

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
 Отделение школы (НОЦ) И.Н. Бутакова

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Автоматизированная система управления влажностью и температурой в климатической камере

УДК 681.51:536.581:681.542.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ74	Тимошенко Евгения Леонидовна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Кац Марк Давыдович	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Куликова Ольга Александровна	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Стрижак Павел Александрович	д.ф.-м.н., профессор		

Планируемые результаты освоения

Код	Результат обучения*	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки		
<i>расчетно-проектная и проектно-конструкторская деятельность:</i>		
P1	применять передовые знания и достижения для формулирования заданий на разработку проектных решений, проектировать инновационные теплоэнергетические и теплотехнические системы и оборудование, разрабатывать проектные решения, связанные с модернизацией технологического оборудования	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1 ^{1**} , УК-2, ПК-1, ПК-2), Критерий 5 АИОР (п.2.1)согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 16.065 «Инженер-проектировщик технологических решений котельных, центральных тепловых пунктов и малых теплоэлектроцентралей», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16.014 «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>производственно-технологическая деятельность:</i>		
P2	интегрировать знания различных областей для разработки мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI , требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024

¹ ** - универсальные компетенции из СУОС ТПУ (для 2017 г. приема - приказ № 2226 от 01.03.2017 г).

		«Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
P3	применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-5, ПК-6), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
P4 (P6)	применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности, разрабатывать мероприятия по безопасности жизнедеятельности персонала и населения, предотвращать экологические нарушения	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)

<i>научно-исследовательская деятельность:</i>		
P5 (P4)	применять глубокие знания для планирования и постановки задачи инновационного инженерного исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки, применять инновационные методы исследования, проводить исследование, критически интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>организационно-управленческая деятельность:</i>		
P6 (P5)	руководить коллективом специалистов различных направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ, разрабатывать мероприятия по предотвращению экологических нарушений	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2, УК-3, УК-4, УК-5, ОК-2, ПК-8, ПК-10), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>педагогическая деятельность:</i>		
P7	осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ПК-11), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессионального стандарта 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования», утвержденный приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 8 сентября 2015 г. № 608н (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 24 сентября 2015 г., регистрационный № 38993)

<i>Универсальные компетенции</i>		
P8	мыслить абстрактно, обобщать, анализировать, систематизировать и прогнозировать, принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, ОК-1, ОК-2), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	использовать творческий потенциал, саморазвиваться, самореализовываться	Требования ФГОС (УК-6, ОК-3), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	использовать иностранный язык для эффективного взаимодействия в профессиональной сфере	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4, УК-5, ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Профиль 4		
P14	применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в автоматизированных системах управления технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-6, ПК-10), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов (40.012 Профессиональный стандарт «Специалист по метрологии», 40.057 Профессиональный стандарт «Специалист по автоматизированным системам управления производством», 40.061 Оператор-наладчик автоматических линий)

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1) аналитический обзор по литературным источникам (технология объекта, структуры автоматизации, технических средств контроля и автоматизации); 2) проектная разработка автоматизированной системы управления климатической камеры; 3) исследование температурных полей в камере в зависимости от влажности и температуры 4) параметрический синтез системы управления температуры и влажности в климатической камере; 5) исследование влияющих факторов на качество переходных процессов в системе автоматического управления климатической камере; 6) обсуждение результатов выполненной работы 7) финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; 8) социальная ответственность; 9) заключение по работе.
Перечень графического материала	1) схема функциональная 2) схема принципиальная электрическая
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Основной раздел	Кац Марк Давыдович Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Киселева Елена Станиславовна Доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Куликова Ольга Александровна Доцент ООД ШБИП
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Обзор теоретических работ	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Кац. М.Д.	к.ф.-м.н.		11.01.19

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ74	Тимошенко Евгения Леонидовна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 135 с., 38 рис., 33 табл., 67 источников, 4 приложения.

Ключевые слова: АСУ климатической камеры, регулирование влажности, регулирование температуры, климатическая камера, климатическая камера тепла-влаги.

Цель работы – разработка автоматизированной системы управления влажностью и температурой.

В процессе разработки производился выбор структурной схемы, анализ и выбор алгоритма управления. По кривым разгона получены передаточные функции объекта управления, определены параметры настройки стабилизирующего, корректирующего и цифрового регуляторов. Так же разработаны функциональная и принципиальная электрическая схемы. Разработана мнемосхема, для управления технологическим процессом.

Благодаря условиям, воссоздаваемы разработанной климатической камере, с помощью математического моделирования получено максимальное значение температуры изоляции кабеля, при варьировании температуры окружающей среды. На основании полученных данных определен остаточный ресурс изоляции кабеля.

Содержание

Введение.....	14
1 Сведения о климатических камерах.....	15
2 Получение аналитической зависимости температуры от относительной влажности в камере	18
3 Конструкция климатической камеры.....	23
4 Требования к автоматическому управлению влажностью и температурой в климатической камере	24
5 Разработка системы автоматического регулирования влажности в климатической камере	25
5.1 Выбор схемы и закона регулирования.....	25
5.2 Обзор и выбор структуры АСУ влажности.....	26
5.3 Обзор и выбор структуры АСУ температуры.....	29
5.4 Выбор системы регулирования	32
5.5 Разработка функциональной схемы автоматизации	34
5.6 Проектная разработка системы управления.....	36
5.6.1 Выбор измерительного преобразователя температуры	36
5.6.2 Выбор измерительного преобразователя уровня	37
5.6.3 Выбор измерительного преобразователя влажности	38
5.6.4 Выбор регулирующего устройства	39
5.6.5 Выбор электропривода	40
5.6.6 Выбор насоса	41
5.6.7 Выбор нагревательного элемента	41
5.6.8 Выбор ультразвукового пьезометра.....	42
5.6.9 Выбор греющего кабеля.....	43
5.6.10 Выбор измерительного преобразователя перепада давления ...	44
5.6.11 Выбор автоматизированного рабочего места	45
5.7 Разработка принципиальной электрической схемы автоматизированной системы.....	46

6 Расчет АСР влажности	47
6.1 Экспериментальное определение кривых разгона объекта управления	47
6.2 Получение передаточной функции по кривой разгона объекта регулирования влажности	49
6.3 Получение передаточной функции по кривой разгона объекта регулирования температуры	50
7 Экспериментальное снятие статически характеристик измерительных преобразователей	52
7.1 Передаточная функция измерительного преобразователя температуры.....	52
7.2 Передаточная функция измерительного влажности	53
8 Расчет оптимальных параметров настройки регулирующих устройств	55
8.1 Обзор методов определения параметров настройки регулятора	55
8.2 Определение ОПН стабилизирующего и корректирующего регуляторов.....	56
8.2.1 Расчет параметров настройки стабилизирующего регулятора ...	56
8.2.2 Расчет параметров настройки корректирующего регулятора.....	58
8.3 Построение переходного процесса и оценка качества работы системы по каналу задающего воздействия.....	60
8.4 Оценка качества переходного процесса по каналу регулирующего воздействия со стороны регулирующего органа	62
8.5 Моделирование процессов АСУ влажности температуры при изменении значений параметров настройки регуляторов	63
8. 6 Расчет параметров настройки цифрового регулятора.....	68
9 Разработка мнемосхемы для АСУ климатической камеры	72
10 Определение зависимости износа изоляции от изменения условий эксплуатации с помощью климатической камеры	73
10.1 Выбор объекта моделирования.....	75
10.2 Моделирование процесса нагрева кабеля.....	76

10.3 Оценка технического состояния кабеля на основании температуры изоляции.....	81
11 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	86
11.1 Предпроектный анализ	87
11.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	87
11.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	88
11.2 FAST-анализ	89
11.3 Перечень работ и оценивание времени их выполнения.....	92
11.4 Смета затрат на проект	94
11.4.1 Материальные затраты	95
11.4.2 Амортизация компьютерной техники.....	95
11.4.3 Затраты на заработную плату	95
11.4.4 Затраты на социальные нужды	96
11.4.5 Прочие затраты.....	96
11.4.6 Накладные расходы	97
Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	98
12 Социальная ответственность	101
12.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	102
12.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создавать объект исследования	104
12.2.1 Микроклимат производственных помещений	105
12.2.2 Естественное и искусственное освещение.....	106
12.2.3 Повышенный уровень шума на рабочем месте	108
12.2.4 Электробезопасность.....	108
12.3 Экологическая безопасность.....	109
12. 4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	110
Заключение по разделу «Социальная ответственность»	112

Заключение	113
Список использованных источников	114
Приложение А Automated control system of humidity and temperature in the climate chamber	121
Приложение Б Значение параметров стабилизирующего регулятора	133
Приложение В Значение параметров корректирующего регулятора	134
Приложение Г Заказная спецификация	135

Графический материал:	на отдельных листах
ФЮРА.421000.009 С2	Схема функциональная
ФЮРА.421000.009 Э3	Схема принципиальная электрическая

Обозначения и сокращения

АСУ	– автоматизированная система управления;
АСР	– автоматическая система регулирования;
АРМ	– автоматизированное рабочее место;
ПЛК	– программируемый логический контроллер
ОПН	– оптимальные параметры настройки;
ВЧХ	– вещественная частотная характеристика;
МЧХ	– мнимая частотная характеристика;
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика;
РАФЧХ	– расширенная амплитудно-фазовая частотная характеристика;
НЦУ	– настройки цифрового управления;
ПВХ	– поливинилхлорид;
СПЭ	– сшитый полиэтилен.

Введение

Промышленные компании, а также центры по разработке и ведению исследовательской деятельности, должны провести предварительные эксперименты в условиях, приближенных к реальным. Такая необходимость объясняется потребностью в улучшении качественных характеристик продукции, готовящейся к выпуску. Для этих целей созданы камеры, которые способны имитировать любые климатические условия.

Климатические камеры позволяют моделировать воздействие окружающей среды. Она позволяет максимально точно воспроизвести необходимые условия окружающей среды. Это может быть температурный режим, ультрафиолетовое излучение, изменить и поддержать параметры влажности воздуха, а также контролировать различные химические и агрессивные вещества. Климатические камеры широко используются во многих отраслях промышленности, машиностроении и других сферах деятельности человека. Работа всех научно-исследовательских центров построена на максимально точных результатах, что делает применение климатических камер весьма актуальным.

Производством климатических камер занимается большое количество фирм: в России завод Патриот, СМ Климат, Мир оборудования, в США – BINDER, Top Rank –Китай и многие другие [1,2].

Климатические камеры используют различные фирмы, например Геолис, ООО «Климат», Фирма Элтеп и т.д [1]. Это всего ли малая часть фирм и заводов, которые подвергают климатическим испытаниям выпускаемую продукцию.

В данной работе спроектированная автоматизированная система управления влажности и температуры для климатической камеры и проведен расчет параметров настроек регуляторов. Для разработки был произведен аналитический обзор технологии объекта, структуры автоматизации, технических средств контроля и автоматизации.

Результаты работы могут быть применены в научных исследованиях и в учебной работе.

1 Сведения о климатических камерах

Конструкцию типовой климатической камеры можно представить в виде четырех частей:

- рабочий объем;
- щит автоматического управления;
- парогенератор;
- фреоновый осушитель.

Рабочий объем представляет из себя шкаф, внутри которого встроен теплообменник. Шкаф оснащен специальной распашной дверью со смотровым окном. В щите автоматического управления расположено основное электрооборудование. Холодильный агрегат обеспечивает охлаждение внутри рабочего объема. Фреоновый осушитель – устройство, которое обеспечивает поддержание определенного уровня влажности. Так же в зависимости от того, для чего разработана климатическая камера используется дополнительное оборудование.

Существует большой спектр выбора климатических камер, которые способны имитировать различные климатические условия. К примеру, камеры способны воссоздавать условия воздействия солнца, глубокого вакуума, соляного тумана. Но самыми распространенными являются камеры тепла, тепла-холода, тепла-холода-влаги, тепла-влаги, барокамера и широкой разморозки.

В рамках реализации комплекса научных направлений 18.1 «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования», 18.3 «Моделирование и прогнозирование климатической стойкости» [3] работают большое количество научных исследовательских центров. Одной из областей которой они занимаются является разработка

методик проведения испытаний полимерных материалов на старение под действием естественных и искусственных факторов светопогоды.

Климатические камеры соляного тумана предназначены для испытаний коррозионной стойкости металлов, обработанных различными видами защитных покрытий. Внутри камеры воссоздаются условия интенсивного коррозионного воздействия нейтральным соляным туманом [4].

В зависимости от вида устройства, размеров, качества вакуума и дополнительного оборудования, камеры глубокого вакуума могут применяться практически на любом предприятии или производстве. Наиболее востребованными считаются камеры с большим размером рабочего пространства и, в тоже время, используя с применением низкого вакуума. Таким образом, их применяют для высушивания всевозможных материалов, для реализации воссоздания космического пространства в ракетостроении, проведение экспериментов удержания плазмы для частиц, в условиях ускорения заряженности молекул [5].

Камеры типа тепла-холода являются универсальными, испытательными. В них можно создавать различные условия. Работа с материалами может вестись при особо низких и при сверхвысоких температурах. Существуют различные модификации этих камер:

- камеры тепла, холода, влаги;
- камеры тепла, влаги;
- камеры холода, влаги.

Сфера применения камер тепла холода, с каждым годом становится только шире. На данный момент, подобные установки нашли свое применение в большинстве современных отраслей, которые уже не могут обойтись без подобного оборудования.

Главное предназначение камер тепла-холода-влаги – это контроль уровня температуры, и её регулировка. Большинство предприятий на данный момент нуждается в установках подобного типа. Главная причина такой

нужды, заключается в современных стандартах качества, достичь которых без климатического оборудования практически невозможно.

Тепло-холод-влага в климатической камере могут выступать в качестве заданных параметров и иметь большой диапазон. Оборудование тепло-холод-влага являются, по своей сути, универсальным, объединяя сразу два вида камер: холод-влага и тепло-влага. Стоит также отметить, что данный вариант имеет еще и экономическое значение: такие камеры климатических испытаний являются более бюджетными, по сравнению с покупкой двух разных камер [6].

Камеры тепла и влаги, используемые для проведения испытаний на влагоустойчивость. Она обеспечивает автоматическое получение и поддержание температуры и относительной влажности по заданным программам (циклические режимы по ГОСТ 20.57.406-81).

Камеры отличаются габаритными размерами, точностью поддержания режима, диапазоном характеристик. Камера тепло-влага обеспечивает работу в диапазоне повышенной влажности – от естественной 10...98 %, в диапазоне температур 30...100 °С.

В данной работе будет разрабатываться камера тепла-влаги. Данные камеры позволяют проводить как температурные, так и влажностные испытания.

2 Получение аналитической зависимости температуры от относительной влажности в камере

При регулировании температуры в камере «Тепло-влага» и «Тепло-холод-влага» следует учесть ее изменение от относительной влажности воздуха.

При ручных аналитических расчетах простым и удобным способом является расчет по I-d диаграмме (психометрическая диаграмма) [7] (рисунок 1).

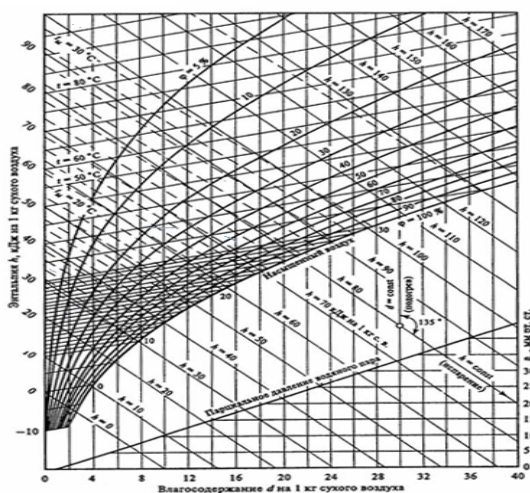


Рисунок 1 – Внешний вид I-d диаграммы

Величину относительной влажности можно оценить по психометрической таблице. Данный метод подходит для расчета относительной влажности в диапазоне температур 0... 90 °C.

При автоматическом управлении параметрами температуры и влажности в климатической камере следует иметь аналитическую зависимость температуры от подаваемой в данный момент времени относительную влажность воздуха. Это является целью данного исследования.

Относительная влажность водно-воздушной смеси может быть оценена, если известны её температура T и температура точки росы T_d , по следующей формуле:

$$RH = \frac{P_s(T_d)}{P_s(T)} \cdot 100, \quad (1)$$

где $P_s(T)$ — давление насыщенного пара для соответствующей температуры.

Относительную влажность так же можно вычислить приближенно по следующей формуле [7]:

$$RH \approx 100 - 5 \cdot (T - 25 \cdot T_d),$$

где T – абсолютная температура, T_d – температура точки росы.

Давление водяного пара рассчитывается по следующей формуле [8]:

$$p = P_s(t') - A \cdot p \cdot (t - t') \cdot (1 + a' \cdot t'), \quad (2)$$

где $P_s(t')$ – давление насыщенного водяного пара над плоской поверхностью воды, имеющей температуру t' , гПа; A – психометрический коэффициент для парогазовой смеси с известным стандартом ее сухой части, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; p – общее давление парогазовой смеси, гПа; t – температура парогазовой смеси, $^{\circ}\text{C}$; t' – температура раздела фаз, $^{\circ}\text{C}$; a' – коэффициент, учитывающий зависимость от температуры удельной теплоты фазового превращения конденсированной фазы воды в пар, $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Номинальное значение психометрического коэффициента A определяется в зависимости от природы движения воздуха:

- $0,795 \cdot 10^{-6}$ – при естественном движении воздуха;
- $0,662 \cdot 10^{-6}$ – при принудительном обдуве с номинальной скоростью 2 м/с;

При расчётах психометрических таблиц принимают $a' = 0,00115 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ исходя из свойств дистиллированной воды по ГОСТ 6709-72 и состава сухого воздуха по ГОСТ 4401-81.

При использовании выражения (3) давление насыщенного пара $P_s(T)$ для соответствующей температуры может быть вычислено при использовании методик Ардена–Бака [9], Гоффа–Гратча [10], Д. Зонтага [11].

Методика Ардена–Бака [11] предполагает использование выражений:

$$P_s(T) = 6.1121 \cdot \exp\left(\frac{(18.678 - T/234.5) \cdot T}{257.14 + T}\right), \quad (3)$$

где T — температура в градусах Цельсия, P_s — давление в гПа.

Для отрицательных температур при отсутствии жидкой фазы используется другая формула:

$$P_s(T) = 6.1121 \cdot \exp\left(\frac{(23.036 - T/333.7) \cdot T}{279.82 + T}\right).$$

Модель Гоффра-Гратча описывает зависимость температуры от насыщенного давления водяного пара следующим образом:

$$\log e^* = -7.90298 \cdot \left(\frac{T_{st}}{T} - 1\right) + 5.02808 \cdot \log\left(\frac{T_{st}}{T}\right) - 1.3816 \cdot 10^{-7} \cdot \left(10^{11.344 \cdot \left(1 - \frac{T_{st}}{T}\right)} - 1\right) + 8.1328 \cdot 10^{-3} \cdot \left(10^{-3.49149 \cdot \left(\frac{T_{st}}{T} - 1\right)} - 1\right) + \log e_{st}^*,$$

где e^* – насыщенное давление водяного пара (гПа); T – абсолютная температура воздуха в кельвинах; T_{st} – точка кипения при 1 атм и температуре 37315 К; e_{st}^* – насыщенное давление в точке кипения.

Возможно применение упрощенной формулы расчета давления насыщенного водяного пара:

$$P = P_0 \cdot \exp\left(\frac{a \cdot t}{\beta + t}\right),$$

где $P_0=6,1121$ гПа, $a=17,5043$ °С, $\beta=241,2$ °С, t – температура плоской поверхности воды, °С.

Для решения поставленной задачи, помимо значений парциального давления и давления насыщения воздуха, необходимо определить температуру влажного термометра. Значение этой физической величины определяется следующим выражением [12]:

$$t_{вл} = t_c \cdot \operatorname{atan}\left(0.151977 \cdot (RH\% + 8.313659)^{\frac{1}{2}}\right) + \operatorname{atan}(t_c + RH\%) - \operatorname{atan}(RH\% - 1.676331) + 0.00391838 \cdot RH\%^{\frac{3}{2}} \cdot \operatorname{atan}(0.023101 \cdot RH\%) - 4.686035, \quad (4)$$

где t_c – температура сухого термометра.

В данной работе расчет зависимости температуры от относительной влажности будет осуществляться с помощью выражений [1–4]. На основании этих выражений получена следующая зависимость

В результате получено выражение

$$RH(t) = \frac{P(t') - A \cdot P \cdot (t - t')}{P(t)} \cdot 100, \quad (5)$$

где t – температура сухого термометра, t' – температура мокрого термометра.

Численные значения были получены в программе MathCad. На основании этих данных построены графики зависимости относительной влажности от температуры (рисунки 2, 3).

На рисунках 2–3 представлено изменение относительной влажности при варьировании разницы температур сухого и влажного термометров.

