

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 681.5

КУБАХ С. О.* , ЦАПАР В. С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ РЕЖИМОМ ПРОЦЕСУ НАФТОПЕРЕРОБКИ

Система керування є критично важливим компонентом у кожній сфері сучасного життя, особливо в процесах нафтопереробки. Вона забезпечує безперервний контроль і оптимізацію технологічних операцій, таких як очищення, дистиляція та підігрів нафти. Покращена продуктивність таких систем призводить до підвищення загальної ефективності, що в довгостроковій перспективі означає значну економію ресурсів, енергії та підвищення якості нафтопродуктів.

Численні системи керування були розроблені спеціально для цієї мети протягом останніх кількох десятиліть у відповідь на постійну потребу в покращенні продуктивності. Маючи це на увазі, ця стаття спрямована на класифікацію та аналіз контролерів різних типів. Перехід від звичайних до більш інтелектуальних адаптивних контролерів виділено разом із відповідними принципами. Звичайні регулятори — це ті, що розроблені для лінійних систем без урахування можливості виникнення параметричних змін. Адаптивні контролери мають здатність автоматично навчатися та адаптуватися до стану заводу та проводити точний поведінки системи.

Ключові слова: система керування, нафтопереробка, адаптивні контролери, продуктивність, ефективність, звичайні регулятори, параметричні зміни, класифікація контролерів

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2024.312421

*Corresponding author: seregakubakh@gmail.com

Received 30 August 2024; Accepted 05 September 2024

Постановка проблеми. Взаємозв'язок між автоматизацією та системою керування широко поширений у промисловому світі. Ця тенденція почалася, коли відбулася промислова революція в обробній промисловості. Важливість систем управління стала очевидною, коли виникла потреба запровадити більш ефективний виробничий процес з використанням автоматизованого обладнання. З такою високою продуктивністю та великомасштабним виробництвом, здібностей людей-операторів було недостатньо, щоб задовольнити вимоги масового виробництва.

Це призвело до збільшення значення систем автоматизації та управління на виробничих або будь-яких інших технологічних підприємствах [1]. Безпека та здоров'я працівників також призвели до розробки кращого автоматизованого обладнання на виробництві.

Автоматичне керування є невід'ємною та важливою частиною сучасного суспільства, і середовище проживання кожної людини оточене системами автоматичного керування [2, 3].

Одним із застосувань системи автоматичного управління є керування процесом. Будь-який продукт, незалежно від того, є він хімічним, наприклад, газові агенти або будь-які витратні матеріали, наприклад, харчовий продукт, може бути виготовлений лише шляхом пропускання сировини через процес. Хімічна інженерія значною мірою включає проектування, вдосконалення та обслуговування процесів, що включають хімічні або біологічні перетворення для великомасштабного виробництва. Інженери-хіміки гарантують, що процеси працюють безпечно, стійко та економічно. Складні промислові процеси, такі як хімічні реактори, теплообмінники, електродегідратори та інші важко контролювати автоматично [4].

Основна структура системи керування процесом складається з таких компонентів, як елемент керування, датчики, контролер і процес або установка. Кожен компонент вносить свій внесок у стабільність системи управління; але контролер є єдиним компонентом, який можна модифікувати для отримання кращої стабільності. Таким чином, надзвичайно важливо, щоб стабільність компонента контролера була на високому рівні для досягнення стабільності системи.

Системи контролю підігріву нафти є одними з тих систем, які не дозволяють контролювати їх за допомогою звичайних методів. Це пояснюється тим, що існує дефіцит числових даних щодо вхідно-вихідних відносин системи керування [5].

Щоб отримати максимальну продуктивність і ефективність від підігріву або замкнутої системи, контролер повинен точно регулювати витрату потоку. У результаті контролер повинен бути здатний швидко реагувати на сильні коливання навантаження, швидко відновлюватись після екстремальних коливань навантаження та стабільно працювати під час змін параметрів системи. Ефективність контролера зазвичай вимірюється з точки зору його здатності підтримувати змінну процесу близькою до ідеальної заданої точки. Таким чином, це безпосередньо пов'язано з оптимізацією значень перехідних параметрів замкнутого циклу, таких як час наростання (T_r), час встановлення (T_s), час затримки (T_d) і перерегулювання (M_p). Підвищення ефективності цих контролерів може призвести не тільки до підвищення якості, але й до значної економії витрат і енергії протягом терміну їх експлуатації. У результаті протягом багатьох років було створено кілька контролерів, щоб краще керувати продуктивністю системи. Звичайні контролери та адаптивні контролери — це два типи контролерів, які можна розділити на широкі категорії.

Особливу увагу слід звернути на процесу контролю температури, які критично важливі у нафтопереробці. Контроль температури в процесу знесолення нафти вимагає високої точності, оскільки неправильний температурний режим може призвести до поганого розділення фракцій і погіршення ефективності процесу. Одним з ключових етапів є початковий підігрів нафти в установці ЕЛОУ-АВТ. Нагрівання нафти до певної температури дозволяє знизити в'язкість і поліпшити процес відділення води і солей, що вкрай важливо для подальшої переробки, а також враховує фінансовий аспект, що дозволить заощадити кошти у процесі автоматизації.

Аналіз попередніх досліджень. Загальною науковою проблемою, яку розглядає дана робота, є всебічний аналіз існуючих систем керування технологічним режимом. Детальне вивчення попередніх підходів та прикладів реалізації, їхніх переваг і недоліків, надає можливість не лише оцінити поточний стан технологій, а й визначити напрямки для подальшого вдосконалення.

1. Звичайні контролери

Звичайні контролери — це контролери, призначені для керування процесами з лінійною поведінкою. Отже, вони керуються лінійними диференціальними рівняннями. Система описана математично та сформульовані відповідні припущення та наближення. Це робиться для того, щоб система була реалістично охарактеризована математичною моделлю. Прикладами кількох лінійних регуляторів є P (пропорційний), PI (пропорційно-інтегральний) і PID (пропорційно-інтегрально-похідний) регулятори.

1.1. Пропорційні контролери

Пропорційний регулятор, як показано на рисунку 1 — це лінійна система керування зі зворотним зв'язком, яка є складнішою за просту систему керування «вмикання-вимикання», але її легше зрозуміти, ніж ПІД-регулятор. Динаміку замкнутого контуру можна змінити шляхом зміни коефіцієнта посилення регулятора K_r . Діапазон пропорційності визначається як зміна вхідного сигналу, виражена у відсотках діапазону, який необхідний для переміщення контрольованого виходу від 0 відсотків до 100 відсотків. Оскільки менша пропорційна смуга створює більшу зміну вихідного сигналу для даного відхилення, вона також підвищує сприйнятливості продуктивності керування до коливань. Водночас вузька смуга пропорційності призводить до меншого зсуву. Цей контролер потребує зміщення або ручного скидання, якщо використовується окремо. Це тому, що він ніколи не досягає стаціонарного стану. Він забезпечує стабільну роботу, але завжди підтримує стабільну помилку. Швидкість відповіді збільшується, коли пропорційна константа K_c збільшується. Якщо помилка перевищує певне порогове значення, простого пропорційного регулятора недостатньо для обробки помилки. Автори [5] у контексті систем із двома входами та двома виходами (ТІТО) із затримками часу ідентифікували набір стабілізуючих областей як для пропорційного (P), так і для пропорційно-інтегрального (PI) регуляторів. Спочатку був спроектований роз'єднувач, а потім серія кроків для встановлення стабілізаційних областей для кожної роз'єднаної підсистеми з урахуванням максимальної затримки в кожному каналі. Поєднання роз'єднувача з розробленими каналними контролерами призводить до створення набору стабілізуючих контролерів для заводу ТІТО. Відповіді блоку кроку для розробленої системи замкнутого циклу з кількома затримками демонструють, що, як і очікувалося, P-регулятори створюють значно велику помилку стаціонарного стану у відгуку кроку. Цю помилку можна усунути шляхом впровадження інтегральної дії, як це видно в ПІ-регуляторах. Крім того, перехідну реакцію системи можна покращити шляхом вибору відповідних параметрів контролера із стабілізуючого набору. Висновки також можуть бути поширені на моделі квадратичних функцій передачі більшої розмірності

(МІМО). Однак автори зосереджуються виключно на теоремі Ерміта-Білера та пов'язаних з нею методах розробки стабілізуючих контролерів у системах ТІТО з кількома затримками, хоча й є цінною, може обмежити її застосування до більш широкого діапазону промислових процесів. Крім того, відсутність урахування показників продуктивності, таких як надійність і усунення збурень, викликає занепокоєння щодо ефективності запропонованих контролерів у реальних сценаріях. Крім того, обговорювані методології спеціально розроблені для лінійних систем, що змінюються в часі, що потенційно обмежує їх ефективність у нелінійних або змінних у часі промислових процесах.

