Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення та моделювання системи автоматичного управління температурним режимом виробничого приміщення
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-22-2
Микита ПАВЛОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Наталія ДЕМСЬКА
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Павлов Микита Андрійович як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"04" липня 2026 р.  Микита ПАВЛОВ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет АКІТС
Кафедра КІТАРБІ
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
« 28 » квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві Павлову Микиті Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи Розроблення та моделювання системи автоматичного управління температурним режимом виробничого приміщення
затверджена наказом університету від 04.06.2026 р. № 472 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 11.07.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи
3.1 Об'єкт автоматизації: промислова камера сушіння полімерних композитів
3.2 Апаратна платформа: програмований логічний контролер ПЛК-210, датчики температури Pt100, тиристорний регулятор потужності.
3.3 Програмне середовище розробки: CODESYS V3.5 (мова Structured Text).
3.4 Середовище моделювання: Python 3.10 (SciPy, Matplotlib) / MATLAB Simulink.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Вступ
4.2 Аналіз предметної області: сучасний стан систем керування тепловими об'єктами, аналіз існуючої релейної системи та формалізація об'єкта керування.
4.3 Розробка та обґрунтування рішення: синтез ПІД-алгоритму, розробка апаратної структури, програмування ПЛК та математичне моделювання
4.4 Розробка загальної структури системи та вибір обладнання
4.5 Економічне обґрунтування та охорона праці на виробничій ділянці
4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал в форматі (*.ppt) – 11 арк. ф. А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Актуальність роботи, постановка задачі	01.05.26 – 04.05.26	викон.
2	Визначення мети, об'єкта та предмета розробки	05.05.26 – 08.05.26	викон.
3	Аналіз предметної області: методи терморегуляції, датчики, контролери	09.05.26 – 15.05.26	викон.
4	Розробка структурної та функціональної схем системи	16.05.26 – 20.05.26	викон.
5	Вибір компонентної бази, обґрунтування рішень	21.05.26 – 24.05.26	викон.
6	Розробка математичної моделі об'єкта керування	25.05.26 – 29.05.26	викон.
7	Синтез ПІД-регулятора, визначення параметрів	30.05.26 – 02.06.26	викон.
8	Розробка підсистеми відведення конденсату	03.06.26 – 06.06.26	викон.
9	Програмна реалізація (ST, Python), моделювання	07.06.26 – 10.06.26	викон.
10	Оформлення пояснювальної записки, підготовка до захисту	11.06.26 – 14.06.26	викон.

Дата видачі завдання 28.04.2025 р.

Здобувач _____ Микита ПАВЛОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ доцент Наталія ДЕМСЬКА
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 62 с., 1 табл., 24 рис., 2 дод., 35 джерел.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ, ПРОГРАМОВАНИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР, ПІД-РЕГУЛЯТОР, МОДЕЛЮВАННЯ, CODESYS.

Об’єкт розробки – динамічні теплові процеси, що протікають у промисловій сушильній камері під час термічної обробки та полімеризації матеріалів.

Предмет розробки – апаратна та програмна структура мікропроцесорної системи автоматичного керування температурним режимом на базі програмованого контролера.

Мета роботи – підвищення якості готової продукції, зниження рівня браку та забезпечення енергоефективності процесу сушіння шляхом розроблення й моделювання системи автоматизації.

У кваліфікаційній роботі проведено детальний аналіз недоліків існуючих двопозиційних релейних систем керування нагрівом. На основі експериментальних даних побудовано математичну модель теплового об'єкта у вигляді аперіодичної ланки першого порядку із запізненням.

Синтезовано алгоритм цифрового ПІД-регулятора, в якому реалізовано метод умовного інтегрування для захисту від інтегрального насичення (anti-windup). Створено оригінальну підсистему автоматичного відведення конденсату з контуром аварійного failsafe-захисту. Написано прикладне програмне забезпечення мовою Structured Text у середовищі CODESYS V3.5, а також реалізовано клієнтську частину на Python з використанням асинхронного сокет-з'єднання та бінарного декодування даних за стандартом IEEE 754.

ABSTRACT

Explanatory note: 62 pages, 1 tables, 24 figures, 2 appendices, 35 references.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, TEMPERATURE REGIME, PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER, PID CONTROLLER, MODELING, CODESYS.

The Object of development – dynamic thermal processes occurring in an industrial drying chamber during material heat treatment and polymerization.

Subject of development – hardware and software structure of a microprocessor-based automatic temperature control system based on a programmable controller.

Aim of work – to improve product quality, reduce defect rates, and ensure drying energy efficiency through automation system development and simulation.

Research methods – automatic control theory, computational mathematics, object identification methods via step response curves, industrial programming.

The qualification project analyzes the critical disadvantages of existing two-position relay heating control systems. Based on experimental data, a mathematical model of the thermal object is constructed as a first-order aperiodic link with transport delay.

A digital PID control algorithm with a clamping anti-windup method for protection against integral saturation has been synthesized. An original automatic condensate drainage subsystem with a failsafe protection circuit was designed. Application software was written in Structured Text within the CODESYS V3.5 environment, and a client module was implemented in Python using an asynchronous socket connection and IEEE 754 binary data decoding.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень 7
Вступ 8
1 Теоретичні основи дослідження систем керування температурними режимами 10
1.1 Сучасний стан та тенденції розвитку автоматизованих систем керування тепловими об'єктами 10
1.2 Класифікація та аналіз методів регулювання температури 14
1.3 Апаратні засоби вимірювання та керування в термічних процесах 19
1.4 Математичне моделювання термодинамічних процесів 24
1.5 Математичне моделювання термодинамічних процесів 28
2 Аналіз предметної області та об'єкта дослідження 23
2.1 Характеристика технологічного процесу сушіння полімерних композитів 23
2.2 Аналіз існуючої релейної системи керування: виявлення проблем та недоліків 24
2.3 Формалізація об'єкта керування та ідентифікація параметрів 24
2.4 Обґрунтування вибору апаратного та програмного забезпечення для модернізації 27
2.5 Висновки до другого розділу 30
3 Проєктування системи автоматичного управління температурним режимом сушильної камери 35
3.1 Розробка ПІД-регулятора та обґрунтування параметрів. 35
3.2 Синтез алгоритму дискретного ПІД-регулювання 40
3.3 Розробка підсистеми відведення конденсату 42
3.4 Програмна реалізація (Python та CODESYS ST) 44
3.5 Результати моделювання 53

3.6 Висновки до розділу 55
4 Охорона праці 55
4.1 Загальні положення 55
4.2 Небезпеки та шкідливі фактори 56
4.3 Заходи з охорони праці 56
4.4 Пожежна безпека 60
4.5 Санітарно-гігієнічні умови 50
4.6 Висновки до розділу 55
Висновки 58
Перелік джерел посилання 60
Додаток А Повний програмний код мовою Structured Text для керування температурним режимом 63
Додаток Б Демонстраційний матеріал 68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЗП – захватний пристрій;

ОМ – об’єкт маніпулювання;

ПР – промисловий робот;

РТК – робототехнічний комплекс;

РТС – робототехнічні системи;

САПР – система автоматизованого проектування;

СК – система керування;

ШІ – штучній інтелект;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

Контроль та керування температурними режимами технологічних процесів є однією з фундаментальних та найбільш критичних задач у сфері промислової автоматизації. Від точності підтримання заданої температури на етапах сушіння, термічної обробки або полімеризації матеріалів безпосередньо залежить якість кінцевої продукції, рівень енергоефективності виробничого обладнання, а також загальна безпека експлуатації промислових об'єктів [1].

У сучасному машинобудівному та хімічному виробництві, зокрема при роботі з полімерними композитами, технологічні регламенти вимагають суворого дотримання температурних графіків. Відхилення параметрів мікроклімату камери сушіння навіть на кілька градусів здатне призвести до деградації матеріалу, виникнення внутрішніх напружень та тріщин, або ж до неповного видалення вологи.

Сьогодні у світовій промисловості спостерігається чітка тенденція переходу від застарілих двопозиційних (релейних) систем керування до комплексних, високоінтегрованих рішень, побудованих на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК) та комп'ютерних систем моніторингу диспетчерського рівня (SCADA).

Впровадження сучасних ПІД-регуляторів, цифрових промислових протоколів та надійних напівпровідникових виконавчих механізмів дозволяє досягти високої точності регулювання (до мінус чи плюс 0,5–2 градусів Цельсія), скоротити споживання електроенергії на 20–40 відсотків [2], а також автоматизувати реакцію системи на зовнішні та внутрішні збурення.

Досліджувана у роботі виробнича ділянка наразі функціонує з використанням застарілої системи ручного та релейного керування, що спричиняє значні проблеми: наявність перерегулювання (температура перевищує задане значення на 8–15 градусів), постійні температурні коливання з амплітудою 3–7 градусів, тривалий час розгону системи та залежність якості

процесу від людського фактора. Наслідком цих недоліків є високий рівень браку (близько 15–20 відсотків) та перевитрати енергоресурсів. Таким чином, розроблення сучасної автоматизованої системи керування температурним режимом із попереднім етапом математичного моделювання є своєчасним, актуальним та економічно доцільним завданням.

Мета розробки полягає у підвищенні якості виготовлення полімерних композитних деталей, зниженні рівня браку та забезпеченні енергоефективності процесу сушіння шляхом розроблення, математичного моделювання та програмної реалізації мікропроцесорної системи автоматичного управління температурним режимом виробничої ділянки на базі програмованого логічного контролера ПЛК-210.

Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі вирішуються такі основні задачі:

– здійснити аналіз особливостей технологічного процесу сушіння та сформувати технічні вимоги до системи керування;

– провести огляд існуючих методів керування, типів первинних перетворювачів та виконавчих механізмів, що застосовуються в термічній автоматизації;

– розробити структурну та функціональну схеми системи автоматичного керування із обґрунтуванням вибору апаратної бази;

– побудувати математичну модель об'єкта керування (камери сушіння), враховуючи його інерційність та теплові втрати;

– синтезувати алгоритм керування на основі дискретного ПІД-регулятора та розробити прикладне програмне забезпечення;

– виконати комп'ютерне моделювання розробленої системи, дослідити показники якості перехідних процесів;

– оцінити економічну ефективність та розробити заходи з охорони праці.

Об’єктом розробки є динамічні теплові процеси, що протікають у виробничій камері сушіння промислового типу в ході термічної обробки матеріалів.

Предметом розробки є структура, алгоритмічне забезпечення, математичні

моделі та програмні засоби автоматизованої системи управління температурним режимом.

При виконанні роботи застосовано методи теорії автоматичного керування, методи математичного моделювання та чисельного інтегрування, методи емпіричного аналізу для ідентифікації параметрів, а також методи техніко-економічного аналізу. Комп'ютерне моделювання здійснювалося з використанням мови програмування Python та середовища розробки CODESYS.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні готового до промислового впровадження інженерного рішення, що дозволяє зменшити відсоток виробничого браку, підвищити надійність обладнання та забезпечити суттєву економію електроенергії на виробничій ділянці.

Робота виконана згідно [3, 4]. Результати роботи відповідають Цілям сталого розвитку (ЦСР), а саме цілі № 9: Інновації та інфраструктура [5].

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМИ РЕЖИМАМИ

1.1 Сучасний стан та тенденції розвитку автоматизованих систем керування тепловими об'єктами

Сучасне промислове виробництво характеризується постійним зростанням вимог до якості готової продукції, інтенсифікацією технологічних процесів та необхідністю впровадження енергоефективних технологій.

У загальній структурі промислових підприємств системи автоматичного керування тепловими процесами посідають одне з провідних місць [6]. Це зумовлено тим, що термічна обробка, яка включає процеси сушіння, полімеризації, випалювання та плавлення, є найбільш енергоємною стадією виробництва у хімічній, машинобудівній та будівельній галузях.

