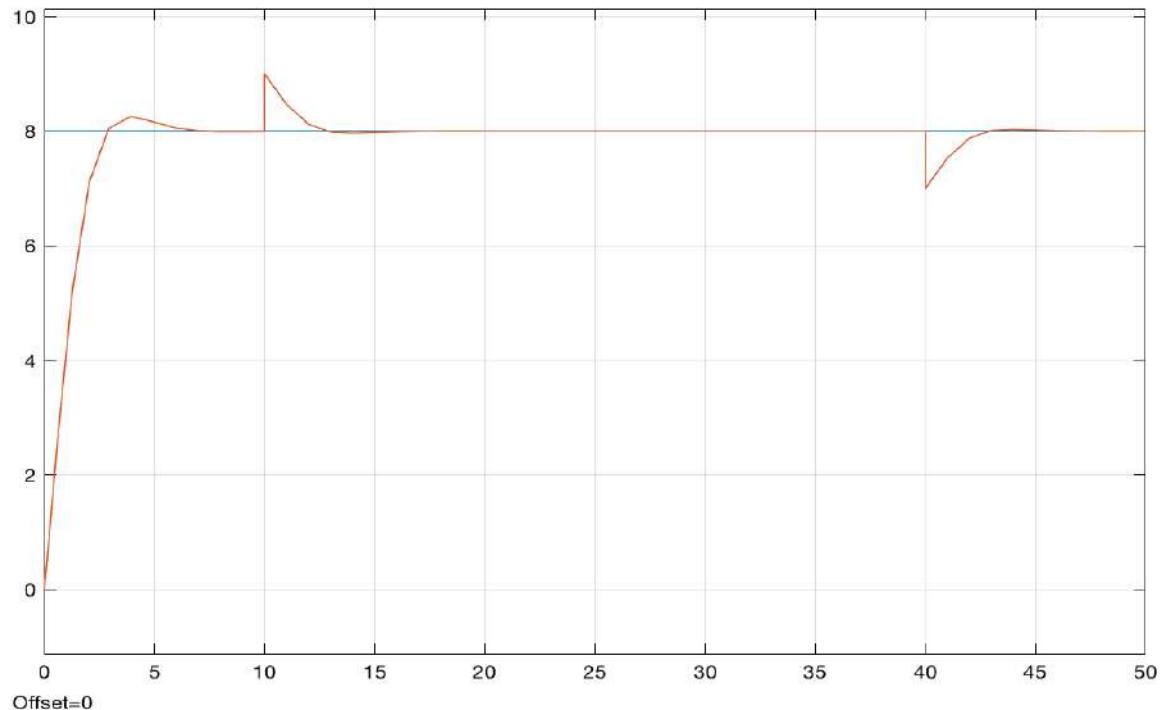


Рисунок 29 - Реакции системы с возмущающим воздействием

## **4 Исследование модели системы управления в реальном времени**

### **4.1 Системы управления с базами данных в реальном времени**

База данных реального времени – это база данных, обработка данных в которой происходит по принципу реального времени. БД реального времени в САУ является общим пространством памяти ядра процесса (среда программирования или физическое устройство, которое выполняет одну или несколько задач за ограниченное время), где объединяет переменные параметры, отслеживаемые технологическим процессом.

Это пространство может обладать следующими общими характеристиками: одновременный и двунаправленный множественный доступ; горячее бронирование; мгновенное обновление во всех модулях; заданное время для каждого рабочего цикла; 100% поддержание целостности данных; системы резервного копирования и безопасности данных.

Системы управления, основанные на базе данных реального времени, имеют общее назначение, могут выполнять несколько задач одновременно, их наиболее распространенными задачами являются запись данных, чтение, расчет переменных, прогнозирование трендов, адресация процессов, активация индикаторов и др.

### **4.2 База данных программы MWBridge**

Моделирование системы регулирования давления в расширителях продувки ПГ реализовано в программно-техническом комплексе MWBridge. В БД MWBridge записаны параметры, коэффициенты, входы и выходы моделированной системы, также вход и выход возмущения. Эти входы и выходы ОУ, ИМ и возмущающего воздействия представлены на рисунке 30. Также добавлены параметры чтобы включить/выключить систему и возмущающее воздействия [9].

The screenshot shows the MWBridge software interface. The main window displays a table of parameters with columns: Номер (Number), Название (Name), Описание (Description), Посл.Значение (Last Value), Статус (Status), Время обновл. (Update Time), Источник (Source), and Таймаут (Timeout). The table contains 27 rows, each representing a parameter like A0, K\_oy, T\_oy, etc. Row A18 is currently selected, highlighted with a blue background. To the right of the table are several configuration panels: 
 

- Группы (Groups):** Includes checkboxes for A, D, Статистика (Statistics), Вычисления (Calculations), and MikBASIC.
- Группы (Groups):** Includes checkboxes for Тренды (Trends), Пропорциональный (Proportional), and ОУ\_апериодическое (Oscillatory).
- Навигация (Navigation):** Includes buttons for navigating between parameters (A000, D000, A999, D999) and a numeric input field for 'Номер' (Number).
- Редактирование (Editing):** Includes buttons for Copy (Копир.), Paste (Встав.), Cut (С), Delete (Вырез.), and Undo (Отмена).

Рисунок 30 - Параметры в базе данных программы MWBridge

#### 4.3 Кодификация ОУ и ИМ в среде MikBASIC

Для программирования могут использоваться MikBASIC в MWBridge.

MWBridge позволяет применять множество инструментов для обработки данных в режиме реального времени, а также представляет собой инструмент для конфигурирования. В MWBridge можно работать с данными вручную и при программировании.

MikBASIC позволяет получить доступ к параметрам, которые регулируются в режиме реального времени, а также к предыдущему значению параметра.

С помощью MikBASIC можно кодировать математическую модель объекта управления с учетом дифференциального уравнения ОУ и ИМ и проводить исследования на этом же объекте управления.

$$W(s) = \frac{L[X_{\text{вых}}(t)]}{L[X_{\text{вх}}(t)]}$$

$$W(s) = \frac{K}{TS+1} = \frac{X_{\text{вых}}(S)}{X_{\text{вх}}(S)};$$

$$K \cdot X_{\text{вх}}(S) = X_{\text{вых}}(S) \cdot (TS + 1);$$

$$T \cdot S \cdot X_{\text{вых}}(S) + X_{\text{вых}}(S) = K \cdot X_{\text{вх}}(S);$$

При  $S \rightarrow \frac{d}{dt}$ ;

$$T \frac{d}{dt} X_{\text{вых}}(t) + X_{\text{вых}}(t) = K \cdot X_{\text{вх}}(t);$$

$$X^I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{X_{\text{вых}}(t + \Delta t) - X_{\text{вых}}(t)}{\Delta t};$$

$$T \left( \frac{X_{\text{вых}}(t + \Delta t) - X_{\text{вых}}(t)}{\Delta t} \right) + X_{\text{вых}}(t) = K \cdot X_{\text{вх}}(t);$$

$$X_{\text{вых}}(t + \Delta t) - X_{\text{вых}}(t) = \frac{\Delta t}{T} (K \cdot X_{\text{вх}}(t) - X_{\text{вых}});$$

$$X_{\text{вых}}(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{T} (K \cdot X_{\text{вх}}(t) - X_{\text{вых}}) + X_{\text{вых}}(t).$$

Для выполнения кодирования в MikBASIC и моделирования объекта управления в MWBridge уравнение, представленное выше, имеет соответствующую форму. MikBASIC предоставляет доступ и регистрацию для текущих и предыдущих значений функции во временной области.

В уравнении наблюдаются текущие и предыдущие значения функции и, чтобы эти значения хранились в памяти MikBASIC, в программе необходимо указать эти переменные и ввести необходимые коды. В программе текущее значение обозначается  $A[n].VALUE$ , предыдущее значение —  $A[n].VALUEOLD$ , где  $n$  может принимать целые значения в MWBridge.

Реализация разностных уравнений в среде MWBridge приведена в приложении А.

Интерфейсы MWBridge и MikBASIC показаны ниже на рисунках 31 и 32.

Проект: [D:\MikSYS]. Лицензион [GTEC]. Пользователь: [ ]

УСО Сеть Алго Алго ВУ ТЭП Мнемосхемы Документы Просмотр трендов

Пользовательские профили | Настройки | Основные | Сеть/УСО | Тренды | WEB | Время | Текст БД.дл: 101 приём: Опередача: Ожидание:к. 273356 [15.34.43]

Основные | Значения | Испр.данные | Все | Уставки | Статусы | Синхронизация НСИ |

Номер	Название	Описание	Посл.Значение	Статус	Время обновл.	Источник	Таймаут
A0			101	0	15:34:44.326	Текст работы с...	60000
A1	K_oy	Коэффициент п...	30.4	0	15:31:18.114		0
A2	T_oy	Постоянная врем...	0.9	0	15:31:24.068		0
A3	delta_t		0.101	0	15:34:44.300		0
A4			###	38	02:00:00.000		60000
A5	K_im	Коэффициент п...	0.0083	0	15:31:39.714		0
A6	T_im	Постоянная врем...	###	38	02:00:00.000		0
A7	K_Bm	Коэффициент п...	0.3	0	15:31:46.221		0
A8			###	38	02:00:00.000		0
A9			###	###	###		60000
A10	ON_off	Включение=1, о...	1	0	15:33:33.038		0
A11	ON_off_Bb	Включение=1, о...	0	0	15:31:59.338		0
A12			###	###	###		60000
A13			###	###	###		60000
A14			###	###	###		60000
A15	IN_Bb	Вход возмущающ...	###	38	02:00:00.000		10000
A16	OUT_Bb	Возмущающее ...	0	0	15:34:44.300		5000
A17			###	38	02:00:00.000		60000
A18	IN_im		31.6956	0	15:34:43.821	ALGO: P01A0001 0	
A19	OUT_im		0.263074	0	15:34:44.300		0
A20	IN_oy		0.263074	0	15:34:44.300		0
A21	OUT_oy		7.99685	0	15:34:44.300		0
A22	OUT_oy_BB	Выход системы ...	7.99685	0	15:34:44.300		0
A23			###	38	02:00:00.000		60000
A24			###	38	02:00:00.000		60000
A25			###	###	###		60000
A26			###	###	###		60000
A27			###	###	###		60000

Рисунок 31 - База данных программы MWBridge

MikBASIC

```

rem расчет такта модели ОУ в секундах
A[3].VALUE = A[0].VALUE/1000

rem Разностное Уравнение для Возмущающего Воздействия
A[16].VALUE = ((A[3].VALUE*A[7].VALUE*A[15].VALUE)+A[16].VALUEOLD)
IF A[16].VALUE > 2 THEN A[15].VALUE=0

rem Разностное Уравнение ИМ
rem Пропорциональный

A[19].VALUE = A[5].VALUE*A[18].VALUE

rem Присвоение Выхода ИМ Входу ОУ

A[20].VALUE = A[19].VALUE

rem Разностное Уравнение ОУ

A[21].VALUE = ((A[1].VALUE*A[20].VALUE) + ((A[2].VALUE*A[21].VALUEOLD)/A[3].VALUE))

A[22].VALUE = A[21].VALUE + A[16].VALUE

IF A[10].VALUE = 0 THEN A[18].VALUE=0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[19].VALUE=0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[20].VALUE=0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[21].VALUE=0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[22].VALUE=0
IF A[11].VALUE = 0 THEN A[16].VALUE=0

```

Принять изменения

ProgBuilder

Время выполнения программы, мсек 0

Текущая строка редактирования 28

Рисунок 32 - Окно программы MikBASIC для программирования

В интерфейсе БД можно видеть параметры исследуемой системы: Коэффициент передачи и постоянная времени ОУ, коэффициент передачи исполнительного механизма, включение/выключение модели ОУ, регулятора и возмущающего воздействия. Коэффициенты регулятора и период вызова регулятора также присутствуют в БД [9].

#### 4.4 Синтез регулятора в среде программирования Алго ВУ

Чтобы замкнуть систему с обратной связью и построить систему управления с заданными коэффициентами, необходимо использовать среду Алго ВУ. Система программирования на языке алгоблоков предназначена также для создания пользовательских процедур, исполняемых программой MWBridge в режиме реального времени. Процедуры являются набором алгоблоков, которые исполняются друг за другом последовательно [10].

