УДК 621.3
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).20

A COMPARATIVE STUDY OF LINEAR AND FUZZY CONTROLLERS FOR A PLASMA CUTTING POWER SUPPLY

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛІНІЙНИХ ТА НЕЧІТКИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ

Yevhen V. Stohniienko[1]
yevhen.stohniienko@ukr.net
ORCID: 0009-0002-6769-8784

Viktoriia S. Maslyk[2]
maslikviktoria641@gmail.com
ORCID: 0009-0007-6654-4149

Є. В. Стогнієнко[1],
аспірант

В. С. Маслик[2],
студентка

[1]Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
[2]National Aerospace University – Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv
[1]Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв
[2]Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків

Abstract. *Purpose*. To explore the effect of the membership function configuration of Sugeno-type fuzzy proportional controllers on the control quality of a plasma cutting power supply and to develop an approach for constructing a nonlinear control law that improves the quality of transient processes without changing the structure of the fuzzy inference system or increasing the number of rules. *Method*. Methods of mathematical and computer modeling in the MATLAB/Simulink environment, automatic control theory, Sugeno fuzzy logic methods, transient process analysis, and comparative analysis of automatic control system performance. *Results*. A mathematical model of an automatic control system for a plasma cutting power supply with a Sugeno-type fuzzy proportional controller has been developed. The influence of membership function configurations on the controller's nonlinear response and the quality of transient processes was investigated. A comparative analysis of the proportional controller and several variants of fuzzy controllers was performed. It has been shown how changing the maximum value of the control signal and the duration for which it is maintained alters the system's characteristics. It has been shown that the proposed membership function configurations improve the quality of the transient response compared to a proportional controller without complicating the structure of the control system. *Scientific Novelty*. The influence of the maximum value of the control signal and the duration for which it is maintained on the quality indicators of the transient process of a plasma cutting power supply has been established. An approach to the synthesis of fuzzy proportional controllers by changing the configuration of membership functions is proposed, which provides the necessary nonlinear control law without changing the structure of the fuzzy inference system. *Practical Value*. The proposed approach to tuning fuzzy proportional controllers can be used in the design of automatic control systems for plasma cutting power supplies and other nonlinear electrical systems.
Key words: control system; fuzzy logic; adaptive control; microprocessor control system; fuzzy model; controller; fuzzy controller; PID controller; fractional order controller; transient process; rise time; overshoot; complex technical system; neural network; plasma arc; plasma cutting; power supply; inguistic variable; membership function; proportional controller; nonlinear control.

Анотація. *Мета*. Дослідити вплив конфігурації функцій належності нечітких пропорційних регуляторів типу Sugeno на якість керування джерелом живлення плазмового різання та розробити підхід до формування нелінійного закону керування, що забезпечує покращення показників якості перехідних процесів без зміни структури системи нечіткого інференсу та збільшення кількості правил. *Методика*. Методи математичного та комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, теорія автоматичного керування, методи нечіткої логіки Sugeno, аналіз перехідних процесів і порівняльний аналіз характеристик систем автоматичного керування. *Результати*. Розроблено математичну модель системи автоматичного керування джерелом живлення плазмового різання з нечітким пропорційним регулятором типу Sugeno. Досліджено вплив конфігурації функцій належності на нелінійну характеристику регулятора та якість перехідних процесів. Виконано порівняльний аналіз пропорційного регулятора та декількох варіантів нечітких регуляторів. Показано, як зміна макси-

мальної величини сигналу керування та тривалості її підтримання змінює характеристики системи. Показано, що запропоновані конфігурації функцій належності забезпечують покращення показників якості перехідного процесу порівняно з пропорційним регулятором без ускладнення структури системи керування. *Наукова новизна*. Встановлено вплив максимальної величини сигналу керування та тривалості її підтримання на показники якості перехідного процесу джерела живлення плазмового різання. Запропоновано підхід до синтезу нечітких пропорційних регуляторів шляхом зміни конфігурації функцій належності, що забезпечує формування необхідного нелінійного закону керування без зміни структури системи нечіткого інференсу. *Практична цінність*. Запропонований підхід до налаштування нечітких пропорційних регуляторів може бути використаний під час проєктування систем автоматичного керування джерелами живлення плазмового різання та іншими нелінійними електротехнічними об'єктами.

