

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Риза Төлеби Ғалимжанұлы и Муқажан Мирас Амангельдыұлы

Автоматизация технологического процесса вакуумной сублимационной сушки

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
к дипломному проекту

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой АиУ  
канд. техн. наук

*Н.С. Сарсенбаев*  
«12» 06 2025 г.



**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
к дипломному проекту

На тему: «Автоматизация технологического процесса вакуумной сублимационной сушки»

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Выполнили

Риза Т. Ф. и Мукажан М.А.

Рецензент

доктор PhD, доцент

*Е.Ж. Оракбаев* Оракбаев Е.Ж.

(подпись)

«11» 06 2025 г.

Научный руководитель

канд техн.наук, ассоц.проф.

*Ж.Ж. Омирбекова* Омирбекова Ж.Ж.

(подпись)

«12» 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий  
Кафедра Автоматизации и управления

6B07103 – Автоматизация и роботизация



**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение дипломного проекта**

Обучающимся Риза Т. Ф. и Мукажан М.А.

Тема: «Автоматизация технологического процесса вакуумной сублимационной сушки».

Утвержден приказом Р. Ускенбаевой № 26-П/Ө от «29» января 2025 г.

Срок сдачи законченной работы: «30» мая 2025 г.

Исходные данные к проекту: входные и выходные данные системы вакуумного насоса.

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) описание технологического процесса вакуумной сублимационной сушки;
- б) разработка автоматического регулирования процесса;
- в) применение синтеза типового регулятора для САР.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

функциональная схема автоматизации САР вакуумной сублимационной сушки;  
функциональная и структурная схема автоматизации для описания технологического  
процесса.

Рекомендуемая основная литература:

1. Иванов П. С., Петров А. Н. Вакуумная сублимационная сушка: теоретические основы и практика. — СПб.: Питер, 2016. — 320 с.;
2. Лебедев Д. И. Программируемые логические контроллеры и SCADA-системы: учебное пособие. — СПб.: Питер, 2017. — 336 с.;
3. Орлов В. П. Программирование и настройка ПЛК ОВЕН. — СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 240 с.

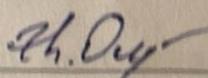
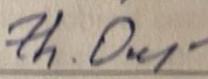
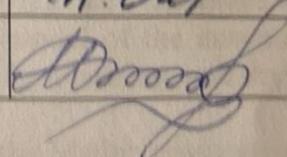
## ГРАФИК

подготовки дипломного проекта

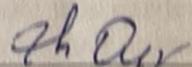
Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Технологический процесс сублимации продуктов	20.02.2025 г.	
Технологический раздел Разработка функциональной и структурой схемы вакуумной сублимационной системы	11.03.2025 г.	
Расчетный раздел Анализ и синтез систем автоматического регулирования вакуумной сублимационной сушки	27.03.2025 г.	
Расчетный раздел Разработка логической программы для управления системы	15.05.2025 г.	

### Подписи

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

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	Ж. Ж. Омирбекова доктор PhD	25.05.25	
Расчетный раздел	Ж. Ж. Омирбекова доктор PhD	27.05.25	
Нормоконтролер	Қ. А. Манатов магистр техн. наук	02.06.25	

Научный руководитель

  
подпись

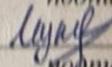
Омирбекова Ж. Ж.

Задание принял к исполнению обучающийся

  
подпись

Риза Т. Ф.

Задание принял к исполнению обучающийся

  
подпись

Мукажан М.А

Дата

«1» 02 2025 г.

## АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе рассматривается разработка технологии глубокой переработки и оборудования вакуумной сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока BR21881957. В качестве объекта управления рассмотрен вакуумный сублимационный аппарат для обезвоживания продуктов с сохранением их структуры и свойств. Разработана функциональная и структурная схемы и математическая модель системы автоматического управления вакуумной сублимационной сушкой, объединяющей холодильную, вакуумную, нагревательную и осушающую подсистемы.

Был проведен анализ полученной математической модели в среде Matlab. Исследованы устойчивость и прямые оценки качества системы. Для повышения показателей качества процесса был разработан регулятор и проанализировано его воздействие на работу системы. Для контура управления вакуумной сублимационной сушкой был разработан алгоритм управления в среде Owen logic и для мониторинга процесса использовалось программное обеспечение Simple SCADA.

## ABSTRACT

This thesis addresses the development of deep processing technology and equipment for vacuum sublimation drying of mare's and camel's milk BR21881957. The control object considered is a vacuum sublimation apparatus for dehydrating products while preserving their structure and properties. Functional and structural diagrams, as well as a mathematical model of the automatic control system for vacuum sublimation drying, integrating refrigeration, vacuum, heating, and drying subsystems, have been developed.

An analysis of the obtained mathematical model was carried out in the Matlab environment. Stability and direct quality assessments of the system were investigated. To improve the quality indicators of the process, a controller was developed, and its impact on the system's operation was analyzed. For the control loop of the vacuum sublimation drying system, a control algorithm was developed in the Owen Logic environment, and Simple SCADA software was used for process monitoring.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технологическая часть	8
1.1 Описание технологического процесса	8
1.2 Анализ технологического процесса с точки зрения автоматизации	9
1.3 Обзор вакуумной сублимационной установки	10
1.4 Контролируемые и регулируемые параметры технологического Процесса	12
1.5 Принцип автоматизации технологического процесса	13
2 Автоматизированная система управления процессом	15
2.1 Выбор аппаратной базы системы автоматизации	15
2.2 Функциональная схема автоматизации технологического процесса	21
2.3 Структурная схема автоматизации технологического процесса	22
3 Разработка алгоритмов автоматического регулирования процесса	23
3.1 Реализация логического управления вакуумной сублимационной сушки в среде Owen logic	23
3.2 Разработка SCADA системы	28
4 Расчетная часть	41
4.1 Математическая модель САР вакуумной сублимационной сушки	41
4.2 Разработка математической модели процесса вакуумной сублимационной сушки	42
4.3 Синтез регулятора	53
Заключение	57
Список литературы	58
Приложение А	59
Приложение Б	60

## ВВЕДЕНИЕ

В современном промышленном производстве, характеризующегося высокими требованиями к качеству продукции, энергоэффективности и безопасности, автоматизация технологических процессов выходит на передний план. Внедрение автоматизированных систем управления позволяет оптимизировать производственные циклы, минимизировать влияние человеческого фактора, снизить эксплуатационные расходы и обеспечить высокое качество конечного продукта.

Актуальность исследования. Одним из перспективных и активно развивающихся направлений в различных отраслях, таких как пищевая, фармацевтическая, а также биотехнологическая, является технология глубокой переработки и оборудования вакуумной сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока BR21881957. Этот метод основан на уникальном физическом явлении – сублимации, при котором влага удаляется из замороженного продукта путем ее перехода из твердого состояния в газообразное в условиях глубокого вакуума, минуя жидкую фазу. Такой подход помогает максимально сохранить первоначальные свойства продукта, его структуры, питательной ценности и значительно увеличивает срок его хранения.

Несмотря на преимущества данной системы, процесс вакуумной сублимационной сушки является сложным и многостадийным, требующим точного и непрерывного контроля множества параметров, включая температуру, давление и время выдержки на каждом этапе. Отклонения от заданных технологических режимов приводят к существенному ухудшению качества продукта. Ручное управление таким процессам малоэффективно, а также сопровождается высоким риском ошибок и невозможностью обеспечить стабильную воспроизводимость результатов. В связи с этим автоматизация позволит оптимизировать параметры сушки, сократить ее продолжительность, снизить потери полезных веществ и повысить качество конечного продукта.

Цель работы. Разработка автоматизированной системы управления процессом вакуумной сублимационной сушки, обеспечивающей эффективное удаление влаги при сохранении биологически активных компонентов и высоких потребительских свойств продукта.

Задачи. Контроль и регулирование температуры внутри камеры сушки, поддержание необходимого уровня вакуума в сушильной камере, управление вакуумным насосом и компрессором, повышение эффективности сушки, а также архивирование и анализ технологических данных.

## **1 Технологическая часть**

### **1.1 Описание технологического процесса**

Подготовленный продукт равномерно распределяется на специальных лотках, которые затем помещаются на полки (радиаторные пластины) внутри сушильной камеры. После загрузки продукта сушильная камера герметично закрывается, обеспечивая изоляцию внутреннего объема от окружающей среды. Это необходимо для создания и поддержания глубокого вакуума [1].

Следующий этап сушки включает в себя глубокое замораживание. Цель данного этапа — полное превращение всей содержащейся в продукте влаги в лед. Температура замораживания зависит от типа продукта и должна быть ниже эвтектической или стеклования точки. Затем включается вакуумный насос, который начинает откачивать воздух из сушильной камеры. Давление внутри камеры постепенно снижается до глубокого вакуума. Создание такого низкого давления является важным условием для сублимации воды при отрицательных температурах.

На этапе первичной сушки, при сохранении глубокого вакуума, начинается контролируемый и медленный нагрев продукта. Тепло передается к продукту через нагреваемые полки (радиаторные пластины). Лед в продукте поглощает тепло и переходит непосредственно в пар. Образовавшийся водяной пар активно удаляется из камеры. Чтобы процесс сублимации был эффективным и пар не сконденсировался обратно на продукте, он направляется в специальный конденсатор льда. Конденсатор льда, или холодная ловушка, представляет собой сильно охлаждаемую поверхность, расположенную между сушильной камерой и вакуумным насосом. Водяной пар, сублимированный из продукта, попадает в этот конденсатор, где мгновенно охлаждается и замерзает, оседая на его холодных поверхностях в виде льда. Это предотвращает попадание пара в вакуумный насос, защищая его и поддерживая требуемый уровень вакуума в сушильной камере. Охлаждение конденсатора обеспечивается мощной холодильной установкой, включающей компрессоры, масляные теплообменники и циркуляционный насос, который обеспечивает непрерывную подачу охлажденного теплоносителя по контуру [2].

После удаления большей части льда, что составляет этап первичной сушки, в продукте может оставаться небольшое количество связанной (адсорбированной) влаги. Для ее удаления температура продукта постепенно повышается до более высоких, а давление вакуума снижается. Этот этап позволяет достичь минимального остаточного содержания влаги в продукте, что критически важно для его долгосрочного хранения и стабильности.

По завершении всех этапов сушки, когда продукт достигает требуемой влажности, вакуумный насос отключается. Через клапаны в камеру медленно подается сухой воздух до тех пор, пока давление внутри камеры не выровняется с атмосферным. Это предотвращает деформацию камеры и обеспечивает безопасное открытие дверцы.

## 1.2 Анализ технологического процесса с точки зрения автоматизации

Тщательное изучение технологического процесса вакуумной сублимационной сушки дает возможность выделить ряд особенностей, которые обосновывают его высокую актуальность и необходимость полной автоматизации.

Процесс вакуумной сублимационной сушки состоит из нескольких дискретных, но взаимосвязанных этапов: загрузка, герметизация, замораживание, вакуумирование, первичная сушка (сублимация), вторичная сушка (десорбция), выравнивание давления и выгрузка. Каждый этап требует соблюдения специфических условий и точной последовательности перехода к следующей стадии. Ручное управление такими сложными переходами приводит к увеличению времени цикла, ошибкам оператора и потенциальным отклонениям от оптимального режима. Автоматизация обеспечивает строгое соблюдение технологического регламента и точное выполнение последовательности операций [3].

Основными параметрами процесса являются температура и давление, которые взаимосвязаны и требуют высокоточного контроля и регулирования.

На этапе замораживания важны скорость и глубина охлаждения для предотвращения образования крупных кристаллов льда, что влияет на конечную структуру продукта.

На этапе первичной сушки необходимо поддерживать оптимальное соотношение температуры продукта и давления вакуума. Слишком высокая температура при данном давлении может привести к "таянию" продукта, а слишком низкая – к замедлению или полной остановке процесса. Точное поддержание вакуума и температуры способствует эффективной сублимации.

На этапе вторичной сушки требуется постепенное повышение температуры для десорбции связанной влаги без термического повреждения продукта. Автоматическая система способна непрерывно отслеживать эти параметры, оперативно реагировать на их изменения и поддерживать их в заданных узких диапазонах.

Цикл вакуумной сублимационной сушки может длиться от нескольких часов до нескольких суток, в зависимости от типа продукта, его толщины и требуемой остаточной влажности. Длительное ручное управление таким процессом является трудоемким и монотонным. Автоматизированная система работает непрерывно, без снижения точности и производительности [4].

То есть несоблюдение технологических режимов даже на короткие промежутки времени может привести к снижению качества конечного продукта и увеличению брака. Автоматизация гарантирует воспроизводимость оптимальных условий, что напрямую влияет на стабильно высокое качество и максимальный выход продукта.

### 1.3 Обзор вакуумной сублимационной установки

Установка ZLGJ-300reeze Dryer представляет собой вакуумную сублимационную сушильную машину. Данная система объединяет в себе несколько функциональных блоков: холодильную установку, вакуумную систему, систему нагрева теплоносителя и систему осушения (рисунок 1.1).

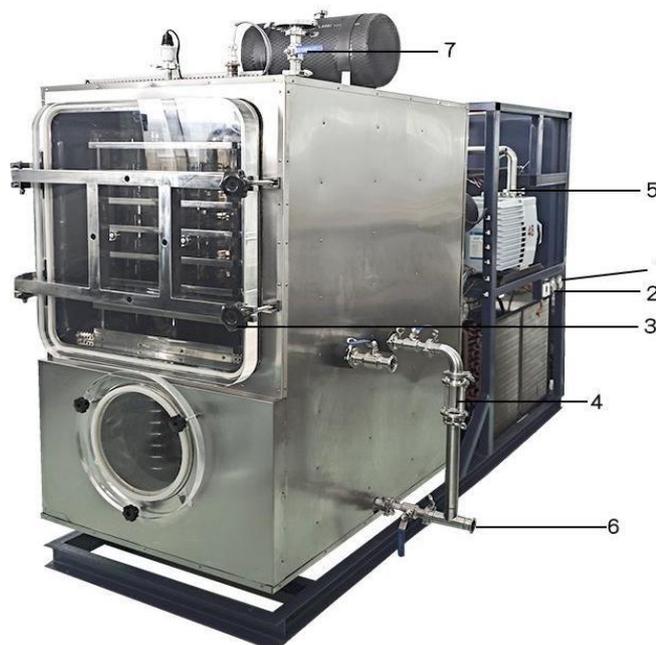


Рисунок 1.1 – Основная структура установки

1 - Измеритель высокого напряжения первого уровня; 2 - Измеритель высокого напряжения второго уровня; 3 - Дверь сушильной камеры; 4 - Зеркало контроля слива; 5 - Интерфейс вакуумной откачки; 6 - Сливной клапан; 7 - Клапан накачки.

В структуре установке измеритель высокого напряжения первого уровня используется для обеспечения безопасности электрических компонентов системы на первом уровне напряжения. Измеритель высокого напряжения второго уровня контролирует параметры высокого напряжения на втором уровне, обеспечивая стабильную работу оборудования. Дверь сушильной камеры нужен для герметичности и доступа к внутреннему пространству сушильной камеры, где происходит процесс сублимационной сушки. Зеркало контроля слива позволяет визуально контролировать процесс удаления конденсата или влаги из системы [5]. Интерфейс вакуумной откачки служит для подключения и управления вакуумным насосом, создавая уровень вакуума внутри камеры. Сливной клапан регулирует отвод жидкостей и конденсата из сушильной камеры. Клапан накачки контролирует подачу воздуха в систему, необходимую для поддержания давления в камере сушки.

Вакуумный насос необходим для создания и поддержания вакуума внутри сушильной камеры, что позволяет воде в замороженном продукте переходить непосредственно из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Вакуумный насос

1 - Вход вакуумного насоса; 2 - Выход вакуумного насоса; 3 - Газовый балластный клапан; 4 - Отверстие для заливки масла; 5 - Контрольная линза уровня масла; 6 - Отверстие для слива масла.

Вход вакуумного насоса служит для подачи воздуха из сушильной камеры в насос, где создается вакуум. Выход вакуумного насоса — это канал, через который откачанный воздух выводится из насоса наружу. Газовый балластный клапан регулирует подачу небольшого количества газа в насос для предотвращения конденсации паров внутри и защиты его от повреждений. Отверстие для заливки масла предназначено для добавления смазочного масла, которое обеспечивает работу механических частей насоса [6]. Контрольная линза уровня масла позволяет следить за уровнем масла, что важно для поддержания оптимальных рабочих условий и предотвращения поломок. Отверстие для слива масла используется для удаления отработанного масла при техническом обслуживании и замене масла в насосе.

Несмотря на преимущества данной установки, она предназначена для сублимации только твердых продуктов, такие как фрукты и овощи. В процессе исследования данный аспект являлся главной проблемой установки.

Вакуумная сублимационная сушильная установка ZLGJ-300reeze не позволяет получить качественный конечный продукт жидкости, такого как молоко.

## 1.4 Контролируемые и регулируемые параметры технологического процесса

Для управления технологическим процессом система оперирует набором входных и выходных сигналов. В качестве входных сигналов система использует данные о температуре внутри и снаружи камеры и давление в камере сушки.

Входные сигналы:

- температура внутри и снаружи камеры;
- давление в вакуумной системе;
- температура теплоносителя.

На основе этих данных система формирует выходные сигналы. К ним относятся управление вакуумным насосом и управление компрессором.

В системе автоматизации вакуумной сублимационной сушки есть две группы параметров контролируемые и регулируемые, они образуют взаимосвязанные контуры управления. К числу контролируемых относятся температуры в нескольких характерных точках установки: внутри рабочей камеры, в теплоносителе, в массе продукта и на поверхности конденсатора паров. С ними измеряются давления в камере. Эти величины позволяют определить о фазе процесса: заморозка, первичная или вторичная сушка. Дополнительным диагностическим признаком служит ток, потребляемый компрессором: его медленное возрастание указывает на постепенное зарастание льдом теплообменника, а резкий - на попадание пара или воздуха в контур. Регулируемые параметры формируются контроллером по результатам анализа перечисленных измерений [7]. Поддержание требуемого вакуума достигается совместным изменением вакуумного насоса и степени открытия клапана, соединяющего камеру с насосом, при этом программный регулятор ориентируется на заданное абсолютное давление и исправляет уставку в зависимости от разности давлений между камерой и конденсатором, чтобы избежать прилипания льда к поверхности продукта. Тепловой баланс камерных полок удерживается каскадной схемой: внешний регулятор опирается на температуру продукта, вычисляет желаемую температуру теплоносителя, а внутренний управляет силой тока, подаваемого на нагревательный элемент, через твердотельное реле. Температура конденсатора, важна для захвата пара, который стабилизируется изменением компрессора, что поддерживает давление кипения хладагента на минимально допустимом уровне и препятствует переходу водяного пара в газ без конденсации.