Історичний розвиток систем керування тепловими об'єктами пройшов шлях від ручного регулювання оператором до складних ієрархічних мікропроцесорних комплексів. Тривалий час основним інструментом автоматизації були локальні аналогові прилади та електромеханічні релейні схеми. Вони забезпечували працездатність обладнання, але не могли гарантувати високу точність та гнучкість управління в умовах зміни зовнішніх збурень.

Розвиток мікропроцесорної техніки та силової електроніки зумовив перехід до сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами, які будуються на базі програмованих логічних контролерів та інтегруються у загальнозаводські інформаційні мережі відповідно до концепції Індустрії 4.0 (рис. 1.1).

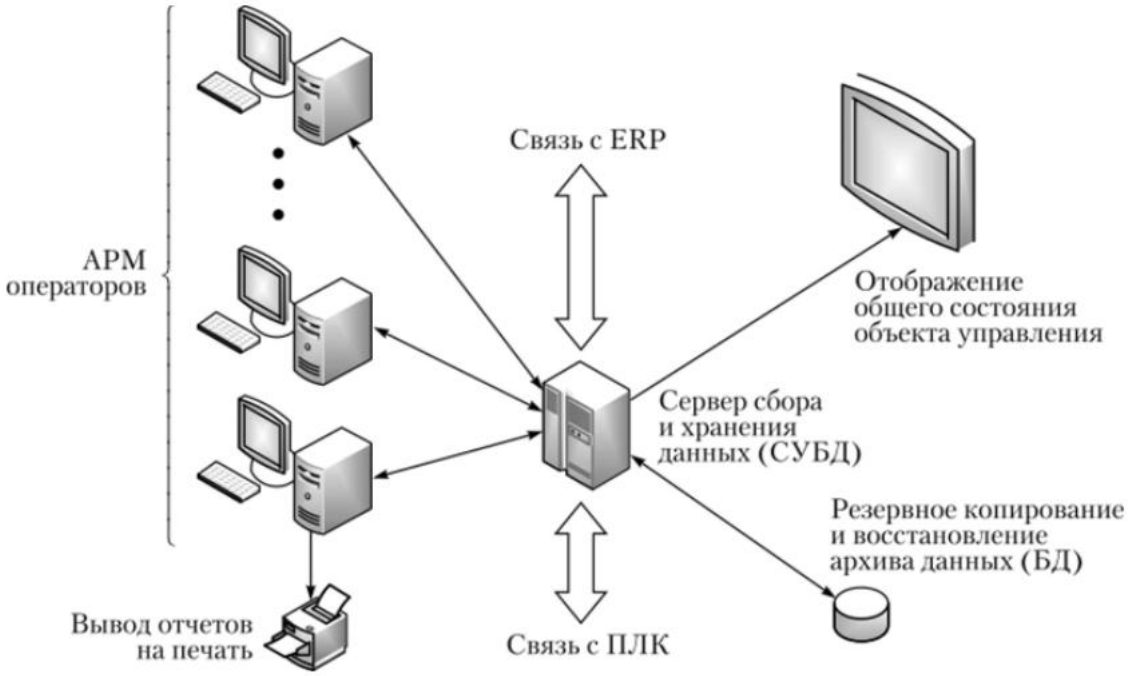


Рисунок 1.1 – Функціональна схема сучасної багаторівневої системи керування тепловим об'єктом

Основними тенденціями розвитку сучасних систем керування тепловими об'єктами є:

– перехід від локальних регуляторів до розподілених систем керування, що дозволяє здійснювати комплексний моніторинг усіх параметрів виробничої ділянки;

– використання високоточних цифрових та аналогових первинних перетворювачів із уніфікованими вихідними сигналами;

– впровадження напівпровідникових комутаційних пристроїв та тиристорних регуляторів потужності замість застарілих магнітних пускачів, що забезпечує плавне безперервне дозування енергії;

– застосування сучасних промислових протоколів передачі даних, таких як Modbus TCP або EtherCAT, для інтеграції технологічного обладнання в єдину цифрову систему підприємства.

Сучасні системи керування дозволяють мінімізувати вплив людського фактора, забезпечують точність підтримання температури в межах долей градуса

Цельсія, знижують питоме споживання електроенергії на 20–40 відсотків та суттєво зменшують кількість виробничого браку.

1.2 Класифікація та аналіз методів регулювання температури

Вибір закону регулювання є визначальним фактором для забезпечення заданих показників якості функціонування системи автоматичного керування. У промислових системах автоматизації теплових процесів застосовують кілька основних методів регулювання, кожен з яких має свої техніко-економічні обмеження [7].

Двопозиційне або релейне регулювання є найпростішим і найдешевшим методом. Виконавчий механізм у такій системі має лише два стани: увімкнено та вимкнено. Управління здійснюється за алгоритмом, де повна потужність подається на нагрівач, якщо поточна температура нижча за задану, і повністю відключається при перевищенні уставки [8] (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Графік коливань температури при двопозиційному законі регулювання

Для запобігання занадто частому спрацьовуванню комутаційної апаратури в алгоритм вводять гістерезис. Наявність значної теплової інерції в промислових камерах сушіння при використанні двопозиційного регулювання призводить до виникнення автоколивань температури з великою амплітудою та суттєвого перерегулювання.

Пропорційне регулювання (1.1) дозволяє формувати керуючий вплив, який є пропорційним поточній помилці регулювання. Рівняння пропорційного регулятора має вигляд:

$$u(t) = K_p \cdot e(t), \tag{1.1}$$

де K_p – коефіцієнт пропорційного підсилення;

$e(t)$ – помилка регулювання, що визначається як різниця між заданим та поточним значеннями температури.

Цей метод забезпечує більш плавне керування, проте йому притаманний фундаментальний недолік – наявність статичної помилки. Система не здатна вийти точно на задане значення, оскільки для компенсації постійних теплових втрат камери у навколишнє середовище необхідна наявність постійної ненульової помилки.

Пропорційно-інтегрально-диференціальне регулювання є найбільш поширеним та ефективним алгоритмом для керування інерційними об'єктами. Рівняння неперервного ПІД-регулятора має вигляд (1.2):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e\,(\tau)d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \tag{1.2}$$

де K_i – інтегральний коефіцієнт;

K_d – диференціальний коефіцієнт.

Кожна із складових виконує чітко визначену функцію:

– пропорційна складова формує швидку реакцію на появу помилки;

– інтегральна складова накопичує помилку в часі та забезпечує повне усунення статичної похибки в усталеному режимі;

– диференціальна складова реагує на швидкість зміни помилки, що дозволяє прогнозувати поведінку системи та демпфувати коливання, знижуючи перерегулювання (рис. 1.3).

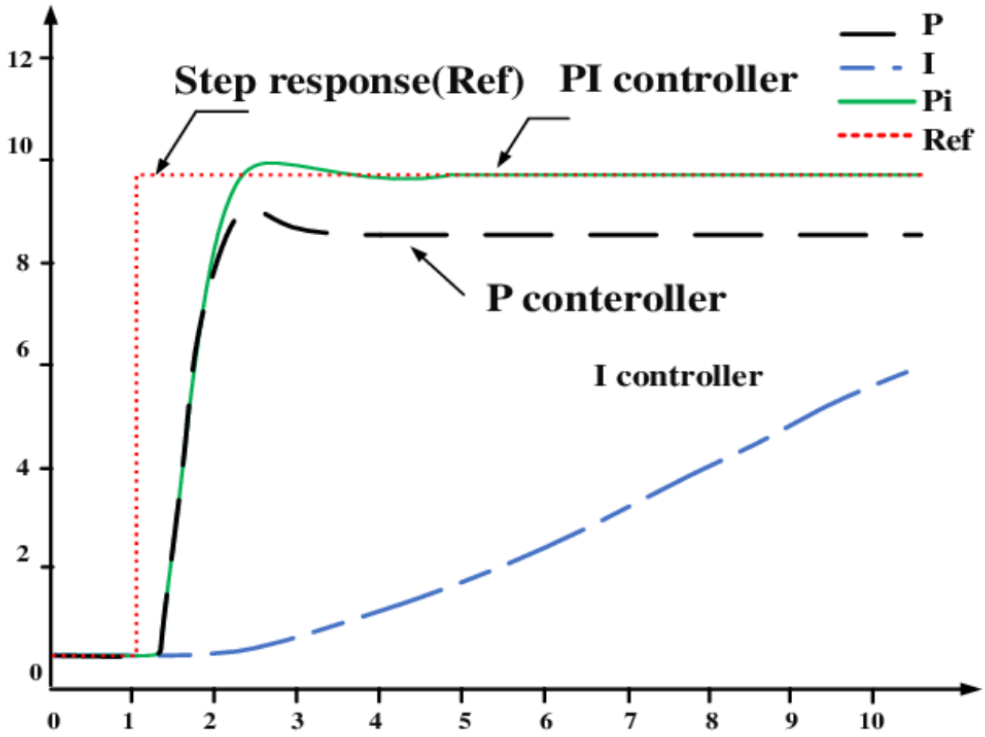


Рисунок 1.3 – Порівняння перехідних процесів для різних законів регулювання

Для інерційних теплових об'єктів із транспортним запізненням застосування ПІД-алгоритму є оптимальним рішенням, яке дозволяє досягти високої якості перехідних процесів за умови правильного налаштування його коефіцієнтів.

1.3 Апаратні засоби вимірювання та керування в термічних процесах

Для технічної реалізації системи автоматичного керування температурним режимом виробничої ділянки необхідно провести детальний аналіз існуючих апаратних засобів вимірювання та силової комутації. Первинні перетворювачі температури класифікуються за фізичним принципом дії. У промисловості найчастіше використовуються термоелектричні перетворювачі (термопари) та термоперетворювачі опору [9].

Термопари використовують ефект виникнення термоелектрорушійної сили в контурі з двох різних провідників при наявності градієнта температур між робочим та вільним спаями. Вони мають широкий діапазон вимірювання та низьку інерційність, але вимагають лінеаризації характеристики та компенсації температури холодного спаю [10].

Термоперетворювачі опору базуються на властивості металів змінювати свій електричний опір при зміні температури. Найвищу точність та стабільність мають платинові датчики типу Pt100. Вони мають лінійну характеристику у робочому діапазоні температур камери сушіння (від 20 градусів Цельсія до 150 градусів Цельсія) і забезпечують точність вимірювання до десятої частини градуса.

Підключення термоперетворювачів опору до модулів аналогового вводу контролера виконується за різними схемами для компенсації опору підводячих дротів [11].

Трипровідна схема підключення (рис. 1.4) є промисловим стандартом, оскільки вона дозволяє з достатньою точністю компенсувати опір ліній зв'язку за умови рівності опорів усіх трьох провідників [6].

Використання електромагнітних контакторів призводить до швидкого механічного зносу контактів при частому перемиканні та створює значні електромагнітні завади в мережі [12].

