

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-304-6-186-194>

УДК 681.5.015

МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Кобзарев Є.В., Абросімов М. В., Дуришев О.А., Амерханов Т. І., Лорія М.Г.

MODEL-BASED DETERMINATION OF OPTIMAL PID CONTROLLER TUNING PARAMETERS FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES

Kobzarev E.V., Abrosimov M.V., Duryshch O.A., Amerkhanov T.I., Loria M.G.

У статті розглянуто модельно-орієнтований підхід до визначення оптимальних параметрів ПІД-регуляторів для технологічних об'єктів.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення точності, швидкодії та стійкості систем автоматичного регулювання без багаторазових активних експериментів на промисловому обладнанні. Запропонований підхід поєднує ідентифікацію еквівалентної математичної моделі об'єкта керування та оптимізацію параметрів регулятора в межах єдиної розрахункової процедури. Об'єктом керування є модель другого порядку з транспортним запізненням, параметри якої визначаються за характерними точками перехідної характеристики із застосуванням методу найменших квадратів. Вихідними даними для теоретичного узагальнення є перехідні характеристики технологічних об'єктів, отримані й апробовані у попередніх дослідженнях. Для оцінювання якості регулювання використано інтегральний квадратичний критерій, що характеризує сумарне відхилення регульованої величини від заданого значення протягом перехідного процесу. Оптимальні значення коефіцієнта підсилення, часу інтегрування та часу диференціювання ПІД-регулятора визначаються методом спряжених градієнтів. Формалізовано послідовність виконання ідентифікації, побудови замкненої системи, обчислення критерію якості та ітераційного коригування параметрів регулятора. Розроблена процедура дає змогу порівнювати варіанти налаштування і вибирати параметри, які забезпечують необхідні показники перехідного процесу. Наукова новизна полягає у поєднанні ідентифікації моделі другого порядку з транспортним запізненням і чисельної оптимізації параметрів ПІД-регулятора. Практичне значення результатів визначається можливістю програмної реалізації методу в системах автоматизованого налаштування регуляторів хіміко-технологічних та інших інерційних технологічних об'єктів.

Ключові слова: ПІД-регулятор, оптимальне налаштування, квадратична оптимізаційна функція, інтегральний критерій якості, ідентифікація об'єкта керування, ланка другого порядку, ПІД-регулятор.

Вступ. Підвищення ефективності функціонування сучасних хімічних виробництв безпосередньо пов'язане з удосконаленням систем автоматичного керування технологічними процесами. Зростання вимог до енергоефективності, безпеки виробництва, якості готової продукції та екологічних показників зумовлює необхідність застосування сучасних методів керування, здатних забезпечити стабільне функціонування технологічних об'єктів за умов зміни режимів роботи, зовнішніх збурень і невизначеності параметрів процесу. Особливо актуальним це є для виробництва нітратної кислоти, де окремі стадії технологічного процесу характеризуються значною інерційністю, транспортним запізненням, нелінійністю та взаємним впливом технологічних параметрів.

Незважаючи на активний розвиток сучасних методів автоматичного керування, пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори залишаються найбільш поширеним типом промислових регуляторів. Це пояснюється простотою їх реалізації, високою надійністю, універсальністю та можливістю інтеграції у більшість сучасних програмно-технічних комплексів керування технологічними процесами. За оцінками сучасних досліджень, саме ПІД-регулятори становлять основу більшості контурів автоматичного регулювання в хімічній, нафтогазовій, енергетичній та інших галузях промисловості. Разом із тим ефективність їх роботи значною мірою визначається правильністю вибору налаштовувальних параметрів.

Існуючі класичні методи налаштування ПІД-регуляторів, зокрема методи Зіглера—Нікольса, Чієна—Хронеса—Ресвіка, Коєна—Куна та інші інженерні підходи, були розроблені для порівняно простих моделей технологічних об'єктів і не завжди

забезпечують необхідну якість регулювання в умовах сучасних виробництв. Їх застосування часто супроводжується значним перерегулюванням, тривалим часом встановлення, недостатнім запасом стійкості та необхідністю додаткового ручного коригування параметрів регулятора. Крім того, багато методів передбачають проведення активних експериментів безпосередньо на технологічному обладнанні, що для потенційно небезпечних хімічних виробництв пов'язано з ризиком порушення технологічного режиму, збільшення витрат енергоресурсів, погіршення якості продукції або виникнення аварійних ситуацій.