Контроллер снимает температуру испарителя конденсатора, а также температуру в рабочей камере, что позволяет определить фазу сублимации и коэффициент теплопередачи, одновременно регистрируется абсолютное давление в камере сушки.

На таблице 1.1 собраны точки, с которыми взаимодействует система управления установкой. Первый блок контроль, относится к параметрам, которые снимаются датчиками: контроллер отслеживает температуру в камере сушки и измеряет давления вакуума. Второй блок управление, перечисляет исполнительные объекты, на которые подаются управляющие сигналы. Электромагнитный клапан открывается в любом процентном положении между 0 и 100, тогда как вентилятор, вакуумный насос и два компрессора переключаются между режимами включено или выключено. Третий блок сигнализация – задаёт пороги, при достижении которых система формирует аварийное оповещение: перегрев фиксируется при превышении 60°C в камере, недостаточное разрежение отмечается, когда давление падает ниже минус 0,9 бар, критическое превышение температуры регистрируется свыше 110°C, а скачок напряжения определяется при уровне выше 220 В.

Таблица 1.1 – Точки контроля системы

Тип точки	Наименование параметра	Диапазон значений
Контроль	Температура в камере сушки	от -50 до +150°C
	Давление вакуума	от -0.9 до 0 бар
Управление	Положение открытия электромагнитного клапана	от 0% до 100%
	Вентилятор	вкл/выкл
	Вакуумный насос	вкл/выкл
	Компрессоры	вкл/выкл
Сигнализация	Перегрев камеры	больше 60°C
	Низкое давление вакуума	меньше -0.9 бар
	Критическое превышение температуры	больше 110°C
	Скачок напряжения	больше 220В

Система охватывает 2 точки контроля по параметрам температура и давления в камере сушки, 4 точки управления компонентами установки для достижения требуемых условий и 4 точки сигнализации, включающие для в себя перегрев, низкое давление и скачок напряжения, которые приводят к аварийной остановке системы.

### 1.5 Принцип автоматизации технологического процесса

Цель автоматизации процесса вакуумной сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока — это обеспечить стабильное поддержание технологических параметров с минимальными отклонениями от заданных режимов, что позволит качество и однородность получаемого продукта при снижении энергозатрат.

На основе технического задания необходимо разработать алгоритм логического управления для контура управления процессом вакуумной сублимационной сушки, реализуемый в среде программирования Owen logic и Owen configurator. Данный алгоритм должен обеспечивать автоматическое функционирование установки с учетом каждого технологического узла. В частности, система управления должна контролировать и регулировать работу вакуумного насоса, который отвечает за создание и поддержание необходимого уровня разрежения в камере сушки. Работа двух компрессоров холодильной системы осуществляется поочередно. Алгоритм автоматически переключает компрессоры, контролируя их режимы работы и состояние, что поддерживает температуру теплообменников.

Два теплообменника управляются с помощью электромагнитных клапанов и регулируются через систему автоматического управления для оптимизации теплообмена между хладагентом и рабочей средой. Система следит за температурой и давлением на входе и выходе теплообменника, корректируя их работу.

Циркуляционный насос обеспечивает постоянную циркуляцию теплоносителя по системе для равномерного прогрева полок. Управляющая логика следит за его работой, включая насос при необходимости и контролируя наличие аварийных режимов.

Нагревательный элемент формирует основной источник тепла для полок камеры. Его работа регулируется с помощью ШИМ-сигналов, формируемых контроллером, что позволяет плавно изменять мощность нагрева и поддерживать точный температурный режим. Алгоритм управления делает так чтобы распределение тепла по секциям была ровной, предотвращая перегрев и тепловые напряжения.

Каскадная система охлаждения и нагрева в установке вакуумной сублимационной сушки состоит из двух компрессоров и двух теплообменников. Они последовательно обеспечивают охлаждение и конденсацию паров в процессе сублимации, а также участвуют в регулировании температурного режима камеры. Принцип каскадной системы заключается в разделении процесса охлаждения на два этапа, первый компрессор и теплообменник образуют низкотемпературный контур, а второй высокотемпературный. Первый контур делает основное охлаждение до требуемых низких температур, необходимых для конденсации и вакуума в камере сушки. Второй контур служит для отвода тепла от первого контура и работает при более высоких температурах и давлениях. Его компрессор сжимает хладагент, который затем через первый теплообменник отдает тепло во внешний теплоноситель. Второй теплообменник, связанный с первым компрессором, выступает в роли испарителя для второго контура.

## 2 Автоматизированная система управления процессом

### 2.1 Выбор аппаратной базы системы автоматизации

В качестве первичного элемента контроля температуры выбрано платиновое сопротивление измеритель РТ–100, поскольку его диапазон от минус 200 до плюс 400°С полностью перекрывает как фазу глубокой заморозки, так и стадию изотермического прогрева полок. Датчик температуры измеряет электрическое сопротивление с использованием чувствительного элемента из платины (рисунок 2.1).

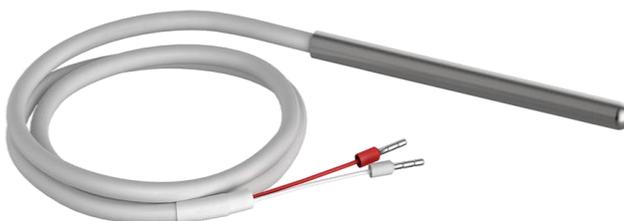


Рисунок 2.1 – Датчик температуры РТ–100

Контроль давления реализован вакуумным датчиком ZJ-52T, который дает возможность отслеживать разрежение в ходе сублимации (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Датчик вакуума ZJ-52T

Датчик вакуума для измерения давления в вакуумных системах, который преобразует вакуум в электрический сигнал для контроля и регулирования технологических процессов. Линейная характеристика тока 4–20мА отображает логарифм абсолютного давления, что повышает разрешение в области глубокого вакуума, критичной для завершения фазового перехода льда в пар.

Датчик температуры типа РТ–100 с тонкопленочным чувствительным элементом, заключенным в гильзу из нержавеющей стали AISI 316 диаметром 3 мм. Корпус рассчитан на вакуум до минус 10 Па и выдерживает стерилизацию

паром при 140°C. Датчик относится к классу А по IEC 6075. Тепловая инерция низкая: время отклика менее 2 с в потоках воздуха, что позволяет корректно моделировать градиент температуры полок в камере сушке. Трехпроводная схема уменьшает влияние сопротивления жил кабеля, допускается длина линии до 150 м без необходимости дополнительного усилителя. Исполнение IP67 и байонетный разъем M12–А упрощает сервисную замену датчика во влажной зоне без разборки гермоввода.

Металлокерамический нагреватель датчика вакуума ZJ-52T термостабилизированный до 50°C, поэтому изменение температуры окружающей среды не искажает показаний при размораживании конденсатора. Корпус из AISI 304 с фланцем KF16 рассчитан на избыточное давление до 1,3 бар благодаря встроенной мембране сброса, степень защиты IP65 исключает проникновение конденсата [8]. Двухпроводное подключение упрощает прокладку кабеля в кабель-каналах с силовыми жилами, а гальваническая развязка больше 500 В защищает модуль ПЛК от статического электричества при разрядах внутри камеры. В таблице 2.1 представлен диапазон, точность и соединение используемых датчиков.

Таблица 2.1 – Используемые датчики

Название	Диапазон	Точность	Соединение
Датчик температуры PT-100	От -200°C до 400°C	Класс А: Точность $\pm 0.15^\circ\text{C}$ до 150°C. Класс Б: Точность $\pm 0.3^\circ\text{C}$ до 200°C.	Трехпроводная: 4–20мА
Датчик вакуума ZJ-52T	От $1 \cdot 10^{-1}$ до $1 \cdot 10^5$ Па	Менее $\pm 25\%$	Двухпроводная: 4–20мА

Датчики подобраны в соответствии требованиям установки лиофильной установки ZLGJ-300 температурное окно -50 +150°C перекрывает как фазу предварительного замораживания, так и высокотемпературный изотермический прогрев полок, а давление от глубокого вакуума 10 Па до избыточных 10 бар соответствует циклам сублимации и регенерации конденсатора ZIGJ-300reeze Dryer на Платиновый PT–100 в гильзе AISI 316 обеспечивает метрологическую стабильность во всём диапазоне и выдерживает многократные термоудары, встроенный преобразователь формирует ток 4–20 мА с поддержкой HART, что даёт помехоустойчивость линий и дистанционную диагностику.

Комбинированный вакуумный датчик ZJ-52T линейно масштабирует логарифм абсолютного давления в тот же унифицированный токовый сигнал, поэтому исключается насыщение измерительного канала и сохраняется разрешающая способность при достижении технологического порога 15 Па. Корпус обоих датчиков рассчитан на эксплуатацию до 70°C и обладает степенью

защиты не ниже IP65, что гарантирует надежную работу при вибрациях вакуумного насоса и возможных конденсатах на фронтальной панели камеры.

На рисунке 2.3 представлена схема подключения датчиков температуры к модулю аналогового ввода MB210–101.

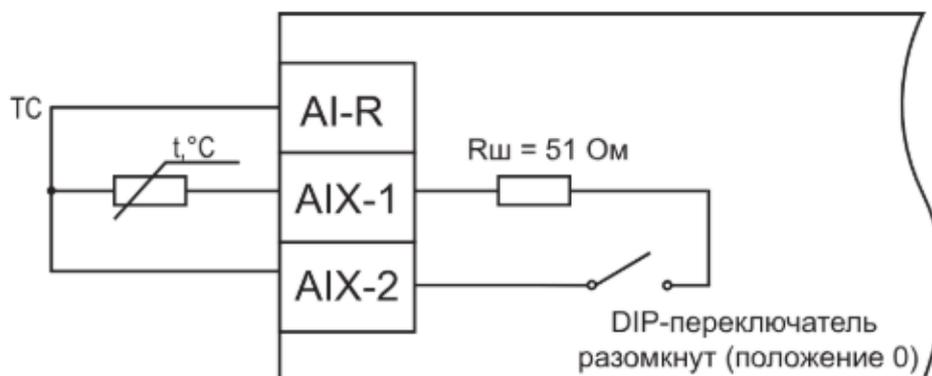


Рисунок 2.3 – Схема подключения датчика температуры

Трехпроводный термопреобразователь сопротивления подключается к универсальному входу модуля Овен MB210–101. Две жилы датчика выводятся на клеммы AIX-1 и AI-R, третья - на AIX-2, такая симметрия провода позволяет модулю автоматически компенсировать собственные сопротивления линий, что устраняет систематическую погрешность при длине кабеля до 15 м. Внутри модуля предусмотрен шунтирующий резистор который включается в цепь переключкой DIP-переключателя, переключка изображена разомкнутой, то есть находится в положении 0, поэтому измерительная цепь работает в режиме прямого считывания сопротивления датчика без преобразования тока 4-20 мА. Общая точка AI-R соединена со всеми каналами входов, поэтому при разводке желательна звёздная земля во избежание паразитных токов, особенно когда рядом используются токовые преобразователи, сам модуль гальванически не развязывает входы между собой, зато обеспечивает 16-битный АЦП и внутренняя линейная калибровка позволяет измерять сопротивления РТ–100 с шагом 0,01°C во всём диапазоне от минус 50 до плюс 150°C для вакуумной сублимационной камеры.

Овен ПР–205 опрашивает MB210–101 по Modbus TCP с периодом 200 мс, конвертирует считанное сопротивление в температуру по кривой IEC 60751 и использует полученное значение для ПИД-регулятора, управляющего нагревом полок. Благодаря отсутствию включенного шунта падение напряжения на входе не превышает 10 мВ, что оставляет запас до ±1 В допустимого диапазона и исключает насыщение АЦП при случайном коротком замыкании на корпус [9]. На таблице 2.2 представлен ПР–205 программируемое реле с графическим дисплеем.

Таблица 2.2 – Выбор программно–логического контроллера

Параметр	ПР–205
Рабочая температура °С	от -20 до +55 °С
Коммуникационные возможности	Ethernet, RS-485
Дискретный ввод и вывод	6 вводов и 8 выводов
Аналоговый ввод и вывод	4 ввода и 3 вывода
Время выполнения операции	1 мкс

Программируемое реле Овен ПР–205 оснащено графическим дисплеем и Ethernet-портом, что обеспечивает широкие возможности для управления системами автоматизации. Прибор поддерживает конфигурацию аналоговых и дискретных входов и выходов, позволяя контролировать технологические процессы (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Программируемое реле Овен ПР–205

Цветной графический экран предоставляет удобный и наглядный интерфейс для пользователей, упрощая процесс настройки и восприятия данных. Ethernet-интерфейс позволяет интегрировать устройство в распределенные системы автоматизации, расширять число входов и выходов с помощью модулей MB210–101, а также осуществлять удалённый мониторинг и управление оборудованием.

В реле предусмотрены версии с двумя интерфейсами RS–485, которые используются для передачи данных на верхний уровень и управления дополнительными элементами системы. Программирование и построение

алгоритмов работы ПР–205 осуществляется с помощью ПО Owen Logic, что дает возможность создавать индивидуальные алгоритмы, учитывающие все особенности автоматизируемого процесса. Оно построено на базе 32-битного микроконтроллера с тактовой частотой 120 МГц, что позволяет выполнить программы объемом до 64 кБ пользовательского кода и обслуживать до 2000 логических элементов без задержек цикла. В конфигурации прибор содержит восьмиканальный универсальный блок ввода и вывода, шесть дискретных входов, и два релейных выхода. При подаче питающего напряжения 24 В внутренний конвертер формирует гальванически развязанное напряжение 5 В для внешних датчиков, что уменьшает количество дополнительных блоков питания в шкафу. На таблице 2.3 представлен MB210–101 модуль аналогового ввода с универсальными входами.

Таблица 2.3 – Выбор модуля расширения для контроллера

Параметр	MB210–101
Рабочая температура °С	от -40 до +55 °С
Степень защиты корпуса	IP20
Поддерживаемые протоколы	Modbus TCP, MQTT
Аналоговых входов	8 входов
Типы поддерживаемых сигналов	унифицированные сигналы: 0-5мА, 0(4)-20мА, ±50 мВ, ±1 В

Модули аналогового ввода предназначены для приема аналоговых сигналов, преобразования их в значения физических параметров и передачи этих данных через сеть Ethernet.

Настройка модулей выполняется с помощью программы Owen Configurator, которая поддерживает работу с несколькими модулями одновременно и обеспечивает быстрый доступ ко всем настройкам. Подключение модулей возможно через интерфейсы Ethernet или USB.

Модуль аналогового ввода ОВЕН MB210–101 обеспечивает приём и преобразование температурных, вакуумных и прочих аналоговых сигналов, которые поступают от первичных преобразователей на восемь универсальных каналов. Каждый канал способен работать с термопарами, платиновыми, никелевыми и медными термопреобразователями, активными датчиками напряжения, а также с резистивными цепями до 5 кОм, что упрощает компоновку смешанных измерений на одной плате [10].

В основе устройства 16-разрядный АЦП, время опроса одного входа составляет 0,9 с для термопреобразователей сопротивления и 0,6 с для термопар либо унифицированных сигналов. Встроенный токоизмерительный резистор

включается DIP-переключателем на боковой панели, позволяя без внешних элементов принимать двухпроводные токовые петли, для компенсации длин соединительных проводов предусмотрена трехпроводная схема RTD и программная коррекция сдвиг-наклон шкал.

Сдвоенный Ethernet-порт поддерживает сетевые стеки Modbus TCP, MQTT и SNMP, есть возможность последовательно связать несколько модулей без дополнительного коммутатора. Встроенная флэш-память ведёт зашифрованный архив до 1000 файлов, а часы реального времени с батареей CR2032 обеспечивают временные метки с погрешностью не более трех секунд в сутки при 25°C. При питании 24 В модуль потребляет не более 4 Вт и сохраняет работоспособность в диапазоне напряжений 10–48 В, защита от переполнения совки присутствует (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Модули аналогового ввода Овен MB210–101

Конструкция рассчитана на эксплуатацию от -40 до +55 °С при влажности до 95% без конденсации, гальваническая изоляция внутренних узлов соответствует ГОСТ ИЕС 61131–2, а корпус IP20 монтируется на DIN-рейку с обязательным зазором 50 мм сверху и снизу для вентиляции. Средний срок службы составляет 12 лет. Для конфигурирования используется ПО Owen Configurator по USB или Ethernet, через то же активируется передача данных в OwenCloud и задаются параметры цифровых фильтров, период опроса, шкалы и сетевые настройки DHCP либо статических адресов. В связке с ПЛК Овен ПР–205 модуль выдает значения в форматах float int16 прямо в регистры Modbus, что позволяет контроллеру вести ПИД–регулирование нагрева полок камеры и регистрировать вакуум едином цикле программы без промежуточных преобразователей.

## 2.2 Функциональная схема автоматизации технологического процесса

Функциональная схема представлена в Приложение А представляет собой функциональное описание процесса вакуумной сублимационной сушки, в котором взаимодействуют несколько компонентов, обеспечивающих эффективное удаление влаги из продукта путем ее замораживания и последующего испарения в условиях глубокого вакуума.

Процесс начинается с размещения продукта во внутренней камере сублимационной установки. Внутри камеры создаются условия низких температур и давления, что позволяет влаге в продукте сначала замерзнуть, а затем перейти из твёрдого состояния сразу в парообразное, минуя жидкую фазу. За создание необходимого разрежения отвечает вакуумная система, включающая вакуумный насос. Насос управляется программируемым логическим контроллером и работает в зависимости от текущих параметров процесса, полученных от датчиков.

Температурный режим внутри камеры контролируется с помощью датчиков температуры РТ-100. Эти датчики передают аналоговые сигналы в контроллер, который анализирует данные и управляет нагревателями, обеспечивая соблюдение температурного профиля каждого этапа сушки. Одновременно с этим датчик вакуума ZJ-52T следит за уровнем давления в системе. Если разрежение выходит за заданные пределы, система автоматически корректирует работу насоса или подает сигнал на аварийное отключение.

Для управления используются электромагнитные клапаны, управляемые с помощью ПЛК. Клапаны обеспечивают выпуск воздуха после завершения цикла сушки. Их работа синхронизируется с этапами процесса в соответствии с алгоритмом, заложенным в программе контроллера.