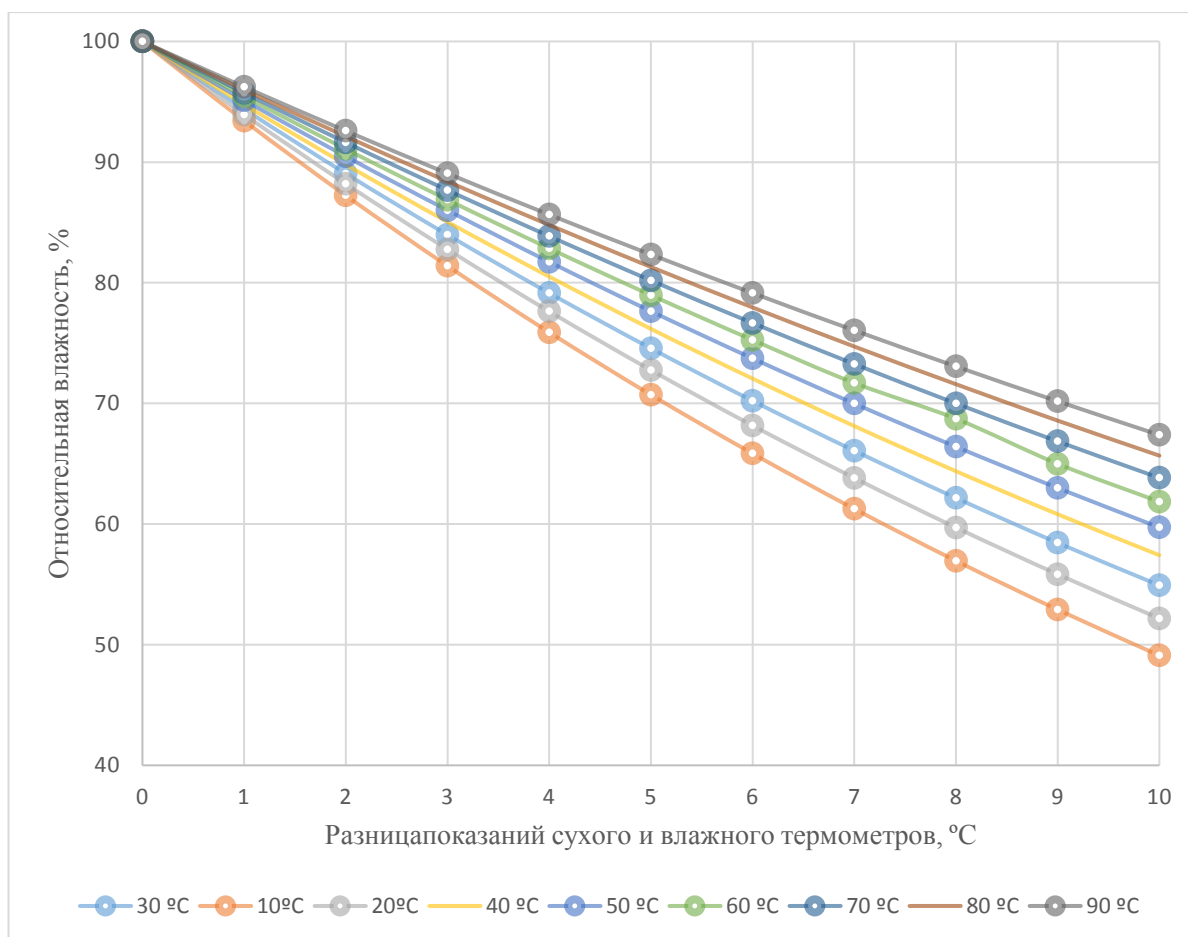


Рисунок 2 – Зависимость изменения влажности от разности температур сухого и влажного термометров

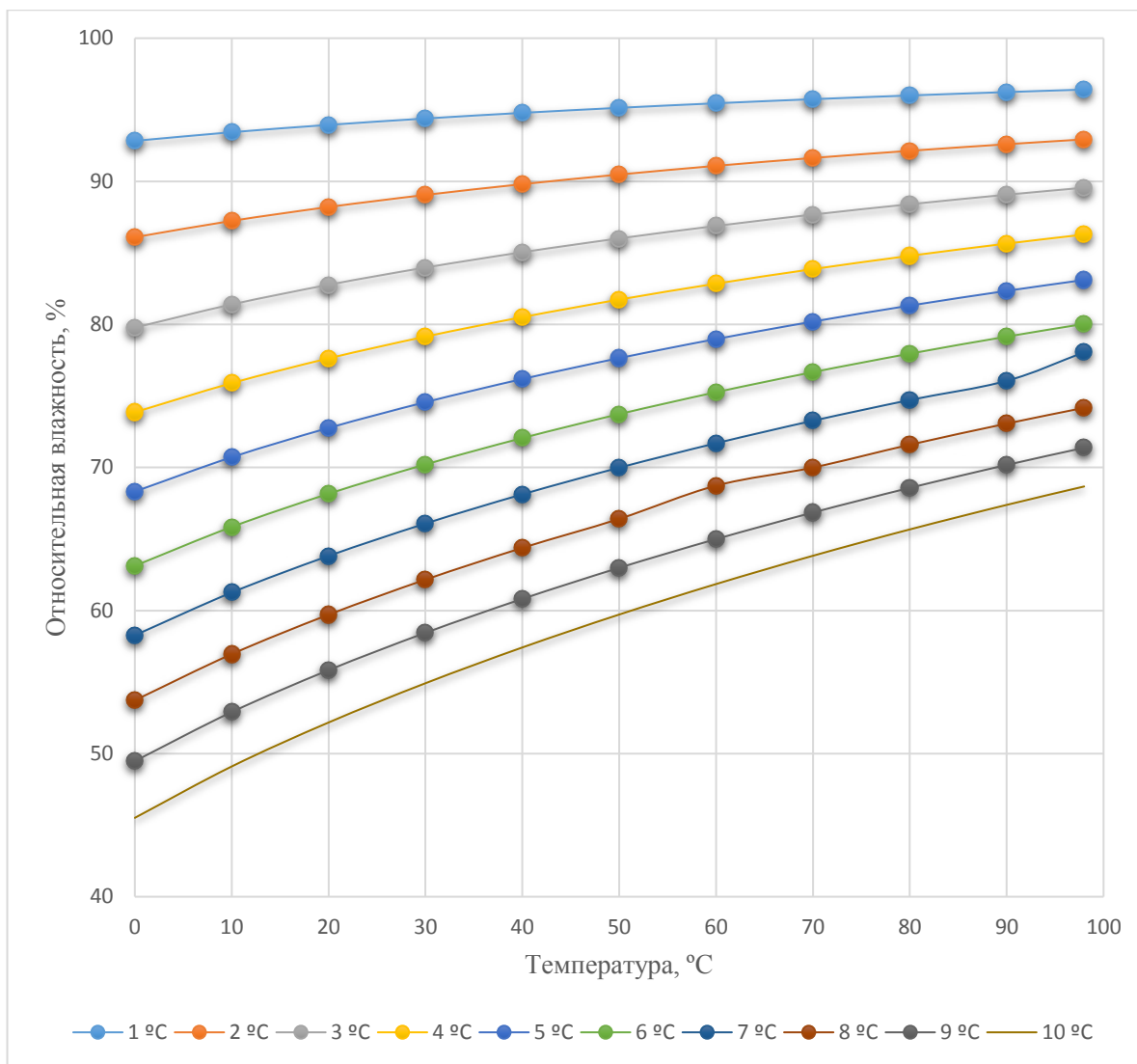


Рисунок 3 – Зависимость изменения температуры от изменения относительной влажности

Основная зависимость влажности от температуры состоит в том, чем меньше значение разницы показаний сухого и влажного термометров, тем выше значение относительной влажности. На основании формулы 5 зная температуру сухого и мокрого термометра или же разницу между ними, легко рассчитать и отследить изменение значения относительной влажности при изменении температуры.

В дальнейших расчетах принимается что, разность показаний сухого и влажного термометра равна 5 °C. На основании рисунка 3 можно сказать, что при данном значении относительная влажность может иметь значение в диапазоне 68...83 %.

3 Конструкция климатической камеры

Климатическая камера базируется на каркасе, который обеспечивает жесткость конструкции. Для уменьшения теплообмена с окружающей средой все стенки камеры укреплены слоем теплоизоляции. Внутренние стенки камеры изготовлены из зеркальной нержавеющей стали. Камера оснащена дверцей со смотровым окном. Герметичность камеры достигается благодаря использованию дверного уплотнителя и наличию у ручки зажима. Смотровое окно изготовлено из закаленного стеклопакета.

Лицевая панель камеры оснащена монитором. На дисплее отображаются основные технологические параметры: температура, влажность и время продолжительности эксперимента.

На рисунке 4 представлен внешний вид климатической камеры, а в таблице 1 приведены ее основные технические характеристики.

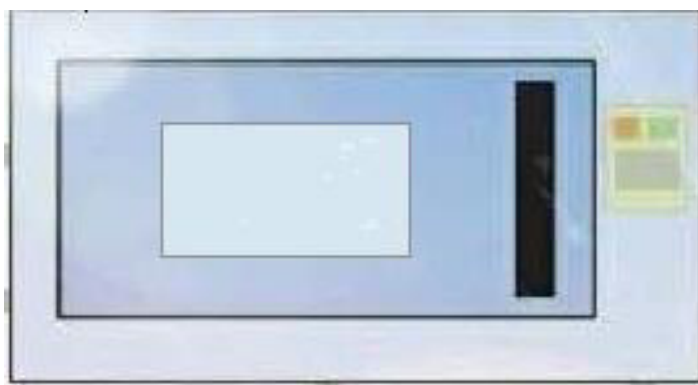


Рисунок 4 – Внешний вид климатической камеры

Таблица 1 – Технические характеристики камеры

Параметр	Значение
Объем камеры	100 л
Диапазон значения влажности	10 ... 98 % RH
Неравномерность поддержания влажности	<5 % RH
Точность поддержания влажности	± 3 % RH
Диапазон значения температур	10 ... 120 °C
Диапазон температур для поддержания влажности	30 ... 80 °C
Точность поддержания температуры	± 1 °C
Неравномерность поддержания температуры	< 4 °C

4 Требования к автоматическому управлению влажностью и температурой в климатической камере

Переходные процессы в промышленных системах должны иметь определенный характер, диктуемый требованиями технологии производства. Условие устойчивости системы регулирования является необходимым, но недостаточным для достижения наилучшего процесса регулирования.

Основными требованиями к переходному процессу являются:

- максимальное значение отклонения регулируемой величины должно быть наименьшим;
- затухания переходного процесса должны иметь интенсивный характер;
- продолжительность переходного процесса должна быть минимальна.

Качественной характеристикой затухающего процесса является интенсивность затухания переходного процесса. Критерий, характеризующий интенсивность затухания для данной АСУ влажности и температуры — это степень колебательности. Оптимальное значение степени колебательности содержится в диапазоне 0,75...0,9 [13]. При достижении значения больше 0,9 при хорошем значении колебаний происходит завышение отклонения регулируемой величины, а при значении меньше 0,75 система будет иметь недостаточную степень затухания колебаний. Исходя из этого, для расчета параметра настройки регулятора принято значение $\psi=0,75$.

Основными требованиями к рассматриваемому переходному процессу является, соответствие заявленных технических характеристик климатической камеры, представленные в таблице 2, реально полученным. Точность поддержания влажности $\pm 3 \%$ относительной влажности (RH), точность поддержания температуры $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Неравномерность поддержания значения температуры не должна составлять более $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а влажности 5% RH. Время регулирования процесса должно быть минимальным.

5 Разработка системы автоматического регулирования влажности

и температуры в климатической камере

5.1 Выбор схемы и закона регулирования

На рисунке 5 представлена структурная схема автоматизированной системы управления влажностью и температурой в климатической камере.

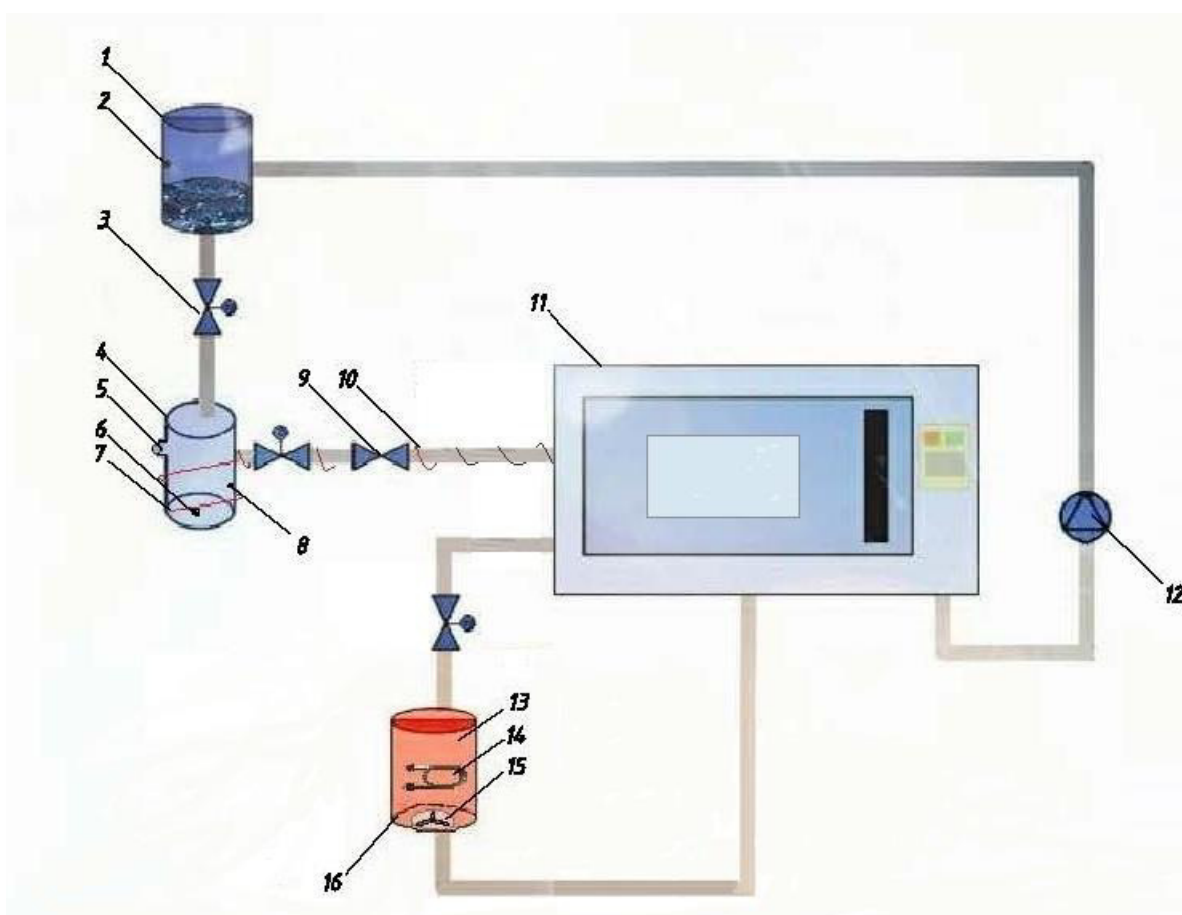


Рисунок 5 – Схема АСУ климатической камеры:

1 – резервуар с водой, 2 – анализатор уровня жидкости, 3 – клапан с электроприводом, 4 – резервуар подготовки влажного воздуха, 5 – нагнетатель воздуха, 6 – пьезометр ультразвуковой, 7 – датчик температуры, 8 – анализатор уровня, 9 – обратный клапан, 10 – греющий кабель, 11 – климатическая камера, 12 – дренажный насос, 13 – резервуар подготовки горячего воздуха, 14 – нагревательный элемент, 15 – нагнетатель воздуха, 16 – датчик температуры.

Из резервуара (1) в резервуар подготовки влажного воздуха (4) с помощью клапана (3) поступает вода. С помощью ультразвукового пьезометра (6) и нагнетателя воздуха генерируется влажный воздух, который по трубопроводу подается в климатическую камеру. Температура влажного воздуха поддерживается греющим кабелем. Так же кабелем покрыт трубопровод, он необходим для предотвращения образования конденсата. Дренажный насос удаляет конденсат из климатической камеры.

В резервуаре подготовки нагретого (13) расположен нагнетатель воздуха (15), который создает направленное движение воздуха. Воздух нагревается до заданной температуры и поступает, непосредственно, в климатическую камеру через трубопровод. Для сохранения постоянного давления в камере и обеспечения циркуляции, воздух, нагнетаемый в камеру, проходя через весь объем подаётся обратно в резервуары подготовки воздуха.

5.2 Обзор и выбор структуры АСР влажности

В современных системах кондиционирования воздуха применяют количественное и качественное регулирование [14]. При качественном регулировании изменению подлежат значения параметров приточного воздуха при неизменном расходе. При количественном регулировании параметры воздуха остаются неизменными, варьируется только значение расхода воздуха.

Значение температуры воздуха поддерживается за счет автоматизированной системы управления, а значение влажности регулируется одним из двух способов: прямое или косвенное регулирование. При косвенном происходит регулирование влажности воздуха относительно точки росы после камеры орошения, а при прямом – регулирование по относительной влажности воздуха в рассматриваемом объеме [15]. На практике часто используют комбинацию данных двух методов.

Прямое регулирование относительной влажности осуществляют при помощи регулятора влажности, измерительный преобразователь которого устанавливается непосредственно внутри объекта [14]. Регулятор влажности поддерживает заданное значение влажности воздуха. АСР, основанная на этом методе регулирования, позволяет достаточно точно поддерживать значение влажности при постоянных и переменных влаговыведениях в объекте.

Косвенное регулирование влажности осуществляется с помощью только одних терморегуляторов [16]. Регулятор влажности при этом отсутствует. Такой метод будет эффективен при постоянном значении влаговыведения в обслуживаемом объекте. Этот принцип получил большее распространение, хоть и точность поддержания влажности у него снижается по сравнению с прямым регулированием.

Совместное использование прямого и косвенного регулирования получил название метода оптимальных режимов [17].

Проанализировав предложенные варианты, можно сделать вывод, что наиболее подходящим вариантом для разрабатываемой автоматической системы регулирования является прямое регулирование влажности и качественное регулирование температуры.

Изменение влажности чаще всего применяется в системах кондиционирования воздуха. На примере этих систем рассматривались различные варианты схем управления. Регулирование влажности может осуществляться по любому из сигналов (относительной влажности или точки росы) несколькими способами. На рисунке 6 представлены возможные схемы регулирования влажности.

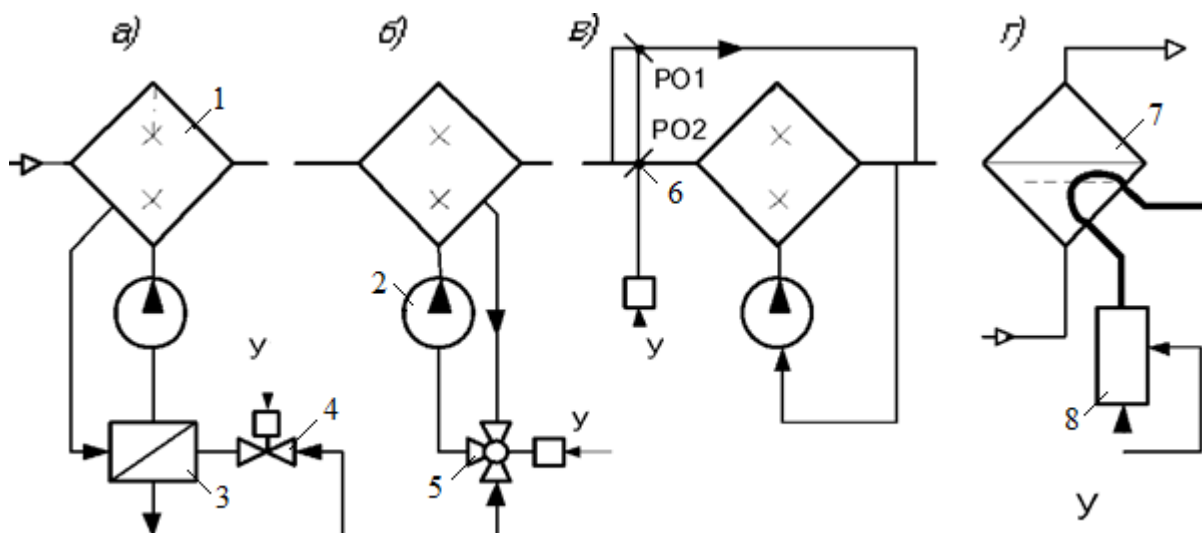


Рисунок 6 – Схемы регулирования влажности в системах кондиционирования воздуха:

1– емкость камеры увлажнения; 2 – насос; 3 – подогреватель; 4 – задвижка; 5 – смесительный клапан холодной и обратной воды; 6 – заслонка; 7 – паровой увлажнитель; 8 – электродвигатель.

На схеме, представленной на рисунке 6а, вода подается в камеру увлажнения из подогревателя. Значение величины нагрева, воды зависит от изменения расхода первичного теплоносителя. На схеме 6б отсутствует подогреватель, и управление осуществляется при помощи смесительного клапана холодной и обратной воды. На схеме 6в показано управление процессом смешивания сухого и увлажненного воздуха. Есть два различных варианта работы данной схемы: управляющее воздействие приводит в действие исполнительное устройство, которое в свою очередь приводит в действие одну заслонку PO_1 или же спаренные заслонки PO_1 и PO_2 изменяющие соотношение расходов сухого и влажного воздуха. На схеме 6г приведена система парового увлажнителя, который работает по принципу барботажа. Управляющее воздействие прикладывается непосредственно к электродвигателю, который в свою очередь изменяет значение точки росы воздуха.

У всех приведенных схему существуют как свои достоинства, так и свои недостатки. Так, например, у схемы 6а требуется дополнительное

устройство – нагреватель. Для реализации схемы бб необходимы дополнительные резервуары для холодной и горячей воды. Так же необходимо осуществлять подогрев горячей воды с целью поддержания определенной температуры. При реализации схемы бв необходимо предусмотреть устройства, которые будут вырабатывать сухой и влажный воздух. Для схемы бг предусмотрено наличие электродвигателя, его использование может привести к дополнительным затратам. Основным аргументом при выборе является стоимость исполнения той или иной схемы регулирования, являются ли они экономически целесообразными для поставленной задачи. Вторым фактором выступает сложность исполнения схемы. Для реализации установки было решено выбрать схему регулирования влажности, представленной на изображении бв. Такой выбор сделан из-за более низкой стоимости схемы по сравнению с остальными вариантами.

5.3 Обзор и выбор структуры АСУ температуры

На рисунке 7 приведены самые распространенные схемы регулирования температуры в системах кондиционирования воздуха.

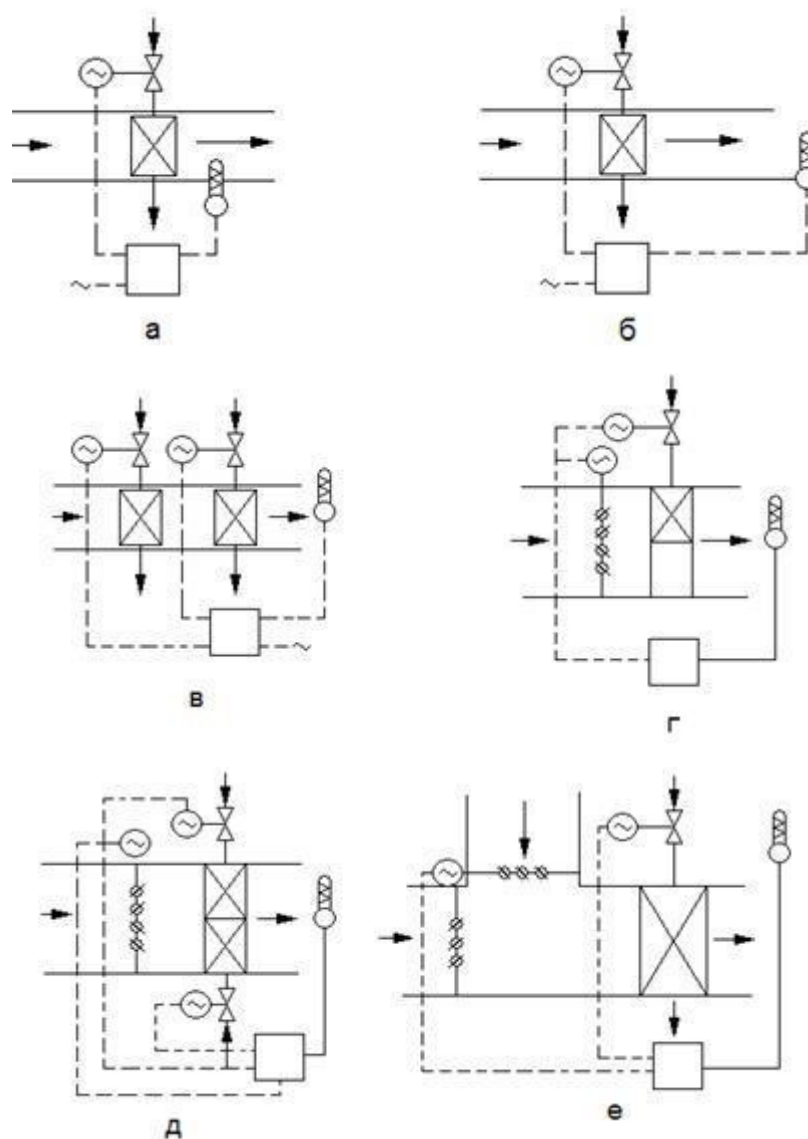


Рисунок 7 – Системы регулирования температуры воздуха, применяемые в установках кондиционирования воздуха:

- а – с преобразователем в воздуховоде; б – с преобразователем в помещении;
- в – с калорифером и поверхностным охладителем; г – с регулируемым воздушным клапаном;
- д – с двумя теплообменниками и воздушным клапаном; е – со смесительно-регулирующим воздушным клапаном.

При размещении измерительного преобразователя непосредственно в воздуховоде (рисунок 7а) обеспечивается постоянное значение температуры воздуха, которое поступает в кондиционируемое помещение. При данном способе температура воздуха не регулируется, и отклонения ее значения не способны вызвать изменений положения регулирующего органа.

Регулятор, измерительный преобразователь которого располагается в обслуживаемом помещении, при отклонении значения температуры от уставки вырабатывает управляющее воздействие на регулирующий клапан, который изменяет количество пара, поступающего в воздухонагреватель (рисунок 7б).

