

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"

ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра електронних систем

Теличко Валентин Андрійович

**ПІД-РЕГУЛЯТОР КОМІРКИ ПРИЛАДУ СИНТЕЗУ  
НАНОКОМПОНЕНТІВ**

Спеціальність 171 Електроніка

Освітня програма Електронні системи

Кваліфікаційна робота

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник:

Спесивих Олександр

Олександрович к.ф.-м.н.

доцент кафедри ЕС

**Реєстрація** \_\_\_\_\_

(номер)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р. \_\_\_\_\_ Тетяна СЕМАК

(підпис)

**Кваліфікаційна робота допущена до захисту**

**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_ Тарас ЗАЯЦЬ

(підпис)

к.ф.-м.н., доцент

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**Рецензент** \_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_ (Ім'я, Прізвище)

\_\_\_\_\_ (науковий ступінь, вчене звання)

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Факультет: Інженерно-технічний

Кафедра: Електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. \_\_\_\_\_ (Заяць Т. М.)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

### З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну бакалаврську роботу  
студенту Телчику Валентину Андрійовичу

- Тема роботи: ПІД-регулятор комірки приладу синтезу нанокomпонентів.  
Затверджена на засіданні кафедри (протокол №\_\_ від \_ 2024 р.)
- Термін закінчення роботи: 8 червня 2025 року.
- Вихідні дані до роботи. Розробити принципову схему ПІД-регулятора комірки приладу синтезу нанокomпонентів з параметрами:
  - Потужність нагрівача до 2 кВт.
  - Температура нагрівача, °С 500-1000;
  - Споживана потужність, не більше 15Вт;
  - Робоча температура, °С 0°С – 50°С.
  - Вологість 80% без конденсації;
  - Точність стабілізації температури, не гірше °С 05-1.0
- Зміст роботи (перелік питань, що підлягають розробці).

#### Пояснювальна записка:

Вступ

- Теоретичні основи роботи ПІД-регулятора;
- Огляд аналогів
- Проектно-конструкторський розділ

3.1 Розробка структурної схеми

3.2 Розробка принципової електричної схеми

3.3 Розрахунки елементів схеми, вибір компонентів

3.4 Математичне моделювання

4. Висновки

5. Перелік посилань

6. Додатки

**Графічна частина:**

- Структурна схема
- Електрична принципова схема
- Перелік елементів
- Специфікація

5. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	Пап О.В.		

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 2024 року.

Керівник роботи \_\_\_\_\_ (доц. Спесивих О.О.)  
(підпис)

Завдання прийняв на виконання \_\_\_\_\_ (Теличко В.А.)  
(підпис)

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування етапів виконання КБР	Термін виконання етапів	Примітки
1.	Пошук та аналіз аналогів об'єкта досліджень.	до 20.02.2025 року	
2.	Огляд та аналіз аналогів.	до 25.02.2025 року	
3.	Вибір технічного рішення та обґрунтування технічної пропозиції.	до 08.03.2025 року	
4.	Синтез структурної та принципової схем, їх розрахунок.	до 15.03.2025 року	
5.	Виготовлення конструкторської документації.	до 15.04.2025 року	
6.	Оформлення кваліфікаційної бакалаврської роботи.	до 13.05.2025 року	
7.	Захист на державній екзаменаційній комісії.	Згідно з графіком захисту	

Студент \_\_\_\_\_ (Теличко В.А.)

(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ (доц. Спесивих О.О.)

(підпис)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему «Створення системи моніторингу та керування температурою електронних компонентів на основі мікроконтролера та сенсорів»/ УжНУ; Керівник Спесивих О.О.; студент Теличко В.А., група ЕС.

Пояснююча записка: 43 сторінок, 5 рисунків, 1 таблиця, 26 джерел, 4 додатків.

Графічна частина:

1. Схема електрична структурна КБР.ЕС. 9469967.001 Е1
2. Схема електрична принципова КБР.ЕС. 9469967.001 Е3
3. Перелік елементів КБР.ЕС. 9469967.001 ПЕЗ
4. Специфікація КБР.ЕС. 9469967.001 СП

**Об'єктом дослідження** є процес регулювання параметрів комірки приладу синтезу наноконпонентів за допомогою ПД-регулятора.

**Метою роботи** є розробка та дослідження ПД-регулятора для автоматизації процесу синтезу наноконпонентів, що дозволить покращити точність регулювання параметрів та стабільність роботи приладу.

Цей проект спрямований на аналіз сучасних методів налаштування ПД-регуляторів, вибір оптимальних параметрів для інтегруючих процесів у системах синтезу наноконпонентів, а також розробку відповідної електричної схеми та математичної моделі пристрою.

**Ключові слова:**

ПД-РЕГУЛЯТОР, СИНТЕЗ НАНОКОМПОНЕНТІВ,  
АВТОМАТИЗАЦІЯ, ПАРАМЕТРИЧНЕ НАЛАШТУВАННЯ

## Abstract

Bachelor's qualification work on “Creation of a system for monitoring and controlling the temperature of electronic components based on a microcontroller and sensors” / UzhNU; Supervisor Spesyvyh O.O.; student Telychko V.A., ES group.

Explanatory note: 43 pages, 9 figures, 2 tables, 26 sources, 4 appendices.

Graphic part:

1. Electrical structural diagram of the CBR.ES. 9469967.001 E1
2. Electrical schematic diagram of the principle CBD.EC. 9469967.001 E3
3. List of elements of CBD.ES. 9469967.001 E3
4. Specification of CBD.EU. 9469967.001 SP

**The object of research is** the process of regulating the parameters of the cell of the device for the synthesis of nanocomponents using a PID controller.

**The aim of the work is** to develop and study the PID controller for automation of the process of nanocomponents synthesis, which will improve the accuracy of parameter control and stability of the device.

This project is aimed at analyzing modern methods of tuning PID controllers, selecting optimal parameters for integrating processes in nanocomponent synthesis systems, and developing an appropriate electrical circuit and mathematical model of the device.

## Keywords:

SUBCONTROLLER, SYNTHESIS OF NANOCOMPONENTS,  
AUTOMATION, PARAMETRIC TUNING

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»  
Інженерно-технічний факультет  
Кафедра електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,  
доц. \_\_\_\_\_ (Заяць Т. М.)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 року

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

На кваліфікаційну бакалаврську роботу

на тему:

**ПІД-РЕГУЛЯТОР КОМІРКИ ПРИЛАДУ СИНТЕЗУ  
НАНОКОМПОНЕНТІВ**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	1
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	3
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ПІД-РЕГУЛЯТОРА.....	4
1.1. Принцип роботи ПІД-регулятора.....	4
1.2. Аналіз сучасних підходів до налаштування ПІД-регуляторів.....	6
1.3. Параметричні та непараметричні методи налаштування ПІД-регуляторів.....	7
1.4. Особливості інтегруючих процесів у системах синтезу нанокomпонентів.....	10
2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АНАЛОГІВ ОБ'ЄКТУ ПРОЕКТУВАННЯ.....	13
2.1. Аналіз існуючих ПІД-регуляторів для систем синтезу нанокomпонентів.....	13
2.2. Порівняльна характеристика аналогів та їх особливості побудови ....	21
3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	25
3.1. Розробка структурної схеми.....	25
3.2. Розробка електричної принципової схеми.....	28
3.3. Розрахунки режимів роботи елементів принципової схеми, вибір елементів.....	30
4. ВИСНОВКИ.....	38
5. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	40
6. ДОДАТКИ.....	43
А. Схема електрична структурна КБР.ЕС. 9469967.001 Е1.....	44
Б. Схема електрична принципова КБР.ЕС. 9469967.001 Е3.....	45
В. Перелік елементів КБР.ЕС. 9469967.001 ПЕЗ.....	46
Г. Специфікація КБР.ЕС. 9469967.001 СП.....	47

## ВСТУП

У сучасній промисловості регулювання технологічних процесів є одним із ключових аспектів забезпечення їх ефективності та стабільності. Одним із найпоширеніших методів керування є пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор, який застосовується як у простих, так і в каскадних контурах управління. Попри значний розвиток альтернативних підходів, ПІД-регулятори залишаються основним інструментом у більшості галузей, включаючи нафтопереробну, хімічну та целюлозно-паперову промисловість. Проте, ефективність їхньої роботи значною мірою залежить від правильного налаштування параметрів, що часто є проблемним через нестачу спеціалізованих знань і часу.

Однією з важливих і складних задач у галузі автоматичного керування є розробка ефективних регуляторів для інтегруючих процесів (ІІ), які характеризуються нестабільністю у відкритому контурі та тенденцією до необмеженого росту вихідної величини при постійному вхідному сигналі. Такі процеси широко поширені в промисловості, зокрема в дистиляційних колонах, нафтохімічних установках, резервуарах для зберігання рідин, реакторах та енергетичних системах. Через складну динаміку інтегруючих процесів налаштування ПІД-регуляторів для їх стабілізації є нетривіальним завданням, що потребує використання спеціалізованих методик і алгоритмів.

Існує багато підходів до налаштування ПІД-регуляторів, починаючи з класичних методів, таких як правила Циглера–Ніколса, Коена–Куна та Чієна–Хронеса–Ресвіка, і закінчуючи сучасними алгоритмами, що ґрунтуються на методах оптимізації та ідентифікації процесу. Особливий інтерес викликають методи, орієнтовані на інтегруючі процеси, оскільки вони дозволяють підвищити ефективність керування і зменшити вплив збурень.

					КРБ ЕС. 9469967.01 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПІД-регулятор комірки приладу синтезу нанокомпонентів Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Теличко В.А.						
Перевір.		Спесивих О.О.					1	52
Реценз.								
Н. Контр.		Папп О.В.						
Затверд.		Заяць Т.М.						УжНУ, ІТФ 4курс.

Метою даної роботи є аналіз існуючих методів налаштування ПД-регуляторів для інтегруючих процесів, дослідження їхньої ефективності та розробка рекомендацій щодо вибору оптимальних параметрів керування. У процесі дослідження буде розглянуто різні типи інтегруючих процесів, їхні особливості та вплив на роботу регуляторів. Особлива увага буде приділена сучасним підходам до налаштування ПД-регуляторів, що базуються на методах ідентифікації та адаптивного керування.