Ключові слова: система керування; нечітка логіка; адаптивне керування; мікропроцесорна система керування; нечітка модель; регулятор; нечіткий регулятор; ПІД регулятор; регулятор дробового порядку; перехідний процес; час наростання; перерегулювання; складна технічна система; нейронна мережа; плазмова дуга; плазмове різання; джерело живлення; лінгвістична змінна; функція належності; пропорційний регулятор; нелінійне керування.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Плазмове різання є одним із найбільш поширених високопродуктивних методів термічного різання електропровідних матеріалів, який широко застосовується в суднобудуванні, машинобудуванні, металургії та інших галузях промисловості. Основною перевагою технології є можливість виконання швидкого та високоякісного різання металів значної товщини із забезпеченням прийнятної точності геометричних параметрів різу. Ефективність процесу значною мірою визначається характеристиками джерела живлення, яке повинно забезпечувати стабільне запалювання плазмової дуги, підтримання необхідного рівня струму та швидке реагування на зміну режимів роботи.

Особливістю плазмової дуги як об'єкта керування є її суттєво нелінійний характер. Електричні та теплові процеси в плазмі характеризуються складними взаємозв'язками між струмом, напругою, температурою та електродинамічними параметрами дугового розряду. Крім того, параметри дуги можуть істотно змінюватися внаслідок зміни товщини та фізичних властивостей оброблюваного матеріалу, геометрії різального інструменту, відстані між соплом і поверхнею металу, а також під впливом зовнішніх збурень. За таких умов математичний опис об'єкта керування стає складним, а використання традиційних лінійних методів керування не завжди забезпечує необхідні показники якості перехідних процесів.

Додатковим ускладнюючим фактором є специфічні умови експлуатації систем плазмового різання. Як правило, установки плазмового різання функціонують у виробничих цехах разом із потужним технологічним обладнанням, зокрема зварювальними комплексами, електроприводами великої потужності, гільйотинними ножицями, верстатами для гнуття металу, установками термічної обробки та іншими споживачами значних електричних потужностей. Робота такого обладнання призводить до випадкових і часто різких змін навантаження цехових мереж електропостачання. Наслідком цього є виникнення провалів та перенапруг, амплітуда і тривалість яких мають випадковий характер.

Для джерел живлення плазмового різання зазначені зміни напруги слід розглядати як зовнішні збурення, які безпосередньо впливають на стабільність струму плазмової дуги. Навіть короткочасні коливання параметрів живлення можуть спричиняти погіршення якості різання. З огляду на високі вимоги до стабільності технологічного процесу виникає необхідність використання методів керування, здатних адаптуватися до змінних умов функціонування та компенсувати вплив зовнішніх збурень.

Одним із перспективних напрямків розв'язання цієї проблеми є застосування нечіткої логіки. На відміну від класичних регуляторів, нечіткі системи керування використовують опис процесу лінгвістичними термами та набором експертних правил, тому вони добре працюють в умовах параметричної невизначеності та нелінійності об'єкта керування. Нечіткі регулятори не потребують побудови точного математичного опису всіх фізичних процесів, а їхню структуру можна підлаштувати під особливості конкретної технологічної системи.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Класичні методи автоматичного керування протягом тривалого часу залишаються основою побудови промислових систем регулювання. Найбільш поширеними серед них є пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори, які успішно застосовуються в широкому спектрі технологічних процесів завдяки простоті реалізації та зрозумілій процедурі налаштування параметрів [1; 2]. Проте, ефективність PID-регуляторів суттєво залежить від адекватності математичної моделі об'єкта керування та правильного вибору коефіцієнтів налаштування. За наявності значних нелінійностей, параметричних змін або зовнішніх збурень, характеристики таких систем можуть істотно погіршуватися, що проявляється у погіршенні характеристик перехідного процесу, що,

своєю чергою, негативно позначається на якості технологічного процесу [3–5].