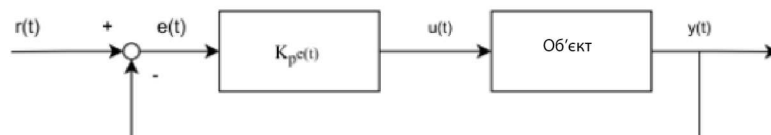


Рис. 1 – Структура Р-регулятора

1.2. ПІ контролери

Одним із найбільш часто використовуваних регуляторів у замкнутих системах є пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор. Це лінійний контролер, який поєднує в собі властивості як Р, так і І контролерів і має алгоритм, який пропонує баланс складності та потужності [7]. Загальна продуктивність системи залежить від пропорційного посилення K_p та інтегрального посилення K_i . Час наростання системи буде зменшено на K_p , що дозволить швидко реагувати в ситуаціях коливання навантаження. K_i зменшує похибку сталого стану, накопичуючи помилки з часом. Замість того, щоб розглядати поточну величину помилки, компонент інтегрального керування оцінює всю інтегральну суму помилки. Щоб отримати загальний вихід ПІ-регулятора, це значення додається до пропорційного члена алгоритму керування. Конг та інші дослідили багато підходів до різних систем керування, одним із яких був ПІ-регулятор [8]. У роботі [9] автори запропонували новий метод налаштування пропорційно-інтегральних (ПІ) контролерів з використанням експериментальних даних, отриманих під час ступінчастого випробування відкритого циклу. Ключовою перевагою цього підходу є його гнучкість, що дозволяє користувачам вибирати бажану надійність (за допомогою функції чутливості, M_s) і точно налаштувати контролери, щоб збалансувати продуктивність (мінімізуючи інтеграл абсолютної похибки, ІАЕ) і посилення шуму. Цей метод особливо ефективний для стабільних систем без коливань і пропонує більшу точність для систем із затримкою або домінантною затримкою, як показано на рисунку 2. Однак метод має обмеження. Це менш ефективно для систем без мінімальної фази, в результаті чого контролери менш надійні, ніж очікувалося. Крім того, хоча цей підхід є точним для широкого діапазону систем, він не поширюється на ПІД-регулятори, обмежуючи його застосування в сценаріях, які вимагають складніших стратегій керування. Покладення на певний набір рівнянь налаштування, адаптованих до моделей третього порядку із затримкою часу, також обмежує його узагальнення для інших типів систем. Необхідні подальші дослідження, щоб усунути ці обмеження та розширити застосовність методу до більш широкого діапазону сценаріїв контролю. Також у дослідженні [10] використовували ПІ-регулятор з налаштуванням лінійних матричних нерівностей (LMI) для керування зрошувальними каналами. Дослідження оцінює три різні методи LMI, класифікуючи їх на основі ефективності, причому метод LMI 3 виявляється найефективнішим, за ним йде метод LMI 1 і, нарешті, метод LMI 2. Аналіз показує, що хоча метод LMI 3 забезпечує найкращу загальну продуктивність, включно з високою точністю керування та меншою вразливістю, він дещо втрачає на часі відновлення. Однак у статті не розглядаються обмеження методів, такі як складність реалізації або вимоги до обчислень для процесу налаштування на основі LMI.

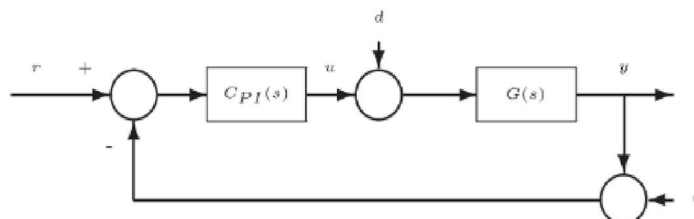


Рис. 2 – Структура ПІ-регулятора

1.3. ПІД контролер

ПІД-регулювання є найбільш широко використовуваним методом усунення помилок у промисловості. Більшість контролерів тут є або PID, або будь-яким із його модифікованих варіантів. Як наслідок, він становить 95% усіх контролерів, що використовуються в промислових цілях. Він містить усю необхідну динаміку: відповідну дію всередині області помилки керування для усунення коливань (режим P), усунення зсуву, приведення помилки до нуля та PV до заданого значення, а також швидку реакцію залежно від швидкості зміни помилки (режим D). Додавання похідного режиму означає, що час реакції установки та загальна стабільність покращаються. Він використовується для прогнозування майбутньої поведінки сигналу помилки на основі швидкості зміни помилки, оскільки він є похідною від пропорційної дії. Рівняння (1) ілюструє математичний опис контролера:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} + K_f \frac{de}{dt} \quad (1)$$

де $u(t)$ – змінна регулювання ПІД, K_p пропорційний коефіцієнт посилення, $e(t)$ значення похибки, K_i інтегральний коефіцієнт посилення, de зміна значення помилки, dt зміна в часі. Зміни в цих константах пропорційності впливають на установку в різному ступені, і, отже, ПІД-регулятори піддаються налаштуванню, коли константи пропорційності змінюються відповідно до вимог. Тому були сформульовані різні типи методів налаштування ПІД-регуляторів, які можна класифікувати на класичні та обчислювальні типи, а потім якийсь компонент процесу виділяється аналітично або візуально, який потім використовується для вибору налаштувань контролера. Будучи ранніми ітераціями, ці підходи є як обчислювальні, так і ефективні. Двома такими класичними техніками є Циглера-Ніколса та Коена-Куна.

1.3.1. PID – Циглер Ніколс. Джон Циглер і Натаніель Ніколс [11] запропонували та сформулювали цю техніку налаштування, яка є, безумовно, найпопулярнішою. Для початку всі три підсилення встановлюються на нуль. Потім K_p поступово збільшується, поки система не почне стабільно коливатися. Кінцевий коефіцієнт посилення тоді називається K_u . Підсилення P, I та D потім встановлюються за допомогою K_u та періоду коливань T_u . Martasia та Setiyono роботи [12] використали метод у розробці системи для фракціонатора важкої нафти. Він успішно досягає та підтримує нові задані значення, досягаючи значень IAE 31,06 та 6,13 для композицій верхньої та бічної кінцевих точок відповідно та 0,04 для температури дефлегмації знизу. На припущеннях ПІД-регулятора Ніколс зробив методіку налаштування. Початкові налаштування можуть негативно впливати на процес, вони призводять до надмірного перерегулювання та коливальної реакції, що вимагає додаткового налаштування. Параметри першого методу також важко оцінити в шумному середовищі [13].

1.3.2. PID – Коен Кун. Коен і Кун [14] розробили підхід, який використовував модель затримки першого порядку плюс мертвий час для визначення параметрів ПІД-регулятора, який зображено на рис. 3. Метод Коена-Куна налаштування контролера коригує повільну реакцію в стаціонарному стані, що забезпечується методом Циглера Ніколса, коли існує великий мертвий час (затримка процесу) відносно постійної часу відкритого циклу. Для того, щоб цей метод був практичним, необхідна велика затримка процесу, оскільки в іншому випадку будуть передбачувані необгрунтовані прирости контролера. Цей підхід можна використовувати лише з моделями першого порядку із затримкою часу, оскільки контролер не реагує негайно на збурення (крокове збурення є прогресивним, а не миттєвим). Відмова від збурень навантаження була основною вимогою проектування. Передавальна функція установки визначається на основі кривої реакції процесу. Параметр ПІД-регулятора визначається за допомогою параметрів налаштування, які були отримані емпірично. Для кожного коефіцієнта підсилення ПІД-регулятора з кривої відгуку необхідно отримати загалом три такі параметри. Isdaryani порівнював метод з Циглера-Ніколса і зазначив про необхідність точних даних про систему керування, а також менший час наростання та менший час встановлення в порівнянні з методом Ніколса. [15]. Метод Коена-Куна класифікується як «офлайн» стратегія налаштування, яка вказує на те, що вихід спочатку стабілізується, а потім подають ступінчастий сигнал, який провокує перехідний процес системи. Після сигналу фіксують параметри системи та проводять налаштування часу затримки, часу наростання та інші характеристики за формулами Коена-Куна, щоб була можливість контролювати керування системи.

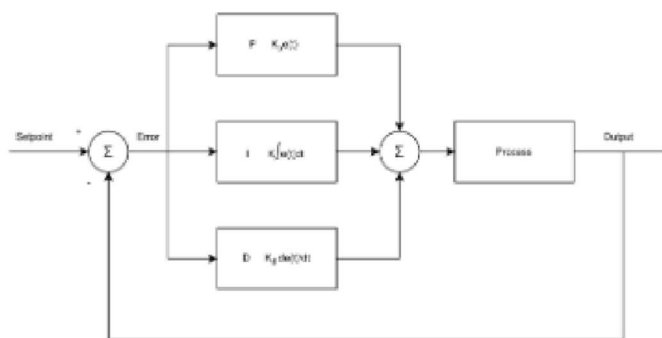


Рис. 3 – Структура PID-регулятора

2. Адаптивні контролери

Багато методів, заснованих на моделях, забезпечують досить добру стабільність і швидкість реакції за умови виконання припущень математичної моделі. Складний процес, з іншого боку, вимагає складного математичного аналізу, алгоритмів з плаваючою комою та складного розгалуження. Це робить впровадження математичних моделей трудомістким і виснажливим. Оскільки нелінійності в системі неможливо повністю відрегулювати, лінійний контролер буде нестабільним, якщо буде вище вимога до точності керування системою, що ускладнює налаштування параметрів контролера, який досить чутливий до шумових сигналів [16]. Крім того, якщо модель є погано визначеною або включає параметри, значення яких визначені лише частково, алгоритм, заснований на цій неповній інформації, не дасть задовільних результатів. Продуктивність або стабільність лінійного контролера погіршиться. Ця реальність вимагає використання підходів до керування, які певним чином включають у проект нелінійну динаміку. Нелінійності навмисно включені в частину системи керування, щоб можна було допускати невизначеності моделі, а адаптивні контролери призначені для обробки нелінійностей у дуже великих діапазонах роботи. Це контролер, який підлаштовується під поточний стан заводу.