В MWBridge необходимо открыть Алго ВУ и настроить параметры для системы управления. Настройки параметров представлены ниже на рисунках 33 и 34.

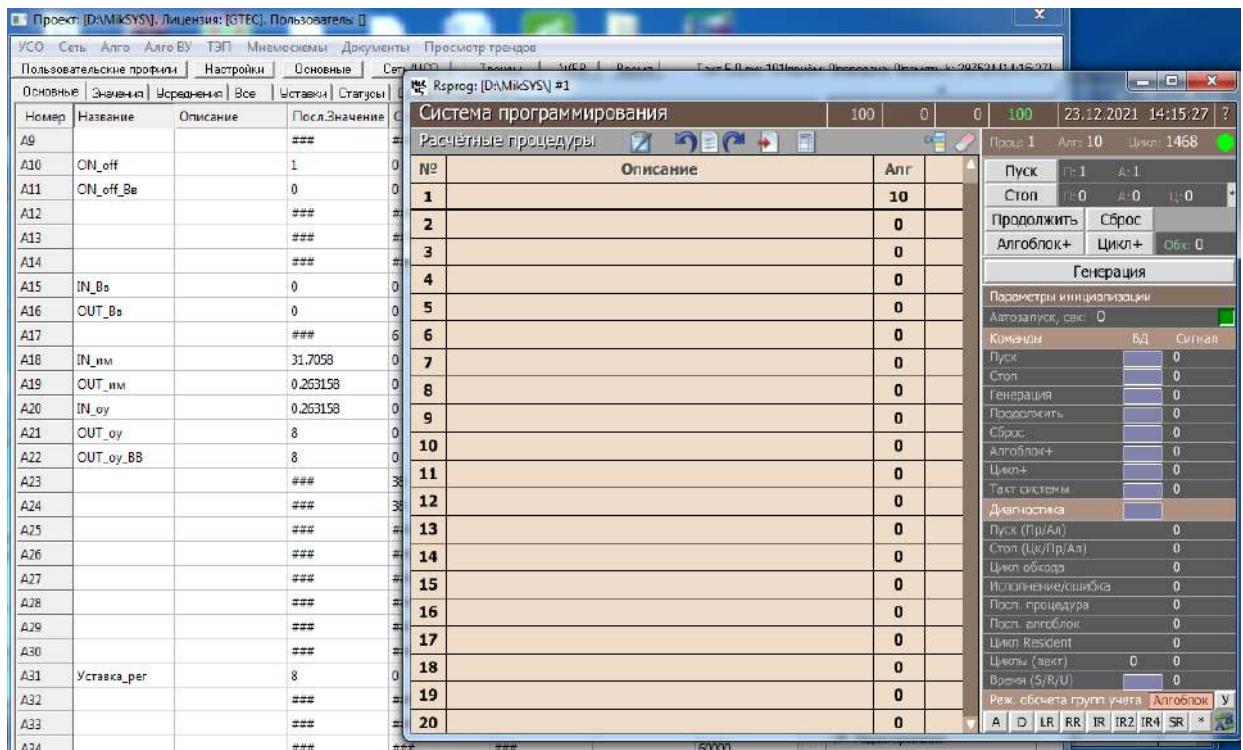


Рисунок 33 - Главное окно программы Алго ВУ

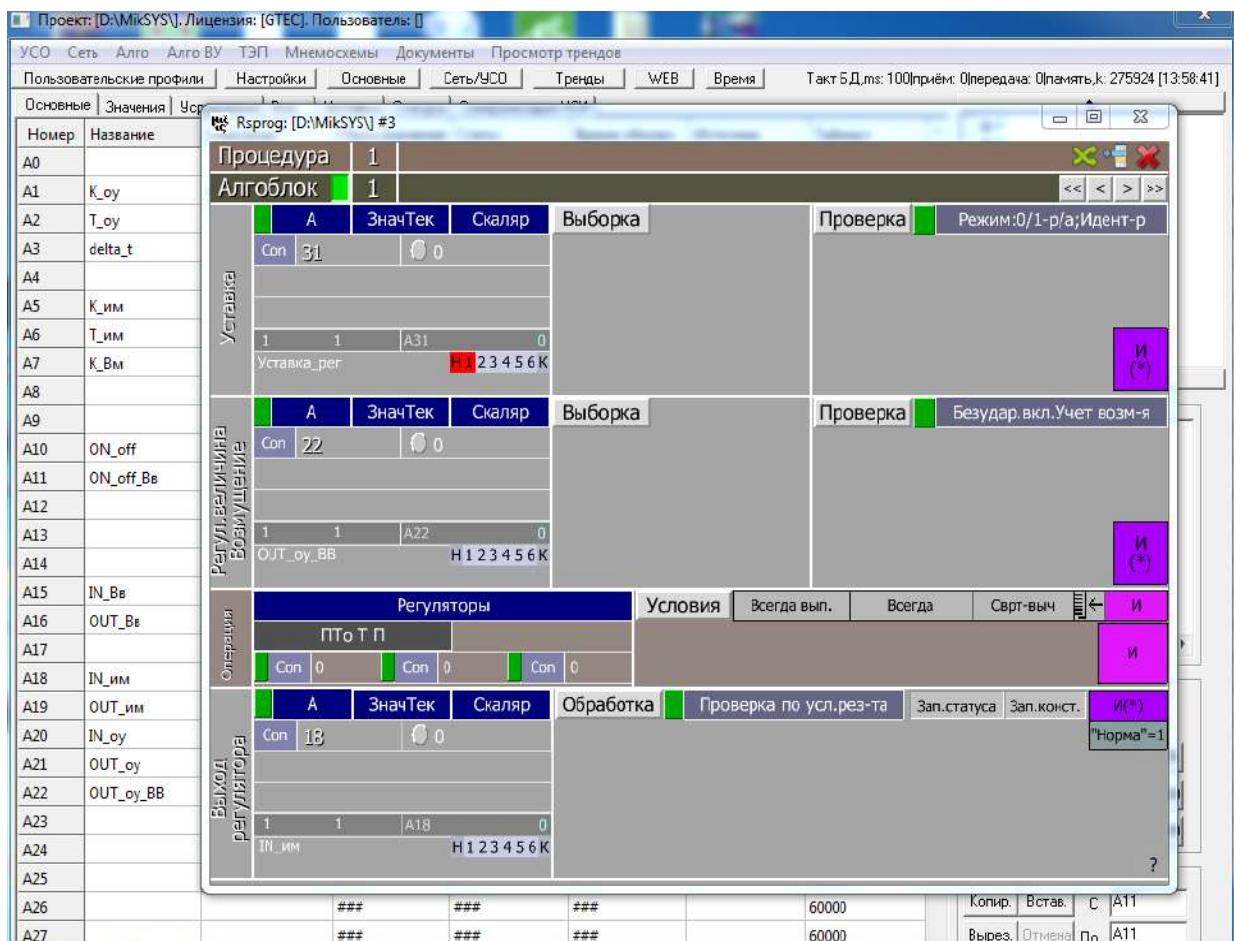


Рисунок 34 - Окно алгоблока

В окне алгоблока необходимо настроить параметры: уставку, возмущающее воздействие, выход регулятора. Также можно выбрать операцию в окне алгоблока. Исполнительный механизм исследуемой системы имеет только коэффициент передачи, поэтому для операции выбрано Пто Т П, которое показано на рисунке 34.

## 4.5 Настройка и исследование влияния регулятора на качество регулирования

RYC-02 реализует ПИ (пропорционально-интегральный) закон регулирования с обратной связью по давлению в расширительном баке RY10P01B1 и по положению клапана RY10S17.

В ПИ-регулировании скорость перемещения регулирующего органа пропорциональна ошибке регулирования и скорости изменения регулируемой величины.

ПИ-регулятор реагирует быстро на изменение уставки (П-составляющая) и работает без статической ошибки (И-составляющая). В случае отказа канала регулирования с интегральной составляющей ПИ-регулятор будет работать как П-регулятор и это повышает надежность его работы.

С ростом И-составляющей ухудшаются показатели качества регулятора.

Вход и выход ОУ системы без регулятора изображены на рисунке 35.

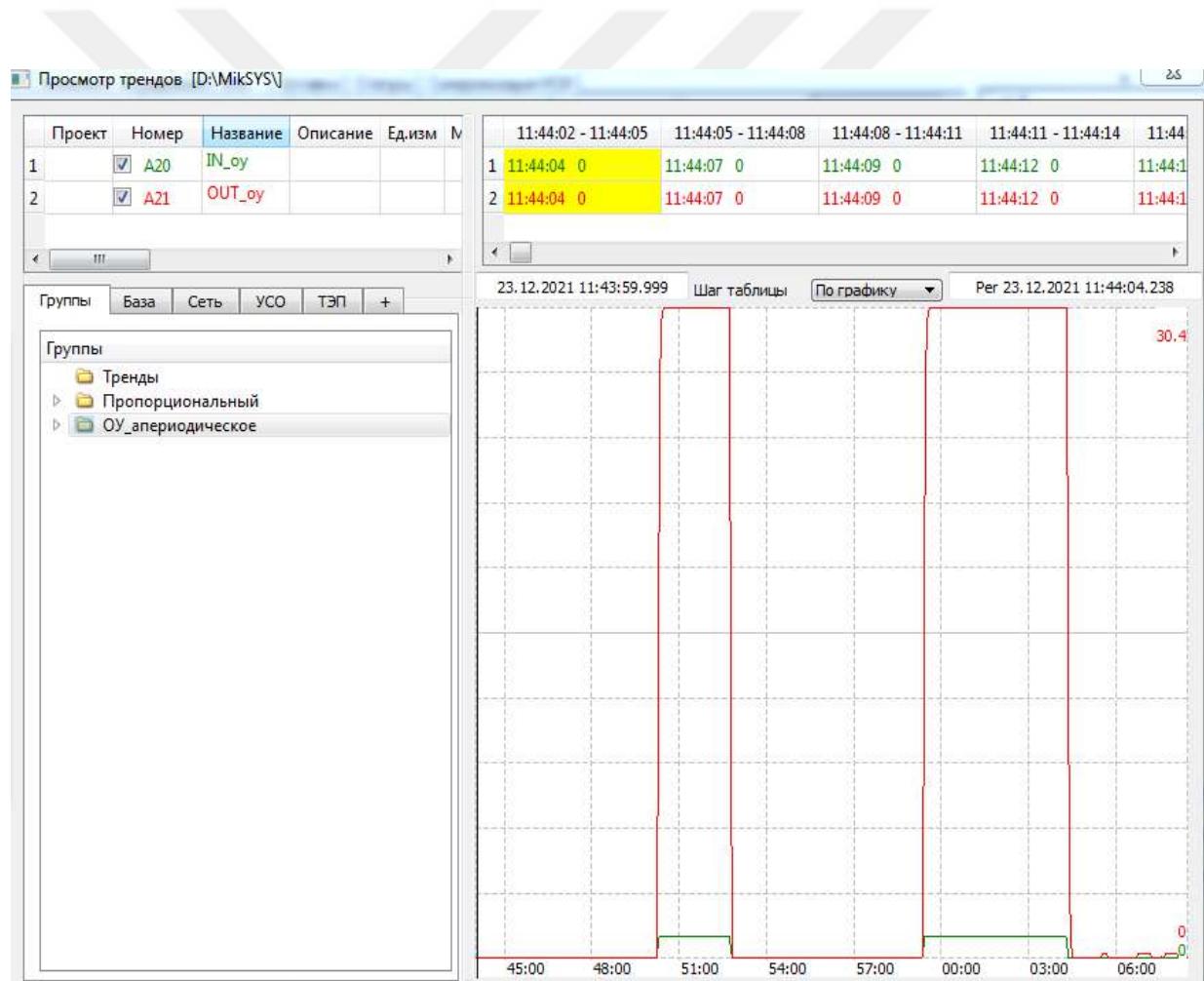


Рисунок 35 - Вход и выход ОУ системы без регулятора

Когда в системе присутствует возмущающее воздействие, образуется скачок на выходе системы, что не является для системы желаемым

результатом. На рисунке 36 можно видеть, что регулятор реагирует на возмущающее воздействие, и выход системы приближается к установленному значению на входе системы уставкой.