Останніми роками значного розвитку набули методи оптимального настроювання регуляторів, які використовують чисельні алгоритми оптимізації, інтегральні критерії якості, методи машинного навчання, метаевристичні алгоритми та інтелектуальні системи керування. Незважаючи на високі результати таких підходів, їх практичне застосування часто обмежується значною обчислювальною складністю, необхідністю великої кількості експериментальних даних або потребою у побудові складних математичних моделей технологічних процесів. У промислових умовах особливої актуальності набувають методи, які забезпечують достатньо високу точність визначення параметрів регулятора при відносно невеликих обчислювальних витратах і можуть бути реалізовані без втручання в роботу діючого виробництва.

Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є поєднання процедур математичної ідентифікації об'єкта керування та чисельної оптимізації параметрів ПД-регулятора в межах єдиного алгоритму. Такий підхід дозволяє врахувати реальні динамічні властивості технологічного процесу ще на етапі визначення параметрів регулятора, що забезпечує підвищення якості автоматичного регулювання без проведення небезпечних експериментів на промисловому обладнанні. Особливий інтерес становить використання моделей другого порядку з транспортним запізненням, які достатньо точно описують динаміку значної кількості технологічних процесів хімічної промисловості та водночас залишаються придатними для практичного використання під час синтезу систем автоматичного керування.

У даній роботі запропоновано модельно-орієнтований метод оптимального настроювання ПД-регуляторів, що базується на використанні квадратичної оптимізаційної функції, математичної моделі еквівалентного об'єкта другого порядку із транспортним запізненням та алгоритму його ідентифікації за характерними точками перехідної характеристики. На відміну від традиційних методів налаштування, запропонований підхід поєднує процедури ідентифікації та оптимізації в єдину послідовність розрахунків, що дозволяє зменшити обсяг необхідних експериментальних даних,

підвищити точність визначення параметрів регулятора та забезпечити покращення динамічних характеристик систем автоматичного регулювання.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та формалізація модельно-орієнтованого методу визначення оптимальних параметрів ПД-регулятора для технологічних об'єктів, представлених моделлю другого порядку з транспортним запізненням, із використанням інтегрального квадратичного критерію якості.

Літературний огляд. ПД-регулятори залишаються найбільш поширеним типом промислових регуляторів завдяки простоті реалізації, високій надійності та універсальності застосування. Проте ефективність їх роботи значною мірою визначається правильністю вибору настроювальних параметрів, оскільки більшість технологічних процесів характеризуються нелінійністю, інерційністю, транспортним запізненням і зміною параметрів під час експлуатації [1].

Існуючі класичні методи налаштування ПД-регуляторів, зокрема методи Зіглера—Нікольса, Коена—Куна та Чієна—Хронеса—Ресвіка, широко застосовуються у промисловості, однак не завжди забезпечують необхідні показники якості керування для складних технологічних процесів. У сучасних дослідженнях показано, що використання математичної моделі об'єкта та оптимізаційних критеріїв дозволяє значно покращити динамічні характеристики систем автоматичного регулювання [2].

Останніми роками значна увага приділяється застосуванню чисельних методів оптимізації для визначення параметрів ПД-регуляторів. Перспективними є алгоритми, що використовують інтегральні критерії якості, багатокритеріальну оптимізацію, а також методи штучного інтелекту та метаевристичні алгоритми. Разом із тим більшість таких підходів характеризуються значною обчислювальною складністю або потребують великої кількості експериментальних даних [3].

Одним із перспективних напрямів є використання квадратичних функцій оптимізації під час налаштування ПД-регуляторів. Використання таких критеріїв дозволяє одночасно враховувати швидкодію, величину перерегулювання та динамічну похибку системи керування, що забезпечує покращення якості перехідних процесів порівняно з традиційними методами [4].

Водночас актуальним залишається питання спрощення процедури ідентифікації об'єкта керування. Сучасні методи дедалі частіше поєднують процедури побудови математичної моделі з алгоритмами автоматичного визначення оптимальних параметрів регулятора, що дозволяє скоротити час налаштування та підвищити точність систем автоматичного керування [5].

Основою проведеного дослідження стали попередні роботи авторів, у яких було розроблено алгоритм ідентифікації об'єктів керування ланками

другого порядку із транспортним запізненням, досліджено модельно-орієнтоване керування колоною синтезу аміаку та виконано аналіз зміни характеристик технологічних об'єктів за різних режимів експлуатації [6–8].

Таким чином, аналіз сучасних досліджень свідчить, що недостатньо уваги приділено комплексному поєднанню ідентифікації еквівалентного об'єкта керування за характерними точками перехідної характеристики з подальшим визначенням оптимальних параметрів ПД-регулятора на основі квадратичної оптимізаційної функції. Саме вирішенню цієї задачі присвячено дану роботу.

