

УДК 681.518:66.045.1

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.1\(503\).2.7](https://doi.org/10.15589/znп2026.1(503).2.7)**SYNTHESIS AND PARAMETRIC OPTIMIZATION OF SPLIT-RANGE CONTROLLER FOR ASYMMETRICAL HEAT EXCHANGE SYSTEMS****СИНТЕЗ ТА ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕГУЛЯТОРА З РОЗДІЛЕНИМ ДІАПАЗОНОМ ДЛЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ ТЕПЛООБМІНУ****Volodymyr Yu. Stanko**

wlad.stanko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1865-1453

Andrii V. Andriiuk

andryxa07@gmail.com

ORCID: 0009-0003-8661-6120

В. Ю. Станько,

канд. екон. наук, доцент

А. В. Андріюк,

старший викладач

Stepan Gzhytskyi Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv*Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького,
м. Львів*

Abstract. Purpose. The main purpose of the study is to develop, synthesize, and parametrically optimize a split-range proportional-integral-derivative controller for asymmetrical multi-loop heat exchange systems, specifically for applications in the food industry (kvass and brewing production), ensuring minimized integral control errors and rational use of energy resources.

Methodology. A heat exchange unit with separated heating and cooling loops, characterized by a pronounced asymmetry of dynamic characteristics along the control channels, was selected as the object of the study. The object is approximated by a first-order model with pure transport delay (FOPDT). The synthesis of the control system with a split range is based on the Siemens TIA Portal environment using the specialized PID_Temp function block. The algorithm applies a two-stage tuning procedure using the Integral Time-weighted Absolute Error (ITAE) criterion to optimize the controller's settings separately for heating and cooling loops.

Results. Experimental studies conducted on an industrial Simatic S7-1200 controller confirmed the effectiveness of the approach. The system achieved precise temperature stabilization with an error margin not exceeding $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ in steady-state modes. The phenomenon of valve chattering at the split-range point was successfully eliminated by introducing a 0,5% deadband. The ITAE criterion reduced the overshoot to 10,7%, improving the transient time by 15%.

Scientific novelty. The study formalizes and proves the effectiveness of automated tuning for highly asymmetric heat exchange objects using a Gain Scheduling strategy within standard PLC functional blocks. It quantitatively establishes the superiority of the ITAE criterion for minimizing transition times and overshoots in such nonlinear thermodynamic systems without requiring external computing units.

Practical significance. The developed algorithm enables highly stable temperature support in beverage production processes. It prevents rapid mechanical wear and tear of executive mechanisms, significantly increases actuator lifespan, reduces noise, and improves the overall energy efficiency of the enterprise.

Key words: proportional-integral-derivative controller; split-range control; asymmetrical objects; multi-loop heat exchanger; parametric optimization; integral time-weighted absolute error.

Анотація. Мета. Основною метою дослідження є розробка, синтез та експериментальна верифікація методики параметричної оптимізації пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора з розділеним діапазоном (Split-Range) для асиметричних багатоконтурних систем теплообміну. Дослідження спрямоване на мінімізацію інтегральної помилки регулювання та забезпечення раціонального використання енергоресурсів на підприємствах харчової промисловості (зокрема у виробництві квасу та пивоварінні).

Методика. Динамічні процеси теплообмінника апроксимовано моделлю першого порядку з чистим транспортним запізненням (FOPDT). Синтез системи керування реалізовано в середовищі Siemens TIA Portal з використанням спеціалізованого функціонального блоку PID_Temp. Параметрична оптимізація регулятора здійснюється за допомогою інтегрального критерію зваженої абсолютної помилки (ITAE) для двох незалежних наборів параметрів (канали нагріву та охолодження).

Результати. Експериментальні дослідження, проведені на базі промислового контролера Simatic S7-1200 діючої установки, підтвердили ефективність розробленої методики. Досягнуто стабілізації температури з похибкою, що не перевищує $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ в усталеному (квазістаціонарному) режимі. Усунуто явище автоколивань виконавчих механізмів (цокотіння клапанів) у точці розділення діапазонів завдяки введенню зони нечутливості у 0,5%. Застосування критерію ІТАЕ дозволило зменшити величину перерегулювання до 10,7% та скоротити час перехідного процесу приблизно на 15%.