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;

КВМ – контролер внутрішньої моделі;

ПС – прямий синтез;

ЕС ТТФ УЖЕНА

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

# 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ПІД-РЕГУЛЯТОРА

## 1.1. Принцип роботи ПІД-регулятора

Пропорційно-інтегрально-похідна (PID) керування є одним із найпопулярніших типів контролерів, що використовуються в промислових застосуваннях, причому понад 90 % усіх контролерів реалізують PID або PI (безпохідне) регулювання [1, 2]. Це один із найпростіших регуляторів уставки, у якому бажаний стан (тобто уставка, еталон, ціль) представляє кінцеву мету процесу регулювання, наприклад, підтримувати кімнатну температуру 23 °С. ПІД-регулятори базуються на стратегіях замкнутого циклу з механізмом негативного зворотного зв'язку, який відстежує реальний стан середовища. У найбільш традиційному застосуванні методів негативного зворотного зв'язку різниця між вимірним станом змінної для регулювання (наприклад, реальна температура в кімнаті) і цільовим значенням (наприклад, 23 °С) створює помилку передбачення, мінімізація якої керує виходом контролера, наприклад, якщо температура занадто висока, вона знижується, а якщо занадто низька, вона підвищується. З математичної точки зору:

$$e(t) = y_r - y(t), \quad (1.1)$$

де  $e(t)$  – помилка;

$y_r$  – опорне або задане значення (наприклад, бажаною температурою);

$y(t)$  – спостережувана змінна (наприклад, фактична кімнатна температура).

Цей механізм, однак, є нестабільним у дуже звичайних умовах, зокрема, коли додається зміщення в стаціонарному стані (наприклад, раптова та непередбачувана зміна зовнішніх умов, що впливають на температуру в

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приміщенні, які ми не контролюємо), або коли необхідно придушити коливання (наприклад, занадто багато коливань під час регулювання температури може бути небажаним). ПД-регулятори елегантно справляються з обома цими проблемами, доповнюючи стандартну архітектуру негативного зворотного зв'язку, яку тут називають пропорційним або Р-членом, інтегральним або І-членом і похідним або D-членом, див. рис. 1.1.

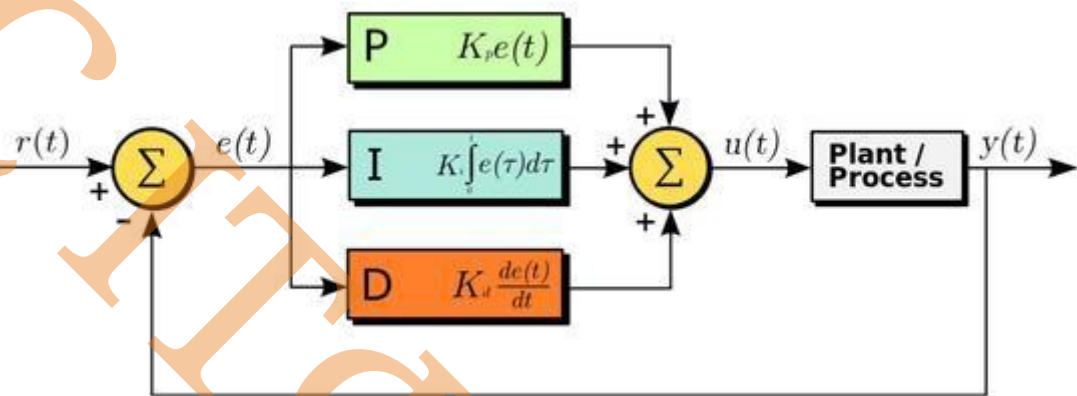


Рисунок 1.1 – ПД-регулятор [3]

На рис. 1.1 видно, що помилка передбачення  $e(t)$  визначається різницею опорного сигналу  $y_r(t)$ ,  $y_r$  у нашій формулюванні та вихідного  $y(t)$  процесу. Різні члени, один пропорційний помилці (Р-член), один інтегрує помилку в часі (І-член) і один, що диференціює її (D-член), керують сигналом керування  $u(t)$ .

Інтегральний член накопичує помилку передбачення з часом, щоб компенсувати помилки через неврахований стаціонарний вхід, тоді як мінімізація похідної помилки передбачення призводить до зменшення амплітуди коливань контрольованого сигналу. Загальна форма сигналу керування  $u(t)$  генерований ПД-регулятором зазвичай описується:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.2)$$

де  $e(t)$  це, знову ж таки, помилка передбачення;

$k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  – це так звані пропорційні, інтегральні та похідні підсилення відповідно, набір параметрів, що використовуються для налаштування відносної сили P, I та D членів контролера.

Популярність ПІД-регуляторів значною мірою пояснюється їхньою простотою розробки та реалізації. З іншого боку, одна з головних проблем полягає в налаштуванні параметрів  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$ , які мають бути адаптовані для роботи з різними (часто суперечливими) обмеженнями процесу регулювання [4, 5].

## 1.2. Аналіз сучасних підходів до налаштування ПІД-регуляторів

Аналіз сучасних підходів до налаштування ПІД-регуляторів охоплює різноманітні методи, які дозволяють досягти оптимальної роботи систем автоматичного керування. ПІД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор) є одним із найпоширеніших засобів регулювання у промислових та технічних системах. Його налаштування здійснюється з урахуванням характеристик об'єкта керування, бажаних показників якості регулювання та специфіки застосування. Традиційно для налаштування ПІД-регуляторів використовують аналітичні методи, емпіричні підходи та адаптивні алгоритми. До класичних методів належать правила Зіглера-Ніколса [6], Куна [7], Чіна-Хронеса-Резвіка [8], які базуються на характеристиках перехідного процесу системи або частотних властивостях об'єкта керування. Вони дозволяють швидко отримати початкові значення коефіцієнтів регулятора, проте

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

часто потребують подальшої корекції. Сучасні підходи передбачають застосування оптимізаційних алгоритмів, таких як методи генетичних алгоритмів, рою часток, градієнтного спуску, які дають змогу знаходити найкращі параметри регулятора з урахуванням заданих критеріїв якості. Штучний інтелект та машинне навчання також знаходять застосування у налаштуванні ПД-регуляторів, дозволяючи адаптувати параметри в реальному часі залежно від змін у характеристиках об'єкта керування. Крім того, використання методів ідентифікації систем та адаптивних алгоритмів забезпечує можливість автоматичного коригування параметрів регулятора без втручання оператора. Одним із перспективних напрямів є застосування нейромережевих підходів, що дозволяють моделювати складні нелінійні системи та забезпечують швидке реагування на зміну умов роботи. У промислових системах все частіше використовують методи розширеного спостерігача стану, які покращують стійкість та точність регулювання. Таким чином, сучасні підходи до налаштування ПД-регуляторів охоплюють як класичні емпіричні та аналітичні методи, так і адаптивні алгоритми на основі оптимізації та штучного інтелекту, що дозволяє досягти високої точності та ефективності управління.

### **1.3. Параметричні та непараметричні методи налаштування ПД-регуляторів**

Параметричні методи ґрунтуються на певних припущеннях щодо характеру розподілу випадкової величини, які зазвичай вважаються ймовірними [9]. У більшості випадків вони передбачають нормальність розподілу досліджуваних даних, що вимагає оцінки параметрів цього розподілу. Наприклад, у t-тесті Стюдента оцінюваними параметрами є математичне сподівання та дисперсія. Додатково можуть вводитися припущення про

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

взаємозв'язок параметрів розподілу у різних вибірках. Зокрема, у t-тесті передбачається однорідність дисперсій двох генеральних сукупностей, з яких були отримані дані, що необхідно для коректного порівняння середніх значень.

Основною перевагою параметричних методів є їхня висока потужність, тобто здатність уникати помилки другого роду ( $\beta$ -помилки). Чим нижчий рівень  $\beta$ -помилки, тим вища потужність тесту, яка розраховується за формулою: потужність =  $1 - \beta$  [10]. Це зумовлено тим, що параметричні методи застосовуються до даних, представлених у метричних шкалах (інтервальній або шкалі відносин). Такі шкали дозволяють не лише визначати рівність або порядок елементів, а й оцінювати рівність інтервалів або відносин між значеннями, що робить їх потужним інструментом статистичного аналізу. Завдяки цьому параметричні методи забезпечують точніший аналіз відмінностей у розподілі випадкових величин при правильності прийнятих гіпотез.

Крім того, параметричні методи мають добре розроблену теоретичну базу, що сприяє їхньому широкому застосуванню. Вони використовуються для оцінки майже будь-яких експериментальних даних і є основним об'єктом вивчення в підручниках зі статистики.

Втім, одним із головних недоліків параметричних методів є залежність від припущень щодо розподілу даних. Якщо, наприклад, у t-тесті Стьюдента [11] дані значно відхиляються від нормального розподілу або мають неоднорідні дисперсії, результати тесту можуть виявитися спотвореними. Така ситуація особливо критична, коли отримані значення статистик знаходяться на межі прийняття або відхилення гіпотез. У деяких випадках такі відхилення є несуттєвими для висновків, але в інших вони можуть стати серйозною проблемою.

Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є трансформація даних для приведення їх до необхідного розподілу. Наприклад, при аналізі часу реакції

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можна застосувати логарифмічне перетворення, щоб зменшити асиметрію розподілу.

Альтернативним варіантом є відмова від параметричних методів на користь непараметричних, які не вимагають жорстких припущень щодо розподілу даних. Непараметричні методи застосовуються тоді, коли результати представлені у слабших шкалах вимірювання, таких як порядкова шкала (ранжування) [12]. Використання спеціальних тестів, наприклад критерію знаків, критерію знакових рангів Вілкоксона [13] або U-критерію Манна-Уїтні [14], дозволяє проводити аналіз без припущень про нормальність розподілу, що робить їх цінним інструментом у випадках, коли параметричні методи непридатні.

Проте непараметричні методи є менш потужними, оскільки призводять до втрати частини інформації, що міститься у вихідних даних. Це підвищує ймовірність помилки другого роду, коли реальні відмінності між вибірками залишаються непоміченими. Таким чином, непараметричні методи вважаються більш консервативними, а їх застосування виправдане у випадках, коли використання параметричних тестів неможливе або їх результати ненадійні.