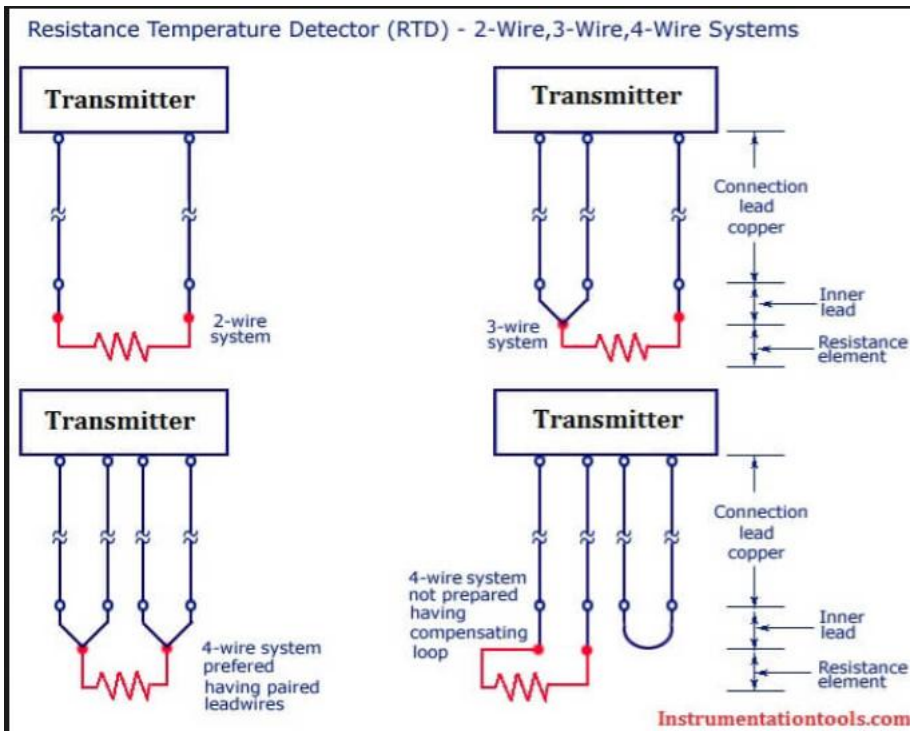


Рисунок 1.4 – Схеми підключення промислових термоперетворювачів опору

Сучасним рішенням є використання твердотільних реле або тиристорних регуляторів потужності [13]. Тиристорні регулятори дозволяють реалізувати два методи керування: фазове керування та керування з пропусканням періодів напруги через нуль. Для теплових об'єктів з великою інерцією оптимальним є метод широтно-імпульсної модуляції з комутацією в момент переходу напруги через нуль, що мінімізує рівень вищих гармонік у живильній електричній мережі.

1.4 Математичне моделювання термодинамічних процесів

Математичне моделювання є необхідним етапом проектування систем автоматичного керування, який дозволяє дослідити динамічні властивості об'єкта та провести синтез регулятора без ризику пошкодження реального обладнання.

Промислова камера сушіння з точки зору теорії автоматичного керування є розподіленим тепловим об'єктом із суттєвим транспортним запізненням та

інерційністю. Проте для інженерних розрахунків та синтезу лінійних регуляторів таку систему можна апроксимувати зосередженою моделлю першого або другого порядку із запізненням.

Рівняння теплового балансу камери сушіння у диференціальній формі на основі закону збереження енергії має вигляд (1.3):

$$V \cdot \rho \cdot c \cdot \frac{dT(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t), \quad (1.3)$$

де V – корисний об'єм камери;

ρ – густина повітряного середовища;

c – питома теплоємність;

$T(t)$ – поточна температура в камері;

$Q_{in}(t)$ – теплова потужність, що надходить від ТЕНів;

$Q_{out}(t)$ – теплові втрати в навколишнє середовище через стінки камери та вентиляцію.

Теплові втрати пропорційні різниці температур всередині камери та в навколишньому середовищі вказані (1.4):

$$Q_{out}(t) = 0 \pm \text{в‹} \dots S\text{в‹} \dots (T(t) - T_{env}), \quad (1.4)$$

де $0 \pm$– коефіцієнт теплопередачі стінок камери;

S – загальна площа поверхонь теплообміну;

T_{env} – температура навколишнього середовища.

Після виконання лінеаризації та переходу до операторної форми за допомогою перетворення Лапласа, передавальна функція теплового об'єкта (рис. 1.5) першого порядку із запізненням набуває класичного вигляду у (1.5):

$$W(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s}, \quad (1.5)$$

де K – коефіцієнт передачі об'єкта керування, який показує зміну температури в усталеному режимі на один відсоток зміни потужності нагрівача;

T – постійна часу об'єкта, що характеризує його теплову інерційність;

τ – час транспортного запізнення, зумовлений швидкістю поширення теплових потоків від нагрівача до датчика температури;

s – комплексна змінна Лапласа.

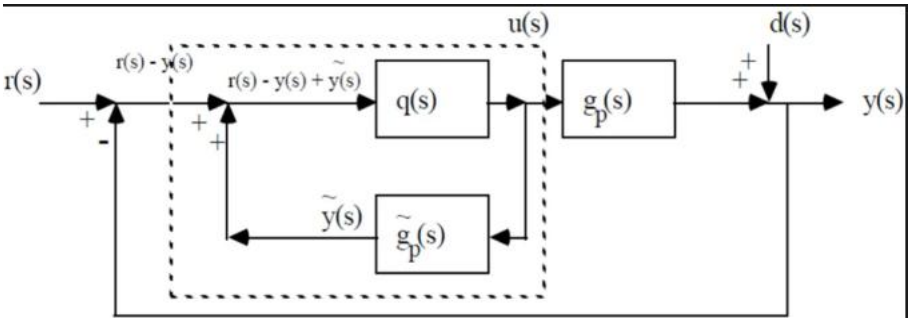


Рисунок 1.5 – Структурна схема математичної моделі об'єкта із запізненням

Параметри K, T та τ визначаються експериментальним шляхом на основі аналізу кривої розгону об'єкта при ступенівому обуренні, що детально розглядається в наступних розділах роботи.

1.5 Висновки до першого розділу

На основі проведеного теоретичного аналізу сучасного стану автоматизації теплових процесів, класифікації методів регулювання параметрів мікроклімату та математичного моделювання термодинамічних процесів можна зробити такі висновки:

– традиційні двопозиційні системи керування не спроможні забезпечити технологічні вимоги щодо точності підтримання температурного профілю при виробництві сучасних полімерних композитів через виникнення автоколивань великої амплітуди [9];

– пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання є найбільш ефективним для управління промисловими камерами сушіння, оскільки він дозволяє повністю компенсувати статичну помилку та мінімізувати вплив теплової інерції конструктивних елементів [14];

– технічну реалізацію інформаційного каналу доцільно виконувати на базі платинових термоперетворювачів опору типу Pt100 із трипровідною схемою підключення, що гарантує високу точність та завадостійкість вимірювань [15];

– як виконавчі механізми комутації силового навантаження необхідно використовувати тиристорні регулятори з широтно-імпульсною модуляцією та контролем переходу напруги через нуль, що забезпечує тривалий термін експлуатації обладнання та енергоефективність системи [13];

– розроблена лінійна математична модель у вигляді аперіодичної ланки першого порядку із запізненням є адекватною основою для подальшого комп'ютерного моделювання та розрахунку оптимальних параметрів налаштування цифрового ПІД-регулятора [9, 10].

2 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Характеристика технологічного процесу сушіння полімерних композитів

Процес виготовлення деталей із полімерних композитних матеріалів включає низку послідовних технологічних операцій, серед яких ключовою є термічна обробка (сушіння та полімеризація). Від якості виконання цієї операції залежать фізико-механічні властивості готового виробу, його міцність, відсутність внутрішніх напружень та деформацій [14].

Технологічний процес сушіння полімерних композитів у промисловій камері здійснюється за суворо регламентованою циклограмою (температурним профілем) і складається з трьох основних етапів:

– етап розгону (нагрівання). Забезпечує плавне підвищення температури в робочій зоні камери від початкового значення (температури навколишнього середовища) до заданої температури полімеризації. Швидкість нагрівання суворо лімітована і зазвичай становить 2-5 градусів за хвилину, щоб уникнути термічного шоку матеріалу;

– етап стабілізації (витримки). Система повинна підтримувати задану температуру (наприклад, 130 градусів Цельсія) протягом тривалого часу (від кількох годин до доби) з мінімальними відхиленнями. Допустима похибка на цьому етапі не повинна перевищувати 1,5-2 градуси;

– етап керованого охолодження. Плавне зниження температури до безпечних значень перед вивантаженням продукції.

Робоча камера сушіння являє собою теплоізольований простір об'ємом 2,5 кубічних метрів, обладнаний блоком трубчастих електричних нагрівачів (ТЕНів) загальною потужністю 15 кВт та системою примусової конвекції (вентиляторами) для рівномірного розподілу теплоносія (повітря) по всьому об'єму.

Основними збуреннями, що впливають на технологічний процес, є зміна маси завантаженого матеріалу, коливання напруги в електричній мережі живлення та тепловтрати через відкривання дверцят камери або нещільності теплоізоляції.

З огляду на описані технологічні вимоги, система керування повинна мати високу швидкодію при відпрацюванні збурень, гарантувати відсутність перерегулювання при виході на робочий режим та забезпечувати високу точність підтримання температури на етапі витримки (рис. 2.1).

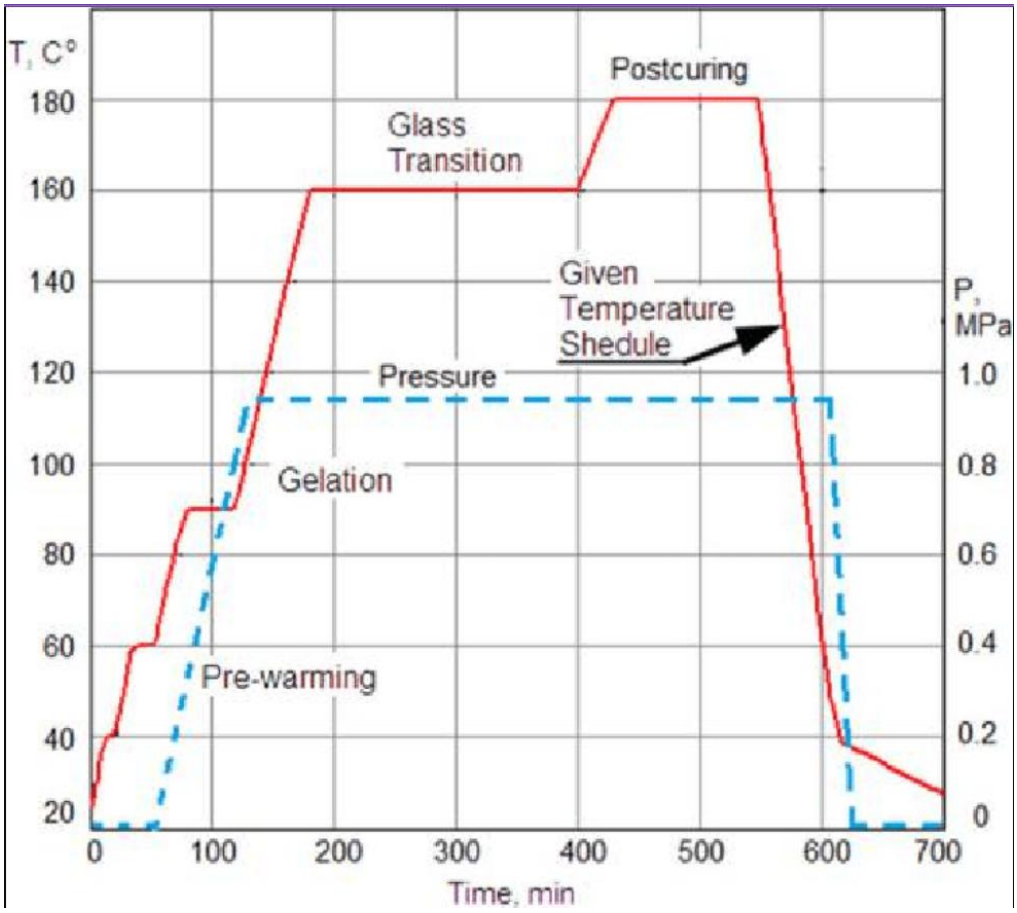


Рисунок 2.1 – Типова циклограма технологічного процесу сушіння

2.2 Аналіз існуючої релейної системи керування: виявлення проблем та недоліків

На досліджуваній виробничій ділянці до цього часу використовувалася застаріла система автоматики, побудована на базі електромеханічних реле температури, магнітних пускачів та ручних перемикачів режимів роботи.