Программируемый логический контроллер Овен ПР-205 является управляющим элементом системы. Он принимает сигналы от всех установленных датчиков, обрабатывает их и формирует управляющие команды для исполнительных механизмов. Контроллер управляет включением и регулировкой нагревателей, вакуумного насоса, клапанов и других устройств. Для отображения текущего состояния системы и взаимодействия с оператором применяется панель НМІ. На экране панели отображаются параметры вакуума, температуры, состояния клапанов и насосов, и текущее состояние процесса. Оператор может задавать параметры рецепта сушки, запускать и останавливать этапы, просматривать графики и сообщения о состоянии системы.

Продукт в процессе сублимационной сушки теряет влагу, которая конденсируется и собирается в отдельном конденсаторе. После завершения процесса камера разгерметизируется, и высушенный материал может быть выгружен и направлен на последующую переработку или упаковку.

## 2.3 Структурная схема автоматизации технологического процесса

Структурная схема автоматизации вакуумной сублимационной сушки представлена в Приложение Б, которая связывает измерительные цепи, исполнительные механизмы и узлы управления в одну Ethernet-шину Modbus TCP. Аналоговые сигналы от шести платиновых термопреобразователей PT-100, установленных по зонам полок, а также от комбинированного датчика вакуума ZJ-52T поступают на два модуля MB210-101 с универсальными входами, каждый канал программно настроен под трехпроводную схему RTD либо токовую петлю 4-20 мА, что устраняет необходимость во внешних преобразователях и позволяет хранить калибровочные коэффициенты прямо в памяти модуля. MB210-101 формируют пакетные данные температуры и давления, передают их по Modbus TCP мастеру сети - программируемому реле Овен ПР-205.

Контроллер параллельно опрашивает модули и НМІ панель ТРС7032КХ, получая задания рецептов выводит тренды параметров на сенсорный экран. В ПР-205 реализован пошаговый алгоритм: после достижения заданной температуры полок реле выдает команду на включение компрессора TAG2522Z, который через масляный теплообменник охлаждает конденсатор, затем открывается электромагнитный клапан EV224B, переключающий холодильный контур, и запускается вакуумный насос DVP-48 для создания разрежения порядка [11]. Сухие контакты выходов DO ПР-205 замыкают катушки промежуточных реле: управляют нагревом полок по секциям, активирует компрессор, открывает клапан EV224B, запускает насос циркуляции теплоносителя, подаёт питание на вакуумный насос, зарезервированы под систему аварийной разгрузки камеры. При срабатывании аварийных сигналов: перегрев, избыточное давление, обрыв фазы двигателя, ПР-205 мгновенно обесточивает все исполнительные реле, закрывает клапан, выводит оповещение на НМІ.

НМІ-панель хранит до сорока технологических формул, каждая из которых включает тридцать шесть сегментов температуры и времени, оператор может переключаться между ручным и автоматическим режимом, просматривать архив и экспортировать данные на USB-накопитель для дальнейшего анализа процесса. Исполнительный контур работает от сети 220/380 В через промежуточные реле; низковольтная часть ПР-205, MB210-101 и НМІ - питается от источника 24 DC, гальванически развязанного от силовой шины. Такая конфигурация позволяет вести предварительное замораживание, первичную сушку и десорбционный догрев в автоматическом режиме без вмешательства оператора, фиксируя полный набор критических параметров для валидации партии.

### 3 Разработка алгоритмов автоматического регулирования процесса

#### 3.1 Реализация логического управления вакуумной сублимационной сушки в среде Owen Logic

Получение значений с датчиков для создания алгоритмов системы применяется программного обеспечения OWEN Configurator. Эта программа имеет большой набор средств для настройки и сбора данных с различных измерительных приборов [12].

OWEN Configurator позволяет определять вид получаемой информации, что необходимо для правильного понимания показаний датчиков. Оператор может настроить единицы измерения, масштабирование и диапазон показаний, которые будут соответствовать разрабатываемому алгоритму (рисунок 3.1).



Имя	Значение	Значение по умолчанию	Минимальное значение	Максимальное значение
Универсальные аналоговые входы				
Конфигурация				
Канал 1				
Тип датчика	TSP100P (Pt 100)	Датчик отключен		
Сдвиг	0	0	-10000	10000
Наклон	1	1	-1	10
AIN.H	100	100	-10000	10000
AIN.L	0	0	-10000	10000
Период	600	600	600	10000

Рисунок 3.1 – Рабочее окно ПО OWEN Configurator

На рисунке 3.2 представлено окно настройки приборов, в котором есть возможность установки нижних и верхних границ измерения, а также настройка протоколов связи Modbus RTU и Modbus TCP/IP.

Алгоритмы работы автоматического регулирования процесса вакуумной сублимационной сушки разрабатывались в программном обеспечении Owen Logic. Данная ПО предоставляет возможность создание логики процесса, установки диапазонов работы и написание аварии, которые важны для автоматизированной системы.

В рабочем окне установлены точки связи с входами и выходами контроллера, которые позволяют правильно прописать алгоритм работы системы и вывести световое и звуковое оповещение при выходе параметров за диапазоны рабочих условия. Помимо этого, есть блоки создание внутренних и сетевых переменных, блока константы и блоки преобразования в булевские, целочисленные значения и в число с плавающей точкой.

Имя	Значение	Переменная
Тип датчика	0-300 кОм	< не выбрана >
Постоянная времени фильтра, с	0.01	< не выбрана >
Нижняя граница измерения	0	< не выбрана >
Верхняя граница измерения	10	< не выбрана >

**Тип датчика**

Modbus регистр: 4101  
Значения:  
0 - 0-300 кОм, 1 - 0-10 В, 2 - 4-20 мА, 3 - Pt500 (a=0.00385), 4 - 500П (a=0.00391), 5 - Cu500 (a=0.00426), 6 - 500M (a=0.00428), 7 - Ni500 (a=0.00617), 8 - Cu1000 (a=0.00426), 9 - 1000M

Рисунок 3.2 – Окно настройки приборов

Одним из преимуществ данного программного обеспечения является готовые блоки SCALE используемые для масштабирования входного сигнала с ограничением (рисунок 3.3).

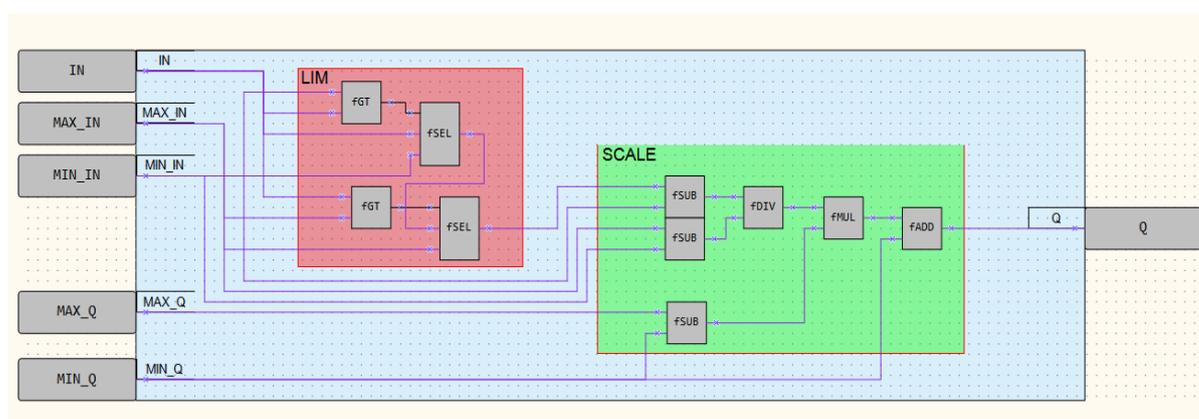


Рисунок 3.3 – Блок SCALE

Блоки SCALE в Owen Logic предоставляют удобный способ преобразования физических значений, получаемых с датчиков, в диапазоны, понятные для контроллера и удобные для использования в алгоритмах. Температурный датчик может выдавать сигнал 4–20 мА, соответствующий диапазону температур от -50 до +150 градусов. Блок SCALE позволяет перевести этот токовый сигнал в фактические градусы, что упрощает работу с данными в программе. Оператору нужно только указать входной диапазон и соответствующий ему выходной диапазон, и блок автоматически выполнит необходимые вычисления. Это избавляет от необходимости вручную прописывать формулы масштабирования, снижая вероятность ошибок и ускоряя разработку.

Главным элементом является макросы, которые помогают упростить схему и сделать ее удобной для чтения пользователей (рисунок 3.4).

Макросы в Owen Logic служат для группировки повторяющихся или сложных элементов логики в один настраиваемый блок. Вместо того чтобы дублировать одни и те же фрагменты управления или вычисления по всей программе, есть возможность создать макрос, который сокращает объем схемы, делая ее более наглядной. Пользователю не приходится просматривать множество однотипных соединений и блоков; он видит компактные макросы, каждый из которых представляет определенный функциональный модуль.

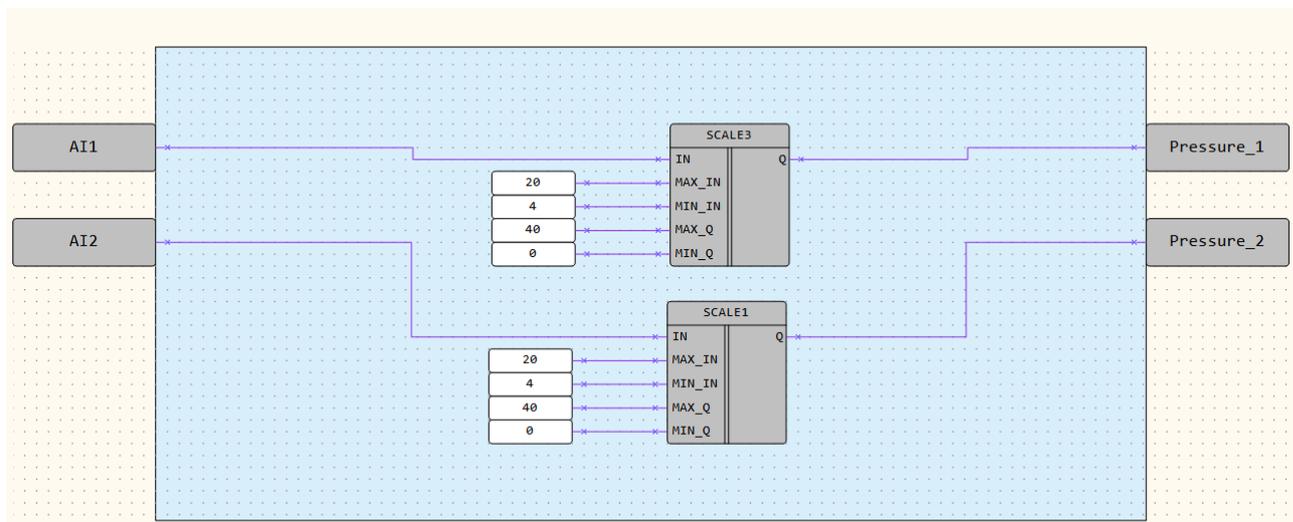


Рисунок 3.4 – Макросы

В разработке алгоритмов автоматического регулирования процесса вакуумной сублимационной сушки использовались логические элементы, такие как функция НЕ и функция И, позволяющие достичь требований установки.

Функция НЕ позволяет инвертировать состояние сигнала или условия. Такой подход даёт возможность управлять процессами, исходя из отсутствия определенных состояний или сигналов, необходимые для безопасности или последовательности выполнения операций.

Функция И применяется для одновременной проверки выполнения нескольких заданных условий. Использование данной функции показывает, что каждый этап процесса начинается только при соблюдении всех необходимых параметров, что обеспечивает стабильность, предсказуемость и высокое качество конечного продукта. Благодаря такому подходу достигается более строгий контроль за технологическим процессом, минимизируются ошибки и исключаются нежелательные отклонения (рисунок 3.5).

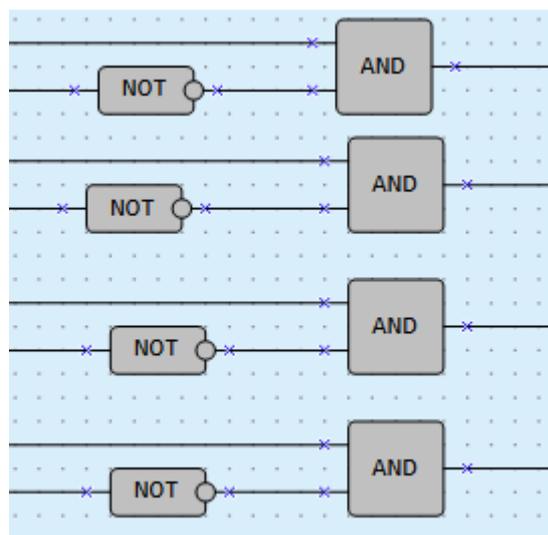


Рисунок 3.5 – Логические функции

На рисунке 3.6 представлен полный алгоритм работы вакуумной сублимационной сушки в соответствии с требованиями системы.

Алгоритм включает в себя считывание показателей с датчиков температуры и давления, обработка и преобразование входных данных, сравнение с уставкой и по полученным значениям включение или выключение компонентов.

Процесс начинается с этапа общего включения заморозки. При общей заморозке включаются такие компоненты, как циркуляционный насос, компрессор 1, вентилятор и теплообменник 1. Затем при достижении температуры внутри камера минус 30 градусов включаются компрессор 2 и теплообменник 2.

При достижении температуры уставки на радиаторных полках начинается этап сублимации, в котором включается вакуумный насос создавая вакуум внутри камеры сушки. После запускается процесс нагрева. На данном этапе начинает работать нагревательный элемент, благодаря которому продукт при вакууме высушивается переходом из кристаллического состояния в газообразное, без перехода в жидкое.

Все компоненты подключены к выходам контроллера, для отслеживания их состояния и управления. Входные сигналы отвечают общее включение стадий заморозки, сублимации и управляющие команды для насосов, компрессоров, вентиляторов и теплообменников.

Значение температуры, получается с датчика и используется для сравнения с заданными порогами, с помощью блока сравнения. Аналогично входные данные температуры и состояние компрессоров с помощью логических операций AND и NOT для формирования условий включения или отключения исполнительных механизмов.

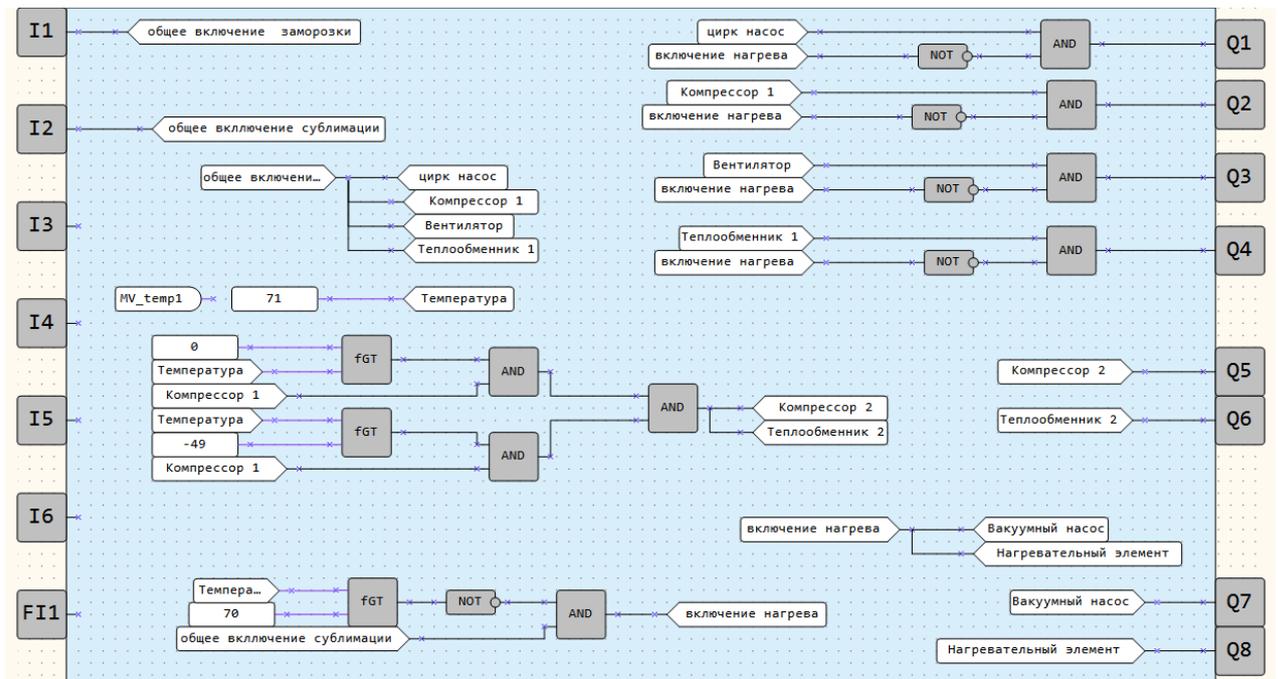


Рисунок 3.6 – Алгоритм автоматического регулирования

К тому же все входные данные подключены к системе сигнализации, при достижении значений температуры и давления вне диапазона работы системы включаются световое и звуковое оповещение (рисунок 3.7).