У підсумку, параметричні методи мають вищу потужність і ширше застосування, однак потребують виконання певних припущень щодо розподілу даних. Якщо ці припущення не дотримуються, доцільніше використовувати непараметричні методи, незважаючи на їхню меншу статистичну потужність.

#### **1.4. Особливості інтегруючих процесів у системах синтезу нанокomпонентів**

Нанотехнологія є однією з найбільш новаторських наукових дисциплін, де атоми реорганізуються в нанорозмірні матеріали для використання унікальних

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фізико-хімічних властивостей і функціональних матеріалів, що породжує нові концепції, такі як наноархітектоніка [15, 16]. Що стосується характеристик на основі їх розміру та передових властивостей, наноматеріали допомогли революціонізувати різні галузі, особливо біомедицину [17]. Такі параметри, як розмір, форма, хімічний склад поверхні або склад, можна модифікувати таким чином, щоб наноматеріали мали покращені характеристики, такі як підвищена біосумісність [18]; вони також можуть бути розроблені для цільової доставки ліків, що запускається для розподілу терапевтичних корисних навантажень на певних біологічних ділянках [19]. Інтеграція передових роботів із програмами машинного навчання робить синтез більш керованим і відтворюваним [21]. Розробка прекурсорів наноматеріалів, моніторинг кінетики реакції та характеристика продуктів на всіх стадіях синтезу можуть бути інтегровані в єдину автоматизовану систему [22]. Іншою ключовою перевагою автоматизованого синтезу є його здатність адаптуватися до високопродуктивних методів, які дозволяють швидко досліджувати експериментальний простір для полегшення відкриття наноматеріалів із індивідуальними властивостями [23]. У цьому контексті висока продуктивність відноситься до швидких методів синтезу, які дозволяють проводити велику кількість експериментів або реакцій за короткий час. Основною перевагою цього підходу є значне скорочення часу оптимізації синтезу. Дослідники вже продемонстрували, що одночасне проведення кількох експериментів з використанням роботизованих робочих станцій з можливостями паралельної обробки є можливим для прискорення оптимізації умов синтезу [24]. Платформи автоматизованого синтезу в інтеграції з експериментальними оцінками мають великі перспективи для прискорення розробки наноматеріалів наступного покоління із застосуванням у різних сферах, таких як охорона здоров'я, зберігання енергії, електроніка та оздоровлення навколишнього середовища [25]. Крім того, розробники систем

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

машинного виробництва наважуються на комбінаторну хімію, де систематично можна створювати велику кількість наноматеріалів [26]. Поєднання машинного виробництва та високопродуктивних методів визначення характеристик, таких як спектроскопія, мікроскопія та аналіз властивостей, дозволяє швидко декодувати зв'язки між структурою та властивостями, що контролюють поведінку наноматеріалів. Таким чином, окрім можливості швидкого виявлення скоординованих або некоординованих матеріалів із бажаними властивостями, автоматизований синтез також може розшифрувати фундаментальні принципи, що лежать в основі їх продуктивності. Можливо, найбільш бажаним атрибутом автоматизованих платформ є здатність підвищувати відтворюваність і надійність у процесах виробництва наноматеріалів, оскільки стандартизовані протоколи синтезу, що працюють незалежно від людей, можуть допомогти зменшити кількість помилок, пов'язаних із ручними методами та процедурами синтезу, таким чином забезпечуючи однакові вимоги до якості та продуктивності, які допомагають підтримувати контроль якості при масштабуванні лабораторних досліджень у промислових застосуваннях. Багато досліджень показали, що контроль продукту покращується завдяки стандартизації, полегшуючи синтез для процесів розробки наноматеріалів. Нещодавня інтеграція штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання в самоорганізовані матеріальні системи спровокувала відродження інтелектуального матеріалознавства. Ці платформи на базі штучного інтелекту забезпечують швидкий і ефективний аналіз даних у масштабах, що виходять за межі людських можливостей, значно прискорюючи темпи виявлення передових матеріалів, адаптованих для конкретних застосувань. Однак, незважаючи на здатність автоматичного синтезу, до його широкого визнання та комерціалізації довелося зіткнутися з багатьма перешкодами. Від побудови роботизованих платформ до оптимізації складних синтетичних методологій при інтеграції алгоритмів прийняття рішень

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

на базі штучного інтелекту необхідно подолати безліч технічних бар'єрів, перш ніж буде реалізовано повний потенціал автоматизованого синтезу та обробки наноматеріалів.

Інтеграція оптимізованих механічних інструментів з обчислювальними методами, включаючи машинне навчання та штучний інтелект, значно покращила якість виробництва цих матеріалів за рахунок мінімізації людських помилок і скорочення часу синтезу. Удосконалення методів автоматизованого синтезу не тільки дозволяє розробляти більш оптимальні, передбачувані та контрольовані підходи для виробництва наноматеріалів з високою ефективністю та бажаними характеристиками, але також має великі перспективи для прискорення розробки наноматеріалів наступного покоління для застосування в різних сферах, таких як охорона здоров'я, накопичення енергії, електроніка та оздоровлення навколишнього середовища.

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АНАЛОГІВ ОБ'ЄКТУ ПРОЕКТУВАННЯ

### 2.1. Аналіз існуючих ПД-регуляторів для систем синтезу нанокомпонентів

Незважаючи на інновації в передових і передових методах керування, ПД-регулятори широко використовуються в промисловості. Завдяки введеним розширенням і оптимальному налаштуванню вони можуть задовольнити навіть найвищі вимоги користувача. Ці контролери можуть використовувати властиві їм можливості відповідно до динаміки процесів і вимог систем керування. Залежно від мети контролю та інструментів, що використовуються, їх можна класифікувати на кілька груп на основі характеристик відгуку, забезпечення необхідного запасу стабільності, мінімізації відповідного критерію ефективності. Методи, що використовують підхід контролю внутрішньої моделі або метод прямого синтезу, також повинні бути включені до цього списку.

Описи таких методів є в літературі. Ймовірно, найвідоміший метод, розроблений Зіглером і Ніколсом, був спрямований на адекватний запас стабільності та підтримував подібні властивості через відстеження заданої точки та придушення збурень. Коефіцієнт розпаду  $1/4$  вважається критерієм дизайну для цього методу.

Коли система керування в першу чергу призначена для дотримання змін заданих значень, часто очікується досягнення нових заданих значень без перевищення і бажано за найкоротший час. Вимоги, сформульовані вище, також враховують економічний аспект процесу керування, оскільки для них необхідні витрати на керування є низькими, на відміну від систем керування, що працюють за часом. Було розроблено кілька методів налаштування ПІ/ПД-регуляторів з метою відстеження заданого значення з мінімальним часом встановлення та без перерегулювання. Першим слід згадати метод, запропонований Chien, Hrones і

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Reswick (CHR), у якому пропорційні, інтегральні та похідні значення налаштувань регулятора залежать від параметрів моделі першого порядку плюс мертвий час (FOPDT).

Методи налаштування, засновані на евристичних методах, можуть бути дуже корисними в процесі проектування контролера. Параметри регулятора, подібні до методу CHR, можна визначити на основі так званих номограм, які графічно представляють залежності параметрів регулятора, такі як функція відношення часу затримки ( $\theta$ ) та постійної часу ( $T$ ). Певною незручністю у використанні номограм є логарифмічний масштаб обох осей цих графіків.

Однак за своєю природою ці методи є лише приблизними. Більш чіткий підхід до цього питання дає метод прямого синтезу. Якщо очікувані вимоги, що ілюструють мету керування, відображені у формі бажаної передатної функції замкнутого циклу, достатньо знати лише модель, щоб розробити контролер. І в цьому випадку істотну складність у визначенні правильних налаштувань регулятора становить затримка часу, що виникає в процесі керування.

Відсутність аналітичного методу налаштування регуляторів процесів із затримкою дозволила визначити такі параметри регулятора, які б забезпечували бажану, але й досяжну реакцію системи. Це, у свою чергу, породило мотивацію до проведення досліджень у цій галузі знань.

Найбільш зручною сферою застосування прямого синтезу є проектування розімкнутих систем керування, яке також знайшло застосування у внутрішньомодельному управлінні. У підході прямого синтезу (ПС) аналітичний вираз для регулятора зворотного зв'язку виводиться з моделі процесу та бажаної реакції замкнутого циклу. У більшості літератури ПС бажана характеристика замкнутого контуру виражається як передатна функція замкнутого циклу для змін уставки. Цю передатну функцію можна сформулювати на основі підходу

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розміщення полюсів або на основі прогнозованого відгуку системи, розрахованого за допомогою зворотного перетворення Лапласа.

В результаті синтезу регулятора прямим методом його структура може відрізнятись від структури ПІ або ПІД регулятора. З іншого боку, на основі найпростіших моделей процесу та після вибору відповідної форми бажаної передавальної функції для замкнутого контуру можна отримати один із класичних контролерів та визначити його необхідні налаштування в процесі проектування. Метод прямого синтезу був предметом обширної статті Чена та Себорга, опублікованої в 2002 році, яка пізніше неодноразово цитувалася в статтях на цю тему. Їхні автори вивели аналітичні вирази для ПІ та ПІД регуляторів для типових процесів.

Метод Root-Locus, блок-схема замкнутої системи керування з ідеальним ПІ-регулятором, що керує установкою  $G_p(s)$ , показана на рисунку 2.1.