Подальший розвиток класичних підходів призвів до появи пропорційно-резонансних і квазіпропорційно-резонансних регуляторів, а також адаптивних регуляторів цілочислового та дробового порядку [6; 7]. Застосування цих методів дає змогу покращити динамічні характеристики та частково врахувати зміну властивостей об'єкта керування. Однак зі зростанням складності алгоритмів значно підвищуються вимоги до точності ідентифікації моделі та обчислювальних ресурсів. Крім того, навіть адаптивні модифікації класичних регуляторів можуть демонструвати обмежену ефективність у випадках, коли об'єкт характеризується складною нелінійною динамікою та випадковими зовнішніми збуреннями [2; 5].

Серед нелінійних методів керування значного поширення набули алгоритми ковзного режиму. Вони характеризуються високою швидкодією, робастністю до параметричних змін і стійкістю до зовнішніх перешкод. У багатьох дослідженнях показано, що регулятори ковзного режиму забезпечують малі значення перерегулювання та високу швидкість відгуку. Разом із тим для таких алгоритмів характерними є проблеми вибору поверхні ковзання та явище високочастотних коливань сигналу керування, яке може негативно впливати на силову частину системи та обмежувати можливість їх практичного застосування в джерелах живлення плазмових установок [5; 8; 9].

Активний розвиток сучасних методів автоматичного керування пов'язаний із використанням інтелектуальних алгоритмів. До таких підходів належать штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми, методи ройової та еволюційної оптимізації, а також нечіткі системи керування [5; 10; 11]. Використання інтелектуальних методів дає змогу здійснювати автоматичний підбір параметрів регуляторів, виконувати адаптацію до зміни режимів роботи в реальному часі та підвищувати якість керування за наявності неповної або неточної інформації про об'єкт [12]. Особливу увагу останніми роками приділено нейро-нечітким системам, які поєднують здатність нейронних мереж до навчання з високою інтерпретованістю нечіткої логіки [11].

Нечіткі регулятори становлять окремий клас інтелектуальних систем керування, здатних ефективно працювати за умов невизначеності та нелінійності. На відміну від традиційних підходів, в нечіткій системі закон керування формується на основі лінгвістичних правил та функцій належності, що забезпечує плавну зміну посилення сигналу керування залежно від поточного стану системи. До основних переваг нечітких регуляторів відносять нелінійний характер закону керування та можливість адаптації до зміни параметрів об'єкта. Ці властивості роблять їх перспективними для керування складними технічними системами, що характеризуються вираженою нелінійністю та істотною невизначеністю, що є характерним, зокрема, і для плазмової дуги [11; 13; 14].

У літературі також широко представлені комбіновані структури нечітких PID-регуляторів, у яких нечітка логіка використовується для автоматичної зміни коефіцієнтів класичного PID-регулятора або безпосереднього формування сигналу керування [11; 13]. Такі системи, як правило, забезпечують кращу якість перехідних процесів порівняно з традиційними регуляторами [15]. Проте їхній синтез потребує ретельного вибору структури нечіткої системи, функцій належності, та особливостей для формування оптимальної характеристики регулятора [14]. Водночас питання впливу особливостей нечіткого регулятора на динаміку системи керування плазмовою дугою досліджено недостатньо.

Аналіз наявних досліджень свідчить, що значна частина робіт зосереджена на порівнянні різних класів регуляторів [16–18] або на розробленні складних гібридних інтелектуальних систем під конкретні потреби [19; 20]. Значно менше уваги приділяється синтезу нечіткої системи інференсу для керування джерелом живлення, що працює на дугове навантаження, її впливу на динамічні характеристики дугового процесу. Зокрема, недостатньо вивченими залишаються питання побудови бажаної нелінійної характеристики регулятора, призначеного для підтримання стабільного струму під час плазмового різання, вибору діапазону сигналу керування, а також впливу цих чинників на швидкодію, величину перерегулювання, час встановлення і енергію керування.

Отже, наукова проблема полягає в забезпеченні високої точності та стабільності струму плазмової дуги в умовах нелінійної динаміки та випадкових збурень мережі живлення шляхом використання адаптивних нечітких регуляторів. Для розв'язання цієї проблеми доцільним є дослідження декількох нечітких пропорційних регуляторів типу Суґено з різними характеристиками нелінійного закону керування, а також встановлення взаємозв'язку між особливостями закону керування, такими як максимальне значення величини сигналу керування та відрізок, протягом якого підтримується максимальна величина сигналу керування й показниками якості перехідного процесу. Отримані результати можуть стати підґрунтям для подальшого синтезу більш складних нечітких та нейро-нечітких систем керування джерелами живлення плазмового різання.