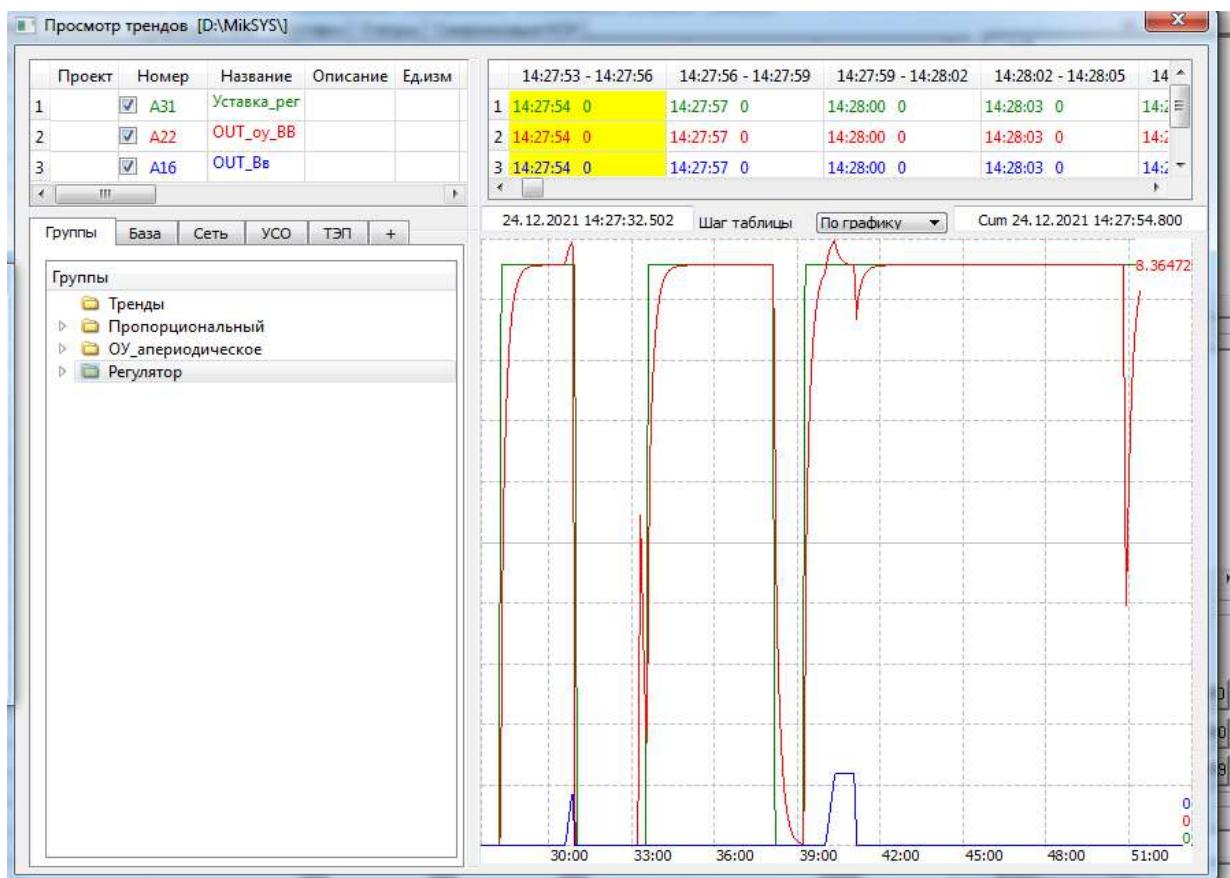


Рисунок 36 - Выход системы с регулятором и возмущающим воздействием

Для тестирования моделирования в MWBridge можно пользоваться функцией «Эмулятор». Для того чтобы добавить Эмулятор, нужно открыть в программе «Модуль эмулятора сигнала» и с его помощью управлять параметрами Эмулятора [9]. Окно модуля эмулятора сигнала изображено на рисунке 37.

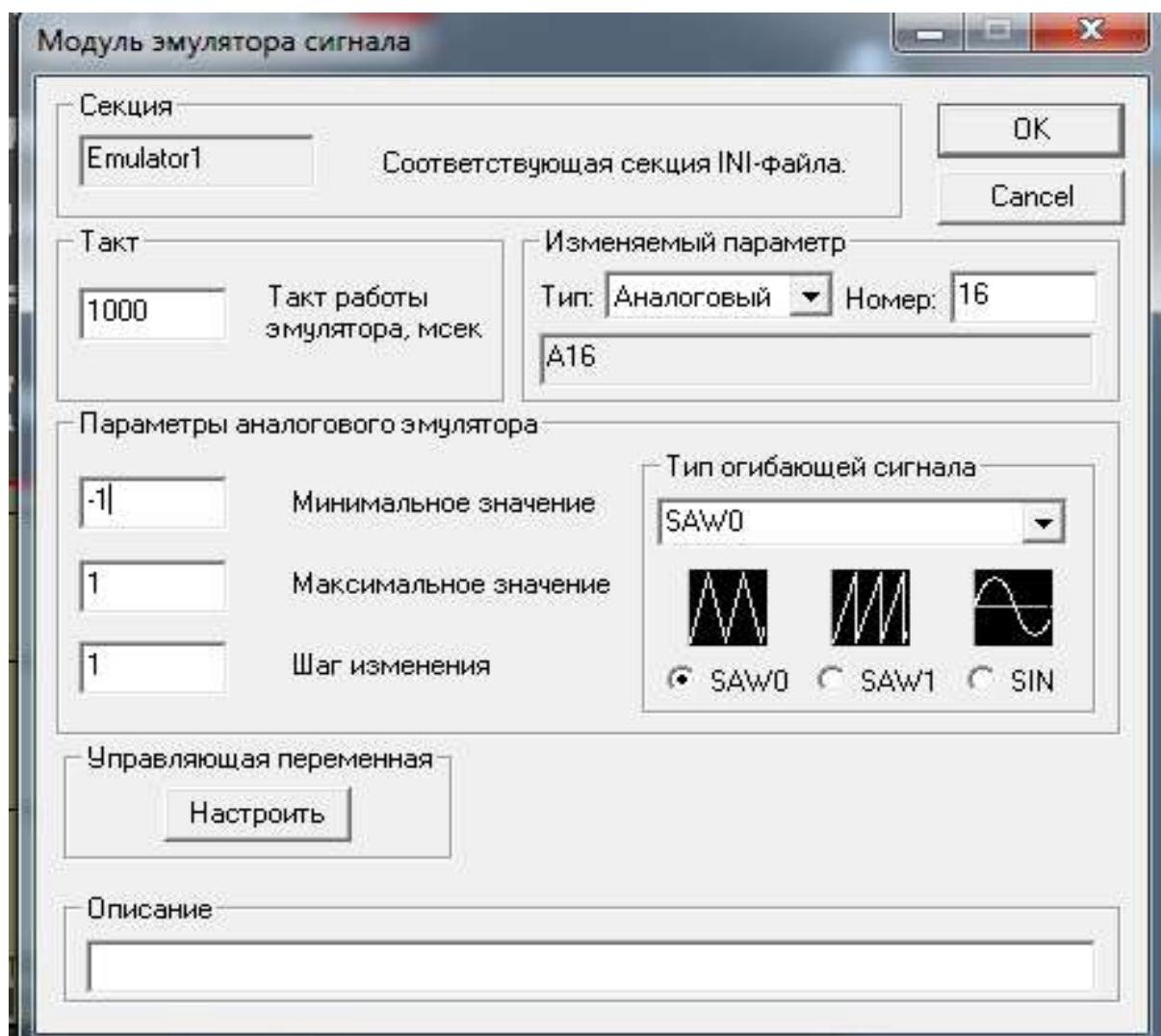


Рисунок 37 - Окно модуля эмулятора сигнала

Такт работы (определяется периодом возмущающих сигналов) сильно влияет на устойчивость и на качество регулирования. При больших значениях Ттакта регулятор хорошо поддерживает выходные значения и давления в допустимом диапазоне 7-9 кгс/см<sup>2</sup>. А при маленьких значениях периода возмущения система находится в неустойчивом состоянии, на выходе возникают колебания и перерегулирования. Это по безопасным критериям и критериям управления техническими оборудованием на АЭС является недопустимым. Это объясняется тем, что если возмущающие сигналы изменяются быстрее, чем управляющие сигналы регулятора, регулятор не способен компенсировать эти изменения возмущения.

Реакция системы на возмущающие синусоидальные и треугольные сигналы с различными значениями Ттакт изображены на рисунках 38 - 42.

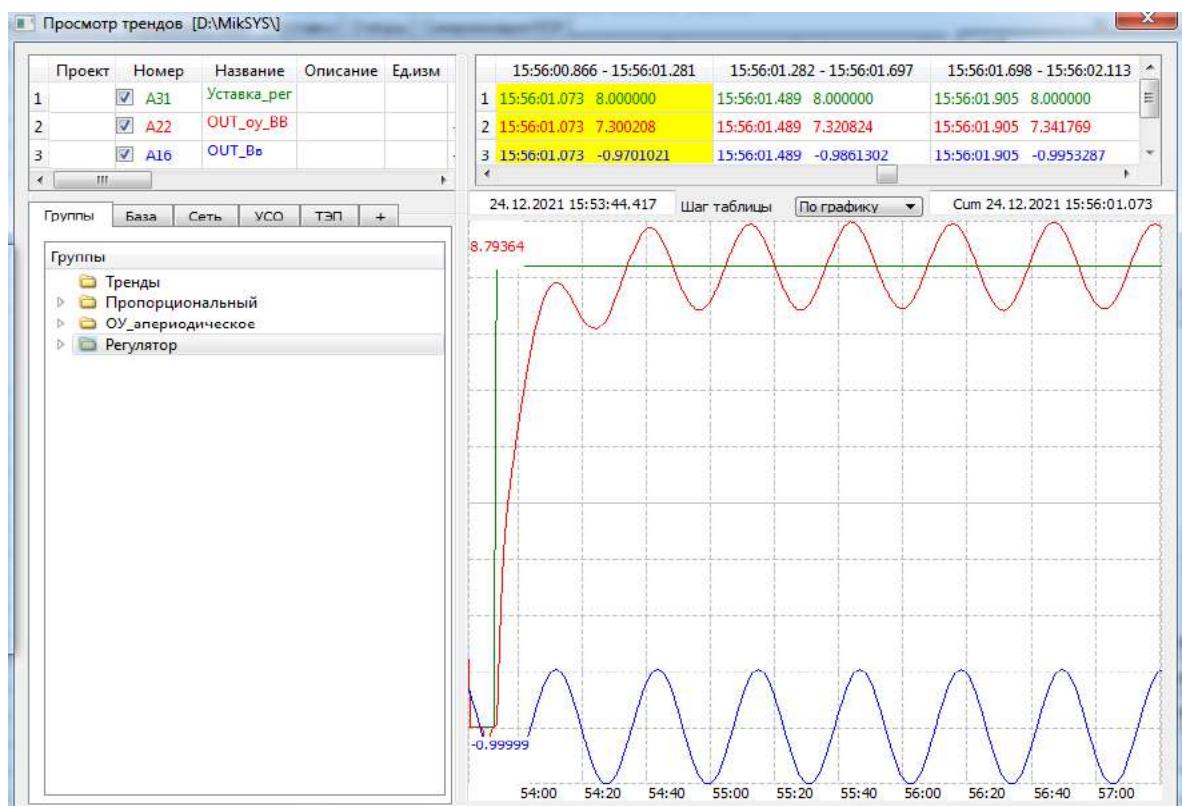


Рисунок 38 - Реакция системы на возмущающие синусоидальные сигналы с тaktом Ттакт =1000



Рисунок 39 - Реакция системы на возмущающие синусоидальные сигналы с тактом Ттакт = 400