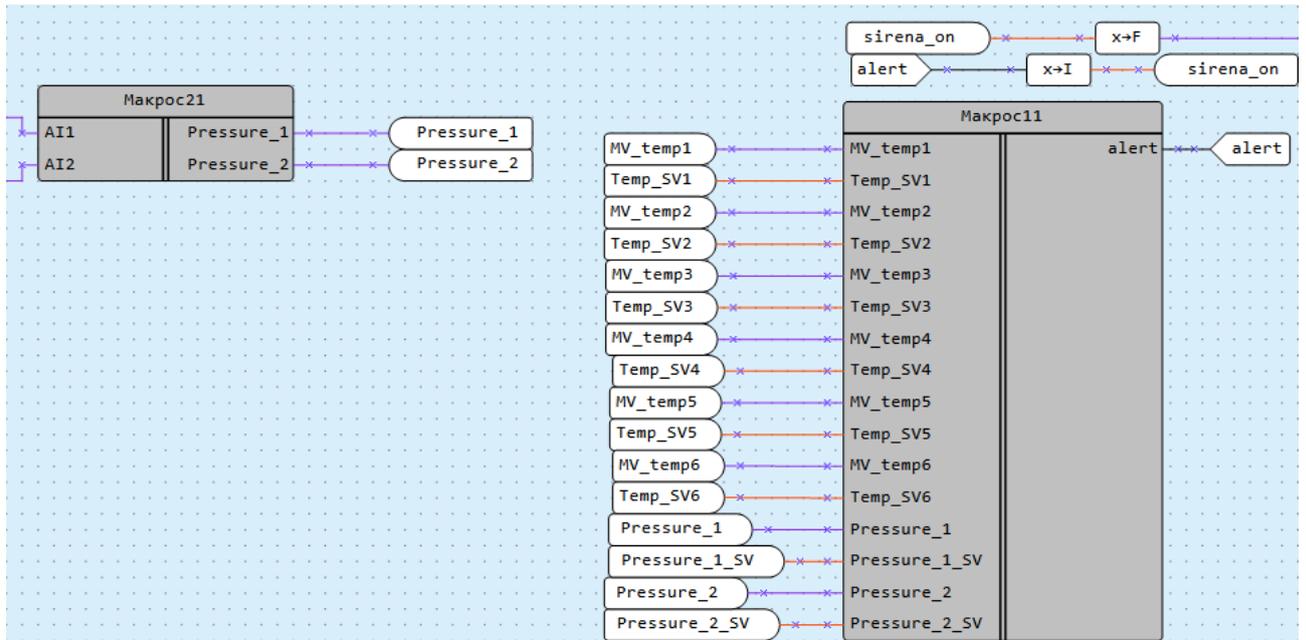


Рисунок 3.7 – Алгоритм автоматического регулирования

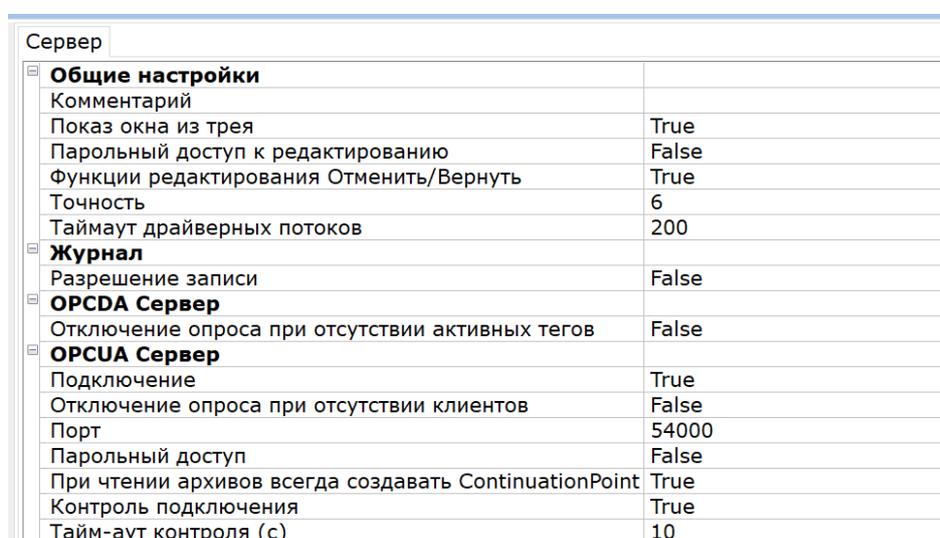
### 3.2 Разработка SCADA системы

Система SCADA используется для централизованного мониторинга и управления процессами. Она представляет собой сочетание программного и аппаратного обеспечения, которая позволяет получать данные с объектов в режиме реального времени и на их основе принимать решения для контроля и оптимизации операций [14]. SCADA собирает информацию от различных датчиков, контроллеров расположенного на объекте. Полученные данные отображаются операторам через графические интерфейсы HMI, что позволяет отслеживать текущее состояние не только всей системы, но и отдельных ее частей, а также выявлять отклонения от нормы и контролировать технологический процесс. SCADA дает возможность операторам удаленно управлять оборудованием и процессами, то есть запускать или останавливать насосы, открывать или закрывать клапаны, изменять уставки параметров. Управление может осуществляться как вручную по команде оператора, так и автоматически по заранее заданным алгоритмам.

Система отслеживает параметры процесса и при выходе их за допустимые пределы немедленно генерирует аварийные сигналы. SCADA сохраняет всю собранную информацию в базах данных.

SCADA системы необходимы для повышения эффективности путем оптимизации производственных процессов за счет точного контроля и регулирования, обеспечения безопасности через предотвращение аварий и инцидентов благодаря постоянному мониторингу и оперативной сигнализации, и удаленного контроля с возможностью управлять объектами, расположенными на значительном расстоянии из единого центра.

Перед разработкой SCADA системы нужно наладить сбор данных, их обработку и передачу в систему мониторинга [15]. Для этого используется такое программное обеспечение как OPC server (рисунок 3.8).



Сервер	
<b>Общие настройки</b>	
Комментарий	
Показ окна из трея	True
Парольный доступ к редактированию	False
Функции редактирования Отменить/Вернуть	True
Точность	6
Таймаут драйверных потоков	200
<b>Журнал</b>	
Разрешение записи	False
<b>OPCDA Сервер</b>	
Отключение опроса при отсутствии активных тегов	False
<b>OPCUA Сервер</b>	
Подключение	True
Отключение опроса при отсутствии клиентов	False
Порт	54000
Парольный доступ	False
При чтении архивов всегда создавать ContinuationPoint	True
Контроль подключения	True
Тайм-аут контроля (с)	10

Рисунок 3.8 – Среда работы в OPC server

OPC server представляет из себя ПО, где налаживается связь между программно–логическим контроллером и самой SCADA системой

В рабочей среде OPC server предоставляется возможность соединения с контроллером для получения данных.

Изначально в настройках прописывается тип связи, предусмотренный контроллером, то есть тип связи Modbus RTU или Modbus TCP/IP. После выбора типа связи происходит настройка для соединения с самими датчиками, исполнительными устройствами, и с сигнализацией. Доступна настройка типов данных на устройстве и сервере (рисунок 3.9).

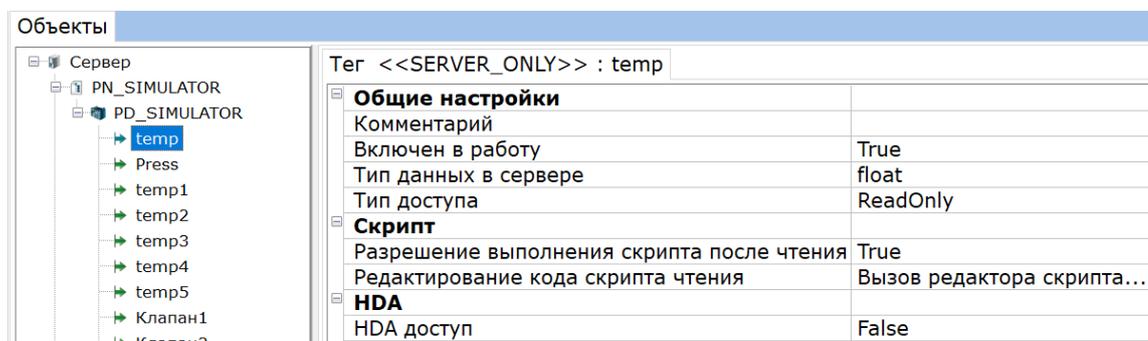


Рисунок 3.9 – Добавленные тегов в соответствии с системой

На рисунке 3.10 представлено окно отслеживание параметров в реальном времени, получаемых с датчиков температуры и давления. Показаны состояние клапанов булевыми значениями с использованием 0 – закрыт и 1 – открыт.

Рег...	Адрес	Знач...	Каче...
SE...	--	-4.72...	GOOD
SE...	--	1	GOOD
SE...	--	-3.90...	GOOD
SE...	--	-7.12...	GOOD
SE...	--	-6.24...	GOOD
SE...	--	-5.26...	GOOD
SE...	--	-3	GOOD
SE...	--	0	GOOD

Рисунок 3.10 – Отслеживание параметров системы

Порядок подключение состоит из нескольких этапов. Создание коммуникационного узла. На данном этапе прописываются IP адрес и IP порт устройства. Добавление устройства. Здесь добавляется адрес устройства; Создание тегов. На этом этапе прописываются регистры, через которые

проходит считывание данных, тип данных на устройстве и на сервере, а также доступно масштабирование.

После настройки OPC server все добавленные теги импортируются в SCADA систему.

SCADA система позволяет создать не только систему управления, но и визуализационную часть процесса. Это значительно помогает в мониторинге объекта управления и наглядно видно какой из этап выполняется в реальном времени.

В SCADA системе есть панель инструментов позволяющая добавлять элементы автоматизации, такие как клапаны, задвижки, трубопроводы, емкости, графики зависимости и кнопки (рисунок 3.11).

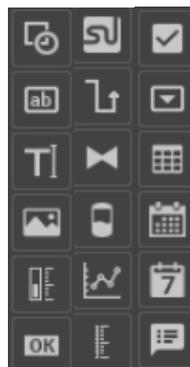


Рисунок 3.11 – Панель инструментов SCADA-системы

После выбора элементов происходит настройка. Устанавливает их расположение по осям X и Y, размеры, задается имя элемента для удобного дальнейшего использования, изменения цвета и установки границ. Главной частью является выбор переменной для данного элемента (рисунок 3.12).

X	136
Y	200
Ширина	144
Высота	48
Имя	Field2
Видимый	<input checked="" type="checkbox"/>
Доступен	<input checked="" type="checkbox"/>
Переменная	Press
Адрес	PN_SIMULATOR.PD_S
Доп. переменная	не выбрано
Цвет фона	<input type="color" value="#FFFFFF"/> 255
Цвет границы	<input type="color" value="#191919"/> 255
Авто. шрифт	<input checked="" type="checkbox"/>
Шрифт	24 px - Тонкий ▾
Цвет шрифта	<input type="color" value="#000000"/> 179
Интервал	0

Рисунок 3.12 – Настройка элементов

Следующим этапом в настройке системы мониторинга является импорт переменных с OPC server.

Переменные в SCADA системе делятся на два типа:

- Внутренние переменные, которые используются для присвоения к ним действия внутри самой SCADA системы;
- Внешние переменные добавляются с OPC server через протоколы OPC UA или OPC DA.

В редакторе переменных есть возможность настроить переменные, в соответствии с требованиями системы (рисунок 3.13).

н. п/п	Имя	Адрес	ID	OPC сервер	Тип данных	Шкала
1	temp	PN_SIMULATOR.PD_SIMULATOR.te	15	InSAT.ModbusOPCServer.DA	Single	temp
2	Press	PN_SIMULATOR.PD_SIMULATOR.Pr	16	InSAT.ModbusOPCServer.DA	Single	press
3	temp1	PN_SIMULATOR.PD_SIMULATOR.te	17	InSAT.ModbusOPCServer.DA	Single	temp
4	temp2	PN_SIMULATOR.PD_SIMULATOR.te	18	InSAT.ModbusOPCServer.DA	Single	temp
5	temp3	PN_SIMULATOR.PD_SIMULATOR.te	19	InSAT.ModbusOPCServer.DA	Single	temp
6	temp4	PN_SIMULATOR.PD_SIMULATOR.te	20	InSAT.ModbusOPCServer.DA	Single	temp
7	temp5	PN_SIMULATOR.PD_SIMULATOR.te	21	InSAT.ModbusOPCServer.DA	Single	temp
8	Klapan1	PN_SIMULATOR.PD_SIMULATOR.Кл	22	InSAT.ModbusOPCServer.DA	Integer	Не выбрано (
9	Klapan2	PN_SIMULATOR.PD_SIMULATOR.Кл	23	InSAT.ModbusOPCServer.DA	Integer	Не выбрано (

Рисунок 3.13 – Редактор переменных

В настройках переменных прописывается имя переменной, выбирается тип данных, шкала измерения, и возможность автоматического восстановления (рисунок 3.14).

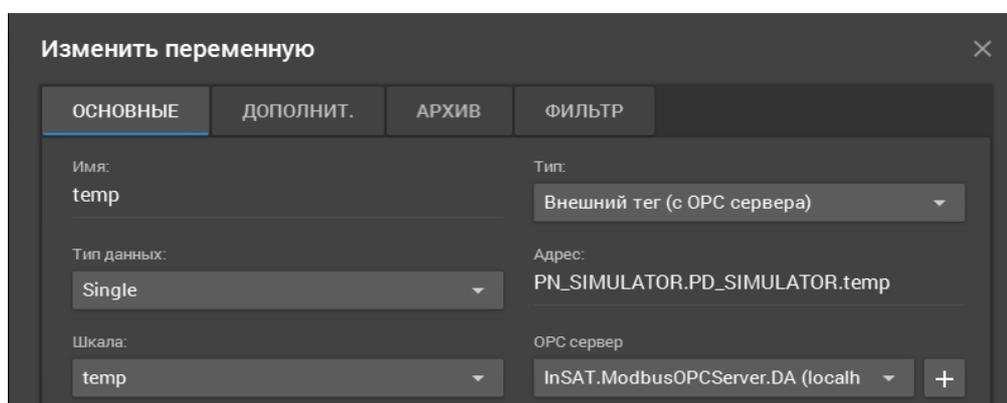


Рисунок 3.14 – Настройка переменных

Есть возможность создание дополнительных окон, в которых можно выводить дополнительную информацию по всей системе в целом или же по отдельным элементам (рисунок 3.15).

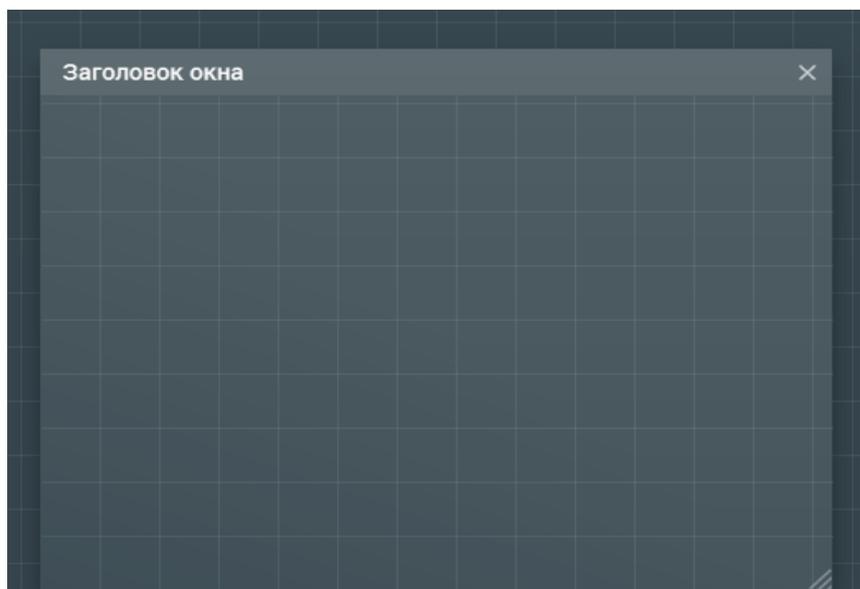


Рисунок 3.15 – Дополнительное окно

Один из главных элементов SCADA системы, является работа с кнопками. В настройках кнопки выбирается переменная, с которой она будет взаимодействовать, выбирается ее тип, то есть тип с фиксацией и без фиксации, вдобавок кнопка имеет два состояния отпущена или нажата (рисунок 3.16).

Переменная	не выбрано
Адрес	
Доп. переменная	не выбрано
Шрифт	11 px - Средний ▾
Цвет шрифта	<input type="color" value="#FFFFFF"/> 255
Интервал	0
Тип	с фиксацией ▾
Инверсия	✗
Перенос	✗
Бит	-1
Подтверждение	✗
Действие	не выбрано ▾
Состояние	Отпущена

Рисунок 3.16 – Настройка кнопки

В настройках самой SCADA системы есть несколько важных элементов. Изменение расширения и цвета схемы, окна трендов, скриптов и OPC server (рисунок 3.17).

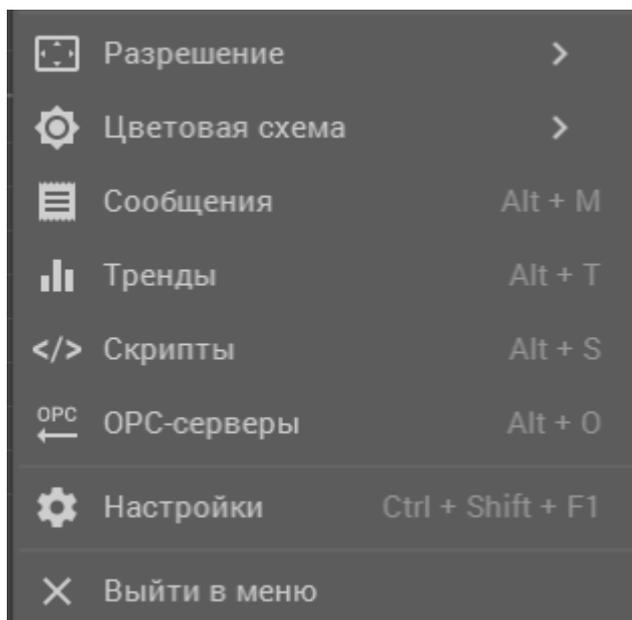


Рисунок 3.17 – Настройка SCADA системы

Редактор скриптов позволяет создавать скрипты любой сложности для управления объектами проекта системы, то есть с переменными, окнами, трендами и их свойствами. Помимо этого, есть возможность создавать универсальные скрипты, которые подойдут для множества однотипных объектов. Редактор скриптов имеет большой набор готовых процедур и функций, которые дают возможность быстро решать задачи различной сложности (рисунок 3.18).

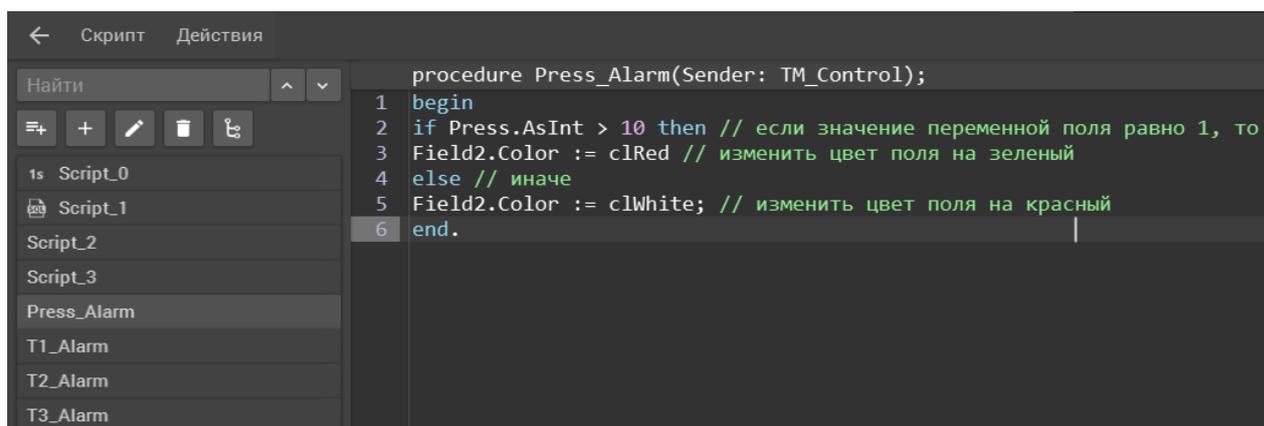


Рисунок 3.18 – Редактор скриптов

Преимуществом редактора скриптов является тем, что есть большое количество видов скриптов, таких как универсальные скрипты, таймеры, глобальные скрипты и по изменениям переменных (рисунок 3.19).