МЕТА РОБОТИ

Дослідити вплив конфігурації функцій належності нечітких пропорційних регуляторів типу Sugeno на якість керування джерелом живлення плазмового різання та розробити підхід до формування нелінійного закону керування, що забезпечує покращення

показників якості перехідних процесів без зміни структури системи нечіткого інференсу та збільшення кількості правил.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи математичного та комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, теорія автоматичного керування, методи нечіткої логіки Sugeno, аналіз перехідних процесів і порівняльний аналіз характеристик систем автоматичного керування.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Математична модель незмінної частини джерела живлення з дуговим навантаженням побудована на основі інерційної ланки першого порядку із затримкою. Така модель дає доволі точний опис динаміки імпульсних перетворювачів напруги, що працюють на дугове навантаження [21]. Така апроксимація адекватно відображає інерційні властивості силової частини та скінченний час реакції перетворювача, а її передавальна функція у загальному випадку має вигляд

$$G(s) = \frac{k_0}{\tau s + 1} e^{-T_d s},$$

де k_0 – коефіцієнт посилення об'єкта керування,

τ – стала часу навантаження, а T_d – транспортне запізнення, яке враховує затримку між формуванням сигналу керування та реакцією силового перетворювача.

Для досліджуваного джерела живлення параметри моделі становлять [22]

$$k_0 = 5.083, \quad \tau = 248 \cdot 10^{-6}\ \text{с}, \quad T_d = 19.23 \mu c,$$

тому передавальна функція об'єкта набуває вигляду

$$G(s) = \frac{5.083}{248 \cdot 10^{-6} s + 1} e^{-19.23 \cdot 10^{-6} s},$$

У часовій області інерційна частина моделі описується диференційним рівнянням

$$248 \cdot 10^{-6} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = 5.083, u(t),$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал, а $y(t)$ – вихідна координата об'єкта.

Наявність транспортного запізнення є характерною особливістю джерел живлення, призначених для плазмових технологій. Це можна пояснити тим, що між формуванням сигналу керування та зміною електричних параметрів плазмової дуги існує скінченний час реакції силової частини перетворювача.

У Simulink чисте запізнення, тобто транспортна затримка, реалізована окремим блоком, тому під час симуляційного моделювання передавальна функція об'єкта набуває вигляду

$$G(s) = \frac{5.083}{248 \cdot 10^{-6} s + 1},$$

а транспортне запізнення враховується окремою ланкою

$$y_d(t) = y(t - T_d).$$

Помилка регулювання визначається класичним співвідношенням

$$e(t) = r(t) - y_d(t),$$

де $r(t)$ є задавальним сигналом.

СИНТЕЗ СИСТЕМ НЕЧІТКОГО ІНФЕРЕНСУ

Для синтезу інтелектуального закону керування на початковому етапі дослідження сформовано однофакторну нечітку систему типу Sugeno нульового порядку, яка містить одну змінну для помилки на вході та одну змінну для сигналу керування на виході. Таку систему відносно легко змінювати, налаштовуючи її методом спроб і помилок, особливо якщо кількість нечітких функцій належності невелика. З Sugeno легше будувати несиметричні характеристики з крутими змінами. Тож таким чином досягається створення гнучкої основи для подальшого синтезу нелінійного закону керування та оцінювання результатів змін.

Серед інших переваг системи Sugeno можна зазначити порівняно невисоку обчислювальну складність, та придатність до параметричної оптимізації, і при



Рис. 1. Структура системи нечіткого інференсу типу Сугено

цьому стійкість до локальних коливань на вході. Крім того, нечіткі системи зазначеного типу забезпечують безперервність відображення «вхід–вихід» та дають змогу отримати аналітичний вираз закону керування у вигляді зваженої суми локальних моделей. На відміну від багатопараметричних нечітких моделей, які суттєво ускладнюють аналіз впливу окремих компонентів на поведінку системи, запропонована структура характеризується мінімальною складністю та прозорою логікою функціонування.

