

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики
Кафедра автоматизації енергетичних процесів**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Володимир ВОЛОЩУК
«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології кібер-енергетичних систем»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

**на тему: «Автоматизація навчального стенду регулювання
температури повітря»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТА-12

Бердниченко Ростислав Миколайович _____

Керівник:

доцент, к.т.н

Степанець Олександр Васильович _____

Консультант з охорони праці:

доцент, к.т.н

Каштанов Сергій Федорович _____

Рецензент:

доцент, к.т.н

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань. Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики

Кафедра автоматизації енергетичних процесів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології кібер-енергетичних систем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Володимир ВОЛОЩУК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Бердниченку Ростиславу Миколайовичу

1. Тема проєкту «Автоматизація навчального стенду регулювання температури повітря», керівник проєкту Степанець Олександр Васильович, доцент, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від «02» червня 2025 р. 1875-с.
2. Термін подання студентом проєкту «___» червня 2025 р.
3. Вихідні дані до проєкту: літературні джерела, зібрані під час проходження виробничої практики.
4. Зміст пояснювальної записки:
 1. Перелік умовних скорочень.
 2. Вступ.
 3. Проєктування АСУТП.
 4. Розрахунок САР.
 5. Опис графічної частини проєкту.
 6. Програмування ПТКЗА.
 7. Імітаційне моделювання АТК.
 8. Охорона праці.
 9. Техніко-економічний розрахунок.
 10. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):

Схема автоматизації функціональна, Специфікація обладнання, Схема принципова електрична, Схема зовнішніх з'єднань та проводок, Креслення загального вигляду щита автоматизації.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каштанов С.Ф., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання «___» квітня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Постановка задачі автоматизації ТОУ. Обґрунтування та аналіз	20.04.2025	
2	Структура ПТК	27.04.2025	
3	Схема автоматизації функціональна	04.05.2025	
4	Креслення загального виду щита	11.05.2025	
5	Монтажна схема щита	13.05.2025	
6	Синтез САР і аналіз її функціонування	18.05.2025	
7	Розрахунок вимірювальних та виконавчих каналів АТК	23.05.2025	
8	Схема принципова електрична	27.05.2025	
9	Розрахунок надійності функціонування АСУ	01.06.2025	
10	Схеми з'єднань та підключень зовнішніх проводок	03.06.2025	
11	Полігонні випробування імітаційної моделі і аналіз функціонування АСУ	04.06.2025	
12	Охорона праці	06.06.2025	
13	Розрахунок техніко-економічної ефективності	07.06.2025	
14	Оформлення пояснювальної записки	09.06.2025	
15	Передзахист ДП	13.06.2025	
16	Захист ДП	20.06.2025	

Студент

Ростислав БЕРДНИЧЕНКО

Керівник

Олександр СТЕПАНЕЦЬ

АНОТАЦІЯ

Даний дипломний проєкт був присвячена розробці навчального стенду регулювання температури повітря. Було окремо розглянуто контур регулювання температури повітря в трубці.

Об'єктом дипломної роботи є навчальний стенд регулювання температури повітря.

Метою дипломної роботи є розробка автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) для навчального стенду нагріву повітря як технологічного об'єкта управління (ТОУ). На локальному рівні програмно-технічного комплексу засобів автоматизації (ПТКЗА) використано програмований логічний контролер (ПЛК) Schneider Electric Modicon M172, призначений для рішень HVAC, зокрема для регулювання температури повітря. Контролерний рівень АСУТП реалізовано за допомогою програмного комплексу EcoStruxure Machine Expert, який підтримує імітаційне моделювання процесу нагріву повітря в автоматизованих технологічних комплексах (АТК). Супервізорний рівень управління реалізовано в HMI/SCADA-системі Ignition для візуалізації та керування процесом

Ключові слова: автоматизована система управління, автоматизація, управління, симуляція, моделювання, навчальний стенд, одноконтурна система.

ANNOTATION

This diploma was devoted to the development of a training stand for air temperature control. The air temperature control circuit in the tube was considered separately.

The object of the thesis is a training stand for air temperature control.

The purpose of the thesis is to develop an automated process control system (APCS) for the air heating training bench as a technological control object (TCO). At the local level of the software and hardware complex of automation equipment (SCAE), a programmable logic controller (PLC) Schneider Electric Modicon M172 was used, designed for HVAC solutions, in particular for air temperature control. The control level of the ACS was implemented using the EcoStruxure Machine Expert HVAC software package, which supports simulation of the air heating process in automated process complexes (APCs). The supervisory level of control is implemented in the HMI/SCADA system Ignition for visualization and process control

Keywords: automated control system, automation, control, simulation, modeling, training bench, cascade system

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСР – автоматична система регулювання

АСУ – автоматизована система управління

АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом

АТК – автоматизований технологічний комплекс

ВК – вимірювальні канали

ВМ – виконавчий механізм

ДПБ – дипломний проєкт бакалавра

ІВС – інформаційно-вимірювальна система

ІМ – імітаційна модель

КЕС – кібер-енергетична система

КПЕ – ключові показники ефективності

КФС – кібер-фізична система

ОУ – об'єкт управління

ПЗ – пояснювальна записка

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний

ПЛК – програмований логічний контролер

ПТЗ – програмно-технічні засоби

ПТКЗА – програмно-технічний комплекс засобів автоматизації

РВК – регулювально-виконавчий канал в складі РВС

РВС – регулювально-виконавча система

АСУТП РО – регулюючий орган

САР – система автоматичного регулювання

ТОУ – технологічного об'єкта управління

ФБ – функціональний блок

HMI – human-machine interface, людино-машинний інтерфейс

PLC – programmable logic controller, програмований логічний контролер

SCADA – supervisory control and data acquisition, диспетчерське управління і збір даних

HVAC – heating, ventilation, & air conditioning, опалення, вентиляція та кондиціювання повітря

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизація навчального стенду регулювання
температури повітря»**

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1 ПРОЄКТУВАННЯ АСУТП	11
1.1 Характеристика технологічного об'єкта управління	11
1.2 Огляд існуючих стендів	11
1.3. Вибір і обґрунтування структури АСУТП ТОУ	14
1.4. Технологічні параметри АСУТП ТОУ	15
1.5. Функції АСУТП	15
1.6. Схема автоматизації функціональна	16
1.7. Схема структурна програмно-технічного комплексу	17
1.8. Перелік і аналіз джерел техніко-економічної ефективності АТК ТОУ	18
РОЗДІЛ 2 ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК САР.....	19
2.1. Інженерний розрахунок вимірювальних каналів САР	19
2.1.1. Перелік вимірювальних каналів	19
2.1.2 Схеми структурні вимірювальних каналів	19
9 2.1.3. Особливості електричних підключень давачів вимірювальних каналів ...	20
2.1.5. Захист технічних засобів вимірювальних каналів від перешкод.....	21
2.1.6. Схеми структурні надійності вимірювальних каналів	21
2.1.7 Метрологічний розрахунок вимірювальних каналів.....	21
2.1.8. Розрахунок надійності вимірювальних каналів.....	23
2.1.9. Функції первинної обробки даних вимірювання в ПЛК	24
2.1.10. Висновок щодо роботоздатності вимірювальних каналів САР	24
2.2. Інженерний розрахунок регульовально-виконавчих каналів САР	25
2.2.1. Перелік систем автоматичного регулювання	25
2.2.2. Функціональна і структурна схеми САР	25
2.2.3. Схема структурна регульовально-виконавчого каналу САР.....	27
2.2.4. Схема структурна програмно-технічних засобів САР	27

2.2.5. Схема структурна надійності реалізації управляючої функції САР	28
2.2.6. Розрахунок надійності реалізації управляючої функції САР	28
2.2.7. Ідентифікація об'єкта управління	30
2.2.8. Розрахунок регуляторів САР	32
2.2.9. Функціональне моделювання САР	42
2.2.10. Висновки щодо роботоздатності РВК САР	47
РОЗДІЛ 3 ОПИС ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ ПРОЄКТУ	48
3.1 Схема функціональна автоматизації ТОУ	48
3.2 Схема структурна ПТК	48
3.3 Схема принципова електрична АСР	48
3.4 Креслення загального виду щита	49
3.5 Схема монтажна щита (таблиця з'єднань)	49
3.6 Схема зовнішніх з'єднань	49
3.7 Специфікація обладнання	50
РОЗДІЛ 5 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АТК	60
5.1 Схема структурна полігону імітаційного моделювання АТК ТОУ	60
9 5.2 Реалізація контролерної функціональності САР в НАВС	60
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ	61
7.1 Техніко-економічний розрахунок для навчального стенду	68
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72

ВСТУП

Сучасні технології автоматизації відіграють ключову роль у підвищенні ефективності та точності управління технологічними процесами в різних галузях, зокрема у системах опалення, вентиляції та кондиціювання (HVAC). Розробка навчальних стендів для вивчення таких систем є важливим завданням, оскільки вони дозволяють студентам і фахівцям набувати практичних навичок у програмуванні, налаштуванні та управлінні автоматизованими системами. Цей дипломний роботпроект присвячена створенню навчального стенду для регулювання температури повітря, який слугуватиме платформою для дослідження та практичного освоєння технологій автоматизації.

Метою даного проекту є розробка автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) для навчального стенду нагріву повітря як технологічного об'єкта управління (ТОУ). У межах проекту реалізовано локальний рівень автоматизації з використанням програмованого логічного контролера (ПЛК) Schneider Electric Modicon M172, призначеного для рішень HVAC, а також програмного комплексу EcoStruxure Machine Expert HVAC для імітаційного моделювання процесу. Супервізорний рівень управління втілено в HMI/SCADA-системі Ignition Designer, що забезпечує візуалізацію та контроль процесу нагріву повітря. Проект спрямований на створення ефективного інструменту для навчання та тестування систем автоматизації.

Завдяки HMI/SCADA-системі Ignition навчальний стенд отримав зручний і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що спрощує керування та сприяє ефективному вивченню студентами принципів роботи АСУТП. Проект має високу практичну цінність, оскільки створює умови для підготовки кваліфікованих фахівців у галузі автоматизації технологічних процесів, здатних застосовувати отримані знання в реальних проектах.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						10
Зм.	Арк.			Дата		

РОЗДІЛ 1 ПРОЄКТУВАННЯ АСУТП

1.1 Характеристика технологічного об'єкта управління

Технологічним об'єктом управління (ТОУ) є навчальний стенд для нагріву повітря, призначений для підтримання заданої температури повітря в трубці. Основним елементом стенду є поліамідний нагрівальний елемент, керований через широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ) за допомогою програмованого логічного контролера (ПЛК) Schneider Electric Modicon M172. Процес включає такі основні стадії:

- нагрівання повітря до заданої температури за допомогою нагрівального елемента.
- контроль температури за допомогою датчика температури NTC10k.
- подача нагрітого повітря на вихід трубки.

Стенд моделює роботу

систем опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC), що дозволяє студентам вивчати принципи автоматизації технологічних процесів. Основні вхідні потоки: електроенергія (230 В постійного струму) та повітря з навколишнього середовища. Проміжні потоки включають ШИМ-сигнал для керування нагрівачем і дані з датчика температури. Вихідним потоком є нагріте повітря та дані про стан системи, що передаються в HMI/SCADA-систему Ignition.

1.2 Огляд існуючих стендів

Було розглянуто такі стенди як:

- навчальний стенд «Системи керування HVAC для будівель» [1]

Призначення: даний стенд розроблений для вивчення принципів роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC). Він орієнтований на студентів технічних спеціальностей і дозволяє досліджувати процеси автоматизації та керування HVAC-системами в умовах сучасних будівель.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						11
Зм.	Арк.			Дата		

Функціональні можливості:

- моделювання роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря;
- практичне налаштування параметрів керування, таких як температура, вологість та повітряний потік;
- наявність інтерфейсу для програмування та моніторингу процесів у реальному часі.

Ключові особливості:

- компактна конструкція, що ідеально підходить для використання в умовах навчальних лабораторій;
- інтерактивні елементи, які забезпечують можливість проведення практичних занять;
- сумісність зі сучасними стандартами автоматизації будівель, що дозволяє ознайомитись із актуальними технологіями в галузі.

Сфера застосування: стенд є ефективним навчальним інструментом для закладів вищої та середньої технічної освіти, де здійснюється підготовка фахівців у сфері автоматизації та енергоефективності. Його використання сприяє глибшому розумінню принципів побудови, роботи та налаштування систем HVAC, що є важливими складовими сучасних інженерних рішень у сфері кліматичного забезпечення будівель.

Навчальний стенд ПОСП-13 " Навчальний стенд: «Тепловий насос повітря–вода» від StandLab [2]

Призначення:

Стенд призначений для вивчення принципів роботи теплових насосів типу «повітря–вода», які застосовуються для опалення, охолодження та гарячого водопостачання. Розроблений для студентів технічних спеціальностей, він дозволяє досліджувати функціонування теплового насоса в умовах, наближених до реальних.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						12
Зм.	Арк.			Дата		

Функціональні можливості:

- демонстрація принципу теплопередачі від повітря до води;
- вивчення ключових компонентів системи: компресора, теплообмінників, розширювального вентиля, датчиків температури та тиску;
- практичне налаштування та моніторинг роботи теплового насоса (регулювання температури, аналіз енергоефективності);
- інтерфейс для програмування та збору даних у режимі реального часу.

Ключові особливості:

- реалістична модель теплового насоса, яка дозволяє імітувати різні режими роботи;
- вомпактна конструкція, зручна для використання в навчальних лабораторіях;
- вбудовані вимірювальні прилади, що забезпечують зчитування параметрів: температура, тиск, споживання енергії тощо.

Сфера застосування: стенд активно використовується у вищих та середніх навчальних закладах, що здійснюють підготовку фахівців у галузі енергоефективних технологій, теплопостачання та сучасних систем опалення. Він є ефективним інструментом для набуття практичних знань і навичок, пов'язаних з експлуатацією теплових насосів.

Навчальний стенд: «Control System with Python — Air Heater System» [3]

Призначення: стенд призначений для вивчення принципів моделювання та керування повітряною системою обігріву з використанням мови програмування Python. Він орієнтований на навчання студентів та спеціалістів в галузі автоматизації, моделювання та аналізу інженерних систем.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						13
Зм.	Арк.			Дата		

Функціональні можливості:

- використання SCADA-системи Ignition для віддаленого керування процесом через веб-інтерфейси;
- реалізований ПІД-регулятор для автоматичного керування температурою в системі;
- візуалізація процесів у реальному часі, включно з графіками температури та відгуку системи;
- можливість моделювання та налаштування алгоритмів керування без використання фізичного ПЛК.

Ключові особливості:

- Замість ПЛК використовується модуль введення/виведення (I/O Module), що забезпечує гнучке підключення та керування;
- Інтерактивне середовище для розробки та тестування алгоритмів на Python;
- Підтримка симуляції сценаріїв у реальному часі для аналізу динаміки системи.

Сфера застосування: стенд призначений для студентів технічних спеціальностей, а також для інженерів і дослідників, які вивчають теорію автоматичного керування, системну інженерію, або програмування в Python. Він є ефективним інструментом для набуття практичних навичок у побудові сучасних систем керування та симуляції інженерних задач.

1.3. Вибір і обґрунтування структури АСУТП ТОУ

Для управління технологічним процесом обрано одноконтурну систему автоматичного керування (САК) з двома регулюючими параметрами:

- нагрів повітря: реалізовано за допомогою ПІД-регулятора.

ПІД-регулятор аналізує дані з датчика температури та вмикає або вимикає нагрівальний елемент, забезпечуючи стабільну температуру на виході.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						14
Зм.	Арк.			Дата		

1.4. Технологічні параметри АСУТП ТОУ

Основні технологічні параметри системи наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Основні параметри технологічного процесу

Параметр	№ з/п	Допустиме відхилення
Вхідна напруга	230 В DC	±5 %
Потужність нагрівача	12–18 Вт	±10 %
Робоча температура нагрівача	10–50 °C	±5 °C
Вихідна температура повітря	10–40 °C	±2 °C

Вплив відхилень параметрів:

- перегрів (температура >55 °C) може призвести до пошкодження нагрівального елемента.
- недостатній нагрів не забезпечує задану вихідну температуру.
- нестабільне живлення викликає некоректну роботу ПЛК та виконавчих механізмів.

1.5. Функції АСУТП

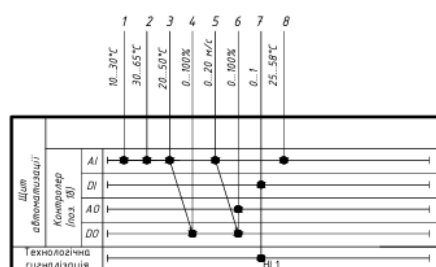
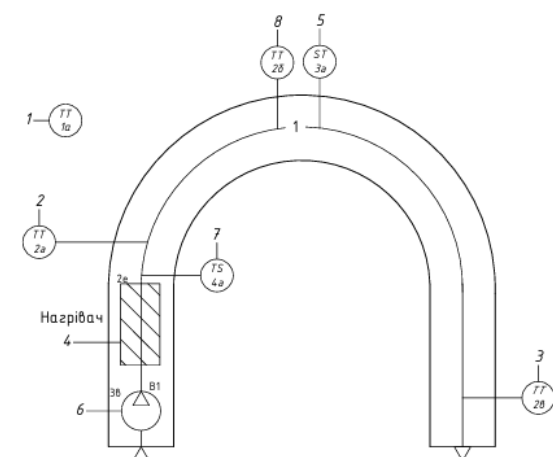
Автоматизована система управління технологічним процесом виконує такі функції:

- технологічний контроль: безперервний моніторинг температури повітря в трубці за допомогою датчиків NTC10k, підключених до ПЛК. Дані обробляються в реальному часі для забезпечення стабільної роботи системи.

- автоматичне регулювання: ПІД-регулятор у ПЛК керує нагрівальним елементом через ШІМ-сигнал, підтримуючи задану температуру. Вентилятор керується реле (ввімкнення/вимкнення).
- технологічний захист і блокування: автоматичне відключення та перехід у безпечний режим при перегріві нагрівача.
- візуалізація та моніторинг: HMI/SCADA-система Ignition забезпечує відображення параметрів, графіків температури, історії роботи та віддалене керування.

1.6. Схема автоматизації функціональна

На рисунку 1.1 наведено загальну структуру об'єкта управління.



Умовні позначення трубопроводів та обладнання

Позначення	Найменування
- L -	Повітря
В1	Вентилятор

ТА-12402.002.001.АТХ.А					
АСК температури повітря лабораторного стенду					
Зм.	Кільк.	Арх.	ВР док.	Підп.	Дата
Розробив	Варваровський Р.П.				
Перевірив	Степанюк О.В.				
Н.контр.				Схема автоматизації функціональна	Етап
Г.контр.				ДП	Архув
Затвердив				Володимир В.А.	1
					ТА-12 НН ІАТЕ

Рисунок 1.1 – Схема автоматизації функціональна

Для вимірювання технологічних параметрів у проєкті застосовуються наступні прилади:

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Арк.			Дата		16

- для вимірювання температури повітря в трубці використовуються датчики температури (ТТ.2а) межа виміру (-10-50) °С;
- для вимірювання швидкості повітря в трубці використовується датчик (СТ.3а) з аналоговим вихідним сигналом (0-10) В, межа виміру (0-20) м/с.