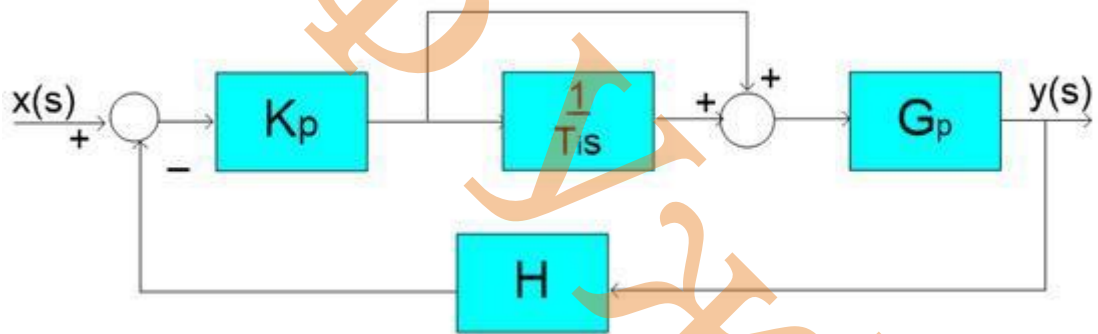


Рисунок 2.1 – Структурна схема замкнутої системи керування

Метод Root-Locus (кореневих місць) у контексті налаштування ПІ/ПІД-регуляторів використовується для дослідження розташування полюсів замкненої системи в комплексній площині залежно від зміни параметрів підсилення. У системах із часовими затримками цей метод дозволяє аналізувати стабільність і динамічні характеристики ще до реального впровадження регулятора. Він

візуалізує, як саме змінюється поведінка системи при варіації коефіцієнтів регулятора, допомагаючи уникнути нестійких чи коливальних режимів і сприяючи точному налаштуванню для мінімізації перехідних процесів.

Керування моделлю типу FOPDT (First-Order Plus Dead Time) за допомогою ПД-регулятора, налаштованого методом прямого синтезу. Такий підхід забезпечує точне керування навіть при наявності затримки, характерної для процесів синтезу наноматеріалів. Завдяки правильному вибору параметрів (пропорційного, інтегрального та диференціального), система демонструє стабільну й неосциляторну динаміку. Root-Locus аналіз підтверджує розміщення полюсів у стабільній області. Це дозволяє досягти високої точності та швидкої адаптації до змін у технологічному процесі.

У випадку з моделлю SOPDT (Second-Order Plus Dead Time), ПД-регулятор дозволяє ефективно керувати складнішою динамікою, що включає два інтегруючих процеси та затримку. Метод прямого синтезу забезпечує налаштування параметрів для досягнення стабільної неосциляторної відповіді. Аналіз за допомогою Root-Locus показує, як параметри впливають на розміщення полюсів та стабільність системи. Такий підхід важливий у високоточних технологіях, зокрема при керуванні процесами синтезу нанокomпонентів.

ПД-регулятори (пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори) є одними з найпоширеніших засобів автоматичного керування, що широко застосовуються в різноманітних технологічних процесах, зокрема у високоточних системах синтезу нанокomпонентів. Ефективне управління параметрами, такими як температура, тиск, концентрація реагентів та швидкість подачі, є критично важливим у нанотехнологіях, де навіть незначні коливання можуть призвести до зміни морфології, структури або властивостей продукту. Існуючі ПД-регулятори зазвичай реалізуються як апаратно-програмні модулі в

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складі автоматизованих систем керування, адаптованих до специфіки конкретного процесу синтезу.

Більшість сучасних ПІД-регуляторів мають цифрову реалізацію та підтримують можливість адаптації параметрів у режимі реального часу, що дозволяє їм реагувати на зміну зовнішніх або внутрішніх умов процесу. У системах синтезу нанокomпонентів часто використовується так званий адаптивний або самоналаштуваний ПІД-регулятор, який забезпечує більш стабільне керування завдяки постійному аналізу динаміки системи та коригуванню коефіцієнтів пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. В окремих випадках застосовуються модифікації ПІД-алгоритмів, такі як нечеткі ПІД-регулятори (fuzzy PID), які здатні працювати в умовах значної нелінійності процесів, або нейромережеві ПІД-регулятори, що використовують елементи штучного інтелекту для покращення точності керування.

Також слід відзначити, що у високоточних технологіях синтезу нанокomпонентів доцільно використовувати так звані каскадні ПІД-системи, де один регулятор керує заданим параметром, а другий — проміжною змінною, яка впливає на основний параметр. Такий підхід дозволяє досягти вищої стабільності та швидкості реакції системи.

Проте, незважаючи на широке застосування, класичні ПІД-регулятори мають певні обмеження. Вони можуть бути неефективними при сильно нелінійних процесах або у випадках з високим ступенем запізнювання в системі. У таких випадках доцільним є впровадження гібридних регуляторів, що поєднують переваги ПІД-контролю з методами нечіткої логіки або предиктивного керування.

Процесуальні установки під тиском і рівнем широко використовуються в різних галузях промисловості, включаючи хімічну, нафтохімічну та харчову

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промисловість [1, 2]. Технологічні установки зазвичай зазнають динамічних змін заданих значень і збурень, що значно впливає на продуктивність керування [3]. Як правило, ПІД-регулятори (пропорційно-інтегрально-похідні) використовуються для керування цими процесами в ефективній роботі цих заводів, що має вирішальне значення для підтримки якості продукції та зниження експлуатаційних витрат. Традиційні ПІД-регулятори іноді реагують швидко та ефективно, що призводить до повільного часу відгуку, перерегулювання та поганого придушення шуму [4]. Крім того, системи, які демонструють немінимальні фазові характеристики, динаміку високого порядку та значні затримки передачі, часто обмежують продуктивність ПІД-регуляторів [5]. Контролер комплексного порядку — це дробовий порядок, призначений для подолання обмежень звичайних ПІД-регуляторів. Контролери комплексного порядку PI (пропорційно-інтегральний)-PD (пропорційно-похідний) мають дробові похідні та інтегральні умови, що дозволяє контролеру працювати з високою динамікою та більшими затримками транзиту [6].

ПІД-регулятор - це стандартна система керування зі зворотним зв'язком, яка використовується в промислових середовищах і є важливою для керування виходом системи залежно від входу. Продуктивність системи змінюється пропорційним компонентом, пропорційним відхиленню між цільовою продуктивністю та фактичною продуктивністю [5]. Інтегральний компонент постійно коригує стійкі помилки шляхом інтегрування накопичених помилок за час. Різкі коливання частоти помилок прогнозуються та компенсуються похідною складовою. ПІД-регулятори широко використовуються в більшості галузей промисловості, таких як регулювання температури, регулювання швидкості двигуна, керування потоком насоса, супутниковий зв'язок [7] і контроль висоти літака [8]. Останнім часом PID використовувався в робототехніці, робототехнічних системах і комп'ютерних системах числового

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування завдяки своїм перевагам, включаючи просте налаштування, підтримку стабільності системи та мінімізацію перерегулювання [9]. Він забезпечує більшу точність, ніж методи ручного налаштування, і гнучкість налаштування вихідного сигналу системи до різних робочих умов [10]. ПД-регулятори можуть бути реалізовані в цифрових або аналогових системах. Тим не менш, цифрові ПД-регулятори, як правило, більш точні та більш доступні для впровадження, швидко реагують на зміни вхідних даних і відповідно регулюють вихідні дані системи [11].

У літературі методика алгоритмічної оптимізації, заснована на алгоритмі запилення квітів [12], налаштовує каскадний контролер PI-PD. Він оцінював свою продуктивність на основі часу осідання, перельоту та недобору. Подібним чином дослідники в [13] досягли часу встановлення, перерегулювання та запасу фази, використовуючи свій підхід PI-PD каскадного дробового порядку для перевернутого маятника. У [14] дослідники використовували арифметичні та тригонометричні оператори, щоб отримати прогнози параметри PI-регулятора дробового порядку, використовуючи цілочисельну абсолютну похибку часу (ITAE) як цільову функцію для досягнення ефективного відстеження заданого значення та ефективності усунення збурень. В іншому дослідженні гібридний імовірнісний фрактальний пошук і методи пошуку шаблонів використовувалися для налаштування каскадного контролера PI-PD і оцінювали його продуктивність на основі часу встановлення, цілочисельної квадратичної помилки (ISE), цілочисельної квадратичної помилки (ITSE), цілочисельної абсолютної помилки (IAE) і ITAE.

У [15] Shanthini et al. використовував оптимізацію роя частинок (PSO) і генетичні алгоритми для налаштування контролерів PID, I-PD і дробового порядку PI-PD у перетворювачі DC-DC, де критеріями ефективності є час встановлення та перерегулювання. Крім того, модифіковані контролери PI-PD

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

налаштовуються за допомогою методу автоматичного налаштування, і їх продуктивність оцінюється на основі часу встановлення, перерегулювання та ІАЕ, з порівнянням із звичайними та модифікованими ПІД-регуляторами [16]. Метод налаштування Циглера–Ніколса для розробки контролерів PI-PD та продуктивність оцінювали на основі часу встановлення, перерегулювання та інтегральної абсолютної похибки (ІАЕ) [17]. Кілька досліджень було проведено з використанням векторної настройки та підходів проб і помилок, які налаштовували контролери PI-PD дробового порядку для двигуна постійного струму в частотному кадрі та оцінювали продуктивність на основі похибок стаціонарного стану [18].

Roong та інші в [19] використовували алгоритм PSO для налаштування контролера PI-PD дробового порядку для керування положенням у системі магнітної левітації, оцінюючи перевищення та час встановлення. В іншому дослідженні метод Циглера–Ніколса використовується для розробки контролера PI-PD для регулювання напруги інтегрованих у будівлю фотоелектричних і вітряних турбінних систем, продуктивність якого залежить від напруги. Так само в автори використали метод Циглера–Ніколса для налаштування контролерів PI-PD та I-PD для керування швидкістю двигунів постійного струму та оцінили їх продуктивність на основі ISE та часу встановлення. У дослідженні, проведеному в [20], використовувався метод Циглера–Ніколса для налаштування контролера PI-PD для нестабільних систем керування з використанням вибіркової даних і порівняння його продуктивності з точки зору ISE, перерегулювання та часу встановлення з продуктивністю ПІД-регулятора.

Останні дослідження підкреслюють важливість ретельної оцінки продуктивності для оцінки ефективності контролерів PI-PD через їхній потенціал кращої продуктивності та стабільності. Дослідники використовували спеціальні показники продуктивності, адаптовані до характеристик системи,

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щоб кількісно визначити продуктивність контролера PI-PD і порівняти його з контролерами інших типів [1, 2, 12,]. Деякі показники продуктивності, що використовуються в розглянутих дослідженнях, включають час встановлення, перевищення, час наростання, час піку, порушення навантаження, абсолютну похибку, запас фази та посилення, ISE, ITSE, IAE, ITAE та час відгуку. Ці вимірювання оцінювали різні аспекти продуктивності контролера, включаючи стабільність, швидкість реакції, точність, здатність придушувати перешкоди та надійність. Вибір методу налаштування був вирішальним для оптимізації продуктивності контролера PI-PD.