Архітектура досліджуваних нечітких систем інференсу типу Сугено показана на рис. 1. Побудована модель складається з п'яти функціонально взаємопов'язаних блоків: вхідного блоку, блоку фазіфікації, бази нечітких правил, блоку обчислення вагових коефіцієнтів та блоку агрегування і дефазіфікації [23].

На першому етапі до системи надходить числове значення вхідної змінної x, яке характеризує поточний стан досліджуваного процесу. Далі виконується процедура фазіфікації, під час якої значення x одночасно проєктується на множину лінгвістичних термів. Результатом цього етапу є набір ступенів належності $\mu_1(x)$, $\mu_2(x)$, …, $\mu_N(x)$, що визначають рівень відповідності вхідного значення кожній із нечітких множин. Використання трикутних функцій належності дозволяє отримати аналітично простий та обчислювально ефективний механізм формування ступенів активації правил [23].

В нашому випадку для опису вхідної змінної використано три трикутні функції належності, розташовані на області визначення з їх частковим перекриттям для безперервності переходу між сусідніми нечіткими множинами. Перша функція належності характеризує область малих значень вхідного сигналу, друга описує проміжний режим функціонування системи, тоді як третя відповідає області великих значень вхідної змінної. Таке розбиття простору є мінімально достатнім для побудови початкової нечіткої моделі та одночасно не призводить до надмірного збільшення кількості правил.

На наступному етапі активується база нечітких правил, яка складається з набору правил виду: «Якщо x належить множині A_i, то $y = c_i$». Кожне правило відповідає окремій локальній області вхідної змінної, а його інференсом є константне значення вихідної змінної, бо використовується модель Sugeno. Тобто вони пов'язують відповідні нечітку множину вхідної змінної з постійним значенням сигналу на виході. Ступінь впливу кожного правила на кінцеве рішення визначається ваговим коефіцієнтом $w_i = \mu_i(x)$. Таким чином, правила з вищим ступенем активації роблять більший внесок у формування підсумкового результату [23]. База знань побудованої нечіткої системи містить три такі правила.

На завершальному етапі здійснюється агрегування часткових інференсів та дефазіфікація методом зваженого середнього. Вихідне значення системи визначається як нормована сума локальних константних оцінок, зважених відповідно до ступенів активації:

$$y(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \mu_i(x) c_i}{\sum_{i=1}^{N} \mu_i(x)}.$$

Нехай x – вхідна змінна, $\mu_i(x)$ – функції належності відповідних нечітких множин, а c_i – сталі інференсів правил. Тоді вихідний сигнал нечіткої системи визначається співвідношенням

$$u(x) = \frac{\sum_{i=1}^{3} \mu_i(x) c_i}{\sum_{i=1}^{3} \mu_i(x)}.$$

З урахуванням використання нормалізованих перекривних трикутних функцій належності виконується умова

$$\sum_{i=1}^{3} \mu_i(x) = 1,$$

тому вираз для сигналу керування набуває вигляду

$$u(x) = \sum_{i=1}^{3} \mu_i(x) c_i.$$

Така архітектура реалізує принцип локально-зваженої апроксимації, відповідно до якого глобальна нелінійна залежність формується шляхом поєднання декількох локальних моделей. Збільшення кількості нечітких множин та правил призводить до більш детального розбиття вхідного простору, що потенційно підвищує точність апроксимації складних нелінійних процесів. При цьому модель зберігає високу інтерпретованість і може бути безпосередньо інтегрована в адаптивні нейро-нечіткі системи та інтелектуальні системи керування [23].

Отримане відображення є неперервною кусково-лінійною функцією вхідної змінної. Фактично система реалізує лінійну інтерполяцію між сусідніми локальними рівнями керування, а зміна вихідного сигналу відбувається плавно, без розривів та стрибків. Завдяки цьому забезпечується передбачувана поведінка регулятора.