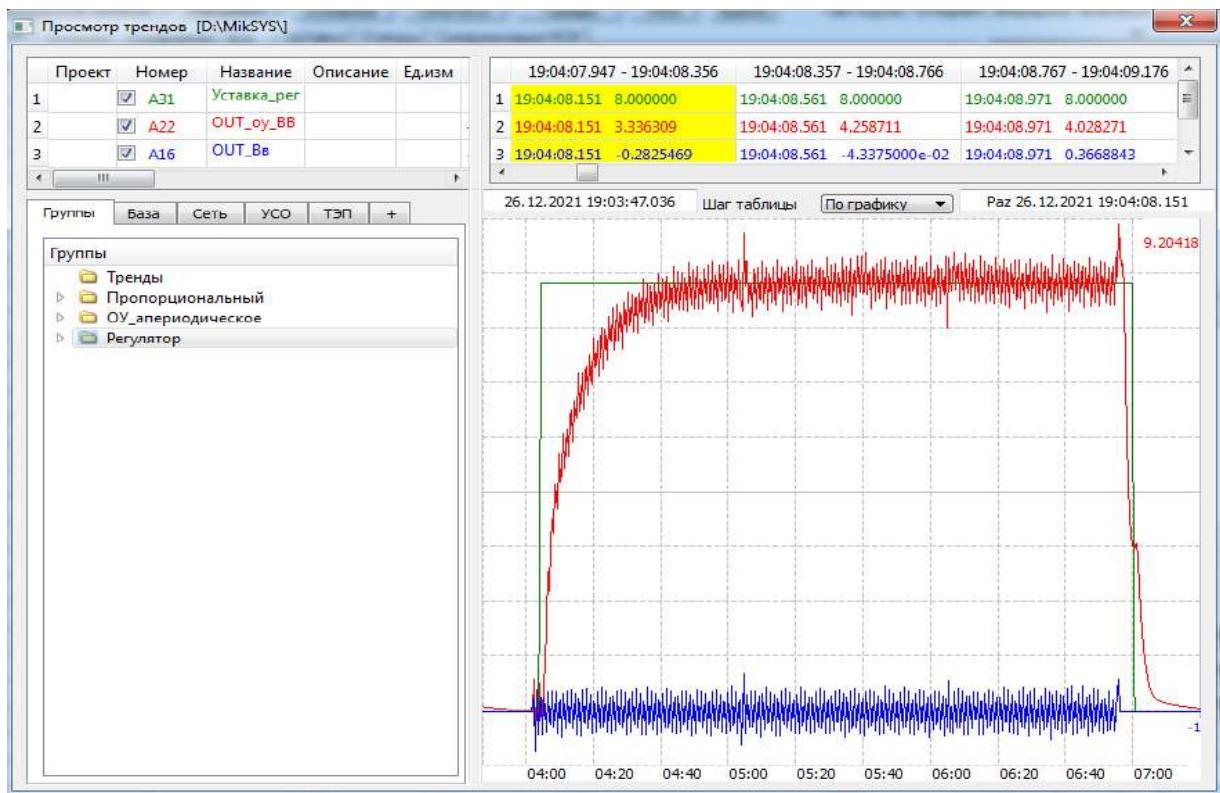


Рисунок 40 - Реакция системы на возмущающие синусоидальные сигналы с тектом Ттакт = 10

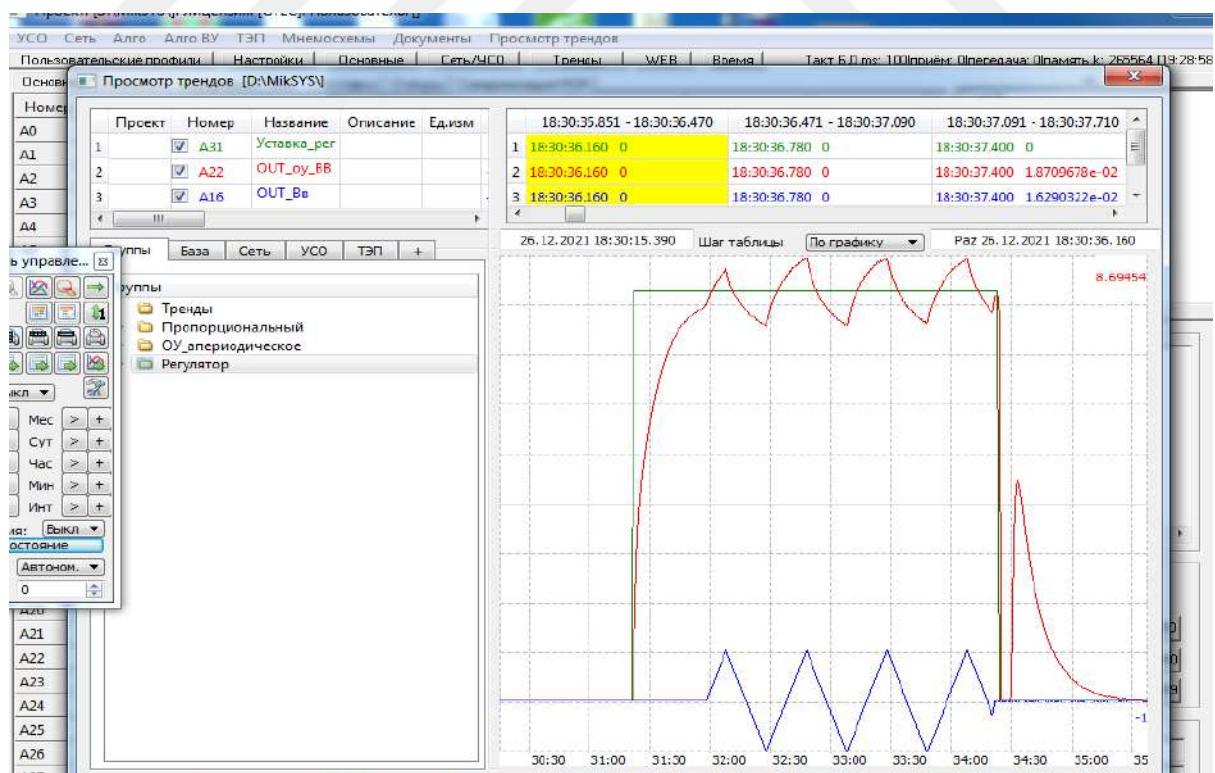


Рисунок 41 - Реакция системы на возмущающие треугольные сигналы с тектом Ттакт = 1000

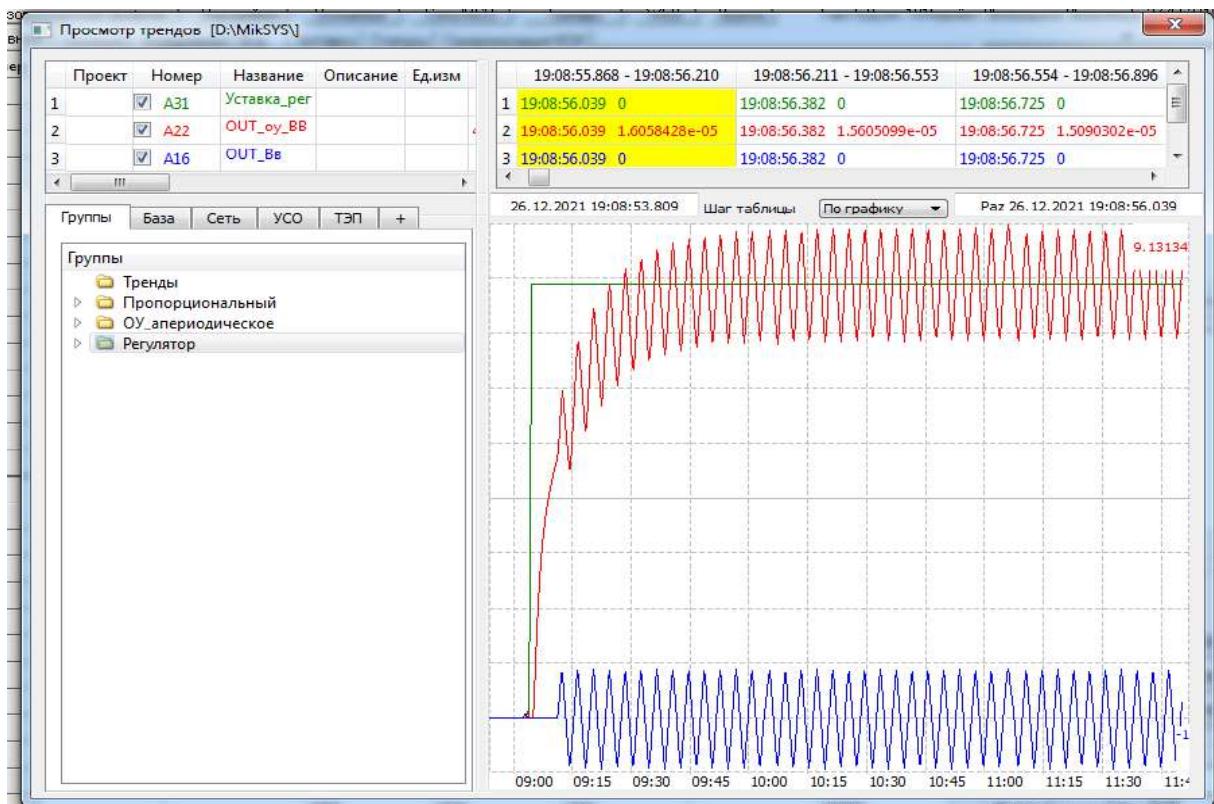


Рисунок 42 - Реакция системы на возмущающие треугольные сигналы с тактом Ттакт = 100

## 4.6 Разработка и описание ЧМИ

### 4.6.1 Создание мнемосхемы

Для того чтобы удобно использовать систему регулирования, моделирование которой выполнено в MWBridge, создан человеко-машинный интерфейс с помощью системы отображения Display [11].

Display предназначена для графического и визуального отображения технологических параметров, сигнальной информации и т.д.

Display включает в себя следующие элементы:

- редактор мнемосхем и настроек;
- графическое ядро.

Графическое ядро осуществляет функции отрисовки элементов отображения и мнемосхем.

На Display можно создать кнопки, привязать их к БД реального времени и назначить действия. Например, включение и отключение регулятора или возмущающего воздействия. Также можно добавить элемент отображения

«Самописец». Этот элемент представляет собой прямоугольную область, предназначенную для отображения графиков изменения заданных параметров базы данных. Рисунки 43, 44 и 45 иллюстрируют процесс создания кнопки, варируемой уставки, также привязка самописца к БД.