Наукова новизна. У роботі формалізовано метод автоматизованого налаштування для сильно асиметричних об'єктів теплообміну з використанням стратегії Gain Scheduling на рівні базових функціональних блоків ПЛК, без застосування зовнішніх обчислювачів. Кількісно доведено перевагу критерію ІТАЕ для мінімізації часу перехідного процесу та перерегулювання у подібних нелінійних термодинамічних системах.

Практична значимість. Розроблений алгоритм забезпечує стабільну підтримку температурних режимів у процесах обробки сусла. Впровадження методики запобігає механічному зносу виконавчих механізмів, підвищує ресурс роботи обладнання, знижує рівень шуму та сприяє загальному підвищенню енергоефективності харчових виробництв. Запропоноване рішення легко масштабується на інші технологічні процеси.

Ключові слова: пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор; керування з розділеним діапазоном; несиметричні об'єкти; багатоконтурний теплообмінник; параметрична оптимізація; інтегральний критерій зваженої абсолютної помилки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасний етап розвитку харчової промисловості характеризується переходом до високоавтоматизованих кіберфізичних систем, що висуває жорсткі вимоги до точності та надійності систем керування технологічними параметрами. Температура є одним із ключових параметрів, що визначають кінетику біохімічних реакцій під час пастеризації, бродіння та охолодження сусла. Відхилення температури від заданої траєкторії навіть на $0,5\text{--}1,0^{\circ}\text{C}$ може призвести до незворотних змін органолептичних властивостей продукту, порушення мікробіологічної стабільності або надмірних енерговитрат [1].

Специфікою теплообмінних процесів у виробництві напоїв є використання багатоконтурних апаратів, де для нагріву застосовується пара або перегріта вода, а для охолодження – розчин гліколю, аміак або крижана вода. Така архітектура породжує складну задачу керування, оскільки об'єкт регулювання демонструє суттєву асиметрію динамічних властивостей.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Швидкість нагріву та охолодження відрізняються не лише за знаком похідної температури, але й за порядком інерційності та величиною транспортного запізнення [2]. Асиметрія об'єкта керування проявляється у тому, що реакція системи на керуючий вплив «вгору» (нагрів) та «вниз» (охолодження) описується різними передавальними функціями. Це зумовлено різницею в коефіцієнтах теплопередачі, теплоємностях теплоносіїв та витратних характеристиках клапанів. Традиційні підходи до синтезу лінійних пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів базуються на припущенні про лінійність об'єкта в робочій точці [3].

Для подолання зазначених проблем у сучасній науковій літературі пропонуються різні підходи. Одним із напрямків є використання адаптивних

регуляторів та методів розкладу коефіцієнтів (Gain Scheduling), які змінюють параметри регулятора в залежності від робочої точки або знаку розузгодження [4]. Інший напрямок – застосування моделю-орієнтованого керування (МРС), яке дозволяє явно враховувати обмеження та нелінійність, проте вимагає значних обчислювальних ресурсів і складної ідентифікації моделі [1]. Питання оптимізації ПІД-регуляторів для теплообмінників з використанням інтегральних критеріїв детально розглядається у низці актуальних досліджень [5; 6].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Застосування єдиного набору налаштувань ПІД-регулятора для асиметричного об'єкта неминуче призводить до компромісу. Налаштування, що забезпечують швидку реакцію на охолодження, можуть викликати значне перерегулювання або автоколивання в режимі нагріву, і навпаки. У системах з розділеним діапазоном (Split-Range) це призводить до проблеми постійної роботи клапанів, цокотіння у точці перемикавання, що знижує ресурс виконавчих механізмів, підвищує шум та погіршує енергоефективність.

З появою потужних промислових контролерів, таких як Siemens S7-1200/1500, стало можливим реалізувати складні алгоритми Split-Range з розділеними налаштуваннями безпосередньо на рівні базового ПЗ, без застосування зовнішніх обчислювачів [7; 8]. Технологічні об'єкти типу PID_Temp у середовищі TIA Portal надають інструментарій для реалізації таких стратегій, однак методика їх оптимального налаштування для сильно асиметричних об'єктів в умовах харчових виробництв залишається недостатньо висвітленою та потребує формалізації.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є розробка та експериментальна верифікація методики синтезу та параметричної оптимізації ПІД-регулятора з розділеним