2.1. Контролер Fuzzy Logic

Заде, фахівець з кібернетики, створив теорію нечітких множин у 1965 році як новий метод для опису, дослідження та розуміння нечітких явищ. Хоча традиційні ПІД-регулятори ефективні для простих лінійних систем, вони часто неефективні для нелінійних систем, систем вищого порядку, систем із затримкою в часі, систем, що змінюються в часі тощо. Наприклад, складно розробити точну математичну модель, оскільки процеси промислового виробництва в реальному світі часто включають нелінійну невизначеність, що змінюється в часі. Тому в цьому випадку традиційний ПІД не може досягти бажаного ефекту. Для нечіткого ПІД-регулятора це усталена техніка інженерного керування, яка не надто ускладнює структуру керування, що впливає з того факту, що немає необхідності створювати точні математичні моделі. Таким чином, він може вирішити багато проблем у сучасній промисловій сфері або сфері автоматизованого керування. Алгоритм розроблено для вирішення проблем шляхом об'єднання всіх наявних фактів і прийняття найкращого рішення. Звичайна логіка має справу з твердженнями абсолютної істинності або булевими значеннями 0 і 1, тоді як нечітка логіка має справу з наборами, які мають суб'єктивні або відносні визначення та пов'язані зі ступенями істинності. Це намагається імітувати те, як люди думають про проблеми та приймають рішення, покладаючись на неоднозначні чи неточні цінності, а не на абсолютну істину чи брехню. Алгоритм складається з ряду правил ЯКЩО-ТО. Антецедент – це частина правила, яка містить опис стану процесу, тоді як консеквент – це частина правила, яка містить керуючу дію. База правил, з якої виводиться керуюча дія, складається з набору таких нечітких правил, викладених як умовні оператори. Тому цей метод також відомий як нечіткий висновок. Функції належності характеризують усі нечіткі множини. Двовимірною функцією належності (MF) характеризує нечітку множину типу 1 і усуває невизначеності, надаючи кожному елементу значення функції належності між [0,1]. Традиційні нечіткі контролери відносяться до 1 типу, як зображено на рисунку 4.

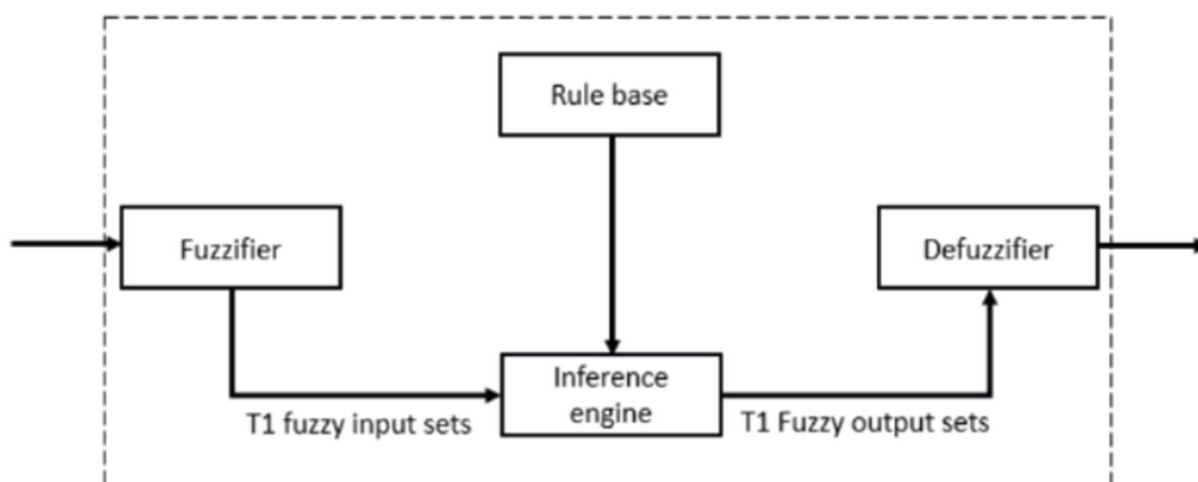


Рис. 4 – Fuzzy регулятор 1-го типу

Концепція нечіткої множини типу 2 була введена професором Заде як розширення концепції звичайної нечіткої множини [17]. Система нечіткої логіки (FLS), описана за допомогою принаймні одного нечіткого набору типу 2, називається FLS типу 2. FLS типу 1 не можуть безпосередньо обробляти невизначеності правил, оскільки вони використовують нечіткі набори типу 1, які є певними. З іншого боку, FLS типу 2 дуже корисні в обставинах, коли важко визначити точну функцію належності, а вимірювання невизначеностей є складним або навіть неможливим. Структура 2 типу зображена на рисунку 5.

Агуіар у роботі провів порівняльний аналіз нечітких контролерів типу 1 і типу 2. дослідження демонструє критичну роль чітко визначених правил і функцій належності в роботі нечітких систем керування. Дослідження вказує, що вдалося досягти зменшення часу наростання на 13 % і часу встановлення на 12 % порівняно з ПД-регулятором, а також показують, що нечіткий контролер типу 1 може забезпечити оптимальну продуктивність системи, коли ці елементи точно визначені. Однак, коли стикаються з погано визначеними правилами або функціями належності, нечіткий контролер типу 2, з його здатністю керувати невизначеністю за допомогою сліду невизначеності (FOU), значно перевершує контролер типу 1. Ця перевага особливо очевидна в сценаріях, де присутні зовнішні перешкоди, а знання дизайнера обмежені. Дослідження підкреслює важливість використання нечітких контролерів типу 2 у додатках, які вимагають підвищеної стійкості та надійності, особливо при роботі з невизначеністю або неповною інформацією. Ефективно вирішуючи ці проблеми, нечіткі контролери типу 2 пропонують більш міцне та надійне рішення, що покращує загальну продуктивність системи [18].

Таоуан та Рінг [19] розширив нечіткий контролер типу 1 до нечіткого контролера інтервального типу 2 та розробили ефективну систему контролю рівня води з двома резервуарами. Результати моделювання підтвердили ефективність методу нечіткого керування інтервальним типом 2, але без перевірки контролю та стійкості запропонованої системи керування в замкнутому циклі. Агауїо у своїй роботі підкреслює практичну здійсненність впровадження нечіткого контролера типу 2 за допомогою відносно простих кроків [20]. Нечіткий контролер типу 2 продемонстрував надійність за наявності шуму з мінімальним впливом на криву відгуку та лише незначними відхиленнями в стаціонарних характеристиках. Незначне збільшення похибки в стаціонарному стані та граничний зсув у часі стабільності за шумових умов свідчить про те, що нечіткий контролер типу 2 ефективно підтримує продуктивність системи, незважаючи на зовнішні перешкоди. Однак дослідження також виявило обмеження нечіткого контролера типу 2, коли він реалізований з одиночними виходами, що призводить до повільної реакції в динамічних умовах. Ця повільна реакція стає особливо очевидною, коли система зазнає збоїв, коли контролер компенсує лише 30 % збурень протягом 10 секунд. Таким чином, хоча нечіткий контролер типу 2 демонструє стійкість до шуму, його застосування може бути менш сприятливим у системах із частими порушеннями або де швидке реагування є критичним.

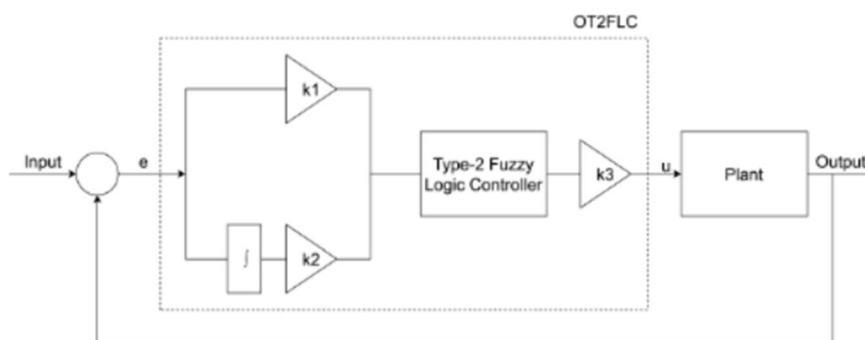


Рис. 5 – Структура OT2FLC

2.2. Нечіткий PI контролер

Пропорційно-інтегральна (PI) схема керування все ще є хорошим способом розробки системи керування зі зворотним зв'язком [21]. PI-регулятори часто є простими та обмежені математичним описом поточної операції. За наявності суттєвих перехідних змін зручніше покращити поточний підхід PI, а не будувати абсолютно нову складну математичну модель для динамічного процесу. Таким чином, експертні бази нечітких правил функціонують як таблиці пошуку для контролера, щоб планувати свої прибутки.