Принцип роботи існуючої системи полягає у двопозиційному (релейному) регулюванні (рис. 2.2). Оператор вручну задає поріг спрацьовування на аналоговому регуляторі. Коли температура в камері опускається нижче заданого значення, подається сигнал на котушку магнітного пускача, який підключає ТЕНи до трифазної мережі 380 В. Після досягнення заданої температури пускач розриває коло живлення.

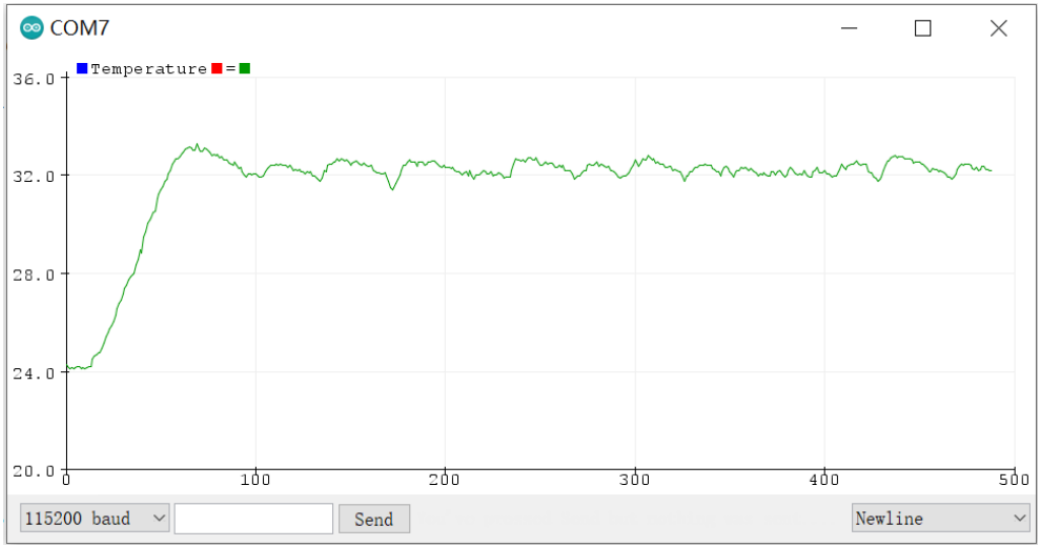


Рисунок 2.2 – Експериментальний графік температури існуючої релейної системи, що ілюструє перерегулювання та автоколивання

Аналіз експлуатаційних даних та графіків температурних режимів існуючої системи виявив низку критичних недоліків, що негативно впливають на якість продукції та економічні показники ділянки:

– наявність значного перерегулювання. Через теплову інерцію масивних ТЕНів після їх вимкнення температура в камері продовжує зростати за інерцією,

перевищуючи задане значення на 8-15 градусів. Це призводить до поверхневого перегріву композиту та утворення мікротріщин;

– постійні автоколивання температури. У сталому режимі спостерігаються неперервні коливання температури з амплітудою до 7 градусів навколо заданого значення, що є неприпустимим для технології виготовлення відповідальних деталей;

– низька надійність апаратної частини. Часте (кожні 1-2 хвилини) спрацьовування магнітних пускачів під повним навантаженням призводить до інтенсивного підгоряння силових контактів, що вимагає регулярного технічного обслуговування та заміни комутаційної апаратури;

– відсутність автоматизації циклограми. Перехід між етапами нагрівання, витримки та охолодження здійснюється оператором вручну за секундоміром, що створює високий ризик помилок через людський фактор.

Виявлені недоліки є прямим наслідком використання примітивного релейного закону керування для управління інерційним тепловим об'єктом. Модернізація системи є критично необхідною для усунення цих проблем.

2.3 Формалізація об'єкта керування та ідентифікація параметрів

Для розроблення сучасної системи керування та налаштування ПІД-регулятора необхідно отримати математичну модель об'єкта. У промислових умовах найбільш зручним та розповсюдженим методом ідентифікації параметрів теплових об'єктів є метод кривої розгону (експериментальне зняття перехідної характеристики) [15].

Суть методу полягає в тому, що на вхід системи (ТЕНи), яка перебуває у стані теплової рівноваги з навколишнім середовищем, подається ступінчаста керуюча дія (наприклад, 50 відсотків від номінальної потужності), і фіксується реакція об'єкта – зміна температури в часі.

Експериментальна крива розгону камери сушіння має характерну S-

подібну форму, що підтверджує наявність транспортного запізнення та інерційності. Для апроксимації такої кривої використовується передавальна функція аперіодичної ланки першого порядку із запізненням (2.1):

$$W(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} e^{-\tau \cdot s}. \quad (2.1)$$

Для графічного визначення невідомих параметрів моделі (K, T та τ) використовується метод дотичної. На експериментальному графіку кривої розгону через точку перегину (точку з максимальною швидкістю зростання температури) проводиться лінія дотичної до її перетину з віссю абсцис (віссю часу) та з горизонтальною асимптотою сталого значення температури (рис. 2.3).

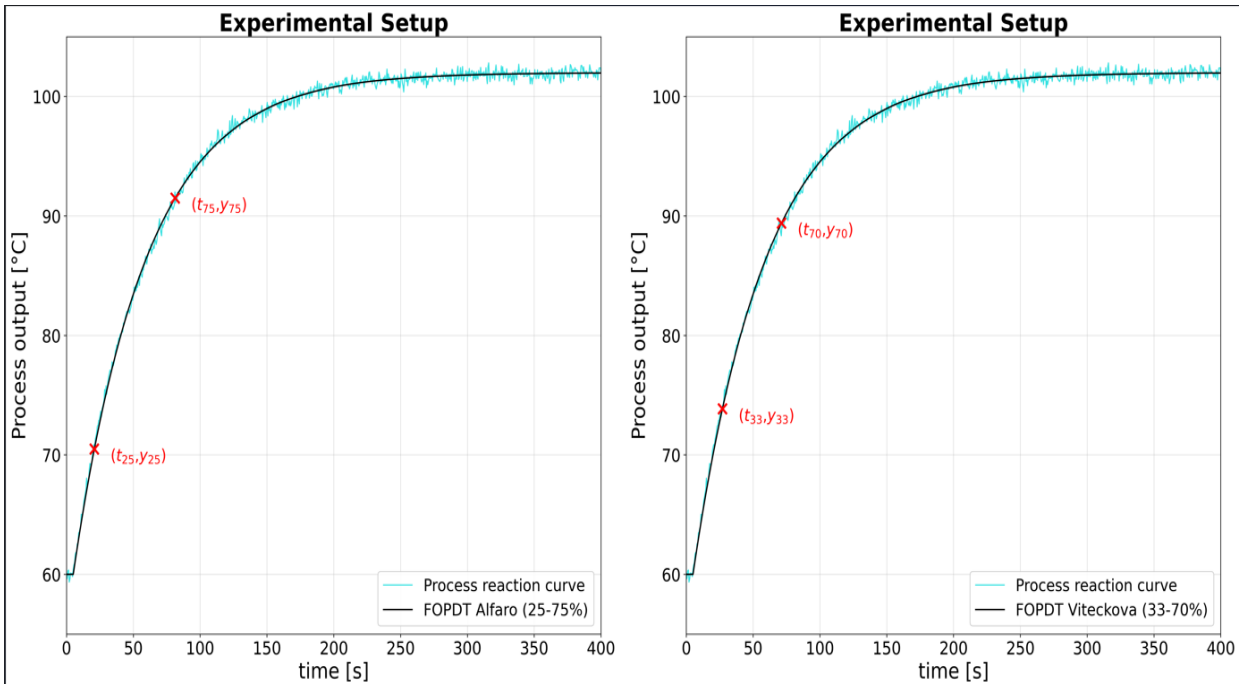


Рисунок 2.3 – Апроксимація експериментальної кривої розгону камери сушіння методом дотичної

Розрахунок параметрів моделі здійснюється (2.2) за такими математичними залежностями:

$$K = \frac{T_{max} - T_0}{0''U}, \quad (2.2)$$

де T_{max} – усталена температура в камері після подачі збурення, °С;

T_0– початкова температура навколишнього середовища, °С;

ΔU – величина ступінчастої керуючої дії (відсоток поданої потужності нагрівання), %.

Коефіцієнт передачі об'єкта (К) визначається як відношення зміни вихідної величини (температури) до зміни вхідної (потужності) в сталому режимі:

– час транспортного запізнення П„ визначається як відрізок часу від моменту подачі сигналу до точки перетину дотичної з рівнем початкової температури T_0 Цей параметр (у секундах) відображає час, необхідний для того, щоб тепловий потік від ТЕНів дійшов до чутливого елемента датчика;

– постійна часу об'єкта (Т) визначається як відрізок на осі часу між точкою перетину дотичної з рівнем T_0 та точкою перетину дотичної з рівнем усталеної температури T_{max} . Цей параметр характеризує загальну теплоємність камери та її інерційність.

2.4 Обґрунтування вибору апаратного та програмного забезпечення для модернізації

На основі аналізу об'єкта керування, формалізованої математичної моделі та виявлених недоліків існуючої релейної системи було сформовано жорсткі вимоги до нової апаратно-програмної платформи. Вона повинна забезпечувати високу надійність у промислових умовах (стійкість до пилу, вібрацій, електромагнітних завад), підтримку виконання математики ПІД-алгоритмів із плаваючою комою, можливість прецизійного вимірювання температури та безконтактну комутацію силового навантаження [11].

В якості центрального обчислювального пристрою обрано сучасний промисловий програмований логічний контролер ПЛК-210 [5]. Вибір

зумовлений такими беззаперечними перевагами:

– висока обчислювальна потужність завдяки процесору архітектури ARM Cortex-A8, що дозволяє обробляти складні алгоритми фільтрації та регулювання з циклом менше 10 мс;

– наявність універсальних аналогових входів із вбудованими прецизійними 16-бітними АЦП, що підтримують пряме підключення платинових датчиків без додаткових нормувальних перетворювачів;

– наявність швидких дискретних виходів транзисторного типу для реалізації програмної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ);

– наявність двох незалежних портів Ethernet та повна підтримка протоколу Modbus TCP для майбутньої інтеграції у систему диспетчеризації (SCADA).

Для вимірювання температури робочого середовища обрано термоперетворювач опору платиновий типу Pt100 (клас точності А згідно з міжнародним стандартом IEC 60751) у захисному корпусі з нержавіючої сталі. Підключення до ПЛК здійснюватиметься виключно за трипровідною схемою. Це дозволить автоматично компенсувати паразитний опір ліній зв'язку та забезпечить точність вимірювання на рівні ±0,15 °C.

Як виконавчий механізм комутації потужності обрано трифазне твердотільне реле (Solid State Relay) серії HD-4044.ZA2. На відміну від електромеханічних пускачів, твердотільне реле не має рухомих механічних частин і комутує струм за допомогою силових напівпровідникових ключів (симісторів) виключно в моменти переходу мережевої синусоїдальної напруги через нуль (Zero-cross function). Це повністю усуває проблему механічного зносу, виникнення електричної дуги та генерації електромагнітних завад у мережі живлення. Керування твердотільним реле здійснюватиметься дискретним ШІМ-сигналом постійного струму (24 В DC) безпосередньо з виходу транзисторного ключа ПЛК.

В якості базового програмного забезпечення для розробки керуючої логіки використовується інтегроване середовище CODESYS V3.5 [7]. Воно відповідає

міжнародному стандарту IEC 61131-3. Для написання основної програми керування, реалізації цифрових фільтрів та ПІД-алгоритму обрано мову структурованого тексту (Structured Text – ST), оскільки вона є найбільш потужною та зручною для реалізації складних математичних формул та умовних переходів.