діапазоном для асиметричних теплообмінних систем, що забезпечує мінімізацію інтегральної помилки регулювання та раціональне використання енергоресурсів.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження визначено теплообмінну установку з розділеними контурами нагріву та охолодження, яка характеризується вираженою асиметрією динамічних характеристик по каналах керування. Предметом дослідження виступають алгоритми синтезу та параметричної оптимізації ПІД-регулятора з розділеним діапазоном (Split-Range Control). У дослідженні використано комплексний підхід, що включає методи математичного моделювання теплових об'єктів (апроксимація моделлю першого порядку з чистим транспортним запізненням), методи теорії автоматичного керування, а також методи експериментальної ідентифікації та параметричної оптимізації за інтегральним критерієм зваженої абсолютної помилки (ITAE) на базі промислового контролера Siemens S7-1200 (середовище TIA Portal).

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

В якості технологічного об'єкта розглядається автоматизована система температурної обробки суслу на підприємстві з виробництва квасу. Технологічна схема включає пластинчастий теплообмінник, через який циркулює продукт. У сорочку або суміжні контури теплообмінника подається теплоносія (пара) або холодоагент (гліколь). Система керування побудована на базі ПЛК Siemens S7-1200. Вимірювання температури здійснюється термометром опору PT100. Виконавчі механізми включають: пропорційний клапан подачі пари (сигнал 4–20 мА) для контуру нагріву та частотний перетворювач насоса подачі гліколю (4–20 мА) для контуру охолодження.

Задачею системи керування є підтримка температури суслу на виході T_{out} на заданому рівні T_{set} шляхом зміни витрати теплоносія F_h або холодоагенту F_c . Керуючий вплив формується єдиним регулятором, вихід якого розподіляється між двома каналами (рис. 1).

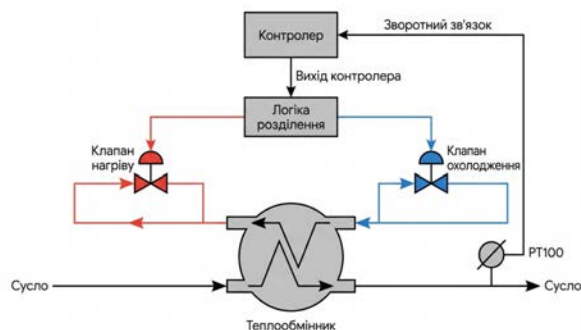


Рис. 1. Структурна схема системи керування теплообмінником з алгоритмом Split-Range

Динамічні процеси у теплообміннику описуються системою диференціальних рівнянь теплового балансу. Для цілей синтезу регулятора доцільно використовувати апроксимацію об'єкта моделлю першого порядку з чистим транспортним запізненням (FOPDT) [3]:

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

де K – статичний коефіцієнт передачі об'єкта (°C/%);

T – стала часу теплової інерції (с);

τ – час чистого запізнення (с).

Асиметрія системи полягає у тому, що параметри передавальної функції є залежними від активного контуру. Таким чином, об'єкт описується гібридною моделлю:

$$W(s) = \begin{cases} \frac{K_h \cdot e^{-\tau_h s}}{T_h s + 1}, \text{ при } MV > MV_{split} \text{ (Нагрів)} \\ \frac{K_c \cdot e^{-\tau_c s}}{T_c s + 1}, \text{ при } MV < MV_{split} \text{ (Охолодження)} \end{cases} \quad (2)$$

Згідно з проведеними на об'єкті експериментами (рис. 2), спостерігається суттєва різниця в динамічних характеристиках:

1. Канал нагріву характеризується більшою сталою часу T_h , що пов'язано з інерційністю парового конденсату або об'ємом «сорочки».

2. Канал охолодження демонструє меншу інерційність ($T_c < T_h$) та вищий загальний коефіцієнт підсилення ($|K_c| > |K_h|$), що типово для систем з примусовою циркуляцією холодоагенту під тиском.

Використання єдиного набору параметрів ПІД-регулятора для такого об'єкта є недопустимим. Математично це пояснюється зміною петльового коефіцієнта підсилення розімкненої системи $K_{loop} = K_{PID} \cdot K_{obj}$. Для забезпечення однакової якості регулювання необхідно виконання умови $K_{loop} \approx const$. Оскільки K_{obj} змінюється стрибкоподібно, коефіцієнт регулятора повинен змінюватися обернено пропорційно: $K_{PID,h} \cdot K_h \approx K_{PID,c} \cdot K_c$.