Основна мета розробки контролера полягає в досягненні продуктивності керування з точки зору стабільності та надійності для змін заданої точки та збурень навантаження. Paramasivam і Agumugam [22] запропонували різні методи проектування гібридної структури управління з використанням системи нечіткої логіки.

Suresh і Srinivas використали ПІ-регулятор з нечіткою логікою, що за допомогою контролера нечіткої логіки отримані результати ближчі до еталонних значень, зображеному на рисунку 6 [23]. Так само Modabbernia та інші у роботі [24] розглянули проектування контролерів за допомогою надійних алгоритмів оптимізації для системи AVR. Також порівняння контролера Fuzzy-PI із звичайним контролером PI продемонструвало зменшення часу встановлення на 37,5% і покращення зменшення помилок на 71,3%.

У статті [25] автор представив успішну реалізацію нечіткого PI-регулятора для керування швидкістю синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM). Запропонована система керування об'єднує контролер контуру швидкості, який використовує підхід нечіткого PI, і контролер контуру струму, що включає векторне керування та просторову векторну широтно-імпульсну модуляцію (SVPWM). Завдяки моделюванню та експериментальному тестуванню дослідження підтверджують здатність контролера підтримувати стабільну швидкість PMSM навіть за змінних умов навантаження.

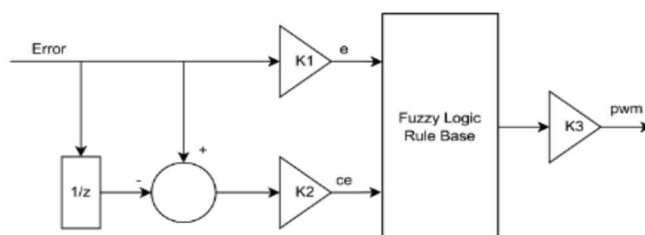


Рис. 6 – Структура Fuzzy-PI регулятора

2.3. Нечіткий ПІД-регулятор

Хоча традиційні ПІД-регулятори ефективні для простих лінійних систем, вони часто неефективні для нелінійних систем, систем вищого порядку, систем із затримкою в часі, систем, що змінюються в часі тощо. Наприклад, складно розробити точну математичну модель, оскільки процеси промислового виробництва в реальному світі часто включають нелінійну невизначеність, що змінюється в часі. Тому в цьому випадку традиційний ПІД не може досягти бажаного ефекту.

Архітектура нечіткого ПІД-регулятора наведена на рисунку 7. Згідно з цим рисунком, система нечіткого висновку (FIS) використовується для налаштування всіх трьох параметрів ПІД. Вхідними даними нечіткого висновку є помилка та швидкість зміни помилки. На виході нечіткого висновку є три параметри: K_p , K_i , K_d . Значення входів і виходів не є точними, вони нечіткі. Більш того, вони пов'язані з досвідом ручного налаштування ПІД-регулятора. Нечіткі ПІД-регулятори широко використовуються сьогодні, і методи нечіткого керування застосовуються до різноманітних ПІД-регуляторів.

Через свою простоту, довговічність, надійність і легкість налаштування параметрів ПІД-регулятор використовується в різних технічних областях [26]. Різкі зміни заданого значення та варіації параметрів, які, як було доведено, спричиняють погану реакцію ПІД-регулювання, є проблемою, з якою стикається техніка ПІД-регулювання. Удосконалені підходи до управління, такі як керування змінною структурою, нечітке керування та нейронні мережі, можуть потенційно подолати цю проблему. Автори в роботі [27] проілюстрували новий підхід до систем ПІД-регулювання шляхом розрахунку температурою інкубатора. Їх система значно підвищує точність і швидкість завдяки включенню швидкості потоку рідини та коефіцієнта теплопередачі в свою математичну модель. У роботі відзначено, що час підйому для системи з нечітким PID-регулятором складає 2,15 секунд, тоді як для звичайного PID-регулятора цей показник дорівнює 4,07 секунд. Що стосується часу встановлення, то для нечіткого PID-регулятора він становить 4,26 секунд, в той час як для традиційного регулятора – 12,89 секунд. Перерегулювання у випадку нечіткого PID-регулятора дорівнює 1,97%, тоді як для звичайного PID-регулятора цей показник складає 6,43%. Крім того, використання цифрових фільтрів для зменшення випадкових похибок вимірювання підвищує стабільність і надійність системи ПІД-регулювання. У документі бракує досліджень, які демонструють ефективність у реальному світі. Більшість наведених прикладів залишаються в аспекті промислового контролю та не враховують потреби використання побутового середовища. Конструкція більш складна, а вартість висока, що не сприяє широкому застосуванню. Крім того, основна увага до ПІД-регуляторів може не враховувати альтернативні методи керування, які можуть бути більш ефективними в певних сценаріях. Нарешті, зовнішні фактори, такі як умови навколишнього середовища та зношеність системи, недостатньо враховані, що потенційно може вплинути на загальну продуктивність системи. У роботах [28, 29] було розроблено стратегію управління на основі простих правил налаштування для FF-компенсаторів, яка була протестована в реальній теплиці для контролю внутрішньої температури повітря з використанням системи природної вентиляції. Основна мета роботи полягає у пропозиції простого, але ефективного схеми управління для складного нелінійного процесу, такого як мікроклімат всередині теплиці. Дослідники ефективно досягли мети контролювати певну температуру навколишнього середовища за допомогою прямого керування з певним перерегулюванням, але це не вирішило проблему контролю температури води на виході. Більше того, з точки зору споживання енергії дослідники розробили комбіновану систему опалення з сонячними тепловими насосами для гарячої води та повітря та керованою даними системою керування розкладом електричного водонагрівача. Ця соціальна взаємодія ефективно економить енергію та зменшує відходи. Але проблема полягає в тому, що вдосконалення процесу нагрівання не може вирішити проблему великої затримки температури води.

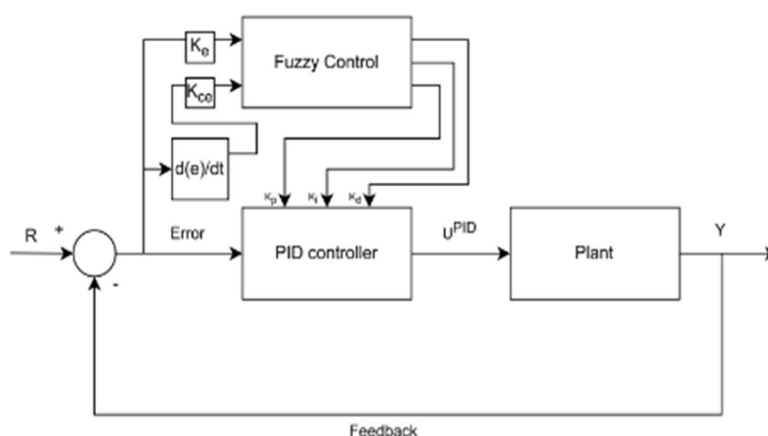


Рис. 7 – Структура Fuzzy-PID регулятора

2.4. Контролер ANFIS

У деяких складних ситуаціях область функцій приналежності нечіткої логіки важко сформулювати вручну [30]. Цю проблему вирішує система адаптивного нейронечіткого висновку (ANFIS), метод на основі ШІ. Це поєднання штучних нейронних мереж і нечітких систем, які використовують можливості навчання. Це генерує нечіткі правила IF THEN з відповідними функціями належності, отриманими з навчальних пар. ANFIS має переваги у порівнянні із адаптивним контролером, налаштувавши посилення мертвого ритму, автор [31] порівнював ПІ-контролер та ANFIS і зазначив, що продуктивність контролера ANFIS є кращою при обробці повільних реакцій процесу, і немає перерегулювання під час тестування зі зміною заданого значення. Однак немає порівняння з іншими типами контролерів та обґрунтування вибору регулятора. У роботі [32] автори зазначили, що контролер (ANFIS) перевершує як ПІД-регулятори, так і регулятори нечіткої логіки. Однак, його складність і потреба в самоналаштуванні ускладнюють його впровадження, особливо в існуючих системах HVAC. Контролери вимагають точних початкових даних для оптимальної продуктивності, які не завжди можуть бути доступними, що призводить до потенційних проблем із надійністю.

У роботі [33] був представлений ретельний аналіз оптимізації температури в теплообмінниках з використанням комбінації експериментальних даних і моделювання ANFIS, який зображено на рисунку 8. Хоча дослідження робить значний внесок, є кілька сфер, де його можна вдосконалити або розширити. У статті представлені детальні експериментальні процедури, але в ній відсутній критичний аналіз обмежень конструкції. Зокрема, розмір вибірки, який використовувався в експериментах, не обговорюється, що викликає занепокоєння щодо статистичної значущості та можливості випадкової варіації результатів. Крім того, хоча дослідження контролює різні експериментальні параметри, воно не стосується того, чи всі відповідні змінні були належним чином контрольовані, що може вплинути на надійність результатів. Наведено порівняння між результатами експерименту та прогнозами ANFIS, але немає критичного аналізу. У статті недостатньо розглядається ризик переобладнання в моделі ANFIS або не надається детальне обговорення точності прогнозів моделі. Цей недогляд обмежує розуміння читачем ефективності моделі та її надійності в різних сценаріях.