СИНТЕЗ ПОЧАТКОВОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Використовуючи методику, яку описано в попередніх дослідженнях [24; 25], нечітку систему налаштовано для реалізування статичного коефіцієнта посилення. Сам цей коефіцієнт отримано раніше [21; 26] із використанням інструмента налаштування

PID-регуляторів. У результаті центральні точки функцій належності розміщені на інтервалі зміни вхідної змінної рівномірно таким чином, що забезпечують відтворення лінійної характеристики регулятора із заданим коефіцієнтом посилення незалежно від величини помилки.

Сформована нечітка система є еквівалентом пропорційного регулятора, вона виконує роль базової, або опорної, моделі, від якої надалі здійснюється перехід до нелінійного регулятора.

Побудова саме лінійної початкової залежності є зручною точкою відліку, оскільки дає змогу дослідити причинно-наслідковий зв'язок між змінами нелінійної характеристики закону керування регулятора та показниками якості регулювання. Це дає змогу оцінити доцільність і ефективність відповідних перетворень відносно лінійної системи, а також різних варіацій між собою.

Таким чином використано нечітку систему як зручну відправну точку для подальшого введення нелінійності та адаптивних властивостей.

ПЕРЕХІД ДО НЕЛІНІЙНОГО РЕГУЛЯТОРА

В рамках запропонованого підходу передбачається перехід від лінійного до нелінійного регулятора без зміни самої архітектури нечіткої системи та бази правил.

Подальше налаштування параметрів вхідних функцій належності шляхом зміни положення їхніх вершин, ширини областей перекриття та ступенів асиметрії призводить до нерівномірного розбиття простору вхідної змінної. У цьому випадку змінюється швидкість інтерполяції між локальними рівнями керування, унаслідок чого формується нелінійна залежність між величиною помилки і сигналом керування. Такий підхід дає змогу локально підвищувати або зменшувати чутливість регулятора в окремих діапазонах функціонування системи без ускладнення механізму нечіткого висновку.

Основна ідея подальшого синтезу полягає у налаштуванні параметрів вхідних функцій належності – зміні положення вершин, ширини областей перекриття та ступеня асиметрії окремих нечітких множин. Такі модифікації порушують рівномірність початкового розбиття простору вхідної змінної і призводять до формування нелінійної залежності між вхідною змінною та сигналом керування.

Запропонований підхід має важливу методологічну перевагу. Початковий лінійний закон керування забезпечує зрозумілу та інтерпретовану структуру регулятора, що полегшує аналіз впливу конфігурації функцій належності на результат. Надалі, шляхом підлаштування конфігурації нечітких множин, стає можливим локальне посилення або послаблення чутливості регулятора в окремих діапазонах зміни вхідного параметра. У результаті формується нелінійний закон керування, адаптований до особливостей об'єкта та здатний забезпечити кращі показники якості керування порівняно з вихідною лінійною моделлю.

На основі цієї базової нечіткої системи сформовано декілька інших систем шляхом редагування функцій належності (збільшення посилення для великих значень помилки, збільшення максимального значення сигналу керування або тривалості його перебування в максимальній дії керування).

Таким чином, початкова лінійна нечітка структура розглядається не як кінцеве рішення задачі синтезу регулятора, а як проміжний етап побудови інтелектуального закону керування. Її використання забезпечує простоту інтерпретації, аналітичну прозорість та можливість контрольованого формування нелінійних властивостей регулятора шляхом послідовного коригування параметрів функцій належності. Це робить запропонований підхід придатним для подальшого синтезу спеціалізованих нечітких регуляторів, орієнтованих на керування технічними системами зі складною нелінійною динамікою.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДОСЛІДЖУВАНИХ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ

Математичне моделювання нечітких систем

Таким чином, для апроксимації нелінійних залежностей та формування адаптивного керування, далі у роботі сформовано три нечіткі системи інференсу типу Суґено першого порядку. Усі досліджувані системи характеризуються однаковою структурною організацією. Вхідний простір формується однією лінгвістичною змінною x, яка описується набором трикутних функцій належності. Дві системи містять три нечіткі множини, тоді як третя система використовує чотири функції належності, що дозволяє підвищити ступінь деталізації розбиття вхідного простору. Це дає змогу реалізувати ідентичні характеристики, одна з яких має локалізоване збільшене посилення.