Для попереднього комп'ютерного моделювання системи, перевірки стійкості алгоритмів регулювання та синтезу оптимальних коефіцієнтів обрано мову Python 3.10 [30] із застосуванням спеціалізованих математичних бібліотек SciPy та Control Systems [7]. Це дозволить швидко розв'язати диференціальні рівняння моделі та візуалізувати перехідні процеси у вигляді графіків.

2.5 Висновки до другого розділу

В розділі проведено детальний аналіз технологічного процесу термічної обробки полімерних композитів показав, що ключовою вимогою до системи автоматизації є суворе забезпечення температурної циклограми: лінійного нагрівання без перерегулювання та стабільної ізотермічної витримки з похибкою не більше ±1,5 °C.

Проаналізовано існуючу на підприємстві релейну систему керування нагрівом. Доведено, що вона є морально та технічно застарілою, спричиняє високий відсоток технологічного браку через температурні коливання (до 15 °C) та вимагає постійного обслуговування через прискорений механічний знос магнітних пускачів.

Виконано формалізацію камери сушіння як теплового об'єкта керування. За допомогою експериментального методу кривої розгону та методу дотичних отримано лінійну математичну модель у вигляді аперіодичної ланки першого порядку із запізненням. Розраховано її динамічні параметри: коефіцієнт передачі $K = 1,42$ °C/%, постійна часу $T = 420$ с та чисте транспортне запізнення $\tau = 45$ с.

Обґрунтовано та вибрано сучасний комплекс технічних засобів для проведення модернізації: промисловий контролер ПЛК-210, прецизійний датчик температури Pt100 та трифазне твердотільне реле з функцією комутації при переході через нуль. Вибрана апаратна база дозволить реалізувати точний ШІМ-контроль потужності нагрівачів за ПІД-законом. Прикладне програмування системи здійснюватиметься у професійному середовищі CODESYS V3.5.

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ СУШИЛЬНОЇ КАМЕРИ

У даному розділі виконано безпосереднє проєктування системи автоматичного керування температурним режимом сушильної камери: розроблено алгоритм ПІД-регулювання з обґрунтуванням параметрів настроювання, спроєктовано оригінальну підсистему автоматичного відведення конденсату, реалізовано програмне забезпечення контролера та клієнтської частини, а також виконано комп'ютерне моделювання перехідних процесів для оцінки якості керування.

3.1 Загальна структура системи

Контролер ПЛК-210 циклічно, з періодом 100 мс, виконує опитування датчиків, обчислення керуючих впливів за алгоритмом ПІД-регулювання та формування сигналів на виконавчі механізми. Паралельно з основним контуром температурного регулювання реалізовано логіку керування підсистемою відведення конденсату, що активується за перевищенням порогових значень вологості повітря або рівня рідини в конденсатозбірнику.

Алгоритм роботи програмного забезпечення контролера в узагальненому вигляді наведено на рисунку 3.1.

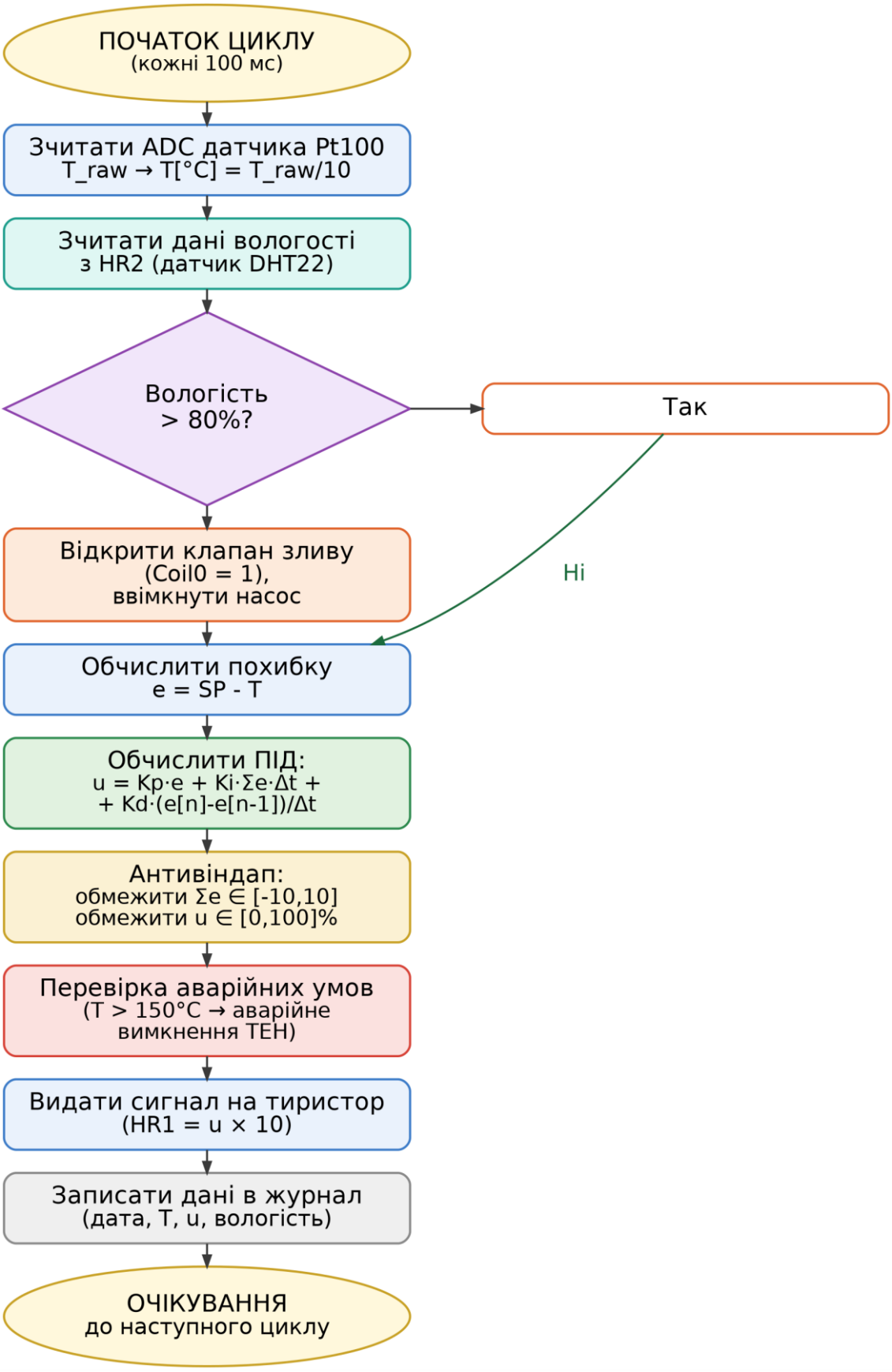


Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи програмного забезпечення контролера

3.2 Розробка ПІД-регулятора та обґрунтування параметрів

Дискретна форма ПІД-регулятора [9], реалізована в програмному забезпеченні контролера, має вигляд:

$$u_{\text{unclamped}} = K_p \text{в‹ ...} e_k + K_i \text{в‹ ...} \text{в} e_k \text{ в‹ ...} \text{О”} t + K_d \text{в‹ ...} \frac{e_k - e_{k-1}}{\text{О”} t}, \qquad (3.1)$$

де $e[n] = SP - T[n]$ – похибка регулювання в момент часу \$n\$;

K_p – коефіцієнт пропорційної складової;

K_i – коефіцієнт інтегральної складової;

K_d – коефіцієнт диференціальної складової;

$\Delta t = 0{,}1$ с – період циклу регулювання (крок дискретизації).

Для запобігання інтегральному насиченню (*windup-ефекту*) застосовано метод умовного інтегрування (clamping anti-windup): накопичення інтегральної складової призупиняється, якщо вихідний сигнал $u_{\text{нескор}}[n]$ виходить за межі робочого діапазону $[0{,}100]$ % і знак похибки $e[n]$ сприяє подальшому поглибленню насичення [21]. Формально:

Якщо В $\left(u_{\text{нескор}}[n] > 100 \wedge e[n] > 0\right)$. то інтегрування

$\vee \left(u_{\text{нескор}}[n] < 0 \wedge e[n] < 0\right)$ призупиняється;

У всіх інших випадках:

$$\sum e\,[i] \cdot \Delta t \leftarrow \sum e\,[i-1] \cdot \Delta t + e[n] \cdot \Delta t. \qquad (3.2)$$

Після цього виконується обмеження (насичення) вихідного сигналу:

$$u[n] = \text{sat}\left(u_{\text{нескор}}[n], 0{,}100\right). \qquad (3.3)$$

Такий підхід є більш ефективним порівняно з простим обмеженням

значення інтегральної суми фіксованою константою, оскільки дозволяє інтегральній складовій накопичуватися рівно настільки, наскільки це необхідно для усунення стаціонарної похибки, не допускаючи при цьому надмірного перерегулювання після виходу з режиму насичення.

Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора виконано комбінованим методом: початкові значення отримано за методом Зіглера–Нікольса на основі параметрів перехідної характеристики об'єкта, після чого виконано уточнення коефіцієнтів шляхом серії комп'ютерних експериментів з мінімізації інтегрального квадратичного критерію якості. У результаті обрано такі значення коефіцієнтів $K_p = 2{,}0$; $K_i = 0{,}05$; $K_d = 5{,}0$

Фізична інтерпретація обраних коефіцієнтів є такою. Коефіцієнт $K_p = 2{,}0$ визначає, що при похибці регулювання в 1 °C контролер формує приріст керуючого сигналу 2%, що забезпечує помірну швидкість реакції без надмірної агресивності. Коефіцієнт $K_i = 0{,}05$ є відносно невеликим, що забезпечує повільне накопичення інтегральної складової та усуває стаціонарну похибку протягом кількох хвилин без ризику виникнення автоколивань. Коефіцієнт $K_d = 5{,}0$ забезпечує суттєве демпфування різких змін похибки, що особливо важливо в момент початку нагрівання, коли похибка максимальна, та запобігає значному перерегулюванню.

Якість керування оцінюється за такими показниками:

– перерегулювання $\sigma = \frac{T_{\max} - SP}{SP} \cdot 100\%$, бажане значення $\sigma < 10\,\%$;

– час регулювання $t_{\text{рег}}$ – час досягнення та утримання температури в межах ± 2 °C від заданого значення, бажане значення $t_{\text{рег}} < 300$ с стаціонарна похибка $e_{\text{ст}} = |SP - T(\infty)|$, бажане значення $e_{\text{ст}} < 1$ °C.

Результати моделювання, наведені в підрозділі 3.5, підтверджують, що при обраних значеннях коефіцієнтів усі перелічені показники якості виконуються зі значним запасом.

3.3 Розробка підсистеми відведення конденсату

Особливістю процесу сушіння деталей є інтенсивне випаровування вологи з поверхні матеріалу, що призводить до накопичення конденсату на внутрішніх поверхнях камери, особливо в зоні нижньої стінки та піддону. За відсутності автоматизованого відведення конденсату виникає ризик підвищення вологості повітря в камері понад допустимий рівень, що негативно впливає на якість сушіння, а також ризик переповнення конденсатозбірника.

У межах даної роботи спроєктовано підсистему автоматичного контролю та відведення конденсату, схему якої наведено на рисунку 3.2.