Система регулирования, которая состоит из двух теплообменников – поверхностного охладителя и калорифера подогрева воздуха, которые работают последовательно (рисунок 7в). Охладитель включается только при условии, что клапан, который регулирует подачу теплоносителя, полностью закрыт. Данный тип системы может регулироваться релейным регулятором.

Система, которая состоит из теплообменника, регулируемого клапана и регулятора (рисунок 7г), осуществляет регулирование за счет изменения соотношения между объемом нагретого и холодного воздуха. Преимуществом данной системы является то, что при незначительном изменении положения клапанов сразу же меняется значение температуры воздуха. Данная система обладает меньшим значением запаздывания.

Так же распространены системы регулирования, представленные на рисунке 7д. Они состоят из регулятора с преобразователем, воздухоохладителя, калорифера, регулирующих клапанов и клапанов. Благодаря регулированию соотношения между нагретым и охлажденным воздухом температура смеси поддерживается постоянной. Регулирующие клапаны приходят в движение только при изменении знака отклонения температуры непосредственно в воздуховоде.

Система представленная 7е содержит калорифер подогрева воздуха и смешительно-регулирующие клапана. Включение калорифера происходит только при условии, что температура воздуха не может быть обеспечена изменением значения температуры смеси рециркуляционного и приточного воздуха.

Самой оптимальной схемой регулирования температуры является, схема, состоящая из калорифера, регулятора с преобразователем,

воздухоохладителя, регулирующих вентилях и клапанов. Данная схема позволяет с достаточной точностью поддержать значение регулируемого параметра и при его отклонении от уставки немедленно выработать управляющее воздействие, и она так же является простой в реализации. На основании данной схемы будет разрабатываться структурная схема АСУ климатической камеры.

5.4 Выбор системы регулирования

В разрабатываемой системе регулированию подлежат два взаимосвязанных параметра: относительная влажность и температура. Поэтому система является двухконтурной. Контур регулирования температуры обладает значительно большим запаздыванием по сравнению с контуром регулирования влажности. Используя это можно сказать, что разрабатываемая система является каскадной (см. главы 6.2, 6.3). Применение таких систем эффективно только тогда, когда запаздывание в контуре регулирования основной величины существенно больше, чем в контуре регулирования вспомогательной величины [18].

Различают два вида каскадных систем – системы с двумя регуляторами (корректирующим и стабилизирующим) и системы с вводом производной от промежуточной регулируемой величины [19].

Одним из наиболее распространенных типов каскадных систем являются системы со стабилизирующим регулятором.

При использовании такой системы реализуется принцип декомпозиции. инерционность основного контура значительно больше инерционности вспомогательного контура, то на первом этапе рассчитываются обычными методами настройки стабилизирующего регулятора, а на втором этапе рассчитываются настройки основного корректирующего регулятора.

Структурная схема АСУ климатической камеры представлена на рисунке 8.

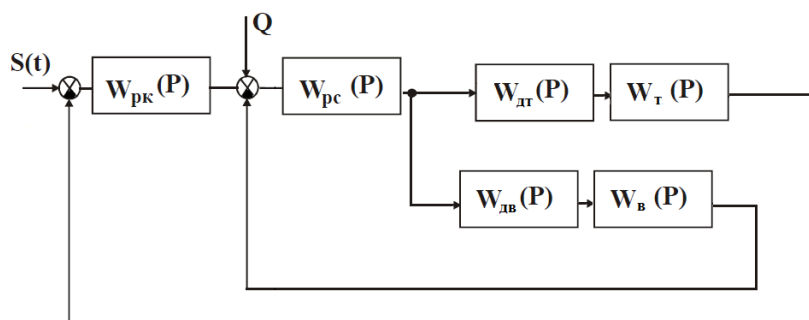


Рисунок 8 – Структурная схема АСУ климатической камеры:

$W_{рк}(P)$ – передаточная функция корректирующего регулятора, $W_{рс}(P)$ – передаточная функция стабилизирующего регулятора, $W_{дт}(P)$ – передаточная функция датчика температуры, $W_{дв}(P)$ – передаточная функция датчика влажности, $W_{т}(P)$ – передаточная функция объекта регулирования температуры, $W_{в}(P)$ – передаточная функция объекта регулирования влажности.

Структурная схема содержит два контура. Первый – контур регулирования температуры, а второй – влажности. Контур регулирования температуры состоит из объекта регулирования по температуре и датчика температуры. Контур регулирования содержит датчик влажности и объект регулирования по влажности. Для стабилизации влажности используется стабилизирующий регулятор. Его задача поддерживать значение влажности на определенном значении. Корректирующий регулятор поддерживает определенное значение температуры.

Используя правила преобразования схем при последовательном соединении звеньев, получаем преобразованную структурную схему (рисунок 9) [19].

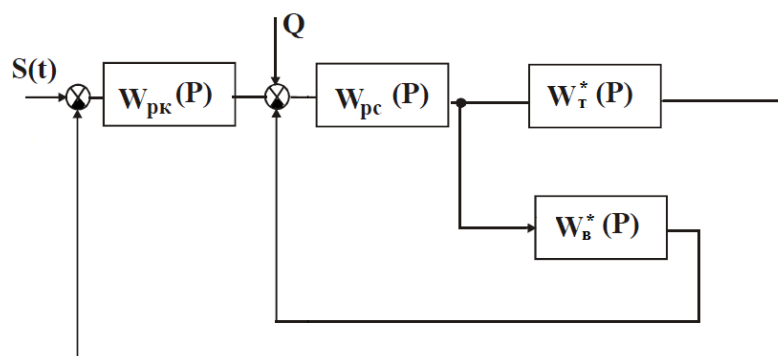


Рисунок 9 – Преобразованная схема АСУ климатической камеры:

$W_B^*(p) = W_{дв}(p) \cdot W_B(p)$, $W_T^*(p) = W_{дт}(p) \cdot W_T(p)$, $W_B(p)$ – передаточная функция контура регулирования влажности, $W_T^*(p)$ – передаточная функция контура регулирования температуры.

5.5 Разработка функциональной схемы автоматизации

Функциональная схема — это основной технический документ, который определяет характер и структуру системы автоматизации, как и оснащённость, её средствами автоматизации и приборами. На функциональной схеме показывается упрощённое изображение объектов автоматизации, приборов, средств автоматизации и управления, которые изображаются условными обозначениями в соответствии с действующими стандартами, а также линии связи между ними.

Функциональная схема АСУ влажности и температуры представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.009 С2.

Из резервуара с водой (А4) в камеру подготовки влажного воздуха (А1) поступает вода. При достижении уровня воды критического состояния датчик LE1 подаёт сигнал на ПЛК. Из А4 в А1 вода поступает при помощи клапана. С помощью ПЛК оператор управляет приводом клапана М1, открывая или закрывая его.

В камере подготовки влажного воздуха установлены датчик температуры ТЕ1, датчик уровня LE2 и ультразвуковой пьезометр. Датчик уровня подаёт сигнал на АРМ при превышении максимального уровня воды в

резервуаре. Датчик температуры передаёт информацию о текущем значении температуры паровоздушной смеси.

Управление включением или выключением ультразвукового пьезометра осуществляется с АРМ. Это основной элемент, который вырабатывает влажный пар.

Трубопровод между А1 и климатической камерой (А2) оснащен клапаном с электроприводом (М2), датчиком температуры ТЕ3 и греющим кабелем. ТЕ3 с помощью унифицированного токового сигнала передает данные о значении температуры влажного воздуха. На основании этих данных происходит включение или выключение греющего кабеля. Он поддерживает определенную температуру, препятствуя образованию конденсата.

Камера подготовки горячего воздуха (А3) оснащена датчиком температуры ТЕ2 и нагревательным элементом. Нагревательный элемент нагревает воздух до определенной температуры, которую фиксирует ТЕ2. Затем воздух поступает в климатическую камеру. Подача воздуха в камеру осуществляется с помощью клапана с электроприводом М3.

Климатическая камера А2 оснащена датчиком влажности МЕ1, на основании показаний которого формируется управляющий сигнал на М2 и происходит размыкание/замыкание цепи питания ультразвукового пьезометра.

Так же в камере расположено два датчика температуры. Датчик ТЕ4 расположен в верхней части камеры, а ТЕ5 в нижней. Датчики передают показания в ПЛК. На основании данных показаний вырабатывается управляющий сигнал на электроприводы М3, М4 – открыть/закрыть и управляющий сигнал на размыкание или замыкание цепи питания нагревательного элемента.

Насос М5 откачивает дренаж из климатической камеры. По сигналу с датчика PDS1 можно судить о состоянии работы насоса. Если произошла авария.

Все сигналы подлежат диспетчеризации на АРМ оператора.

5.6 Проектная разработка системы управления

Выбор оборудования производится с учетом всех характеристик измеряемой среды и технологических особенностей процесса измерения. Совокупность технических средств АСР основывается на серийно выпускаемых средствах автоматизации и считается достаточным для реализации всех функций АСР.

5.6.1 Выбор измерительного преобразователя температуры

Существует большое количество различных устройств, основной задачей которых является измерение температуры твердых, жидких и газообразных сред, использующих различные термометрические свойства.

В качестве первичных преобразователей температуры чаще всего используются термопреобразователи сопротивления (ТПС) и термоэлектрические преобразователи (ТЭП). Термопреобразователи предназначены для измерения температуры газообразных и жидких неагрессивных и агрессивных сред, а также поверхностей твердых тел.

В данной работе рассмотрим два термопреобразователя типа ДТС155.И фирмы Овен и ТСМУ-16-S производства ЭТК прибор [20,21]. В таблице 2 представлены технические характеристики этих датчиков.

Таблица 2 – Технические характеристики ТПС

Характеристики	Тип датчика	
	ДТС155.И	ТСМУ-16-S
Диапазон измеряемых температур, °С	-50...+500	-50...+150
Защищенность от влаги и пыли	IP65	IP65
Показатель тепловой инерции, с	10...30	20
Выходной сигнал, мА	4...20	4...20

В качестве измерительного преобразователя в работе будет использоваться ТСМУ-16-S, он обладает наиболее оптимальными характеристиками.

5.6.2 Выбор измерительного преобразователя уровня

Датчики уровня жидкостей необходимы для контроля уровня жидкостей в ёмкостях или трубопроводах. По функционалу датчики уровня делятся на уровнемеры и сигнализаторы.

Уровнемеры предназначены для непрерывного измерения уровня жидкостей, а сигнализаторы предназначены для определения заданного положения уровня (заполнение/опустошение) жидкости в ёмкости. В данной работе рассматриваться будут сигнализаторы уровня жидкости, так как для работы системы необходимо знать только отклонение уровня жидкости в резервуаре от заданного значения.

В таблице 3 представлены характеристики сигнализаторов уровня жидкости фирм Овен и Магнито-Контакт [22,23].

Таблица 3 – Технические характеристики образцов

Характеристики	Тип датчика	
	АУЖ-2 «Венеция»	ПДУ-1.1
Диапазон рабочих температур, °С	-30...+50	+105
Степень защиты	IP68	IP68
Номинальное напряжение, В	12	120
Выходной сигнал	НО/НЗ	НО/НЗ
Количество сигнализируемых уровней	1	1–2
Стоимость, руб.	529	1500

В качестве измерительного преобразователя уровня использовать решено анализатор уровня жидкости АУЖ-2 «Венеция».

5.6.3 Выбор измерительного преобразователя влажности

Измерительный преобразователь влажности представляет собой средство измерения, которое позволяет определить текущее значение относительной влажности воздуха. Относительная влажность воздуха напрямую зависит от температуры измеряемой среды, из-за этого такие датчики вместе с влажностью могут измерять и температуру.

Для выбора измерительного преобразователя влажности рассматривалось три альтернативных варианта, наиболее подходящих по своим техническим характеристикам. Это измерители температуры и влажности ДВТ-0.3Т, КФТФ и ПТВ100 [24,25,26].

В таблице 4 приведены основные параметры, по которым выбирался измерительный преобразователь.

Таблица 4 – Сравнение характеристик измерительных преобразователей влажности

Характеристика	Тип датчика		
	КФТФ	ДВТ-0.3ТЭ.КЛ	ПТВ100
Погрешность измерения влажности, %	± 2	± 2	± 2,5
Пределы измерений относительной влажности, %	0... 95	0... 98	0... 98
Стоимость, руб.	11 300	3000	7200

Исходя из конфигурации и ценового критерия, был выбран измерительный преобразователь температуры и влажности ДВТ-0.3ТЭ.КЛ.

5.6.4 Выбор регулирующего устройства

В качестве регулирующего устройства могут рассматриваться программируемое реле, регулятор и программируемый логический контроллер. В данной работе в качестве регулирующего устройства используется программируемый логический контроллер.

На рынке существует большой выбор ПЛК различных фирм: зарубежные представители Siemens, Mitsubishi, Schneider Electric, Omron и отечественные Овен, Элемер, Текон и др. У всех производителей существуют различные линейки ПЛК, отличающиеся по стоимости, производительности, надежности и др. Но основным аргументом при выборе контроллера является соответствие функциональных характеристик контроллера решаемой задаче.

Выбор происходил между контроллером МЗТА МС120 фирмы Контарь и контроллерами ПЛК-63 и ПЛК-100 фирмы Овен [27,28,29]. В таблице 5 представлены основные технические характеристики контроллеров.

Таблица 5 – Характеристики контроллеров

Характеристики	Типы ПЛК		
	МЗТА МС12.3	ПЛК-63	ПЛК-100
Напряжение питания, В	24	220	220
Потребляемая мощность, Вт	7	18	10
Входы	8 аналоговых+ 4 дискретных	8 аналоговых+ 8 дискретных	8 дискретных
Выходы	4 аналоговых + 8 реле	1 реле + 5 по выбору	12 дискретных
Интерфейс	RS485, RS232	RS485, RS232	RS485, RS232
Память	77 кбайт	64 кбайт	8 Мбайт

МЗТА МС12.3 является более подходящим вариантом. Данный контроллер обладает большей памятью и большим количеством выходов и предназначен для малых систем автоматизации.

5.6.5 Выбор электропривода

Для приведения в движение клапанов и управления этим движением необходимо использовать электропривод. Различают несколько разновидностей электроприводов: вращательные, поступательные, позиционные и т.д.

Для поставленной задачи подойдет экономичный, компактный и простой в эксплуатации электропривод.

Подходящим условиям удовлетворяет позиционный электропривод. Были рассмотрены электроприводы для управления запорной арматурой малых габаритов HQ – 006 корейского производства и AMV 23 фирмы Danfoss (таблица 6) [30,31].

Таблица 6 – Характеристики электроприводов

Характеристики	Типы электроприводов	
	HQ - 006	AMV 23
Напряжение питания, В	24	24
Потребляемая мощность, Вт	2	2,15
Выходной сигнал, мА	4...20	4...20
Время на перемещение штока на 1 мм, с	160	150
Степень защиты	IP67	IP54

В качестве электропривода для разрабатываемой системы выбран AMV 23, так как он обладает меньшим временем на перемещение штока и является более энергосберегающим.

5.6.6 Выбор насоса

Насос необходим для откачки конденсата из климатической камеры в резервуар с водой. Так как объем перекачиваемой жидкости будет не большой, то и насос необходим компактный и не дорогой. Самым подходящим типом насосов является вибрационный. Данный тип прост в эксплуатации и обладает малыми размерами.

Рассматривалось два типа насосов: Малыш-М фирмы Тополь и Ручеек-1М производителя ОЛЬСА. Основные технические характеристика рассматриваемых образцов представлены в таблице 7 [32,33].

Таблица 7 – Технические характеристики сравниваемых насосов

Характеристики	Типы насосов	
	Малыш-М	Ручеек-1М
Мощность, Вт	240	225
Производительность	25 л/мин	432 л/ч
Высота подъёма максимальная, м	60 м	60
Глубина погружения, м	3	10
Цена, руб.	2190	1900

Насос Ручеек-1М является более производительным в сравнении с другим насосом.

5.6.7 Выбор нагревательного элемента

Самым распространённым типом нагревательного элемента являются ТЭНы. Электрические воздушные ТЭНы применяются в качестве

нагревательного элемента в канальных электрокалориферах и приточных вентиляционных установках. Нагрев сред осуществляется путем конвекции, теплопроводности и излучения

В таблице 8 представлено два типа воздушных ТЭНов разных производителей.

Таблица 8 – Технические характеристики ТЭНов

Характеристики	Типы ТЭНов	
	200A13/2T.220Ф2R30	воздушный ТЭН для круглых каналов
Материал оболочки	Углеродистая сталь	Углеродистая сталь
Длина, см	200	0,267
Мощность, кВт	2,5	2
Напряжение питания, В	220	230
Температура на оболочке, °С	450...600	500
Цена, руб.	1800	1150

В результате анализа был выбран воздушный ТЭН для круглых каналов фирмы Irsa [34].

5.6.8 Выбор ультразвукового пьезометра

Все увлажнители работают по двум основным принципам: изотермическое и адиабатическое увлажнение. При изотермическом увлажнении происходит смешение воздуха с водяным паром, который выделил увлажнитель. Принцип адиабатического увлажнения основан на естественном испарении воды в окружающую среду. Суть работы таких увлажнителей основана на разности парциальных давлений пара, вырабатываемого над водной поверхностью и давления окружающего воздуха.

Более легким в реализации является воссоздание ультразвукового увлажнителя. В основе работы таких увлажнителей лежит мембрана (ультразвуковой излучатель). Этот пьезоэлектрический прибор, который под воздействием электрического тока вибрирует на ультразвуковой частоте. Под воздействием ультразвуковых волн, вода механическим образом превращается в водяной туман – воздух насыщается микроскопическими частичками воды.

В таблице 9 представлено два сравниваемых типа мембран: M25C001 производства Кореи и мембрана для увлажнителя воздуха компании Solbat Company.

Таблица 9 – Технические характеристики ультразвуковых излучателей

Характеристики	Типы пьезометров	
	M25C001	Мембрана для увлажнителя воздуха
Диаметр, мм	25	20
Резонансная частота, МГц	1,70 +/- 0,05	1,70
Резонансное сопротивление, Ом	2	< 2
Распыляемый объем (производительность), мл/ч	500	350

Наибольшую производительность показала мембрана M25C001 [35].

5.6.9 Выбор греющего кабеля

Греющий кабель необходим для предотвращения образования конденсата в трубе подачи влажного воздуха в камеру, а также дополнительный подогрев резервуара подготовки влажного воздуха.

В таблице 10 представлены технические характеристики греющих кабелей одной ценовой категории.

Таблица 10 – Технические характеристики греющих кабелей

Характеристики	Типы кабелей	
	HEATUS PerfectJet 01	FINE KOREA GRX/RGS 40-2CR
Напряжение, В	220	220
Мощность, Вт	13	40
Температура воздействия, °С	85	90
Минимальный радиус изгиба, мм	30	25

В качестве греющего кабеля будет использоваться HEATUS PerfectJet 01. Данный кабель является более энергоэффективным [36].

5.6.10 Выбор измерительного преобразователя перепада давления

Датчики перепада измеряют перепады давления и показывают результаты использования контроля автоматизированных процессов. Это позволяет оператору поддерживать и контролировать безопасность процессов.

В качестве измерительного преобразователя перепада давления выбран датчик KPI 35 фирмы Danfoss [37]. Данный датчик будет сигнализировать о работе насоса.

В таблице 11 представлены основные технические характеристики KPI 35.

Таблица 11 – Технические характеристики KPI 35

Параметр	Значение
Диапазон настройки, бар	0,2...8
Перепад давления, бар	0.5...1,5
Рабочая среда	вода, воздух, масло
Макс. Допустимая температура рабочей среды, °С	100

5.6.11 Выбор автоматизированного рабочего места

АРМ соединяет программно-аппаратные средства, которые обеспечивают взаимодействие человека с компьютером. Оно предоставляет возможность ввода и вывода информации.

Организация сетей передачи данных осуществляется посредством сетей Modbus /Ethernet TCP/IP, полевой шины Modbus и технологической сети Ethernet.

В таблице 12 приведены характеристики ноутбуков, между которыми производится выбор.

Таблица 12 – Технологические характеристики ноутбуков

Характеристики	Типы ноутбуков		
	Acer Extensa EX2519-C298	HP 255 G6	ASUS Vivobook Max D541Na-GQ335T
Производитель процессора	Intel	AMD	Intel
Количество ядер процессора	2	2	4
Частота процессора, ГГц	1.6	1.5	1.1
Частота оперативной памяти, МГц	1600	1866	1600
Объем жесткого диска, ГБ	500	500	500

Выбирается ноутбук HP 255 G6, потому что компьютер имеет лучшие характеристики [38].

На основании выбранного оборудования была составлена заказная спецификация, она представлена в приложении Г.

5.7 Разработка принципиальной электрической схемы автоматизированной системы

Принципиальная электрическая схема должна определять полный состав приборов, аппаратов и устройств (а также связей между ними), действие которых обеспечивает решение, регулирования, защиты, измерения и сигнализации.

Принципиальные схемы служат основанием для разработки других документов проекта (монтажных таблиц щитов и пультов, схем внешних соединений и др.). На схеме изображаются все элементы информационно-измерительной системы, находящиеся в щите, а также принцип их взаимодействия [39].

Питание щита автоматизации должно осуществляться от двухфазной цепи с переменным напряжением 220 В. Для преобразования напряжения сети переменного тока 220 В в постоянное напряжение 24 В необходимо разместить блок питания. Сигналы с полевых датчиков должны поступать на контроллер МС 12.3 и модуль расширения ME16.1 через клеммные сборки.

Описание разработки принципиальной электрической схемы:

- 1) изучение схем подключения электрических средств автоматизации из заказной спецификации;
- 2) выбор схемы питания;
- 3) изучение особенности подключения электрических приборов;
- 4) изготовление чертежа принципиальной электрической схемы.

Схема принципиальная электрическая представлена на листе с шифром ФЮРА.42100.009 ЭЗ.

Питание щита автоматизации осуществляется от двухфазной цепи с переменным напряжением 220 В. Для защиты элементов цепи от перегрузок и токов короткого замыкания используются выключатели автоматические.

6 Расчет АСР влажности

6.1 Экспериментальное определение кривых разгона объекта управления

Определение статических и динамических характеристик объекта может быть выполнено двумя способами: аналитическим и экспериментальными путями [13].

В данной работе применяется экспериментальный метод определения кривой разгона. Суть такого метода заключается в том, что объект управления предварительно приводят в равновесное состояние, затем на него подают различного рода возмущение, и через определенные промежутки времени регистрируют изменение выходной величины до прихода ее к новому установившемуся значению.

Экспериментальные кривые разгона при трех значениях влажности приведены на рисунке 10.