1.7. Схема структурна програмно-технічного комплексу

Структурна схема рисунок 1.2 програмно-технічного комплексу (ПТК) включає такі компоненти:

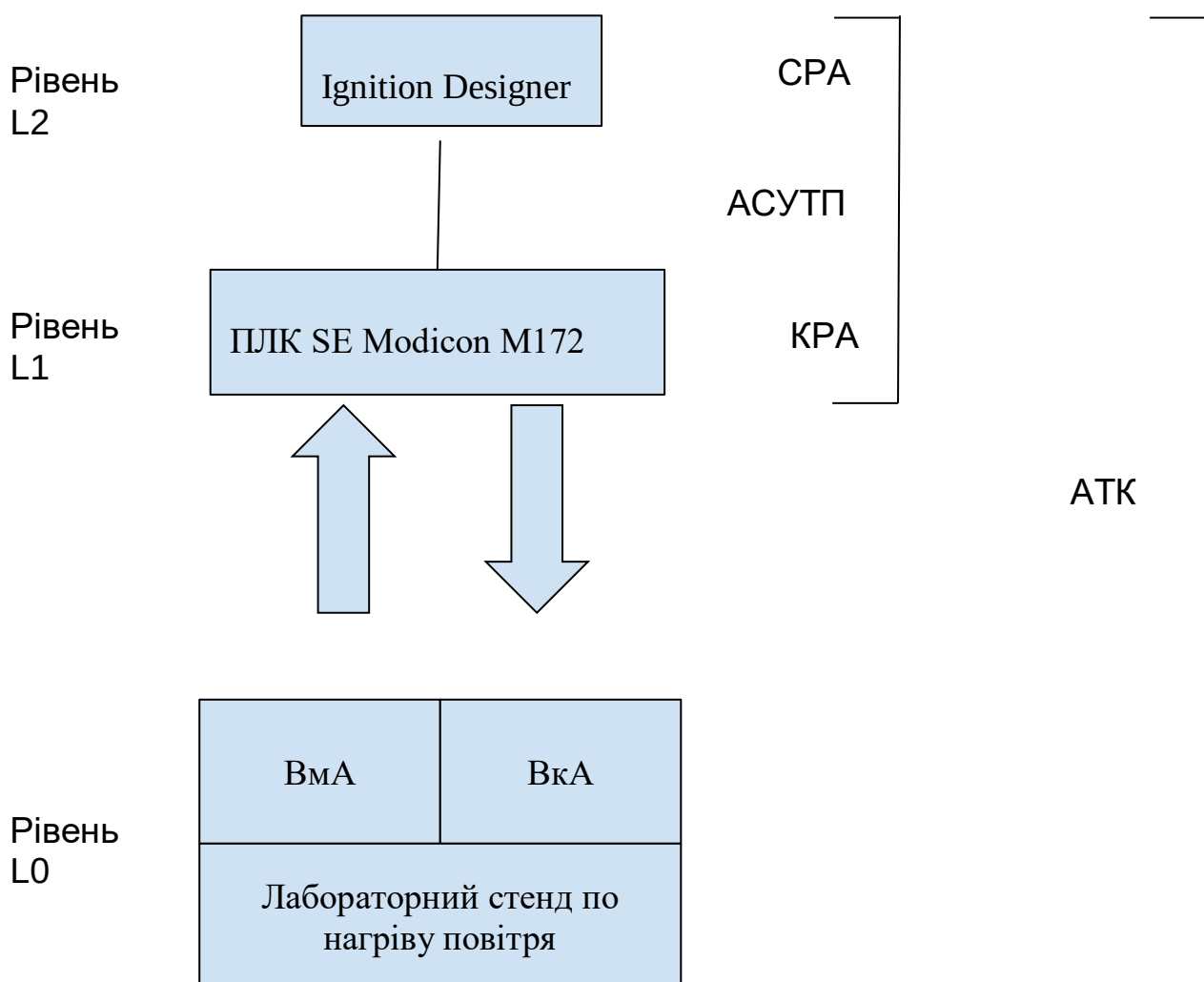


Рисунок 1.2 – Схема структурна програмно-технічного комплексу

Перелік умовних позначень до рис. 1.2:

ВмА – вимірювальна апаратура.

ВкА – виконавча апаратура.

ПЛК – програмований логічний контролер.

СРА – супервізорний рівень автоматизації.

АСУТП – автоматизована система управління технологічними процесами.

КРА – контролерний рівень автоматизації.

АТК – автоматизований технічний комплекс

1.8. Перелік і аналіз джерел техніко-економічної ефективності АТК ТОУ

Техніко-економічна ефективність автоматизованого технологічного комплексу (АТК) ТОУ досягається завдяки таким джерелам:

Зниження витрат на навчання: використання компактного навчального стенду дозволяє економити ресурси порівняно з реальними промисловими системами, забезпечуючи аналогічний функціонал для вивчення автоматизації.

Енергоефективність: ПІД-регулятор оптимізує роботу нагрівача, зменшуючи енергоспоживання. Використання релейного керування вентилятором спрощує систему, знижуючи витрати на обладнання.

Надійність і безпека: система захисту (блокування, автоматичне відключення при перегріві) зменшує ризик пошкодження обладнання, подовжуючи термін його служби.

Гнучкість і масштабованість: HMI/SCADA-система Ignition дозволяє легко налаштовувати параметри та інтегрувати додаткові функції, що підвищує універсальність стенду.

Практична цінність: стенд готує фахівців, здатних працювати з реальними системами HVAC, що знижує витрати на додаткове навчання персоналу в промислових умовах.

Аналіз ефективності:

Технічна ефективність: точність регулювання температури (± 2 °C) і надійність системи забезпечують якісне навчання та дослідження.

Економічна ефективність: використання стандартних компонентів (ПЛК, датчики, SCADA) знижує собівартість стенду. Енергоефективність зменшує експлуатаційні витрати.

Освітня ефективність: інтерактивний інтерфейс і можливість моделювання різних режимів роботи сприяють глибокому розумінню принципів АСУТП.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						18
Зм.	Арк.			Дата		

РОЗДІЛ 2 ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК САР

2.1. Інженерний розрахунок вимірювальних каналів САР

2.1.1. Перелік вимірювальних каналів

Система автоматичного регулювання (САР) навчального стенду для нагріву повітря включає два вимірювальні канали для контролю температури повітря в трубці, та третій вимірювальний канал для проведення статистики в порівнянні з другим датчиком, на скільки велика різниця між температурами посередині трубки та в кінці :

- ВК1: вимірювання температури повітря за допомогою датчика температури NTC10K, підключеного до ПЛК Schneider Electric Modicon M172.
- ВК2: вимірювання температури повітря за допомогою датчика температури NTC10K, підключеного до ПЛК Schneider Electric Modicon M172.
- ВК3: вимірювання температури повітря за допомогою датчика температури NTC10K, підключеного до ПЛК Schneider Electric Modicon M172.
- ВК4: вимірювання швидкості повітря за допомогою датчика швидкості КАН air velocity, підключеного до ПЛК Schneider Electric Modicon M172.

2.1.2 Схеми структурні вимірювальних каналів

Структурні схеми вимірювальних каналів ВК1, ВК2 та ВК3 включають:

Схему структурну ВК температури повітря зображено на рис. 2.1.

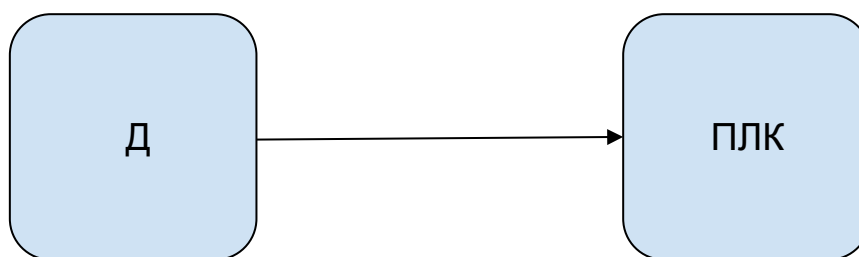


Рисунок 2.1 – Схема структурна ВК температури повітря

Д – давач з дискретним уніфікованим вихідним сигналом

ПЛК – вхід програмованого логічного контролера

Номенклатура (модель) давача: NTC10K

Схему структурну ВК швидкості повітря зображено на рис. 2.2.

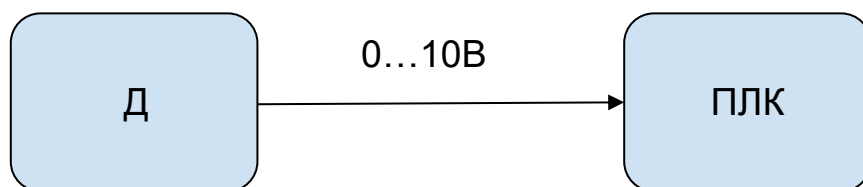


Рисунок 2.2 – Схема структурна ВК швидкості повітря

Д – давач з аналоговим уніфікованим вихідним сигналом 0..10 В

ПЛК – вхід програмованого логічного контролера

Номенклатура (модель) давача: КАН air velocity

2.1.3. Особливості електричних підключень давачів вимірювальних каналів

Датчик температури NTC10K підключений до ПЛК через двопровідну схему з використанням екранованого кабелю типу КВВГ 2х0,75 мм². Основні особливості:

- номінальний опір датчика становить 10 кОм при 25 °С.
- підключення до аналогового входу ПЛК (0–10 В або 4–20 мА) з використанням резистора для перетворення сигналу.
- живлення датчика забезпечується від блоку живлення ABL 2REM24065K.

2.1.4. Монтаж технічних засобів вимірювальних каналів

Датчик температури встановлено всередині трубки стенду в точці, що забезпечує точне вимірювання температури повітряного потоку. Монтаж виконано з урахуванням:

- фіксації датчика за допомогою кріпильного елемента для запобігання вібрації.
- розташування кабелю в захисному гофрованому рукаві для механічного захисту.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						20
Зм.	Арк.			Дата		

2.1.5. Захист технічних засобів вимірювальних каналів від перешкод

Для захисту від електромагнітних перешкод використано:

- екранований кабель КВВГ 2х0,75 мм² для передачі сигналу від датчика до ПЛК.
- заземлення екрану кабелю на стороні ПЛК для зменшення впливу електромагнітних полів.
- фільтри низьких частот в аналоговому вході ПЛК для придушення шумів.
- розташування кабелю подалі від силових ліній нагрівача та вентилятора.

2.1.6. Схеми структурні надійності вимірювальних каналів

На основі одноконтурної САР температурою повітря розглянемо схему структурну надійності ВК. Ця САР складається з одного ВК, відповідно структурна схема набуває наступного вигляду Рисунок 2.3.



Рисунок 2.3 Схему структурної надійності ВК САР температурою повітря

2.1.7 Метрологічний розрахунок вимірювальних каналів

Вимоги щодо необхідної точності вимірювання були сформульовані у табл. 1.1. У табл. 2.1 наведені основні параметри ВК САР температурою повітря на основі яких буде проведений метрологічний розрахунок.

Таблиця 2.1 – Основні параметри ВК САР температурою повітря.

ВК №	Елемент ВК	Клас точності	Діапазон вимірювання
1	NTC 10K	1	-50...110 °C
	ПЛК SE Modicon M172	1	

Межа основної приведенної похибки ВК виводиться за формулою:

$$\varepsilon_{д-плк} = \sqrt{\varepsilon_{д}^2 + \varepsilon_{плк}^2} \quad 2.1$$

За формулою 2.1 вираховуємо межу основної приведенної похибки ВК:

$$\sqrt{1^2 + 1^2} = 1.4\%$$

Межа абсолютної похибки розраховується за формулою:

$$\Delta_{д} = \frac{\varepsilon_{д}(x_{max} - x_{min})}{100} \quad (2.2)$$

У формулі 2.2

$\varepsilon_{д}$ – клас точності давача;

x_{max} – це максимальне значення вимірюваної величини;

x_{min} – це мінімальне значення вимірюваної величини.

Межа абсолютної похибки для давачів температури:

$$\Delta_{д} = \frac{1.4 \cdot (110 - (-50))}{100} = 2.2^{\circ}\text{C}$$

Результат розрахунків за ВК №1:

$$X_{д-плк} = \square \pm 2.2^{\circ}\text{C}$$

Отримані результати метрологічних розрахунків ВК САР температурою повітря наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2- отримані результати

ВК №	Межа основної допустимої приведенної похибки	Межа абсолютної похибки	Результат розрахунків
1	1.4%	2.2°C	±2.2°C

2.1.8. Розрахунок надійності вимірювальних каналів

У табл. 2.3 наведений середній час напрацювання на відмову (MTBF/ MTTF) елементів ВК САР температурою повітря в трубці.

Таблиця 2.3 – Середній час напрацювання на відмову елементів ВК

Елемент ВК	Т _{ср} , год
ПЛК SE Modicon M172	60 000
Датчик температури NTC 10K	10 000
Датчик температури NTC 10K	10 000
Датчик температури NTC 10K	10 000

Оскільки Т_{ср} давачів кожного ВК є однаковими, то числові значення розрахунків будуть ідентичними.

Задамо середній час на відмову $T_{ср}^* = 8\,000$ год та коефіцієнт готовності $\square_{гот} = 0,999$.

Інтенсивність відмов вираховується за формулою:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \lambda_d \quad 2.3$$

Розрахунок інтенсивності відмов для ВК1

$$\frac{1}{10000} + \frac{1}{60000} = 11,7 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{год}}$$

Середній час напрацювання на відмову розраховується за формулою:

$$T_{ср} = \frac{1}{\lambda_d} \quad 2.4$$

За формулою 2.4:

$$T_{ср} = \frac{1}{11,7 \cdot 10^{-5}} = 8547 \text{ год.}$$

Оскільки $T_{ср} > T_{ср}^*$ то можна зробити висновок, що структура вимірювальних каналів коректна

2.1.9. Функції первинної обробки даних вимірювання в ПЛК

ПЛК Schneider Electric Modicon M172 виконує такі функції первинної обробки даних:

- ПЛК приймає вхідні сигнали від вимірювальних пристроїв, таких як датчики температури або швидкості потоку повітря, зчитуючи як аналогові, так і цифрові дані з підключених сенсорів. Отримана інформація зберігається для подальшої обробки в системі керування.
- Для підвищення точності вимірювань, які можуть бути спотворені шумом або перешкодами, ПЛК здатен застосовувати фільтрацію, щоб зменшити вплив цих факторів. Також можуть використовуватися методи компенсації для корекції зміщень або нелінійних спотворень, що забезпечує вищу якість і достовірність даних.

2.1.10. Висновок щодо роботоздатності вимірювальних каналів САР

Вимірювальний канал ВК1 забезпечує вимірювання температури повітря (± 2.2 °C) і захист від перешкод. Канал відповідає вимогам навчального стенду, забезпечуючи стабільний моніторинг температури та передачу даних для подальшого аналізу в SCADA.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						24
Зм.	Арк.			Дата		

2.2. Інженерний розрахунок регулювально-виконавчих каналів САР

2.2.1. Перелік систем автоматичного регулювання

Тип САР температури повітря: одноконтурна

Завдання:

- задане значення температури повітря — температура, яку користувач задає вручну.

-режим швидкості вентилятора – користувач сам вибирає режим швидкості (перший, другий або вимкнення вентилятора)

Регульований параметр: температура повітря — виміряна температура в трубці.

Об'єкт управління: нагрівач як об'єкт, який змінює температуру повітря; це об'єкт з самовирівнюванням, оскільки температура стабілізується при відсутності збурень.

Використовуваний регулюючий орган — нагрівач та вентилятор.

2.2.2. Функціональна і структурна схеми САР

Структурна схема одноконтурної САР температури повітря [4] зображена на Рисунку 2.3.

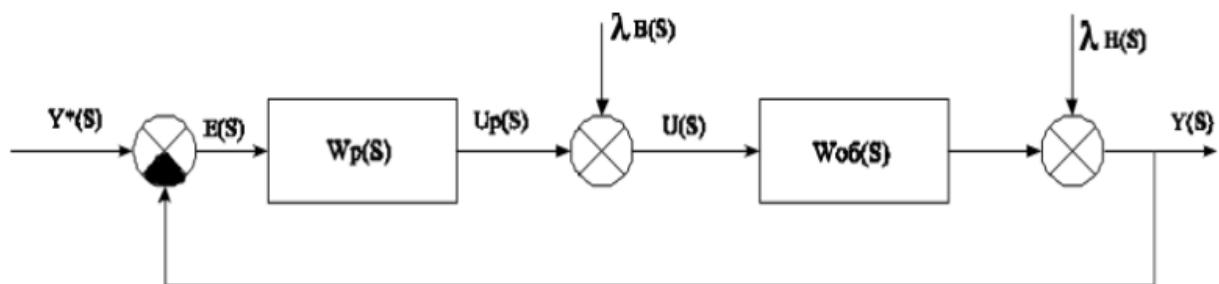


Рисунок 2.3-Схема структурна САР температури

Перелік позначень до рисунку 2.3

Перелік позначень до рис. 1.5:

- s – оператор Лапласа (оператор диференціювання ddt).
- $W_{об}(s)$ – передавальна функція об'єкту управління (ОУ). $Y_s = W_{об}s \times U_s$.

- $W_p(s)$ – передавальна функція регулятора (РЕГ). $U_{ps}=W_{ps} \times E_s$.
- $Y^*(s)$ – задане значення (уставка) регульованого параметру (Set Value – SV).
- $Y(s)$ – поточне значення регульованого параметру (Process Value – PV).
- $E(s) = [Y^*(s) - Y(s)]$ – розбаланс регульованого параметру (Error Value – EV).
- $U_p(s)$ – управляюча дія регулятора режимного параметру (Control Value – CV) – задане положення регулюючого органу РО.
- $U(s)$ – управляюча дія на ОУ
- $\Lambda_v(s)$ – сигнальне збурення зі сторони РО
- $\Lambda_n(s)$ – сигнальне збурення зі сторони навантаження

Джерелом збурення являється вентилятор, який керується вручну, без участі системи автоматичного регулювання, може призводити до змін витрати повітря через нагрівач при незмінному стані нагрівача

2.2.3. Схема структурна регулювально-виконавчого каналу САР

На рисунку 2.4 зображено схему регулювально виконавчого каналу САР

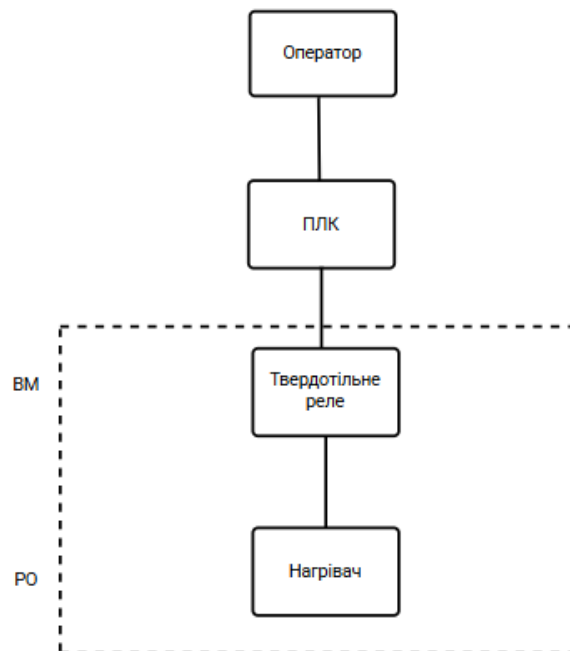


Рисунок 2.4- схема регулювально виконавчого каналу

У якості виконавчого механізму обрано твердотільне реле, яке керує роботою регулюючого органа — нагрівача, включаючи чи виключаючи його залежно від сигналу від ПЛК. Принцип роботи полягає в тому, що інформація обробляється в ПЛК, потім сигнал подається на твердотільне реле, яке швидко активує або деактивує нагрівач. Це дозволяє підтримувати температуру повітря увімкненням/вимкненням нагрівача, забезпечуючи кращу точність і менший знос порівняно з механічними реле, впливаючи на загальну температуру в контрольованій зоні.