Постановка задачі дослідження. Однією з основних проблем автоматичного керування технологічними процесами виробництва нітратної кислоти є забезпечення високої якості регулювання в умовах значної інерційності, транспортного запізнення та зміни параметрів об'єкта під впливом зовнішніх і внутрішніх збурень. До таких процесів належать регулювання температури, концентрації, витрати та тиску, від стабільності яких безпосередньо залежать енергоефективність виробництва, якість готової продукції та безпечність технологічного процесу.

У більшості промислових систем керування використовуються ПД-регулятори, які поєднують простоту реалізації, достатню універсальність та можливість інтеграції до сучасних програмно-технічних комплексів. Проте ефективність їх функціонування визначається правильністю вибору коефіцієнтів пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. Використання стандартних методів налаштування не завжди забезпечує необхідну якість регулювання для складних технологічних процесів із великим транспортним запізненням та значною інерційністю, що характерно для виробництва нітратної кислоти. У таких випадках спостерігаються збільшення перерегулювання, тривалий час встановлення, погіршення запасів стійкості та необхідність додаткового ручного коригування параметрів регулятора.

Сучасні підходи до синтезу систем автоматичного керування передбачають використання математичних моделей технологічних об'єктів, чисельних методів оптимізації та алгоритмів автоматичного налаштування ПД-регуляторів. Однак більшість існуючих методів або потребує проведення активних експериментів безпосередньо на промисловому обладнанні, або використовує складні алгоритми оптимізації, реалізація яких потребує значних обчислювальних ресурсів. Крім того, відомі методи часто розглядають окремо задачі ідентифікації об'єкта керування та визначення оптимальних параметрів регулятора, що ускладнює їх практичне використання в умовах діючого виробництва.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення методу, який поєднує процедури ідентифікації математичної моделі технологічного об'єкта та визначення оптимальних параметрів ПД-регулятора в єдиному алгоритмі. Такий підхід повинен забезпечувати достатню точність опису динамічних властивостей об'єкта, мінімізувати обсяг експериментальних даних, необхідних для ідентифікації, та дозволяти визначати параметри регулятора за критерієм мінімуму інтегральної квадратичної функції якості.

У даній роботі як математичну модель технологічного об'єкта прийнято еквівалентну ланку другого порядку із транспортним запізненням, яка адекватно описує динамічні властивості більшості контурів автоматичного регулювання виробництва нітратної кислоти. Визначення параметрів моделі здійснюється за експериментально отриманою перехідною характеристикою із використанням характерних точок та нелінійного методу найменших квадратів. Після ідентифікації моделі оптимальні параметри ПД-регулятора визначаються шляхом мінімізації квадратичної функції якості методом чисельної оптимізації. Вихідні перехідні характеристики та результати ідентифікації технологічних об'єктів отримано у попередніх дослідженнях авторів [6–8]. У цій роботі нові промислові експерименти не проводилися. Раніше отримані дані використано для теоретичного узагальнення, формалізації та опису послідовності модельно-орієнтованого визначення параметрів ПД-регулятора.

Таким чином, науковою задачею дослідження є підвищення якості автоматичного керування технологічними процесами виробництва нітратної кислоти шляхом розроблення експериментально-теоретичного методу оптимального настроювання ПД-регуляторів, який поєднує ідентифікацію об'єкта керування другого порядку із транспортним запізненням та визначення оптимальних параметрів регулятора за квадратичним критерієм якості.

Ідентифікація технологічного об'єкта керування. Ефективність налаштування ПД-регулятора значною мірою залежить від точності математичної моделі технологічного об'єкта. Для більшості процесів виробництва нітратної кислоти характерними є значна інерційність, транспортне запізнення та наявність декількох домінуючих сталих часу. Такі процеси достатньо точно описуються моделлю ланки другого порядку із транспортним запізненням (Second Order Plus Time Delay, SOPTD), яка широко використовується при синтезі систем автоматичного керування хімічними виробництвами.

На відміну від моделей першого порядку, модель другого порядку дозволяє адекватніше описати як аперіодичні, так і слабкоколивальні процеси, характерні для теплообмінних апаратів, колон, реакторів та інших технологічних об'єктів. Крім того, використання моделі SOPTD забезпечує

більш точне визначення параметрів ПІД-регулятора та покращення показників якості автоматичного регулювання.

У даній роботі математична модель технологічного об'єкта представлена передавальною функцією(1):

$$W(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (1)$$

де K – коефіцієнт підсилення об'єкта; T_1, T_2 – сталі часу; τ – транспортне запізнення; s – оператор Лапласа.