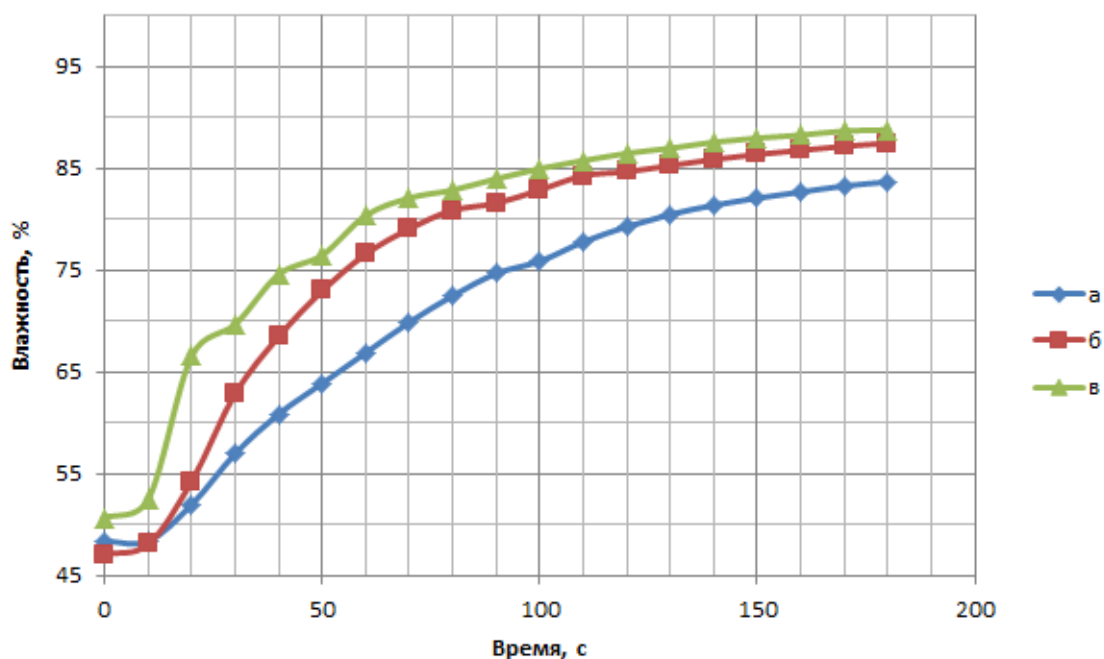


Рисунок 10 – Экспериментальные кривые разгона относительной влажности, при возмущении расходом воды:
а – 35 г/л; б – 175 г/л; в – 350 г/л.

Усредненная кривая разгона влажности, полученная по методике [40], приведена на рисунке 11.

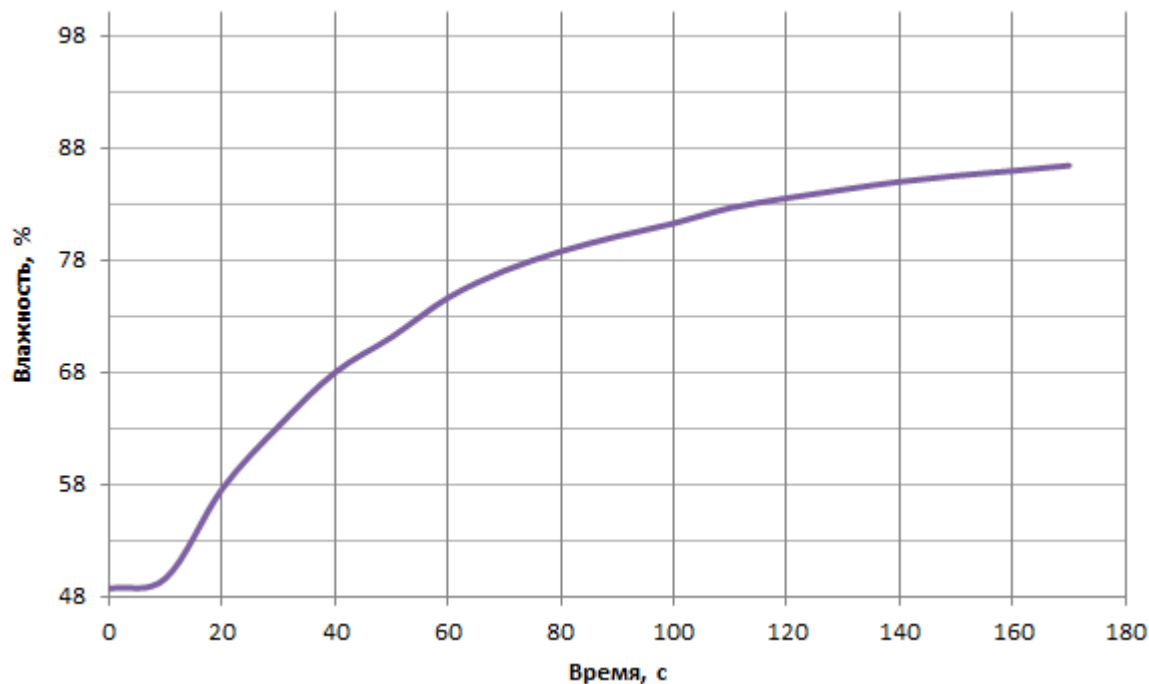


Рисунок 11 – Усредненная экспериментальная кривая разгона влажности при возмущении расходом воды

Аналогичным образом получена усредненная кривая разгона температуры при возмущении расходом воды (рисунок 12).

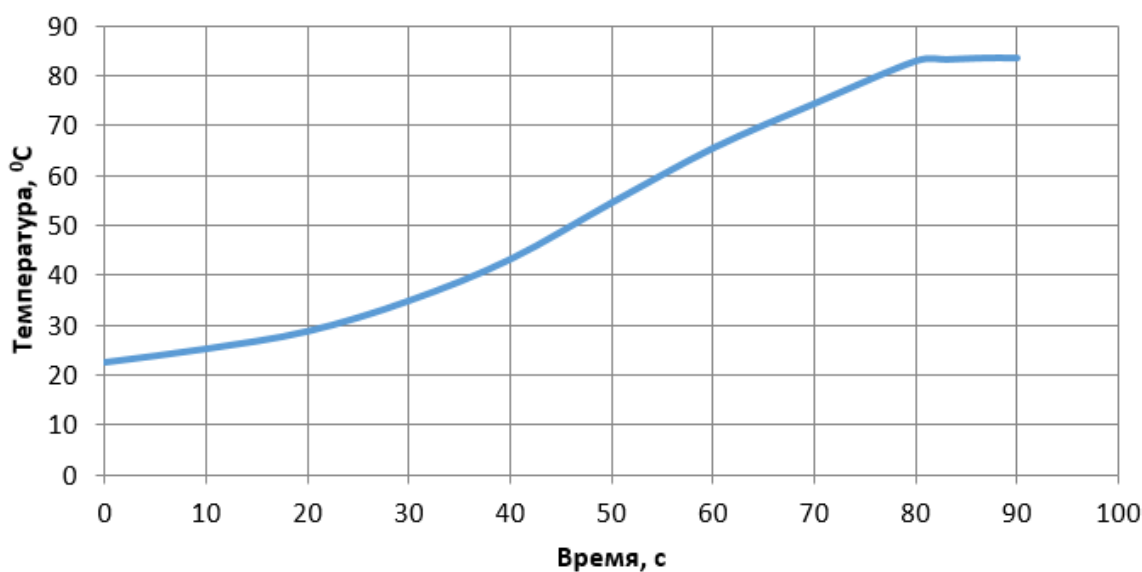


Рисунок 12 – Усредненная экспериментальная кривая разгона температуры

6.2 Получение передаточной функции по кривой разгона объекта

регулирования влажности

Существует несколько методов определения динамических характеристик объекта управления по кривой разгона такие, как: графический и интерполяционный методы [25].

В зависимости от вида кривой разгона выбирается вид передаточной функции. В нашем случае передаточная функция для кривой представляет собой апериодическое звено с запаздыванием:

$$W(P) = \frac{k}{(TP + 1)} e^{-P\tau}, \quad (6)$$

где k – коэффициент усиления, P – оператор Лапласа, τ – время запаздывания, T – постоянная времени.

Производится аппроксимация кривой по методу Ормана. Данный метод дает возможность определить по нормированной кривой разгона определить две доминирующие постоянные объекта [41]. Определяется время t_7 по нормированной переходной функции $h(t)$, которое является корнем уравнения $h(t_7)$ и время t_4 и $h(t_4)$. Затем вычисляются постоянная времени T и время запаздывания τ :

$$\tau = 0,5(3t_4 - t_7),$$
$$T = \frac{t_7 - \tau}{1.2} = 1.25(t_7 - t_4).$$

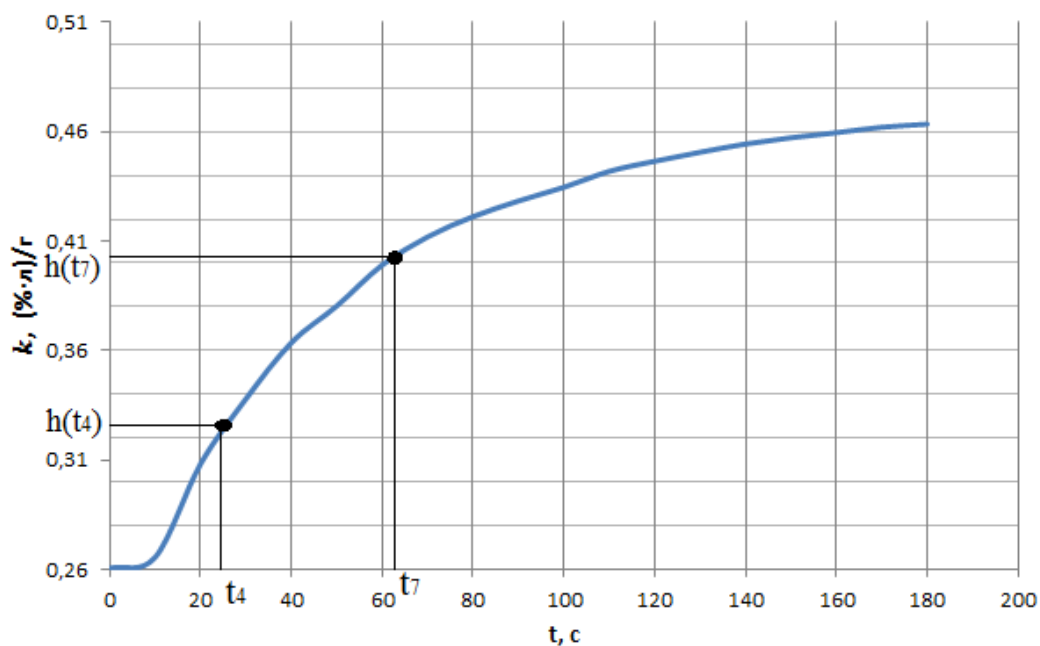


Рисунок 13 – Определение параметров передаточной функции объекта

Определяются значения по кривой разгона:

$$\tau = 0,5(3 \cdot 25 - 62,4) = 6,3;$$

$$T = 1,25(62,4 - 25) = 46,75.$$

Значение коэффициента усиления объекта:

$$k = y(\infty) = 0,463.$$

Передаточная функция объекта регулирования влажности имеет вид:

$$W(P) = \frac{0,463}{(46,75P + 1)} e^{-6,3P}. \quad (7)$$

6.3 Получение передаточной функции по кривой разгона объекта регулирования температуры

Получение передаточной функции объекта регулирования так же проводится по методу Ормана [41].

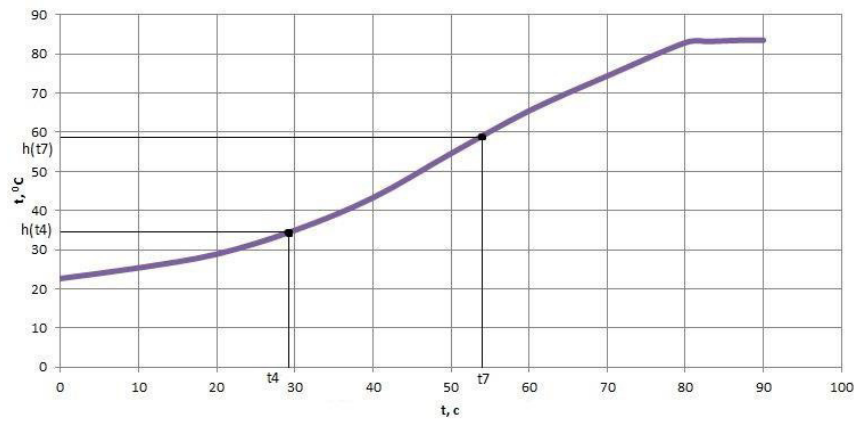


Рисунок 14 – Определение параметров передаточной функции объекта

Определяются значения постоянной времени и времени запаздывания по кривой разгона:

$$\tau = 0,5(3 \cdot 29,2 - 53,8) = 16,9;$$

$$T = 1,25(53,8 - 29,2) = 30,75.$$

Значение коэффициента усиления объекта:

$$k = y(\infty) = 0,84 .$$

Передаточная функция объекта регулирования температуры имеет вид:

$$W(P) = \frac{0,84}{(30,75P + 1)} e^{-16,9P} . \quad (8)$$

7 Экспериментальное снятие статически характеристик измерительных преобразователей

7.1 Передаточная функция измерительного преобразователя температуры

Структурная схема установки для получения статической характеристики измерительного преобразователя температуры представлена на рисунке 15.

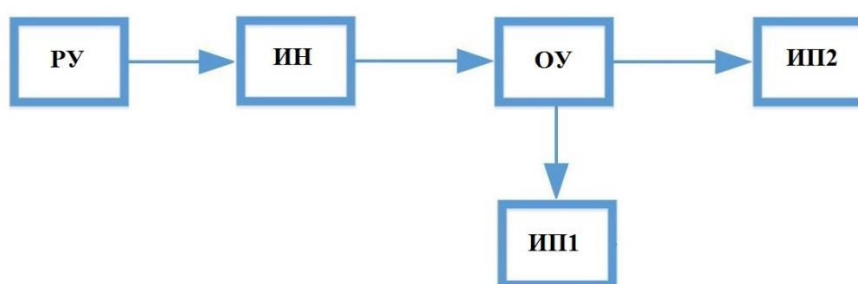


Рисунок 15 – Структурная схема стенда для измерения температуры:

РУ – регулирующее устройство, ИН – источник нагрева, ОУ – объект управления, ИП1, ИП2 – измерительные преобразователи.

С помощью регулирующего устройства задается значение температуры, до которой нагревается ИН. С помощью источника нагрева в объекте контроля устанавливается заданная температура. Значения температуры снимаются образцовым и поверяемым измерительным преобразователем температуры.

В качестве измерительного преобразователя температуры используется термопреобразователь сопротивления ТСМУ-16-S. На рисунке 16 представлена зависимость изменения выходного сигнала от изменения значения температуры, полученная в результате эксперимента.

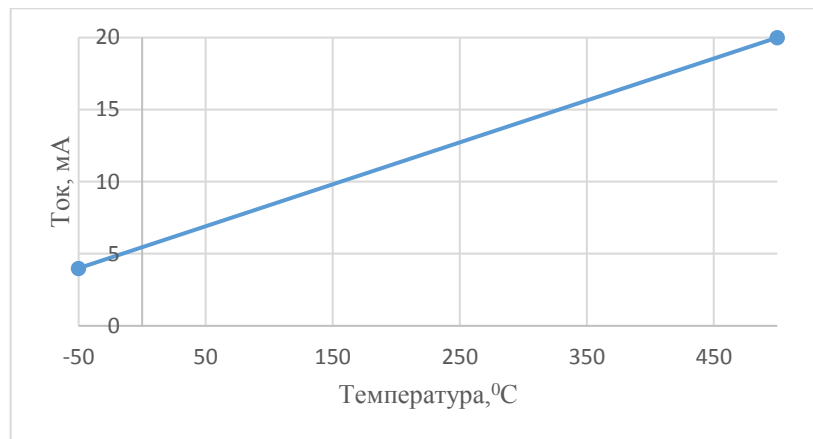


Рисунок 16 – Результаты экспериментального определения статической характеристики измерительного преобразователя температуры

Коэффициент передачи преобразователя температуры рассчитывается по следующему выражению:

$$K_t = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{20 - 4}{500 - (-50)} = 0,03.$$

Передаточная функция преобразователя температуры:

$$W_t(P) = K_t = 0,03. \quad (9)$$

7.2 Передаточная функция измерительного влажности

Структурная схема установки для получения статической характеристики измерительного преобразователя влажности представлена на рисунке 17.

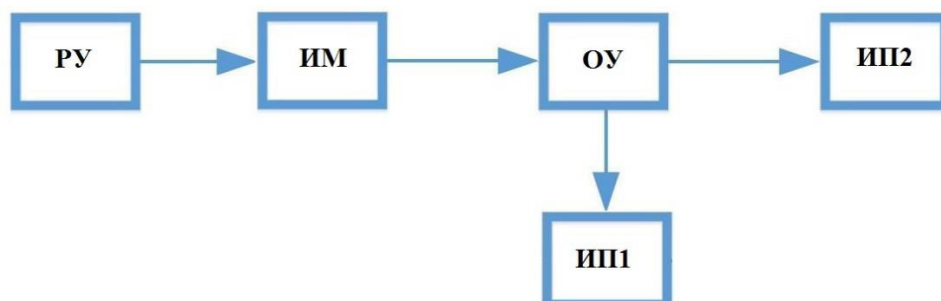


Рисунок 17 – Структурная схема стенда для измерения температуры:

РУ – регулирующее устройство, ИМ – исполнительный механизм, ОУ – объект управления, ИП1, ИП2 – измерительные преобразователи.

С помощью регулирующего устройства устанавливается определенное значение влажности. Исполнительный механизм (ультразвуковой пьезометр) вырабатывает увлажненный воздух, который поступает в ОУ. Значения относительной влажности в объеме объекта управления фиксируются образцовым и поверяемым измерительным преобразователем влажности.

В качестве измерительного преобразователя используется ДВТ-0.3ТЭ. На рисунке 18 представлена зависимость изменения выходного сигнала от изменения расхода, полученная в результате эксперимента.

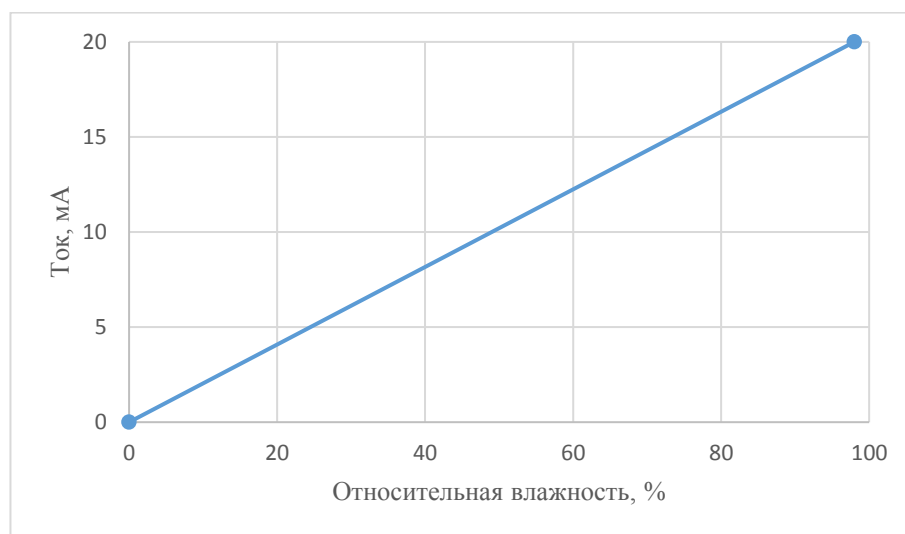


Рисунок 18 – Результаты экспериментального определения статической характеристики измерительного преобразователя влажности

Коэффициент передачи преобразователя влажности:

$$K_g = \frac{\Delta I}{\Delta RH} = \frac{20-0}{98-0} = 0,2.$$

Передаточная функция преобразователя влажности:

$$W_g(P) = K_g = 0,2. \quad (10)$$

8 Расчет оптимальных параметров настройки регулирующих устройств

8.1 Обзор методов определения параметров настройки регулятора

Существует несколько способов определения настройки параметров регулятора: аналитические [42], графические [43] и на основе приведенных методик [42].

При использовании графического метода происходит построение области устойчивости в координатах параметров регулятора. Потом происходит построение в этих же координатах новой области для параметров, которые рассчитываются по определенному критерию. Отталкиваясь от определенных правил, выбираются оптимальные параметры настройки регулятора. Примером такого правила может служить рекомендация Астрема и Хаглунда [42]. Рекомендация заключается в следующем: значение интегральной составляющей должно иметь максимальное значение, это обеспечит минимальное значение времени регулирования.

Аналитические методы основываются на обеспечении достижения значения, определенного из критериев. В качестве критериев могут использоваться: запас устойчивости по фазе и по модулю, заданная степень устойчивости [44] и др. К аналитическим относятся частотные методы нахождения параметров настройки. Методы расчета по частотным характеристикам лежат в основе методов для расчета реально применяемых систем регулирования. Они дают возможность учитывать величины случайных шумов.

Методы настройки регуляторов, основанные на методах, получили широкое распространение из-за своей простоты. Примером может служить Метод-Никольса [45], но у данного способа определения существуют недостатки. Он обеспечивает высокое значение перерегулирования и большое время регулирования. Недостатком метода на основании правил можно так же

считать то, что существует необходимость уменьшения порядка модели, а это в свою очередь ведет к ошибке, которая влияет на качество настройки системы.

Расчет параметров настройки регулятора будет осуществляться методом расширенных амплитудно-фазовых частотных характеристик (РАФЧХ). Расчетные формулы данного метода способны обеспечивать границы заданного запаса устойчивости или же заданной степени колебательности системы в пространстве параметров настройки регулятора [46].

8.2 Определение ОПН стабилизирующего и корректирующего регуляторов

Задача выбора оптимальных параметров настройки связана с поиском экстремума критерия оптимальности в области допустимых значений параметров.

АСУ климатической камерой является каскадной с корректирующим и стабилизирующим регуляторами. При теоретических исследованиях предпочтительным является метод расчёта по контурам регулирования [19].

Так как применение первого интегрального критерия к колебательному переходному процессу не целесообразно, то для определения оптимальных параметров настройки регуляторов воспользуемся вторым интегральным критерием.

8.2.1 Расчет параметров настройки стабилизирующего регулятора

Согласно рисунку 9 передаточная функция объекта регулирования записывается как:

$$W_{об}(p) = W_{дт}(p) \cdot W_{др}(p) \cdot W_T(p) = 0,03 \cdot \frac{0,84 \cdot e^{-p \cdot 16,9}}{30,75 \cdot p + 1} = \frac{0,025 \cdot e^{-p \cdot 16,9}}{30,75 \cdot p + 1}. \quad (11)$$

Определим параметры настройки ПИ-регулятора методом РАФЧХ.

Замена P на комплексную переменную $p = (-\omega) \cdot (m - i)$.

Настроечные параметры ПИ-регулятора [47]:

$$\frac{k_p}{T_u} = \frac{(-1)}{A_{o\delta 1}^2(m, \omega)} \omega \cdot (m^2 + 1) \cdot \text{Im}_{o\delta 1}(m, \omega),$$

$$k_p = \frac{(-1)}{A_{o\delta 1}^2(m, \omega)} \cdot (\text{Re}_{o\delta 1}(m, \omega) + m \cdot \text{Im}_{o\delta 1}(m, \omega)),$$

где $\text{Re}_{o\delta}(m, \omega)$ и $\text{Im}_{o\delta}(m, \omega)$ расширенные ВЧХ и МЧХ эквивалентного объекта, $A_{o\delta 1}(m, \omega) = \sqrt{\text{Re}_{o\delta 1}(m, \omega) + \text{Im}_{o\delta 1}(m, \omega)}$ – расширенная АЧХ объекта.

Задаем степень затухания $\psi = 0,75$, тогда степень колебательности определяется как:

$$m = -\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(1 - \psi) = -\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(1 - 0,75) = 0,221.$$

В приложении Б приведен расчет ОПН стабилизирующего регулятора.

На основании этих данных построен график зависимости $\frac{k_p}{T_u}(\omega) = f(k_p(\omega))$ (рисунок 19).