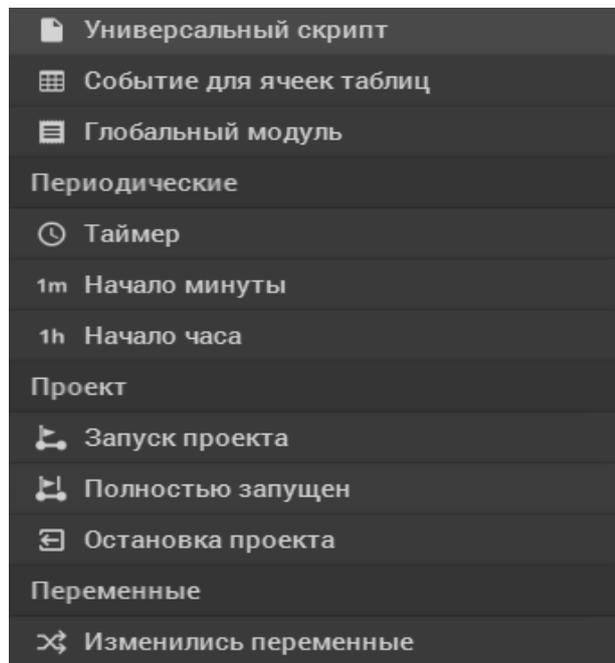


Рисунок 3.19 – Виды скриптов

Редактор скриптов поддерживает язык программирования Pascal позволяющий создавать гибкие и сложные скрипты для системы.

Для вывода показателей на окно оператора используется элемент поле. Переменная, которую нужно отобразить на панели, выбирается из редактора переменных.

К тому же важным компонентом SCADA системы представляет собой тренды, которые показывают изменение всей системы или же отдельных частей в виде графиков с зависимостью от времени (рисунок 3.20).

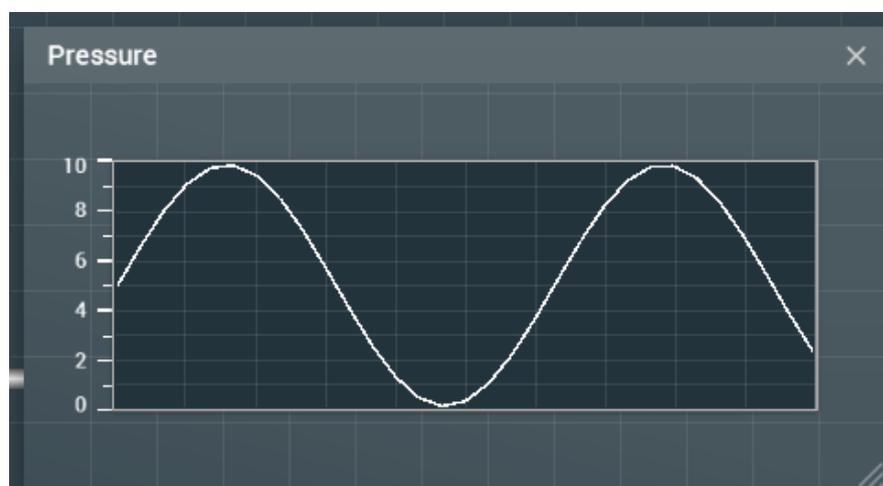


Рисунок 3.21 – Тренды

Есть возможность настроить различную зависимость, которую требует система.

Разработанная SCADA система для вакуумной сублимационной сушки имеет следующий вид (рисунок 3.22):

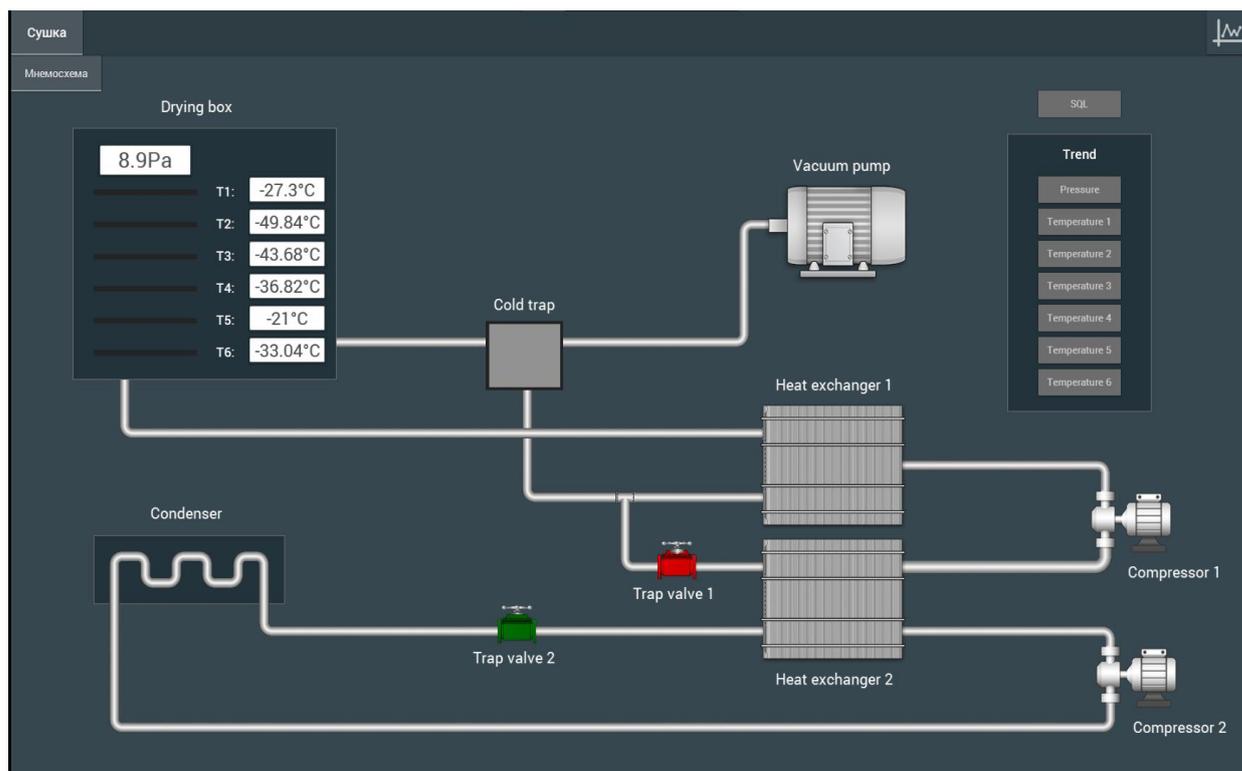


Рисунок 3.22 – Общий вид системы мониторинга вакуумной сублимационной сушки

Данная система включает в себя все требуемые элементы для визуализации процесса сушки, на которой отображены основные узлы установки: сушильная камера, холодная ловушка, конденсатор, два теплообменника, два компрессора и вакуумный насос

Блок *Drying box* включает в себя отслеживание всех показателей системы, то есть текущие значения параметров температуры и давления. Соединительные линии между узлами показывают потоки теплоносителя и вакуума.

Красным и зеленым цветом выделены положения клапанов, что позволяет контролировать состояние запорно регулирующей арматуры. Управление двумя компрессорами реализовано через графические элементы, отображающие их работу и возможность включения или отключения.

Правая часть интерфейса содержит панель трендов, где отображаются динамики давления и температуры по шести датчикам.

Дополнительно для визуализации выходов показателей за пределы рабочего диапазона блок загорается красным цветом (рисунок 3.23).

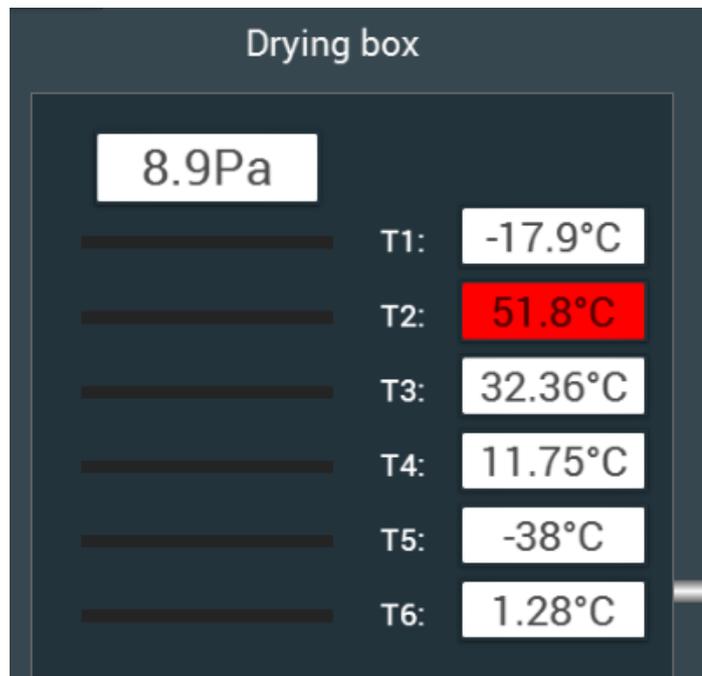


Рисунок 3.23 – Блок Drying box с визуальным оповещением

Одним из основных элементов в самой системе вакуумной сублимационной сушки является клапаны. В системе мониторинга данные элементы имеют два состояния открыт или закрыт, которые различаются цветами зеленым и красным соответственно (рисунок 3.24).

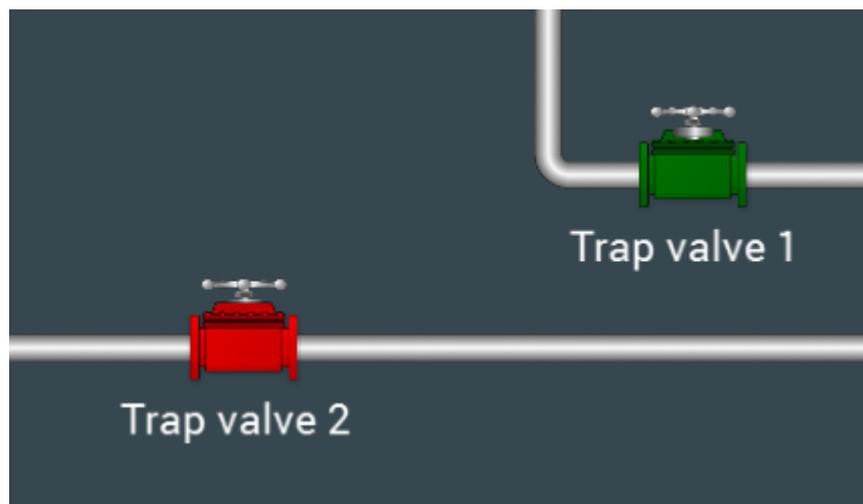


Рисунок 3.24 – Состояние клапанов

В правом краю установлены кнопки для открытия окон трендов, позволяющие отслеживать изменение показателей температуры и давления (рисунок 3.25).



Рисунок 3.25 – Кнопки открытия трендов

Дополнительные окна дают возможность открывать сразу несколько окон для параллельного отслеживания показателей температуры и давления, изменение их по времени (рисунок 3.26).

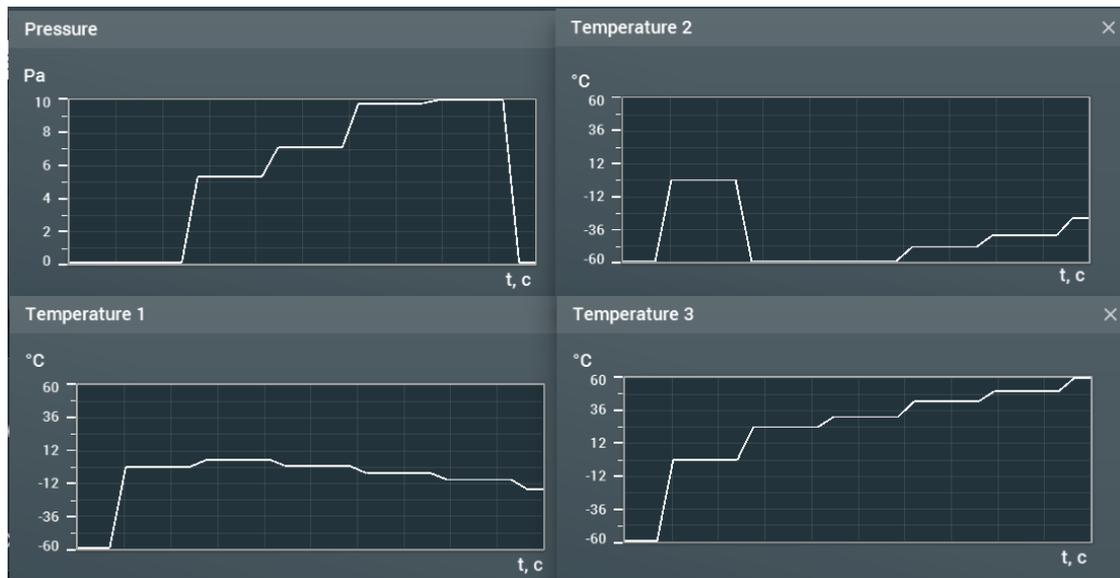


Рисунок 3.26 – Окна трендов температуры и давления

Для сохранения данных для дальнейшего исследования используется База данных.

База данных для SCADA системы предназначена для хранения огромных объемов данных. Она служит хранилищем для всей информации, собираемой от датчиков, контроллеров в реальном времени. База данных используется для хранения исторических данных, что позволяет анализировать

производительность процесса во времени. Без этих данных тяжело проводить анализ, оптимизировать производственные циклы или прогнозировать потребности в обслуживании.

На основе данных, хранящихся в базе, SCADA система может создавать отчеты, такие как отчеты о производстве, потреблении ресурсов или времени простоя. Эти отчеты нужны для планирования, оценки эффективности и соблюдения нормативов. База данных предоставляет основу для анализа производственных процессов, помогая выявлять корреляции, искать причины отклонений и оптимизировать рецептуры.

В разработанной системе используется Microsoft SQL Server Management Studio (SSMS). SSMS нужен для администрирования баз данных, включая управление экземплярами SQL Server, создание и изменение баз данных, управление безопасностью настройку и резервное копирование. Помимо этого, SSMS нужен для выполнения запросов и скриптов SQL для извлечения, вставки, обновления и удаления данных, что важно для анализа и исправления ошибок.

Создание базы данных начинается с выбора размера таблиц, типов файла и предписания путей, где данные будут храниться (рисунок 3.27).

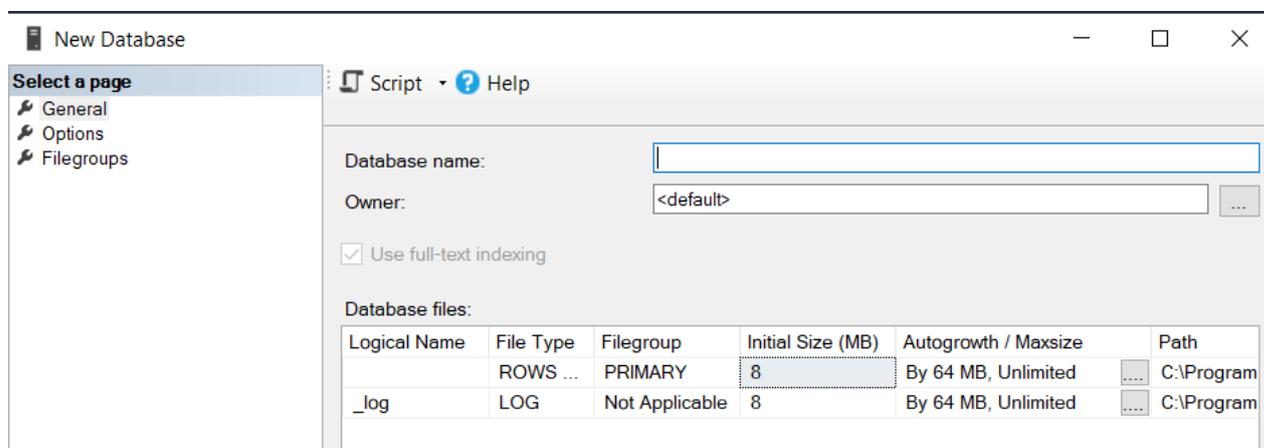


Рисунок 3.27 – Создание базы данных

После создания базы создаются таблицы, в которые будут записываться данные со SCADA системы. После создания базы данных формируются таблицы, предназначенные для сохранения данных, измерений температуры, давления, состояния исполнительных механизмов и событий аварий и сбоев. Для каждой таблицы определяется набор полей, включая временные метки, источники данных и сами измеряемые значения, что обеспечивает возможность корреляции данных в технологическом процессе. Создание и модификация таблиц осуществляется как с помощью визуального конструктора, так и посредством написания SQL скриптов.