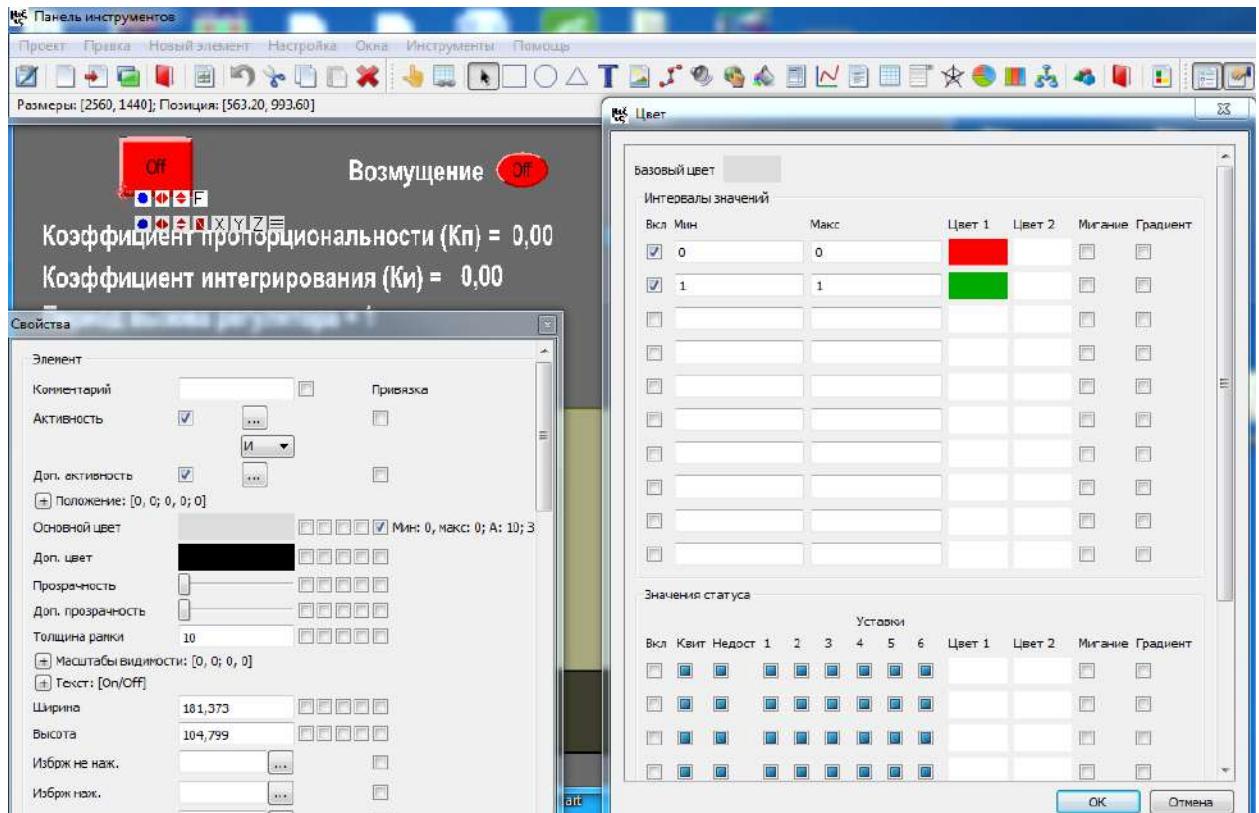


Рисунок 43 – Создание кнопки на мнемосхеме

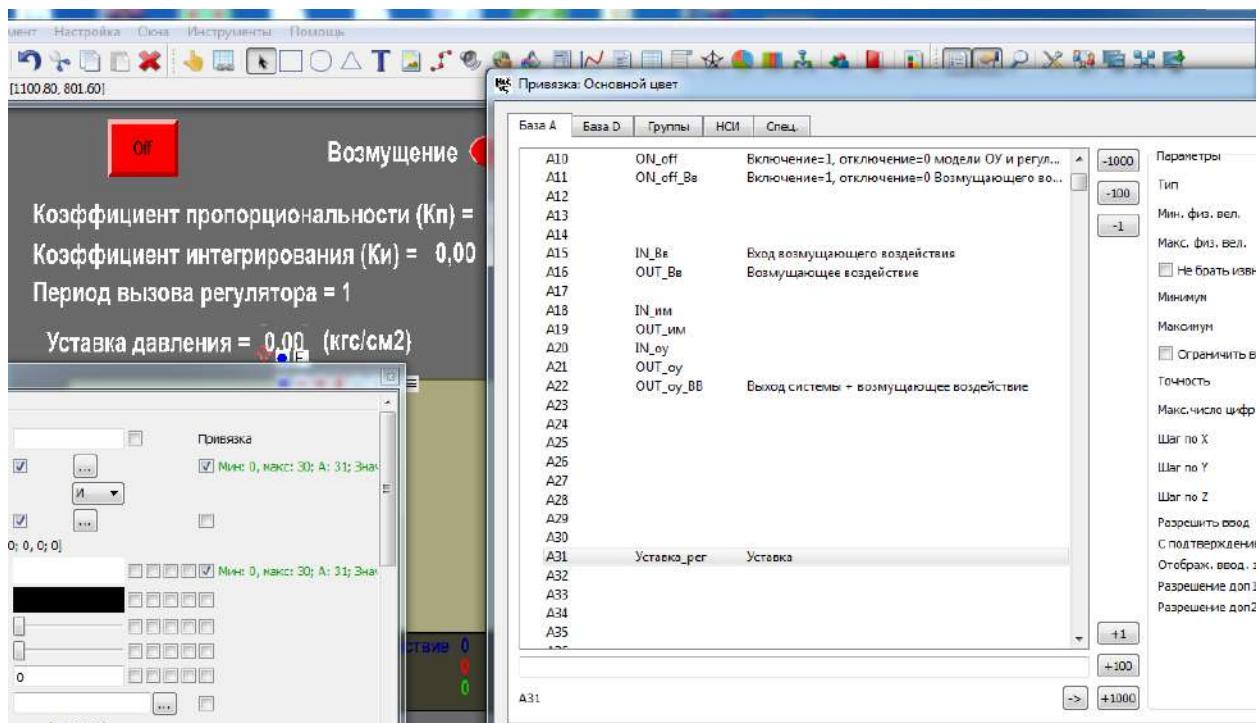


Рисунок 44 – Создание варьируемой уставки и привязка к БД

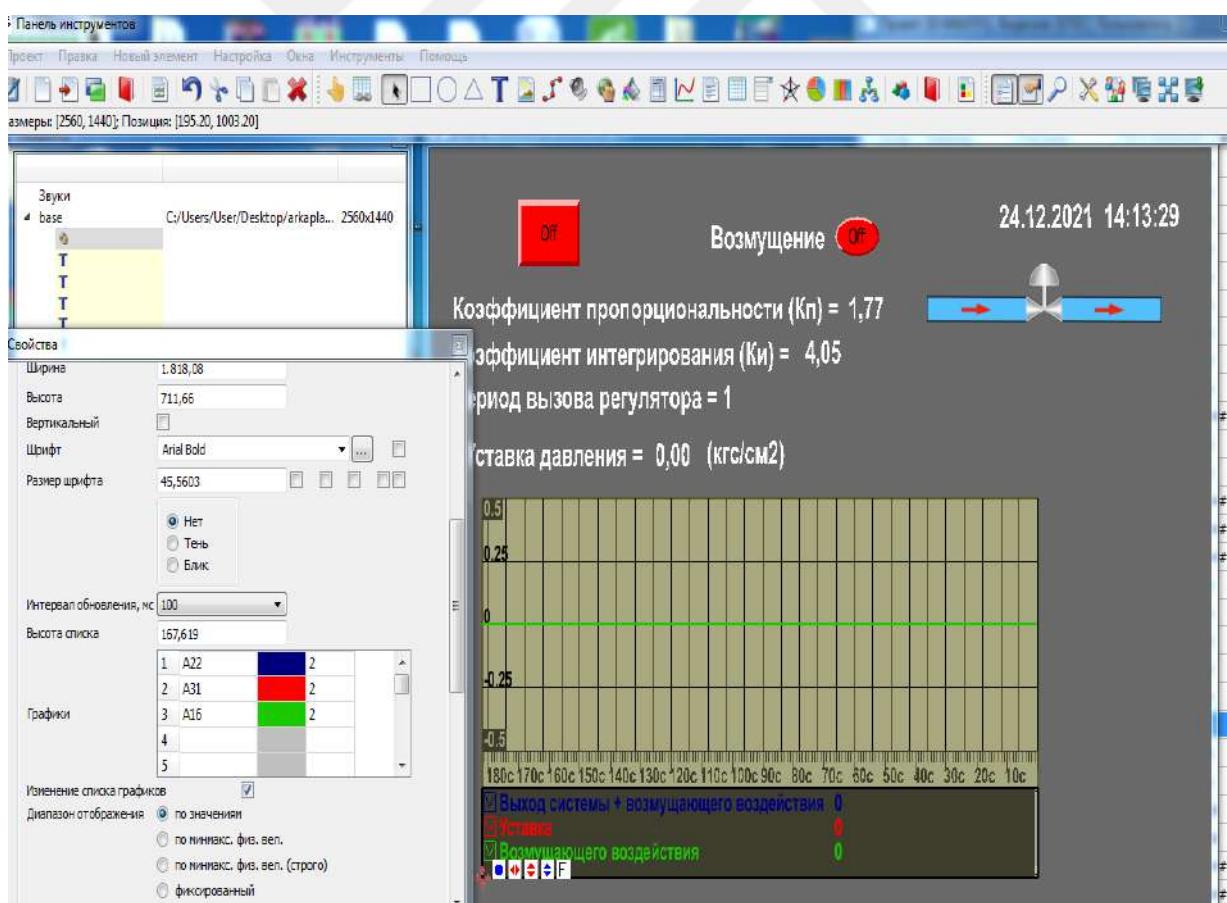


Рисунок 45 - Привязка самописца к БД

На рисунке видны кнопки включения/выключения системы и возмущающего воздействия. Также значения уставки, коэффициентов регулятора и периода вызова регулятора можно ввести на Display [11]. На мнемосхеме выводится уставка с возможностью изменения с точностью до 0.01 кгс/см<sup>2</sup>. Ниже на рисунке 46 показана реакция системы с регулятором на уставку без возмущающего воздействия.

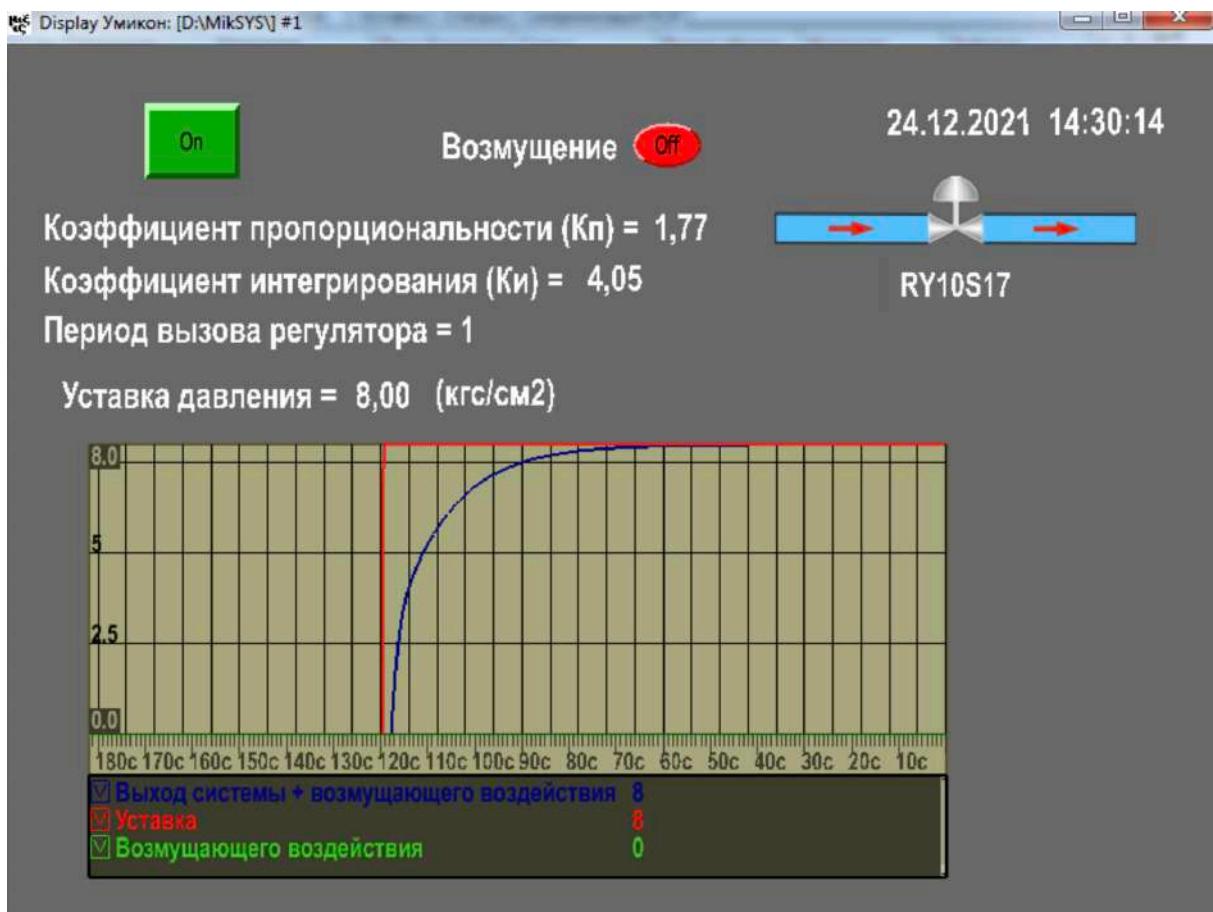


Рисунок 46 - Мнемосхема с технологическими параметрами

Нажимая кнопку «Возмущение», на мнемосхеме можно включить возмущающее воздействие, чтобы исследовать реакцию системы на возмущения и понимать, насколько точно и корректно работает система управления при подобных изменениях в сигналах. На рисунке 47 приведена реакция системы на возмущающее воздействия.