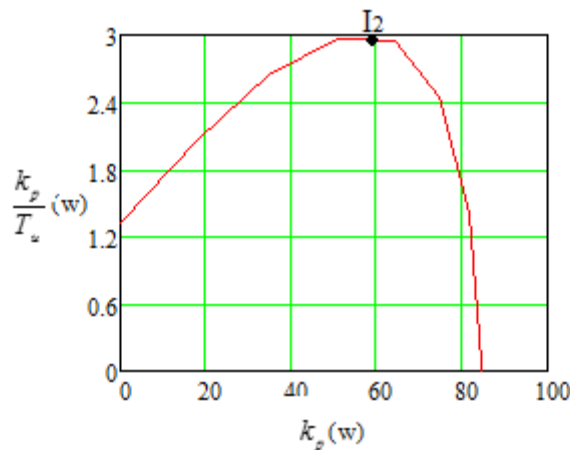


Рисунок 19 – Граница запаса устойчивости

На границе заданного запаса устойчивости находим значения параметров, минимизирующих принятый критерий качества работы системы, а именно минимуму второго интегрального критерия соответствует точка

равная $0,95 \cdot \max\left(\frac{k_p}{T_u}\right)$ в сторону большего значения частоты, то есть правее максимума.

Из графика на рисунке 19 определяем значение $\max\left(\frac{k_p}{T_u}\right) = 2,97$, тогда получим следующие оптимальные параметры настройки стабилизирующего ПИ-регулятора:

$$0,95 \cdot \max\left(\frac{k_p}{T_u}\right) = 0,95 \cdot 2,97 = 2,82;$$

$$k_p = 58;$$

$$T_u = \frac{k_p}{k_p / T_u} = \frac{58}{2,82} = 20,57 .$$

Передаточная функция стабилизирующего регулятора записывается следующим выражением:

$$W_{pc}(p) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u \cdot p}\right) = 58 + \frac{58}{20,57 \cdot p} . \quad (12)$$

8.2.2 Расчет параметров настройки корректирующего регулятора

Преобразованная структурная схема системы представлена на рисунке 20 [47].

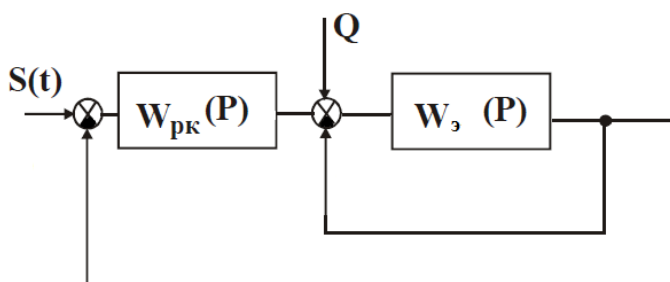


Рисунок 20 – Преобразованная структурная схема:

$$W_{\text{э}}(p) = \frac{W_{pc}(p) \cdot W_T^*(p)}{1 + W_{pc}(p) \cdot W_B^*(p)}, \quad W_{\text{э}}(p) - \text{эквивалентная передаточная функция объекта.}$$

Передаточная функция эквивалентного объекта регулирования записывается как:

$$W_3(p) = \frac{W_{pc}(p) \cdot W_T^*(p)}{1 + W_{pc}(p) \cdot W_B^*(p)},$$

$$W_3(p) = \frac{\left(58 + \frac{58}{20,57 \cdot p}\right) \cdot \frac{0,025 \cdot e^{-p \cdot 16,9}}{30,75 \cdot p + 1}}{1 + \left(58 + \frac{58}{20,57 \cdot p}\right) \cdot \frac{0,09 \cdot e^{-p \cdot 6,3}}{46,75 \cdot p + 1}}. \quad (13)$$

Определим параметры настройки ПИ-регулятора методом РАФЧХ [48].

Заменяем P на комплексную переменную $p = (-\omega) \cdot (m - i)$.

Настроечные параметры ПИ-регулятора:

$$\frac{k_p}{T_u} = \frac{(-1)}{A_{обP}^2(m, \omega)} \omega \cdot (m^2 + 1) \cdot \text{Im}_{обP}(m, \omega),$$

$$k_p = \frac{(-1)}{A_{обP}^2(m, \omega)} \cdot (\text{Re}_{обP}(m, \omega) + m \cdot \text{Im}_{обP}(m, \omega)),$$

где $\text{Re}_{об}(m, \omega)$ и $\text{Im}_{об}(m, \omega)$ расширенные ВЧХ и МЧХ эквивалентного объекта, $A_{обP}(m, \omega) = \sqrt{\text{Re}_{обP}(m, \omega) + \text{Im}_{обP}(m, \omega)}$ – расширенная АЧХ эквивалентного объекта.

Задаем степень затухания $\psi = 0,75$, тогда степень колебательности $m = 0,221$.

В приложении В приведен расчет ОПН корректирующего регулятора.

На основании этих данных построен график зависимости $\frac{k_p}{T_u}(\omega) = f(k_p(\omega))$

(рисунок 21).

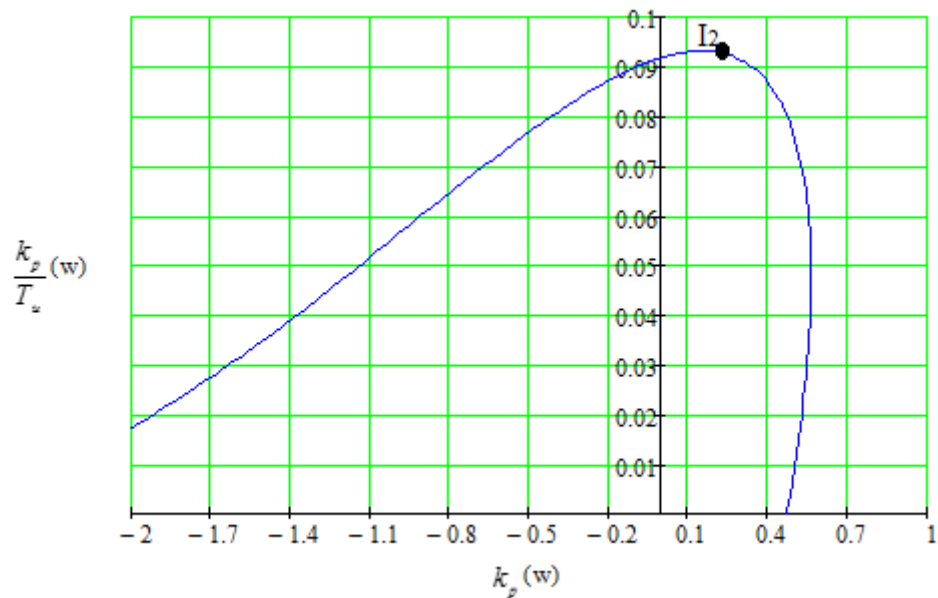


Рисунок 21 – Граница запаса устойчивости

Откуда находим оптимальные параметры настройки корректирующего регулятора: $K_p=0,21$, $T_u = 2,38$ с.

Таким образом, передаточная функция корректирующего регулятора имеет вид:

$$W_{кр}(p) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u \cdot p}\right) = 0,21 \cdot \left(1 + \frac{1}{2,38 \cdot p}\right) = 0,21 + \frac{0,21}{2,38 \cdot p}. \quad (14)$$

8.3 Построение переходного процесса и оценка качества работы системы по каналу задающего воздействия

Передаточная функция замкнутой системы по управляющему воздействию равна [48]:

$$W_{зс}(p) = \frac{W_{кр} \cdot W_{э}}{1 + W_{кр} \cdot W_{э}}. \quad (15)$$

Методом численного интегрирования. Этот метод основан на том, что при нулевых начальных условиях и единичном ступенчатом воздействии связь между переходной характеристикой и вещественной частотной характеристикой системы имеет вид [48]:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{Re}(W_{з.с.}(i\omega))}{\omega} \cdot \sin(\omega t) d\omega.$$

На рисунке 22 представлен переходный процесс замкнутой системы по каналу задающего воздействия. С помощью этого переходного процесса была произведена оценка качества регулирования. Данная оценка позволит сделать вывод о том, насколько система удовлетворяет предъявленным требованиям, при предъявленных к системе ограничениях.

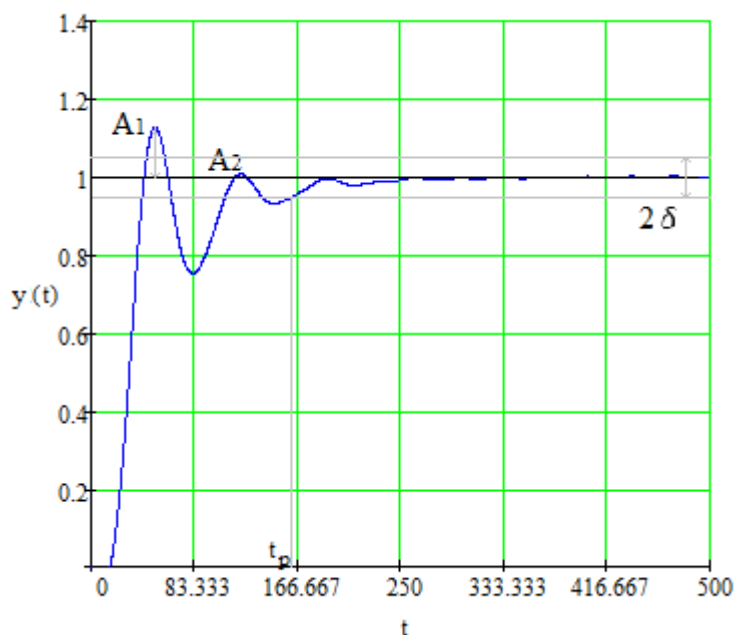


Рисунок 22 – Переходный процесс по каналу задающего воздействия

По рисунку 22 определяются прямые оценки качества переходного процесса (таблица 13).

Таблица 13 – Показатели качества переходного процесса

Показатель качества	Заданное	Расчетное
Максимальная динамическая ошибка		$A_1=0,12$
Перерегулирование		$\sigma = 12 \%$
Степень затухания	$\psi = 0,75$	$\psi = 0,75$
Статическая ошибка		$\varepsilon_{ст} = 0$
Время регулирования		$t_p = 158 \text{ с}$
Допустимое отклонение		$\delta = 0,05$

Поскольку расчетный и заданный параметр совпадает, то можно сделать вывод что ОПН регуляторов определены верно.

8.4 Оценка качества переходного процесса по каналу регулирующего воздействия со стороны регулирующего органа

Рассмотрению подлежит переходный процесс при возмущении f , которое идет по каналу регулирующего воздействия. Передаточная функция системы будет иметь вид [48]:

$$W(P) = \frac{W_3(P)}{1 + W_3(P) \cdot W_p(P)}. \quad (16)$$

На рисунке 23 представлен переходный процесс замкнутой системы по каналу регулирующего воздействия. С помощью этого переходного процесса была произведена оценка качества регулирования. Данная оценка позволит сделать вывод о том, насколько система удовлетворяет предъявленным требованиям, при предъявленных к системе ограничениях.

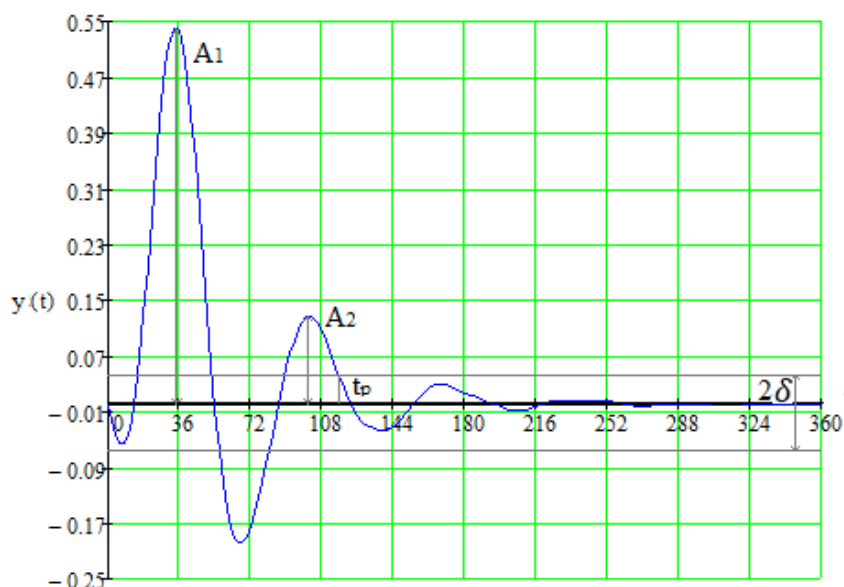


Рисунок 23 – Переходный процесс в системе по каналу регулирующего воздействия

При помощи графика определяются прямые критерии качества (таблица 14).

Таблица 14 – Показатели качества переходного процесса

Показатель качества	Заданное	Расчетное
Максимальная динамическая ошибка		$A_1=0,54$
Перерегулирование		$\sigma = 54 \%$
Степень затухания	$\psi = 0,75$	$\psi = 0,75$
Статическая ошибка		$\varepsilon_{ст} = 0$
Время регулирования		$t_p = 28,8 \text{ с}$
Допустимое отклонение		$\delta = 0,05$

Поскольку расчетный и заданный параметр совпадает, то можно сделать вывод что ОПН регуляторов определены верно.

8.5 Моделирование процессов АСУ влажности температуры при изменении значений параметров настройки регуляторов

Моделирование позволяет произвести анализ качества переходных процессов в замкнутой АСУ при отклонении параметров настройки регуляторов.

Моделирование осуществлялось с помощью лабораторного практикума «Автоматизация технологических процессов ТЭС».

Для моделирования переходного процесса при изменении параметров настройки регуляторов в каскадной системе использовалась подпрограмма RAFK1 (рисунок 24).

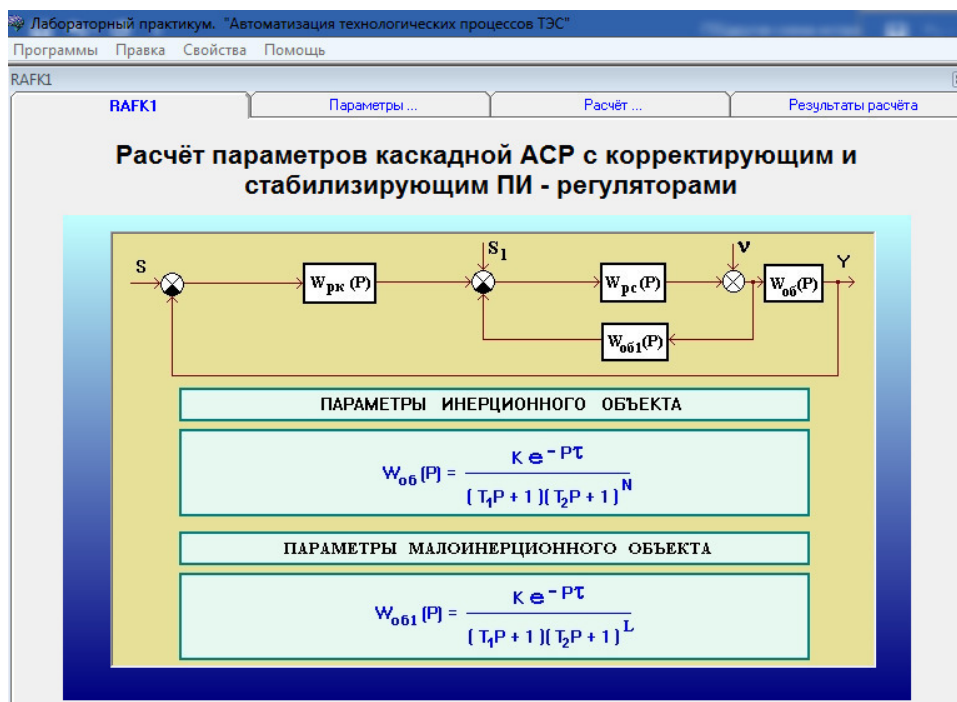
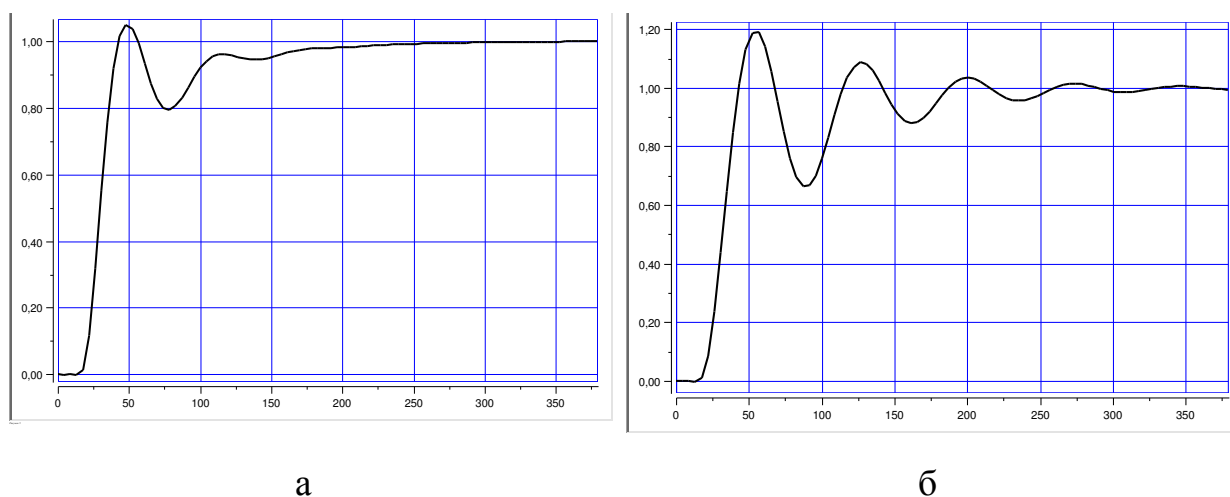


Рисунок 24 – Окно программы ASU

На рисунке 25 представлены переходные процессы при изменении параметров стабилизирующего регулятора, параметры корректирующего регулятора остаются неизменными. При изменении величины P -составляющей на 17 % стабилизирующего регулятора, значение I -составляющей равно значению, полученному аналитическим путем.



а

б

Рисунок 25 – Изменение значения постоянной интегрирования стабилизирующего регулятора: а – $K_p=68$, б – $K_p=48$

Таблица 15 – Показатели качества переходных процессов

Показатель качества	Исходное ($K_p=58$)	$K_p=68$	$K_p=48$
Максимальная динамическая ошибка	$A_1=0,12$	$A_1=0,05$	$A_1=0,175$
Перерегулирование	$\sigma = 12 \%$	$\sigma = 5 \%$	$\sigma = 17,5 \%$
Степень затухания	$\psi = 0,75$	$\psi = 1$	$\psi = 0,57$
Время регулирования	$t_p = 158 \text{ с}$	$t_p = 250 \text{ с}$	$t_p = 360 \text{ с}$

На рисунке 26 представлены переходные процессы при изменении параметров стабилизирующего регулятора, параметры корректирующего регулятора остаются неизменными. При изменении величины И-составляющей стабилизирующего регулятора при неизменном значении П-составляющей.

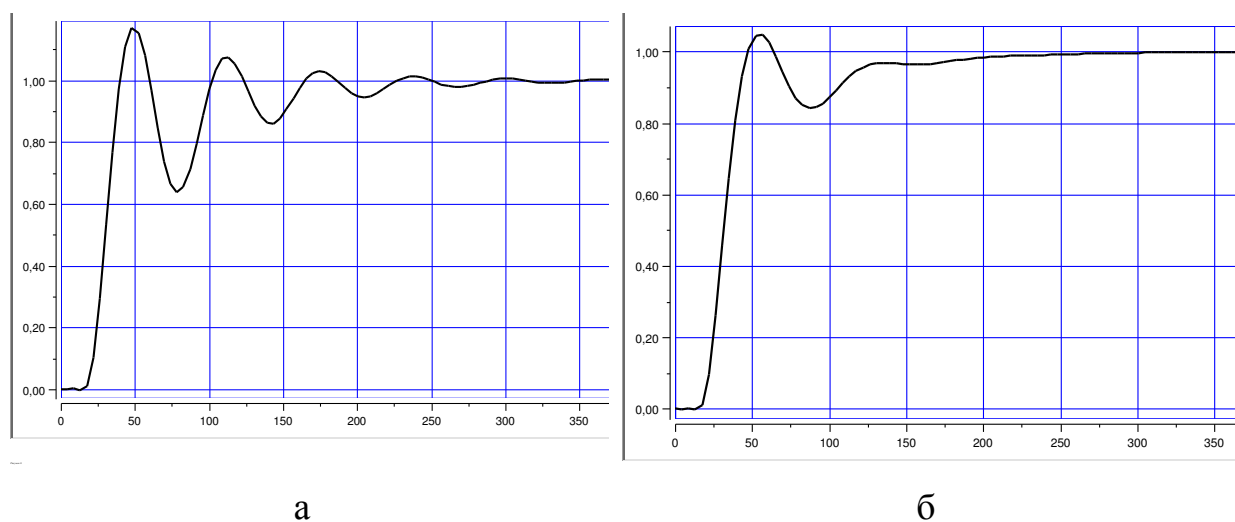


Рисунок 26 – Изменение значения постоянной интегрирования стабилизирующего регулятора: а– $K_p / T_i = 3,82$, б – $K_p / T_i = 1,82$

Таблица 16 – Показатели качества переходных процессов

Показатель качества	Исходное ($K_p / T_{и} = 2,82$)	$K_p / T_{и} = 3,82$	$K_p / T_{и} = 1,82$
Максимальная динамическая ошибка	$A_1 = 0,12$	$A_1 = 0,165$	$A_1 = 0,063$
Перерегулирование	$\sigma = 12 \%$	$\sigma = 16,5 \%$	$\sigma = 6,3 \%$
Степень затухания	$\psi = 0,75$	$\psi = 0,57$	$\psi = 1$
Время регулирования	$t_p = 158 \text{ с}$	$t_p = 330 \text{ с}$	$t_p = 258 \text{ с}$

На рисунке 27 представлены переходные процессы при изменении параметров корректирующего регулятора, при неизменных значениях параметров стабилизирующего регулятора. При изменении значения P -составляющей корректирующего регулятора и при неизменном значении I -составляющей.