Стратегія Split-Range передбачає використання одного виходу ПІД-регулятора (MV) для керування двома виконавчими механізмами через функціональний перетворювач. У середовищі TIA Portal функціональний блок PID_Temp має два незалежних виходи OutputHeat та OutputCool, які формуються на основі внутрішнього алгоритму. В досліджуваній системі використано наступні налаштування масштабування [8]:

- OutputHeat з діапазоном 0,0–100,0%.
- OutputCool з діапазоном 10,0–100,0%.

Встановлення нижньої межі 10,0% для охолодження створює зміщення (offset), що дозволяє уникнути роботи насоса в зоні нестійкої роботи.

Критичним елементом синтезу є введення зони спокою (Deadband) навколо точки перемикання шириною 0,5–1,0% для запобігання ефекту цокотіння клапанів (рис. 3).

Найважливішою перевагою об'єкта PID_Temp є вбудована підтримка двох наборів параметрів Retain. CtrlParams.Heat та Retain.CtrlParams.Cool. Контролер автоматично перемикає активний набір коефіцієнтів залежно від знаку вихідного сигналу, що фактично реалізує стратегію Gain Scheduling без написання додаткового коду.

Для налаштування промислових регуляторів традиційно використовуються інтегральні критерії. У контексті багатоконтурних теплообмінників, де метою є швидка стабілізація без значних коливань, критерій ITAE є найбільш доцільним [6]:

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3)$$

Множник часу t під інтегралом штрафує помилки, що існують тривалий час, стимулюючи систему до швидкого заспокоєння. Процедура автоматизованого налаштування для несиметричного об'єкта складається з двох етапів (Pre-tuning та Fine-tuning) [7]. Задача оптимізації для кожного набору параметрів $\mathbf{p} = \{K_p, T_i, T_d\}$ формалізується як:

$$s_{opt} = \arg \min \sum_{k=0}^N t_k \cdot |T_{set} - T_{actual}(k, s)| \quad (4)$$

при обмеженнях на максимальне значення вихідного сигналу $0 \leq u(t) \leq 100$ та швидкість зміни керуючого впливу $|du/dt| \leq u_{max}$.

В ході експерименту на діючій установці виробництва квасу було отримано перехідні характеристики каналів нагріву та охолодження. Аналіз даних ідентифікації та налаштування наведено у таблиці 1.

Отримані дані ($T_{i,heat} \approx 3 \cdot T_{i,cool}$) чітко підтверджують гіпотезу про сильну асиметрію об'єкта. Використання єдиного налаштування (наприклад, усередненого $T_i = 13,5$ с) призвело б до перерегулювання в режимі нагріву та затягування ліквідації динамічної помилки в режимі охолодження.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Порівняльний аналіз перехідних процесів для різних стратегій керування продемонстрував чітку перевагу оптимізованого алгоритму Dual-PID порівняно з даними, наведеними в роботі [6]. При використанні критерію ITAE величина перерегулювання зменшується



Рис. 2. Налаштування системи в середовищі Siemens TIA Portal на об'єкті дослідження