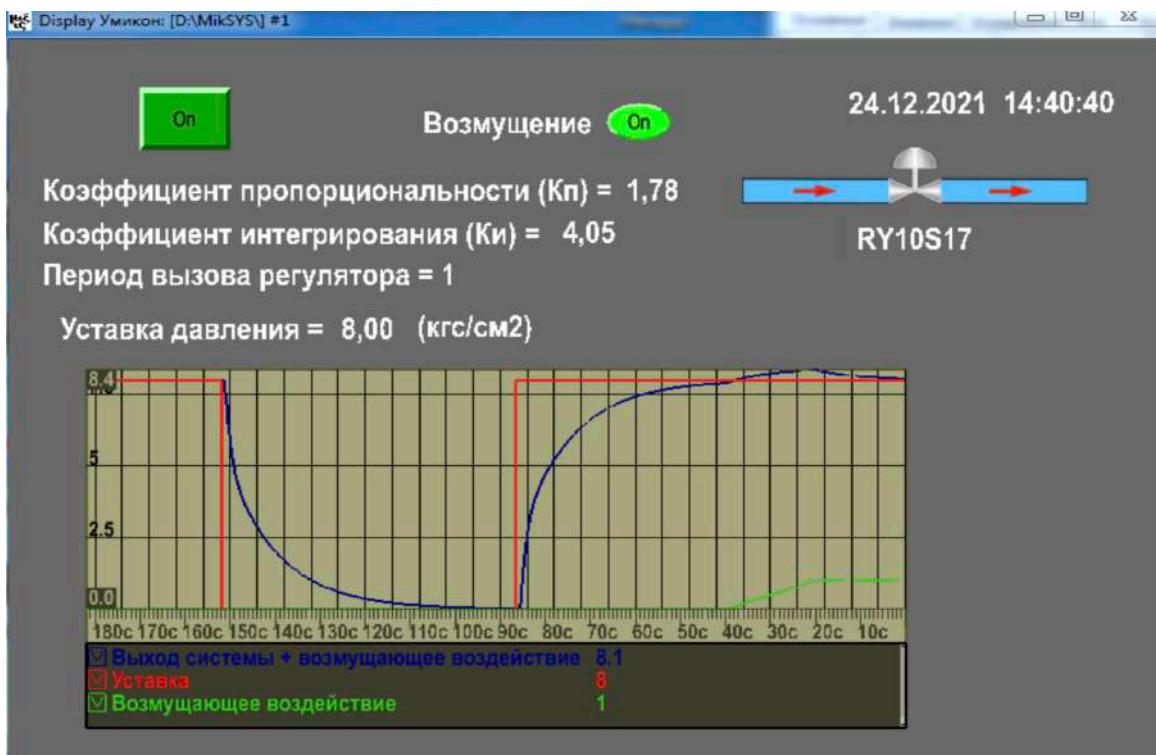


Рисунок 47 - Реакция системы на возмущающее воздействия

На рисунке 48 можно наблюдать, что с выключением возмущения образуется скачок значения на выходе системы, но регулятор исправляет это изменение, и после этого выходное значение системы достигает значения уставки, требуемой для работы системы.

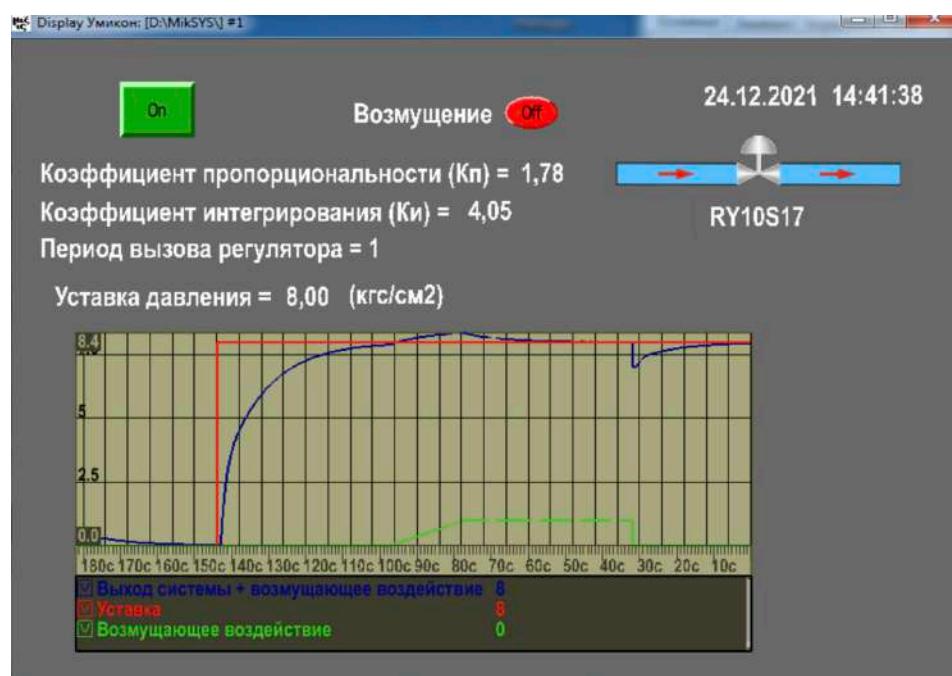


Рисунок 48 - Реакция системы на возмущающее воздействия при выключении возмущения

#### 4.6.2 Исследование системы регулирования с разными коэффициентами

Чтобы исследовать систему регулирования, её реакцию на возмущающее воздействия и качества регулирования были изменены коэффициенты пропорциональности и интегрирования, также период вызова регулятора.

На рисунках 49 - 50 показана реакция системы на различные значения Кп, Ки.

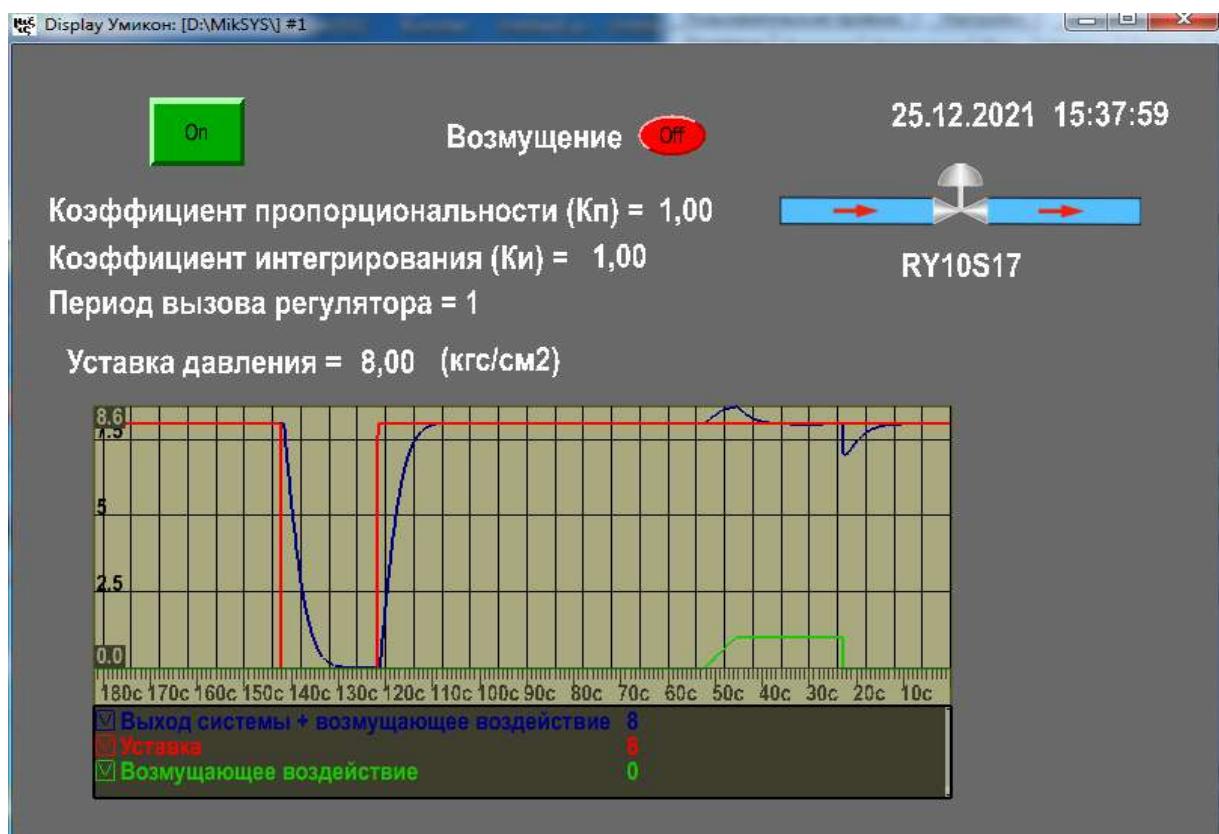


Рисунок 49 – Реакция системы при Кп = 1, Ки = 1

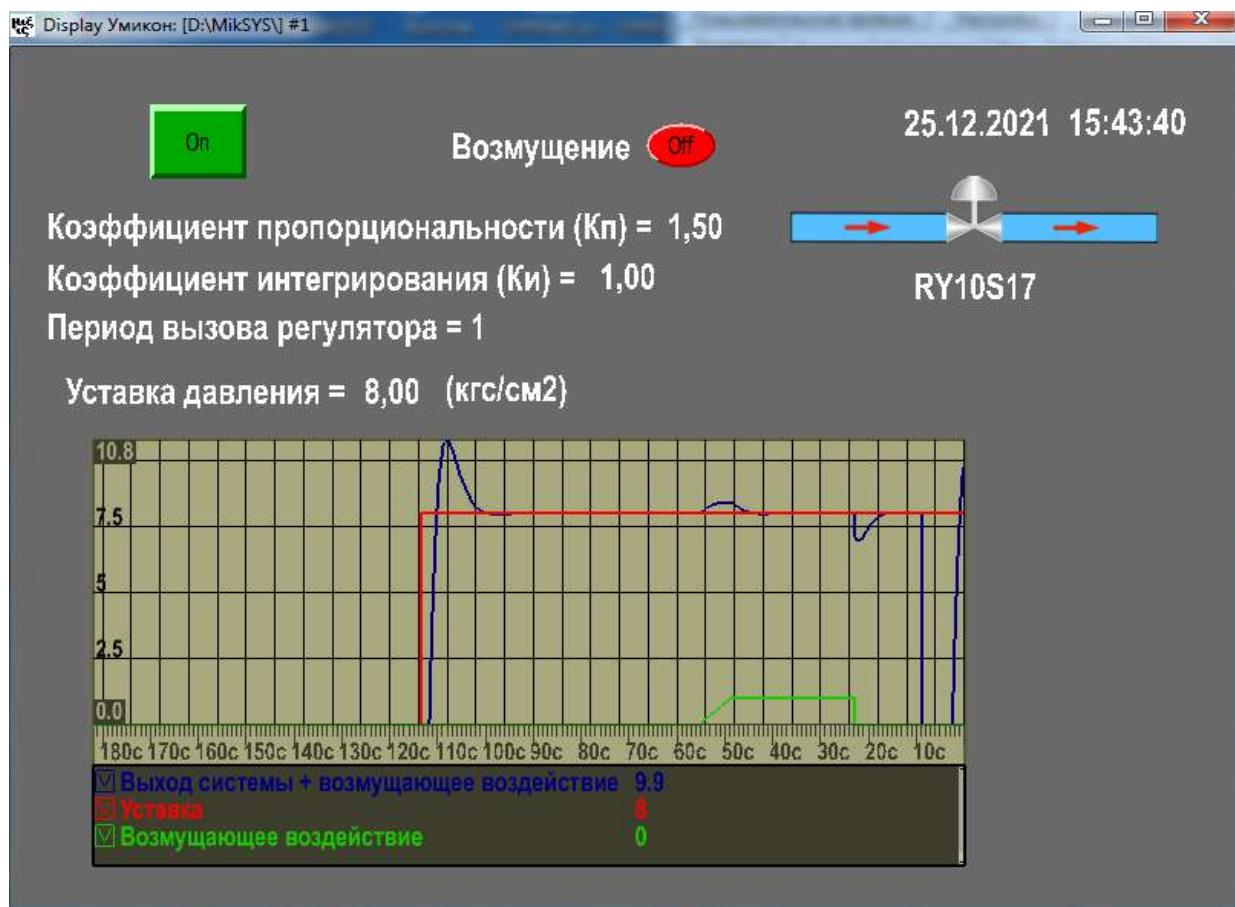


Рисунок 50 – Реакция системы при Кп = 1,5, Ки = 1

Нужно отметить, что при Кп = 1,5 величина перерегулирования очень большая. Величина перерегулирования показывает, на сколько процентов максимальное значение переходной характеристики превышает её установившиеся значения.