2.2.4. Схема структурна програмно-технічних засобів САР

Для вибраної САР, структура, яка наведена в пунктів 1.7 є аналогічною. Дані передаються по протоколу Modbus TCP. Використовується інтерфейс Ethernet. Оброблюються дані контролером, відмінністю є те, що використовуються один контур, для якого треба датчик температури та виконавчий механізми з регулюючим органом.

2.2.5. Схема структурна надійності реалізації управляючої функції САР

Оскільки одноконтурна САР температурою повітря в трубі складається з двох РВК, відповідно структурна схема надійності реалізації управляючої функції набуває наступного вигляду, зображеного на Рисунку 2.5

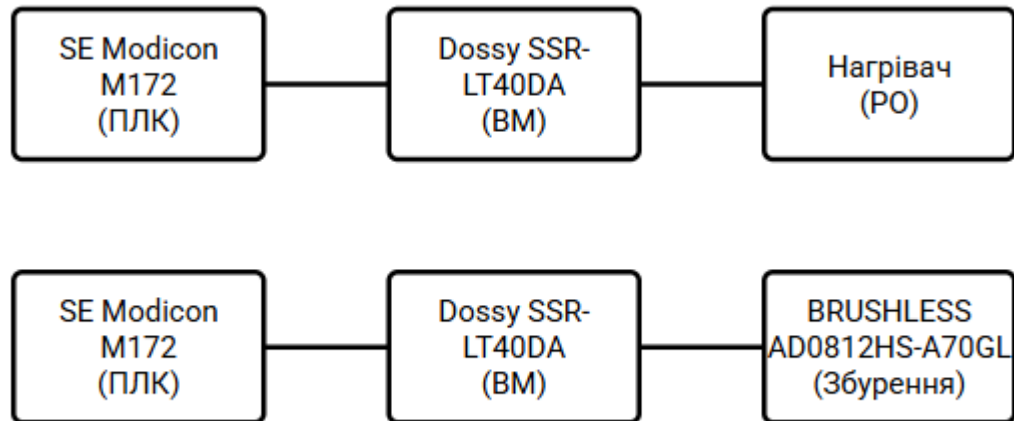


Рисунок 2.5 - структурна схема надійності реалізації управляючої функції

Схема демонструє два контури з використанням PLC SE Modicon M172 та твердотільного реле Dossy SSR-LT40DA як виконавчого механізму. Перший контур включає нагрівач для термічного регулювання, а другий — вентилятор XBR 7015S для забезпечення повітряного потоку. Надійність забезпечується завдяки високій швидкості перемикання реле, стабільності PLC та відповідності виконавчих механізмів заданим умовам,

2.2.6. Розрахунок надійності реалізації управляючої функції САР

У таблиці 2.4 наведено середній час напрацювання на відмову (MTBF/MTTF) елементів регульовально-виконавчого каналу (РВК) системи автоматичного регулювання (САР) температурою повітря в рамках даної академічної роботи.

Таблиця 2.4 – Середній час напрацювання на відмову (MTBF/MTTF) елементів РВК САР температурою повітря

РВК номер	Елемент РВК	Тср, год
1	ПЛК SE Modicon M172	60 000
	Dossy SSR-LT40DA	100 000
	Нагрівач	20 000

Розрахунки надійності:

середній час напрацювання РВК на відмову ($MTBF_{\text{хox}}$)

Для послідовної системи $MTBF_{\text{хox}}$ розраховується як зворотне значення суми інтенсивностей відмов. Інтенсивність відмови для кожного елемента:

- λ_1 (ПЛК) = $1 / 60\,000 = 1.67 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$;
- λ_2 (Реле) = $1 / 100\,000 = 1 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$;
- λ_3 (Нагрівач) = $1 / 20\,000 = 5 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$;

сукупна інтенсивність відмови:

$$\lambda_{\text{заг}} = \lambda^1 + \lambda^2 + \lambda^3 = 1.67 \times 10^{-5} + 1 \times 10^{-5} + 5 \times 10^{-5} = 7.67 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$$

Середній час напрацювання на відмову:

$$MTBF_{\text{хox}} = 1 / \lambda_{\text{хox}} \quad 2.5$$

За формулою 2.5:

$$1 / (7.67 \times 10^{-5}) \approx 13\,036,6 \text{ годин.}$$

Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ розраховується за формулою:

$$P(t) = e^{-\lambda_{\text{хox}} \cdot t} \quad 2.6$$

Для $t = 1000$ годин:

$$P(1000) = e^{-(7.67 \cdot 10^5) \cdot 1000} = e^{-0.0767} \approx 0.926 .$$

Середній час відновлення роботоспроможності (MTTR)

- ПЛК SE Modicon M172: MTTR $\approx$ 1 година;
- Dossy SSR-LT40DA: MTTR $\approx$ 0,5 години;
- нагрівач: MTTR $\approx$ 2 години;

Середній час відновлення для РВК: $MTTR_{\text{хох}} = (1 + 0,5 + 2) / 3 \approx 1,17$ години.

2.2.7. Ідентифікація об'єкта управління

ОУ класифікується як об'єкт із самовирівнюванням. Це обґрунтовується тим, що після припинення регулювальної дії (вимкнення нагрівача) температура повітря в стенді поступово повертається до початкового стану через теплові втрати, що характерно для самовирівнювальних систем.

Оскільки об'єкт має самовирівнювання, задана модель являє собою послідовне з'єднання ланки транспортного запізнення та аперіодичної ланки першого порядку. Ланка транспортного запізнення вводиться штучно для апроксимації перехідного запізнення в ОУ.

У якості випереджальної (швидкісної) частини ОУ $W_{\text{вп}}(s)$ використовується ОУ з наступними характеристиками:

- $K_{\text{вп}} = 0,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{pO}}$ (коефіцієнт підсилення, визначений як зміна температури на одиницю зміни вхідного сигналу);
- $T_{\text{вп}} = 30$ с (часова стала випереджальної частини);
- $\tau_{\text{вп}} = 8$ с (час транспортного запізнення);

Передавальна функція :

$$W_{\text{вп}}(s) = \frac{K_{\text{вп}}}{(T_{\text{вп}}s + 1)} * e^{-\tau_{\text{вп}}s} = \frac{0,5}{(30s+1)} * e^{-8s} \quad 2.7$$

Передавальна функція ОУ

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						30
Зм.	Арк.			Дата		

Криву розгону для об'єкта отримаємо за допомогою побудованої схеми (Рисунок. 2.6)

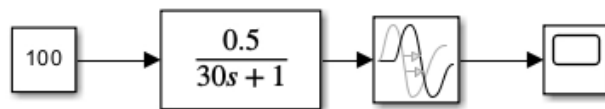


Рисунок 2.6 Схема для побудови розгінної характеристика об'єкта управління

Після побудови схеми в Scade отримаємо графік перехідної характеристики рисунок 2.7

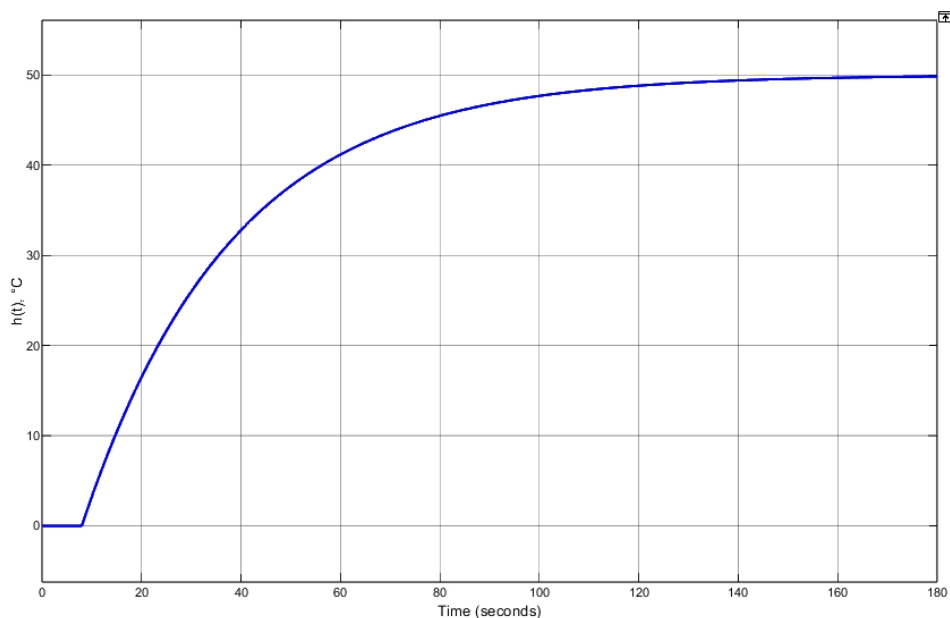


Рисунок 2.7 Розгінна характеристика

2.2.8. Розрахунок регуляторів САР

Вимоги до якості регулювання [5] формуються через прямі показники якості перехідного процесу, що характеризуються:

- нульовим перерегулюванням;
- мінімальним часом регулювання не більше 100 секунд;
- відсутністю коливань;

Стандартна модель ОУ

Стандартна модель ОУ, отримана в розділі 2.2.7, має передавальну функцію:

$$W(s) = \frac{0,5}{30s+1} \cdot e^{-8s}, \text{ де:}$$

- $0,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{ВМ}}$ – коефіцієнт підсилення (Квп);
- 30 с – часова стала (Твп);
- 8 с – час транспортного запізнення (твп);

Розрахунок параметрів регулятора буде виконано трьома методами: методом РАФХ, та експрес-методом ВТІ з нульовим перерегулюванням.

Розрахунок методом РАФХ:

Оберемо перехідний процес зі степенем затухання $\psi=0.98$ та коефіцієнтом коливальної стійкості $m = 0.6227$. Таке значення було взято з міркувань зменшення коливальності перехідного процесу САР.

Спочатку побудуємо АФХ та РАФХ за допомогою наступного m-файлу:

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						32
Зм.	Арк.			Дата		


```

1      w=0:0.0001:0.6;
2      p=1j*w;
3      W=(0.5.*exp(-8.*p))./(30*p+1);
4      Re=real(W);
5      Im=imag(W);
6      m=0.6227;
7      p=w*(1j-m);
8      W1=(0.5.*exp(-8.*p))./(30*p+1);
9      Re1=real(W1);
10     Im1=imag(W1);
11     plot(Re,Im,'b-',Re1,Im1,'r--');
12     xlabel('Re(w)');
13     ylabel('Im(w)');
14     grid on;
15     ha=gca;
16     ha.XAxisLocation = 'origin';
17     ha.YAxisLocation = 'origin';
18     legend("АФХ", "РАФХ");
19     title("АФХ і РАФХ об'єкту управління")

```

Рисунок 2.8 – Код m-файлу для побудови АФХ і РАФХ ОУ

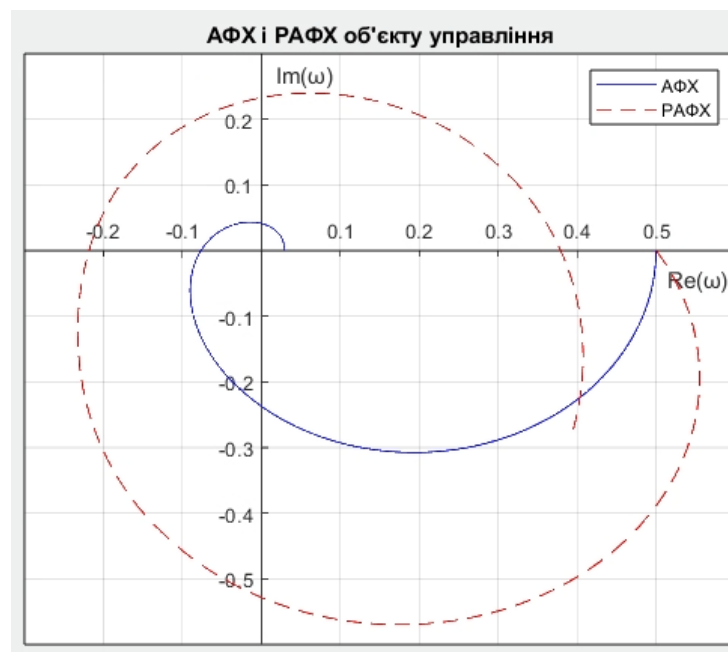


Рисунок 2.9 - Графіки АФХ та РАФХ ОУ

Розрахуємо параметри налаштувань для ПІ регулятора.

Для побудови кривої заданого степеня коливальності скористаємось формулами для ПІ-регулятора:

$$\begin{cases} K_p = -\frac{p^{\text{розш}}(m, \omega) + Q^{\text{розш}}(m, \omega)m}{(A^{\text{розш}}(m, \omega))^2} \\ K_i = -\frac{\omega(m^2 + 1) \cdot Q^{\text{розш}}(m, \omega)}{(A^{\text{розш}}(m, \omega))^2} \end{cases}$$

Код m-файлу для побудови кривої коефіцієнтів:

```

1      w=0:0.0001:0.15;
2      m=0.6227;
3      p=w.*(1j-m);
4      W=(0.5.*exp(-8.*p))./(30*p+1);
5      Re=real(W);
6      Im=imag(W);
7      A=Re.^2+Im.^2;
8      Kp=-(m.*Im+Re)./A;
9      Ki=-w.*(m^2+1).*Im./A;
10     plot(Kp,Ki)
11     xlabel('Kp')
12     ylabel('Ki')
13     hold on;
14     grid on;
15     Kimax=max(Ki);
16     Kpmax=Kp(Ki==Kimax);
17     plot(Kpmax, Kimax, 'o');
18     title("Крива заданого степеня коливальності")

```

Рисунок 2.10 – Код m-файлу для побудови кривої заданого степеня коливальності

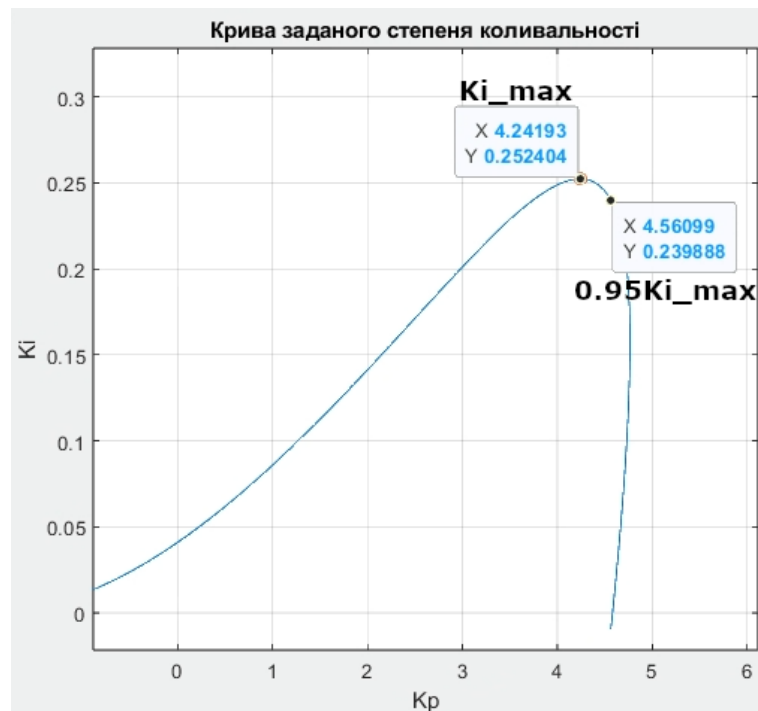


Рисунок 2.11 - Крива заданого степеня коливальності об'єкта з позначеними точками Ki_max і 0.95Ki_max

Для ПІ-регулятора визначимо налаштування при $K_i=0.95\max(K_i)$

$K_p=4.56$;

$K_i=0.2399$;

$T_i=19$;

Перевіримо правильність визначення параметрів K_p і T_i для регулятора.

Для цього необхідно побудувати РАФХ РС :

```
1 w=0.05:0.0001:0.5;  
2 m=0.6227;  
3 p=w.*(1j-m);  
4 Wob=(0.5.*exp(-8.*p))./(30*p+1);  
5 Wr=4.56.*(1+1./(19.*p));  
6 Wos=Wr.*Wob;  
7 Re=real(Wos);  
8 Im=imag(Wos);  
9 grid on;  
10 hold on;  
11 p1=w.*1j;  
12 Wob1=(0.5.*exp(-8.*p1))./(30*p1+1);  
13 Wos1=Wr.*Wob1;  
14 Re1=real(Wos1);  
15 Im1=imag(Wos1);  
16 plot(Re1,Im1,'b- ',Re,Im,'r-- ');  
17 plot(-1,0,"ko");  
18 xlabel('Re(w)');  
19 ylabel('Im(w)');  
20 legend("АФХ", "РАФХ");|
```

Рисунок 2.12 – Код m-файлу для побудови АФХ і РАФХ РС

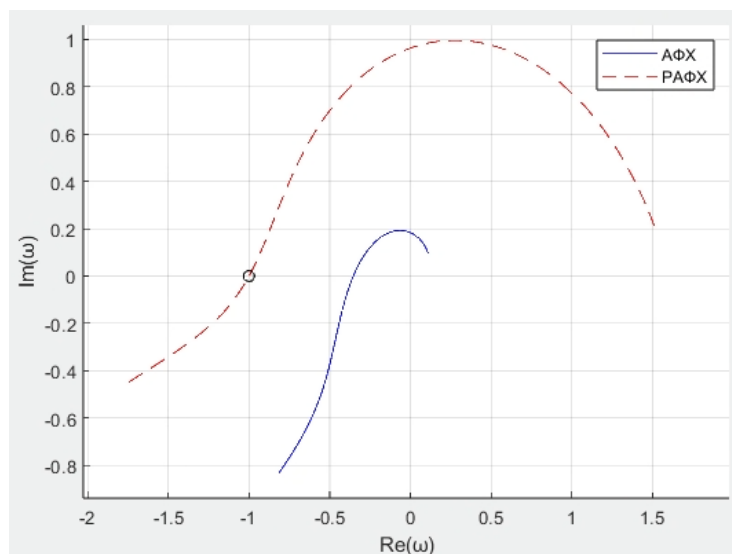


Рисунок 2.13 – АФХ і РАФХ РС

На рис. 2.13 ми можемо побачити, що РАФХ розімкненої системи проходить через точку $(-1; j0)$. Це означає, що отримана система має кореневий показник коливальності $m = m^* = 0.6227$.

Побудуємо перехідний процес для одноконтурної САР. Для цього побудуємо схему в Matlab Simulink.