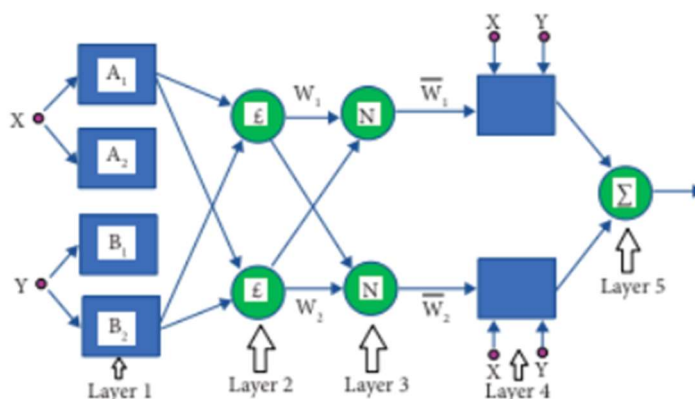


Рис. 8 – Структура ANFIS моделі

2.5. Контролер на основі генетичного алгоритму

Алгоритми пошуку, засновані на біологічній еволюції, такі як генетичні алгоритми (GA), перетинають простір пошуку у спосіб, аналогічний природній еволюції [34]. Звичайний генетичний алгоритм виглядає наступним чином, використовуючи блок-схему, показано на рисунку 9. Спочатку випадкові рішення вибираються серед знайдених у просторі пошуку, щоб служити початковими рішеннями. Функція відповідності використовується для вибору відсотка рішень для розведення наступного покоління рішень на кожній ітерації. Вибір базується на функції придатності (імовірніше, будуть обрані кращі рішення). Для прийняття остаточного рішення використовується імовірнісний аналіз. Вибір рішень пов'язується разом, і подальше покоління рішень формується з використанням підходів кросинговеру та мутації. Коли задані критерії завершення (такі як час або точність) виконуються ітерації завершуються, і процес завершується. Reddy та Balaji у роботі [35] використовували GA для покращення продуктивності ПІД-контролера, який

використовується для контролю температури в кожухотрубному теплообміннику. У статті висвітлюються переваги поєднання нечіткої логіки з ПІД-регулюванням. Ця комбінація використовує сильні сторони обох методів — високу стабільну продуктивність ПІД і чудову динамічну реакцію нечіткої логіки. Ця інтеграція особливо корисна в системах, які вимагають як точності, так і адаптивності. Порівняно з іншими алгоритмами, GA показав дуже хороші результати щодо перерегулювання та усунення завад, а також запасів посилення та фази. Показано, що запропонований контролер GA-PID зменшує перевищення піку та час встановлення, які є критично важливими показниками продуктивності в системах керування. Стаття містить конкретні кількісні покращення, такі як зменшення пікового перевищення з 3,54 % до 3,22 % і зменшення часу встановлення з 74 секунд до 65 секунд. Ці вдосконалення підтверджують ефективність підходу GA-PID. Незважаючи на переваги контролера GA-PID, визнається складність впровадження таких передових методів керування. Процес оптимізації констант налаштування та інтеграції нечіткої логіки з ПІД-регулюванням є складним, особливо для нелінійних систем, де продуктивність може бути не настільки надійною в процесі керування. У той час як GA-PID є перспективним у покращенні продуктивності лінійних систем, його ефективність у нелінійних системах менш очевидна. Це обмеження може обмежити застосовність результатів у реальних промислових умовах, де нелінійність є звичайним явищем. Відсутність експериментальних даних з реальних промислових процесів викликає питання щодо практичної здійсненності запропонованого методу.

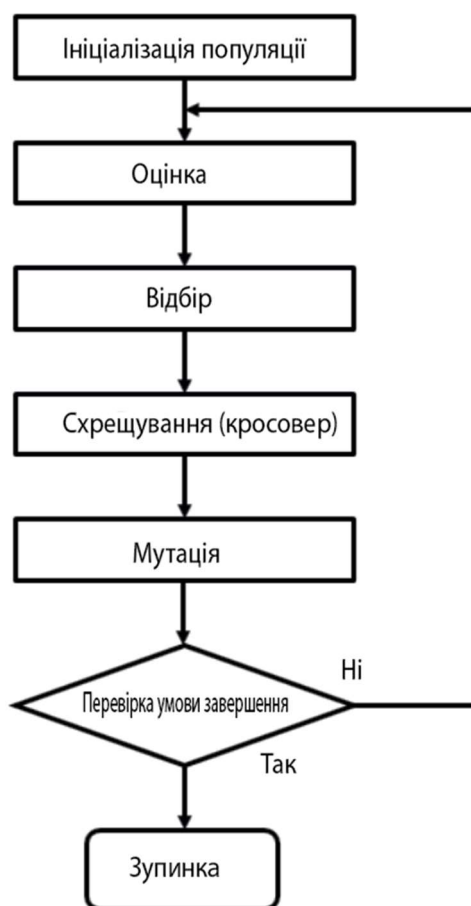


Рис. 9 – Блок-схема генетичного алгоритму

2.6. Контролер на основі оптимізації роїв частинок

Розроблена в 1995 році Еберхартом і Кеннеді оптимізація роєм частинок (PSO) є відносно новим підходом до оптимізації, який існує вже деякий час. У цій моделі існує нескінченна популяція частинок, і вони поширюються в просторі рішень у пошуках оптимального рішення. PSO надихається соціальною

поведінкою тварин і включає частинки, що представляють можливі набори параметрів, які потребують оптимізації. Кожна частинка коригує своє положення на основі власного досвіду та досвіду сусідів. Мета полягає в тому, щоб знайти найкраще рішення, яке називається «функцією придатності», за допомогою кооперативної ройової поведінки. В алгоритмі PSO частинки ініціалізуються випадковими позиціями та швидкостями. Вони адаптують свої шляхи до найкращої позиції, знайденої на даний момент (pbest) і глобальної найкращої позиції (gbest). Фітнес-функція оцінює продуктивність кожної частинки, що веде до оптимізованого рішення. Автори у роботі [36] розробили систему на основі PSO, що показала коротший час встановлення та наростання з меншим перевищенням порівняно з системою на основі ІМС. Хоча контролер на основі PSO працює краще, ніж ІМС, у обробці перешкод, все ще існують обмеження щодо того, наскільки ефективно система може керувати великими чи неочікуваними зовнішніми перешкодами. Навіть з оптимізацією відхилення завод може бути не ідеальним. У галузях із високодинамічним середовищем недосконале усунення збоїв може призвести до технічних проблем на виробництві та ризиків для безпеки, особливо в критичних системах, таких як хімічні чи нафтопереробні підприємства. Початкове випадкове розміщення частинок у PSO іноді може призвести до неоптимальної конвергенції, особливо якщо випадкова ініціалізація недостатньо охоплює простір пошуку. Ця випадковість може спричинити збіжність алгоритму на локальних мінімумах замість глобального оптимуму. Автори [37] розробили методику налаштування ПІ-регулятора, яка базується на метаевристичному алгоритмі оптимізації. Використання вдосконаленої методики оптимізації MEPSO дозволило знайти коефіцієнти ПІ-регулятора для п'яти еталонних передавальних функцій. У проведених дослідженнях в якості критерію використали зважену суму середньої інтегральної похибки. Однак багато методів оптимізації, включаючи оптимізацію роєм частинок (PSO), було застосовано для налаштування контролерів ПІ, більшість наукових робіт зосереджено на оптимізації за одним критерієм. Огляд зосереджений на проблемах керування котлотурбінними системами, описуючи їх як складні нелінійні системи з декількома входами та виходами (МІМО) із широкими робочими діапазонами. Методи лінеаризації, такі як модель Белла та Астрьома, спрощують модель, але можуть не охопити всю складність операцій у реальному світі. Автори не зазначають про потенційні проблеми в процесі використання PSO, а саме складність розширених методів контролю: такі методи, як PSO, APSO та IAPSO, вимагають ретельного налаштування та можуть мати проблеми з локальними мінімумами, хаотичною поведінкою та високою чутливістю до змін параметрів. Контроль рівня води в барабані є ключовим завданням через його інтеграційний характер, що призводить до складної поведінки керування. Базовим контролером, таким як PID, може бути важко підтримувати стабільний рівень без відхилень, тому процес налаштування є критичним. Розробка та застосування адаптивних контролерів, які можуть регулювати параметри в режимі реального часу, щоб впоратися зі змінами в поведінці системи, такими як зміна рівня води в барабані та коливання потреб у електроенергії є доцільнішою.

Стаття [38] демонструє, що інтеграція вдосконаленого адаптивного генетичного алгоритму (AGA) для налаштування параметрів ПІД-регулятора значно покращує динамічну продуктивність системи та точність у стаціонарному режимі. AGA перевершує традиційні методи та стандартні генетичні алгоритми, усуваючи їх обмеження та забезпечуючи більш ефективну та точну оптимізацію параметрів. Результати підтверджують ефективність AGA у практичних застосуваннях, пропонуючи його як життєздатний підхід для оптимізації систем ПІД-регулювання в автоматизованих процесах. Також вказано, що перевищення ступінчастої характеристики з традиційним алгоритмом ПІД-регулювання вручну є помітно великим. Незважаючи на те, що ступінчаста характеристика, отримана за допомогою налаштування параметрів PID на основі GA, демонструє менший викид порівняно з ручним налаштуванням, вона має більший піковий час. Навпаки, ступінчаста характеристика, заснована на налаштуванні параметрів ПІД-регулятора AGA, демонструє чудову продуктивність з точки зору часу налаштування, пікового часу та перерегулювання, що робить його найефективнішим серед трьох методів.