Кроме этого, было проведено исследование влияния периода вызова регулятора на качество регулирования. Результаты показаны на рисунках 51, 52 ниже.

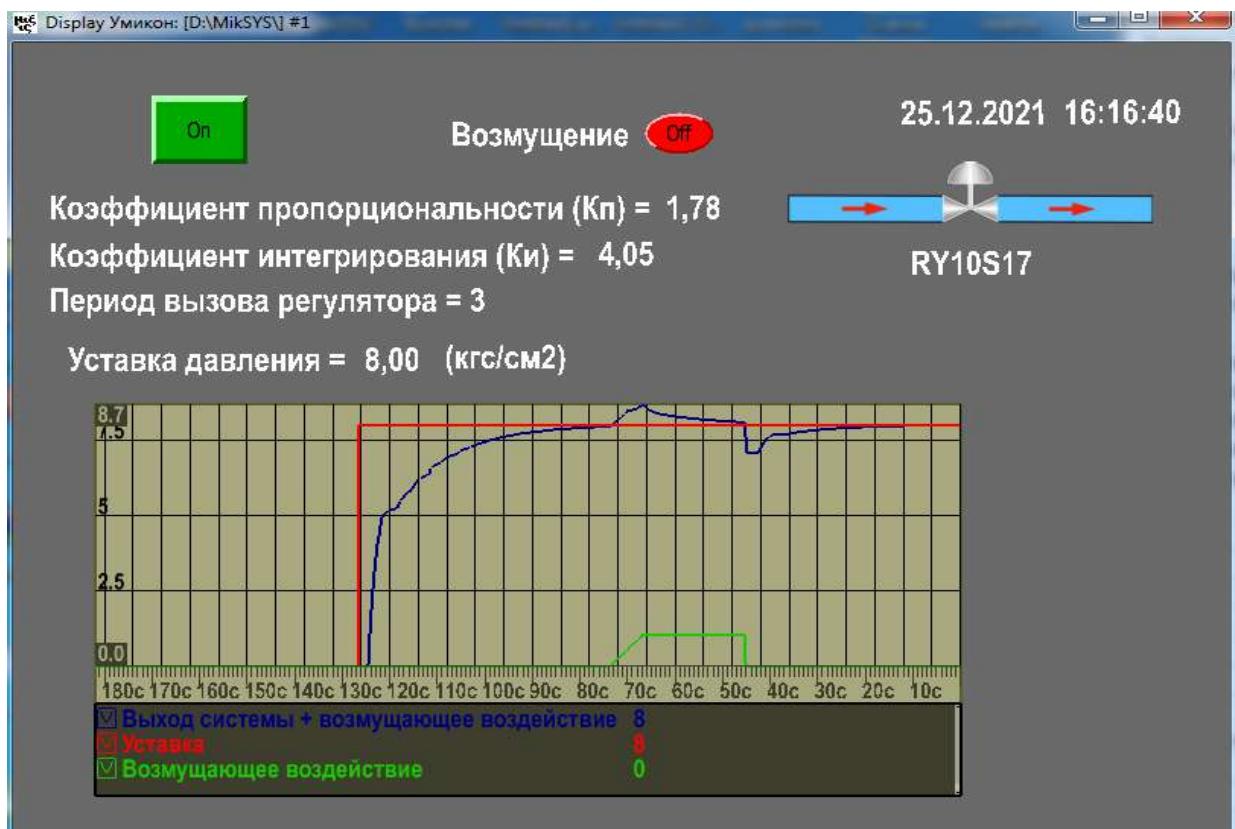


Рисунок 51 - Реакция системы при периоде вызова регулятора = 3 с

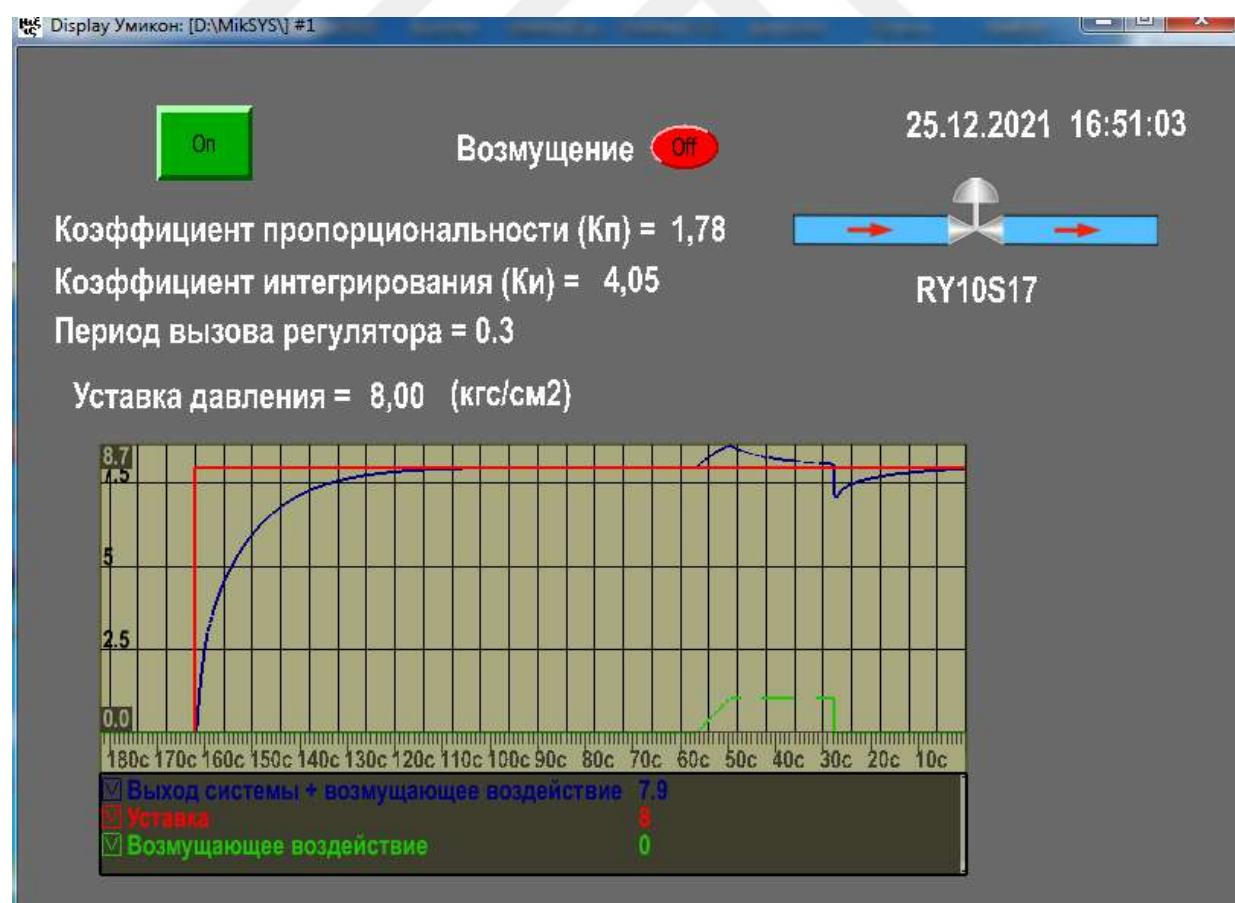


Рисунок 52 - Реакция системы при периоде вызова регулятора = 0.3 с

Далее была рассмотрена реакция системы на возмущающие треугольные и синусоидальные сигналы с различным значением Ттакт. Результаты проиллюстрированы на рисунках 53 – 56.

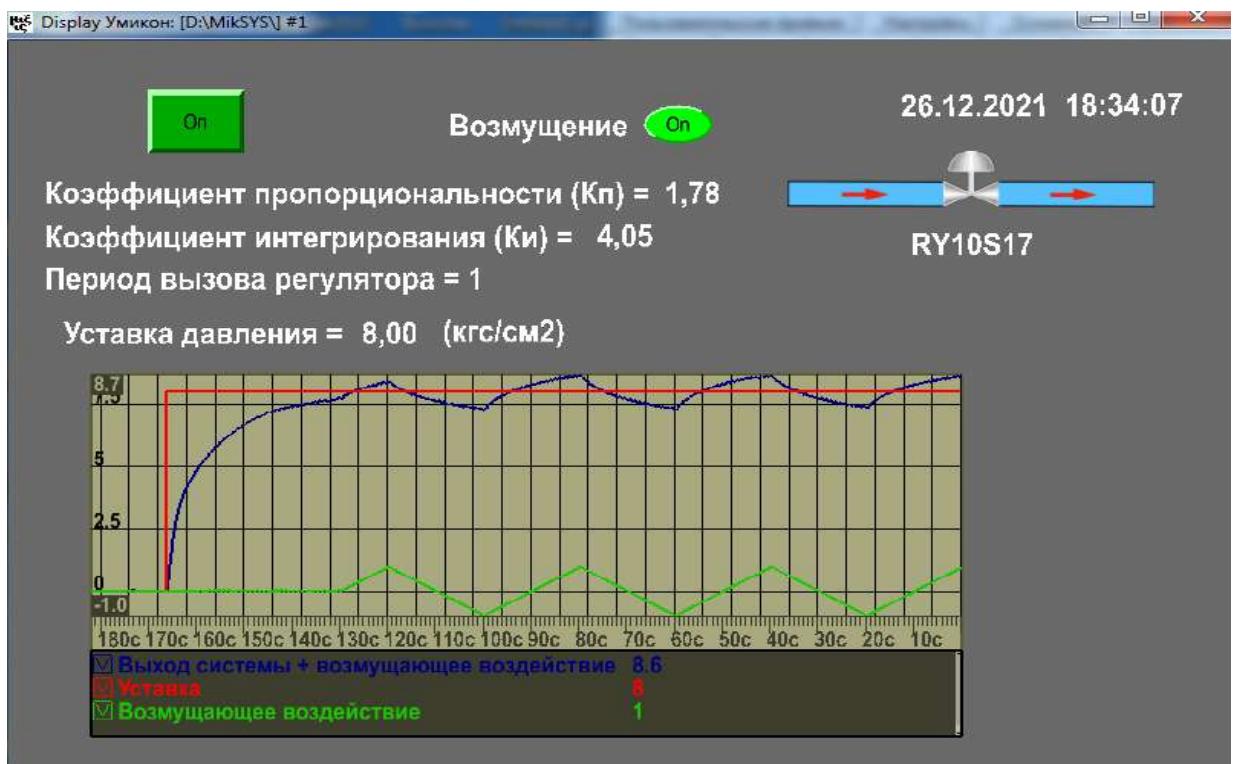


Рисунок 53 - Реакция системы на возмущающие треугольные сигналы с тaktом Ттакт = 1000 в ЧМИ