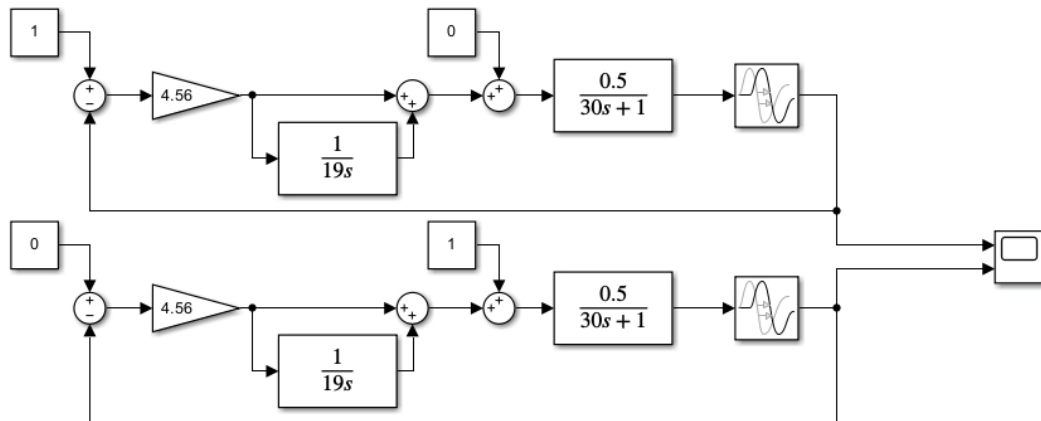


Рисунок 2.14 – Схема одноконтурної САР за каналами «завдання-вихід» та «збурення-вихід»

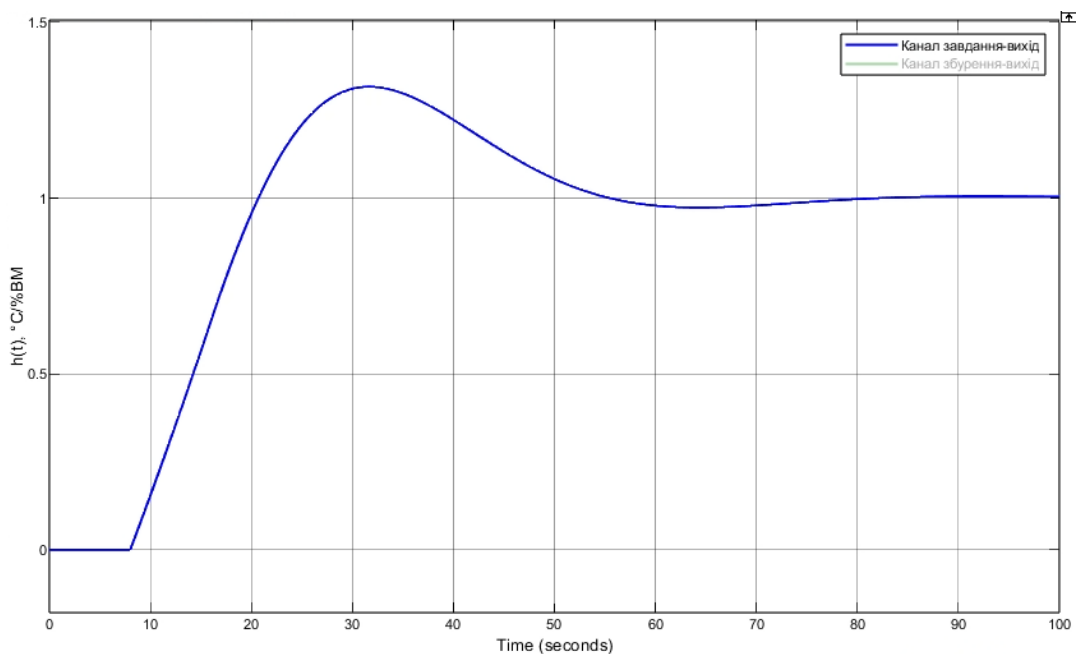


Рисунок 2.15 – Графік перехідного процесу одноконтурної САР за каналом «завдання-вихід»

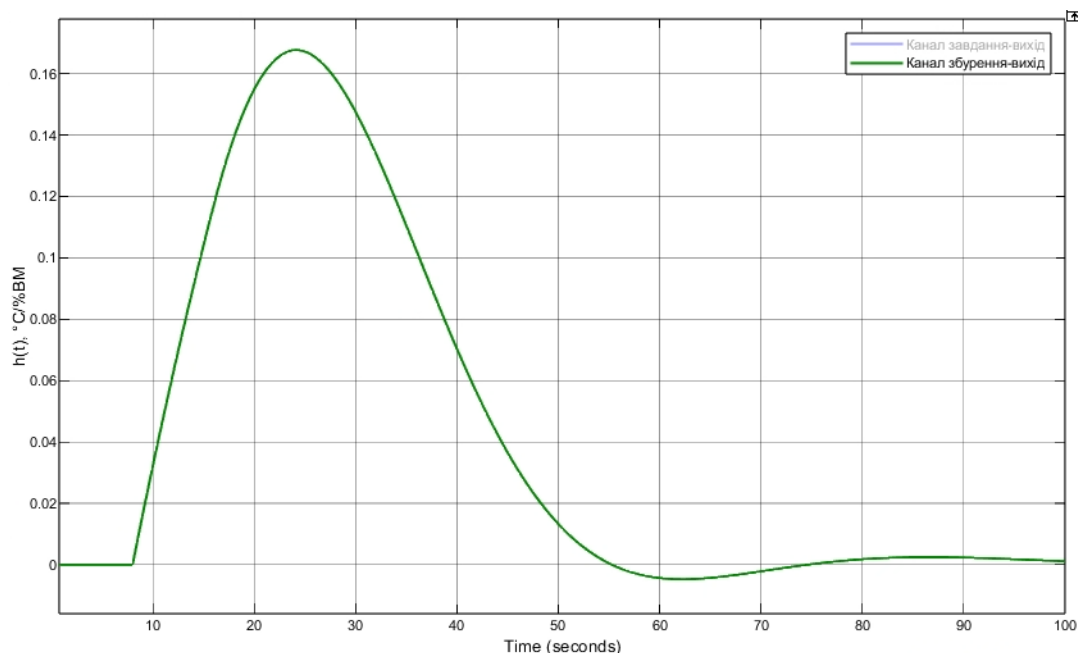


Рисунок 2.16 – Графік перехідного процесу одноконтурної САР за каналом «збурення-вихід»

Визначимо прямі показники якості для системи та занесемо до таблиці:

Таблиця 2.1 – Прямі показники якості перехідного процесу одноконтурної САР за методом РАФХ

Показник якості	Завдання-вихід	Збурення-вихід
Статична похибка, $\Delta_{ст}$	0	0
Динамічна похибка, $\Delta_{дин}$	0.317	0.167
Перерегулювання σ , %	31.7	2.83
Степінь затухання, Ψ	0.981	0.985
Час перехідного процесу $t_{пп}$, с	52	53

Розрахунок методом ВТІ, перерегулювання – 0%:

Розрахуємо налаштування регуляторів за методом 20% перерегулювання.

Спочатку розрахуємо стабілізуючий П-регулятор. Формула для розрахунку ПІ-регулятора:

$$K_P = \frac{0,6}{K_{об}} \cdot \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$$

$$T_i = 0,6 \cdot T_{об}$$

Маємо:

$$K_{\Pi} = \frac{0,6}{0,5} \cdot \frac{30}{8} = 4.5$$

$$T_i = 0,6 \cdot 30 = 18$$

Побудуємо перехідний процес для одноконтурної САР. Для цього побудуємо схему в Matlab Simulink.

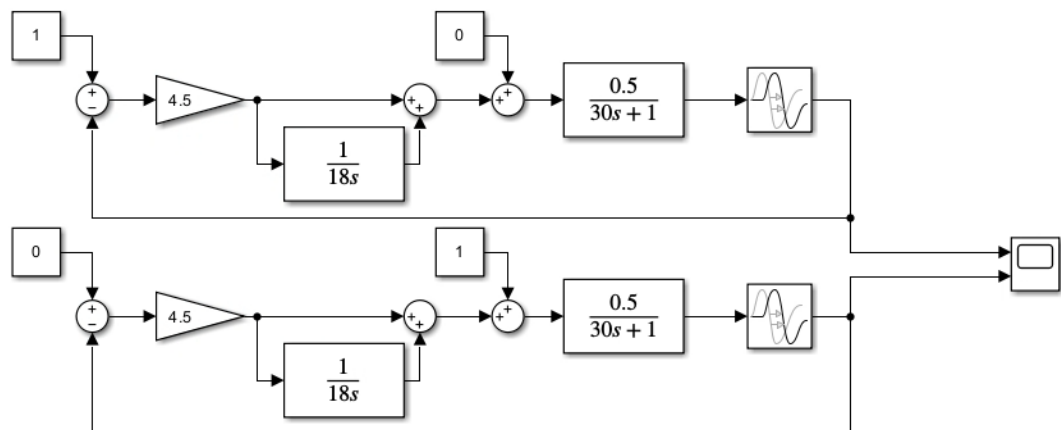


Рисунок 2.17 – Схема одноконтурної САР за каналами «завдання-вихід» та «збурення-вихід»

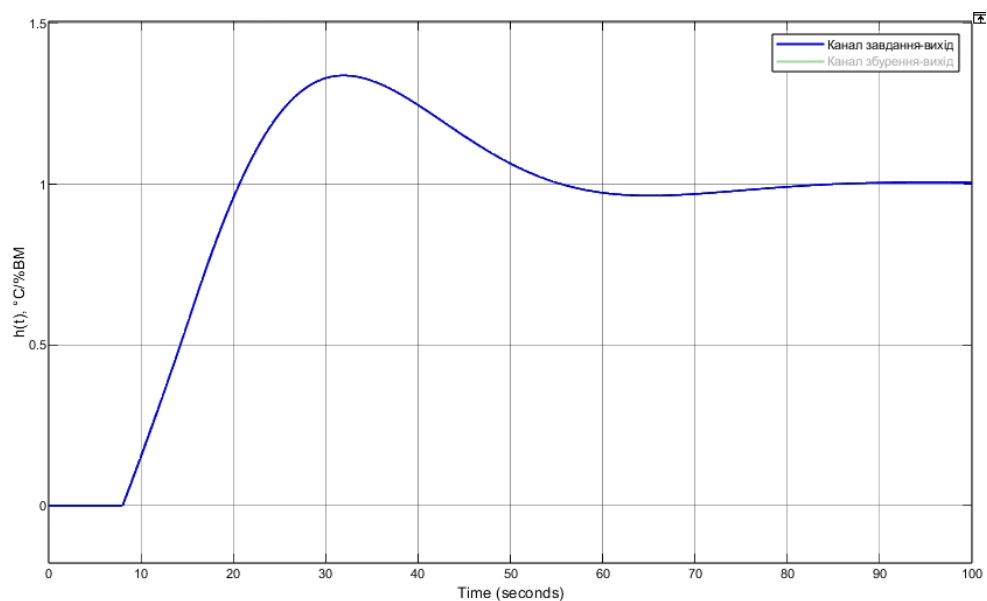


Рисунок 2.18 – Графік перехідного процесу одноконтурної САР за каналом «завдання-вихід»

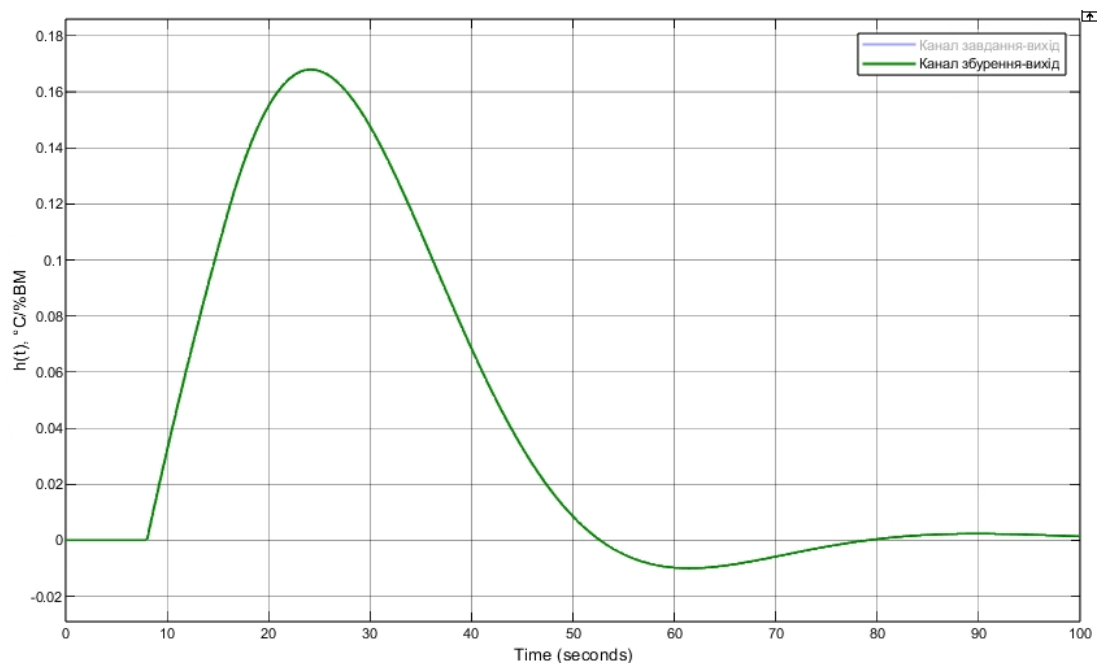


Рисунок 2.19 – Графік перехідного процесу одноконтурної САР за каналом «збурення-вихід»

Визначимо прямі показники якості для системи та занесемо до таблиці:

Таблиця 2.2 – Прямі показники якості перехідного процесу одноконтурної САР за експрес методом ВТІ перерегулювання – 0%

Показник якості	Завдання-вихід	Збурення-вихід
Статична похибка, $\Delta_{ст}$	0	0
Динамічна похибка, $\Delta_{дин}$	0.338	0.168
Перерегулювання σ , %	33.8	5.92
Степінь затухання, Ψ	0.982	0.986
Час перехідного процесу $t_{пп}$, с	70	71

Порівняємо якість перехідних процесів САР розрахованими методами РАФХ та експрес методом ВТІ:

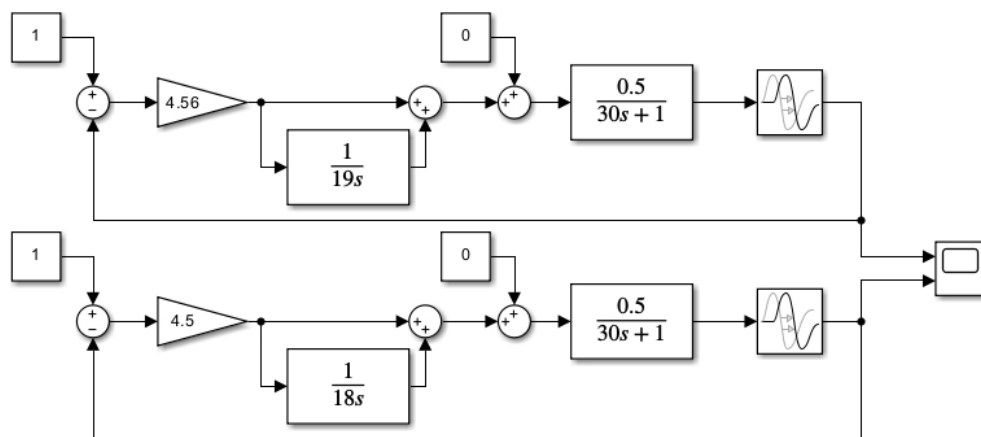


Рисунок 2.20 – Структурна схема порівняння одноконтурних САР за каналом «завдання-вихід»

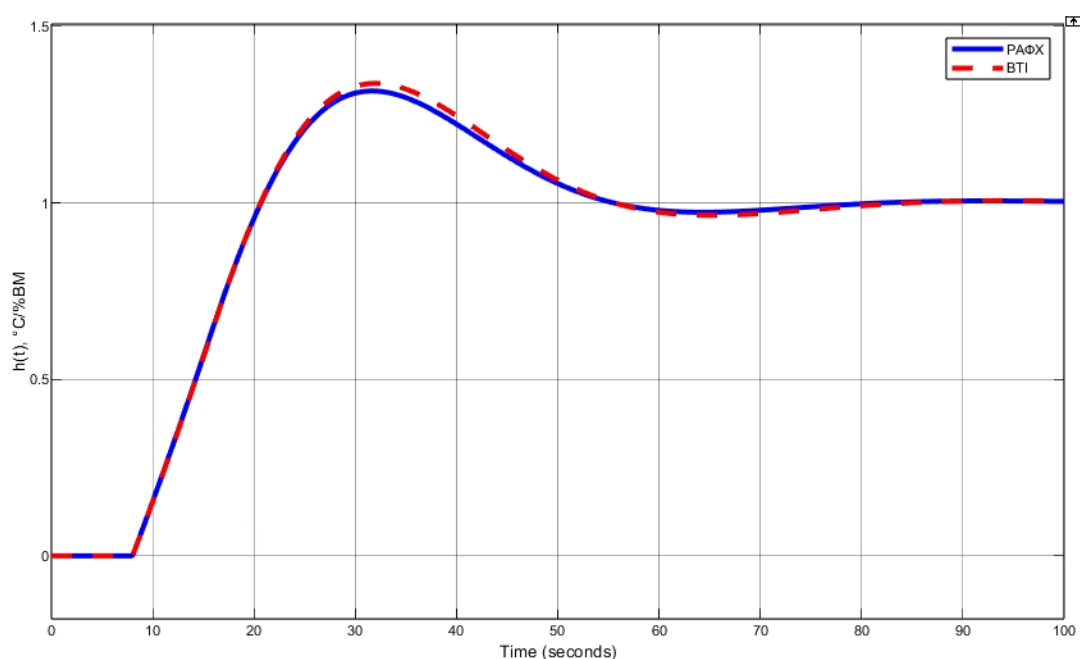


Рисунок 2.21 – Графіки перехідних процесів САР за каналом «завдання-вихід»

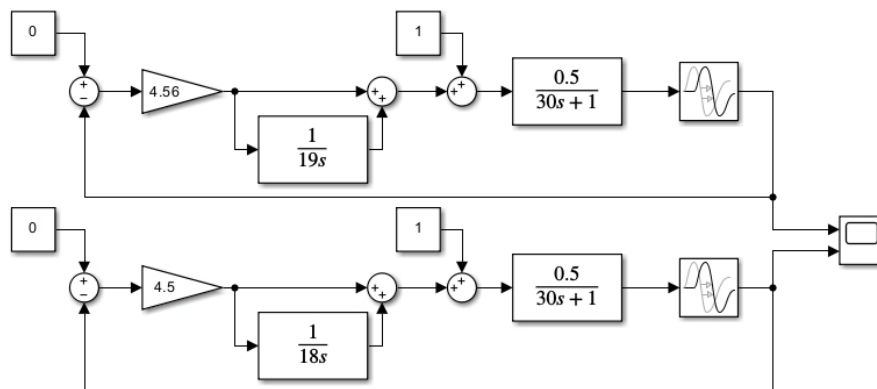


Рисунок 2.22 – Структурна схема порівняння одноконтурних САР за каналом «збурення-вихід»

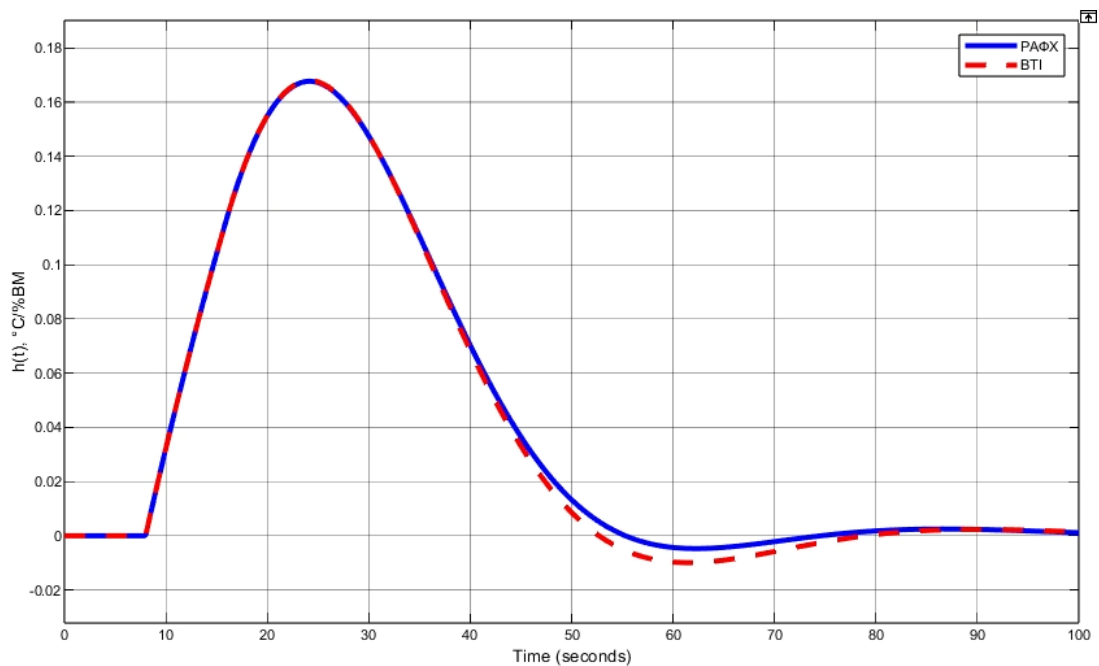


Рисунок 2.23 – Графіки перехідних процесів САР за каналом «збурення-вихід»

Порівняємо прямі показники якості одноконтурних САР розрахованих методом РАФХ та ВТІ:

Таблиця 2.3 – Порівняння прямих показників якості одноконтурної САР розрахованої 3-ма методами

Показник якості	РАФХ		ВТІ	
	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід
Статична похибка, $\Delta_{ст}$	0	0	0	0
Динамічна похибка, $\Delta_{дин}$	0.317	0.167	0.338	0.168
Перерегулювання σ , %	31.7	2.83	33.8	5.92
Степінь затухання, Ψ	0.981	0.985	0.982	0.986
Час перехідного процесу $t_{пп}$, с	52	53	70	71

Обидва методи забезпечили дуже схожі значення параметрів ПІ регулятора:

- метод РАФХ – $K_p = 4.56$ $T_i = 19$;
- метод ВТІ – $K_p = 4.5$ $T_i = 18$;

Загалом, через це, прямі показники якості схожі в обох САР, але САР розрахована методом РАФХ забезпечує кращий перехідний процес за всіма показниками якості, в обох каналах регулювання. Зокрема час перехідного процесу суттєво менший в обох каналах, через менше перерегулювання.