Параметри моделі визначалися за експериментальною перехідною характеристикою технологічного процесу. Для цього використовували реакцію об'єкта на ступінчасту зміну керуючого впливу, отриману під час роботи виробничого обладнання без порушення нормального технологічного режиму.

На першому етапі виконувалося попереднє опрацювання експериментальних даних. Із перехідної характеристики усувалися випадкові високочастотні шуми та вимірювальні похибки шляхом цифрової фільтрації. Після цього визначалися характерні точки кривої, які відповідають найбільш інформативним ділянкам зміни вихідної координати.

Подальше визначення параметрів моделі здійснювалося за методом найменших квадратів. Як критерій оптимальності використовувалася мінімізація квадратичного відхилення між експериментальною та розрахунковою перехідними характеристиками

$$J = \sum_{i=1}^N (y_i^{\text{exp}} - y_i^{\text{mod}})^2 \quad (2)$$

де y_i^{exp} – експериментальне значення вихідної координати; y_i^{mod} – значення, отримане за математичною моделлю; N – кількість експериментальних точок.

Мінімізація функціонала дозволяла визначити оптимальні значення параметрів K , T_1 , T_2 та τ , що забезпечують найкраще узгодження моделі з реальною динамікою технологічного процесу.

На відміну від традиційних методів ідентифікації, які використовують повну експериментальну вибірку, запропонований підхід базується на використанні характерних точок перехідної характеристики. Це дозволяє істотно зменшити обсяг необхідних експериментальних даних, скоротити час обчислень та забезпечити високу точність ідентифікації. Аналогічний підхід застосовується в сучасних алгоритмах автоматичного налаштування промислових ПІД-регуляторів, побудованих на моделі SOPTD.

Адекватність отриманої математичної моделі оцінювалася шляхом порівняння експериментальної та розрахункової перехідних характеристик. Критеріями оцінювання були середньоквадратична похибка апроксимації, максимальне відхилення моделі від експериментальних даних та коефіцієнт детермінації R^2 . За результатами проведених досліджень встановлено, що запропонований метод забезпечує високу точність відтворення динамічних властивостей технологічного об'єкта, а максимальна похибка апроксимації не перевищує значень, отриманих у попередніх дослідженнях авторів.

Отримана модель другого порядку із транспортним запізненням була використана як основа для подальшого визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора за квадратичним критерієм якості. Застосування такої моделі дозволило врахувати реальні динамічні властивості технологічного процесу та підвищити ефективність синтезу системи автоматичного керування порівняно з використанням спрощених моделей першого порядку.

Розроблення методу оптимального настроювання ПІД-регулятора. Після побудови математичної моделі технологічного об'єкта наступним етапом дослідження є визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора. Структурна схема модельно-орієнтованого визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора зображено на рис. 1

Якість роботи системи автоматичного керування значною мірою залежить від правильного вибору коефіцієнтів пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. Для технологічних процесів виробництва нітратної кислоти, що характеризуються значною інерційністю та транспортним запізненням, застосування класичних методів налаштування не завжди забезпечує необхідні показники швидкодії, точності та стійкості. Тому доцільним є використання оптимізаційного підходу, який дозволяє визначити параметри регулятора на основі математичної моделі об'єкта керування. Модельно-орієнтовані методи налаштування для SOPTD-процесів забезпечують кращі показники якості порівняно з класичними емпіричними правилами.

У роботі використано класичну структуру ПІД-регулятора

$$W_{\text{PID}}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

де K_p – коефіцієнт пропорційної складової; T_i – час інтегрування; T_d – час диференціювання.