У підсумку, сучасні ПІД-регулятори демонструють високу ефективність у задачах керування процесами синтезу нанокomпонентів, особливо при використанні адаптивних алгоритмів, цифрової реалізації та інтеграції з інтелектуальними системами керування. Подальший розвиток цих систем пов'язаний із удосконаленням алгоритмів самоналаштування, підвищенням стійкості до зовнішніх збурень і покращенням точності регулювання в умовах багатofакторних процесів.

## 2.2. Порівняльна характеристика аналогів та їх особливості побудови

У процесах синтезу нанокomпонентів, особливо в автоматизованих системах, важливу роль відіграє точність і стабільність регулювання фізико-хімічних параметрів, таких як температура, тиск, концентрація тощо. Для цього широко використовуються ПІД-регулятори, які забезпечують оптимальне керування за рахунок поєднання пропорційного (P), інтегрального (I) та диференціального (D) компонентів. На сьогоднішній день існує кілька варіантів реалізації ПІД-регуляторів, кожен з яких має свої конструктивні та функціональні особливості.

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналогові ПІД-регулятори базуються на електронних компонентах і забезпечують швидкодію, однак їх чутливість до зовнішніх впливів та складність налаштування знижують їхню ефективність у складних або змінних умовах. Цифрові ПІД-регулятори, реалізовані на мікроконтролерах або мікропроцесорах, надають значно більше гнучкості, можливість збереження налаштувань, а також інтеграції з іншими елементами керуючої системи.

Зі зростанням вимог до точності та адаптивності керування з'явилися нові типи ПІД-регуляторів – адаптивні, нейро-ПІД та фаззи-ПІД регулятори. Вони мають здатність до самоналаштування, адаптації до змін параметрів середовища, а також ефективного керування в умовах невизначеності або складної динаміки процесів. Зокрема, в контексті синтезу наноматеріалів, де параметри процесу можуть змінюватись у реальному часі, такі інтелектуальні регулятори стають особливо актуальними.

Нижче наведена порівняльна таблиця 2.1, яка ілюструє основні характеристики, переваги та недоліки різних типів ПІД-регуляторів, а також їхню доцільність у застосуванні до приладів для синтезу наноконпонентів.

Таблиця 2.1 - Порівняльна характеристика аналогів ПІД-регуляторів для комірки приладу синтезу наноконпонентів

Тип ПІД-регулятора	Архітектура / Особливості побудови	Переваги	Недоліки	Застосовність у приладі для синтезу наноконпонентів
Класичний аналоговий ПІД-регулятор	Побудований на аналогових елементах: операційні	Висока швидкодія, стабільна робота при фіксованих параметрах	Складність налаштування, чутливість до дрейфу параметрів	Обмежена застосовність – важко адаптувати до

	підсилювачі, РС-ланцюги			динамічних умов синтезу
Цифровий ПД- регулятор (на мікроконтролері)	Алгоритм реалізований програмно, використовує дискретизацію сигналів	Гнучкість у налаштуванні, можливість адаптації, простота інтеграції	Залежність від частоти дискретизації, можливі затримки	Оптимальний вибір для адаптивного керування температурою, тиском тощо

Продовження таблиці 2.1

Адаптивний ПД-регулятор	Включає блоки ідентифікації параметрів об'єкта керування, які оновлюють коефіцієнти ПД	Підлаштовується під змінні умови процесу	Вища обчислювальна складність, потребує більше ресурсів	Висока ефективність при змінних умовах синтезу нанокомпонентів
Нейро-ПД регулятор	Комбінація штучної нейронної мережі та класичного ПД	Самонавчання, добра адаптивність, може керувати складними нелінійними процесами	Складна реалізація, потребує навчання і відладки	Перспективний для складних або нових технологічних процесів

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Фаззи-ПІД регулятор (нечіткий логічний регулятор)	ПІД-алгоритм з нечіткою логікою для адаптації коефіцієнтів	Стійкість до шумів, добре працює при нечітко визначених параметрах	Потребує експертних знань для формування правил	Доцільний для умов, де процеси мають високий ступінь невизначеності
---	--	--	---	---

Для комірки приладу синтезу наноконпонентів, де важлива точність, стабільність та адаптивність керування температурою, тиском або хімічними параметрами, найбільш ефективними є цифрові, адаптивні або інтелектуальні (нейро-, фаззи-) ПІД-регулятори. Вибір залежить від складності процесу синтезу та вимог до точності керування.

### 3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

У даному розділі розглядається продуктивність запропонованих контролерів комплексного, звичайного та дробового порядку для автоматизації процесів і управління на технологічних установках. Контролери порівнюються щодо придушення збурень і відстеження заданих значень, враховуючи такі змінні, як час відгуку, стійкість до невизначеності та похибка стаціонарного стану. Дослідження показує, що складний контролер PID має кращу точність, швидший час відгуку та краще придушення шуму. Проте реалізація є складною через підвищену складність і вимоги до обробки. Навпаки, стандартний контролер PID є відомим рішенням, але може мати проблеми з точністю та надійністю. Контролери дробового порядку, засновані на дробових обчисленнях, можуть підвищити точність керування та надійність нелінійних та змінних у часі систем. Експериментальні висновки та приклади з реального світу використовуються, щоб висвітлити сильні та слабкі сторони кожного контролера. Отримані дані дають цінну інформацію про сильні та слабкі сторони контролерів складного та дробового порядку та допомагають вибрати відповідний контролер для конкретних вимог технологічного підприємства. Майбутні перспективи дизайну контролерів та оптимізації продуктивності детально описано, визначено потенційні переваги використання комплексних контролерів і контролерів дробового порядку на технологічних установках.

#### 3.1. Розробка структурної схеми

PID – це алгоритм керування зі зворотним зв'язком, який широко використовується в автоматизованих та інженерних системах. Він регулює продуктивність системи, обчислюючи різницю між бажаною заданою точкою та

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фактичним значенням процесу змінної. Три параметри PID є  $K_p$ ,  $K_i$ , і  $K_d$ , які визначають його поведінку, і блок-схема його контролера показана на рисунку 3.1.

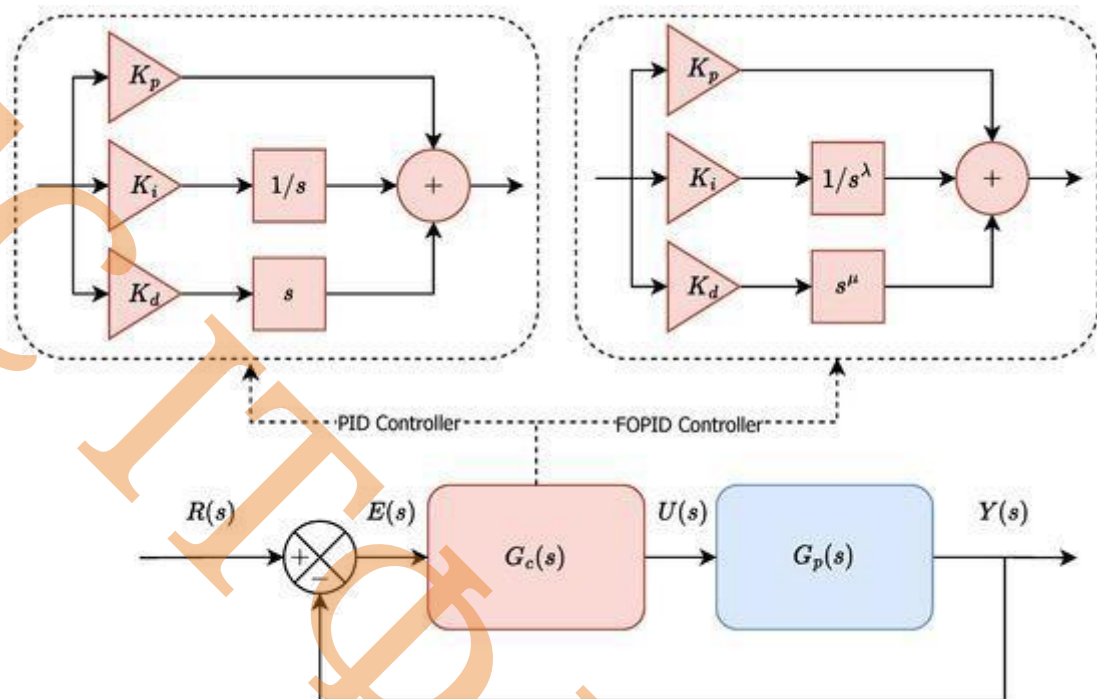


Рисунок 3.1 – Структурна схема цілочисельного та дробового ПІД-регуляторів

На схематичному зображенні показано задане значення, позначене  $R(s)$ , вихідна відповідь системи на  $Y(s)$ , помилка від  $E(s)$ , а сигнал контролера мимомо  $U(s)$ . Варто зазначити, що всі ці представлення знаходяться в області Лапласа, представлені змінною « $s$ ». Пропорційне посилення ( $K_p$ ) впливає на керуючу дію на основі поточної похибки. Вищий  $K_p$  значення призводить до більш агресивної реакції, ведучи систему до бажаного заданого значення швидше. Однак установка  $K_p$  занадто високий може спричинити перевищення та нестабільність, що робить вирішальним вибір оптимального значення. Інтегральний підсилення

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

( $K_i$ ) є ключовим параметром у системах керування, який допомагає усунути помилки стаціонарного стану та виправити довгострокові відхилення між бажаними параметрами та фактичною продуктивністю. З іншого боку, похідний приріст ( $K_d$ ) – це параметр у системах керування, який враховує швидкість зміни сигналу помилки. Поєднання цих трьох термінів дозволяє ПІД-регулятору досягти стабільності, чутливості та точності в управлінні різними системами. Керуючий сигнал ПІД-регулятора подається наступним чином:

$$U(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s). \quad (3.1)$$

ПІД-регулятори дробового порядку (FOPID) є розширеними версіями традиційних ПІД-регуляторів, які використовують обчислення дробового порядку для покращення продуктивності управління складними системами [29]. На відміну від стандартних ПІД-регуляторів, які мають три параметри (пропорційний, інтегральний і похідний), контролери FOPID включають два додаткові параметри ( $\lambda$  і  $\mu$ ), щоб досягти кращого контролю. Контролер ФОПІД $\lambda$