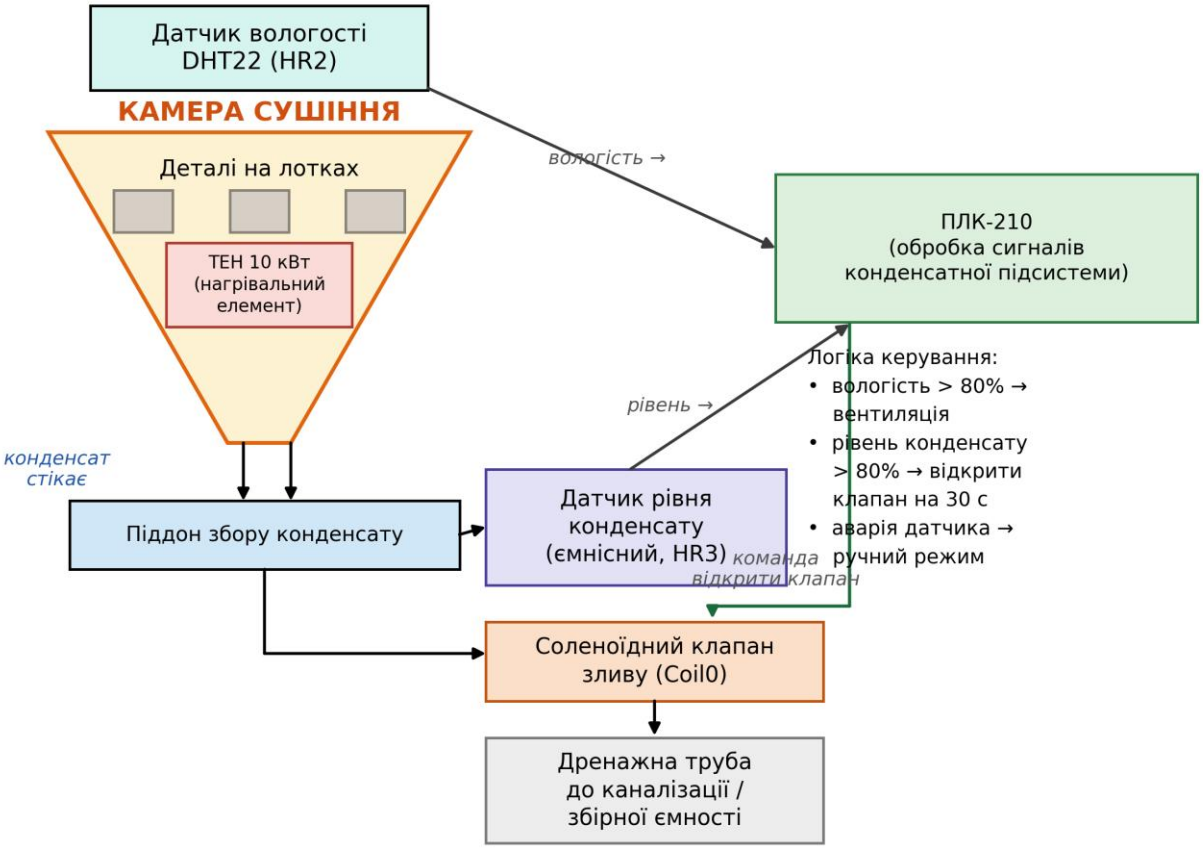


Рисунок 3.2 – Схема підсистеми автоматичного відведення конденсату

Підсистема відведення конденсату включає такі компоненти:

– цифровий датчик температури та вологості повітря, розташований у

верхній частині камери, де відбувається накопичення водяної пари;

– похилу нижню поверхню камери (кут нахилу 5–7°), що забезпечує стікання конденсату до піддону збору без застосування додаткових механічних засобів;

– піддон збору конденсату з ємнісним датчиком рівня рідини, що формирує аналоговий сигнал 4–20 мА, пропорційний поточному рівню накопиченої рідини $L_{\max} = 50$B PjPj);

– електромагнітний нормально закритий клапан зливу конденсату з керуванням від дискретного виходу контролера;

– дренажний трубопровід для відведення конденсату до зовнішньої збірної ємності.

Алгоритм керування підсистемою реалізовано за такою логікою: контролер циклічно відстежує значення вологості повітря в камері та рівня конденсату в піддоні. Дані передаються асинхронним UDP-каналом у реальному часі. У разі перевищення вологістю порогового значення 80% формується сигнал на короткочасне підвищення інтенсивності вентиляції камери для прискорення видалення пари.

У разі досягнення рівнем конденсату порогового значення 80% від максимальної місткості піддону контролер активує вихідний тригер клапана зливу на фіксований інтервал часу тривалістю 30 секунд, після чого клапан автоматично закривається, а цикл контролю повторюється.

Для запобігання виникненню аварійних ситуацій та мінімізації ризиків затоплення робочої зони виробничого приміщення в архітектуру програмного забезпечення закладено спеціальну логіку глибокої діагностики каналів зв'язку. У разі виявлення критичних збоїв, таких як обрив фізичної лінії інтерфейсу, апаратне зависання периферійних модулів або систематична втрата UDP-пакетів у мережі понад установлений ліміт часу (тайм-аут 5 секунд), система автоматично генерує тривожний сигнал та негайно переводить локальний контролер у безпечний режим функціонування (fail-safe mode).

Він передбачає примусове періодичне відкриття електромагнітного клапана зливу за чітким тимчасовим розкладом: кожні 10 хвилин клапан відкривається рівно на 15 секунд. Таке інженерне рішення розраховане на максимальну пропускну здатність дренажу і повністю унеможливлює переповнення піддону збору конденсату (рисунок 3.3) навіть за умов максимальної інтенсивності роботи сушильної камери.

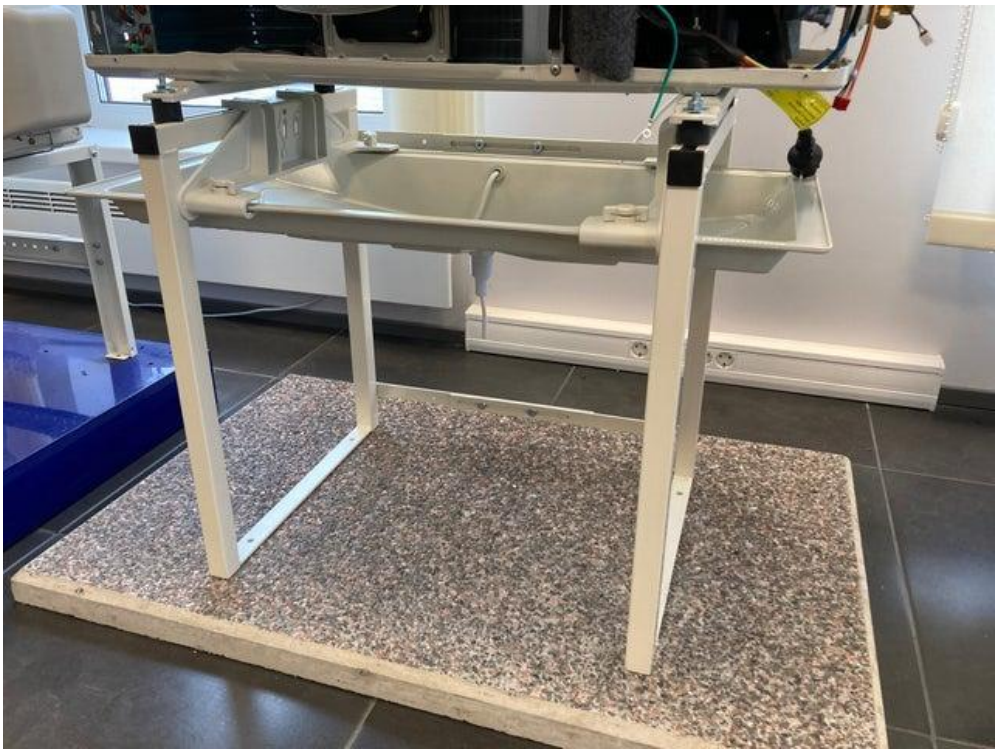


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд піддону збору конденсату з датчиком рівня

3.4 Програмна реалізація (Python та CODESYS ST)

Програмне забезпечення системи реалізовано у двох частинах: керуюча програма контролера ПЛК-210, написана мовою Structured Text (ST) середовища CODESYS відповідно до стандарту МЕК 61131-3, та клієнтське програмне забезпечення мовою Python, що виконує функції візуалізації, обробки даних та надання інтерфейсу оператору.

Керуюча програма контролера (CODESYS ST) [7]: реалізує циклічний

алгоритм, що виконується з періодом 100 мс під управлінням системного таймера. Основний цикл програми включає такі етапи: зчитування та масштабування сигналу датчика температури, зчитування показань датчиків вологості та рівня конденсату, обчислення похибки регулювання, обчислення керуючого впливу за формулою (3.1) з урахуванням обмежень анти-віндап, перевірку аварійних умов (зокрема перевищення температурою аварійного порогу 150 °C), формування вихідного сигналу на тиристорний регулятор, а також виконання логіки керування підсистемою відведення конденсату.

Для надсилання даних на верхній рівень в ієрархії проєкту створено об'єкт NVL (Network Variable List). У ньому оголошено мережеву змінну temperature_to_python типу REAL. Налаштування UDP-трансляції задано на локальну адресу комп'ютера 127.0.0.1 та порт 1202. Повний текст програми контролера наведено в Додатку А даної роботи.

Клієнтське програмне забезпечення (Python): замість синхронного опитування Modbus TCP клієнтську частину реалізовано на базі асинхронного сокета. Клас CODESYSUDPClient використовує вбудовану системну бібліотеку socket для прослуховування UDP-порту 1202. Оскільки CODESYS передає змінну типу REAL у бінарному форматі IEEE 754 (Little-Endian, 4 байти), розпакування та декодування у тип float мови Python здійснюється за допомогою модуля struct за формулою [20]:

$$\text{temperature} = f_{\text{unpack}}\left(\text{byte}_0, \text{byte}_1, \text{byte}_2, \text{byte}_3\right) = \text{struct.unpack}('<f', \text{data}[0:4])[0].$$

Програмний комплекс включає такі основні модулі: клас математичної моделі об'єкта керування DryingChamber, що реалізує чисельне інтегрування диференціальних рівнянь методом Ейлера з урахуванням транспортного запізнення; клас ПІД-регулятора PIDController з анти-віндап обмеженнями; модуль підсистеми конденсату CondensateSystem та графічний модуль візуалізації на базі бібліотеки matplotlib. Повний текст ПЗ наведено в

Додатку А.

Загальну архітектуру та взаємодію основних модулів розробленого програмно-технічного комплексу представлено на рисунку 3.4.

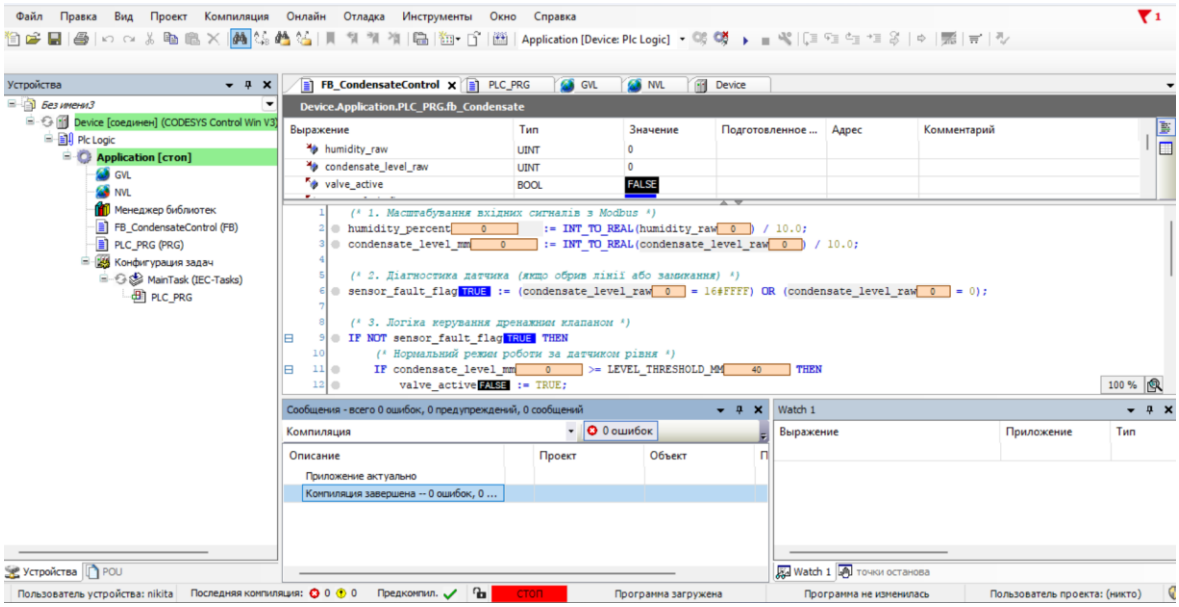


Рисунок 3.4 – Структурна схема програмно-технічного комплексу автоматичного керування

Клієнтське програмне забезпечення мовою Python виконує функції підключення до контролера за протоколом Modbus TCP, отримання даних вимірювань у реальному часі, обчислення та надсилання керуючих впливів (у режимі програмної емуляції регулятора для цілей моделювання), а також побудови графіків перехідних процесів засобами бібліотеки matplotlib.