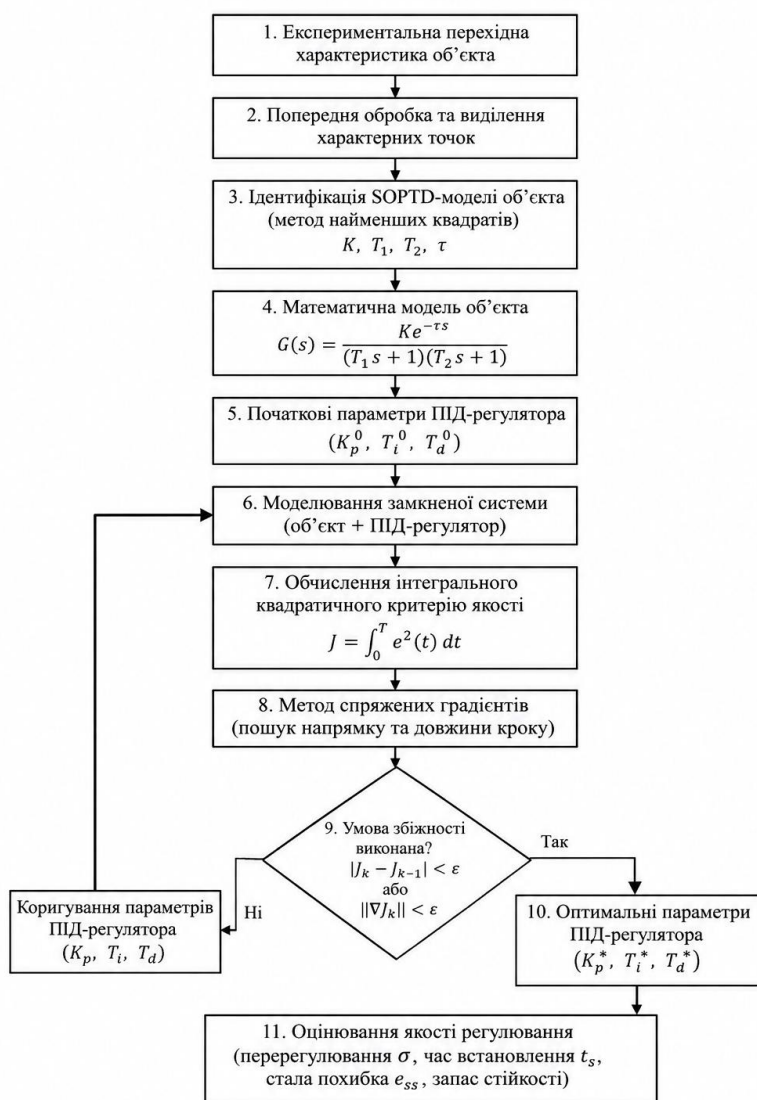


Рис. 1. Структурна схема модельно-орієнтованого визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора

Пошук оптимальних значень параметрів K_p , T_i та T_d здійснювався шляхом мінімізації квадратичного критерію якості, який характеризує сумарне відхилення регульованої величини від заданого значення протягом усього перехідного процесу. Як функцію мети прийнято інтегральний квадратичний критерій

$$J = \int_0^{t_p} e^2(t) dt. \quad (4)$$

де $e(t)$ – похибка регулювання; t_p – тривалість перехідного процесу.

Використання квадратичного критерію забезпечує підвищену чутливість до значних відхилень регульованої величини, що сприяє одночасному зменшенню перерегулювання, скороченню часу встановлення та підвищенню точності автоматичного регулювання. Квадратичні критерії широко застосовуються в задачах оптимального синтезу регуляторів завдяки їх

математичним властивостям і високій ефективності при оптимізації параметрів систем керування.

Оптимізація виконувалася методом спряжених градієнтів. Вибір цього алгоритму обумовлений його швидкою збіжністю, невисокими обчислювальними витратами та можливістю ефективного пошуку мінімуму функції багатьох змінних без необхідності обчислення матриці других похідних. На кожній ітерації визначався градієнт функції якості

$$\nabla J(\mathbf{p}_k) = \left[\frac{\partial J}{\partial K_p}, \frac{\partial J}{\partial T_i}, \frac{\partial J}{\partial T_d} \right]^T \quad (5)$$

після чого виконувалося коригування параметрів регулятора відповідно до вибраного напрямку пошуку

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k \quad (6)$$

де $\mathbf{p}$ – вектор параметрів регулятора; α_k – довжина кроку; $\mathbf{d}_k$ – напрямок спряженого градієнта.

Оптимізаційна процедура завершувалася після досягнення заданої точності або за умови, що зміна значення функції якості між двома послідовними ітераціями не перевищувала встановленого порогового значення.

Розроблений метод складається з таких послідовних етапів:

- отримання експериментальної перехідної характеристики технологічного об'єкта;
- ідентифікація параметрів моделі другого порядку із транспортним запізненням;
- визначення початкових значень параметрів ПІД-регулятора;
- моделювання перехідного процесу;
- обчислення квадратичного критерію якості;
- коригування параметрів регулятора методом спряжених градієнтів;
- перевірка умов збіжності;
- визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора.

На відміну від традиційних методів налаштування, запропонований підхід використовує математичну модель, отриману безпосередньо за експериментальними даними конкретного технологічного процесу. Це дозволяє врахувати реальні динамічні властивості об'єкта та забезпечити індивідуальне налаштування регулятора без використання універсальних емпіричних коефіцієнтів.

Особливістю запропонованого методу є інтеграція процедур ідентифікації об'єкта та оптимізації параметрів ПІД-регулятора в єдину розрахункову послідовність. Такий підхід скорочує час налаштування, зменшує обсяг необхідних експериментальних даних і підвищує якість отриманих параметрів регулятора. Аналогічні модельно-орієнтовані методи для SOPTD-процесів демонструють переваги над класичними методами Зіглера—Нікольса та іншими емпіричними правилами налаштування.