Методи PSO, GA та DE продемонстрували кращі результати порівняно з традиційним методом налаштування у роботі [39]. Однак найкращі результати були отримані за допомогою алгоритму рою частинок (PSO). Він показав найбільш стабільні та точні параметри для всіх розглянутих функцій витрат, забезпечуючи кращі показники з мінімізації помилки та покращення продуктивності системи.

Метою роботи є аналіз поточних рішень систем автоматизації в контексті керування технологічним режимом процесу нафтопереробки, з акцентом на системи, які здатні адаптуватися до змін у параметрах процесу та автоматично переналаштовувати параметри контролера.

Виклад основного матеріалу. У теорії управління перехідна характеристика системи керування є частиною часової реакції, де ми спостерігаємо, як вхідний сигнал змінюється з часом. Це стан виходу при його переході від початкового стану до кінцевого. Таким чином, крива відгуку характеризується кількома важливими параметрами. Час наростання (t_r) — це час, необхідний для переходу сигналу від низького значення до високого. Час встановлення (t_s) — це час, необхідний для того, щоб сигнал досяг і залишався в заданому допустимому діапазоні помилок. Перевищення (M_p) - це сигнал, що перевищує визначене кінцеве значення сталого стану. Пропорційні контролери реагують на величину помилки процесу, забезпечуючи вихідний сигнал приводу, кратний помилці. Збільшення підсилення K_p зменшує похибку сталого стану, але створює перерегулювання. Через нездатність контролера виправляти помилки в процесах вищого порядку було визначено, що базове пропорційне керування неефективне для практичного використання. Щоб досягти реалістичних реалізацій, інтегральний коефіцієнт підсилення K_i включено в PI-регулятори, щоб уникнути довгострокових помилок і зсуву. Інтегральне керування режимом значно зменшило час наростання та встановлення порівняно з ШПМ-регулюванням. Але було визначено, що додавання інтегрального режиму мало негативний вплив на час відгуку системи та загальну стабільність. У результаті PI-контролер не може збільшити швидкість відгуку та часто працює мляво, оскільки йому не вистачає здатності передбачити, що станеться найближчим часом. Він не може мінімізувати час реакції. Таким чином, PI-регулятор підходить для промислових процесів, у яких час реакції не є проблемою, під час роботи присутні великі перешкоди та шум. Це також добре застосовується лише тоді, коли в системі є транспортні затримки, і коли швидкість не є проблемою.

Отже, у ПІД-регуляторах додається похідний коефіцієнт підсилення K_d , який діє як демпфер зусилля керування. У той час як встановлено, що ПІ-регулятор зменшує час наростання краще, ніж ПІД-регулятор, ПІД-регулятор має більш швидкий загальний час встановлення через зменшення коливань. ПІД-регулятор є дуже надійним алгоритмом керування, оскільки всі три коефіцієнти підсилення компенсують недоліки, наявні в інших коефіцієнтах підсилення. Тому точне налаштування цих посилень стає вирішальним. Дві найпопулярніші техніки тюнінгу, які використовуються, це Циглер-Нікольс і Коен-Кун. Згідно з дослідженнями системи для фракціонатора важкої нафти [12], налаштований ПІД-контролер спростив керування та забезпечив ефективно регулювання на задані значення. Помітним недоліком налаштування методом Коена-Куна є те, що його можна реально реалізувати лише на процесах першого порядку з великими затримками транспортування. У той час як контролер Циглера виявився більш точним, його налаштування вимагає навмисного порушення стану установки, що може бути неможливим для делікатних операцій. Щоб компенсувати нелінійні нестабільні стани установки, контролери Fuzzy Logic були розроблені з нечіткими наборами типу 1. Виявилось, що бази правил досить ефективно коригують параметричні коливання, а відсутність складного математичного моделювання полегшує їх застосування. За мінливих умов Fuzzy Logic Controller вдалося досягти зменшення часу наростання на 13 % і часу встановлення на 12 % порівняно з ПІД-регулятором [18]. Для подальшого вдосконалення функцій приналежності системи нечіткого висновку нечіткі набори типу 2. Однак, коли стикаються з погано визначеними правилами або функціями належності, нечіткий контролер типу 2, з його здатністю керувати невизначеністю за допомогою сліду невизначеності (FOU), значно перевершує контролер типу 1. Ця перевага особливо очевидна в сценаріях, де присутні зовнішні перешкоди, а знання обмежені. Дослідження підкреслює важливість використання нечітких контролерів типу 2 у додатках, які вимагають підвищеної стійкості та надійності, особливо при роботі з невизначеністю, а недоліком було те, що було важче побудувати функції належності з урахуванням невизначеності. Нечіткий контролер типу 2 продемонстрував надійність за наявності шуму з мінімальним впливом на криву відгуку та лише незначними відхиленнями в стаціонарних характеристиках. Незначне збільшення похибки в стаціонарному стані та граничний зсув у часі стабільності за шумових умов свідчить про те, що нечіткий контролер типу 2 ефективно підтримує продуктивність системи, незважаючи на зовнішні перешкоди. Однак дослідження також виявило обмеження нечіткого контролера типу 2, коли він реалізований з одиночними виходами, що призводить до повільної реакції в динамічних умовах. Ця повільна реакція стає особливо очевидною, коли система зазнає збоїв, коли контролер компенсує лише 30% збурень протягом 10 секунд.

Таким чином, хоча нечіткий контролер типу 2 демонструє стійкість до шуму, його застосування може бути менш сприятливим у системах із частими порушеннями або де швидке реагування є критичним. Тому для створення гібридних структур були представлені регулятори Fuzzy-PI, Fuzzy-PID, які поєднують переваги обох методів контролю. Порівняння контролера Fuzzy-PI із звичайним контролером PI продемонструвало

зменшення часу встановлення на 37,5 % і покращення зменшення помилок на 71,3 % [24]. У більшості випадків Fuzzy-PI достатньо хороший для керування процесом, і похідний термін використовується рідко через те, що він чутливий до шуму. Основним недоліком регулятора Fuzzy-PI порівняно з системою Fuzzy-PID є порівняно повільний відгук системи через відсутність похідного підсилення. Незважаючи на те, що було встановлено, що включення третього коефіцієнта підсилення в регулятор Fuzzy-PID забезпечує більшу гнучкість і стабільність FLC, регулятор Fuzzy-PID мав більше перерегулювання, але він мав значно менший час наростання та час встановлення та демонстрував якісне управління для складного нелінійного процесу, такого як мікроклімат всередині теплиці [28]. У роботі відзначено, що час підйому для системи з нечітким PID-регулятором складає 2,15 секунд, тоді як для звичайного PID-регулятора цей показник дорівнює 4,07 секунд. Що стосується часу встановлення, то для нечіткого PID-регулятора він становить 4,26 секунд, в той час як для традиційного регулятора – 12,89 секунд. Перерегулювання у випадку нечіткого PID-регулятора дорівнює 1,97 %, тоді як для звичайного PID-регулятора цей показник складає 6,43 % [27].

Головним недоліком нечітких ПД-регуляторів було те, що, хоча вони точні в обробці нелінійності, вони потребують великої кількості правил, які вимагають значного ручного налаштування. Оскільки це методом проб і помилок, це неможлива якість. Штучна мережа нейронів (ШМН) і зворотне розповсюдження використовувалися для моделювання баз правил і функцій членства в управлінні ANFIS. Використання лише навчальних даних спростило процедуру проектування. У роботі [32] автори зазначили, що контролер (ANFIS) перевершує як ПД-регулятори, так і регулятори нечіткої логіки. Однак, його складність і потреба в самоналаштуванні ускладнюють його впровадження, особливо в існуючих системах HVAC. Контролери вимагають точних початкових даних для оптимальної продуктивності, які не завжди можуть бути доступними, що призводить до потенційних проблем із надійністю [32]. Метаевристики, такі як генетичний алгоритм і оптимізація рою частинок, також зуміли забезпечити чудову ефективність керування системи. Використовували GA для покращення продуктивності ПД-контролера, який використовується для контролю температури в кожухотрубному теплообміннику [35]. У статті висвітлюються переваги поєднання нечіткої логіки з ПД-регулюванням. Ця комбінація об'єднує переваги обох методів: стабільну високу продуктивність PID-контролера та задовільну динамічну реакцію нечіткої логіки. Ця інтеграція особливо корисна в системах, які вимагають як точності, так і адаптивності. Порівняно з іншими алгоритмами, GA показав дуже хороші результати щодо перерегулювання та усунення завад, а також запасів посилення та фази. Показано, що запропонований контролер GA-PID зменшує перевищення піку та час встановлення, які є критично важливими показниками продуктивності в системах керування. Стаття містить конкретні кількісні покращення, такі як зменшення пікового перевищення з 3,54 % до 3,22 % і зменшення часу встановлення з 74 секунд до 65 секунд. Ці вдосконалення підтверджують ефективність підходу GA-PID [35]. Порівнюючи налаштування PSO з налаштуванням Циглера, реакція установки спостерігала суттєве перевищення стандартного ПД-регулятора, але вищу продуктивність було отримано з налаштуванням PSO-PID-регулятора. Це призвело до меншого перерегулювання та часу встановлення. ПД-регулятори, налаштовані на PSO, також продемонстрували кращу продуктивність порівняно з контролерами на основі GA. Також вказано, що перевищення ступінчастої характеристики з традиційним алгоритмом ПД-регулювання вручну є помітно великим. Незважаючи на те, що ступінчаста характеристика, отримана за допомогою налаштування параметрів PID на основі GA, демонструє менший викид порівняно з ручним налаштуванням, вона має більший піковий час [38]. Порівняння різних методів налаштування параметрів показало найкращі результати за допомогою алгоритму рою частинок (PSO). Система, керована ним, виявилася найефективнішою, що забезпечило найкращі показники та стабільність роботи системи [39].