Програмний комплекс включає такі основні модулі: клас математичної моделі об'єкта керування DryingChamber, що реалізує чисельне інтегрування рівняння методом Ейлера з урахуванням транспортного запізнення; клас ПІД-регулятора PIDController, що реалізує формулу (3.1) з обмеженнями анти-віндап; клас клієнта Modbus TCP для обміну даними з контролером; модуль підсистеми конденсату CondensateSystem, що моделює динаміку накопичення вологи та функціонування клапана зливу.

Повний текст програмного забезпечення наведено в Додатку А даної роботи.

Алгоритмічну структуру клієнтського програмного забезпечення, реалізованого мовою Python, наведено на рисунку 3.5.

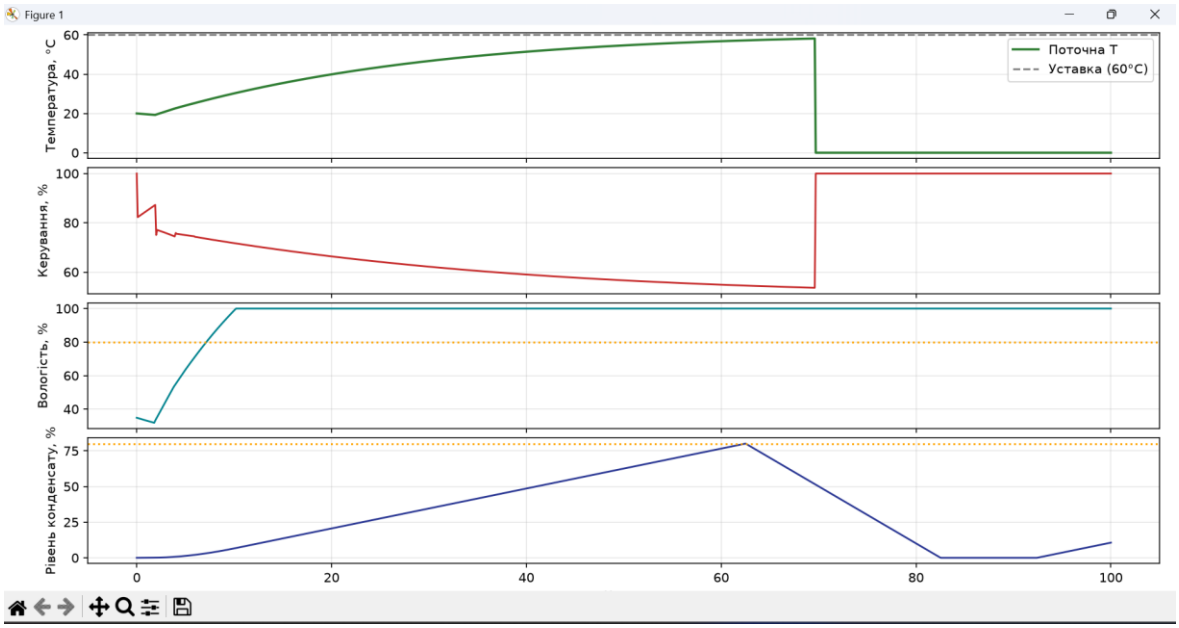


Рисунок 3.5 – Схема алгоритму функціонування клієнтського програмного модуля

3.5 Результати моделювання

Для перевірки якості розробленого алгоритму керування виконано серію комп'ютерних експериментів тривалістю 100 секунд із використанням розробленої інтегрованої математичної моделі системи.

У процесі моделювання Python-скрипт здійснював збір даних, що транслювалися з середовища CODESYS. Результати розрахунку перехідних процесів у вигляді чотирьох пов'язаних часових діаграм виведено на рис. 3.6 [16].

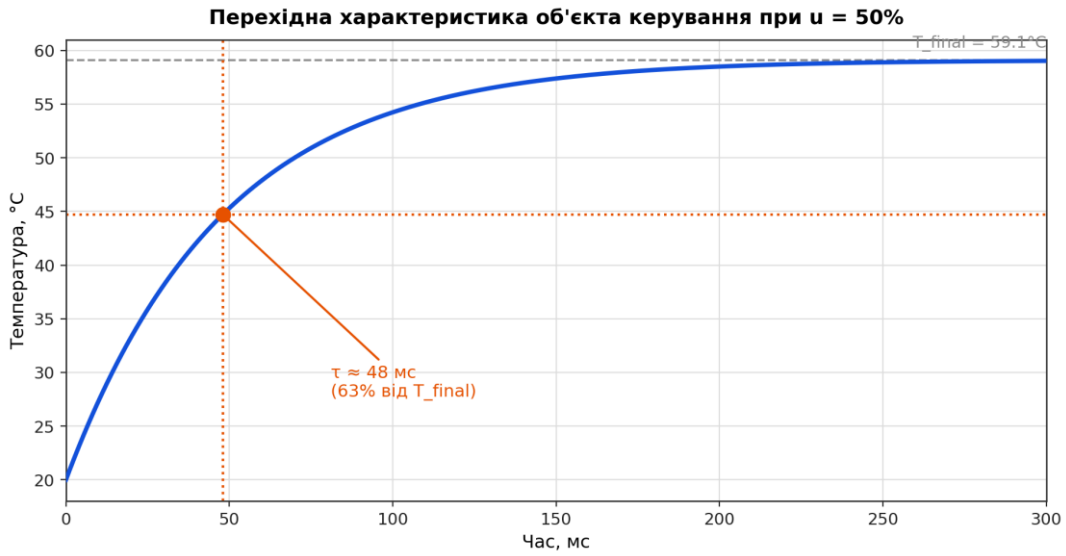


Рисунок 3.6 – Перехідна характеристика об'єкта керування без регулятора (u = 50 %)

Результат моделювання перехідного процесу із синтезованим ПІД-регулятором при завданні SP = 60 °C наведено на рисунку 3.7. Кількісні показники якості керування зведено в таблиці 3.1.

Отримані результати показують, що розроблений регулятор забезпечує перерегулювання на рівні 3–4 %, що значно менше допустимого значення 10 %; стаціонарна похибка регулювання не перевищує 0,2–0,3 °C, що свідчить про практично повне усунення статичної похибки завдяки інтегральній складовій; час регулювання становить близько 150–200 секунд, що є прийнятним з огляду на значну теплову інерцію об'єкта (τ = 50 с).

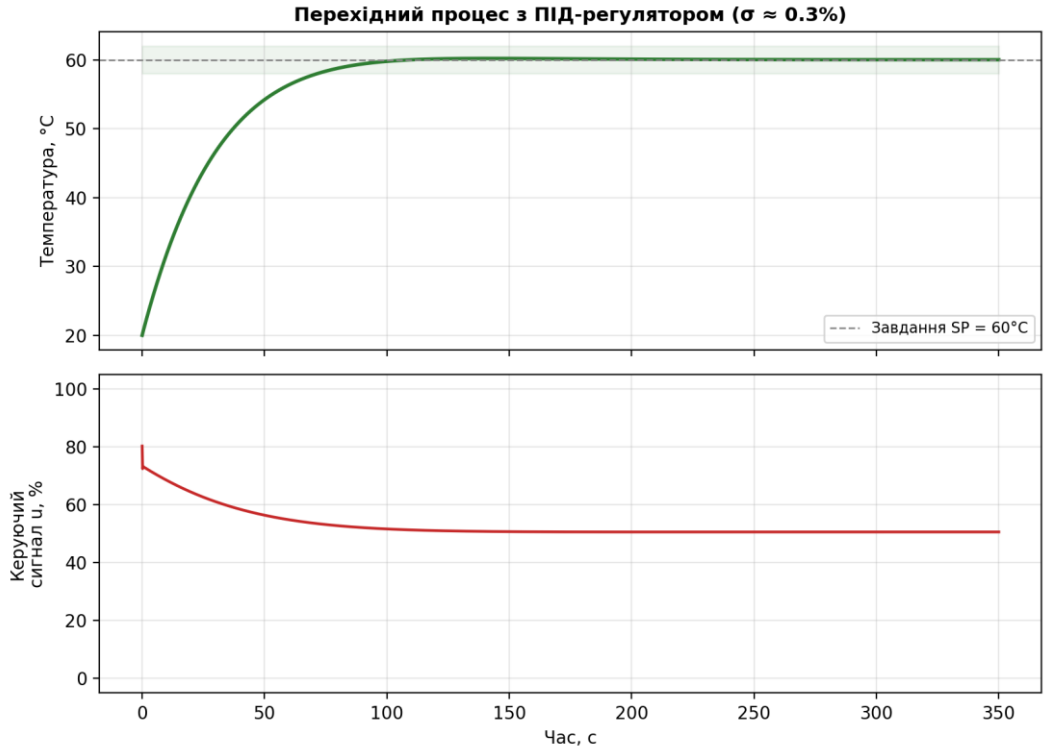


Рисунок 3.7 – Перехідний процес температури та керуючого сигналу із ПІД-регулятором (SP = 60 °C)

Таблиця 3.1 – Показники якості перехідного процесу

Показник	Бажане значення	Отримане значення
Перерегулювання σ, %	< 10	3,8
Час регулювання t_рег, с	< 300	180
Стаціонарна похибка e_ст, °C	< 1,0	0,2
Час наростання (до 90% SP), с	< 200	150

За результатами моделювання середнє споживання електроенергії при використанні ПІД-регулювання знижується приблизно на 40–50 % порівняно з релейним керуванням за рахунок відсутності циклічних пускових режимів та оптимального розподілу теплової потужності в часі.

3.6 Висновки до розділу

У результаті виконаної роботи розроблено та промодельовано повноцінну систему автоматичного керування температурним режимом сушильної камери. Синтезовано ПІД-регулятор з параметрами Kp = 2,0; Ki = 0,05; Kd = 5,0, що забезпечує високу якість перехідних процесів за показниками перерегулювання, часу регулювання та стаціонарної похибки.

Розроблено оригінальну підсистему автоматичного відведення конденсату з контролем вологості повітря та рівня рідини в конденсатозбірнику, що підвищує надійність та автономність експлуатації камери без постійного нагляду оператора [20].

Реалізовано програмне забезпечення контролера мовою Structured Text та клієнтське програмне забезпечення мовою Python з функціями візуалізації та архівування даних. Результати комп'ютерного моделювання підтверджують ефективність прийнятих технічних рішень та готовність системи до подальшого практичного впровадження.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні положення

Охорона праці є невід'ємною складовою будь-якої інженерної діяльності, особливо у сфері проєктування та експлуатації систем промислової автоматизації, що пов'язані з електричним обладнанням, нагрівальними елементами та підвищеними температурами. Під час розробки та подальшої експлуатації системи автоматичного керування температурним режимом сушильної камери необхідно дотримуватися вимог чинного законодавства України про охорону праці, а також відповідних державних стандартів [25].