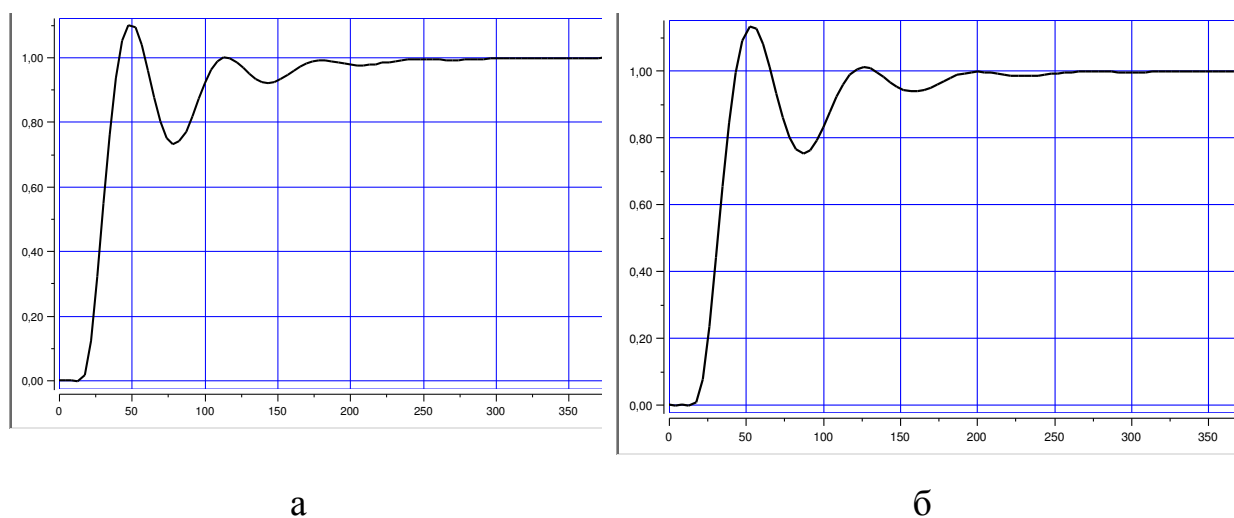
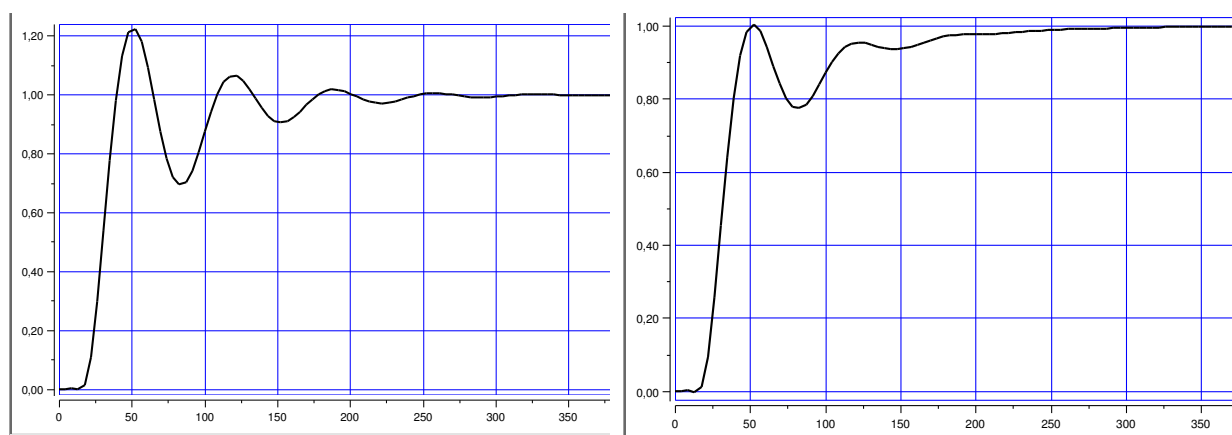


Рисунок 27 – Изменение значения постоянной интегрирования стабилизирующего регулятора: а– $K_p = 0,31$ б – $K_p = 0,11$

Таблица 17 – Показатели качества переходных процессов

Показатель качества	Исходное ($K_p=0,21$)	$K_p=0,31$	$K_p=0,11$
Максимальная динамическая ошибка	$A_1=0,12$	$A_1=0,094$	$A_1=0,13$
Перерегулирование	$\sigma = 12 \%$	$\sigma = 9,4 \%$	$\sigma = 13 \%$
Степень затухания	$\psi = 0,75$	$\psi = 1$	$\psi = 0,95$
Время регулирования	$t_p = 158 \text{ с}$	$t_p = 235 \text{ с}$	$t_p = 315 \text{ с}$

На рисунке 28 представлены переходные процессы при изменении параметров корректирующего регулятора, при неизменных значениях параметров стабилизирующего регулятора. При изменении значения И-составляющей корректирующего регулятора и при неизменном значении П-составляющей.



а

б

Рисунок 28 – Изменение значения постоянной интегрирования стабилизирующего регулятора: а – $K_p / T_{и} = 0,0984$, б – $K_p / T_{и} = 0,0784$

Таблица 18 – Показатели качества переходных процессов

Показатель качества	Исходное ($K_p / T_n = 0,0884$)	$K_p / T_n = 0,0984$	$K_p / T_n = 0,0784$
Максимальная динамическая ошибка	$A_1 = 0,12$	$A_1 = 0,225$	$A_1 = 0,002$
Перерегулирование	$\sigma = 12 \%$	$\sigma = 22,5 \%$	$\sigma = 0,2 \%$
Степень затухания	$\psi = 0,75$	$\psi = 0,67$	$\psi = 1$
Время регулирования	$t_p = 158 \text{ с}$	$t_p = 317 \text{ с}$	$t_p = 284 \text{ с}$

В результате проведенного моделирования можно сделать вывод, что только параметры настройки регуляторов, полученные расчетным способом способны обеспечить заданную степень колебательности и минимальное время регулирования. Изменение параметров настройки в большинстве случаев приводят к увеличению перерегулирования и значительному увеличению времени регулирования системы.

8. 6 Расчет параметров настройки цифрового регулятора

Порядок расчета параметров настройки цифровых регуляторов определяется структурой построения системы НЦ и требованиям, предъявляемыми к качеству ее работы.

Выполним расчет системы НЦУ, схема которой представлена на рисунке 29. Цифровой регулятор в схеме НЦУ состоит из аналого-цифрового преобразователя АЦП, вычислительного устройства ВУ и цифро-аналогового преобразователя ЦАП. В вычислительном устройстве ВУ осуществляется вычисление текущего значения регулирующего воздействия для каждого очередного шага, определяемого интервалом квантования T . таким образом, ВУ осуществляет преобразование по заданному закону последовательности чисел ошибки $\varepsilon[kT]$ в последовательность чисел $\mu[kT]$, определяющих текущее значение регулирующего воздействия. Цифро-аналоговый

преобразователь ЦАП преобразует числовую последовательность $\mu[kT]$ в непрерывное перемещение регулирующего органа $\mu(t)$. В аналогово-цифровом преобразователе АЦП ошибка регулирования $\varepsilon(t)$, равная разности между заданием $s(t)$ и текущим значением $y(t)$ регулируемой величины, преобразуется в числовую последовательность $\varepsilon[kT]$. На схеме системы регулирования $v(t)$ – возмущение, действующие на объект.

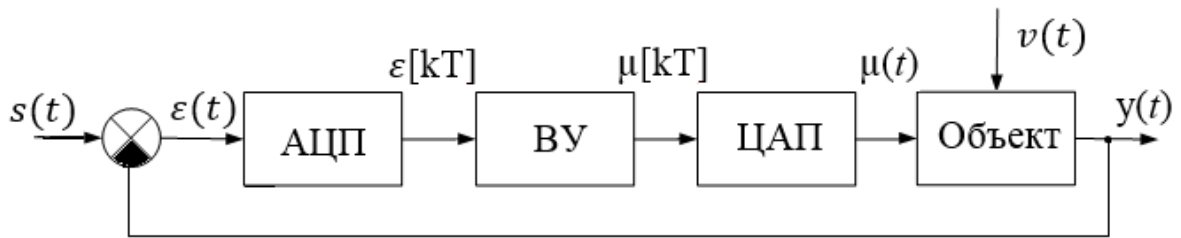


Рисунок 29 – Схема системы регулирования с цифровым регулятором

В основу требований, предъявляемых к качеству работы АСР, положим следующее [19]:

- система с цифровым регулятором должна иметь запас устойчивости не ниже заданного;
- регулируемая величина не должна иметь пульсаций, обусловленных квантованием;
- параметры настройки цифрового регулятора должны обеспечивать минимум второго интегрального критерия

Для расчета параметров настройки цифрового регулятора использовалась программа RAFC1S. Она находится в каталоге программы ASU. На рисунке 30 представлено окно программы с некоторыми расчетными значениями.

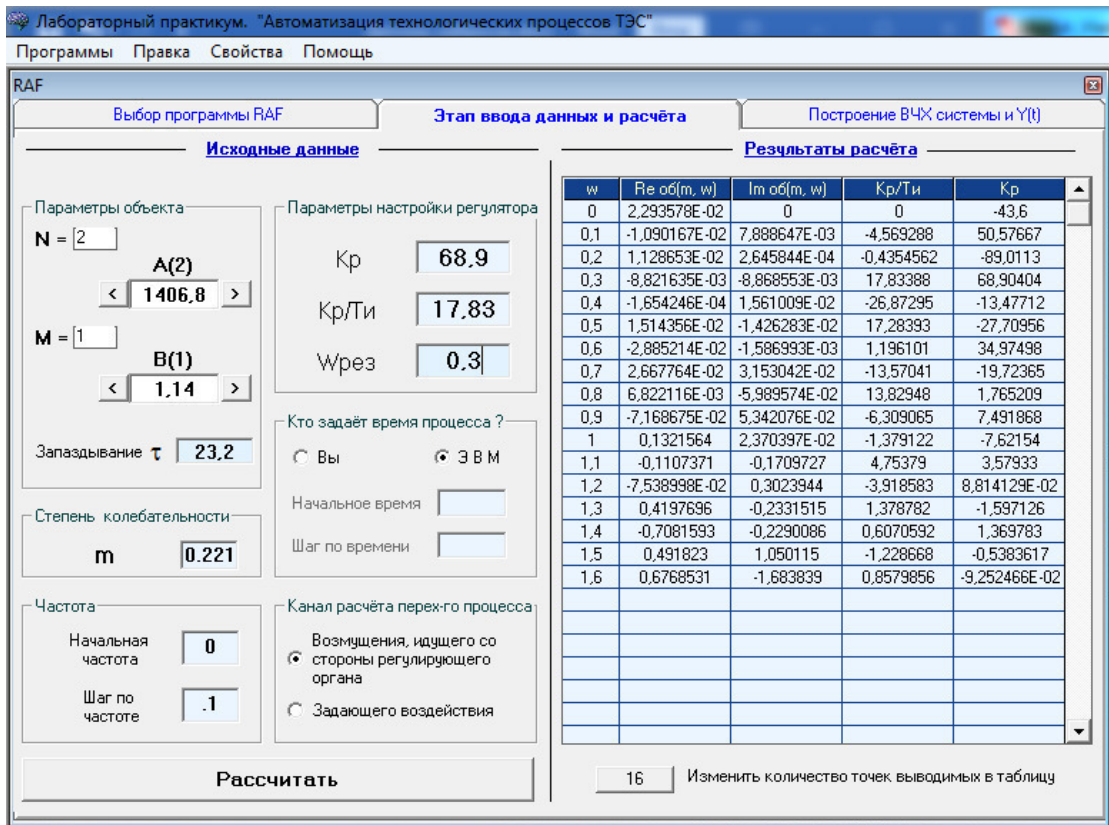


Рисунок 30 – Окно программы RAFC1S

С помощью RAFC1S был получен приходный процесс с возмущением, идущим со стороны регулирующего органа.

На рисунке 31 представлен переходный процесс системы с цифровым регулятором.

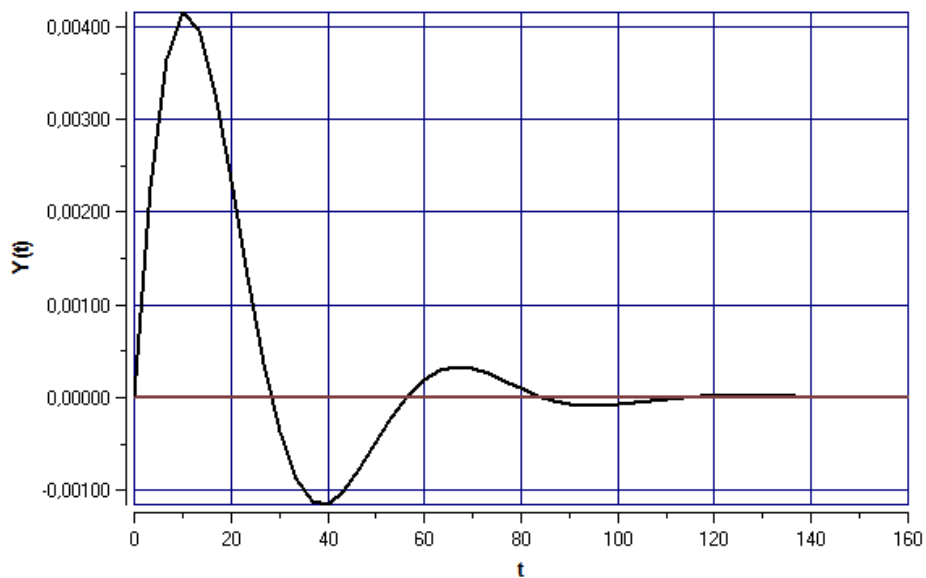


Рисунок 31 – Переходный процесс системы с цифровым регулятором

В таблице 19 представлены основные характеристики переходного процесса с цифровым регулятором.

Таблица 19 – Показатели качества переходного процесса

Максимальная динамическая ошибка	$A_1=0,0042$
Перерегулирование	$\sigma = 0,42 \%$
Степень затухания	$\psi = 0,9$
Время регулирования	$t_p = 117 \text{ с}$

С помощью РАФЧХ был рассчитан теоретический переходный процесс, а с помощью программы RAFC1S были определены ОПН, непосредственно, для переходного процесса приближенного к реальному. На основании рисунка 31 можно сказать, что система с цифровым регулятором имеет минимальное перерегулирование и сам процесс носит затухающий характер.

9 Разработка мнемосхемы для АСУ климатической камеры

Для разработки мнемосхемы выбрана программа Simple SCADA. Данное программное обеспечение предназначено для создания человеко-машинного интерфейса.

Программа дает возможность визуализировать технический процесс через рабочую оболочку Windows.

Внешний вид разработанной мнемосхемы представлен на рисунке 32.

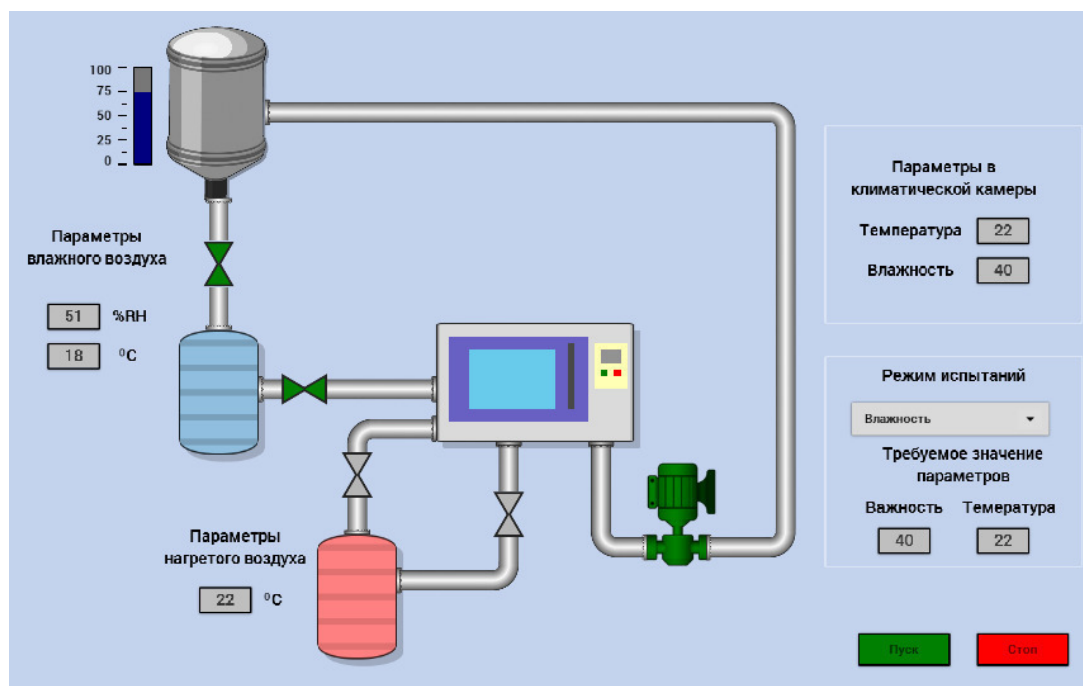


Рисунок 32 – Скриншот мнемосхемы

В поле «Режим испытаний» выбирается режим, в котором будет осуществляться работа климатической камеры. В зависимости от выбранного режима, происходит открытие задвижек и включение насоса соответствующего контура. При открытии задвижек, включении насоса выбранного контура, на мнемосхеме они начинают мигать зеленым цветом.

Так же оператор может задать необходимые значения влажности и температуры.

10 Определение зависимости износа изоляции от изменения условий эксплуатации с помощью климатической камеры

Климатические камеры позволяют воссоздавать различные диапазоны температур, которые возможны в условиях эксплуатации исследуемых объектов. Разработанная климатическая камера способна воссоздавать температуру в диапазоне 10 °С ... 120 °С и значения относительной влажности могут достигать 98 %. Климатические камеры с такими характеристиками позволяют проводить следующие тесты:

- характеристика термостойкости (воздействие высоких температур);
- характеристика холодостойкости (воздействие низких температур);
- характеристика влагостойкости (воздействие высокой влажности);
- сильный износ или старение.

В качестве основного применения разрабатываемой климатической камеры решено использовать тестирование различных образцов на предмет старения и сильного износа. Объектом исследования на термический износ будет являться изоляция кабеля. Однако изготавливаемые кабели обладают высокой стойкостью к повышенному значению относительной влажности. Поэтому исследование старения изоляции будет зависеть только от температуры окружающей среды.

Надежность и бесперебойная работа кабельных линий зависят от внешних условий и температурного режима работы линии. В особенности это выражается при эксплуатации кабелей в климатических условиях нашей страны. В данных условиях тепловые свойства изоляции существенно меняются в зависимости от времени года. В ходе работы происходит нагрев кабельной линии из-за потерь активной мощности в жиле и изолирующих элементах. При приближении температуры жилы к максимально допустимой

запускается процесс интенсивного теплового износа, что в последствии приводит к пробую изоляции.

Отказ кабеля – время от времени встречающееся явление, которое приводит к существенным материальным затратам. Помимо того, в эксплуатации находится достаточно большое количество кабелей, проработавших более 30 лет [49]. Это значительно повышает вероятность их отказа.

В различных источниках в качестве основных причин повреждаемости кабелей приводят: влияние на изоляцию кабеля высокого напряжения и окружающей среды, механические повреждения. Данные о количестве кабелей, которые выходят из строя из-за перегрева, практически отсутствуют. Но тем не менее температура является одним из основных факторов, который приводит к износу полимерной изоляции. Кабели способны подвергаться температурным перегрузкам при возникновении аварий в электрической цепи. При таких условиях происходит интенсивный тепловой износ изоляции кабелей и их постепенный выход из строя.

На стадии проектирования систем электроснабжения одним из критериев выбора сечения жил кабеля является условие нагрева допустимым длительным током. При этом в расчетных формулах при расчетах используют эмпирические коэффициенты, которые учитывают условия эксплуатации кабеля [50]. В реальных условиях на кабели влияют случайные сочетания внешних факторов, которые должны время от времени учитываться при оценке остаточного срока эксплуатации кабеля. Таким образом существует необходимость непрерывного диагностирования тепловых режимов силовых кабелей.

На сегодняшний день изготавливаются кабели со встроенными оптоволоконными продольными датчиками температуры [49]. Современные аппаратные и программные средства, например, как ПТС-1000 российской фирмы Седатэк, дают возможность измерить температуру в любом месте по всей длине кабеля. К недостаткам данных систем можно отнести возможность

контроля температуры только поверхностных слоев кабеля. Самая нагретая точка кабеля располагается на поверхности жилы, и именно в этой области наиболее интенсивно происходит тепловой износ изоляции кабеля.

Очевидно, что измерять температуру самой нагретой точки кабеля возможно только косвенным методом. Существует два способа косвенного измерения температуры на поверхности жилы кабеля [49]. Первый метод основывается на зависимости электрического сопротивления жилы от температуры. Данный метод предполагает значительные аппаратные затраты.

Второй метод основывается на использовании математических моделей. Данный метод требует соответствующей математической базы, но он более предпочтителен в плане аппаратных затрат.

10.1 Выбор объекта моделирования


В работе рассматривается два типа основной изоляции – ПВХ и СПЭ. На сегодняшний день данные типы изоляций являются самыми распространенными и надежными.

ПВХ изоляция – это один из наиболее популярных видов изоляционного покрытия, которое широко применяется для прокладки, в первую очередь, внутри помещений. ПВХ не предназначен для использования при низких температурах, поэтому на открытом пространстве обычно монтируется в трубах.

СПЭ изоляция схожа с ПВХ пластикатом. Изоляция из сшитого полиэтилена применяется только на одножильных и трехжильных кабелях. Преимущество СПЭ перед ПВХ: меньшая толщина диэлектрика при равном рабочем напряжении на линии. Данный тип изоляции способен сохранять свои механические и электрические свойства при приближении к температуре плавления.

В таблице 20 представлены основные характеристики выбранных для исследования кабелей.

Таблица 20 – Характеристики кабелей [51,52]

Характеристики	Тип кабеля	
	АПВП 1х120	ВвГ 1х70
Диаметр жилы	13,5 мм	10,2 мм
Материал жилы	алюминий	медь
Материал изоляции	СПЭ	ПВХ
Наружная толщина изоляции	3,4 мм	1,4 мм
Толщина экрана	0,6 мм	–
Материал наружной изоляции/толщина	полиэтилен	ПВХ пластикат
Толщина оболочки	2,5 мм	1,7 мм
Допустимая температура, °С	70/160	70/160
Допустимая влажность	98 %	98 %
Срок службы	30 лет	30 лет
Вид сечения		

10.2 Моделирование процесса нагрева кабеля

Моделирование процесса нагрева кабеля осуществляется с помощью программы MatLab. В таблице 21 представлены основные параметры, которые необходимы при выполнении моделирования.

Таблица 21 – физические свойства материалов и среды

Материал	Электропроводность	Теплопроводность	Теплоемкость	Плотность
Медь	$5 \cdot 10^7$ См/м	400 Вт/(м·К)	393 Дж/(кг·К)	8920 кг/м ³
СПЭ		0,235 Вт/(м·К)	2350 Дж/(кг·К)	930 кг/м ³
ПВХ		0,19 Вт/(м·К)	2140 Дж/(кг·К)	1500 кг/м ³
Воздух		2,59Вт/(м·К)	1005 Дж/(кг·К)	1,205 кг/м ³

Для решения поставленной задачи принимаются следующие условия:

- кабель имеет идеальную цилиндрическую конструкцию;
- плотность тока по сечению провода распределяется равномерно;
- значение параметров окружающей среды и кабеля не изменяются по его длине;
- распространение тепла происходит равномерно;
- на границе расчетной области применимо граничное условие третьего рода.

Так же для решения поставленной задачи необходимо учитывать зависимость коэффициента теплопроводности λ от температуры. Значение коэффициента определяется по следующей формуле [53]:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot t),$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности вещества; b – коэффициент пропорциональности.

Значение коэффициентов пропорциональности и теплопроводности определяются по справочным данным.

Количество теплоты, выделяющееся в жиле за единицу времени, определяется по формуле Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R,$$

где I – сила тока, R – сопротивление.

Объёмная плотность тепловыделения определяется следующим образом:

$$q = \frac{\delta^2}{\gamma_{Cu}},$$

где $\delta = \frac{I}{S}$ – плотность тока, S – площадь поперечного сечения проводника.

В сечении кабеля температурное поле определяется с помощью дифференциального уравнения Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \nabla^2 t + \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot q,$$

где t – температура, $\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot p}$ – коэффициент температуропроводности, τ – время, p – плотность вещества.

С учетом осевой симметрии уравнение Фурье в цилиндрической системе координат будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot p} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \left(r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right)}{\partial r} + \frac{1}{c \cdot p} \cdot \frac{\delta^2}{\gamma}. \quad (17)$$

В левой части уравнения 17 определяется скорость изменения температуры выбранного элементарного объема, которое находится на расстоянии r от оси кабеля.

В правой части уравнения 17 содержится два слагаемых. Первое слагаемое определяет способность материала проводить тепло с помощью температурного напора между соседними элементарными объемами на малых промежутках от оси кабеля. Второе слагаемое описывает выделение тепла в элементарном объеме, по которому протекает электрический ток.

Рассмотрим пример решения задачи для кабеля с ПВХ изоляцией. Первым действием выделяются 3 основные области относительно радиуса кабеля:

- токопроводящая жила ($0 < r < r_1$);
- изоляция из ПВХ ($r_1 < r < r_2$);
- внешняя изоляция кабеля ($r_2 < r < r_3$);
- грунт (песчано-гравийная смесь) ($r_3 < r < r_4$).

Нулевое значение r находится на оси кабеля, r_4 лежит на границе расчётной области.