Параметр модулює інтегральне посилення з часом, представляючи змінний у часі фактор, який можна регулювати на основі динаміки системи. Це дозволяє контролеру регулювати інтегральне посилення відповідно до мінливої поведінки системи та потреб управління.  $\mu$  параметр контролера FOPID масштабує інтегральне посилення, точно налаштовуючи величину інтегрального відгуку на характеристики системи та цілі керування. Налаштування  $\mu$  відповідно, контролер FOPID може адаптувати інтегральну реакцію для задоволення конкретних вимог керування. Блок-схема контролера FOPID показана на рисунку 3.1. Керуючий сигнал контролера FOPID подається наступним чином:

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$U(s) = (K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu) E(s), 0 < \lambda, \mu < 1. \quad (3.2)$$

Досягнення оптимальної продуктивності управління в контролерах FOPID вимагає обережності  $K_p, K_i, K_d, \lambda, \mu$

налаштування, щоб збалансувати чуйність, стабільність і міцність. Різноманітні оптимізаційні, евристичні або модельні підходи можуть бути використані для отримання відповідних значень параметрів для конкретного застосування керування. Інтеграція  $\lambda$  і  $\mu$  параметрів і стандартне посилення підвищує продуктивність контролерів FOPID за рахунок підвищення точності керування, придушення шуму та адаптації до нелінійної та змінної в часі динаміки. Ці контролери стають дедалі популярнішими в таких галузях, як керування процесами, робототехніка та силова електроніка, де точне та надійне керування має вирішальне значення для керування поведінкою складної системи.

### 3.2. Розробка електричної принципової схеми

Розроблена схема призначена для автоматичного регулювання температури нагрівача з використанням термопари типу К (хромель-алюмель), мікроконтролера ATmega328P, датчика струму ACS712ELCTR-20A-T, оптронів FOD814S і MOC3020, а також силового виконавчого елемента — симістора, керованого через оптопару.

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



температури та формує керуючий сигнал відповідно до алгоритму ПІД-регулювання (пропорційно-інтегрально-диференціального).

Формований широтно-імпульсний сигнал (PWM) подається на вхід оптрону FOD814S, який виконує гальванічну розв'язку між логічною та силовою частинами. Далі сигнал передається на МОС3020, який безпосередньо керує симістором у силовому колі. Цей симістор виконує функцію виконавчого елемента — він вмикає або вимикає живлення нагрівача залежно від PWM-сигналу.

Для контролю струму споживання застосовується датчик струму ACS712ELCTR-20A-T, який генерує аналоговий сигнал, пропорційний струму, що протікає через нагрівач. Цей сигнал зчитується мікроконтролером через АЦП, що дозволяє реалізувати функції зворотного зв'язку та захисту (наприклад, аварійне вимкнення при перевищенні струму).

Світлодіод у схемі служить індикатором активності: він вмикається одночасно з подачею керуючого сигналу на симістор, сигналізуючи про роботу нагрівача.

### 3.3. Розрахунки режимів роботи елементів принципової схеми, вибір елементів

Під час проектування системи враховано такі технічні вимоги: робоча температура нагрівача — 500–1000 °С, максимальна потужність — до 2 кВт, температура довкілля — до 50 °С, вологість — до 80 %.

Живлення нагрівача здійснюється від джерела змінного струму 220 В. Очікуваний струм споживання:

$$I = P / U = 2000 \text{ Вт} / 220 \text{ В} \approx 9,1 \text{ А.}$$

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Враховуючи це, було застосовано симістор, керований через оптосимістор МOC3020, із достатнім запасом по струму та напрузі. Його модель уточнюється залежно від конкретного навантаження — у схемі забезпечено можливість заміни виконавчого елемента без змін логіки керування.

Для вимірювання температури обрано термопару типу К (ТХА), яка безпосередньо підключена до аналогового входу мікроконтролера після необхідної обробки сигналу.

У якості керуючого елемента застосовується АТmega328P — мікроконтролер з широкими можливостями: достатньою кількістю портів, підтримкою АЦП, PWM, UART, SPI та можливістю реалізації ПІД-регулятора на мові програмування С. Алгоритм управління реалізовано у середовищі розробки Arduino IDE або AVR-GCC.

Живлення цифрової частини здійснюється через лінійний стабілізатор L7805ABP, що перетворює 12 В у стабільні 5 В.

Оптрони FOD814S і МOC3020 забезпечують надійну гальванічну розв'язку між низьковольтною логікою та силовим колом, що гарантує безпечну експлуатацію пристрою.

Таким чином, використані компоненти забезпечують точне, ефективне й безпечне регулювання температури в умовах промислової експлуатації — з гнучкою архітектурою та можливістю масштабування.

#### **Розрахункова частина:**

#### **Розрахунок стабілізатора L7805ABP**

$P=(U_{вх}-5)\cdot I$  навантаження

#### **Розрахунок сигналу з ACS712ELCTR-20A-T**

- чутливість  $\sim 100$  мВ/А (для 20А версії);
- при 9.1 А  $\rightarrow$  сигнал  $\approx 0.5$  В зміщення + 0.91 В =  $\sim 1.41$  В;
- струм на основі даних АЦП:

$$I = \frac{U_{\text{вих}} - 2.5}{0,1}$$

Розрахунок резисторів R1–R18

### **R1 — 330 Ом**

Резистор R1 використовується для обмеження струму через світлодіод оптопари МОС3020, яка керує симістором у схемі ПІД-регулятора. Оскільки вихід мікроконтролера подає 5 В, а падіння напруги на світлодіоді становить  $\approx 1.2$  В, на резисторі буде 3.8 В.

Напруга на резисторі: 3.8 В

Струм через резистор: 11.5 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0437$  Вт

Висновок: резистор номіналом 330 Ом і потужністю не менше 0.0437 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

### **R2 — 10 кОм**

Резистор R2 забезпечує фіксований логічний рівень на вході мікроконтролера у відсутності зовнішнього сигналу.

Напруга на резисторі: 5 В

Струм через резистор: 0.5 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0025$  Вт

Висновок: резистор номіналом 10 кОм і потужністю не менше 0.0025 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

### **R3 — 1 кОм**

Резистор R3 обмежує струм бази транзистора, що використовується для комутації навантаження.

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Напруга на резисторі: 4.3 В

Струм через резистор: 4.3 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0185$  Вт

Висновок: резистор номіналом 1 кОм і потужністю не менше 0.0185 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

#### **R4 — 4.7 кОм**

R4 використовується у верхньому плечі дільника напруги для подачі сигналу на аналоговий вхід мікроконтролера.

Напруга на резисторі: 2.5 В

Струм через резистор: 0.53 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0013$  Вт

Висновок: резистор номіналом 4.7 кОм і потужністю не менше 0.0013 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

#### **R5 — 4.7 кОм**

R5 є нижнім плечем дільника напруги для подачі аналогового сигналу у АЦП.

Напруга на резисторі: 2.5 В

Струм через резистор: 0.53 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0013$  Вт

Висновок: резистор номіналом 4.7 кОм і потужністю не менше 0.0013 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

#### **R6 — 120 Ом**

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

R6 є вихідним резистором у ШІМ-колі, розрахованим на порівняно високий струм.

Напруга на резисторі: 5 В

Струм через резистор: 41.7 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.21$  Вт

Висновок: резистор номіналом 120 Ом і потужністю не менше 0.21 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

### **R7 — 10 кОм**

R7 забезпечує стабільний логічний рівень на цифровому вході.

Напруга на резисторі: 5 В

Струм через резистор: 0.5 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0025$  Вт

Висновок: резистор номіналом 10 кОм і потужністю не менше 0.0025 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

### **R8 — 220 Ом**

R8 обмежує струм через індикаторний світлодіод.

Напруга на резисторі: 3 В

Струм через резистор: 13.6 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0408$  Вт

Висновок: резистор номіналом 220 Ом і потужністю не менше 0.0408 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

### **R9 — 100 кОм**

R9 є частиною фільтра або зворотного зв'язку з високим опором.

Напруга на резисторі: 2.5 В

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Струм через резистор: 25 мкА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.000063$  Вт

Висновок: резистор номіналом 100 кОм і потужністю не менше 0.000063

Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

**R10 — 1 кОм**

R10 обмежує струм бази транзистора або оптодрайвера.

Напруга на резисторі: 4.3 В

Струм через резистор: 4.3 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0185$  Вт

Висновок: резистор номіналом 1 кОм і потужністю не менше 0.0185 Вт

забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

**R11 — 1 кОм**

R11 захищає аналоговий вхід мікроконтролера від перенавантаження.

Напруга на резисторі: 5 В

Струм через резистор: 5 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.025$  Вт

Висновок: резистор номіналом 1 кОм і потужністю не менше 0.025 Вт

забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

**R12 — 10 кОм**

R12 використовується у фільтрі або як обмежуючий резистор у вхідному ланцюзі.

Напруга на резисторі: 5 В

Струм через резистор: 0.5 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0025 \text{ Вт}$

Висновок: резистор номіналом 10 кОм і потужністю не менше 0.0025 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

**R13 — 470 Ом**

R13 використовується у керуючій лінії для обмеження струму.

Напруга на резисторі: 5 В

Струм через резистор: 10.6 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.05 \text{ Вт}$

Висновок: резистор номіналом 470 Ом і потужністю не менше 0.05 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

**R14 — 1 кОм**

R14 — частина фільтруючого ланцюга для згладжування ШІМ-сигналу.

Напруга на резисторі: 2 В

Струм через резистор: 2 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.004 \text{ Вт}$

Висновок: резистор номіналом 1 кОм і потужністю не менше 0.004 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

**R15 — 2.2 кОм**

R15 входить у зворотній зв'язок регулятора або фільтра.

Напруга на резисторі: 3 В

Струм через резистор: 1.36 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0041 \text{ Вт}$

Висновок: резистор номіналом 2.2 кОм і потужністю не менше 0.0041 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

**R16 — 10 кОм**

R16 задає початковий рівень на цифровому вході.