2.2.9. Функціональне моделювання САР

Проаналізуємо САР на чутливість до параметричних збурень. Для цього проваріюємо значення коефіцієнта передачі ОУ.

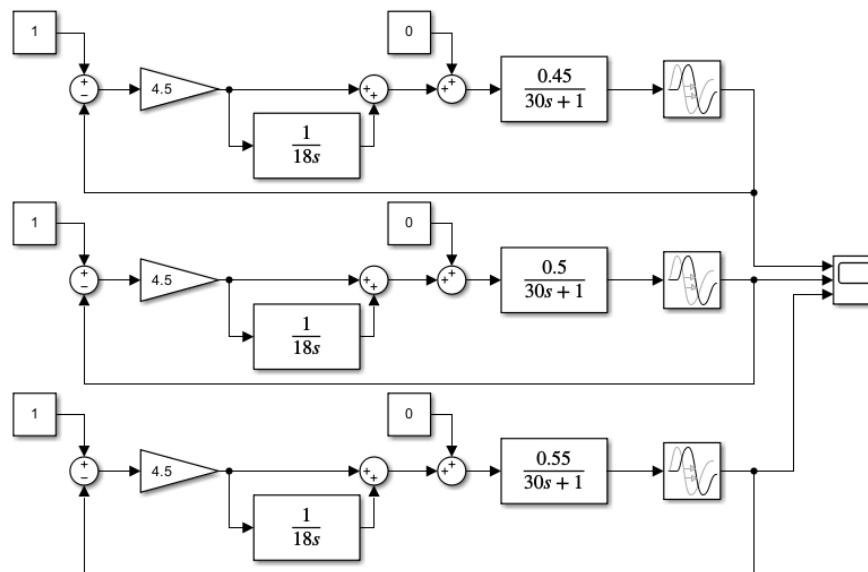


Рисунок 2.24 – Структурна схема аналізу чутливості одноконтурної САР за каналом «завдання-вихід» при дрейфі коефіцієнту передачі

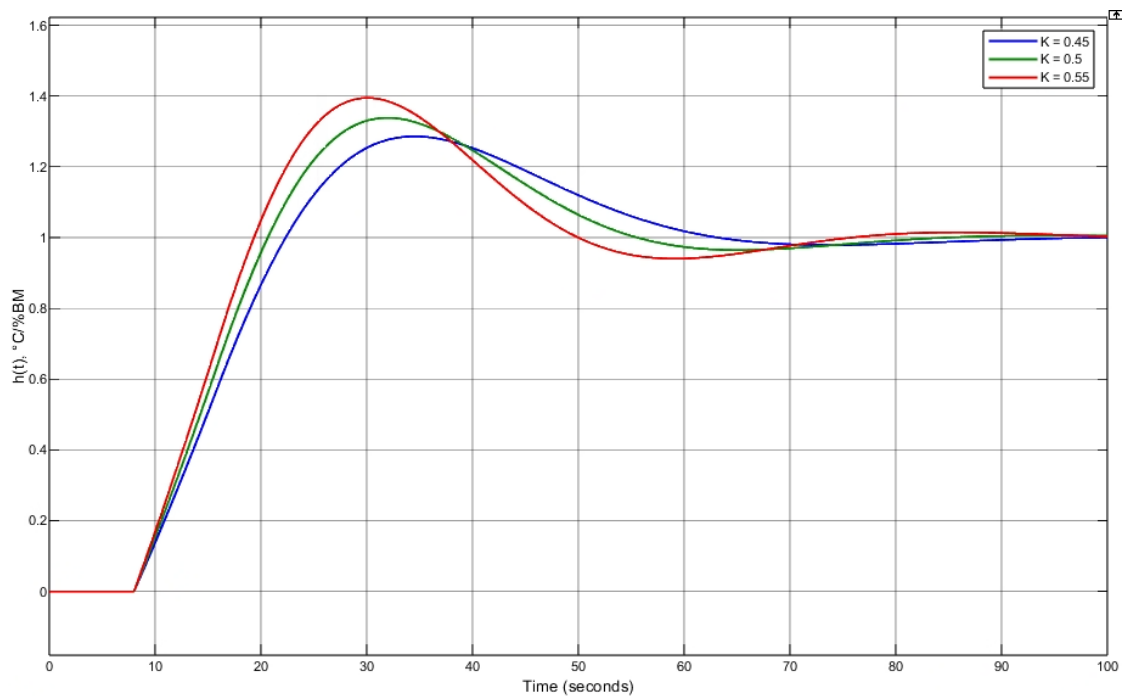


Рисунок 2.25 – Графік перехідних поєсів аналізу чутливості одноконтурної САР за каналом «завдання-вихід» при дрейфі коефіцієнту передачі

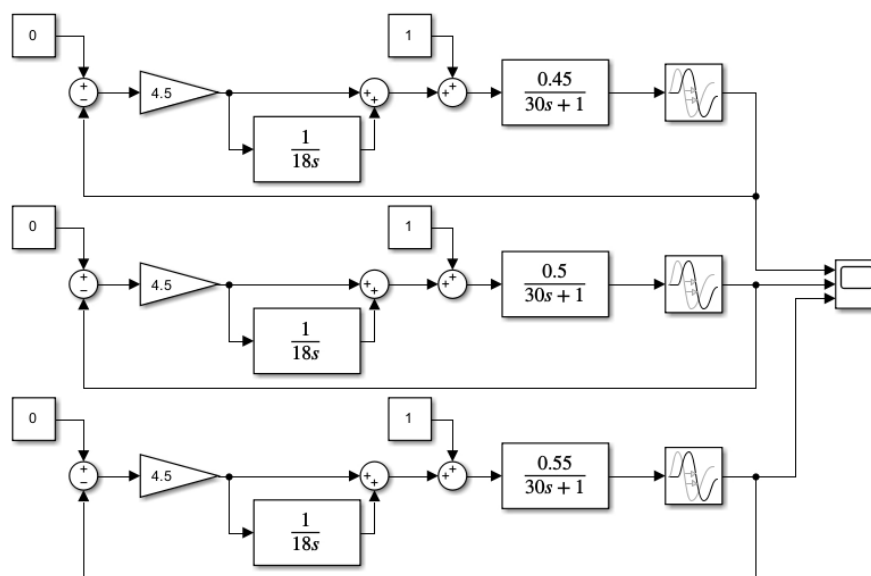


Рисунок 2.26 – Структурна схема аналізу чутливості одноконтурної САР за каналом «збурення-вихід» при дрейфі коефіцієнту передачі

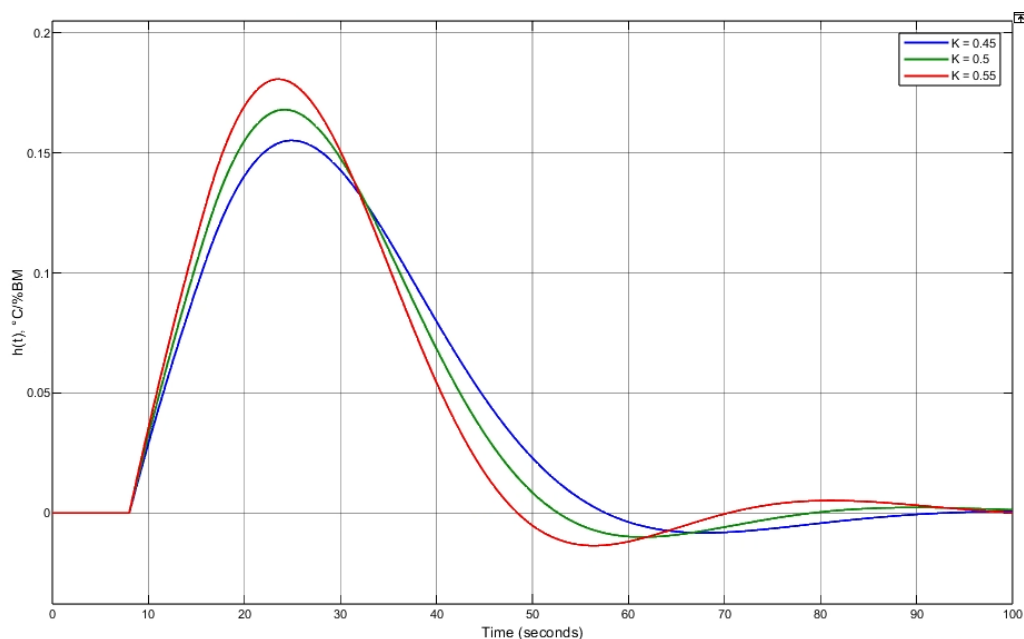


Рисунок 2.27 – Графік перехідних процесів аналізу чутливості одноконтурної САР за каналом «збурення-вихід» при дрейфі коефіцієнту передачі

Таблиця 2.4 – Прямі показники якості перехідного процесу одноконтурної САР, при дрейфі коефіцієнту передачі ОУ при дрейфі коефіцієнту передачі

Показник якості	«завдання-вихід»			«збурення-вихід»		
	K = 0.45	K = 0.5	K = 0.55	K = 0.45	K = 0.5	K = 0.55
Статична похибка, $\Delta_{ст}$	0	0	0	0	0	0
Динамічна похибка, $\Delta_{дин}$	0.286	0.317	0.395	0.155	0.167	0.181
Перерегулювання σ , %	28.6	31.7	39.5	5.27	2.83	7.48
Степінь згасання, Ψ	0.993	0.981	0.962	0.995	0.985	0.97
Час перехідного процесу $t_{пп}$, с	58	52	68	79	53	66

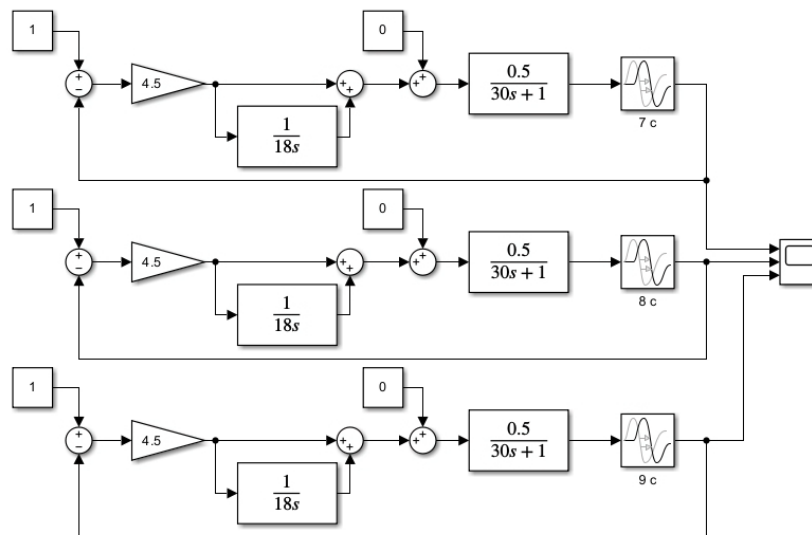


Рисунок 2.24 – Структурна схема аналізу чутливості одноконтурної САР за каналом «завдання-вихід» при дрейфі транспортного запізнення

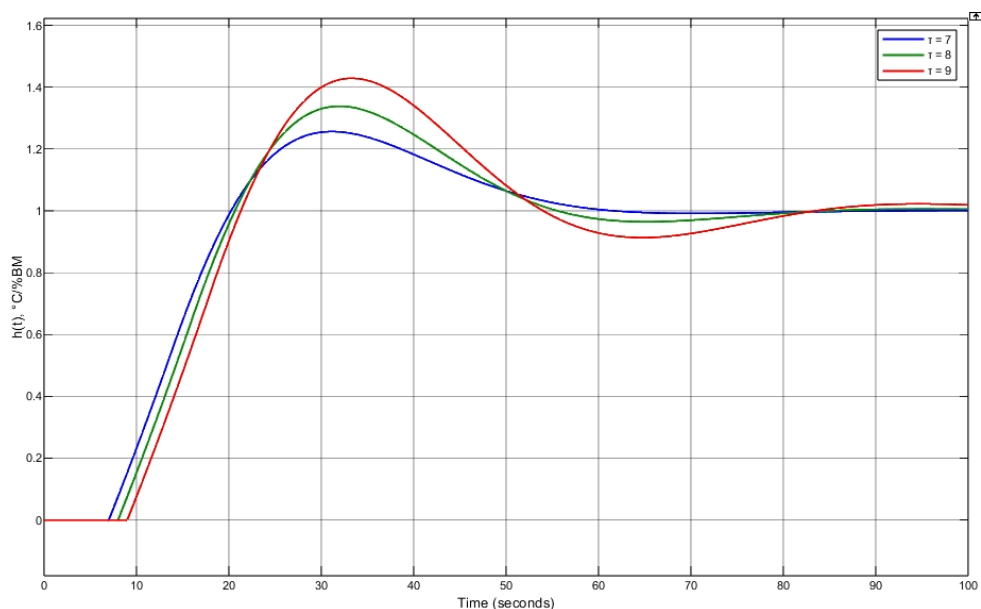


Рисунок 2.25 – Графік перехідних процесів аналізу чутливості одноконтурної САР за каналом «завдання-вихід» при дрейфі транспортного запізнення

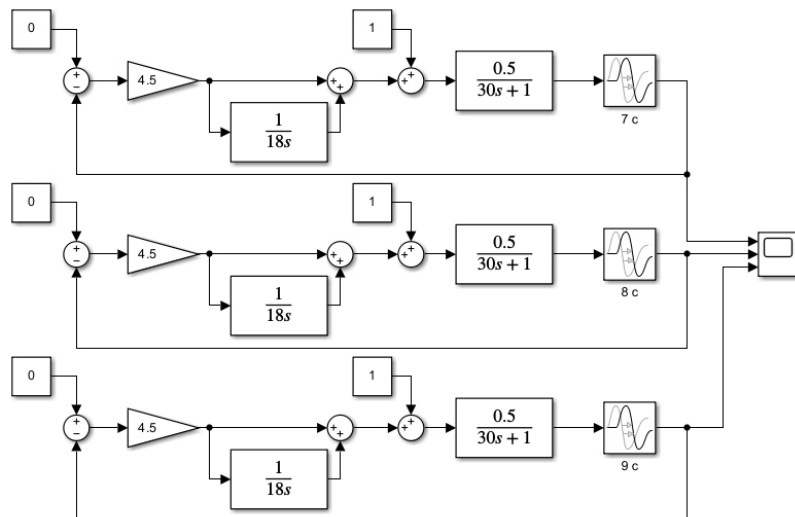


Рисунок 2.26 – Структурна схема аналізу чутливості одноконтурної САР за каналом «збурення-вихід» при дрейфі транспортного запізнення

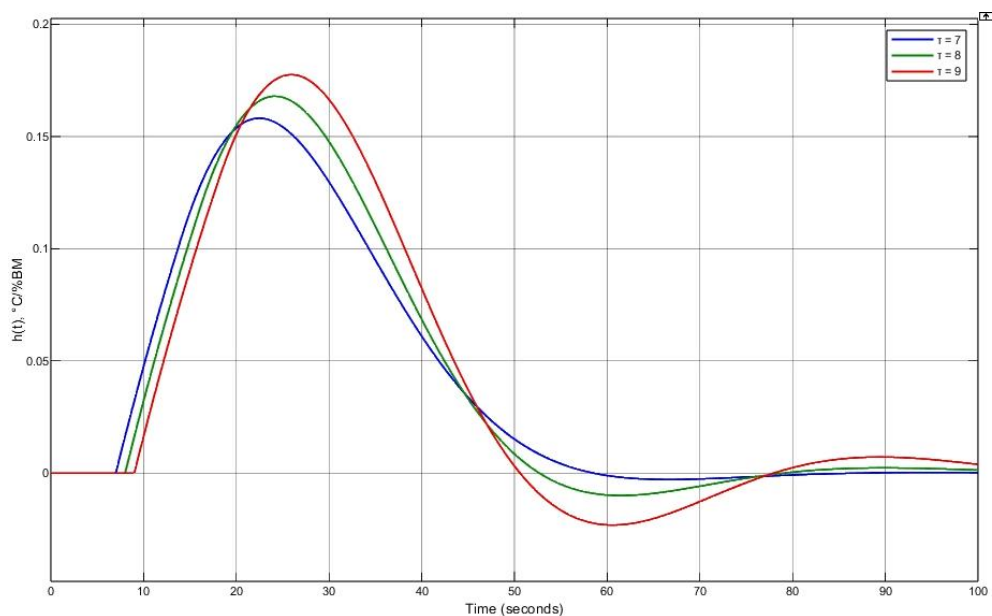


Рисунок 2.27 – Графік перехідних процесів аналізу чутливості одноконтурної САР за каналом «збурення-вихід» при дрейфі транспортного запізнення

Таблиця 2.5 – Прямі показники якості перехідного процесу одноконтурної САР, при дрейфі коефіцієнту передачі ОУ при дрейфі транспортного запізнення

Показник якості	«завдання-вихід»			«збурення-вихід»		
	$\tau = 7$	$\tau = 8$	$\tau = 9$	$\tau = 7$	$\tau = 8$	$\tau = 9$
Статична похибка, $\Delta_{ст}$	0	0	0	0	0	0
Динамічна похибка, $\Delta_{дин}$	0.256	0.317	0.429	0.158	0.167	0.178
Перерегулювання σ , %	25.6	31.7	42.9	1.78	2.83	13.02
Степінь затухання, Ψ	0.996	0.981	0.949	0.992	0.985	0.959
Час перехідного процесу $t_{пп}$, с	55	52	78	58	53	97

Проведений аналіз чутливості показав, що САР характеризується низькою чутливістю до змін своїх параметрів: перехідні характеристики залишилися практично незмінними. Це підтверджує стійкість і оптимальність налаштувань регулятора, що забезпечує стабільне керування при незначних варіаціях параметрів. Збільшення тривалості перехідного процесу пояснюється малим обраним значенням $\varepsilon = 3\%$.