Усі розрахунки виконувалися у програмному середовищі MATLAB із використанням власної програми оптимізації, яка реалізує алгоритм ідентифікації моделі, моделювання перехідного процесу та автоматичного визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора. Отримані результати були використані для подальшого порівняння із традиційними методами налаштування та оцінювання ефективності запропонованого підходу.

Результати дослідження. Для оцінювання ефективності запропонованого методу було проведено серію обчислювальних експериментів із використанням математичної моделі технологічного об'єкта виробництва нітратної кислоти, отриманої на етапі ідентифікації. Дослідження виконувалися шляхом моделювання замкненої системи автоматичного керування з ПІД-регулятором, параметри якого визначалися за розробленим алгоритмом квадратичної оптимізації. Отримані результати порівнювалися з результатами

налаштування регулятора за класичними методами Зіглера—Нікольса, Чієна—Хронеса—Ресвіка та методом трикутника. Таке порівняння є поширеним підходом при оцінюванні нових методів налаштування ПІД-регуляторів для процесів, що описуються моделями SOPTD.

На першому етапі було перевірено точність побудованої математичної моделі. Порівняння експериментальної та розрахункової перехідних характеристик показало, що модель другого порядку із транспортним запізненням достатньо точно відтворює динамічні властивості реального технологічного процесу. Використання характерних точок перехідної характеристики дозволило визначити параметри моделі з високою точністю, а середньоквадратичне відхилення між експериментальною та розрахунковою характеристиками залишалось в допустимих межах. Отримані результати підтверджують доцільність використання моделі SOPTD як основи для синтезу систем автоматичного керування технологічними процесами хімічної промисловості.

Після завершення процедури ідентифікації було виконано оптимізацію параметрів ПІД-регулятора. У процесі оптимізації спостерігалось монотонне зменшення значення інтегральної квадратичної функції якості, що свідчить про збіжність запропонованого алгоритму. Після досягнення мінімуму функції якості отримано набір параметрів K_p , T_i , T_d , які забезпечують оптимальні показники перехідного процесу для досліджуваного об'єкта.

Аналіз перехідних характеристик показав, що використання запропонованого методу дозволяє суттєво покращити якість автоматичного регулювання. Порівняно з традиційними методами налаштування спостерігається скорочення часу регулювання, зменшення величини перерегулювання та підвищення точності підтримання заданого режиму. При цьому перехідний процес характеризується плавною зміною регульованої величини без значних коливань, що є особливо важливим для технологічних процесів виробництва нітратної кислоти.

Також було проаналізовано стійкість системи автоматичного керування. Проведене моделювання підтвердило, що оптимізовані параметри ПІД-регулятора забезпечують достатній запас стійкості та зберігають працездатність системи при зміні параметрів технологічного процесу в робочому діапазоні. Це свідчить про можливість практичного використання запропонованого методу в умовах промислової експлуатації, де характеристики об'єкта можуть змінюватися внаслідок коливань навантаження, зміни властивостей сировини або режимів роботи обладнання. Аналогічні результати щодо підвищення робастності модельно-орієнтованих методів налаштування для SOPTD-процесів наведено і в сучасних дослідженнях.

Результати моделювання також показали, що використання математичної моделі об'єкта дозволяє

виконувати налаштування ПІД-регулятора без проведення багаторазових експериментів безпосередньо на виробничому обладнанні. Це суттєво скорочує час введення системи в експлуатацію, зменшує ризик порушення технологічного режиму та забезпечує можливість попереднього аналізу різних варіантів налаштування регулятора.

Для кількісної оцінки ефективності запропонованого підходу було використано інтегральні критерії якості регулювання, максимальне перерегулювання, час встановлення та статичну похибку. За всіма дослідженими показниками розроблений метод продемонстрував перевагу над традиційними емпіричними методами налаштування. Найбільш суттєве покращення спостерігалось за критеріями часу регулювання та інтегральною квадратичною похибкою, що підтверджує ефективність використання квадратичної оптимізаційної функції під час визначення параметрів ПІД-регулятора. Подібні переваги модельно-орієнтованих методів також відзначаються в сучасних роботах, присвячених оптимальному налаштуванню ПІД-регуляторів для процесів із транспортним запізненням.

Отримані результати свідчать, що запропонований модельно-орієнтований метод поєднує високу точність ідентифікації технологічного об'єкта та ефективність оптимізаційного визначення параметрів ПІД-регулятора. Це забезпечує підвищення якості автоматичного керування без суттєвого збільшення обчислювальних витрат і створює передумови для практичного впровадження розробленого підходу в системах автоматизації виробництва нітратної кислоти.