Таблицы создаются по определенному шаблону или же через написания кода в окне скриптов (рисунок 3.28).

```

SQLQuery3.sql - D...G5MRP\Admin (58)
SELECT TOP (1000) [id]
      ,[t]
      ,[v]
      ,[q]
      ,[l]
FROM [SCADA].[dbo].[trends]

```

Рисунок 3.28 – Код для создания таблицы

После написания кода и его запуска в окне Results появится таблица с указанными параметрами (рисунок 3.29).

	id	t	v	q	l
1	15	2025-05-10 03:11:51.183	-31,1200008392334	0x00000010	0
2	15	2025-05-10 03:11:56.310	-24,0400009155273	0x00000000	0
3	15	2025-05-10 03:12:01.277	-19,3199996948242	0x00000000	0
4	15	2025-05-10 03:12:06.277	-12,2399997711182	0x00000000	0
5	15	2025-05-10 03:12:11.187	-7,5199998092651	0x00000000	0
6	15	2025-05-10 03:12:16.303	-0,43999997615814	0x00000000	0
7	15	2025-05-10 03:12:21.247	4,28000020980835	0x00000000	0
8	15	2025-05-10 03:12:25.920	4,28000020980835	0x00000020	0
9	15	2025-05-10 03:12:42.890	30,2399997711182	0x00000010	0
10	15	2025-05-10 03:12:48.027	37,3199996948242	0x00000000	0
11	15	2025-05-10 03:12:52.990	42,0400009155273	0x00000000	0
12	15	2025-05-10 03:12:57.923	46,7599983215332	0x00000000	0
13	15	2025-05-10 03:13:03.090	47,6399993896484	0x00000000	0
14	15	2025-05-10 03:13:08.037	40,560001373291	0x00000000	0
15	15	2025-05-10 03:13:11.993	40,560001373291	0x00000020	0
16	15	2025-05-10 03:15:12.510	1,91999995708466	0x00000010	0
17	15	2025-05-10 03:15:17.653	6,6399998664856	0x00000000	0
18	15	2025-05-10 03:15:22.600	13,7200002670288	0x00000000	0

Рисунок 3.29 – Таблица параметров

Для привязки базы данных к системе мониторинга используются глубокие настройки SCADA системы. В пунктах СУБД выбирают тип используемой базы данных, а в хост прописывается путь к самой базе данных (рисунок 3.30).

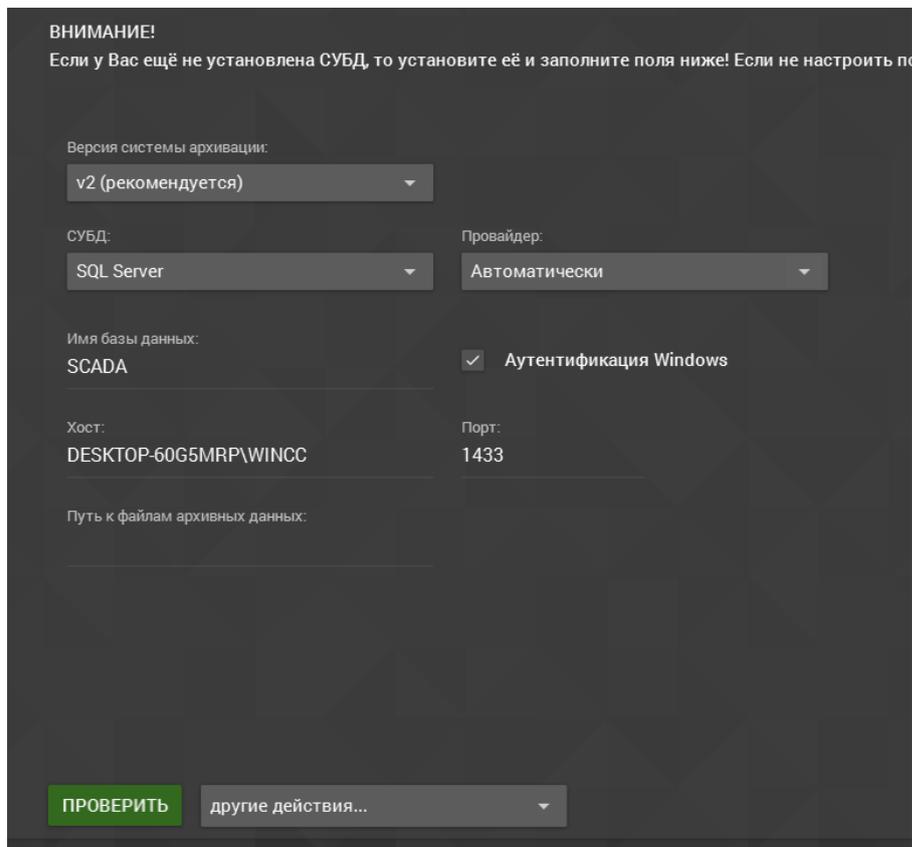


Рисунок 3.30 – Соединение базы данных со SCADA-системой

Также настроена обратная связь, то есть получения значений с базы данных в SCADA систему для построения отчетов (рисунок 3.31).

ReportTitleBand1				
Отчет параметров вакуумной сублимационной сушки				
Дата создания: {Time}		{dtStart} {dtEnd}		
HeaderDATA				
Время	Давление в камере	Температура первой полки	Температура второй полки	Температура третьей полки
DataDATA: Источник данных: DATA				
{1:HH:mm}", DATA.Время.AddS	{DATA.P}	{DATA.T_1}	{DATA.T_2}	{DATA.T_3}
FooterDATA				
ИТОГО	(DataDATA,DATA.	(DataDATA,DATA.	(DataDATA,DATA.	(DataDATA,DATA.

Рисунок 3.31 – Раздел отчетов в SCADA системе

## 4 Расчетная часть

### 4.1 Математическая модель САР вакуумной сублимационной сушки

В соответствии с техническим заданием нужно синтезировать один контур управления для вакуумной сублимационной сушки. Контур регулирования температуры в камере сушки на основе принципа управления по обратной связи.

Для управления процессом вакуумной сублимационной сушки будет разработана математическая модель системы автоматического регулирования температуры. В основу синтеза регуляторов положена функциональная схема (рисунок 4.1), на которой показаны основные компоненты системы: задающее устройство (ЗУ), регулятор (Р), исполнительный механизм (ИМ), регулирующий орган (РО), клапан (ОУ) и датчики температуры (Д), обеспечивающие обратную связь.

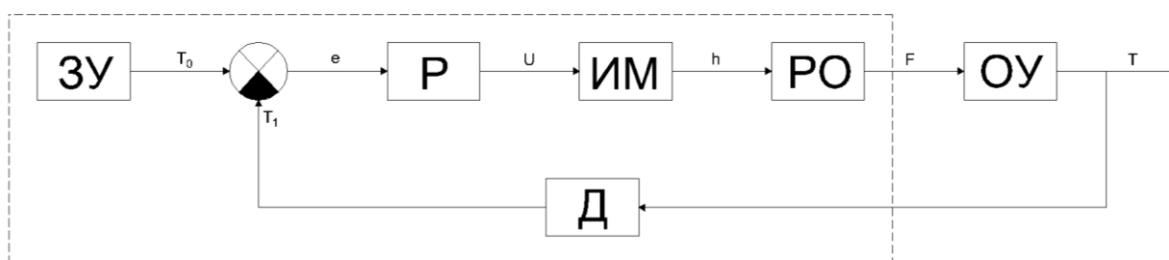


Рисунок 4.1 – Функциональная САР вакуумной сублимационной сушки

Где:

- ЗУ - задающее устройство;
- Р - регулятор;
- ИМ - исполнительный механизм;
- РО - регулирующий орган;
- ОУ - Клапан;
- Д - Датчики температуры;
- $T_0$  - Температура в камере сушки;
- $e$  - ошибка, возникающая при отклонении параметра от задания;
- $U$  – напряжение;
- $h$  - перемещение регулирующего органа;
- $F$  - расход воздуха.

В ходе проведения анализа технологического процесса вакуумной сублимационной сушки медного концентрата были определены входные уставки температуры и выходные фактические значения температуры внутри камеры. Входной уставкой является температура, заданная для системы, а выходным фактическим значением — фактическая температура внутри камеры барабанного вакуум-фильтра.

## 4.2 Разработка математической модели процесса вакуумной сублимационной сушки

Данная работа проводилась на существующей установке, которая не предназначена для сублимации жидких продуктов. Вследствие чего, на данной установке осуществлялись эксперименты сублимации верблюжьего молока для получения исходных данных. В процессе экспериментов по качеству конечного продукта были получены две базы данных с успешными и неуспешными результатами.

При построении математической модели использовались данные двух экспериментов, для наглядного сравнения конечного продукта.

Чтобы получить математическую модель использовался пакет System Identification Toolbox системы Matlab (рисунки 4.2 и 4.3).

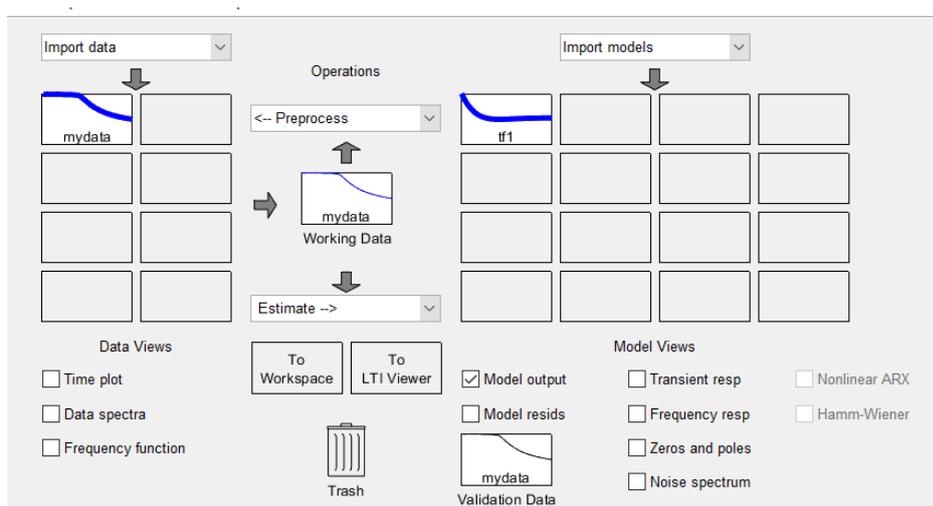


Рисунок 4.2 – System Identification успешного эксперимента

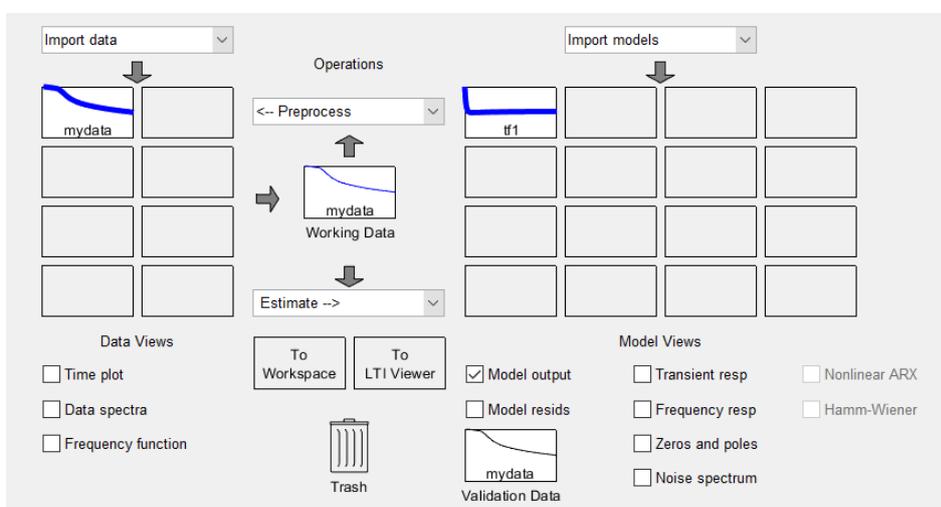


Рисунок 4.3 – System Identification неуспешного эксперимента

По результатам можно заметить, что процент адекватности успешного эксперимента составляет 92,04 процента, а не успешного 38,09 процентов (рисунки 4.2 и 4.3).

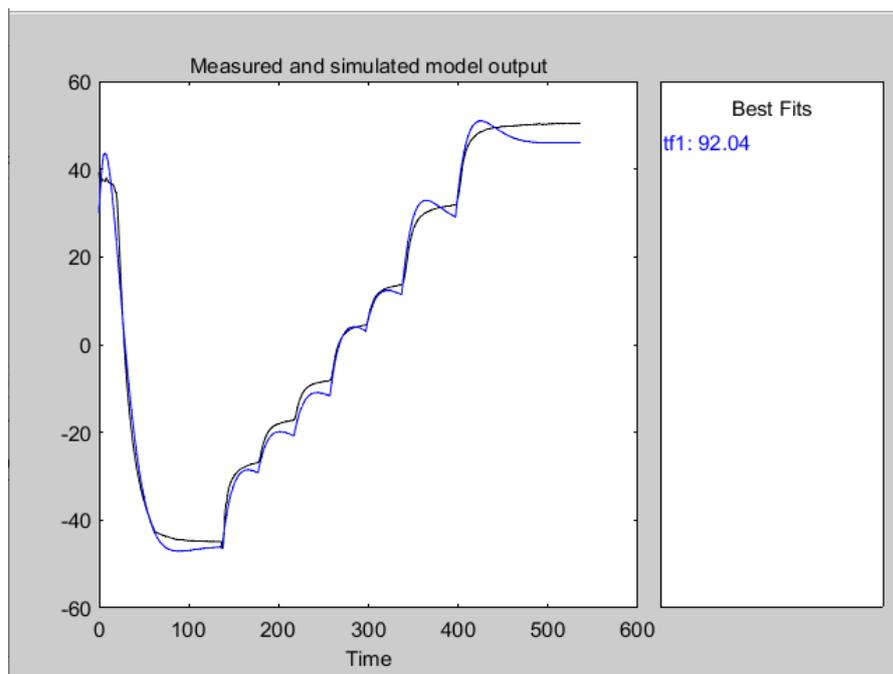


Рисунок 4.4 – Процент адекватности успешного эксперимента

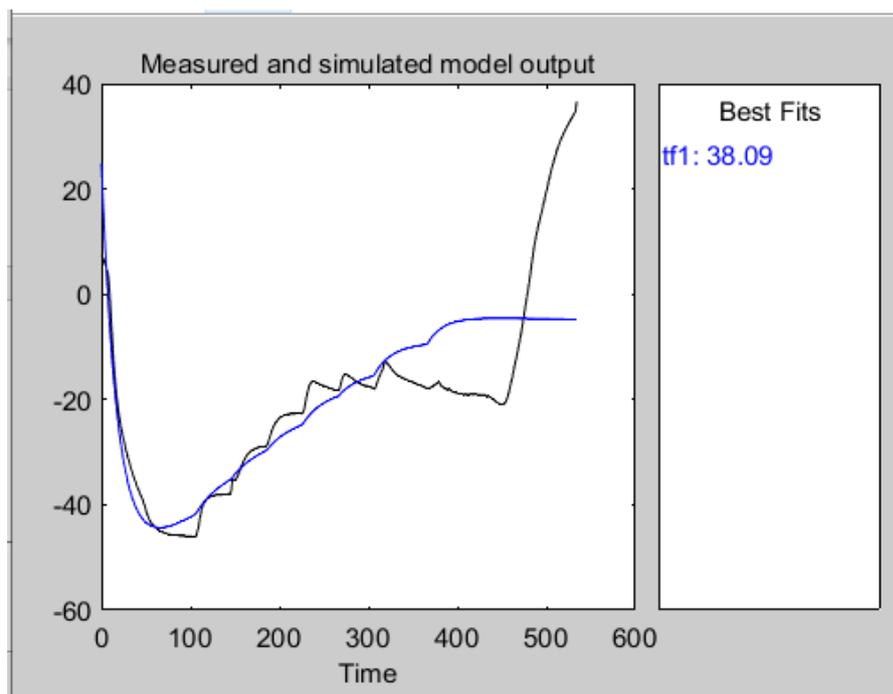


Рисунок 4.5 – Процент адекватности неуспешного эксперимента

В соответствии с рисунками 4.4 и 4.5 математическая модель САР вакуумной сублимационной сушки успешного и неуспешного экспериментов имеют вид разомкнутой системы 2-го порядка:

Успешный эксперимент:

$$G_{Oy}(s) = \frac{0.1172s + 0.004015}{s^2 + 0.108s + 0.004362}. \quad (4.1)$$

Неуспешный эксперимент:

$$G_{Oy}(s) = \frac{0.01354s + 0.00001432}{s^2 + 0.05877s + 0.0001207}. \quad (4.2)$$

Где:

–  $G(s)$  – передаточная функция разомкнутой системы, показывающая как выход системы реагирует на её вход в частотной области.

Чтобы обеспечить устойчивость и точность работы системы автоматического регулирования вакуума при сублимационной сушке необходимо учитывать помимо поведение самого объекта управления, но и динамические свойства регулирующего органа и исполнительного механизма. Каждый из этих элементов обладает собственной временной характеристикой, которая влияет на общее качество регулирования и эффективность процесса в целом.

Регулирующим органом выступает электромагнитный клапан, который имеет почти мгновенную реакцию срабатывания, соответствующая времени от 0,1 до 0,5 секунд.

Исходя из этого используем усредненное значение:

$$G_{PO}(s) = \frac{K_K}{T_K s + 1}. \quad (4.3)$$

Где:

–  $K_K = 1$  – коэффициент усиления клапана;

–  $T_K = 0.2$  – постоянная времени.

Имея все необходимые данные для получения передаточной функции регулирующего органа подставив значения в формулу (4.3):

$$G_{PO}(s) = \frac{1}{0.2s + 1}. \quad (4.4)$$

Затем определим передаточную функцию исполнительного механизма, которым является вакуумный насос. Вакуум создается постепенно и зависит от объема камера, исходя из этого, время создания вакуума варьируется от 3 до 10 секунд.

Используя эти данные построим передаточную функцию исполнительного механизма:

$$G_{\text{ИМ}}(s) = \frac{1}{5s + 1}. \quad (4.5)$$

После получения всех необходимых передаточных функции построим общую передаточную функцию контура управления:

$$G(s) = G_{\text{ОУ}}(s) + G_{\text{РО}}(s) + G_{\text{ИМ}}(s). \quad (4.6)$$

Тогда в соответствии формуле (4.6) передаточная функция для успешного (4.7) и неуспешного (4.8) экспериментов будут иметь следующий вид:

$$G(s) = \frac{0.1172s + 0.004015}{s^4 + 5.308s^3 + 1.565962s^2 + 0.1306824s + 0.004362}. \quad (4.7)$$

$$G(s) = \frac{0.01354s + 0.00001432}{s^4 + 5.25877s^3 + 1.3057247s^2 + 0.05939764s + 0.0001207}. \quad (4.8)$$

Формула преобразования разомкнутую систему в замкнутую:

$$T(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}. \quad (4.9)$$

Где:

–  $T(s)$  – передаточная функция замкнутой системы.

Соответственно передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

Успешный эксперимент:

$$T(s) = \frac{0.1172s + 0.004015}{s^4 + 5.308s^3 + 1.565962s^2 + 0.2478824s + 0.008377}. \quad (4.10)$$

Неуспешный эксперимент:

$$T(s) = \frac{0.01354s + 0.00001432}{s^4 + 5.25877s^3 + 1.3057247s^2 + 0.07293764s + 0.00013502}. \quad (4.11)$$

После получения замкнутых передаточных функции систем автоматического регулирования проведем анализ системы на устойчивость. Для этого применим первый метод Ляпунова.