2.2.10. Висновки щодо роботоздатності РВК САР

У рамках даного розділу виконується оцінка роботоздатності регульовально-виконавчого каналу (РВК) однієї системи автоматичного регулювання (САР). САР пов'язана з регулюванням температури повітря. Чутливість прямих показників якості перехідних процесів у замкненій САР до параметричних збурень ОУ оцінюється шляхом варіювання ключових параметрів моделі ОУ.

Надійність реалізації управляючих і захисних функцій САР ґрунтується на даних із розділу 2.2.6. Середній час напрацювання на відмову РВК становить 13 036,6 годин, що забезпечує довготривалу експлуатацію. Імовірність безвідмовної роботи за 1000 годин дорівнює 0,926, що не досягає цільового значення 0,95, але є прийнятною за умови періодичного технічного обслуговування. Середній час відновлення роботоспроможності (1,17 години) відповідає вимозі менше 2 годин, забезпечуючи оперативне відновлення.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						47
Зм.	Арк.			Дата		

РОЗДІЛ 3 ОПИС ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ ПРОЄКТУ

3.1 Схема функціональна автоматизації ТОУ

Опис схеми функціональної автоматизації ТОУ наведений у підрозділі 1.5 ПЗ ДПБ. У даному підрозділі описані застосовані у проєкті прилади для вимірювання технологічних параметрів та режими роботи стенду. Принцип роботи стенду більш детально описаний у підрозділі 1.1 ПЗ ДПБ.

3.2 Схема структурна ПТК

Схему структурну стенду наведено і описано у підрозділі 1.6 ПЗ ДПБ.

3.3 Схема принципова електрична АСР

Схема електрична принципова описує взаємодію електричних сигналів між різними компонентами системи Рисунок 3.1

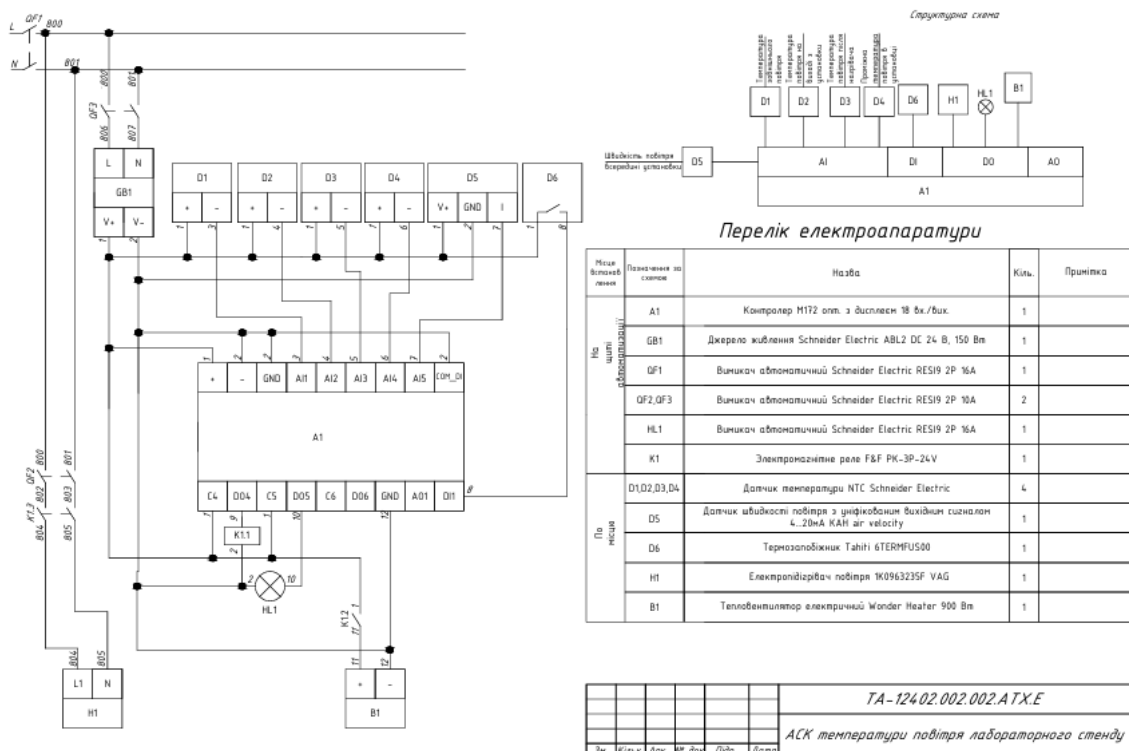


Рисунок 3.1 – Схема електрична принципова

- кола живлення. Маркування 800-999. За схемою ці ланцюги подаються на вхід блока живлення;
- Датчики температури D1 D2 D3 D4 та датчик потку повітря D5 підключені до аналогових входів ПЛК
- Також показано які компоненти знаходяться на щиті а які по місцю.

3.4 Креслення загального виду щита

Креслення загального виду щита автоматизації у загальному описує як виглядає щит автоматизації, де і як розташовуються засоби контролю і керування технологічним процесом усередині нього та на фасадній частині. Для монтажу електроапаратури в середині щита використовується стандартна DIN-рейка з розмірністю 35мм × 7,2 мм. Розподільний кабель канал служить для організації електропроводки в середині щита (кабельменеджменту).

3.5 Схема монтажна щита (таблиця з'єднань)

Монтажна схема щита використовується для візуалізації з'єднань, які виконуються безпосередньо всередині щита. Вона має спрощений вигляд і не дотримується масштабування. Усі пристрої, розміщені в щиті, показані з відповідними електричними підключеннями. Окрім цього, на схемі подано точки підключення зовнішніх проводів до елементів щитової апаратури. Специфіку електричних з'єднань датчиків, які входять до складу вимірювальних каналів, розглянуто в підрозділі 2.1.3 пояснювальної записки ДПБ.

3.6 Схема зовнішніх з'єднань

Схема зовнішніх з'єднань призначена для пояснення комутації між щитом та позащитовими елементами, а також між ними та іншими елементами, розташованими за місцем. Також дана схема описує як і яким кабелем повинні бути з'єднані між собою засоби і щит автоматизації.

Усі кабелі були підібрані з урахуванням необхідних вимог, а саме:

- рекомендацій виробника засобів автоматизації;
- урахуванням номінальних струмів, що будуть проходити через кабель;
- урахуванням щонайменше 10% запасу жил;
- умов експлуатації.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						49
Зм.	Арк.			Дата		

3.7 Специфікація обладнання

Було використано:

- датчики температури NTC TM1STNTCSF44015 [6] (3 одиниці): виробник— Schneider Electric. Ці датчики призначені для вимірювання температури в діапазоні від -50°C до 110°C з класом захисту IP67, що забезпечує стійкість до пилу та вологи. Використовуються для точного моніторингу температури повітря в стенді.
- програмований логічний контролер (ПЛК) Modicon M172[7]: виробник—Schneider Electric. ПЛК призначений для керування процесами автоматизації, забезпечуючи гнучкість і програмованість для реалізації алгоритмів регулювання температури.
- Блок живлення (БЖ) ABL2REM24065K[8]: виробник — Schneider Electric. БЖ забезпечує стабільне живлення стенду, захищаючи обладнання від перебоїв у електромережі.

Schneider Electric — глобальна французька компанія, заснована у 1836 році, спеціалізується на енергоменеджменті та промисловій автоматизації. Компанія відома високою якістю продукції, включаючи датчики, ПЛК та БЖ, які відповідають міжнародним стандартам безпеки та енергоефективності. Продукція Schneider Electric широко застосовується в навчальних і промислових системах автоматизації.

- твердотільне реле SSR-LT40DA[8]: виробник — DOSSY. Це реле забезпечує швидке перемикання навантаження (нагрівача) з високою надійністю та довговічністю, що критично для регулювання температури.

DOSSY — виробник твердотільних реле, орієнтований на створення компактних і ефективних рішень для промислової автоматизації. Компанія спеціалізується на твердотільних реле, таких як SSR-LT40DA, які забезпечують високу швидкість перемикання та мінімальні витрати на обслуговування.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						50
Зм.	Арк.			Дата		

Наявність та характеристика дистриб'юторів

Дистриб'ютори

Schneider

Electric

Schneider Electric має розгалужену мережу дистриб'юторів в Україні, таких як компанії, що працюють через офіційну мережу Schneider Electric Ukraine. Дистриб'ютори забезпечують поставки датчиків NTC TM1STNTCSF44015, ПЛК Modicon M172 та БЖ ABL2REM24065K, надаючи технічну підтримку, гарантійне обслуговування та швидку доставку оригінальної продукції з відповідною документацією.

Дистриб'ютори

DOSSY

Для твердотільних реле DOSSY SSR-LT40DA дистриб'юторська мережа в Україні менш централізована. Продукція постачається через спеціалізовані компанії, що займаються промисловою автоматизацією, такі як локальні постачальники електротехнічного обладнання. Ці дистриб'ютори пропонують технічну консультацію та забезпечення запасними частинами, хоча асортимент може бути обмеженим через нішеву спеціалізацію вендора.

РОЗДІЛ 4 ПРОГРАМУВАННЯ ПТКЗА

4.1 Програмування функціональності ПЛК

Програмування функціональності ПЛК виконувалося в інструментальному програмному середовищі автоматизації EcoStruxure Machine Expert HVAC, яке базується на стандарті IEC 61131-3.

Це середовище розробки призначене для програмування контролерів серії M172 та підтримує всі п'ять мов програмування, визначених стандартом IEC 61131-3: LD (Ladder Diagram), ST (Structured Text), FBD (Function Block Diagram), IL (Instruction List) та SFC (Sequential Function Chart).

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						51
Зм.	Арк.			Дата		

Розроблене прикладне програмне забезпечення складається з основних структурних одиниць рисунок 4.1

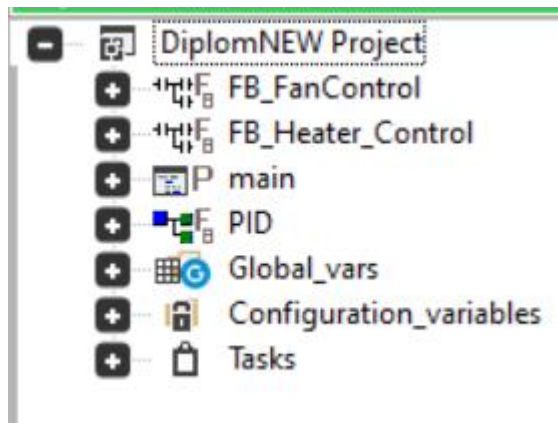


Рисунок 4.1 – Структура розробленого ПЗ

Ключові функції/призначення розроблених структурних одиниць:

- FB_Heater_Control - функціональний блок призначений для контролю нагрівача.
- FB_FanControl - функціональний блок призначений для керування вентилятором
- FB_PID – функціональний блок де реалізований ПІД-регулятор
- P Main - основна програма на мові ST де визиваються інші функціональні блоки

P main - Призначаємо значення для змінних, і викликаємо відповідні функціональні блоки. Рисунок 4.2

Local variables				
	Name	Type	Address	Array
1	fanControl	FB_Fan_Control	Auto	No
2	heaterControl	FB_HeaterContro	Auto	No
3	PID1	FB_PID	Auto	No


```

0001 fanControl.Fan_Speed_Set := Fan_Speed_Set;
0002 fanControl();
0003
0004 PID1.Heater_Enable := Heater_Enable;
0005 PID1.Temp_1 := Temp_1;
0006 PID1.Temp_Setpoint := Temp_Setpoint;
0007 PID1.Kp := Kp;
0008 PID1.Ti := Ti;
0009 PID1.Td := Td;
0010 Heater_Relay := PID1.Heater_Relay;
0011 PID1();
0012
0013 heaterControl.Heater_Enable := Heater_Enable;
0014 heaterControl.Heater_Active := Heater_Active;
0015 heaterControl();
0016

```

Рисунок 4.2 – Лістинг програми P main

FB_FanControl - вентилятор має дві швидкості і тому відповідно яке значення на Fun_Speed_Set вмикається відповідна швидкість якщо Fun_Relay_1 або Fun_Relay_2 = false, то вентилятор не працює. Рисунок 4.3 та 4.4

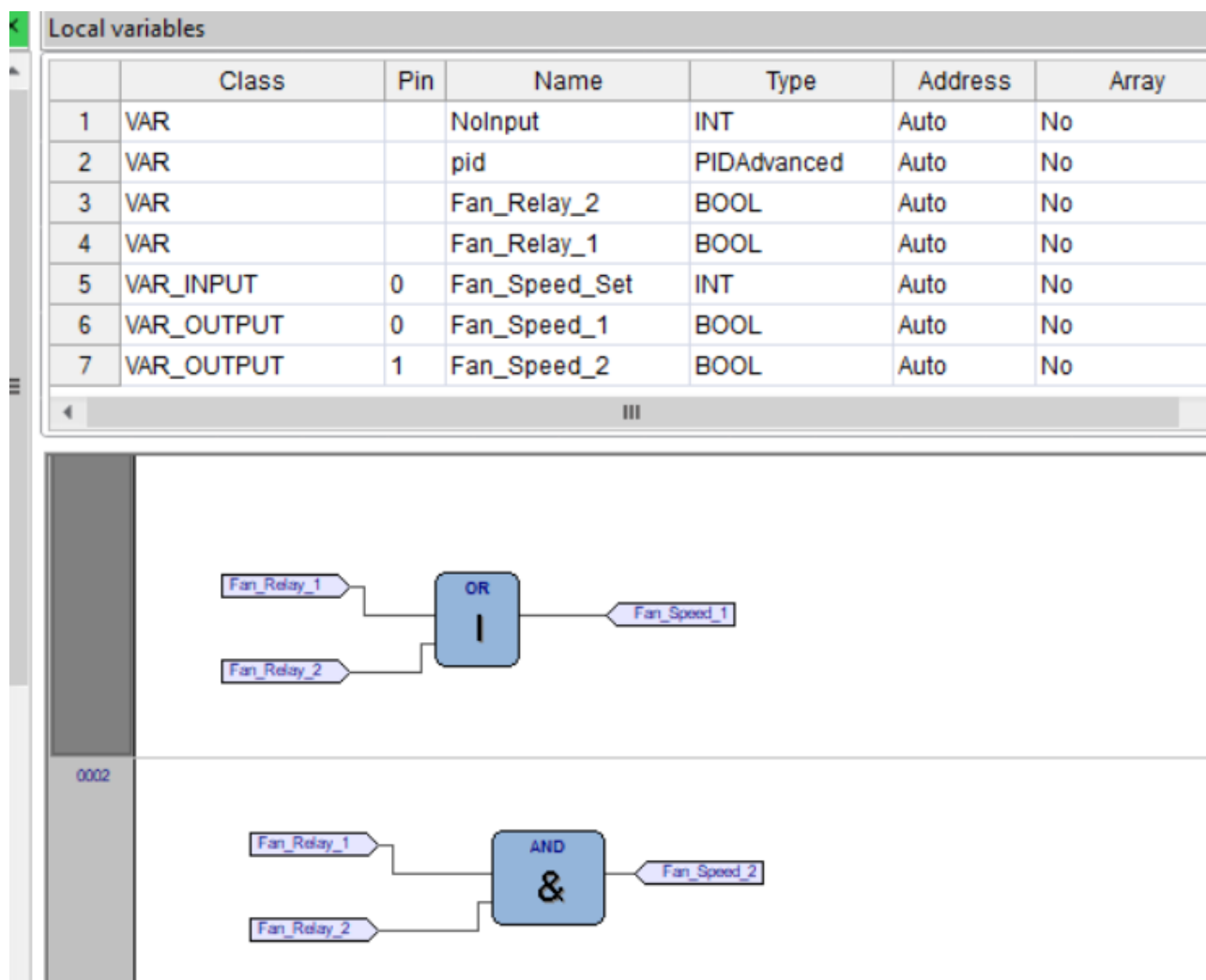


Рисунок 4.3 – Лістинг програми FB_FanControl

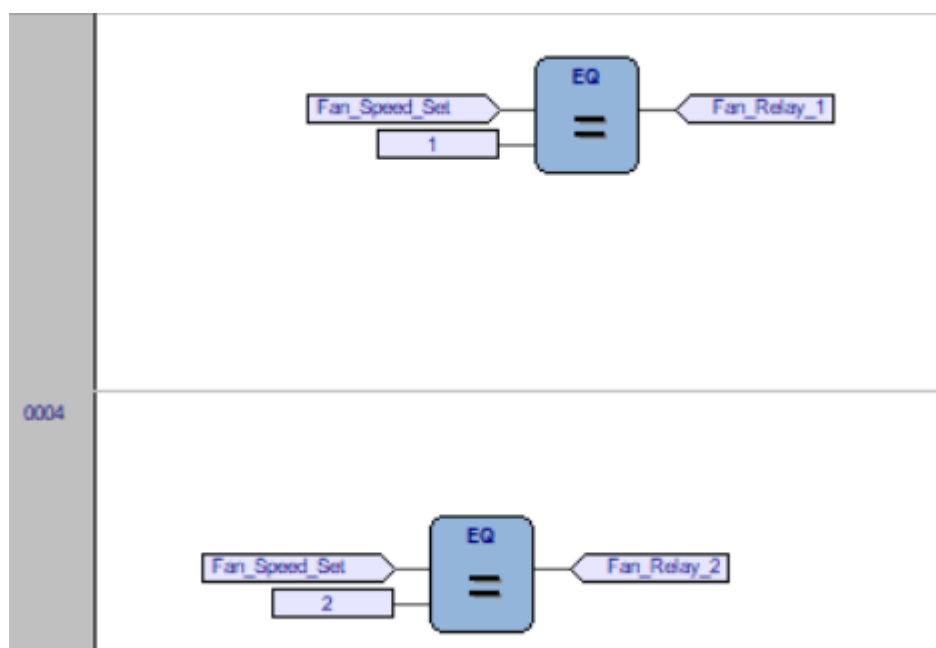


Рисунок 4.4 – Лістинг програми FB_FanControl

FB_Heater_Control - Нагрівач працює за умови якщо перший датчик температури показує менше за 55 градусів С та якщо працює вентилятор, інакше є ризик перегріти нагрівач та розплавити трубку, рисунок 4.5