Порівняльний аналіз запропонованого методу з існуючими методами настроювання ПІД-регуляторів. Для оцінювання ефективності розробленого експериментально-теоретичного методу проведено порівняння результатів його застосування з найбільш поширеними методами настроювання ПІД-регуляторів, що використовуються в промислових системах автоматичного керування. Як базові методи обрано метод Зіглера—Нікольса, метод Чієна—Хронеса—Ресвіка (CHR) та метод трикутника, які широко застосовуються для технологічних процесів із транспортним запізненням та інерційною динамікою.

Порівняння виконувалося за однакових умов моделювання для математичної моделі технологічного об'єкта виробництва нітратної кислоти, представленій ланкою другого порядку із транспортним запізненням. Для кожного із методів визначалися параметри ПІД-регулятора, після чого здійснювалося моделювання замкненої системи автоматичного керування та оцінювалися показники якості перехідного процесу.

Основними критеріями порівняння були:

- максимальне перерегулювання;
- час встановлення;
- статична похибка;
- інтегральний квадратичний критерій якості;
- плавність керуючого впливу;
- запас стійкості системи.

Результати моделювання показали, що класичний метод Зіглера—Нікольса забезпечує швидко налаштування регулятора, однак характеризується значним перерегулюванням і коливальним характером перехідного процесу. Такі особливості можуть бути допустимими для окремих технічних систем, але для процесів виробництва нітратної кислоти вони призводять до збільшення технологічних витрат, додаткових енергетичних витрат і погіршення стабільності режиму роботи обладнання. Подібні недоліки класичних правил налаштування неодноразово відзначалися в роботах інших дослідників.

Метод CHR забезпечує більш плавний характер перехідного процесу та меншу величину перерегулювання порівняно з методом Зіглера—Нікольса. Проте досягнення цього ефекту супроводжується збільшенням часу регулювання. Для технологічних процесів, у яких необхідно швидко компенсувати дію зовнішніх збурень, така особливість може знижувати ефективність системи автоматичного керування.

Метод трикутника характеризується простотою практичного застосування та не потребує складних математичних розрахунків. Разом із тим його точність істотно залежить від правильності визначення характерних параметрів експериментальної перехідної характеристики. При наявності шумів вимірювання або зміни параметрів об'єкта точність налаштування суттєво зменшується.

Запропонований у роботі метод принципово відрізняється від наведених підходів тим, що використовує математичну модель технологічного об'єкта, отриману за результатами ідентифікації, та визначає параметри ПІД-регулятора шляхом мінімізації інтегральної квадратичної функції якості. Це дозволяє одночасно врахувати інерційність об'єкта, транспортне запізнення та взаємний вплив усіх параметрів регулятора під час пошуку оптимального рішення.

За результатами моделювання встановлено, що запропонований метод забезпечує: зменшення перерегулювання порівняно з класичними методами, скорочення часу встановлення перехідного процесу, зниження інтегральної квадратичної похибки, більш плавну зміну керуючого сигналу, підвищення запасу стійкості системи, меншу чутливість до зміни параметрів технологічного об'єкта.

Отримані результати узгоджуються із сучасними дослідженнями, у яких показано, що модельно-орієнтовані методи налаштування для моделей SOPTD забезпечують кращі показники якості порівняно з емпіричними правилами,

особливо для складних хіміко-технологічних процесів.

Додатковою перевагою запропонованого підходу є можливість його автоматизації. Усі етапи — від ідентифікації математичної моделі до визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора — можуть бути реалізовані програмними засобами без необхідності багаторазового ручного коригування параметрів. Це скорочує час введення системи в експлуатацію, зменшує вплив людського фактора та підвищує відтворюваність результатів.

Таким чином, проведене порівняння показало, що розроблений модельно-орієнтований метод поєднує переваги модельно-орієнтованого підходу та чисельної оптимізації, забезпечуючи більш високу якість автоматичного регулювання порівняно з традиційними методами настроювання ПІД-регуляторів. Це дозволяє рекомендувати його для використання під час проєктування та модернізації систем автоматичного керування технологічними процесами виробництва нітратної кислоти, а також інших інерційних об'єктів хімічної промисловості.

У роботі розроблено модельно-орієнтований метод оптимального настроювання ПІД-регуляторів для технологічних об'єктів виробництва нітратної кислоти, який базується на поєднанні математичної ідентифікації об'єкта керування та чисельної оптимізації параметрів регулятора за квадратичним критерієм якості. Запропонований підхід дозволяє визначати параметри ПІД-регулятора з урахуванням реальних динамічних властивостей технологічного процесу без проведення багаторазових експериментів безпосередньо на промислових об'єктах.