Трикутна функція належності для i-го терма визначається параметрами (a_i, b_i, c_i) та задається виразом

$$\mu_i(x) = \{0, x \le a_i, [2mm] \frac{x - a_i}{b_i - a_i}, a_i < x \le b_i,$$

$$[3mm] \frac{c_i - x}{c_i - b_i}, b_i < x < c_i, [3mm] 0, x \ge c_i.)$$

Значення функції належності $\mu_i(x)$ визначає ступінь активації відповідного правила та може інтерпретуватися як міра належності поточного значення вхідної змінної до певного лінгвістичного терма. Використання саме трикутних функцій належності зумовлене їх простотою, можливістю аналітичного опису та невисокими обчислювальними витратами, що є важливим під час синтезу адаптивних нечітких систем у реальному масштабі часу.

Для кожної нечіткої множини формується правило виду

$$R_i: \text{Якщо } x \in A_i, \text{ то } y = c_i,$$

де A_i позначає i-ту нечітку множину вхідної змінної, а c_i є константним наслідком відповідного правила. Ступінь активації правила визначається співвідношенням

$$w_i = \mu_i(x).$$

Підсумкове значення вихідної змінної обчислюється методом зваженого усереднення (Weighted Average), який для систем Сугено з одним входом може бути записаний у вигляді

$$y(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \mu_i(x) c_i}{\sum_{i=1}^{N} \mu_i(x)},$$

де N є кількістю нечітких правил. Наведене співвідношення являє собою узагальнену математичну модель усіх досліджуваних нечітких систем. Отриманий вихідний сигнал формується як нормована сума локальних константних оцінок, зважених відповідно до ступеня активації кожного правила.

Для моделей, що містять три нечіткі правила ($N = 3$), вихідні константи набувають значень $c_1 = 0$, $c_2 = 0{,}6217$ та $c_3 = 1{,}35959178$. У цьому випадку модель набуває вигляду

$$y(x) = \frac{0{,}6217, \mu_2(x) + 1{,}35959178, \mu_3(x)}{\mu_1(x) + \mu_2(x) + \mu_3(x)}.$$

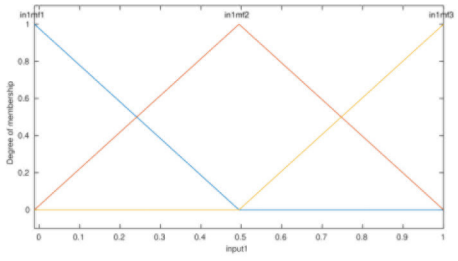
Для системи з чотирма нечіткими правилами ($N = 4$) додатково використовується четверта функція належності з константним наслідком $c_4 = 2$, що приводить до такого співвідношення:

$$y(x) = \frac{0{,}6217, \mu_2(x) + 1{,}35959178, \mu_3(x) + 2, \mu_4(x)}{\mu_1(x) + \mu_2(x) + \mu_3(x) + \mu_4(x)}.$$

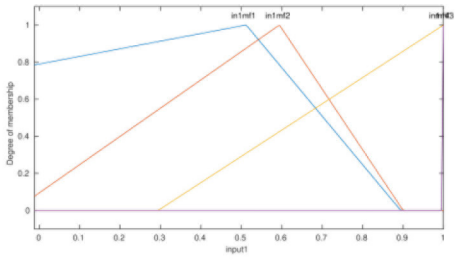
Таким чином, побудовані нечіткі системи реалізують локально-зважене відображення між вхідною та вихідною змінними, де кожне правило відповідає окремій ділянці вхідного простору. Збільшення кількості функцій належності приводить до більш детального покриття області визначення вхідного параметра та потенційно підвищує точність апроксимації нелінійних залежностей. Водночас зберігається інтерпретованість моделі, оскільки внесок кожного правила у формування кінцевого рішення може бути безпосередньо оцінений через відповідні ступені належності та вагові коефіцієнти.