5. Висновки

Ця стаття охоплює низку сучасних традиційних та адаптивних методів управління системами. Традиційні контролери, такі як ПД-регулятор, завдяки своїй надійності та ефективності, вже давно стали галузевим стандартом і керують більшістю процесів управління по всьому світу. Однак, оскільки ідеальних рішень не існує, завжди виникає потреба у вдосконаленні методів контролю. Сучасні адаптивні контролери розроблені для покращення продуктивності ПД-регуляторів шляхом інтеграції останніх технологічних досягнень, таких як нечітка логіка, нейронні мережі та метаевристичні методи. Для кожної з розглянутих стратегій контролю надано технічний вступ та огляд попередніх досліджень. Результати обговорено детально, щоб продемонструвати, як недоліки одного типу контролера стимулювали розробку іншого, підкреслюючи технологічні зміни. Вплив цих методів на продуктивність і практичну здійсненність також оцінено, щоб створити вичерпну довідку, яку можна використовувати в процесах нафтопереробки.

Список використаної літератури

1. Y. Song, K. Zhao, H. Ye. Control of Nonlinear Systems: Stability and Performance. New York: CRC Press, 2024. P. 306
2. F. Golnaraghi, B. Kuo. Automatic control systems. McGraw-Hill Education. McGraw-Hill Education, 2017. P.186
3. W. Guojun, C. Songqiao. An overview of the development of automatic control theory. Microcomputers and Applications, 2000. P.4-7
4. T. Hägglund, Process Control in Practice. Sweden: CPI books GmbH, 2023. P.207
5. F. Golnaraghi, B. Kuo. Advanced Chemical Process Control: Putting Theory into Practice. Germany: Wiley-VCH, 2023. P.368
6. Venkatesh M., Patra S., Ray G. Design of a set of stabilizing P and PI controllers for LTI TITO system with multiple time-delays. *International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*. 2022. Vol. 55, P.405-410. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.067>
7. Kossove E., Prabhu V., Abu-Ayyad M. PI Controller Research and Design. *Conference: Multi-Campus Research Experience for Undergraduate*. 2018. P.1-13. URL: <https://www.researchgate.net/publication/339292312>
8. Kong L., Yang Q., Chen R., Zhang Z., Li Y., Shi Y. Improved Proportional Integral (PI) controller for water level control in open channel systems: A case study of the Middle Route Project for South-to-North Water Transfer. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2024. Vol. 51. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101646>
9. Sanchis R. A new method for experimental tuning of PI controllers based on the step response. *ISA Transactions*. 2022. Vol. 128. P.329-342. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.09.008>
10. Arauz E., Maestre J., Tian X., Guan G. Design of PI Controllers for Irrigation Canals based on Linear Matrix Inequalities. *Water*. 2020. Vol. 12. P.855. URL: <https://doi.org/10.3390/w12030855>
11. Ziegler J., Nichols N. Optimum Settings for Automatic Controller Transaction of ASME. Vol. 64, P. 759-68. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4019264>
12. Martasia S., Setiyono B. Design of Auto-tuning Relay Feedback controller for Shell Heavy Oil Fractionator. *MATEC Web of Conferences*. 2018. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821802007>
13. Abbas A., Mustafa M. A review of adaptive tuning of PID-controller: Optimization techniques and applications. *Int. J. Nonlinear Anal*. 2024. Vol. 2, P.29–37. URL: <http://dx.doi.org/10.22075/ijnaa.2023.21415.4024>
14. Cohen G., Coon G. Theoretical considerations of retarded control Transactions of ASME. 1953. Vol. 75, pp. 827-34
15. Isdaryani F., Feriyonika F, Ferdiansyah R. Comparison of Ziegler-Nichols and Cohen Coon tuning method for magnetic levitation control system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1450, P.1–11. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1450/1/012033>
16. O. Castillo, P. Melin. Soft Computing for Control of Non-Linear Dynamical Systems . New York: Physica-Verl., 2001. P.102
17. L. Zadeh. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I . *Information Sciences*. 1975. Vol. 8, P.199–249. URL: [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5)
18. Aguiar R., Franco I., Leonardi F. Comparative Analysis of Type-1 and Type-2 Fuzzy Controllers: Exploiting Synergies for Improved Control System Performance. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*. 2023. Vol. 9. URL: <http://doi.org/10.18540/jcecvl9iss4pp15936-01e>
19. Zhao T., Ping L. Study of Interval Type-2 Fuzzy Controller for the Twin-tank Water Level System. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2012. Vol. 20. P.1102-1106 URL: [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(12\)60593-X](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60593-X)
20. Araujo J., Rodriguez J. Type-2 fuzzy controller's performance index. Case study: tank level control. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1704. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1704/1/012016>
21. Rupam R., Prasenjit G. Design of a new nonlinear predictive PI controller for cascaded control system applications. Indian Control Conference. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/ICC56513.2022.10093503>
22. Arumugam R., Paramasivam R. Hybrid fuzzy controller for speed control of switched reluctance motor drives. *Energy Conversion and Management*. 2005. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.08.007>
23. Suresh R., Vamshidhar R., Rajababu D. Speed control of scim drive using fuzzy pi controller. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/981/4/042041>

24. Modabbernia M., Alizadeh B., Sahab A. Designing the Robust Fuzzy PI and Fuzzy Type-2 PI Controllers by Metaheuristic Optimizing Algorithms for AVR System. IETE Journal of Research. 2020. URL: <https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1769510>
25. Quynh N. The Fuzzy PI Controller for PMSM's Speed to Track the Standard Model. IETE Mathematical Problems in Engineering. 2020. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/1698213>
26. M. Shamsuzzoha, L. Raja. PID Control for Linear and Nonlinear Industrial Processes. London: CRC Press, 2023. P. 122
27. Md. Mizanur R., Md. Saiful I. DESIGN OF A FUZZY BASED PID ALGORITHM FOR TEMPERATURE CONTROL OF AN INCUBATOR. Journal of Physics: Conference Series. 2021. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1969/1/012055>
28. Montoya-Ríos A., García-Mañas F., Guzmán J. Simple Tuning Rules for Feedforward Compensators Applied to Greenhouse Daytime Temperature Control Using Natural Ventilation. Journal of Agronomy. 2020. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091327>
29. Chaudhuri T., Soh Y., Li H. A feedforward neural network based indoor-climate control framework for thermal comfort and energy saving in buildings. Journal of Energy. 2019. Vol. 248. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.065>
30. Khairudin M., Ibrahim B. TEMPERATURE CONTROL BASED ON FUZZY LOGIC USING ATMEGA 2560 MICROCONTROLLER. Journal of Physics: Conference Series. 2021. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1737/1/012044>
31. Akbariza M., Handoko D. Temperature and water level control in a multiinput, multi-output process using neuro-fuzzy controller. Journal of Physics: Conference Series. 2022. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1816/1/012022>
32. Yadav A., Goel A. Comparative Analysis of HVAC using PID, Fuzzy and ANFIS Technique. International Journal of Research in Advent Technology. Vol. 6. 2018
33. Altarazi F., Kumar K., Gupta G., Gulzar M. Analysis and Implementation of Thermal Heat Exchanger Tube Performance with Helically Pierced Twisted Tape Inserts Using ANFIS Model. Mathematical Problems in Engineering. 2021. Vol. 2021. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/1734909>
34. García C., Velasco M., Angulo C. Revisiting Classical Controller Design and Tuning with Genetic Programming. Journal of Sensors. 2023. Vol. 23. URL: <https://doi.org/10.3390/s23249731>
35. Somasundar C., Balaji K. A Genetic Algorithm (GA)-PID Controller for Temperature Control in Shell and Tube Heat Exchanger. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 23. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/925/1/012020>
36. Zeng W., Zhu W. An IMC-PID controller with Particle Swarm Optimization algorithm for MSBR core power control. Nuclear Engineering and Design. 2020. Vol. 360. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110513>
37. Romasevych V., Loveikin K. Optimal Constrained Tuning of PI-Controllers via a New PSO-Based Technique. International Journal of Swarm Intelligence Research. 2020. URL: <https://doi.org/10.4018/IJSIR.2020100104>
38. Zhao J., Xi M. Optimal Constrained Self-Tuning of PID Parameters Based on Adaptive Genetic Algorithm. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/782/4/042028>
39. Dhanasekaran B., Kaliannan J. Load Frequency Control Assessment of a PSO-PID Controller for a Standalone Multi-Source Power System. Journal of Technologies. 2023. URL: <https://doi.org/10.3390/technologies11010022>

Serhii Kubakh, Vitalii Tsapar

ANALYSIS OF EXISTING CONTROL SYSTEMS FOR THE TECHNOLOGICAL REGIME OF THE OIL REFINING PROCESS

The control system is a critically important component in every aspect of modern life, especially in oil refining processes. It ensures continuous monitoring and optimization of technological operations such as purification, distillation, and oil heating. Improved performance of such systems leads to increased overall efficiency, which in the long term results in significant savings in resources and energy, as well as enhanced quality of petroleum products. Numerous control systems have been specifically developed for this purpose over the past few decades in response to the ongoing need for improved performance. With this in mind, this article aims to classify and analyze controllers of

various types. The transition from conventional to more intelligent adaptive controllers is highlighted along with the relevant principles. Conventional regulators are those designed for linear systems without considering potential parametric changes. Adaptive controllers, on the other hand, have the ability to automatically learn and adapt to the plant's conditions, ensuring more precise system behavior.