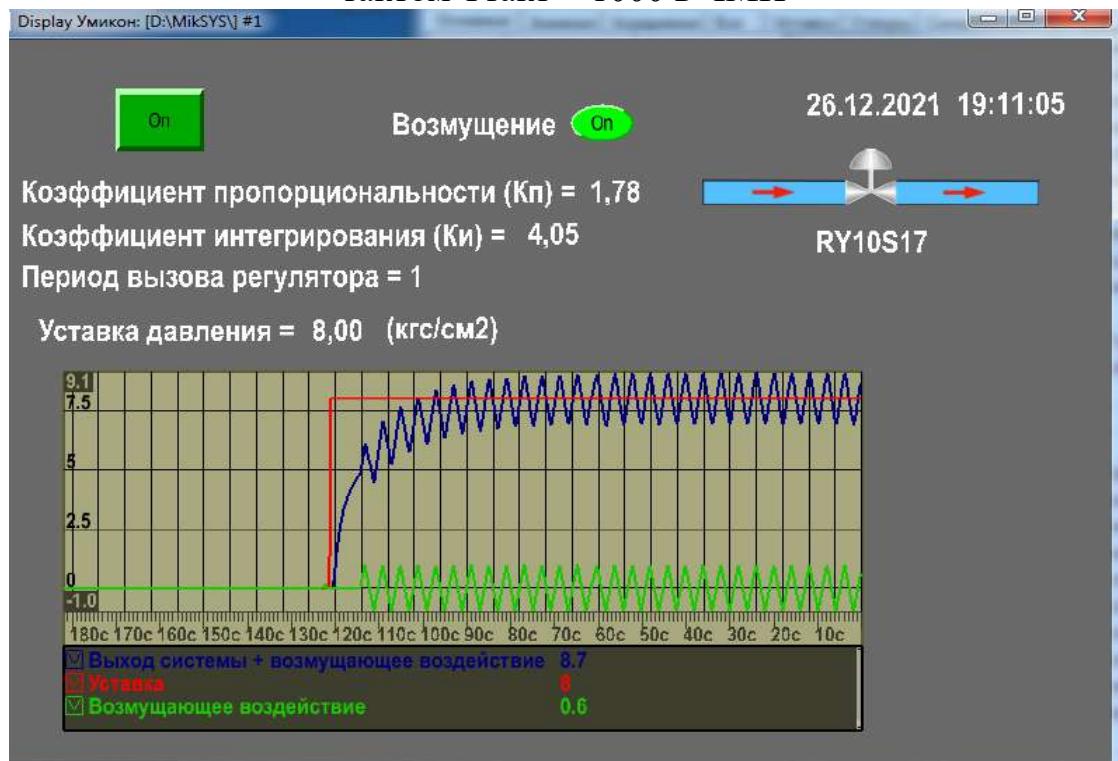


Рисунок 54 - Реакция системы на возмущающие треугольные сигналы с тaktом Ттакт = 100 в ЧМИ

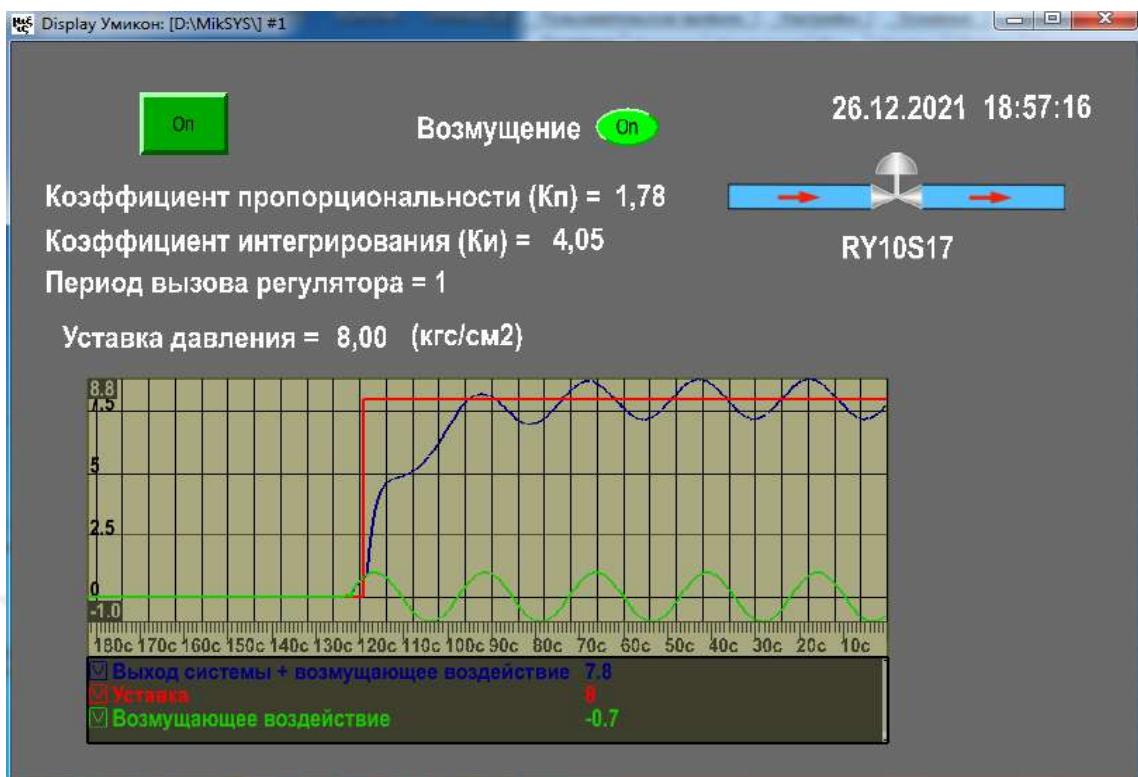


Рисунок 55 - Реакция системы на возмущающие синусоидальные сигналы с тактом Ттакт = 400 в ЧМИ

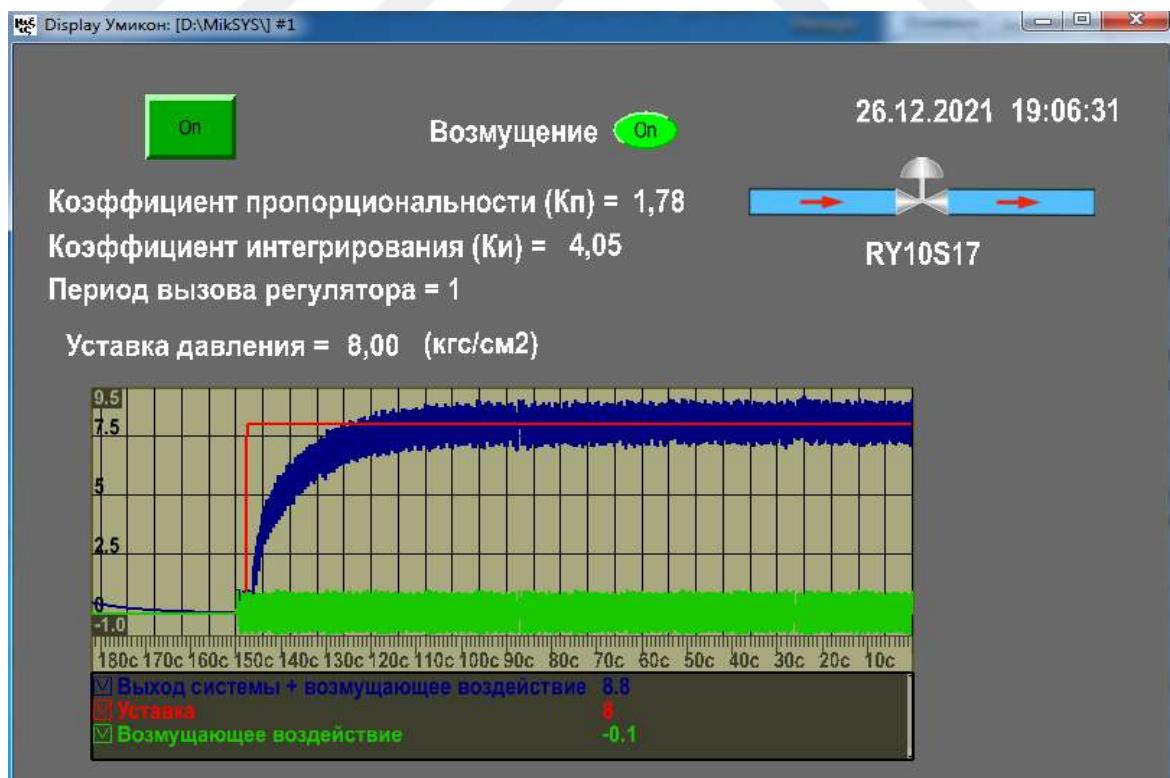


Рисунок 56 - Реакция системы на возмущающие синусоидальные сигналы с тактом Ттакт = 10 в ЧМИ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целях исследования, разработки и моделирования системы управления давлением в расширителе продувки парогенератора ВВЭР-1000 была изучена техническая документация на систему, а также реализованы:

- математическая модель объекта управления давлением;
- передаточные функции объекта управления и исполнительного механизма;
- объект управления, исполнительного механизма и регулятор в Simulink/Matlab;
- алгоритм кодирования для объекта управления, исполнительного механизма и возмущающего воздействия;
- регулятор в Алго ВУ с базой данных в реальном времени;
- исследование влияния регулятора на качество регулирование;
- исследование устойчивости системы регулирования при наличии возмущающего воздействия;
- человеко-машинный интерфейс и его описание.

Можно сделать вывод о том, что цели подготовки выпускной квалификационной работы были успешно выполнены. Полученные результаты находятся в пределах номинальных интервалов для нормальной работы расширителей продувки парогенераторов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зверков, В.В. Автоматизированная система управления технологическими процессами АЭС. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2014. – 560с.
2. Основное оборудование РО. Министерство Российской Федерации по атомной энергии. Концерн «Росэнергоатом». Балаковская Атомная Электростанция. Служба подготовки персонала. – 182с.
3. Технологические системы РО, часть 2. Министерство Российской Федерации по атомной энергии. Концерн «Росэнергоатом». Балаковская Атомная Электростанция. Служба подготовки персонала. – 285с.
4. Медведев Ю.И. Курс лекций по теории автоматического управления. Часть 1: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – 110с
5. Бондаренко, Ю. Н. Автоматизация системы продувки ПГ и регулирования уровня и давления в расширителях продувки ПГ: Филиал концерна «Росэнергоатом», Волгодонская АЭС.
6. Зверков В.В. Программно-технические комплексы АСУТП АЭС. Функциональные и структурные решения - Учебное пособие. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2018. – 132с.
7. Общее описание платформы ТПТС-НТ. Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова. – Москва, 2017 – 36с.
8. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС/. – Одесса. –2001. –305с.
9. MWBRIDGE- MLB. Руководство пользователя. – Москва: Умикон, 2019. – 246с.
10. RSPROG Система алгоблочного программирования верхнего уровня Руководство Пользователя. – Москва: Умикон, 2020. – 156с.
11. DISPLAY Система отображения Руководство пользователя. – Москва: Умикон, 2019. – 60с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Реализация разностных уравнений в среде MWBridge

rem расчет такта модели ОУ в секундах

A[3].VALUE = A[0].VALUE/1000

rem Разностное Уравнение для Возмущающего Воздействия

A[16].VALUE =

((A[3].VALUE\*A[7].VALUE\*A[15].VALUE)+A[16].VALUEOLD)

IF A[16].VALUE > 1 THEN A[15].VALUE=0

rem Разностное Уравнение ИМ

rem Пропорциональный

A[19].VALUE = A[5].VALUE\*A[18].VALUE

rem Присвоение Выхода ИМ Входу ОУ

A[20].VALUE = A[19].VALUE

rem Разностное Уравнение ОУ

A[21].VALUE = ((A[1].VALUE\*A[20].VALUE) +

((A[2].VALUE\*A[21].VALUEOLD)/A[3].VALUE))/(A[2].VALUE/A[3].VALU  
E +1)

A[22].VALUE = A[21].VALUE + A[16].VALUE

IF A[10].VALUE = 0 THEN A[18].VALUE=0

IF A[10].VALUE = 0 THEN A[19].VALUE=0

IF A[10].VALUE = 0 THEN A[20].VALUE=0

IF A[10].VALUE = 0 THEN A[21].VALUE=0

IF A[10].VALUE = 0 THEN A[22].VALUE=0

IF A[11].VALUE = 0 THEN A[16].VALUE=0