Література

- Rojas J. D., Arrieta O., Vilanova R. Industrial PID Controller Tuning: With a Multiobjective Framework Using MATLAB®. Cham: Springer, 2021. 148 p. DOI: 10.1007/978-3-030-72311-8.
- Alfaro V. M., Vilanova R. Model-Reference Robust Tuning of PID Controllers. Cham: Springer, 2016. 192 p. DOI: 10.1007/978-3-319-28213-8.
- Madhuranthakam C. R., Elkamel A., Budman H. Optimal tuning of PID controllers for FOPTD, SOPTD and SOPTD with lead processes. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008. Vol. 47, No. 2. P. 251–264. DOI: 10.1016/j.cep.2006.11.013.
- Ekinci S., Izci D., Gider V. et al. Quadratic interpolation optimization-based 2DoF-PID controller design for highly nonlinear continuous stirred-tank heater process. Scientific Reports, 2025. Vol. 15. Article 16324. DOI: 10.1038/s41598-025-01379-3.
- Ekinci S., Izci D., Jabari M. et al. A novel hyperbolic tangent-based PID controller tuned by the artificial lemming algorithm for nonlinear steam condenser pressure control. Scientific Reports, 2026. Vol. 16. Article 4600. DOI: 10.1038/s41598-025-34740-7.
- Tavakoli S., Safaei M. Analytically derived disturbance rejection-based PID controller tuning for second-order plus dead time plants. Electronics Letters, 2024. Vol. 60, No. 8. Article e13199. DOI: 10.1049/ell2.13199.
- Yeliseyev P., Loria M., Tselishchev O., Karpiuk L., Duryshchev O., Kobzarev Y. Identifying the operational characteristics of an ammonia synthesis column, taking into account changes in the operating parameters of the process plant. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2026. Vol. 2, No. 6 (140). P. 72–80. DOI: 10.15587/1729-4061.2026.359439.
- Лорія М. Г. Знаходження шляхів забезпечення максимальної ефективності роботи колони синтезу метанолу. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, 2019. № 1 (45). С. 127. URL: https://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_1%2845%29_2019/article/22.pdf.

Kobzarev E.V., Abrosimov M.V., Duryshv O.A., Amerkhanov T.I, Loria M.H. Model-based determination of optimal pid controller tuning parameters for technological processes

This article examines a model-based approach to determining the optimal parameters of PID controllers for industrial processes.

The relevance of this work stems from the need to improve the accuracy, response time and stability of automatic control systems without the need for repeated active experiments on industrial equipment. The proposed approach combines the identification of an equivalent mathematical model of the plant with the optimisation of controller parameters within a single calculation procedure. The plant is a second-order model with transport delay, the parameters of which are determined from characteristic points of the transient response using the least squares method. The input data for the theoretical generalisation are the transient responses of technological systems, obtained and validated in previous studies. To evaluate the quality of control, the integral quadratic criterion is used, which characterises the total deviation of the controlled variable from the setpoint during the transient process. The optimal values of the gain, integration time and differentiation time of the PID controller are determined using the conjugate gradient method. The sequence of steps for identification, construction of the closed-loop system, calculation of the quality criterion and iterative adjustment of the controller parameters has been formalised.

The procedure developed makes it possible to compare different tuning options and select the parameters that ensure the required transient response characteristics. The scientific novelty lies in the combination of second-order model identification with transport delay and the numerical optimisation of PID controller parameters. The practical significance of the results is determined by the possibility of implementing the method in software for automated controller tuning in chemical-technological and other inertial systems.

Keywords: PID controller, optimal tuning, quadratic optimisation function, integral quality criterion, identification of the controlled system, second-order element, PID controller.

Кобзарев Євген Володимирович – аспірант, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,
<https://orcid.org/0009-0004-8811-7488>
kobzarev@snu.edu.ua

Абросімов Михайло Вікторович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,
<https://orcid.org/0009-0007-8634-8364>
abrosimov@ukr.net

Дуришев Олександр Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,
<https://orcid.org/0009-0003-4472-2697>
duryshv@snu.edu.ua

Амерханов Тімур Ігоревич – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,
<https://orcid.org/0009-0009-8300-7032>
amerkhanov@ukr.net

Лорія Марина Геннадіївна – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,
<https://orcid.org/0000-0002-5589-8351>
m_loria@snu.edu.ua

Дата першого надходження статті 05.08.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 26.08.2026.

Дата публікації 30.09.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)