Используем команду `pzmap` в MatLAB для получения значений полюсов и изобразим их на комплексной плоскости (рисунки 4.10 и 4.11).

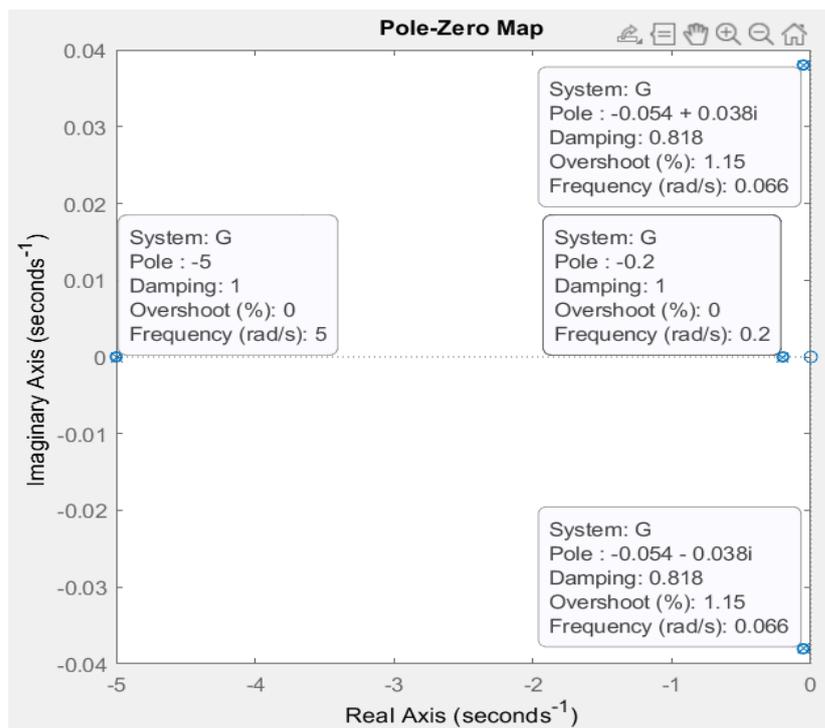


Рисунок 4.6 – Полюса разомкнутой САР успешного эксперимента на комплексной плоскости

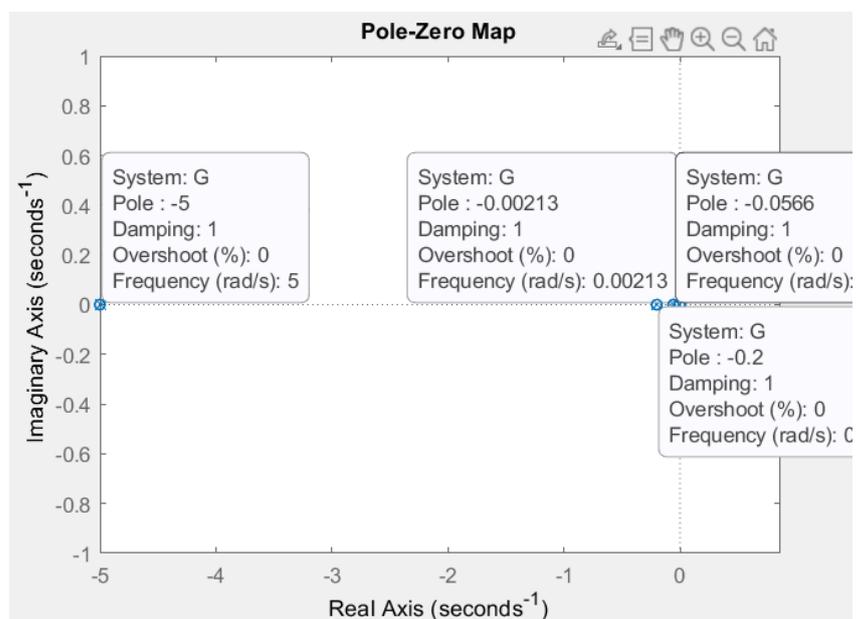


Рисунок 4.7 – Полюса разомкнутой САР неуспешного эксперимента на комплексной плоскости

Также получим полюса через команду `pole` (рисунки 4.8 и 4.9).

```
>> G=tf([0.1172 0.004015],[1 5.308 1.565962 0.1306824 0.004362])  
  
G =  
  
          0.1172 s + 0.004015  
-----  
s^4 + 5.308 s^3 + 1.566 s^2 + 0.1307 s + 0.004362  
  
Continuous-time transfer function.  
  
>> pole(G)  
  
ans =  
  
-5.0000 + 0.0000i  
-0.2000 + 0.0000i  
-0.0540 + 0.0380i  
-0.0540 - 0.0380i
```

Рисунок 4.8 – Полюса разомкнутой САР успешного эксперимента

```
>> G=tf([0.01354 0.00001432],[1 5.25877 1.3057247 0.05939764 0.0001207])  
  
G =  
  
          0.01354 s + 1.432e-05  
-----  
s^4 + 5.259 s^3 + 1.306 s^2 + 0.0594 s + 0.0001207  
  
Continuous-time transfer function.  
  
>> pole(G)  
  
ans =  
  
-5.0000  
-0.2000  
-0.0566  
-0.0021
```

Рисунок 4.9 – Полюса разомкнутой САР неуспешного эксперимента

На рисунках 4.6 и 4.7 можно заметить, что полюса разомкнутой системы автоматического регулирования равны отрицательным действительным значениям, поэтому, согласно первому методу Ляпунова системы устойчивы.

Таким же способом проверим замкнутые системы автоматического регулирования. (рисунки 4.10 и 4.11).

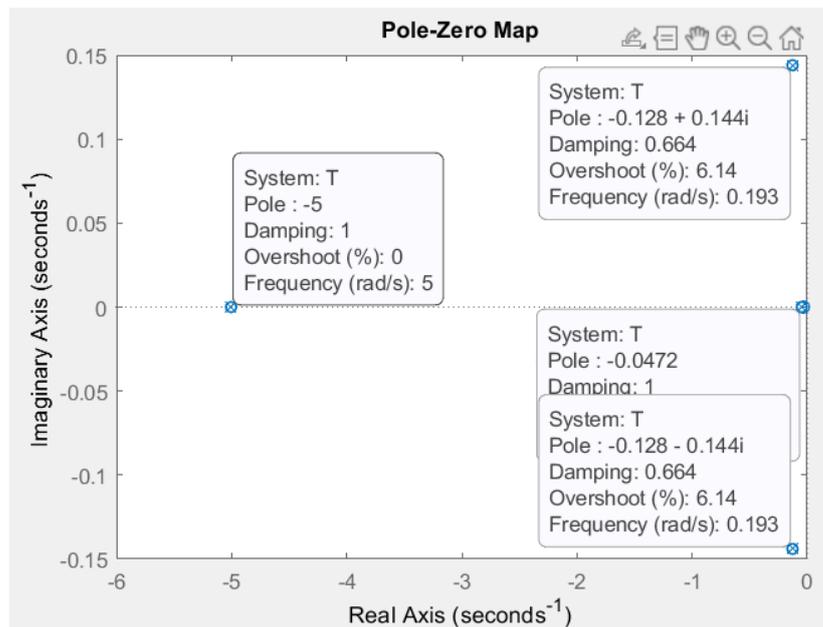


Рисунок 4.10 – Полюса замкнутой САР успешного эксперимента на комплексной плоскости

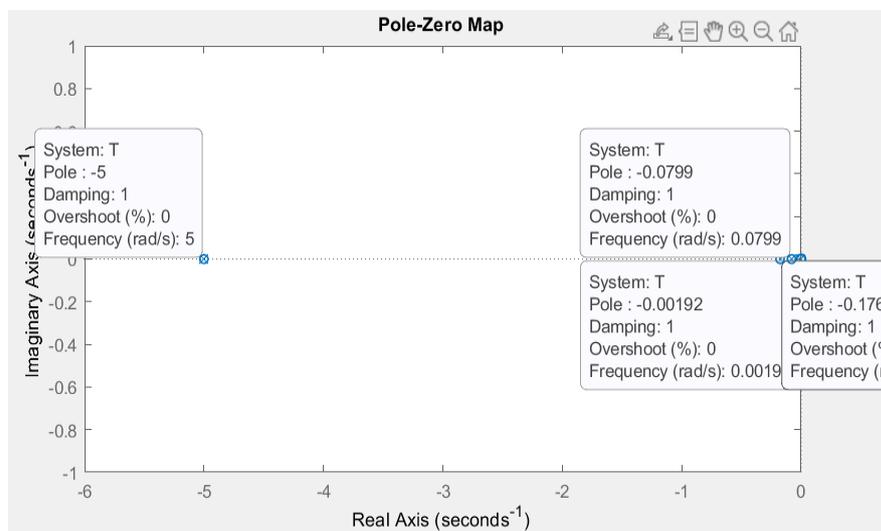


Рисунок 4.11 – Полюса замкнутой САР неуспешного эксперимента на комплексной плоскости

На рисунках 4.10 и 4.11 можно заметить, что полюса замкнутой САР равны отрицательным действительным значениям, из чего следует, что согласно первому методу Ляпунова системы устойчивы.

Проверим полученные полюса через команду pole.

```
>> T=tf([0.1172 0.004015],[1 5.308 1.565962 0.2478824 0.00877])

T =

          0.1172 s + 0.004015
-----
s^4 + 5.308 s^3 + 1.566 s^2 + 0.2479 s + 0.00877

Continuous-time transfer function.

>> pole(T)

ans =

-5.0049 + 0.0000i
-0.1279 + 0.1440i
-0.1279 - 0.1440i
-0.0472 + 0.0000i
```

Рисунок 4.12 – Полюса замкнутой САР успешного эксперимента

```
>> T=tf([0.01354 0.00001432],[1 5.25877 1.3057247 0.07293746 0.00013502])

T =

          0.01354 s + 1.432e-05
-----
s^4 + 5.259 s^3 + 1.306 s^2 + 0.07294 s + 0.000135

Continuous-time transfer function.

>> pole(T)

ans =

-5.0006
-0.1764
-0.0799
-0.0019
```

Рисунок 4.13 – Полюса замкнутой САР неуспешного эксперимента

Полученные полюса командой pole соответствуют полюсам изображенных на комплексной плоскости. Исходя из этого можно сделать вывод, что разомкнутые и замкнутые САР устойчивы, согласно первому методу Ляпунова.

После исследования разомкнутых и замкнутых САР на устойчивость первым методом Ляпунова, приступим к этапу определения оценок качества замкнутой системы автоматического регулирования.

Оценки качества разделяются на прямые оценки, получаемые по переходному процессу системы, и косвенные оценки, определяемые по полюсам системы.

При построении переходного процесса замкнутой САР можно увидеть прямые оценки качества (рисунки 4.14 и 4.15).

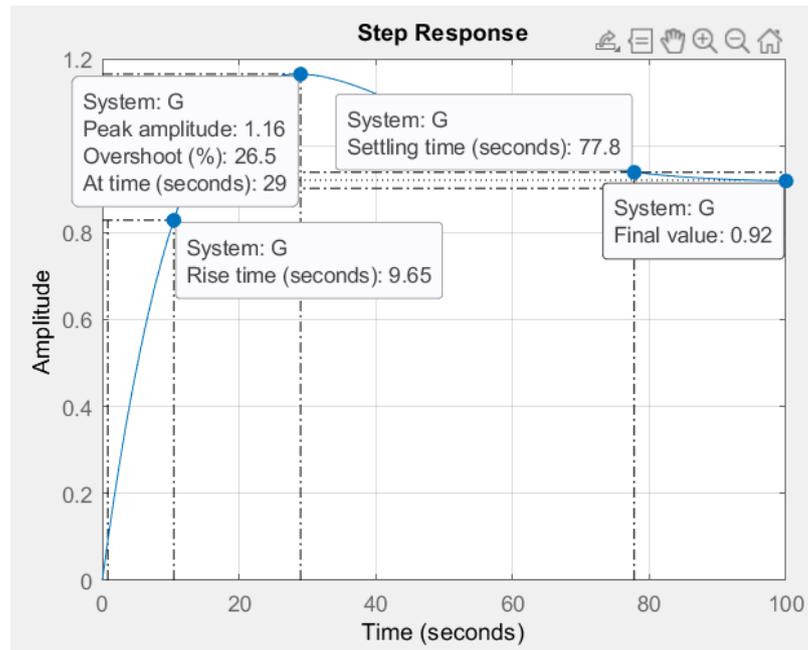


Рисунок 4.14 – Прямые оценки качества замкнутой САР успешного эксперимента

После получения переходного процесса замкнутой САР успешного эксперимента заполним таблицу оценок качества (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Оценки качества замкнутой САР успешного эксперимента

№	Оценки качества	Значения
1	Время регулирования ( $T_{set}$ )	77.8 с
2	Перерегулирование ( $P_{OV}$ )	26.5%
3	Число колебаний( $M$ )	0
4	Колебательность( $\mu$ )	-
5	Период колебаний( $T$ )	-
6	Установившаяся ошибка ( $e_{ss}$ )	0.793
7	Время достижения первого максимума ( $T_p$ )	29 с
8	Время нарастания ( $T_R$ )	9.65 с
9	Декремент затухания	-

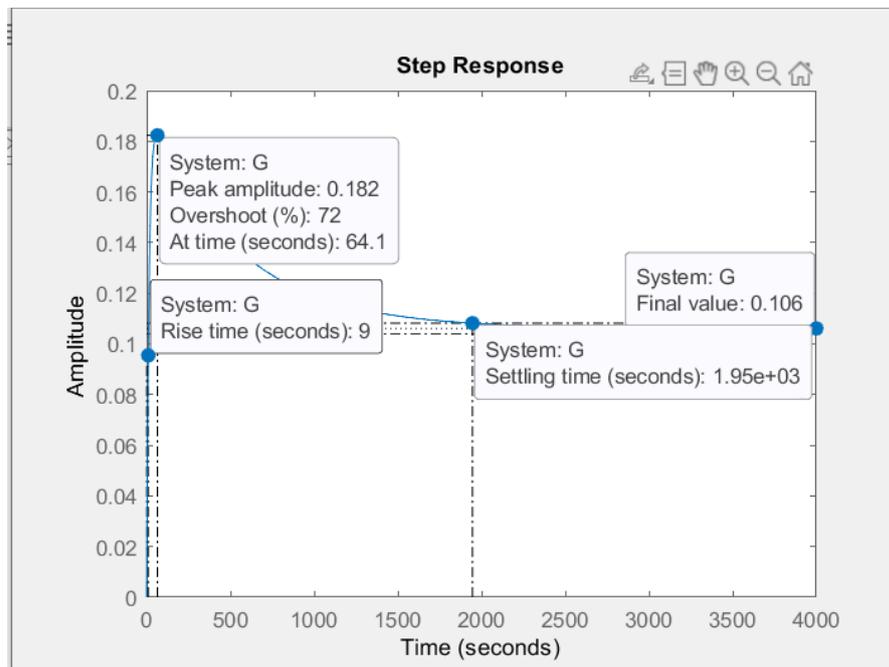


Рисунок 4.15 – Прямые оценки качества замкнутой САР неуспешного эксперимента

После получения переходного процесса замкнутой САР успешного эксперимента заполним таблицу оценок качества (таблица 4.1).

Таблица 4.2 – Оценки качества замкнутой САР неуспешного эксперимента

№	Оценки качества	Значения
1	Время регулирования ( $T_{set}$ )	195 с
2	Перерегулирование ( $P_{OV}$ )	72%
3	Число колебаний(M)	0
4	Колебательность( $\mu$ )	-
5	Период колебаний(T)	-
6	Установившаяся ошибка ( $e_{ss}$ )	0.582
7	Время достижения первого максимума ( $T_p$ )	64.1 с
8	Время нарастания ( $T_R$ )	9 с
9	Декремент затухания	-

На таблицах 4.1 и 4.2 видно установившуюся ошибку, которая показывает разницу между желаемыми и фактическими значениями выходного сигнала.

После определения оценок качества системы перейдем к определению запасов устойчивости по амплитуде и фазе двух экспериментов с использованием команды `bode` в MatLAB (рисунки 4.16 и 4.17).

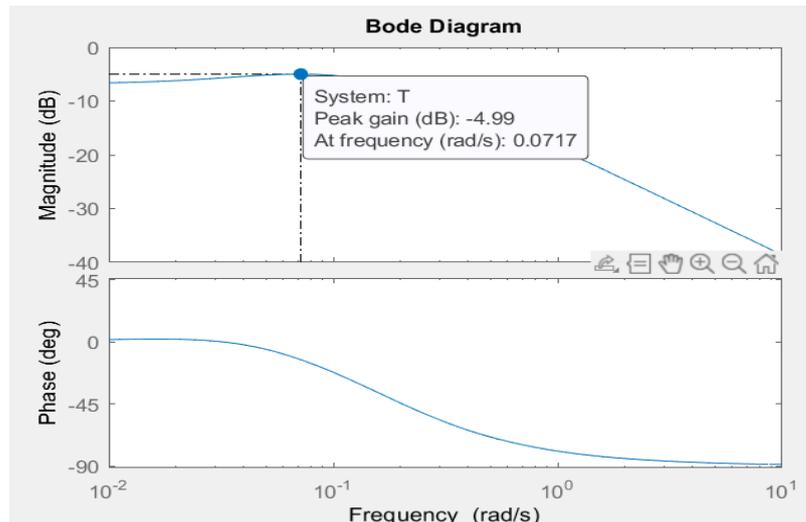


Рисунок 4.16 – Запас устойчивости успешного эксперимента

Как можно заметить на рисунке 4.16 в успешном эксперименте запасы устойчивости равны бесконечности. Из этого можно сделать вывод, что система абсолютно устойчива, при любых изменениях параметров или воздействиях не потеряет устойчивость.