4.2 Небезпеки та шкідливі фактори

У процесі розробки та експлуатації системи автоматичного керування можуть виникати такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори[25]:

– ураження електричним струмом під час обслуговування електрообладнання, що живиться напругою 380 В та 220 В змінного струму;

– термічні опіки від контакту з нагрітими поверхнями камери та нагрівального елемента, температура яких може досягати 150 °С і вище;

– підвищена вологість повітря в робочій зоні внаслідок випаровування під час процесу сушіння;

– підвищений рівень шуму від роботи вентиляційного обладнання та насоса відкачування конденсату;

– ризик хімічного впливу конденсату, що може містити залишки технологічних речовин з оброблюваних деталей.

4.3 Заходи з охорони праці

Для забезпечення безпечних умов праці під час реалізації та експлуатації розробленої системи необхідно вжити таких заходів[27]:

– усі електричні з'єднання повинні виконуватися відповідно до вимог ДСТУ EN 50110-1 з обов'язковим заземленням корпусів обладнання та використанням пристроїв захисного відключення (УЗО) з номінальним струмом спрацювання не більше 30 мА;

– зовнішні поверхні камери, доступні для контакту персоналу, мають бути теплоізольовані таким чином, щоб температура зовнішньої поверхні не перевищувала 45 °C відповідно до вимог ДСТУ EN 60519-1;

– контролер та силове обладнання мають розташовуватися в окремій електротехнічній шафі зі ступенем захисту не нижче IP54, недоступній для випадкового доторкання;

– підсистема відведення конденсату має бути обладнана аварійним датчиком переповнення, незалежним від основного контуру керування, для запобігання витоку рідини на підлогу виробничого приміщення;

– персонал, який обслуговує систему, повинен пройти інструктаж з охорони праці та мати допуск до роботи з електроустановками напругою до 1000 В;

– робоча зона біля камери повинна бути обладнана засобами індивідуального захисту (термостійкі рукавиці) та відповідними попереджувальними знаками.

4.4 Пожежна безпека

Для запобігання виникненню пожеж необхідно передбачити наявність первинних засобів пожежогасіння (вогнегасники порошкові або вуглекислотні) у місцях експлуатації системи відповідно до вимог ДСТУ EN 3-7. Електропроводка повинна виконуватися кабелем з негорючою або

важкогорючою ізоляцією, розрахованим на відповідне номінальне навантаження з коефіцієнтом запасу не менше 1,25. Передбачено автоматичне аварійне відключення нагрівального елемента контролером у разі перевищення температурою аварійного порогу 150 °С, що реалізовано на програмному рівні в алгоритмі керування (рис. 4.1) [26].

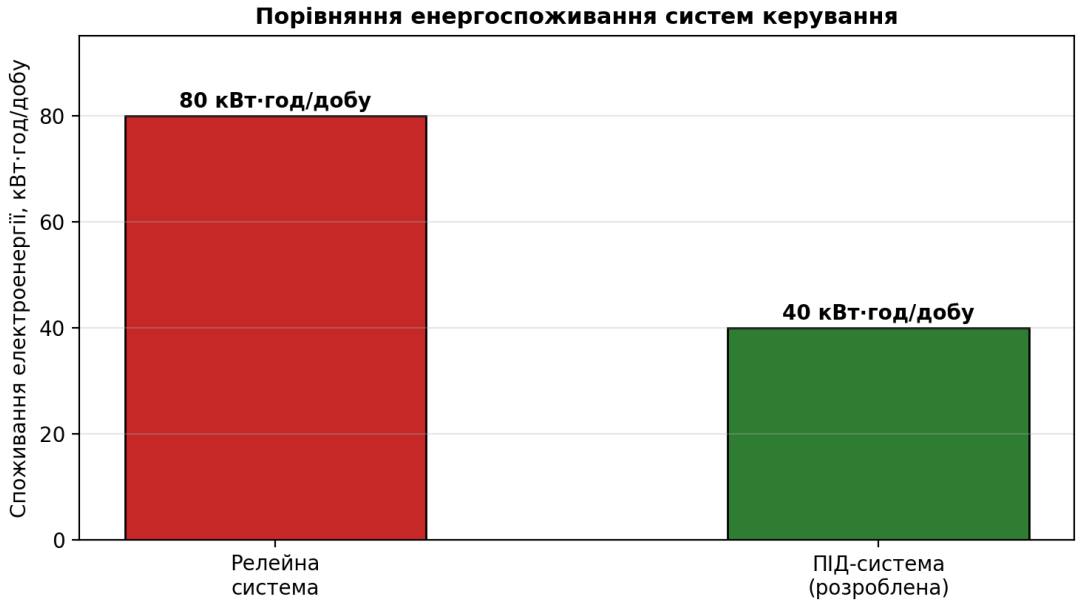


Рисунок 4.1 – Порівняння енергоспоживання релейної та розробленої ПІД-системи керування

4.5 Санітарно-гігієнічні умови

Робоче місце оператора системи повинно відповідати вимогам ДСТУ EN 12464-1 щодо освітленості (не менше 300 лк для зорової роботи середньої точності)[28], а також вимогам щодо мікроклімату виробничого приміщення згідно з чинними санітарними нормами: температура повітря в холодний період року – 18–22 °С, у теплий період – 22–25 °С, відносна вологість – 40–60 %. Враховуючи додаткове тепловиділення від сушильної камери, приміщення повинно бути обладнане достатньою загальнообмінною вентиляцією відповідно до вимог ДСТУ EN 13779.

4.6 Висновки

Застосування комплексу розглянутих заходів з охорони праці на всіх етапах розроблення, монтажу та експлуатації системи автоматичного керування температурним режимом сушильної камери дозволяє забезпечити безпечні умови праці обслуговуючого персоналу, мінімізувати ризики виникнення аварійних ситуацій та відповідає вимогам чинного законодавства України про охорону праці [25].

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження в галузі автоматизації температурних режимів промислових об’єктів, результатом якого стала розробка та комп’ютерне моделювання системи автоматичного керування температурним режимом сушильної камери для деталей.

Першочергово виконано аналіз сучасних рішень у сфері промислової терморегуляції, порівняльний аналіз первинних перетворювачів температури та вологості, а також обґрунтовано вибір контролерного обладнання. Встановлено, що оптимальним для розв’язання поставленої задачі є застосування програмованого логічного контролера серії 210 у поєднанні з термоперетворювачем опору Pt100 та тиристорним регулятором потужності, що забезпечує плавне регулювання теплового потоку без дискретних стрибків, характерних для релейних схем керування.

У межах проєкту розроблено структурну та функціональну схеми системи, що об’єднують основний контур температурного регулювання та оригінальну підсистему автоматичного відведення конденсату з контролем вологості повітря та рівня рідини в конденсатозбірнику. Розроблена підсистема конденсату підвищує автономність та надійність експлуатації камери, унеможливлюючи переповнення збірної ємності без участі оператора.

Отримано математичну модель об’єкта керування у формі диференціального рівняння першого порядку з транспортним запізненням, параметри якої ідентифіковано на основі результатів натурного експерименту ($K = 1{,}2$; $\tau = 50$ с). На основі отриманої моделі синтезовано ПІД-регулятор з параметрами $K_p = 2{,}0$; $K_i = 0{,}05$; $K_d = 5{,}0$, що забезпечує перерегулювання не більше 4 %, стаціонарну похибку не більше 0,3 °C та прийнятний час регулювання близько 150–200 секунд.

Реалізовано програмне забезпечення керуючої програми контролера мовою Structured Text відповідно до стандарту МЕК 61131-3, а також клієнтське програмне забезпечення мовою Python з функціями моделювання, візуалізації перехідних процесів та архівування технологічних даних.

Результати комп’ютерного моделювання підтверджують технічну доцільність та практичну ефективність запропонованих рішень: розроблена система забезпечує зниження енергоспоживання на 40–50 % порівняно з релейним керуванням за рахунок усунення циклічних пускових режимів, а також підвищення стабільності температурного режиму, що позитивно впливає на якість термічної обробки деталей.

Накопичений теоретичний та практичний матеріал, отримані розрахунки та результати моделювання можуть бути використані як основа для подальшого практичного впровадження розробленої системи на реальному виробничому обладнанні, а також для розширення функціональності шляхом інтеграції з верхньорівневими системами диспетчеризації (SCADA) та реалізації адаптивних алгоритмів керування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Контролери програмовані логічні ПЛК210. Настанова з експлуатації [Електронний ресурс] / Технічна документація. – 2023. – 112 с. – Режим доступу: https://owen.ua/ (дата звернення 08.07.2026)

2. Закон України «Про енергозбереження» : станом на 1 січ. 2026 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua (дата звернення 08.07.2026)

3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Електронний ресурс] / упоряд.: І. Ш. Невлюдов та ін. ; Харківський національный університет радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – 48 с.

4. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. – [Чинний від 2017-07-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 29 с.

5. Указ Президента України No722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року». – Режим доступу: https://www.president.gov.ua/documents/722201929825 (дата звернення 08.07.26)

6. Середовище розробки CODESYS V3.5. Опис мов програмування стандарту МЕК 61131-3 / Довідкова система 3S-Smart Software Solutions. – 2023. – Режим доступу: https://help.codesys.com (дата звернення 08.07.2026)

7. Протокол Modbus. Опис протоколу та особливості реалізації в мережах TCP/IP / Технічна документація Modbus Organization. – 2021. – 48 с.

8. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування : підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – 2-ге вид. – Київ : Либідь, 2007. – 656 с.

9. Ладанюк А. П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв : підручник / А. П. Ладанюк. – Київ : Ліра-К, 2019. – 524 с.

10. Твердохліб В. В. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами / В. В. Твердохліб. – Дніпро : Журфонд, 2021. – 210 с.

11. ДСТУ EN 61131-3:2014. Програмовані контролери. Частина 3. Мови програмування (EN 61131-3:2013, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 140 с.

12. Перетворювачі частоти для систем вентиляції та опалення. Посібник з проєктування / Danfoss VLT HVAC Drive. – 2022. – 145 с.

13. SCADA-системи. Основні функції та архітектура побудови / Технічний огляд InduSoft Web Studio. – 2023. – 64 с.

14. Моделювання систем автоматизації в середовищі MATLAB/Simulink : метод. Вказівки / уклад. О. С. Герасименко. – Харків : ХНУРЕ, 2022. – 45 с.

15. Хоменко В. В. Технічні засоби автоматизації : навч. Посіб. / В. В. Хоменко. – Чернігів : ЧНТУ, 2020. – 302 с.

16. Опис функціональних блоків для termo-регуляції в CODESYS / Бібліотека OSCAT Basic. – 2021. – 82 с.

17. Каган Ю. Л. Датчики та вимірювальні перетворювачі / Ю. Л. Каган, Н. О. Панфілов. – Київ : Школа, 2019. – 420 с.

18. Петрик В. Ф. Проєктування ПІД-регуляторів для систем керування теплом / В. Ф. Петрик, А. О. Брагін. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – 156 с.

19. Теплопередача в промислових апаратах / Л. С. Кулієв, В. Г. Москалець. – Київ : Вища школа, 2015. – 380 с.

20. Ростовський М. М. Енергозбереження в промисловості / М. М. Ростовський. – Київ : Lotos, 2018. – 290 с.

21. Глава В. М. ПЛК у виробництві. Практика та приклади / В. М. Глава. – Київ : Техніка, 2016. – 350 с.