В модели плотность тока выражается кусочно-заданной функцией $\delta = f(r)$:

$$\delta = \begin{cases} \delta_{\text{ж}} = \frac{I_{\text{ж}}}{S_{\text{ж}}}, & 0 < r \leq r_1, \\ \delta_{\text{и}} = 0, & r_1 < r \leq r_2, \\ \delta_{\text{и}} = 0, & r_3 < r. \end{cases} \quad (18)$$

Согласно с принятыми допущениями, на внешней границе расчетной области принимается температура окружающей среды. При расчетах это значение составило 20 °С. Согласно граничным условиям третьего рода, теплоотдача за единицу времени и на единицу длины будет определяться как:

$$Q_{\text{отд}} = \alpha \cdot 2\pi r(t - t_{\text{ср}}).$$

Решение выражения 17 в стационарном режиме, при неподвижном температурном поле для выделенных характерных областей с учетом уравнения 18, записывается как:

$$t(r) = \begin{cases} -\frac{\delta_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}} \cdot \lambda_{\text{ж}}} \cdot \frac{r^2}{4} + C_1 \cdot \ln(r) + C_2, & 0 \leq r \leq r_1, \\ C_3 \cdot \ln(r) + C_4 & r_1 \leq r \leq r_2, \\ C_5 \cdot \ln(r) + C_6, & r_2 \leq r \leq r_3, \\ C_7 \cdot \ln(r) + C_8, & r_3 \leq r \leq r_4, \end{cases} \quad (19)$$

где $C_1 - C_8$ – постоянные интегрирования определяющиеся на основании условий непрерывности теплового потока и граничных условий.

На внутренних границах (r_1 и r_2) используется граничное условие четвертого рода, на внешней границе (r_4) – граничное условие третьего рода. А на границе $r=0$ применяется частный случай второго граничного условия (значение теплового потока равняется 0).

Система уравнений 19 с учетом граничных условий определяется как:

$$t(r) = \begin{cases} t_{\text{ср}} + \frac{\frac{\delta_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}}} \cdot S_{\text{ж}}}{2\pi \cdot r \cdot \alpha}, & r = r_4, \\ t(r_5) + \frac{\frac{\delta_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}}} \cdot S_{\text{ж}}}{2\pi \cdot r \cdot \lambda_{\text{с}}} \cdot \ln\left(\frac{r_5}{r}\right), & r_3 \leq r \leq r_4, \\ t(r_4) + \frac{\frac{\delta_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}}} \cdot S_{\text{ж}}}{2\pi \cdot r \cdot \lambda_{\text{п}}} \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r}\right), & r_2 \leq r \leq r_3, \\ t(r_2) + \frac{\frac{\delta_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}}} \cdot S_{\text{ж}}}{2\pi \cdot r \cdot \lambda_{\text{п}}} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r}\right), & r_1 \leq r \leq r_2, \\ t(r_1) + \frac{\delta_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}} \cdot 4\lambda_{\text{ж}}} \cdot (r_1^2 - r^2), & 0 \leq r \leq r_1, \end{cases} \quad (20)$$

где λ_c – теплопроводность окружающей среды, $\lambda_{п}$ – теплопроводность ПВХ, $\lambda_{ж}$ – теплопроводность жилы.

В соответствии с системой уравнений 20 с помощью программы Matlab получен профиль температур в сечении кабеля и окружающей среды.

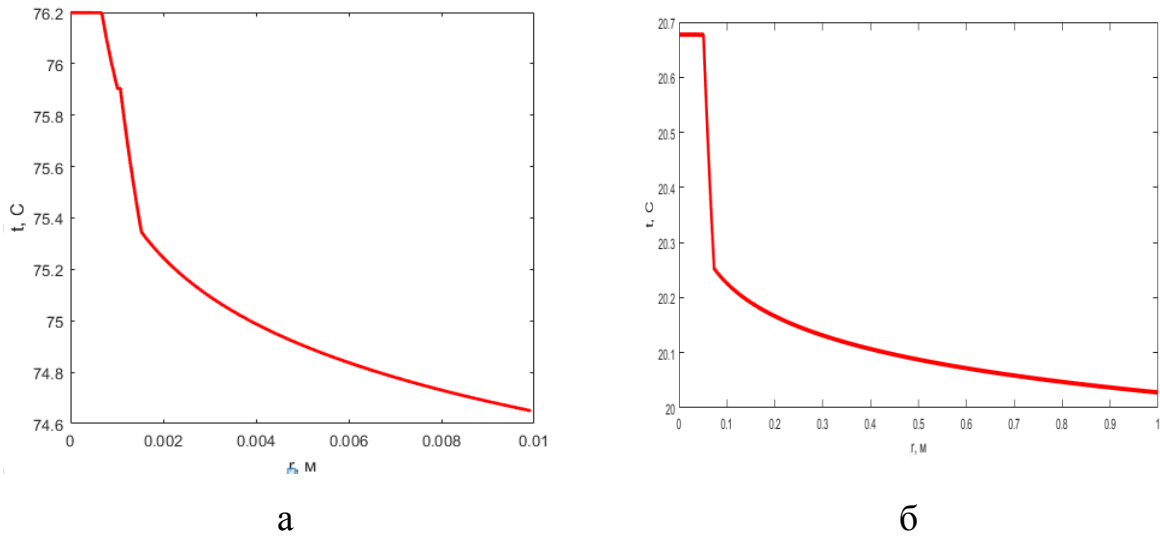


Рисунок 33 – Распределение температуры в сечении кабелей и окружающем пространстве:

а – кабель с СПЭ изоляцией, б – кабель с ПВХ изоляцией

В результате моделирования получена максимальная температура изоляции кабелей при варьировании относительной влажности и температуры окружающей среды. Данное значение необходимо для определения износа изоляции.

Моделирование проводилось при постоянном значении силы тока, протекающем в кабеле, изменялось значение температуры окружающей среды. С увеличением температуры на внешней границе соответственно происходило увеличение максимального значения изоляции. В среднем с увеличением температуры на 10°C температура ПВХ изоляции увеличивалась на $3,4^{\circ}\text{C}$, а температура СПЭ изоляции увеличивалась на $5,8^{\circ}\text{C}$ относительно температуры окружающей среды.

10.3 Оценка технического состояния кабеля на основании температуры изоляции

Модель старения, которая может быть использована в этих целях, должна зависеть от воздействий температуры и электрического поля, а также быть действительной для кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена и его рабочего диапазона температуры. В качестве основной модели для определения остаточного ресурса изоляции из сшитого полиэтилена решено использовать модель, предложенную в [54]:

$$\tau_p = A \cdot E^{-n} \cdot e^{\frac{W_a}{kT}}, \quad (21)$$

где τ_p – срок службы изоляции; A – постоянная, зависящая от структуры вещества; E – напряженность электрического поля; n – показатель степени, зависящий от особенности конструкции и вида изоляции, рода и величины воздействующего напряжения; W_a – энергия активации одной молекулы; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Выбранная модель рассчитывает степень старения разрядов [54,55] и температуре изоляции. Мощность в данной модели характеризует затраты энергии на разрушение диэлектрика, что в лучшей степени характеризует разрушающее воздействие частичных разрядов на изоляцию.

Для использования (21) с целью определения остаточного ресурса кабеля с СПЭ изоляцией необходимо определить неизвестные параметры.

Энергия активации термодеструкции для исследуемых образцов изоляции, согласно [56] может варьироваться от 84 до 104 КДж/Моль.

Для расчета срока службы примем худший возможный вариант, когда для разрушения молекул материала изоляции требуется наименьшая энергия активации, то есть примем для расчета энергию активации равную 84 КДж/Моль.

Однако, для использования этого параметра в расчетах, требуется преобразовать формулу модели старения, используя универсальную газовую постоянную (R), так как энергия активации задана для одного моля вещества:

$$\tau_p = A \cdot E^{-n} \cdot e^{\frac{W_a}{RT}}. \quad (22)$$

Показатель степени, зависящий от особенности конструкции изоляции кабеля определен согласно [54]. Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и поливинилхлорида примем $n=4$.

Постоянная, зависящая от структуры вещества требует дополнительных исследований, однако для расчета была принята:

$$A = 10^{22}$$

Значение напряженности электрического поля было определено с помощью программы Elcut. На рисунке 34 представлены напряженности электрических полей исследуемых кабелей. Для расчетов принималось максимальное значение напряженности.

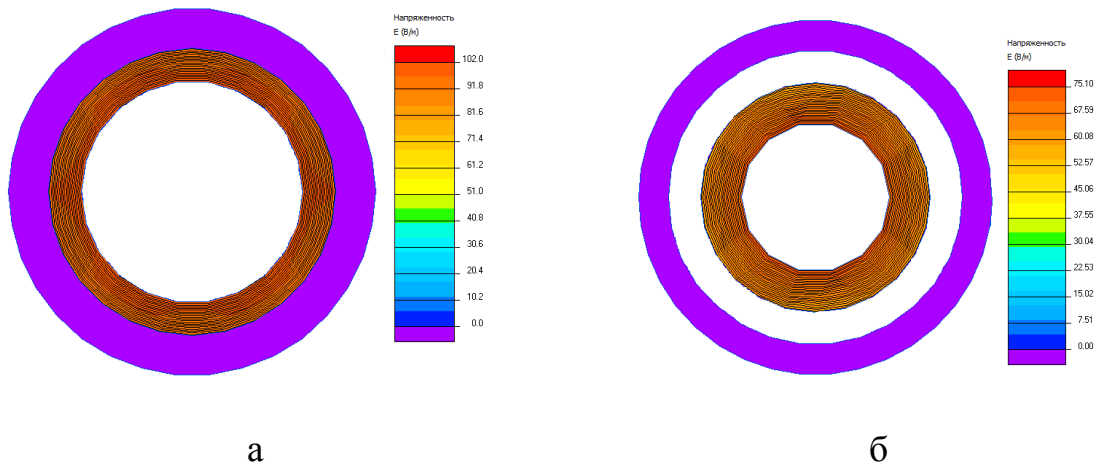


Рисунок 34 – Напряженность электрического кабеля: а – изоляция ПВХ, б – СПЭ изоляция

На основании полученных данных была определена зависимость срока службы ПВХ и СПЭ изоляции. На рисунках 35, 36 представлена зависимость срока службы изоляции от температуры ее эксплуатации при неизменной напряженности электрического поля.

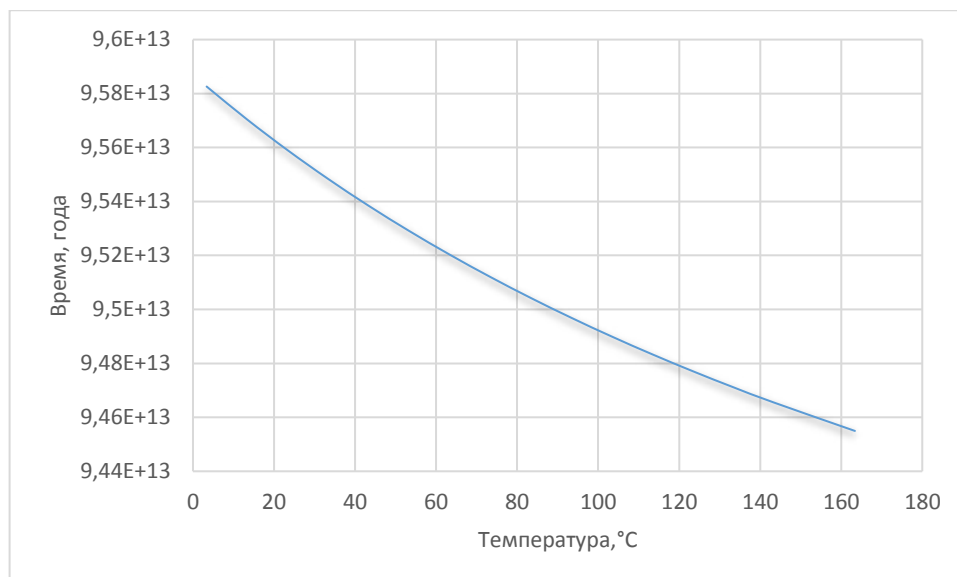


Рисунок 35 – Зависимость срока службы изоляции кабеля из поливинилхлорида от температуры эксплуатации

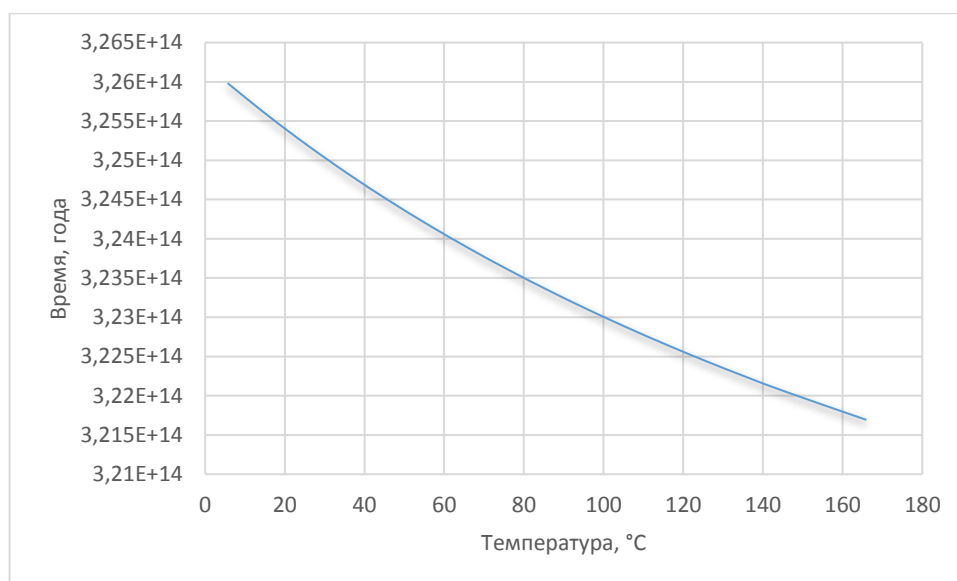


Рисунок 36 – Зависимость срока службы изоляции кабеля из сшитого полиэтилена от температуры эксплуатации

На основании полученных данным можно сказать, что срок службы изоляции из сшитого полиэтилена значительно выше, чем изоляции из поливинилхлорида.

При нормальных условиях эксплуатации срок службы изоляции достаточно большой и скорость разрушения материала, из которого изготовлена изоляция, достаточна мала. Но при достижении температуры

эксплуатации выше установленного значения, происходит резкое снижение срока службы изоляции. Для кабелей с СПЭ изоляцией это значение составляет 90 °С, а для ПВХ изоляции 70 °С.

Помимо температуры окружающей среды, в реальных условиях эксплуатации кабели подвергаются воздействию электромагнитного поля и других деструктивных факторов, который так же вносят свой вклад в своевременный износ изоляции, сокращая срок эксплуатации кабеля.

Заключение

Результатом выполнения выпускной квалификационной работы является разработанная АСУ влажностью и температурой в климатической камере.

При выполнении работы произведен литературный обзор по тематике работы, разработаны функциональная и принципиально электрическая схемы. Произведен выбор технических средств для схемы и на основании него разработана заказная спецификация.

Экспериментальным путем определены параметры объекта управления. При значении этих параметров определены оптимальные настройки регуляторов. С помощью программы ASU проведен анализ правильности определения ОПН регуляторов. Данный анализ показал, что параметры настройки регуляторов, полученные расчетным методом способны обеспечить заданную степень колебательности и минимальное время регулирования. Так же с помощью данной программы определены параметры настройки цифрового регулятора.

Для разработанной системы создана мнемосхема, позволяющая управлять технологическим процессом.

Используя условия, которые способна воссоздать разработанная климатическая камера, при помощи математического моделирования, определен остаточный ресурс кабелей с ПВХ и СПЭ изоляцией.

Список использованных источников

- 1 Завод патриот. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zavodpatriot.ru> свободный. – Загл. с экрана.
- 2 BINDER constant climate chambers: quality and precision. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.binder-world.com/en/products/constant-climate-chambers> свободный. – Загл. с экрана.
- 3 Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». Авиационные материалы и технологии. 2015 г. – 3-33 с.
- 4 Камеры соляного тумана. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eziactionpumps.ru/isyatatelnye-klimaticheskie-kamery/> свободный. – Загл. с экрана.
- 5 Устройство для климатических испытаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zavodpatriot.ru/articles/22-ustrojstvo-kamerdlya-klimaticheskikh-isyataniy/> свободный. – Загл. с экрана.
- 6 Разновидности климатических камер для испытаний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://osc-pribor.ru/29406/> свободный. – Загл. с экрана.
- 7 Влажность. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Влажность/> свободный. – Загл. с экрана.
- 8 ГОСТ 8.524-85 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Таблицы психометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения. М.: Издательство стандартов, 1985 г. – 37 с.
- 9 Arden L. Buck. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. American Meteorological Society 1981.– 23 p.

- 10 Goff, J. A., Gratch, S. Low-pressure properties of water from –160 to 212 °F, in Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, New York, 1946. – 27 p.
- 11 Vömel H. Saturation Vapor Pressure Formulations. University of Colorado, 2015. – 14 p.
- 12 Stull R. Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature. Canada, 2011. – 26 p.
- 13 Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.
- 14 Свистунов В. М., Пушняков Н. К. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – С.-Пет.: Политехника, 2006.– 432 с.
- 15 Аверкин А. Г. Примеры и задачи по курсу «кондиционирование воздуха и холодоснабжение». - М.: АСВ, 2003.– 126 с.
- 16 Изельт П., Арндт У., Вильке М.. Увлажнение воздуха. Системы и применение. - М.: Техносфера, Евроклимат, 2007.– 224 с.
- 17 Сотников А. Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции. -Л.: Машиностроение, 1984. – 235 с.
- 18 Кулаков Г.Т. Анализ и синтез САР: Спр. пособие - Мн.: Выш. шк., 2003. –207 с.
- 19 Андык В.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами на ТЭС. Томский политехнический университет. – Томск: 2016. – 408 с.
- 20 Овен ДТС. Термопреобразователи сопротивления. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.owen.ru/uploads/свободный>. – Загл. с экрана.
- 21 Датчики температуры ТСМУ-16-S, ТСМУ-10-S [электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.eltecom.ru/catalog/datchiki/datchiki-temperature-tsmu-16-s-tsmu-10-s/> свободный. – Загл. с экрана.

- 22 Анализатор уровня жидкости. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tinko.ru/catalog/product/216319/свободный>. – Загл. с экрана.
- 23 Каталог продукции Датчики Датчики уровня ПДУ поплавковые датчики уровня. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.owen.ru/product/datchiki_urovnya_poplavkovie_pdu/ свободный. – Загл. с экрана.
- 24 KFTF - S+S Regeltechnik. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://shop.mzta.ru/kftf> свободный. – Загл. с экрана.
- 25 Датчики влажности и температуры ДВТ-03.ТЭ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://relsib.com/product/datchik-vlazhnosti-i-temperature-dvt-03te> свободный. – Загл. с экрана.
- 26 ПВТ100 промышленный датчик (преобразователь) влажности и температуры воздуха. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.owen.ru/product/pvt100> свободный. – Загл. с экрана.
- 27 МС8 и МС12 - Контроллеры и субмодули к ним. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mzta.ru/produkcziya/vypuskaemaya-produktsiya/24-programmno-tekhnicheskij-kompleks-kontar/> свободный. – Загл. с экрана.
- 28 ПЛК63 контроллер. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.owen.ru/product/plk63> свободный. – Загл. с экрана.
- 29 ПЛК100 контроллер для малых систем автоматизации с DI/DO. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.owen.ru/product/plk100> свободный. – Загл. с экрана.
- 30 Электропривод запорной арматуры. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aircrafter.ru/> свободный. – Загл. с экрана.
- 31 Электроприводы редукторные типа AMV. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.danfoss.info/content/files/AMV.pdf> свободный. – Загл. с экрана.

- 32 Вибрационный погружной насос «Малыш». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.220-volt.ru/catalog-358730/> свободный. – Загл. с экрана.
- 33 Вибрационный насос ОЛЬСА Ручеёк-1М. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.220-volt.ru/catalog-248080/> свободный. – Загл. с экрана.
- 34 Каталог продукции. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://irca.ru/catalog.php> свободный. – Загл. с экрана.
- 35 Ультразвуковая мембрана. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://poleznayashtuka.ru/13-membrany-dlya-uvlazhnitelej/19-ultrazvukovaya-membrana-25-mm/> свободный. – Загл. с экрана.
- 36 Греющий кабель HEATUS PerfectJet .[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.220-volt.ru/catalog-529935/> свободный. – Загл. с экрана.
- 37 Реле давления Danfoss KPI35. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kpi35.ru> свободный. – Загл. с экрана.
- 38 Технические характеристики ноутбука HP 255 G6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://support.hp.com/ua-ru/document/c05493445> свободный. – Загл. с экрана.
- 39 Клюев А.С., Глазов Б.В. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
- 40 Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления.-М.: Энергия, 1996.- 311 с.
- 41 Широкий Д. К., Куриленко О. Л. Расчет параметров промышленных систем регулирования. Справочное пособие. Техника, 1972.- 232 с.
- 42 Åström K. J. Advanced PID control – USA: ISA - Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. – 460 p.

- 43 Tan, N. Computation of stabilizing PI and PID controllers using the stability boundary locus // Energy Conversion and Management. – 2006. –7 p.
- 44 Шубладзе А. М. Методика расчета оптимальных по степени устойчивости ПИД-законов управления II. Автоматика и телемеханика. – 1987 г. – 9 с.
- 45 Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002 г. – 382 с.
- 46 Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления. – Тамбов: изд-во ТГТУ, 2004 г. – 256 с.
- 47 Андык В.С. Теория автоматического управления. Учебное пособие к практическим занятиям: - Томск: Изд. ТПУ, 2000 г. –108 с.
- 48 Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. - М.: ГЭИ, 1961.-344 с.
- 49 Зализный Д. И. Широков О. Г. Ходанович Н. М. Шутов А. Ю. Математическое моделирование тепловых процессов в силовых кабелях с пластмассовой изоляцией. Вестник ГГТУ ИМ. П. О. Сухого № 3. –2009 г. – 11 с.
- 50 Шувалов М.Ю. исследование надежности силовых кабелей среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Кабели и провода №5 2007 г. – 9 с.
- 51 Кабель ВВГ 1x70 - 0.66/1 кВ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyie/s-pvx-izolyacziej-\(0,66;-1kv\)/vvg/kabel-vvg-1h70/](https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyie/s-pvx-izolyacziej-(0,66;-1kv)/vvg/kabel-vvg-1h70/) свободный. – Загл. с экрана.
- 52 Кабель АПвП 1x120/16. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyie/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-10kv/apvp-10kv/kabel-apvp-1x120-16.html> свободный. – Загл. с экрана.
- 53 Основы кабельной техники. Под ред. И.Б. Пешкова. М.: Издательский центр «Академия». 2006 г. – 432 с.

- 54 Кучинский, Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – «Энергия». Ленингр. Отд-ние. – 1979 г. – 224 с.
- 55 Вдовико, В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука. – 2007 г. – 155 с.
- 56 Тагер А.А. Физико-химия полимеров. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Научный мир. – 2007 г. – 573 с.
- 57 Сущность методики FAST. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://humeur.ru/page/sushhnost-metodiki-fast-v-oblasti-fsa> свободный. – Загл. с экрана.
- 58 ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001 г. – 8 с.
- 59 ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 18 с.
- 60 ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с
- 61 СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 21 с.
- 62 ГОСТ 12.1.046-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Строительство. Нормы освещения строительных площадок. – М.: Стандартинформ, 2015. – 23 с.
- 63 ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2015. – 27 с.
- 64 ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.

65 Чрезвычайная ситуация. [электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Чрезвычайная_ситуация / свободный. – Загл. с экрана.

66 СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 21 с.

67 СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*. – М.: Стандартинформ, 2017. – 121 с.