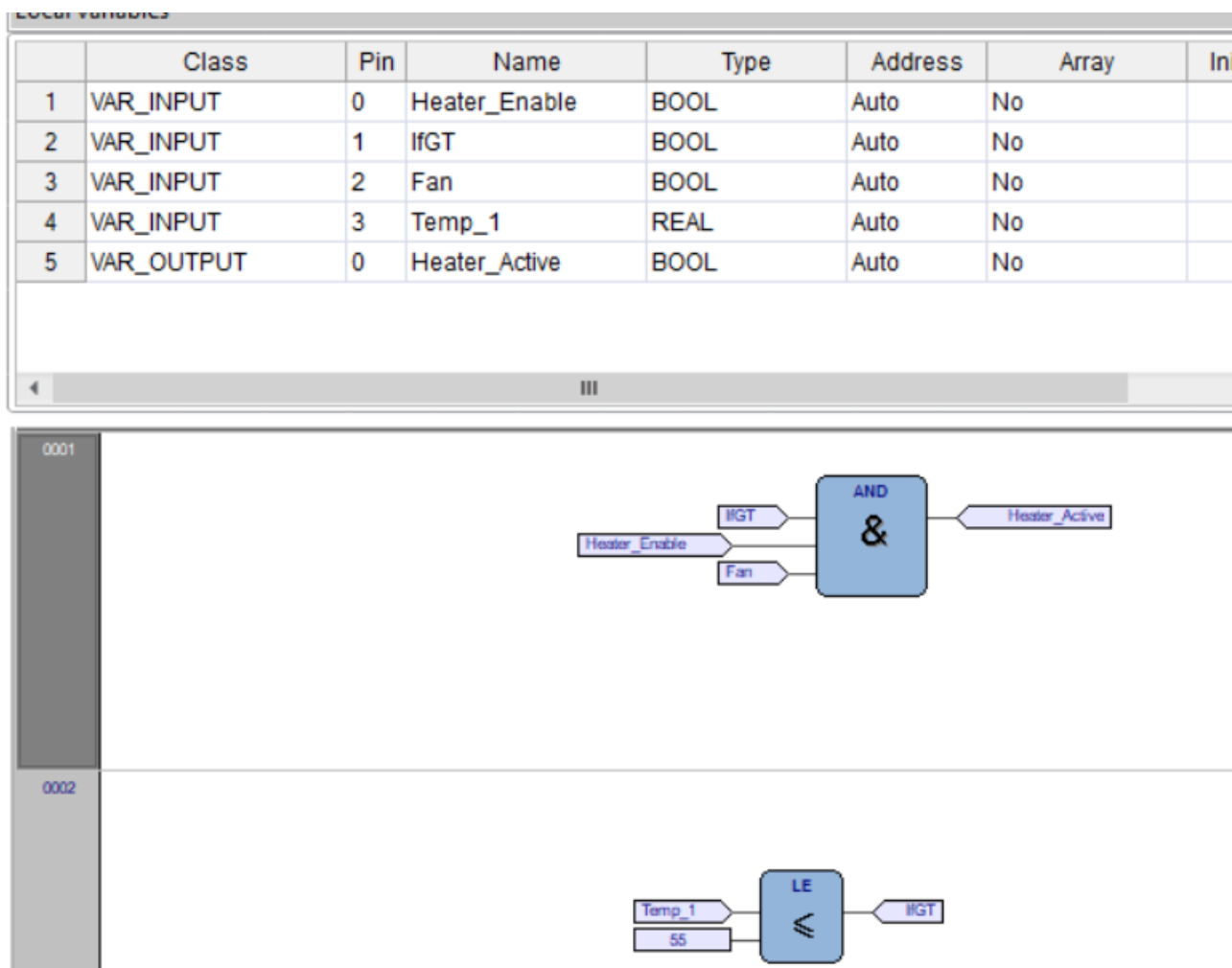


Рисунок 4.5 – Лістинг програми FB_Heater_Control

FB_PID зображений на рисунку

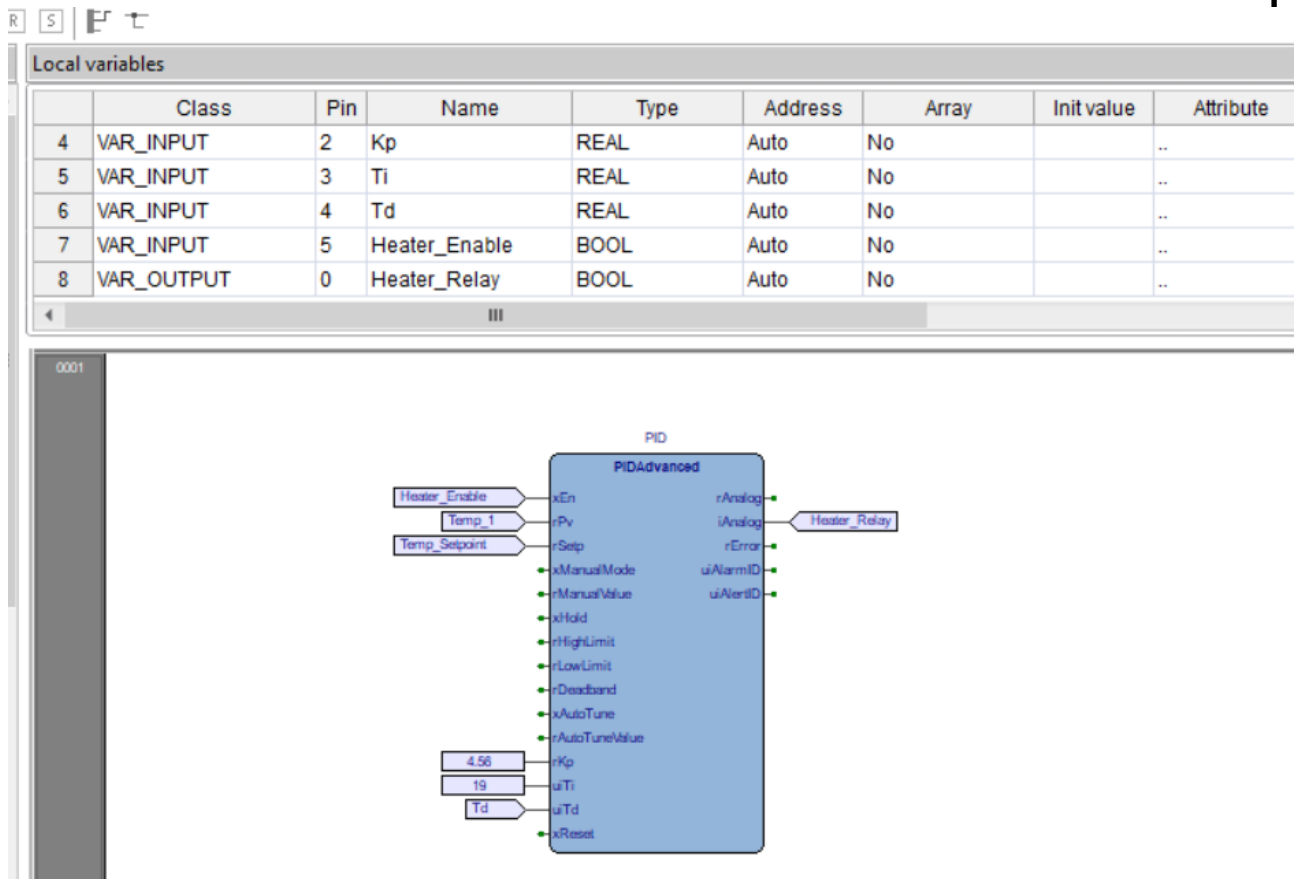


Рисунок 4.6 – Лістинг програми FB_PID

4.2 Програмування функціональності SCADA-системи

В якості SCADA-системи у даному проєкті використано Ignition від компанії Inductive Automation. Ця платформа забезпечує зручне створення інтерактивних графічних інтерфейсів, зв'язок з контролерами через протокол Modbus TCP, а також можливість створення логіки на мові Python.

Для зручного переміщення між різними екранами використовується вікно Menus, яке зображено на рис. 4.7.

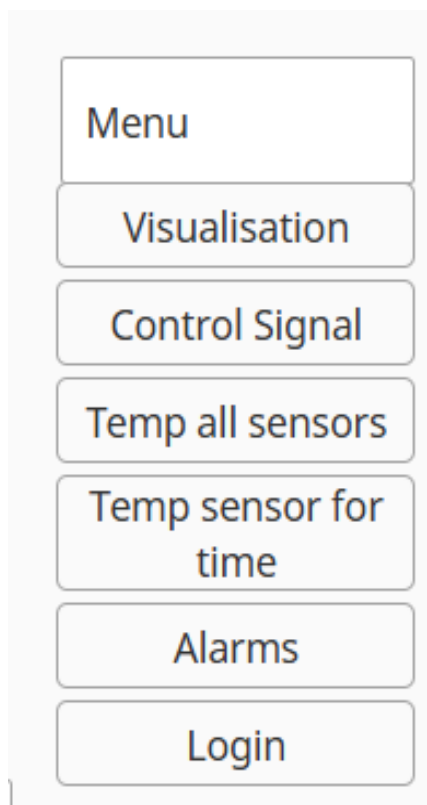


Рисунок 4.7 – Відображення меню для переключення між вікнами

На рисунку 4.8 відображення журналу, де записуються всі Alarms

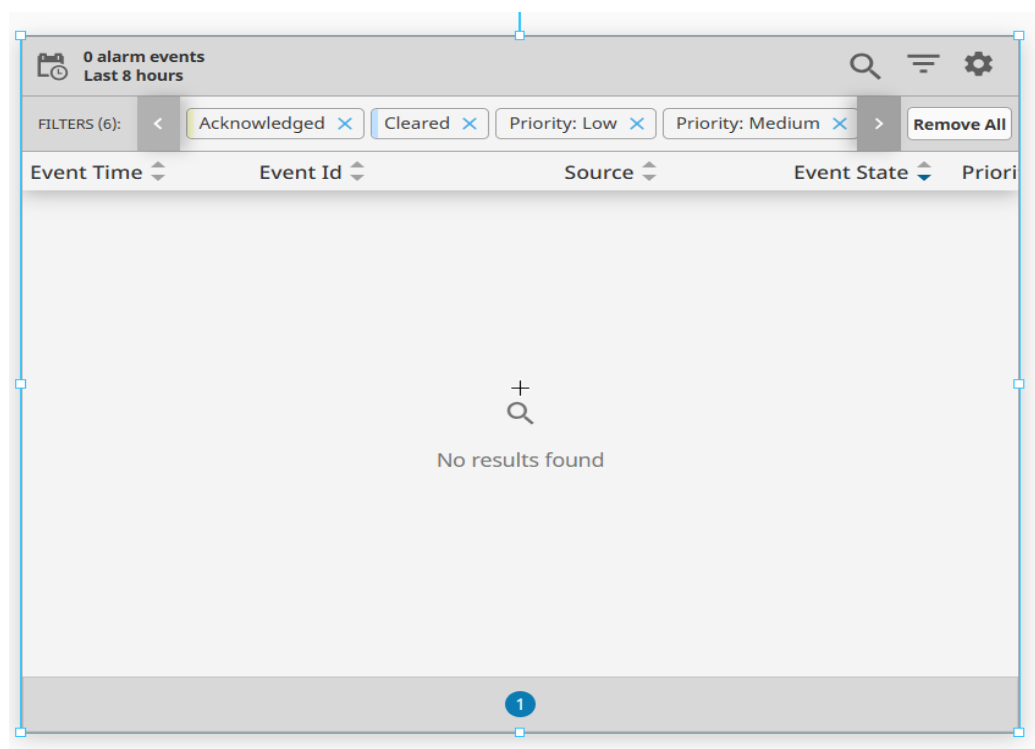


Рисунок 4.8 – Вікно Alarms

На рисунку 4.9 та 4.10 відображення вікна візуалізації.

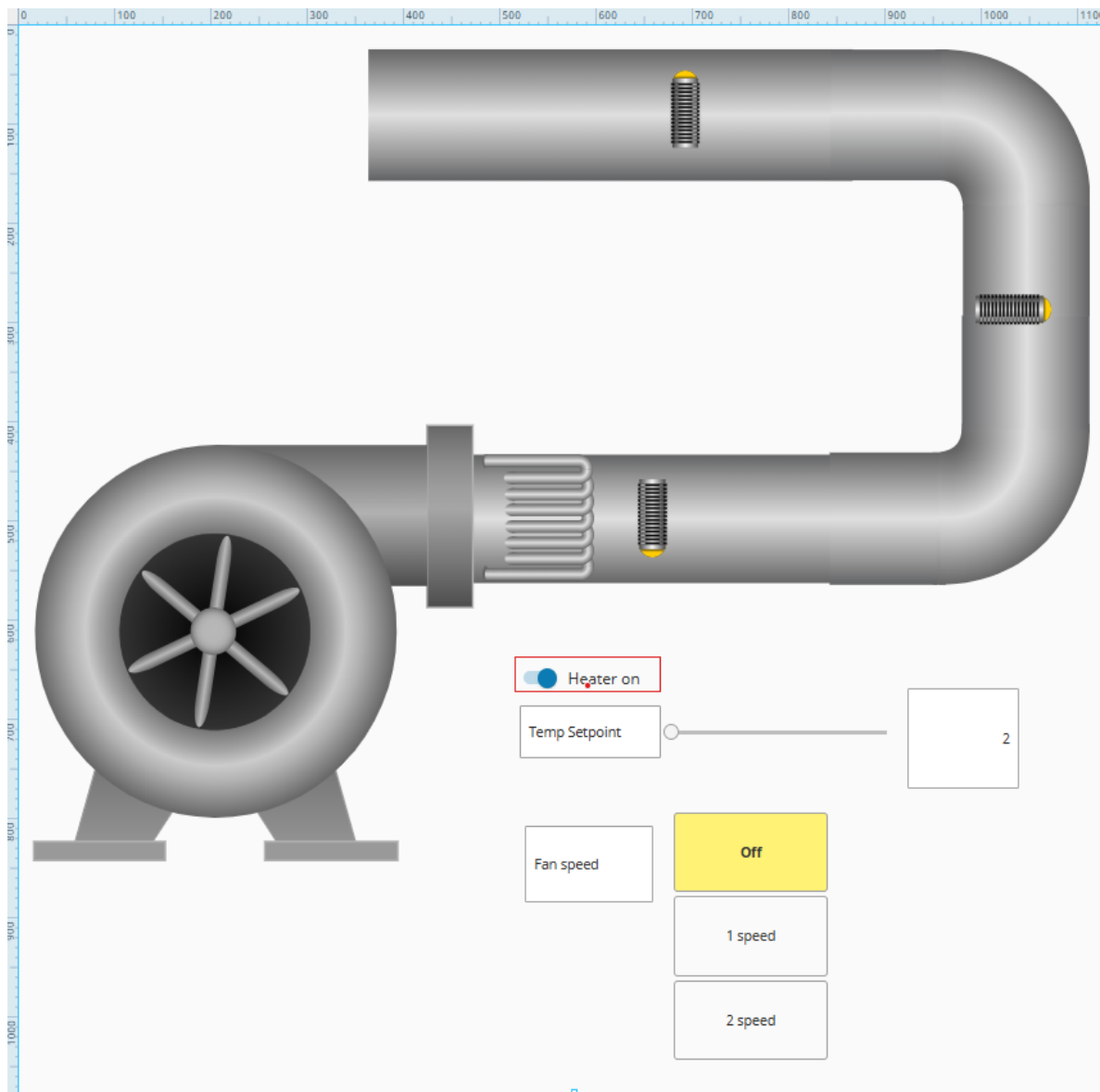


Рисунок 4.9 – Вікно візуалізації



Рисунок 4.10 – Вікно візуалізації

РОЗДІЛ 5 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АТК

5.1 Схема структурна полігону імітаційного моделювання АТК ТОУ

На рисунку 5.1 зображено схему структурну полігону імітаційного моделювання.

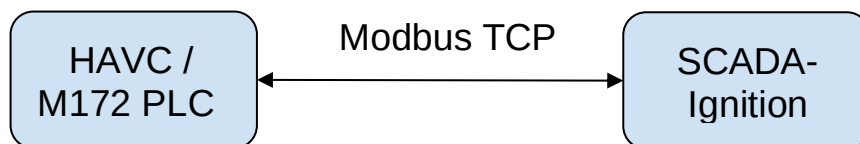


Рисунок 5.1 – Схема структурна полігону імітаційного моделювання АТК ТОУ

У даному випадку для моделювання АТК ТОУ використовується програмно-технічний симулятор АТК, а програмні продукти, що для цього застосовувались – HAVC, Ignition. Між ПЛК та SCADA-системою обмін даними відбувається по протоколу Modbus TCP.

5.2 Реалізація контролерної функціональності САР в HAVC

Контролерна функціональність САР в тому числі була наведена у підрозділі 4.1 ПЗ ДПБ.

5.3 Реалізація SCADA в Ignition

Супервізорна функціональність в SCADA-системі Ignition була реалізована і продемонстрована в підрозділі 4.2 ПЗ ДПБ.

РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6. Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта проектування

У цьому підрозділі представлено технічні рішення для забезпечення безпечної роботи навчального стенду регулювання температури повітря. Розташування устаткування та організація робочих місць. Устаткування розміщено в навчальному приміщенні відповідно до вимог ДСТУ EN 61010-1:2016 [10] Робочі місця студентів спроектовано з урахуванням ергономічних стандартів: столи та стільці відповідають ДСанПіН 5.5.6.009-98 [11], а відстань між ними становить не менше 1,2 м для безпечного пересування. Теплоізоляція нагрівального елемента.

Поліамідний нагрівальний елемент ізольовано теплостійким матеріалом, що унеможливорює прямий контакт із поверхнею, температура якої перевищує 60 °С, відповідно до ГОСТ 12.2.007.0-75 [12] — використане джерело: "Система стандартів безпеки праці. Електротехнічні пристрої. Загальні вимоги безпеки", знижуючи ризик опіків. Безпека роботи вентилятора. Вентилятор обладнано захисною сіткою, яка запобігає контакту з рухомими частинами, а двигун оснащено захистом від перегріву з автоматичним відключенням при критичній температурі, що відповідає ГОСТ 12.2.007.0-75 [12].

Електробезпека: Джерело живлення: 5-ти провідна трифазна електромережа змінного струму з глухозаземленою нейтраллю, робоча напруга 230/400 В. Використовується система захисного заземлення TN-C-S. Дана система захисного заземлення виключає можливість ураження персоналу електричним струмом при пробі на корпус ЕУ однієї з фаз електромережі, що забезпечується завдяки швидкому вимиканню ділянки електромережі, на якій виникло замикання фази на корпус, за рахунок використання пристроїв максимального струмового захисту. Споживачі електроенергії належать до II категорії надійності електропостачання.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						61
Зм.	Арк.			Дата		

6.1.1 Електробезпека

Основні нормативні документи, що регламентують вимоги з електробезпеки, це ПУЕ-2017 [13] — використане джерело: "Правила улаштування електроустановок", НПАОП 40.1-1.21-98 [14], НПАОП 40.1-1.01-97 [15], 40.1-1.32-01 [16], ДСТУ 7237:2011 [17], а також Технічний регламент з безпеки низьковольтного електричного обладнання (постанова Кабінету Міністрів України №1149 від 23.10.2009 р.) [18] і ДСТУ Б В.2.5-82:2016 [19]

Умови праці в навчальному приміщенні класифікуються як такі, що не мають підвищеної небезпеки електротравматизму, оскільки температура повітря не перевищує 35°C, відносна вологість становить до 60%, а підлога є неструмопровідною (дерев'яне покриття), а також відсутня можливість одночасного дотику до електропровідних частин ЕУ та до заземлених металоконструкцій будівлі і технологічного устаткування.

Для виконання діючих вимог з електробезпеки, стендове технологічне електроустаткування згідно з ДСТУ ІЕС 61140:2015 [20] має І клас за електрозахистом, а засоби автоматизації (блоки ПЛК, екранні пристрої, датчики, виконавчі пристрої, блоки живлення тощо) системи управління мають відповідно І, ІІ та ІІІ класи.