Keywords: control system, oil refining, adaptive controllers, performance, efficiency, conventional regulators, parametric changes, controller classification

References

1. Song, Y., Zhao, K., Ye, H. (2024). *Control of Nonlinear Systems: Stability and Performance*. New York: CRC Press. P. 306.
2. Golnaraghi, F., Kuo, B. (2017). *Automatic Control Systems*. McGraw-Hill Education. P.186.
3. Guojun, W., Songqiao, C. (2000). An overview of the development of automatic control theory. *Microcomputers and Applications*. P.4-7.
4. Hägglund, T. (2023). *Process Control in Practice*. Sweden: CPI books GmbH. P.207.
5. Golnaraghi, F., Kuo, B. (2023). *Advanced Chemical Process Control: Putting Theory into Practice*. Germany: Wiley-VCH. P.368.
6. Venkatesh, M., Patra, S., Ray, G. (2022). Design of a set of stabilizing P and PI controllers for LTI TITO system with multiple time-delays. *International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*, 55, P.405-410. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.067>.
7. Kossove, E., Prabhu, V., Abu-Ayyad, M. (2018). PI Controller Research and Design. Conference: Multi-Campus Research Experience for Undergraduate. P.1-13. URL: <https://www.researchgate.net/publication/339292312>.
8. Kong, L., Yang, Q., Chen, R., Zhang, Z., Li, Y., Shi, Y. (2024). Improved Proportional Integral (PI) controller for water level control in open channel systems: A case study of the Middle Route Project for South-to-North Water Transfer. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101646>.
9. Sanchis, R. (2022). A new method for experimental tuning of PI controllers based on the step response. *ISA Transactions*, 128, P.329-342. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.09.008>.
10. Arauz, E., Maestre, J., Tian, X., Guan, G. (2020). Design of PI Controllers for Irrigation Canals based on Linear Matrix Inequalities. *Water*, 12, P.855. URL: <https://doi.org/10.3390/w12030855>.
11. Ziegler, J., Nichols, N. (1953). Optimum Settings for Automatic Controller. *Transactions of ASME*, 64, P. 759-768. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4019264>.
12. Martasia, S., Setiyono, B. (2018). Design of Auto-tuning Relay Feedback controller for Shell Heavy Oil Fractionator. *MATEC Web of Conferences*. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821802007>.
13. Abbas, A., Mustafa, M. (2024). A review of adaptive tuning of PID-controller: Optimization techniques and applications. *Int. J. Nonlinear Anal.*, 2, P.29-37. URL: <http://dx.doi.org/10.22075/ijnaa.2023.21415.4024>.
14. Cohen, G., Coon, G. (1953). Theoretical considerations of retarded control. *Transactions of ASME*, 75, P. 827-834.
15. Isdaryani, F., Feriyonika, F., Ferdiansyah, R. (2020). Comparison of Ziegler-Nichols and Cohen Coon tuning method for magnetic levitation control system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1450, P.1-11. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1450/1/012033>.
16. Castillo, O., Melin, P. (2001). *Soft Computing for Control of Non-Linear Dynamical Systems*. New York: Physica-Verl. P.102.
17. Zadeh, L. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, 8, P.199-249. URL: [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5).
18. Aguiar, R., Franco, I., Leonardi, F. (2023). Comparative Analysis of Type-1 and Type-2 Fuzzy Controllers: Exploiting Synergies for Improved Control System Performance. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 9. URL: <http://doi.org/10.18540/jcecvl9iss4pp15936-01e>.
19. Zhao, T., Ping, L. (2012). Study of Interval Type-2 Fuzzy Controller for the Twin-tank Water Level System. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20, P.1102-1106. URL: [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(12\)60593-X](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60593-X).
20. Araujo, J., Rodriguez, J. (2020). Type-2 fuzzy controller's performance index. Case study: tank level control. *Journal of Physics: Conference Series*, 1704. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1704/1/012016>.
21. Rupam, R., Prasenjit, G. (2022). Design of a new nonlinear predictive PI controller for cascaded control system applications. *Indian Control Conference*. URL: <https://doi.org/10.1109/ICC56513.2022.10093503>.

22. Arumugam, R., Paramasivam, R. (2005). Hybrid fuzzy controller for speed control of switched reluctance motor drives. *Energy Conversion and Management*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.08.007>.
23. Suresh, R., Vamshidhar, R., Rajababu, D. (2020). Speed control of scim drive using fuzzy pi controller. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 981, 042041. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/981/4/042041>.
24. Modabbernia, M., Alizadeh, B., Sahab, A. (2020). Designing the Robust Fuzzy PI and Fuzzy Type-2 PI Controllers by Metaheuristic Optimizing Algorithms for AVR System. *IETE Journal of Research*. URL: <https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1769510>.
25. Quynh, N. (2020). The Fuzzy PI Controller for PMSM's Speed to Track the Standard Model. *IETE Mathematical Problems in Engineering*. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/1698213>.
26. Shamsuzzoha, M., Raja, L. (2023). *PID Control for Linear and Nonlinear Industrial Processes*. London: CRC Press. P. 122.
27. Md. Mizanur, R., Md. Saiful, I. (2021). Design of a Fuzzy-Based PID Algorithm for Temperature Control of an Incubator. *Journal of Physics: Conference Series*. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1969/1/012055>
28. Montoya-Ríos, A., García-Mañas, F., Guzmán, J. (2020). Simple Tuning Rules for Feedforward Compensators Applied to Greenhouse Daytime Temperature Control Using Natural Ventilation. *Journal of Agronomy*, 10. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091327>.
29. Chaudhuri, T., Soh, Y., Li, H. (2019). A feedforward neural network based indoor-climate control framework for thermal comfort and energy saving in buildings. *Journal of Energy*, 248. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.065>.
30. Khairudin, M., Ibrahim, B. (2021). Temperature Control Based on Fuzzy Logic Using ATmega 2560 Microcontroller. *Journal of Physics: Conference Series*, 1737, 012044. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1737/1/012044>.
31. Akbariza, M., Handoko, D. (2022). Temperature and Water Level Control in a Multi-Input, Multi-Output Process Using Neuro-Fuzzy Controller. *Journal of Physics: Conference Series*. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2034/1/012009>.
32. Yadav, A., Goel, A. (2018). Comparative Analysis of HVAC using PID, Fuzzy and ANFIS Technique. *International Journal of Research in Advent Technology*, 6.
33. Altarazi, F., Kumar, K., Gupta, G., Gulzar, M. (2021). Analysis and Implementation of Thermal Heat Exchanger Tube Performance with Helically Pierced Twisted Tape Inserts Using ANFIS Model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/1734909>
34. García, C., Velasco, M., Angulo, C. (2023). Revisiting Classical Controller Design and Tuning with Genetic Programming. *Journal of Sensors*, 23. URL: <https://doi.org/10.3390/s23249731>
35. Somasundar, C., Balaji, K. (2020). A Genetic Algorithm (GA)-PID Controller for Temperature Control in Shell and Tube Heat Exchanger. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 23. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/925/1/012020>
36. Zeng, W., Zhu, W. (2020). An IMC-PID Controller with Particle Swarm Optimization Algorithm for MSBR Core Power Control. *Nuclear Engineering and Design*, 360. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110513>
37. Romasevych, V., Loveikin, K. (2020). Optimal Constrained Tuning of PI-Controllers via a New PSO-Based Technique. *International Journal of Swarm Intelligence Research*. URL: <https://doi.org/10.4018/IJSIR.2020100104>
38. Zhao, J., Xi, M. (2020). Optimal Constrained Self-Tuning of PID Parameters Based on Adaptive Genetic Algorithm. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/782/4/042028>
39. Dhanasekaran, B., Kaliannan, J. (2023). Load Frequency Control Assessment of a PSO-PID Controller for a Standalone Multi-Source Power System. *Journal of Technologies*. URL: <https://doi.org/10.3390/technologies11010022>