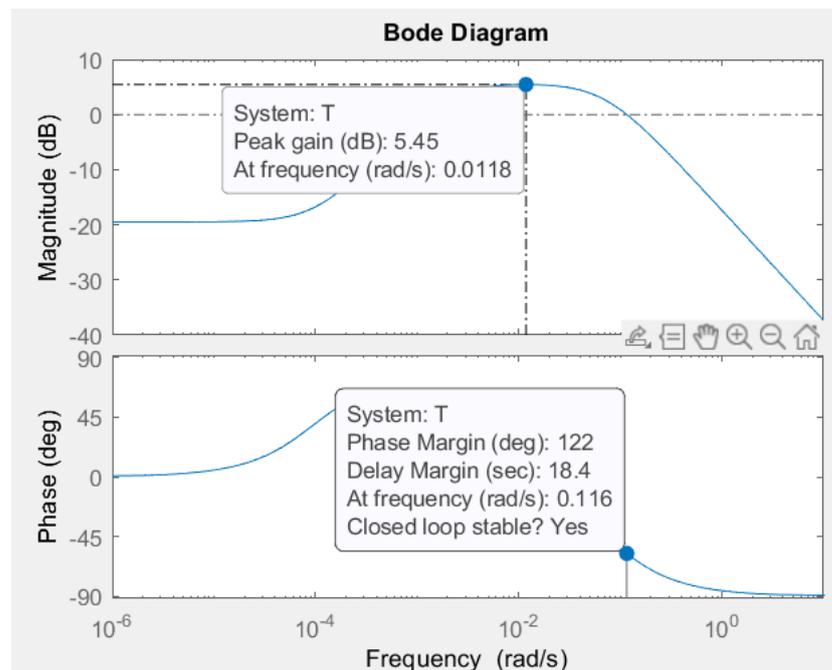


Рисунок 4.17 – Запас устойчивости неуспешного эксперимента

На рисунке 4.17 видно, что в неуспешном эксперименте запасы устойчивости как в первом равны бесконечности.

Запасы устойчивости неуспешного эксперимента также показывают бесконечность, данная система тоже является абсолютной устойчивой. Она, как

и первая в успешном эксперименте не потеряет устойчивость при любых изменениях параметров или воздействиях.

Рекомендуемый запас по фазе от 30 до 60 градусов, при менее 30 градусов система близка к нестабильности, то есть может быть чувствительна к возмущениям, а при более 60 градусов приведет к излишне медленной реакции.

Запас устойчивости по амплитуде рекомендуется в диапазоне от 6 до 12 дВ. При запасе устойчивости менее 6 дВ система может стать неустойчивой при небольших изменениях, а при более 12 дВ означает избыточную консервативность.

### 4.3 Синтез регулятора

Для настройки регуляторов применялся метод Циглера-Никольса №1. Данный метод использует реакция объекта на ступенчатое изменение управляющего воздействия.

Этот метод включает в себя три параметра, такие как  $k$  – коэффициент передачи,  $T$  – постоянная времени,  $L$  – время запаздывания.

По полученным параметрам заполняется таблица параметров типовых регуляторов (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Параметры типовых регуляторов

Регулятор	$K_p$	$T_i$	$T_D$
P – регулятор	$\frac{T}{KL} = \frac{5}{1 * 0.3} = 16.6$	-	-
PI – регулятор	$0.9 \frac{T}{KL} = 0.9 * 16.6 = 14.94$	$\frac{L}{0.3} = \frac{0.3}{0.3} = 1$	-
PID – регулятор	$1.2 \frac{T}{KL} = 1.2 * 16.6 = 19.92$	$2L = \frac{1}{2*0.3} = 1.67$	$0.5L = 0.5*0.3=0.15$

Промоделируем системы с полученными параметрами типовых регуляторов для наглядного сравнения. Затем получим прямые оценки качества системы (рисунок 4.18).

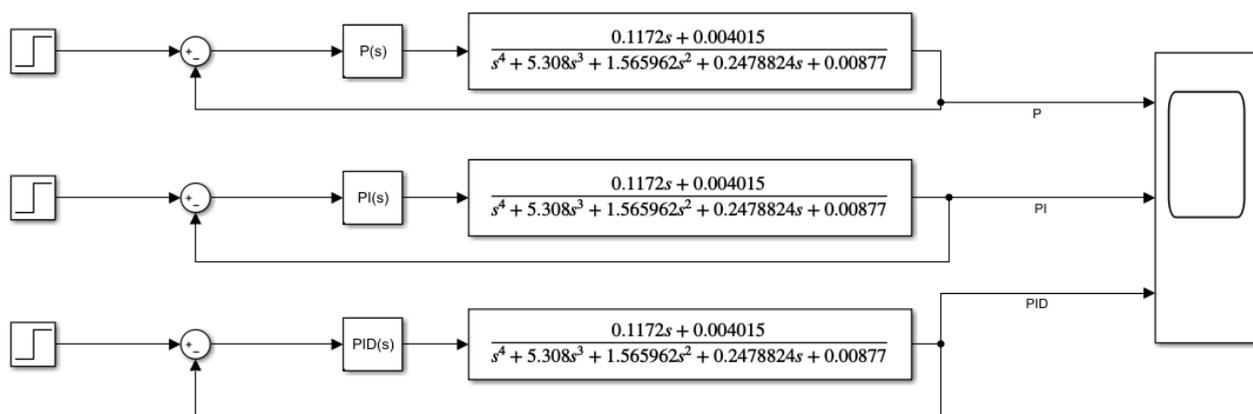


Рисунок 4.18 – Схема моделирования система с типовыми регуляторами

После моделирования через блок Scope получим результаты переходных процессов с разными регуляторами (рисунок 4.19).

С помощью полученных переходных процессов заметим, что P – регулятор не позволяет достичь уставки, в то время как PI – и PID – регуляторы дают возможность достичь желаемых результатов.

Из этого можно сделать вывод, что P – регулятор быстро реагирует, но имеет ошибку, в то время как PI – и PID – регуляторы дают точное достижение уставки и справляются с возмущением.

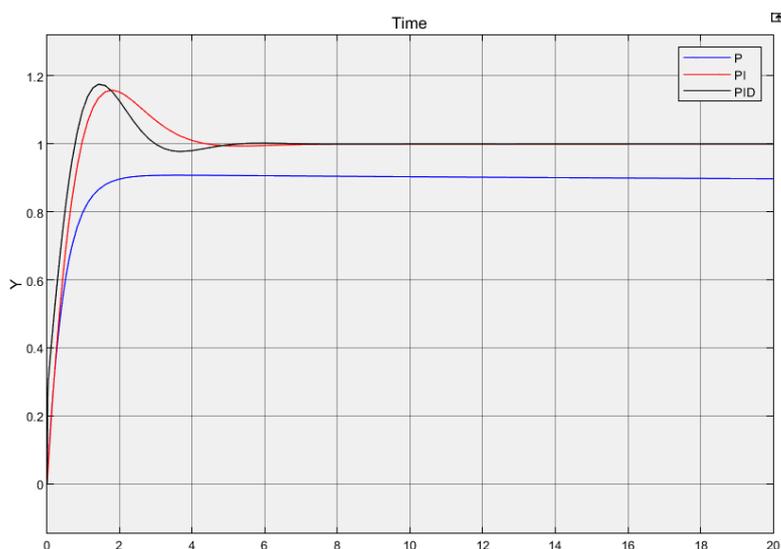


Рисунок 4.19– Переходные процессы системы с P –, PI – и PID – регуляторами

Для определения оценок качества используем переходной процесс PID – регулятора и сравним его, предварительно заполнив таблицу 4.4 (рисунок 4.20).

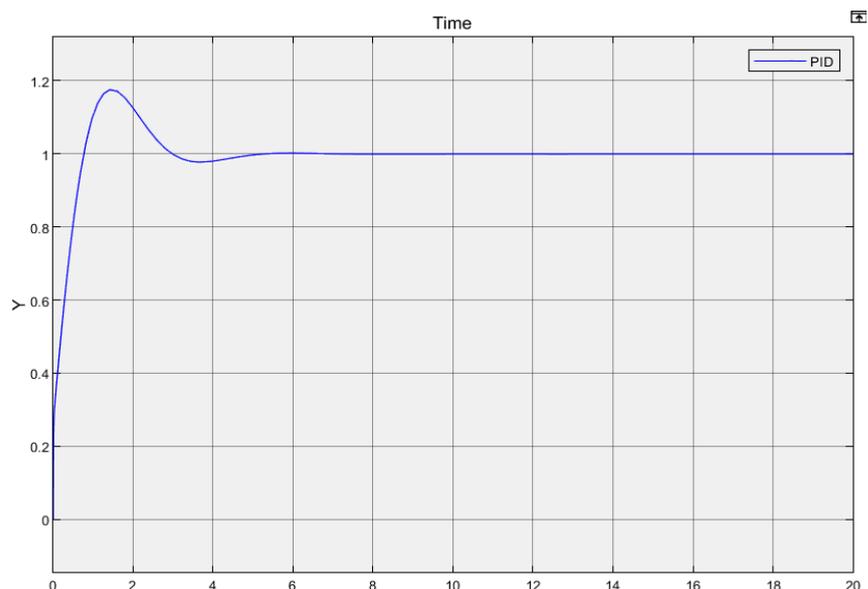


Рисунок 4.20 - Прямые оценки качества переходного процесса с PID регулятором

По полученному переходному процессу заполним таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Прямые оценки качества переходного процесса с PID – регулятором

№	Оценки качества	Значения
1	Время регулирования ( $T_{set}$ )	7 с
2	Перерегулирование ( $P_{OV}$ )	11.7%
3	Число колебаний(M)	0
4	Колебательность( $\mu$ )	-
5	Период колебаний(T)	-
6	Установившаяся ошибка ( $e_{ss}$ )	0.85
7	Время достижения первого максимума ( $T_p$ )	1.5 с
8	Время нарастания ( $T_R$ )	0.75 с
9	Декремент затухания	-

При сравнении показателей оценок качества систем автоматического регулирования, работающего без регулятора и с использованием PID – регулятора, по таким параметрам, как время регулирования, процент перерегулирования и установившаяся ошибка, можно сделать несколько выводов.

Во-первых, система без регулятора, показывает длительное время регулирования и большой процент перерегулирования. Помимо этого,

установившаяся ошибка имеет большое значение, что снижает точность и качество управления технологическим процессом.

Во-вторых, применение PID – регулятора улучшает динамические характеристики системы, параметры которого были получены с помощью метода Циглера-Никольса. Данный метод позволяет подобрать параметры, при которых система достигает уставки с минимальными перерегулированием и временем регулирования.

Исходя из всего сказанного, можно сказать, что PID-регулятор показывает приближенные к желаемым значениям показатели качества регулирования, что выражается в снижении времени регулирования, уменьшении процента перерегулирования и минимизации установившейся ошибки. Такая оптимизация качества управления приводит к повышению стабильности и надежности работы системы, что очень важно при управлении технологическими процессами, таким вакуумная сублимационная сушка, требующая высокую точность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе был подробно рассмотрен процесс вакуумной сублимационной сушки. На основании теоретического анализа трехэтапного процесса сушки были выполнены экспериментальные циклы и получены технологические параметры, которые легли в основу математической модели объекта, позволили определить передаточные функции температурного контура и подобрать настройки ПИД-регуляторов, обеспечивающих отклонение температуры полок. В качестве аппаратной платформы использованы программируемый реле Овен ПР–205 и модули аналогового ввода МВ210–101.

Целью работы было исследование и разработка эффективной системы управления вакуумной сублимационной сушкой, и опираясь на ее устойчивость и качество регулирования. В процессе работы были разработаны структурная и функциональная схемы системы. Проведены анализы динамических свойств разомкнутой и замкнутой системы, определены устойчивость и прямые оценки качества системы.

Параллельно была разработана логика контроллера в среде Owen Logic на языке FBD которая реализует последовательные стадии заморозки, сублимации и нагрева системы, автоматический переход между ними и защиту от аварий. Также была реализована диспетчерская панель управления на базе Simple SCADA обеспечивающая отображение работы системы и трендов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Гаврилов А. В. Автоматизация технологических процессов: учебное пособие / А. В. Гаврилов. – М.: Академия, 2014. – 288 с.
- 2 Иванов П. С., Петров А. Н. Вакуумная сублимационная сушка: теоретические основы и практика. – СПб.: Питер, 2016. – 320 с.
- 3 Кузнецова Е. В. Основы автоматизации технологических процессов. – М.: Высшая школа, 2018. – 256 с.
- 4 Лебедев Д. И. Программируемые логические контроллеры и SCADA-системы: учебное пособие / Д. И. Лебедев. – СПб.: Питер, 2017. – 336 с.
- 5 Миронов С. А. Технология вакуумной сублимационной сушки и оборудование. – Екатеринбург: УрФУ, 2019. – 210 с.
- 6 Никифоров В. И., Козлов А. В. Автоматизация и управление технологическими процессами. – М.: Лань, 2015. – 400 с.
- 7 Орлов В. П. Программирование и настройка ПЛК ОВЕН. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 240 с.
- 8 Рогов С. В. Методы и средства автоматизации в пищевой промышленности. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. – 320 с.
- 9 Савин П. Е. Введение в SCADA системы. – М.: Энергия, 2012. – 192 с.
- 10 Смирнов А. Г. Современные методы управления и автоматизации технологических процессов. – СПб.: Питер, 2016. – 288 с.
- 11 Соловьев И. Ю. Вакуумная и сублимационная сушка: учебный курс / И. Ю. Соловьев. М.: Изд-во МГТУ, 2018. – 275 с.
- 12 Тихонов В. М. Теория автоматического управления: учебник. – М.: Юрайт, 2015. – 512 с.
- 13 Федоров А. Н. Основы промышленной автоматизации. – СПб.: Лань, 2017. – 360 с.
- 14 Чернов В. В. Программирование ПЛК и SCADA: практическое руководство. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 304 с.
- 15 Шевченко Е. И. Современные SCADA-системы: устройство и применение. – СПб.: Питер, 2019. – 280 с.

## **Приложение А**

### **Функциональная схема автоматизации**

## **Приложение Б**

### **Структурная схема автоматизации**

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Риза Төлеби Ғалимжанұлы, Муқажан Мирас Амангельдыұлы

**Соавтор (если имеется):** Муқажан Мирас Амангельдыұлы

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Автоматизация технологического процесса вакуумной сублимационной сушки

**Научный руководитель:** Жанар Омирбекова

**Коэффициент Подобия 1:** 1.5

**Коэффициент Подобия 2:** 0

**Микропробелы:** 0

**Знаки из здругих алфавитов:** 3

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

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

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

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

Обоснование:

Дата

*Ж. Омирбекова*

проверяющий эксперт

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Риза Төлеби Ғалимжанұлы, Муқажан Мирас Амангельдыұлы

**Соавтор (если имеется):** Муқажан Мирас Амангельдыұлы

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Автоматизация технологического процесса вакуумной  сублимационной  сушки

**Научный руководитель:** Жанар Омирбекова

**Коэффициент Подобия 1:** 1.5

**Коэффициент Подобия 2:** 0

**Микропробелы:** 0

**Знаки из здругих алфавитов:** 3

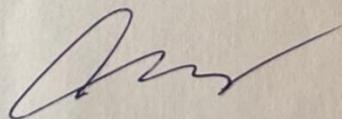
**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

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

Дата



Заведующий кафедрой

## ОТЗЫВ

### НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломный проект

Ризы Төлеби Ғалимжанұлы и Муқажана Мираса Амангельдыұлы по образовательной программе 6B07103 – «Автоматизация и роботизация» на тему: *«Автоматизация технологического процесса вакуумной сублимационной сушки»*

Дипломный проект посвящён разработке автоматизированной системы управления вакуумной сублимационной сушкой – высокотехнологичному процессу, применяемому для бережного удаления влаги из термочувствительных продуктов. Актуальность выбранной темы обусловлена возрастающими требованиями к качеству и стабильности выпускаемой продукции, в том числе в пищевой, фармацевтической и биотехнологической отраслях.

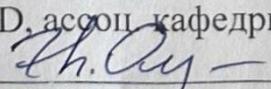
Проект демонстрирует хороший уровень технической подготовки, понимание физических процессов внутри вакуумной камеры, грамотное применение принципов автоматического регулирования и современных программных средств.

Это повысит воспроизводимость процессов, упростит работу оператора и обеспечит стабильное качество конечного продукта. Также это позволит снизить необходимость постоянного вмешательства со стороны персонала и ускорить переходы между производственными циклами.

В целом дипломный проект Ризы Төлеби Ғалимжанұлы и Муқажана Мираса Амангельдыұлы соответствует требованиям к выпускным квалификационным работам, обладает высокой степенью проработанности и практической значимости. Работа выполнена на достойном инженерном уровне, студенты показали самостоятельность, ответственность и аналитическое мышление. Считаю, авторы — присвоения академической степени бакалавра техники и технологии по образовательной программе 6B07103 – «Автоматизация и роботизация».

#### Научный руководитель:

PhD, ассистент кафедры «Автоматизация и управление»

 Омирбекова Ж. Ж.

«18» 06 2025 г.

## РЕЦЕНЗИЯ

На дипломный проект

Риза Төлеби Ғалимжанұлы и Муқажан Мирас Амангельдыұлы

6B07103 – Автоматизация и роботизация

На тему: Автоматизация технологического процесса вакуумной сублимационной сушки

Выполнено:

- а) графическая часть на 2 листах
- б) пояснительная записка на 60 страницах

## ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Дипломная работа посвящена автоматизации технологического процесса вакуумной сублимационной сушки. Основная часть работы состоит из четырех разделов.

В первом разделе дается подробное описание технологического процесса сублимационной сушки, его этапов и особенностей. Во втором разделе рассмотрены принципы разработки автоматизированной системы управления процессом, выбор аппаратной базы и представлена функциональная и структурная схемы. Третий раздел посвящен разработке алгоритмов автоматического регулирования, в том числе использованию программного обеспечения для логического управления и разработки SCADA-системы для мониторинга процесса. Четвертый раздел включает расчетную часть, где выполнена математическая модель САР, проведен синтез регулятора, а также рассмотрены методы анализа и оценки качества работы системы.

В работе освещены теоретические и технические аспекты автоматизации процесса вакуумной сублимационной сушки. Однако, для повышения эффективности системы, особенно в условиях массового производства, будет полезно интегрировать рецептурное управление в алгоритм. Применение рецептурных алгоритмов для таких систем позволит автоматизировать настройку процесса в зависимости от различных характеристик продукции, что значительно повысит гибкость и эффективность управления. Это также позволит значительно улучшить адаптивность системы к изменениям входных данных и условий, таким как колебания влажности или температуры в производственном процессе. Интеграция рецептурного подхода обеспечит не только точность и стабильность в производственном процессе, но и позволит оптимизировать работу системы управления, снизив потребность в постоянном вмешательстве оператора и улучшив качество конечного продукта.

## Оценка работы

Дипломный проект оценивается на «отлично» (95%), и студенты Риза Төлеби Ғалимжанұлы и Муқажан Мирас Амангельдыұлы заслуживают присвоения степени бакалавра по образовательной программе 6B07103 – Автоматизация и роботизация.

### Рецензент

Доктор PhD, доцент

Кафедры «Автоматизация и управление»

АУЭ ИИТ ИИИТ ДАУКеева



Орақбаев Е.Ж.