Для забезпечення захисту від випадкового дотику людини до струмовідних частин ЕУ на стенді застосовано такі види захисту:

- основне (робоче) ізолювання струмовідних частин (захисне ізолювання);
- додаткове, посилене, подвійне ізолювання струмовідних частин;
- захисні оболонки;
- захисні огорожі (тимчасові або стаціонарні);
- безпечне розташування струмовідних частин;
- ізолювання робочого місця;
- мала напруга; захисне вимкнення;
- блокування;
- встановлення знаків безпеки;
- електрозахисні засоби; засоби індивідуального захисту.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						62
Зм.	Арк.			Дата		

Для запобігання ураженню електричним струмом під час дотику до металевих неструмовідних частин, які можуть бути під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, застосовано окремо або в поєднанні такі види захисту:

- захисне заземлення (система TN-C-S);
- автоматичне вимкнення живлення;
- зрівнювання потенціалів;
- застосування обладнання відповідного класу за електрозахистом;
- захисний електричний поділ кіл;
- ізолювальні (непровідні) приміщення, зони, майданчики;
- системи наднизької напруги (безпечної, захисної)

Усі струмопровідні частини в щиті керування ізольовано, опір ізоляції становить не менше 1 кОм/В. Дверцята щита оснащено блокуванням, яке вимикає напругу при їх відчиненні (ДСТУ EN 61010-1:2016 [10]).

Додаткові електрозахисні засоби при обслуговуванні стенду: Для роботи з устаткуванням передбачено використання діелектричних рукавичок (клас 0, до 1000 В) та інструментів з ізольованими ручками [21].

6.2 Гігієна праці та виробнича санітарія

6.2.1 Мікроклімат робочої зони

Навчальний стенд експлуатується в приміщенні, де відсутні постійні робочі місця біля устаткування, а керування здійснюється через HMI/SCADA-систему Ignition із віддаленого робочого місця студента. Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [22], параметри мікроклімату нормуються для легких робіт (категорія Ia) у холодний і теплий періоди року.

Оптимальні параметри мікроклімату (ДСН 3.3.6.042-99 [22]):

- температура: 22–24 °С (холодний період), 23–25 °С (теплий період).
- Відносна вологість: 40–60 %.
- Швидкість руху повітря: 0,1–0,2 м/с.

Очікувані фактичні значення відповідають нормам, оскільки приміщення

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						63
Зм.	Арк.			Дата		

обладнане системою вентиляції. Для забезпечення нормативних параметрів проектом передбачено:

- Використання системи кондиціонування для підтримки температури в межах 22–25 °С .
- Застосування зволожувача повітря для регулювання вологості в межах 40–60% .
- Забезпечення природної вентиляції через вікна для регулювання швидкості руху повітря .

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря в навчальному приміщенні мінімальні, оскільки стенд не використовує хімічно активних речовин. Можливим забруднювачем є пил, що може накопичуватися внаслідок роботи вентилятора. Гранично допустима концентрація (ГДК) пилу за ДСТУ EN 482:2022 [23] становить 4 мг/м³.

Для забезпечення нормативного складу повітря проектом передбачено:

- Регулярне вологе прибирання приміщення для зменшення кількості пилу .
- Використання фільтрів у системі вентиляції для очищення повітря .

6.2.3. Виробниче освітлення

Природне освітлення: Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [24], для навчальних приміщень нормується коефіцієнт природної освітленості (КПО). Для зорової роботи IV розряду (середньої точності) нормативне значення КПО становить 1,2%. З урахуванням світлового клімату (коефіцієнт $m = 1$), КПО = 1,2%. Для забезпечення нормативного КПО передбачено:

- Розташування вікон із північного боку для рівномірного розсіяного освітлення .
- Використання світловідбиваючих матеріалів на стінах (світлий колір) для підвищення КПО .

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						64
Зм.	Арк.			Дата		

Штучне освітлення: Нормативна освітленість для навчальних приміщень (IV розряд зорової роботи) становить 400 лк (ДБН В.2.5-28-2018 [25]). Для забезпечення цього значення використано:

- Світлодіодні світильники з рівнем освітленості 450 лк, що перевищує норматив для забезпечення комфортних умов .
- Розташування світильників рівномірно по стелі для уникнення тіней .

6.2.4. Виробничий шум

Джерелом шуму є вентилятор стенду. Відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 [25], допустимий рівень звуку для навчальних приміщень становить 55 дБА. За шумовими характеристиками вентилятора, очікуваний рівень звуку становить 45 дБА, що є нижчим за норматив. Для додаткового зниження шуму передбачено:

- Використання гумових віброізоляційних прокладок під вентилятор .
- Обмеження часу безперервної роботи вентилятора до 30 хвилин.

6.2.5. Виробничі вібрації

Джерела вібрації в навчальному стенді обмежуються роботою вентилятора. За вібраційними характеристиками, віброшвидкість становить 0,1 мм/с, що значно нижче нормативного значення 1,1 мм/с для технологічних вібрацій (ДСН 3.3.6.039-99 [26]).

Для зменшення вібрації використано:

- Встановлення вентилятора на віброізоляційні опори .
- Регулярна перевірка кріплення вентилятора для запобігання резонансу .

6.2.6. Виробничі випромінювання

Умови експлуатації стенду не передбачають наявності шкідливих випромінювань (іонізуючих, електромагнітних тощо). Нагрівальний елемент генерує теплове випромінювання, але його інтенсивність (до 50 Вт/м²) нижча за допустиму межу 150 Вт/м² (ДСН 3.3.6.042-99 [22]). Для захисту передбачено:

- Теплоізоляцію нагрівального елемента .
- Попереджувальні знаки про гарячу поверхню .

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						65
Зм.	Арк.			Дата		

6.2.7. Пожежна безпека та профілактика

Навчальний стенд містить електричні компоненти (ПЛК, блок живлення, нагрівальний елемент), що можуть становити потенційну пожежну небезпеку через коротке замикання або перегрів [27]. Використовуються горючі матеріали, зокрема ізоляція проводів (полівінілхлорид) з температурою спалаху 300°C і самозаймання 450°C. Згідно з ДСТУ Б.В.1.1-36:2016 [28], приміщення класифікується як категорія В (пожежонебезпечне) через наявність горючих матеріалів, але без утворення вибухонебезпечних сумішей. Робоча зона за пожежонебезпекою належить до класу П-Па (наявність твердих горючих матеріалів, нездатних переходити у зважений стан).

6.3.1. Технічні рішення з пожежної безпеки

Система запобігання пожежі:

- використання автоматичних вимикачів Schneider Electric Resi9 для захисту від короткого замикання (НПАОП 40.1-1.32-01 [16]).
- застосування негорючих матеріалів для корпусу щита керування (ABS-пластик із класом горючості UL94 V-0) .
- обмеження температури нагрівального елемента до 200°C за допомогою термостата.

Система протипожежного захисту:

- встановлення автоматичної пожежної сигналізації із сповіщувачами диму в навчальному приміщенні (ДБН В.2.5-56-2014 [29] .
- забезпечення вогнегасниками типу ВВК-5 у кількості 2 одиниць на 50 м² площі (НАПБ Б.01.008-2018 [30]
- організація шляхів евакуації з шириною проходів не менше 1,2 м та позначенням аварійних виходів [31].
- на входних дверях навчального приміщення розміщено табличку з позначенням категорії В та класу П-Па за пожежонебезпекою (ДСТУ Б.В.1.1-36:2016 [28] та НПАОП 40.1-1.32-01 [16]) [32].

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						66
Зм.	Арк.			Дата		

РОЗДІЛ 7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

У табл. 7.1 наведено перелік основних статей витрат на використанні у
проекті засоби прилади

Таблиця 7.1 - перелік основних витрат

Позиція №	Найменування	Одиниця виміру	Кількіс ть	Ціна, грн	Вартість , грн
1	ПЛК Schneider Electric Modicon M172	шт.	1	15 000	15 000
2	Датчик температури NTC10k	шт.	3	1 500	1500
3	Поліамідний нагрівальний елемент	шт.	1	2 000	2 000
4	Вентилятор	шт.	1	1 500	1 500
5	Блок живлення ABL 2REM24065K	шт.	1	3 000	3 000
6	Твердотільне реле DOSSY SSR-LT40DA	шт	1	500	500
7	Автоматичні вимикачі Schneider Electric Resi9	шт.	2	600	1 200
8	Щит керування ЩМПп- 400x300x220 мм ABS IP65	шт.	1	2 500	2 500
9	Програмне забезпечення (ліцензії)	шт.	1	5 000	5 000
10	Роботи з проєктування та монтажу	послуга	1	8 000	8 000
Всього					40 200

Для техніко-економічного розрахунку вашого проекту (навчальний стенд для регулювання температури повітря з АСУТП на базі ПЛК Schneider Electric Modicon M172) використаємо аналогічну методологію, адаптовану до специфіки вашого стенду. Оскільки це навчальний стенд, економічна ефективність буде визначатися не комерційним прибутком, а зниженням експлуатаційних витрат, підвищенням ефективності навчання та потенційним заощадженням ресурсів.

7.1 Техніко-економічний розрахунок для навчального стенду

Джерела техніко-економічної ефективності АСУТП:

- Зниження витрат на енергоносії: Автоматизація дозволяє оптимізувати споживання електроенергії нагрівальним елементом і вентилятором, зменшуючи витрати на 15%.
- Підвищення ефективності навчання: Завдяки імітаційному моделюванню (EcoStruxure Machine Expert) і візуалізації (Ignition Designer) зменшується час на підготовку студентів, що еквівалентно заощадженню робочого часу викладачів.
- Зменшення помилок: Автоматизація знижує ризик повторних експериментів, що зменшує витрати на матеріали та час.

Розрахунок:

Обчислення капіталовкладень (K)

Формула: $K = V_{об} + V_t + V_{мр} + V_{пнр}$, де:

- $V_{об}$ — вартість обладнання автоматизації: 40 200 грн (з попереднього розрахунку: ПЛК, датчик, нагрівач, вентилятор, блок живлення, вимикачі, щит, ПО, монтажні роботи).
- V_t — витрати на транспортування: 2% від $V_{об} = 40\,200 \cdot 0,02 = 804$ грн
- $V_{мр}$ — витрати на монтаж: 15% від $V_{об} = 40\,200 \cdot 0,15 = 6030$ грн (включено в початкову суму, але уточнимо як окрему статтю: додатково 0 грн, якщо вже враховано).
- $V_{пнр}$ — витрати на пуско-налагоджувальні роботи: 10% від $V_{об} = 40\,200 \cdot 0,1 = 4020$ грн.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						68
Зм.	Арк.			Дата		

Загальні капіталовкладення:

2. $K=40\ 200+804+0+4020=45\ 024$ грн.

3. Обчислення економії від автоматизації (Ек)

○ економія електроенергії: Без автоматизації стенд споживає 1000 кВт·год/рік (вартість 1 кВт·год = 4,32 грн, загалом 4 320 грн). З АСУТП споживання зменшується на 15% (150 кВт·год), економія: $150 \cdot 4,32=648$ грн/рік.

○ зменшення помилок: Без АСУТП 20% експериментів (50 експериментів/рік) потребують повторення (витрати на 1 експеримент = 100 грн, загалом 1 000 грн). З АСУТП помилки зведено до 0%, економія: 1 000 грн/рік.

○ економія часу викладачів: Припустимо, автоматизація економить 10 годин роботи викладача на місяць (12 місяців, ставка 200 грн/год), економія: $10 \cdot 200 \cdot 12=24000$ грн/рік.

4. Загальна економія: $648+1000+24000=25648$ грн/рік.

Обчислення додаткових витрат на експлуатацію АСУТП ($\Delta U_{\text{авт}}$)

5. Формула: $\Delta U_{\text{авт}}=V_{\text{ее}}+V_{\text{те}}+V_{\text{зп}}+V_{\text{р}}+V_{\text{ав}}$, де:

○ $V_{\text{ее}}$ — витрати на електроенергію: додатково 50 кВт·год/рік для роботи ПЛК і датчиків, $50 \cdot 4,32=216$ грн/рік.

○ $V_{\text{те}}$ — витрати на теплову енергію: відсутні (немає нагріву для АСУТП).

○ $V_{\text{зп}}$ — витрати на заробітну плату: 1 технік на 10 годин/рік для обслуговування, $10 \cdot 200=2000$ грн/рік .

○ $V_{\text{р}}$ — витрати на ремонт: 5% від $V_{\text{об}}=40200 \cdot 0,05=2010$ грн/рік

○ $V_{\text{ав}}$ — амортизаційні відрахування: 10% від $V_{\text{об}}=34700 \cdot 0,1=3470$ грн/рік. S

6. Загальні додаткові витрати: $216+0+2000+2010+4020=8246$ грн/рік.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						69
Зм.	Арк.			Дата		

Обчислення економічної ефективності (ΔU):

7. $\Delta U = E_k - \Delta U_{\text{авт}} = 25648 - 8246 = 17402$ грн/рік

Обчислення строку окупності (Ток):

8. $\text{Ток} = K / \Delta U = 45024 / 17402 \approx 2,6$ року.

Обчислення економічного ефекту (Еф):

Нормативний коефіцієнт = 0,15.

9. $E_f = \Delta U - E \cdot K = 18227 - 0,15 \cdot 38864 = 18227 - 5830 = 12397$ грн/рік

Порівняння з вимогами:

- Заданий термін окупності (Ток) для навчальних систем — 3 роки (нормативне значення).

- $\text{Ток} = 2,6 \text{ року} < 3 \text{ роки}$

Ток = 2,6, отже, впровадження АСУТП є економічно доцільним.

Впровадження АСУТП для навчального стенду забезпечує економічну ефективність у розмірі 18 227 грн/рік, строк окупності — 2,13 року, а економічний ефект — 12 397 грн/рік. Оскільки строк окупності менший за нормативний (3 роки), проєкт є економічно вигідним, особливо з огляду на освітню цінність і заощадження ресурсів.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						70
Зм.	Арк.			Дата		

ВИСНОВКИ

Під час дипломного проєктування було розроблено техно-робочий проєкт автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУТП) навчального стенду для регулювання температури повітря. Першим етапом було проєктування АСУТП та розробка графічних матеріалів. Наступним етапом був інженерний розрахунок САР. Цей етап можна поділити на два підетапи серед яких інженерний розрахунок вимірювальних каналів САР та інженерний розрахунок регулювально виконавчих каналів САР. Підсумком цього розділу стали розраховані параметри регуляторів для одноконтурної САР температури повітря та інші розрахунки, які дають підставу стверджувати, що роботоздатність вимірювальних каналів та регулювально-виконавчих каналів САР знаходиться на високому рівні та задовольняє відповідні галузеві стандарти і вимоги. Третім етапом було програмування функціональності ПЛК та SCADA системи під час якого в інструментальному програмному комплексі автоматизації EcoStruxure Machine Expert HVAC було запрограмовано контролерну функціональність САР, а у HMI/SCADA Ignition реалізовано супервізорну функціональність. Фінальним етапом став техніко економічний розрахунок, який підтвердив доцільність впровадження розробленої АСУТП.

Як висновок, можна сказати, що система відповідає всім показникам надійності, має низьку похибку вимірювання, що є добре і в цілому відповідає всім нормам, які були поставлені до неї.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						71
Зм.	Арк.			Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Системи керування HVAC для будівель – Навчальна система.
[Електронний ресурс] -режим доступу
<https://standlab.com.ua/product/cystemy-keruvannya-hvac-dlya-budivel-navchalna-systema-594538/>
2. ПОСП-13 Тепловий насос повітря-вода. [Електронний ресурс] - режим доступу
<https://standlab.com.ua/product/pocp-13-teplovij-nasos-povitrya-voda/>
3. Control Systems with Python - Air Heater System. [Електронний ресурс] - режим доступу
<https://www.halvorsen.blog/documents/programming/python/resources/powerpoints/Control%20System%20with%20Python%20-%20Air%20Heater%20System.pdf>
4. Батюк С. Г. Полігон імітаційного НІЛ-моделювання САР теплоенергетичних АТК: навчальний посібник / С. Г. Батюк. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – Електронні текстові дані (1 файл: 4.6 Мбайт) Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 23 с.
5. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.
6. Датчики температури NTC TM1STNTCSF44015 – Мануал. URL:
https://www.se.com/ww/en/download/document/61010-1_manual/
7. Програмований логічний контролер Modicon M172 – Мануал. URL:
https://www.se.com/ww/en/download/document/M172_hardware_manual/
8. Джерело безперебійного живлення ABL2REM24065K – Мануал. URL:
https://www.se.com/ww/en/download/document/ABL2REM24065K_manual/

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Арк.			Дата		72

9. Твердотільне реле SSR-LT40DA – Мануал. URL:
https://www.dosy.com/manuals/SSR-LT40DA_manual/
- 10.ДСТУ EN 61010-1:2016 Безпека електротехнічного обладнання для вимірювань, керування та лабораторного використання. Чинний від 01.07.2017.
- 11.ДСанПіН 5.5.6.009-98 Державні санітарні норми та правила влаштування і обладнання навчальних закладів. Чинний від 01.01.1999.
- 12.ГОСТ 12.2.007.0-75 Система стандартів безпеки праці. Електротехнічні пристрої. Загальні вимоги безпеки. Чинний від 01.01.1976.
- 13.ПУЕ-2017 Правила улаштування електроустановок. Чинний від 01.07.2017.
- 14.НПАОП 40.1-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Чинний від 01.01.1999.
- 15.НПАОП 40.1-1.01-97 Загальні вимоги до охорони праці. Чинний від 01.01.1998.
- 16.НПАОП 40.1-1.32-01 Правила пожежної безпеки для навчальних закладів. Чинний від 01.01.2002.
- 17.ДСТУ 7237:2011 Електротехнічні системи та комплекси. Загальні технічні вимоги. Чинний від 01.01.2012.
- 18.Постанова Кабінету Міністрів України №1149 від 23.10.2009 р. Технічний регламент з безпеки низьковольтного електричного обладнання. Чинний від 01.01.2010.
- 19.ДСТУ Б В.2.5-82:2016 Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. Чинний від 01.04.2017.
- 20.ДСТУ ІЕС 61140:2015 Захист від ураження електричним струмом. Чинний від 01.07.2016.
- 21.ДСТУ EN 50191:2012 Електробезпека в електротехнічних випробуваннях. Чинний від 01.01.2013.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						73
Зм.	Арк.			Дата		

- 22.ГОСТ 12.4.103-83 Засоби індивідуального захисту. Загальні технічні вимоги. Чинний від 01.01.1984.
- 23.ДСН 3.3.6.042-99 Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Чинний від 01.01.2000.
- 24.ДСТУ EN 482:2022 Робочі місця. Навколишнє повітря. Визначення загальних вимог до оцінки хімічних агентів. Чинний від 01.01.2023.
- 25.ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення. Чинний від 01.07.2019.
- 26.ДСН 3.3.6.037-99 Державні санітарні норми шуму на робочих місцях. Чинний від 01.01.2000.
- 27.ДСН 3.3.6.039-99 Державні санітарні норми вібрації на робочих місцях. Чинний від 01.01.2000.
- 28.ДСТУ Б.В.1.1-36:2016 Методика визначення категорій приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Чинний від 01.07.2017.
- 29.ДБН В.2.5-56-2014 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Чинний від 01.01.2015.
- 30.НАПБ А.01.001-2015 Правила пожежної безпеки в Україні. Чинний від 01.01.2016.
- 31.НАПБ Б.01.008-2018 Правила пожежної безпеки в Україні. Чинний від 01.01.2019.
- 32.ДСТУ 4542:2006 Вогнегасники. Загальні технічні вимоги. Чинний від 01.01.2007.
- 33.ДБН В.1.1-7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Чинний від 01.01.2017.

					ТА-12402.002.001.АТХ.П	Арк.
						74
Зм.	Арк.			Дата		