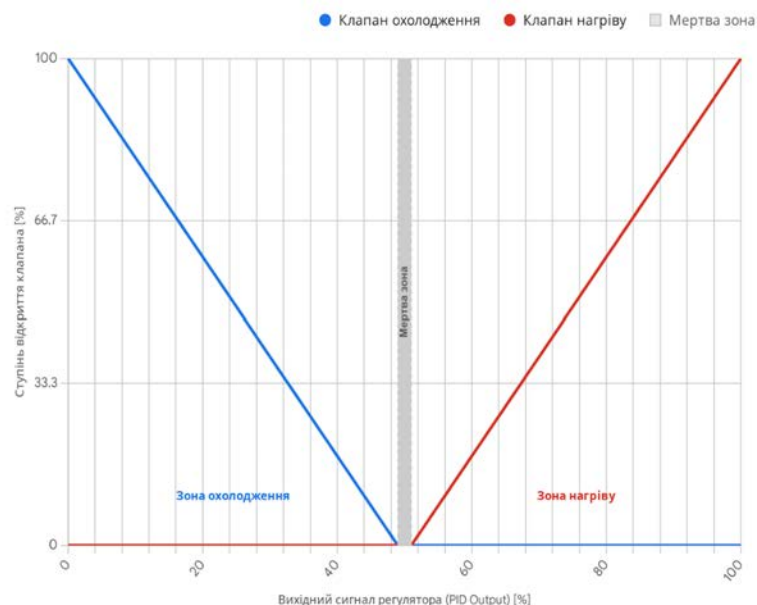


Рис. 3. Статична характеристика перетворення сигналів у системі Split-Range]

Таблиця 1. Оптимізовані параметри ПІД-регулятора PID_Temp

Параметр налаштування	Канал Нагріву (Heat)	Канал Охолодження (Cool)	Аналіз динаміки
Коефіцієнт підсилення (K_p)	1,0	2,0	Канал охолодження має менший власний коефіцієнт передачі або вимагає жорсткішого керування для компенсації збурень.
Час інтегрування (T_i), с	20,0	7,0	Процес охолодження протікає майже в 3 рази швидше, що вимагає швидшої реакції інтегральної складової.
Коеф. диференціювання (T_d), с	0,2	0,2	Диференціальна складова має однаковий стабілізуючий вплив (демпфування) для обох процесів.
Вагові коефіцієнти (P/D)	1,0 / 1,0	1,0 / 1,0	Використовується класична структура ПІД без зміщення ваги уставки.

до 10,7%, тоді як стандартний підхід (IAE) дає близько 21,7%, а єдиний набір параметрів – понад 33%. Час встановлення скоротився приблизно на 15%.

Важливим результатом стало повне усунення цокотіння клапанів у сталому режимі завдяки введенню зони нечутливості 0,5%. В результаті досягнуто стабільної підтримки температури з похибкою, мінімізованою до технологічно допустимих меж для сильно інерційних систем теплообміну (в межах $\pm 0,5^\circ\text{C}$), що повністю задовольняє вимоги до виробництва.

Візуалізація в системі HMI підтверджує коректну роботу логіки, при відхиленні температури активується лише один відповідний вихід (OutputCool або OutputHeat), при цьому ніколи не спостерігається їх одночасна робота з високою амплітудою.

Отримані результати свідчать, що врахування асиметрії коефіцієнтів підсилення об'єкта є критичним для забезпечення працездатності системи. Запропонований підхід дозволяє досягти

стабільності у всьому діапазоні температур. Це особливо важливо для процесів термообробки, де зміна динаміки об'єкта може бути спричинена утворенням накипу на пластинах теплообмінника, що значно змінює загальний коефіцієнт теплопередачі [9]. Для успішного впровадження рекомендується обов'язково вводити зону нечутливості (Deadband) в точці перемикавання та проводити автоналаштування окремо для обох контурів.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено детальний аналіз проблеми автоматичного керування температурою в несиметричних багатоконтурних системах теплообміну. Доведено, що традиційні лінійні регулятори не здатні забезпечити високу якість перехідних процесів через суттєву різницю в динамічних параметрах каналів.

Розроблено методику синтезу системи керування з розділеним діапазоном, яка базується на використанні двох наборів налаштувань ПІД-регулятора та

адаптивної логіки перемикавання. Це дозволяє реалізувати стратегію Gain Scheduling, лінеаризуючи характеристики розімкненої системи.

Виконано параметричну оптимізацію регулятора за інтегральним критерієм ІТАЕ. Виявлено, що цей критерій є найбільш ефективним для теплових об'єктів, дозволяючи зменшити перерегулювання майже у 2 рази.

Експериментальна перевірка на діючому промисловому об'єкті підтвердила адекватність розробленої методики. Отримані параметри ($K_p = 1,0$; $T_i = 20,0 / 7$ с) забезпечують стабільну підтримку температури в усталеному режимі з похибкою не більше $\pm 0,5^\circ\text{C}$ та відрізняються високою енергоефективністю. Запропоноване рішення легко масштабується на інші процеси харчової промисловості.