Напруга на резисторі: 5 В

Струм через резистор: 0.5 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.0025$  Вт

Висновок: резистор номіналом 10 кОм і потужністю не менше 0.0025 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

**R17 — 1 кОм**

R17 — частина фільтруючого ланцюга для згладжування ШІМ-сигналу.

Напруга на резисторі: 2 В

Струм через резистор: 2 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.004$  Вт

Висновок: резистор номіналом 1 кОм і потужністю не менше 0.004 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

**R18 — 1 кОм**

R18 — частина фільтруючого ланцюга для згладжування ШІМ-сигналу.

Напруга на резисторі: 2 В

Струм через резистор: 2 мА

Розрахунок опору:  $R = U / I$

Розрахунок потужності:  $P = I^2 \cdot R = 0.004$  Вт

Висновок: резистор номіналом 1 кОм і потужністю не менше 0.004 Вт забезпечує стабільну роботу в заданому режимі.

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 4. ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи було розроблено, досліджено та змодельовано систему ПІД-регулювання температури комірки приладу для синтезу нанокomпонентів. Аналіз теоретичних основ ПІД-регулювання підтвердив актуальність використання таких регуляторів у високоточних технологічних процесах, де необхідно забезпечити стабільне та надійне керування тепловими режимами. Під час огляду сучасних реалізацій ПІД-контролерів були проаналізовані адаптивні, цифрові та інтелектуальні модифікації, що підтвердило доцільність використання цифрового підходу на основі мікроконтролера з можливістю програмного налаштування параметрів регулювання.

У проектно-конструкторському розділі було створено структурну та принципову електричну схеми цифрового ПІД-регулятора. Особливу увагу було приділено вибору силового елемента — симістора VT138-800, який забезпечує надійну роботу з навантаженням потужністю до 2 кВт при напрузі 220 В. Як температурний датчик застосовано термопару типу К, сигнал від якої обробляється прецизійним цифро-аналоговим перетворювачем MAX31855 і передається до мікроконтролера ATmega328P через інтерфейс SPI. Для реалізації захисних функцій використано компаратор LM393, а живлення логічної частини забезпечується стабілізатором AMS1117-5.0, який формує напругу 5 В із джерела 12 В.

Проведені електротехнічні розрахунки дозволили оптимально підібрати елементну базу з урахуванням реальних експлуатаційних умов, таких як температурні коливання, вологість і енергетичне навантаження. Результати моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink показали ефективність роботи ПІД-регулятора — система демонструє швидкий вихід на задане значення температури, стійкість до зовнішніх збурень, відсутність суттєвого перерегулювання та здатність підтримувати температуру з точністю до  $\pm 1$  °С.

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, розроблена схема повністю відповідає технічному завданню, успішно реалізує цифровий ПД-алгоритм керування температурою, є надійною, точною й енергоефективною, а також має потенціал до впровадження у складі сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами в лабораторних і промислових умовах.

ЕС ДТФ УЖЕНА

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

## 5. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Åström, K.J.; Hägglund, T. Advanced PID Control; ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society: Research Triangle Park, NC, USA, 2006. [Google Scholar].
2. Åström, K.J.; Hägglund, T. Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control. J. Process Control 2004, 14, 635–650. [Google Scholar] [CrossRef].
3. Arturo Urquizo. PID Controller—Wikipedia, the Free Encyclopedia. 2011. Available online: [https://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller](https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller) (accessed on 30 March 2018).
4. Åström, K.J. PID Controllers: Theory, Design and Tuning; ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society: Research Triangle Park, NC, USA, 1995. [Google Scholar].
5. Åström, K.J.; Hägglund, T. The future of PID control. Control Eng. Pract. 2001, 9, 1163–1175. [Google Scholar] [CrossRef].
6. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. // Transactions of the ASME, Vol.64. pp. 759-768, 1942.
7. Harold W. Kuhn, «The Hungarian Method for the assignment problem», Naval Research Logistics Quarterly, 2:83—97, 1955. Kuhn's original publication.
8. Chien K. L. On the automatic control of generalized passive systems / K. L. Chien, J. A. Hrones, J. B. Reswick // Transaction of the ASME. – 1952. – Vol. 74. – No. 2 – P. 175–185.
9. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules, 3rd ed.; Imperial College Press: London, UK, 2009; ISBN 978-1-84816-242-6. [Google Scholar].
10. Ziegler, J.G.; Nichols, N.B. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME 1942, 64, 759–768. [Google Scholar] [CrossRef].

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Åström, K.J.; Panagopoulos, H.; Hägglund, T. Design of PI controllers based on non-convex optimization. *Automatica* 1998, 34, 585–601. [Google Scholar] [CrossRef].
12. Gorez, R. A survey of PID auto-tuning methods. *Eur. Phys. J. A* 1997, 38, 3–10. [Google Scholar].
13. Huba, M. Constrained pole assignment control. In *Current Trends in Nonlinear Systems and Control*; Menini, L., Zaccarian, L., Abdallah, C.T., Eds.; Birkhäuser Boston: Boston, MA, USA, 2006; pp. 163–183. ISBN 978-0-8176-4383-6. [Google Scholar].
14. Huba, M. *Theory of Automatic Control 3: Constrained PID Control*; STU: Bratislava, Slovakia, 2006. [Google Scholar].
15. Z. Chen et al. CRISPR-Cas13a-powered electrochemical biosensor for the detection of the L452R mutation in clinical samples of SARS-CoV-2 variants *J. Nanobiotechnol.* (2023).
16. M. Negahdary *Aptamers in nanostructure-based electrochemical biosensors for cardiac biomarkers and cancer biomarkers: a review Biosens. Bioelectron.* (2020).
17. M. Negahdary et al. Electrochemical aptasensing of human cardiac troponin I based on an array of gold nanodumbbells-applied to early detection of myocardial infarction *Sensors Actuators B Chem.* (2017).
18. V. Harish et al. Cutting-edge advances in tailoring size, shape, and functionality of nanoparticles and nanostructures: a review *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* (2023).
19. G. Rahimi et al. Design a PEGylated nanocarrier containing lemongrass essential oil (LEO), a drug delivery system: application as a cytotoxic agent against breast cancer cells *J Drug Delivery Sci. Technol.* (2023).
20. M. Negahdary et al. Application of electrochemical biosensors for the detection of microRNAs (miRNAs) related to cancer *Coord. Chem. Rev.* (2022).

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

21. A.M. Salaheldin et al. Automated synthesis of quantum dot nanocrystals by hot injection: mixing induced self-focusing Chem. Eng. J. (2017).

22. J. Lin et al. Machine learning accelerates the investigation of targeted MOFs: performance prediction, rational design and intelligent synthesis Nano Today (2023).

23. H. He et al. From prediction to design: recent advances in machine learning for the study of 2D materials Nano Energy (2023).

24. M. Negahdary et al. An ultrasensitive electrochemical aptasensor for early diagnosis of Alzheimer's disease, using a fern leaves-like gold nanostructure Talanta (2019).

25. M.M. Ghobashy et al. Gold nanoparticles in microelectronics advancements and biomedical applications Mater. Sci. Eng. B (2024).

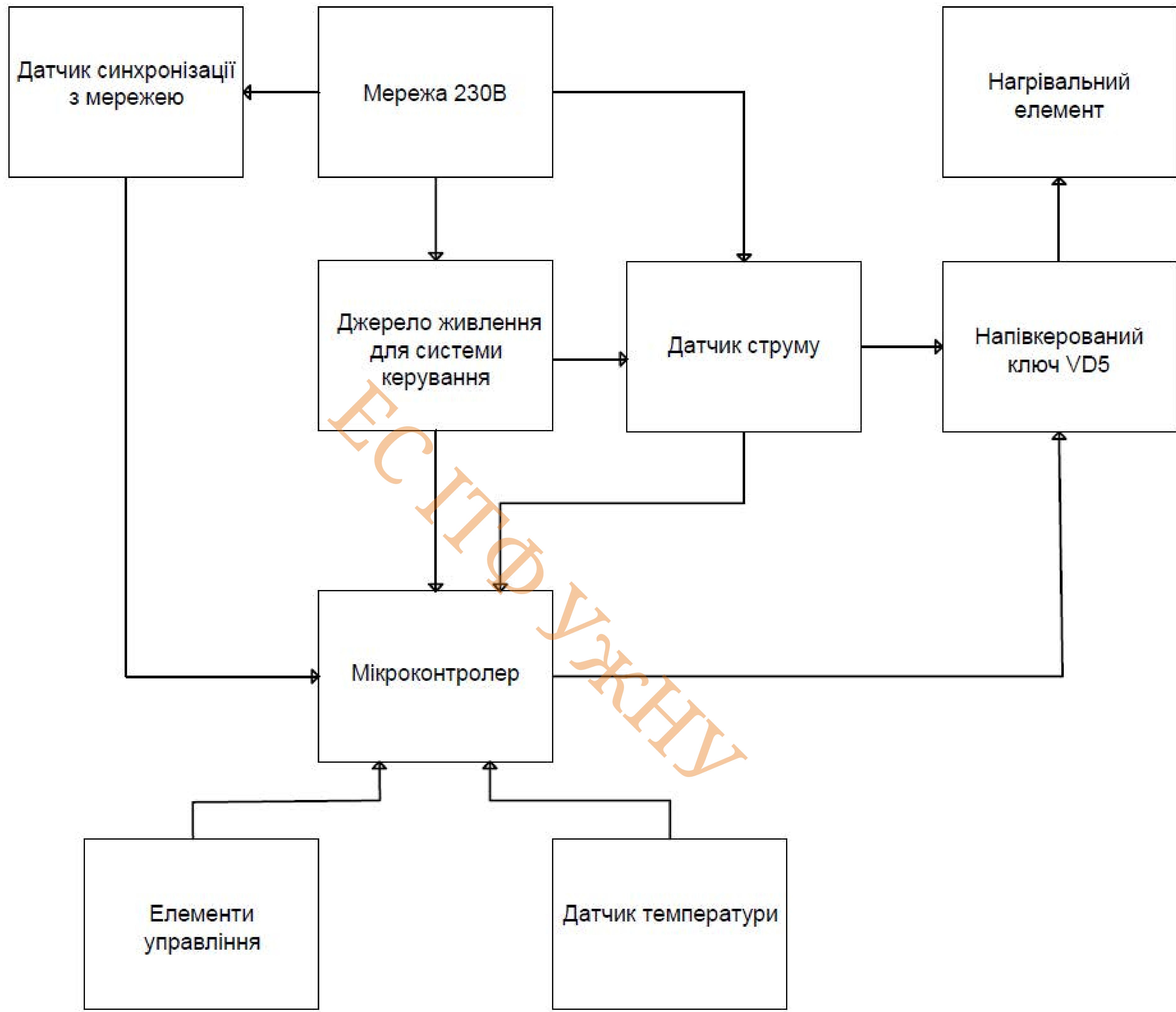
26. M. Negahdary et al. Developing a nanomaterial-based 3D-printed platform: application as a cancer aptasensor via detection of heat shock protein 90 (HSP90) Sensors Actuators B Chem. (2024).