Приложение А

(обязательное)

Automated control system of humidity and temperature in the climate chamber

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ74	Тимошенко Евгения Леонидовна		

Консультант школы отделения (НОЦ) И.Н.Бутакова:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кац М.Д.	к.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Черемисина Харрер И.А.	к.ф.н., доцент		

Introduction

Industrial companies, as well as centers for the development and study of research activities, should conduct preliminary experiments in conditions close to the real ones. This demand is explained by the need to improve the quality characteristics of the products being prepared for release. Imitating any climatic conditions chambers have been created for these purposes.

Climatic chambers allow you to simulate the effects of the environment. It allows you to reproduce the necessary environmental conditions as accurately as possible. It can be temperature conditions, ultraviolet radiation, changing and maintaining the parameters of air humidity. Climatic chambers are widely used in many industries, engineering and other fields of human activity. The work of all research centers is built on the most accurate results, which makes the use of climate chambers very relevant [1].

A large number of firms are engaged in the production of climate chambers: Patriot plant, SM Climate, Equipment World in Russia, BINDER in the USA, Top Rank in China and many others.

Climatic chambers are used by various companies, for example Geolis, Climate LLC, Eltep Company, etc. This is just a small part of firms and factories that subject products to climatic testing.

In this paper, an automated humidity and temperature control system for the climate chamber was designed and the controller settings parameters were calculated. For the development, an analytical review of the object technology, automation structure, technical means of control and management was made.

The results of the work can be applied in scientific research and in academic work.

Information about climate chambers

The design of a typical climate chamber can be represented in four parts:

- working volume;
- automatic control panel;
- steam generator;
- freon dryer.

The working volume is a cabinet with a built-in heat exchanger. The cabinet is equipped with a special door with a viewing window. The main electrical equipment is located in the automatic control panel. The cooling unit provides cooling inside the working volume. Freon dryer is a device that maintains a certain level of humidity.

There is a wide range of climate chambers that can simulate various climatic conditions. For example, chambers are able to create the conditions of exposure to the sun, high vacuum, salt fog. However, the most common are chambers of heat, heat-cold, heat-cold-humidity, heat-humidity, pressure chamber and wide defrost.

Climatic salt fog chambers are designed to test the corrosion resistance of metals treated with various types of protective coatings. Inside the chamber, the conditions for intense corrosive attack with neutral salt fog are created [2].

A salt fog chamber is an economically viable solution, since it allows to carry out qualification tests without the regular involvement of outside organizations.

Depending on the type of device, size, quality of vacuum and additional equipment, deep vacuum chambers can be used in almost any enterprise or production. The most popular are chambers with a large size of the working space and, at the same time, using a low vacuum. Thus, they are used for drying all kinds of materials, to create outer space in rocket production, conducting plasma confinement experiments for particles under accelerated molecular charge conditions [3].

Heat-cold chambers are flexible. They can create a variety of conditions. Work with materials can be carried out at extremely low and at extremely high temperatures. There are various modifications of these chambers:

- heat-cold-humidity chambers;
- heat-humidity chambers;
- cold-humidity chambers.

Scope of application of heat-cold chambers becomes only wider every year. Now, such installations have found their application in most modern industries, which cannot operate without such equipment.

The main purpose of the heat-cold-humidity chambers is to control the temperature level. Most companies currently need installations of this type. The main reason for this need lies in modern quality standards, which are almost impossible to achieve without climate equipment.

Heat-cold-humidity in the climate chamber can act as the set parameters and have a large range. The equipment of heat-cold-humidity chambers is universal, that combine at once two types of chambers: cold-humidity and heat-humidity. It is also worth noting that this option is also of economic importance: such climate chambers are more budgetary, compared with the purchase of two different chambers [4].

Heat-humidity chambers are used for humidity resistance tests. It provides automatic receipt and maintenance of temperature and relative humidity for a given program.

Chambers differ in overall dimensions, accuracy of maintenance of the mode, range of characteristics. The heat-humidity chamber provides operation in the range of high humidity - from the natural 10 ... 98%, in the temperature range from 30 ... 100 ° C.

Humidity Information

Atmospheric air consists of the water part and the dry part (nitrogen, oxygen, inert gases). The dry part of the air is almost constant, and the amount of water vapor is not constant, it depends on local climatic conditions and the season.

In heat-humidity and heat-cold-humidity climate chambers the amount of water vapor that is contained in the air changes. The quantitative content of dry air remains constant. In all processes that are associated with the drying and humidification of air, when calculating the processes using such unit of measurement of humidity as humidity content. It shows the amount of water vapor in one kilogram of dry air.

Relative humidity is a physical quantity that indicates the degree of air saturation with water vapor [5]. It is calculated as the ratio of the humidity content in a given state to the humidity content at full saturation at the same pressure and temperature values.

When calculating the heat-humidity state of humid air, there is such a thing as enthalpy. It is the sum of the enthalpies of the dry part of the air and the enthalpy of water vapor.

The simplest and most convenient method for determining the change in the state of atmospheric air is the calculation according to the I-d diagram (psychometric diagram) [5]. The I-d diagram appearance is shown in Figure 1.

The coordinates of the diagram contain the dependences of the basic parameters of humid air: air temperature, humidity content, enthalpy and relative humidity [5].

The diagram is used both to determine the parameters of humid air, and to build changes in its state under various influences. Also the I-d diagram can display the dew point temperature and the temperature of the wet thermometer. These parameters are widely used in the calculations of air conditioning and ventilation.

The dew point temperature is the necessary temperature that must be reached in order for unsaturated air to become saturated, while maintaining a constant humidity content.

The temperature of wet steam is the temperature that humid air is ready to receive, when it reaches a state of saturation, this process occurs at a constant value of air enthalpy.

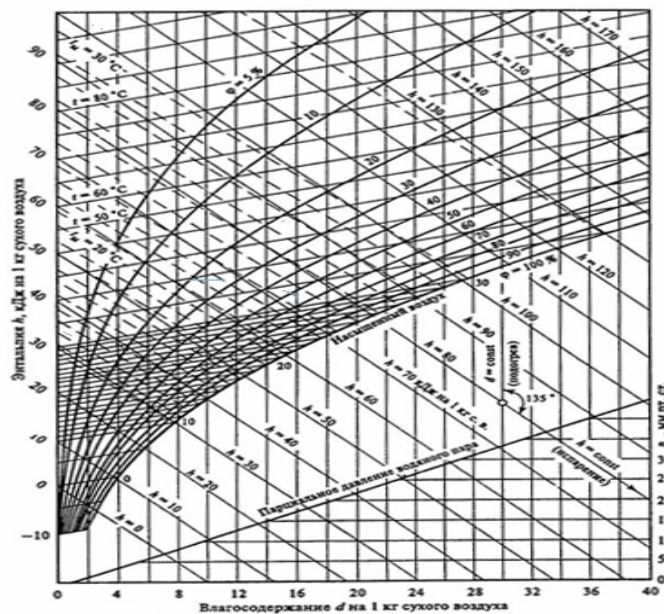


Figure 1 – The I-d diagram appearance

Temperature dependence of the relative humidity

Equivalent definition is the ratio of the mass fraction of water vapor in the air to the maximum possible at a given temperature. Measured as a percentage and is determined by the formula:

$$RH = \frac{p(H_2O)}{p^*(H_2O)} \cdot 100,$$

where RH is the relative humidity, $p(H_2O)$ is the partial pressure of water vapor in the mixture, $p^*(H_2O)$ is the equilibrium pressure of the saturated steam.

The partial pressure of water vapor is calculated using the following formula:

$$p = P_c(t') - A \cdot p \cdot (t - t') \cdot (1 + a' \cdot t'), \quad (23)$$

where $P_c(t')$ is the pressure of saturated water vapor above the flat surface of water having a temperature t' , hPa; A is the psychrometric coefficient for the vapor-gas mixture with a known standard of its dry part, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; p is the total pressure of the vapor-gas mixture, hPa; t is the temperature of the vapor-gas mixture, $^{\circ}\text{C}$; t' is the phase temperature, $^{\circ}\text{C}$; a' is the coefficient taking into account the temperature dependence of the specific heat of the phase transformation of the condensed phase of water into steam, $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

The nominal value of the psychrometric coefficient A are:

$A = 0.795 \cdot 10^{-6}$ – with the natural movement of air;

$A = 0.662 \cdot 10^{-6}$ – with forced blowing at a nominal speed of 2 m/s;

When calculating psychrometric tables take $a = 0.00115 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ based on the properties of distilled water and the composition of dry air.

The pressure of saturated water vapor increases strongly with increasing temperature. Therefore, during isobaric cooling of air with a constant concentration of steam, a moment (dew point) occurs when the steam is saturated. At the same time, the “extra” vapor is condensed in the form of fog, dew or ice crystals.

The relative humidity of an air / water mixture can be assessed if its temperature (T) and dew point temperature (T_d) are known, using the following formula:

$$RH = \frac{P_s(T_d)}{P_s(T)} \cdot 100, \quad (24)$$

where $P_s(T)$ is the saturated vapor pressure for the corresponding temperature, which can be calculated using the Arden Buck equation [6]:

Arden Buck Method:

$$P_s(T) = 6.1121 \cdot \exp\left(\frac{(18.678 - T/234.5) \cdot T}{257.14 + T}\right), \quad (25)$$

where T is the temperature in degrees Celsius, P_s is the pressure in hPa.

For negative temperatures in the absence of a liquid phase, a different Buck formula is used:

$$P_s(T) = 6.1121 \cdot \exp\left(\frac{(23.036 - T/333.7) \cdot T}{279.82 + T}\right).$$

For more accurate calculations, you should use the Hoff-Gratch models or more modern ones: A. Wechsler, ITS-90 [12], D. Zontag [7].

Goffre-Gratch model

This method is designed to estimate the water vapor pressure saturation at a specific temperature. The original experimental correlation of Goff-Gratch (1946) is as follows:

$$\log e^* = -7.90298 \cdot \left(\frac{T_{st}}{T} - 1\right) + 5.02808 \cdot \log\left(\frac{T_{st}}{T}\right) - 1.3816 \cdot 10^{-7} \cdot \left(10^{11.344 \cdot \left(1 - \frac{T_{st}}{T}\right)} - 1\right) + 8.1328 \cdot 10^{-3} \cdot \left(10^{-3.49149 \cdot \left(\frac{T_{st}}{T} - 1\right)} - 1\right) + \log e_{st}^*$$

where, e^* is the saturated pressure of water vapor (hPa); T is the absolute air temperature in kelvins; T_{st} is the boiling point at 1 atm and a temperature of 37315 K; e_{st}^* is the saturated at the boiling point.

It is possible to use the missing formula for calculating the pressure of saturated water vapor:

$$P = P_0 \cdot \exp\left(\frac{a \cdot t}{\beta + t}\right)$$

where $P_0 = 6.1121$ hPa, $a = 17.5043$ ° C, $\beta = 241.2$ ° C, t is the temperature of the flat surface of the water, ° C.

The expanded formula contains a large number of elements; therefore, it is more expedient to use a simplified formula.

Relative humidity can also be calculated approximately by the following formula:

$$RH \approx 100 - 5 \cdot (T - 25 \cdot T_d),$$

where T is the absolute temperature, T_d is the dew point temperature.

Also, relative humidity can be estimated by the psychrometric table. Figure 1 shows a fragment of the psychrometric table. The row heading is the temperature of the dry thermometer, the column headings are the difference of the readings of the dry and wet thermometers.

This method is suitable for calculating relative humidity with a temperature range of 0 – 90 ° C.

Dry-bulb temperature, ° C	Psychrometric difference, ° C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	100	90	81	72	64	56	48	40	32	25	18
21	100	91	82	73	65	57	49	42	34	27	20
22	100	91	83	74	66	58	50	43	36	29	23
23	100	91	83	75	67	59	52	45	38	31	25

Figure 1 – The psychrometric table fragment

Mathematical formulation of the problem

To solve this problem, in addition to the partial pressure and air saturation pressure, it is necessary to determine the temperature of the wet thermometer. The value of this physical quantity is determined by the following expression:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{BЛ}} = t_c \cdot \operatorname{atan} \left(0.151977 \cdot (RH\% + 8.313659)^{\frac{1}{2}} \right) + \operatorname{atan}(t_c + RH\%) \\
 - \operatorname{atan}(RH\% - 1.676331) + 0.00391838 \cdot RH\%^{\frac{3}{2}} \\
 \cdot \operatorname{atan}(0.023101 \cdot RH\%) - 4.686035,
 \end{aligned} \tag{26}$$

where t_c is the temperature of the dry thermometer.

In this paper, the calculation of the dependence of temperature on relative humidity will be carried out using expressions [1–4]. Numerical values were obtained in the program MathCad.

Figures 2 and 3 show the change in relative humidity with variation of the temperature difference between dry and wet thermometers.

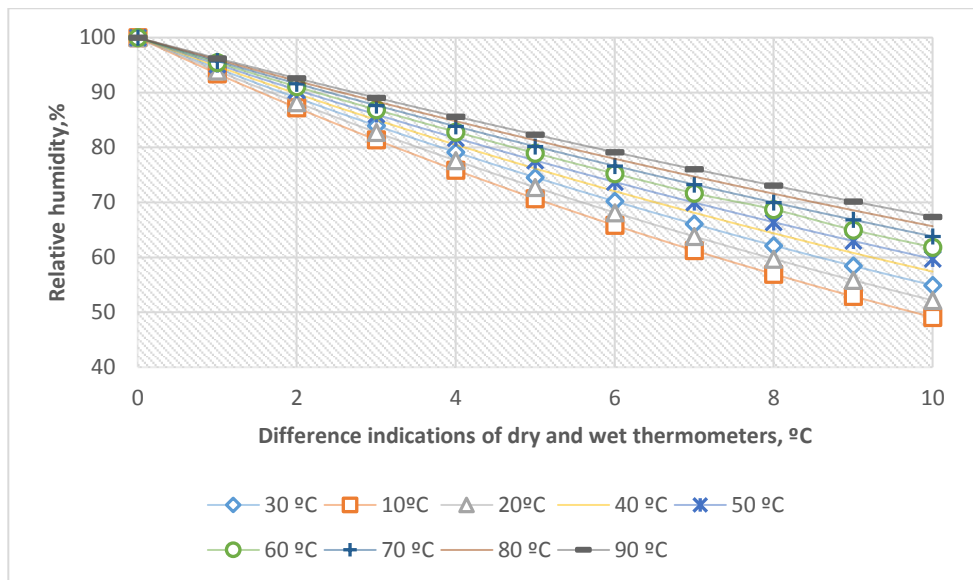


Figure 2 – Dependence of humidity changes on the difference between dry and wet thermometers

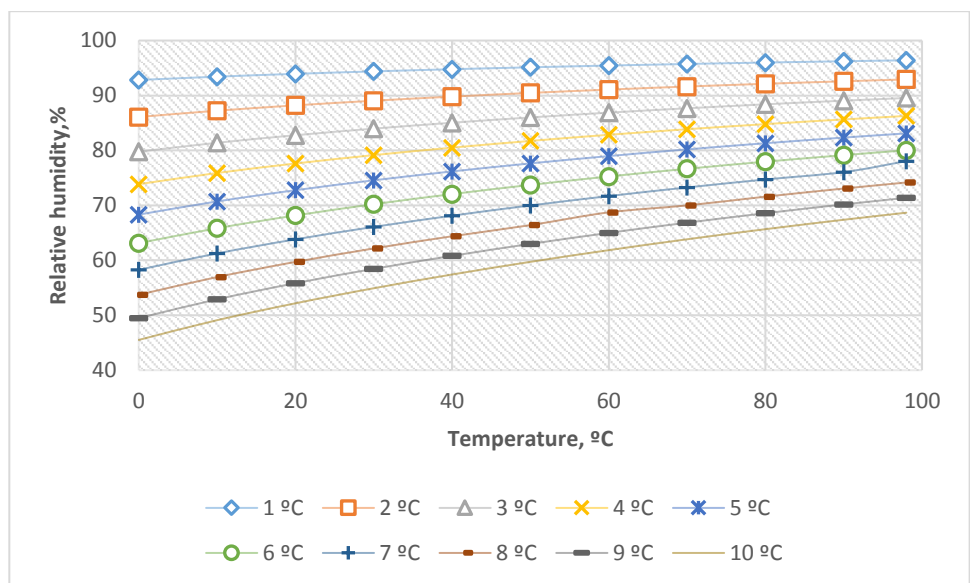


Figure 3 – Dependence of temperature change on changes in relative humidity

Climate chamber design

The climate chamber is based on a frame that provides rigidity to the structure. To reduce heat exchange with the environment, all the walls of the chamber are reinforced with a layer of thermal insulation. The inner walls of the chamber are made of mirror stainless steel. The camera is equipped with a door with a viewing window. The tightness of the chamber is achieved through the use of a door seal and the presence of a clip on the handle. The viewing window is made of tempered glass.

The front panel of the chamber is equipped with a monitor. The display shows the main technological parameters: temperature, humidity and the duration of the experiment.

Figure 4 shows the climate chamber appearance, and Table 1 shows its main technical characteristics.

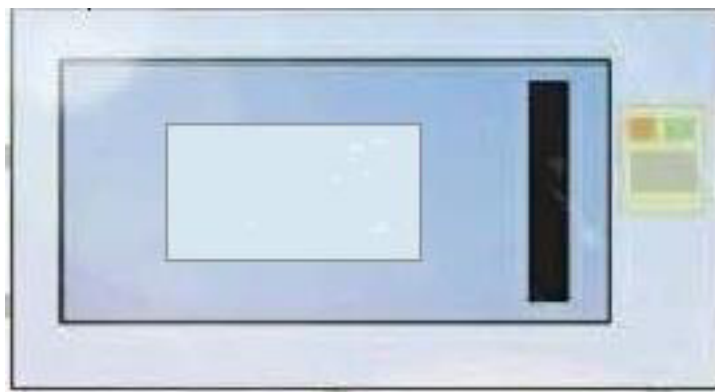


Figure 4 – The climate chamber appearance

Table 1 – Chamber specifications

Parameter	Value
Chamber volume	100 l
Range of humidity values	10 – 98 % RH
Irregularity in maintaining humidity	<5 % RH
Humidity maintenance accuracy	±3 % RH
Temperature range	-30 – 120 °C
Temperature range to maintain humidity	30 – 80 °C
Accuracy of temperature maintenance	± 1 °C
Irregularity of temperature maintenance	< 4 °C

References

- 1 Климатическая камера. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Климатическая_камера/ свободный. – Загл. с экрана.
- 2 Камеры соляного тумана. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eziactionpumps.ru/ispitatelnye-klimaticheskie-kamery/> свободный. – Загл. с экрана.
- 3 Разновидности климатических камер для испытаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://osc-pribor.ru/29406/> свободный. – Загл. с экрана.
- 4 Устройство для климатических испытаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zavodpatriot.ru/articles/22-ustrojstvo-kamer-dlya-klimaticheskikh-ispytanij/> свободный. – Загл. с экрана.
- 5 Влажность. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Влажность/> свободный. – Загл. с экрана.
- 6 Hardy В. Its-90 formulations for vapor pressure, frostpoint temperature, dewpoint temperature, and enhancement factors in the range –100 to +100 C. The Proceedings of the Third International Symposium on Humidity & Moisture. Thunder Scientific Corporation. –2009. – Vol. 5
- 7 Buck A. L. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. American Meteorological Society. –2008. – Vol. 6
- 8 Свистунов В. М., Пушняков Н. К. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.- С.-Пет.: Политехника, 2006.–432 с.

Приложение Б

Значение параметров стабилизирующего регулятора

Таблица 1 – Значение параметром стабилизирующего регулятора

$\omega, \text{с}^{-1}$	K_P	$\frac{K_p}{T_u}$
0.058	47.5	2.93197
0.059	49.015	2.95439
0.06	50.51	2.97317
0.061	51.982	2,9832
0.062	53.432	2.99937
0.063	54.858	3.00657
0.064	56.259	3.0097
0.065	57.635	3.00868
0.066	58.985	3.0034
0.067	60.308	2.99377
0.068	61.603	2.97971
0.069	62.869	2.96113
0.07	64.107	2.93795

Приложение В

Значение параметров корректирующего регулятора

Таблица 1 – Параметры корректирующего регулятора

$\omega, \text{с}^{-1}$	K_P	$\frac{K_P}{T_u}$
0.02	-2.752	0.00212
0.03	-2.151	0.01324
0.04	-1.627	0.03005
0.06	-0.748	0.06678
0.07	-0.383	0.08124
0.08	-0.071	0.09042
0.085	0.062	0.09261
0.09	0.181	0.09307
0.095	0.284	0.09173
0.1	0.37	0.08859
0.105	0.441	0.08367
0.11	0.495	0.07703
0.115	0.533	0.06878
0.12	0.555	0.05905

Приложение Г

Заказная спецификация

Таблица 1 – Заказная спецификация приборов и средств автоматизации

Поз.	Наименование, техническая характеристика приборов и средств автоматизации	Тип и марка прибора	Кол
1	2	3	4
TE1...TE4	Термопреобразователь сопротивления, погружаемый, НСХ 50М, монтажная длина 500 мм, диапазон измеряемых температур - 50... +150 °С, выходной сигнал 4...20 мА. ЭТК-Прибор, г. Москва.	ТСМУ-16-S	4
LE1,LE2	Анализатор уровня жидкости Диапазон рабочих температур -30..50 °С. Выходной сигнал НО/НЗ Степень защиты IP68. Магнито-Контакт, г. Москва	АУЖ-2 «Венеция»	2
ME1	Датчик влажности. Диапазон измерения: 0...98%. Выходной сигнал 4...20 мА. Допускаемая погрешность ±2%. ООО «Рэлсиб» г. Новосибирск	ДВТ-0.3ТЭ.КЛ	1
PDS1	Реле перепада давления Диапазоны давления: -0,2...28 бар. Класс защиты IP44 Danfoss, Дания	КРІ 35	1
M1...M4	Электропривод AMV 23 Потребляемая мощность, 7 ВА. Питание 220 В, управляющий сигнал постоянный ток 24 В. IP54 Danfoss, Дания	AMV 23	4
M5	Насос погружной, максимальная производительность 23 л/ч, диаметр 50 мм, питание 24 В. ООО «Ольса», г. Новосибирск.	Ручеек-1М	1
	Программируемый логический контроллер МС12.3. Аналоговые входы: 8. Дискретные входы: 4. Аналоговые выходы: 4. Дискретные выходы: 8. Напряжение питания 24 В. Контарь, г. Москва	МЗТА МС12.3	1
	Модуль дискретного ввода вывода. Дискретные входы: 16. Дискретные выходы: 4 Напряжение питания 220В. Контарь, г. Москва	ME16.1	1

Продолжение таблицы 1

Поз.	Наименование, техническая характеристика приборов и средств автоматизации	Тип и марка прибора	Кол		
1	2	3	4		
	Ноутбук HP 255 G6 15.6" Ноутбук HP 255 G6 черный. Количество ядер процессора 2. Частота оперативной памяти 1866 МГц. Объем жесткого диска 500 ГБ. Страна производитель Китай	HP 255 G6 15.6 255 G6	1		
	Воздушный ТЭН для круглых каналов мощность 2 кВт, напряжение питающей сети 220 В. Игса г. Москва.		1		
	Ультразвуковая мембрана, напряжение питания 24 В, рабочая среда-вода. Страна производитель Корея.	M25C001	1		
	Греющий кабель, максимальная температура 85 °С, мощность 13 Вт/м, длина 2 м. Young Chang Silicone, Южная Корея	HEATUS PerfectJet	1		
		ФЮРА.421000.009 СО1			
Исполн	Тимошенко	Спецификация приборов и средств автоматизации	Стад	Лист	Листов
Провер	Кац		ТРП	1	1
			ТПУ ИШЭ Группа 5БМ74		