REFERENCES

- [1] Yerolla, R., Suhailam, P., & Besta, C. S. (2024). Advanced temperature control in ethanol fermentation using a PSO-PID controller with split-range control strategy. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 55, 1–13. <https://doi.org/10.1080/10826068.2024.2381761>
- [2] Svensson, E., & Burström, J. (2019). *Evaluation of Smart Split-Range Control Strategies for Optimized Turbine and Steam Control in Pulp and Paper*. Luleå University of Technology. Retrieved from <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1351824/FULLTEXT01.pdf>
- [3] Polishchuk, I. A. (2023). Nalashtuvannia PID-rehuliatora na osnovi metodu priamoho syntezu dlia ob'ektiv drugoho poriadku iz zapiznenniam [Tuning of PID controller based on direct synthesis method for second-order objects with delay]. *Naukovi pratsi VNTU*, (2). Retrieved from <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/download/683/648> [in Ukrainian].
- [4] ISA Blog. (2020). *Ask the Automation Pros: How Can We Improve or Eliminate Split-Range Control?* Retrieved from <https://blog.isa.org/how-can-we-improve-or-eliminate-split-range-control>
- [5] Mishra, R. K., & Shahi, R. R. (2018). Magnetic Characteristics of High Entropy Alloys. In *Magnetism and Magnetic Materials*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74235>
- [6] Kebede, M. G., & Asrat, T. (2025). Comparative study between a GA-tuned PID controller based on minimizing IAE, ITAE, and ISE objective functions in a shell and tube heat exchanger temperature control system. *TechRxiv*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.175751164.45376976/v1>
- [7] Siemens. (n.d.). *PID control: TIA Portal documentation and tutorials*. Retrieved from <https://docs.tia.siemens.cloud/r/en-us/v21/pid-control>
- [8] Siemens AG. (2025). *SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID control: Function Manual*. Retrieved from https://support.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_916450/v4/s71500_pid_control_function_manual_en-US_en-US.pdf
- [9] Trafczynski, M., Markowski, M., Alabrudzinski, S., & Urbaniec, K. (2016). Tuning Parameters of PID Controllers for the Operation of Heat Exchangers under Fouling Conditions. *Chemical Engineering Transactions*, 52, 1237–1242. <https://doi.org/10.3303/CET1652207>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Yerolla, R., Suhailam, P., & Besta, C. S. (2024). Advanced temperature control in ethanol fermentation using a PSO-PID controller with split-range control strategy. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 55, 1–13. <https://doi.org/10.1080/10826068.2024.2381761>
- [2] Svensson, E., & Burström, J. (2019). *Evaluation of Smart Split-Range Control Strategies for Optimized Turbine and Steam Control in Pulp and Paper*. Luleå University of Technology. URL: <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1351824/FULLTEXT01.pdf>
- [3] Поліщук, І. А. (2023). Налаштування ПІД-регулятора на основі методу прямого синтезу для об'єктів другого порядку із запізненням. *Наукові праці ВНТУ*, (2). URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/download/683/648>
- [4] ISA Blog. (2020). *Ask the Automation Pros: How Can We Improve or Eliminate Split-Range Control?* URL: <https://blog.isa.org/how-can-we-improve-or-eliminate-split-range-control>
- [5] Mishra, R. K., & Shahi, R. R. (2018). Magnetic Characteristics of High Entropy Alloys. In *Magnetism and Magnetic Materials*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74235>
- [6] Kebede, M. G., & Asrat, T. (2025). Comparative study between a GA-tuned PID controller based on minimizing IAE, ITAE, and ISE objective functions in a shell and tube heat exchanger temperature control system. *TechRxiv*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.175751164.45376976/v1>
- [7] Siemens. (б. д.). *PID control: TIA Portal documentation and tutorials*. URL: <https://docs.tia.siemens.cloud/r/en-us/v21/pid-control>
- [8] Siemens AG. (2025). *SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID control: Function Manual*. URL: https://support.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_916450/v4/s71500_pid_control_function_manual_en-US_en-US.pdf
- [9] Trafczynski, M., Markowski, M., Alabrudzinski, S., & Urbaniec, K. (2016). Tuning Parameters of PID Controllers for the Operation of Heat Exchangers under Fouling Conditions. *Chemical Engineering Transactions*, 52, 1237–1242. <https://doi.org/10.3303/CET1652207>

© Станько В. Ю., Андріюк А. В.

Дата першого надходження статті до видання: 24.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)