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

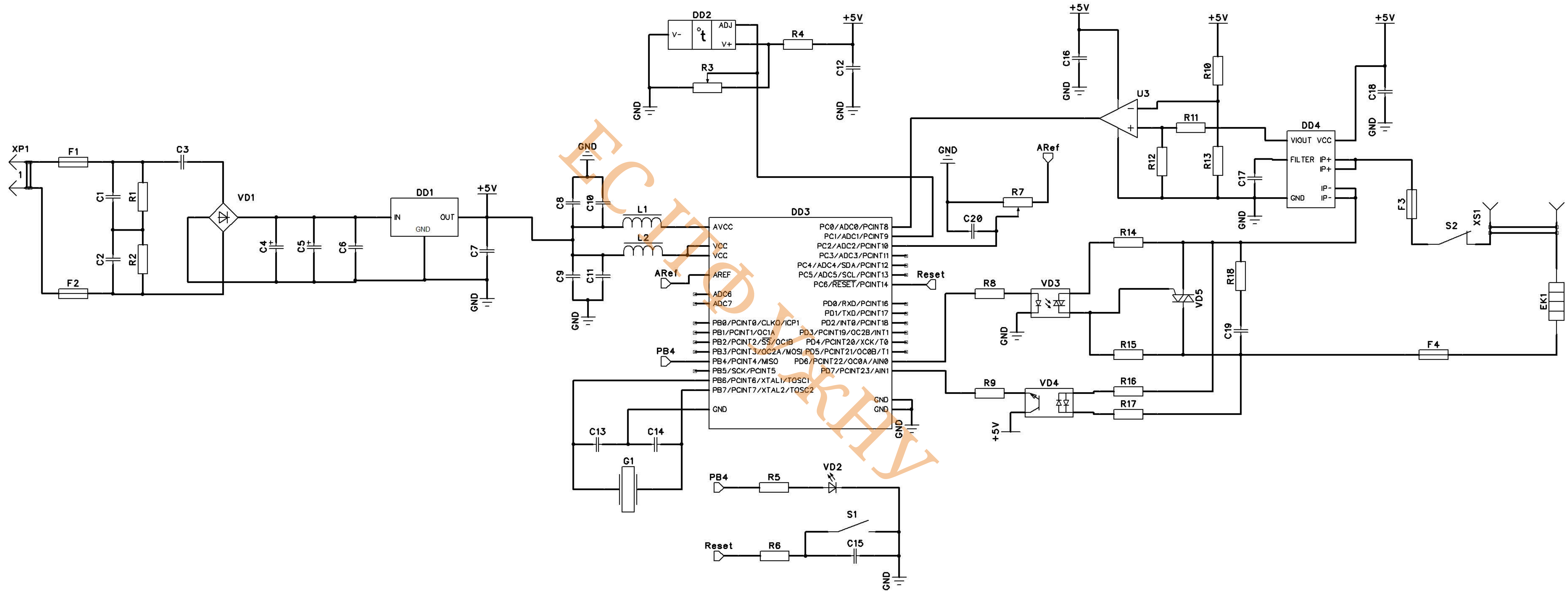
**ДОДАТКИ**

ЕС ТТФ УЖЕНА

					КП ЕС.9469967.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43



					КРБ ЕС.99469967.001 Е1			
Зм	Лит	№ докум.	Підпис	Дата	ПІД-регулятор комірки приладу синтезу наноконпонентів			
Розроб		Теличко В.А.						
Перевір		Елещих О.О.						
					Лит	Маса	Масштаб	
					Аркуш	1	Аркушів	1
					Структурна схема			
					УжНУ, ІТФ ЕС 4к.			



					КРБ ЕС.99469967.001 ЕЗ			
Эк	Лит	№ докум.	Подпис	Дата	ПИД-регулятор комірки приладу синтезу наноконденітів			
Розроб	Телічко В.А.							
Перевір	Елєсєвих О.О.							
					Лит	Маса	Масштаб	
					Аркуш	1	Аркушів	1
Н конт	Палт О.В.				Схема електрична принципова			
Затверд	Зяць Т.М.							УжНУ, ІТФ ЕС 4к.

Поз. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
<u>Конденсатори</u>			
C1	UHE1V101MPD 100 $\mu\text{F}$ 25В $\pm 20\%$	1	
C2	GRM188R71H104KA93D 100 нФ 50В $\pm 10\%$	1	
C3	CL21B105KBFNNNE 1 $\mu\text{F}$ 25В $\pm 10\%$	1	
C4, C5	EEU-FR1E221 220 $\mu\text{F}$ 25В $\pm 20\%$	2	
C6-C12	GRM188R71H104KA93D 100 нФ 50В $\pm 10\%$	7	
C13-17	VJ1206Y103MXXAT 10 нФ 50 В $\pm 20\%$	4	
C18	GRM188R71H104KA93D100 нФ 50В $\pm 10\%$	1	
C19	CL21B105KBFNNNE 1 $\mu\text{F}$ 25В $\pm 10\%$	1	
C20	GRM21BR71H104KA01L 100 нФ 50 В $\pm 10\%$	1	
<u>Резистори</u>			
R1	MF25 330R 330 $\Omega$ 0.25 Вт $\pm 1\%$	1	
R2	RC0805JR-0710KL 10к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 5\%$	1	
R3	MF25 1K 1 кОм 0.25 Вт $\pm 1\%$	1	
R4	RC0805FR-074K7L 4.7 к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 1\%$	1	
R5	RC0805FR-074K7L 4.7 к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 1\%$	1	
R6	MF50 120R 120 $\Omega$ 0.5 Вт $\pm 1\%$	1	
R7	RC0805JR-0710KL 10к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 5\%$	1	
R8	MF25 220R 220 $\Omega$ 0.25 Вт $\pm 1\%$	1	
R9	RC0805FR-07100KL 100 к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 1\%$	1	
R10	MF25 470R 470 $\Omega$ 0.25 Вт $\pm 1\%$	1	
R11	RC0805FR-071KL 1 к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 1\%$	1	
R12	RC0805JR-0710KL 10к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 5\%$	1	
R13	MF25 470R 470 $\Omega$ 0.25 Вт $\pm 1\%$	1	
R14	RC0805FR-071KL 1 к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 1\%$	1	
R15	RC0805FR-072K2L 2.2 к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 1\%$	1	
R16	RC0805JR-0710KL 10 к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 5\%$	1	
R17	RC0805FR-071KL 1 к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 1\%$	1	
R18	RC0805FR-071KL 1 к $\Omega$ 0.125 Вт $\pm 1\%$	1	
КБР.ЕС. 9469967.001 ПЕЗ			
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис Дат
Розроб.	Теличко В.А.		
Перевір.	Слесивих О.О.		
Реценз.			
Н. Контр.	Папп О.В.		
Затверд.	Заяць Т.М.		
<b>Перелік елементів</b>		Лім.	Арк.
			1
		Аркушів	2
		УжНУ, ІТФ ЕС 4к.	





Додаток 1

Завідувачу кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ

Зайця Тарасу Михайловичу

Студента (-ки) 4-го курсу  
спеціальності 171 Електроніка  
Телишка Валентин Андрійович  
(прізвище, ініціали)

## ЗАЯВА

щодо самостійного виконання  
навчальної/кваліфікаційної роботи здобувачем освіти

Я, Телишко Валентин Андрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові),

Студент(-ка) денної форми навчання, ІТФ ч-ий курс  
(форма навчання, факультет, курс)

заявляю: моя письмова робота на тему: ІТФ-рециклор кашірки  
прикладу синтезу карбокапрокетів

виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату.

Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше робіт мають відповідні посилання. Я ознайомлений(а) з діючим Положенням, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску навчальної/кваліфікаційної роботи до захисту та притягнення до академічної відповідальності.

20.06.25  
Дата

Телишко  
Підпис

Додаток 2.

**ДОВІДКА**  
про результати перевірки на унікальність  
кваліфікаційної, навчальної (курсової) роботи

Автор роботи	Гелетко Валентин Анатолійович
Назва роботи	ПЗД - регулятор калібри приладу синтезу каноканпокенів
Спеціальність	171, Електроніка
Курс	4
Факультет	ІТФ
Кафедра	ЕС
Керівник роботи	Сенесих О. О.
Роботу перевірено в програмі	Strike Plagiatism
Додано до бази даних	
Ідентифікаційний номер роботи	
Результати перевірки	
Показник унікальності тексту через перевірку роботи у внутрішній базі кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ	
Показник унікальності тексту в мережі Інтернет	

Відповідальна особа/  
Науковий керівник роботи

20.06.25  
Дата

Сенесих О. О.  
(прізвище, ініціали)  
[Підпис]  
Підпис

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Теличко В.А.

Співавтор:

Назва: 2025\_КБР\_Теличко В.А.

Науковий керівник: Ігор Михайлович Юркін

Підрозділ: Department

Коефіцієнт подібності 1:2%

Коефіцієнт подібності 2:0%

Мікропроблі: 0

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-18 11:48:37.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

- Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.
- Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.
- Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Робота є власною і не є плагіатом  
до департаменту

Ігор Михайлович Юркін

Дата

18.06.25

експерт

Мис