Симуляційне моделювання нечітких систем

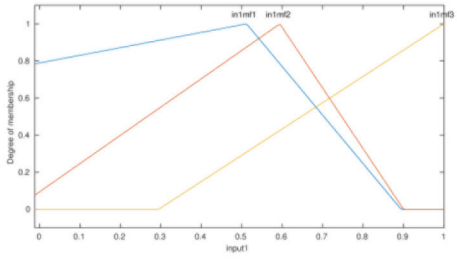
Для лінійного регулятора використано три рівномірно розподілені трикутні функції належності, розташовані таким чином, що забезпечується симетричне та рівномірне покриття діапазону вхідної змінної, що фактично дозволяє відтворити лінійну залежність між входом і виходом. У першому нечіткому регуляторі структура ускладнюється введенням додаткової функції належності, що є локалізованою в області великих значень та забезпечує посилення сигналу керування на значних відхиленнях. Другий нечіткий регулятор зберігає подібну конфігурацію функцій належності, що свідчить про близьку до попереднього поведінку системи, але з насиченням,



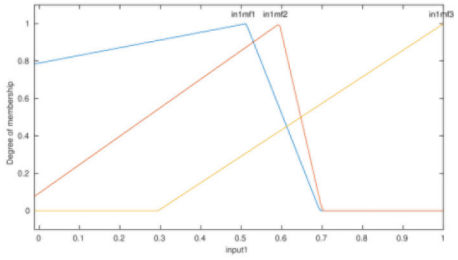
(а) Лінійна відповідність 1



(б) Нелінійна відповідність 2



(в) Нелінійна відповідність 3



(г) Нелінійна відповідність 4

Рис. 2. Вхідні функції належності для регуляторів на основі Sugeno FIS

тоді як у третьому нечіткому регуляторі функції належності модифіковано шляхом збільшення крутизни схилів, що означає більш різку зміну сигналу керування та підвищену чутливість на значних відхиленнях.

Нечіткі правила

Перший нечіткий регулятор (4 правила)

1. Якщо (input дорівнює in1mf1) тоді (output дорівнює out1mf1) (1)
2. Якщо (input дорівнює in1mf2) тоді (output дорівнює out1mf2) (1)
3. Якщо (input дорівнює in1mf3) тоді (output дорівнює out1mf3) (1)
4. Якщо (input дорівнює in1mf4) тоді (output дорівнює out1mf4) (1)

Другий нечіткий регулятор (3 правила)

1. Якщо (input дорівнює in1mf1) тоді (output дорівнює out1mf1) (1)
2. Якщо (input дорівнює in1mf2) тоді (output дорівнює out1mf2) (1)
3. Якщо (input дорівнює in1mf3) тоді (output дорівнює out1mf3) (1)

Третій нечіткий регулятор (3 правила)

1. Якщо (input дорівнює in1mf1) тоді (output дорівнює out1mf1) (1)
2. Якщо (input дорівнює in1mf2) тоді (output дорівнює out1mf2) (1)
3. Якщо (input дорівнює in1mf3) тоді (output дорівнює out1mf3) (1)

З погляду нечіткої логіки, ці правила описують просте однозначне відображення між функцією належності входу (in1mf$X$) та функцією належності виходу (out1mf$X$).

Перегляд нечітких правил для $x = 0$

Нечіткі правила регуляторів показані на рис. 3.

Поверхневі діаграми

Поверхневі діаграми (рис. 4) показують зв'язок між вхідними змінними (у нашому випадку похибкою) та вихідним сигналом керування для обох типів регуляторів.

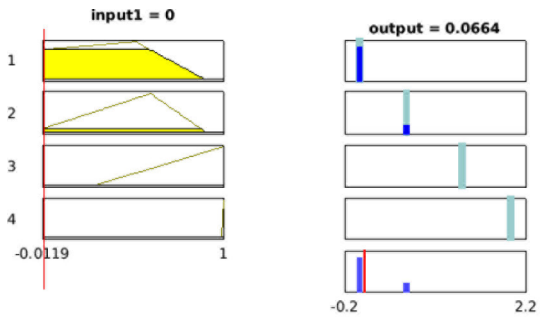
Лінійний регулятор (лінія 1, рис. 4) характеризується прямолінійною залежністю між вхідною помилкою та вихідним сигналом, що відображає постійний коефіцієнт посилення. Нечіткі регулятори типу Sugeno (лінії 2–4, рис. 4) демонструють змінний нахил характеристики, що відповідає адаптивному закону керування: у різних варіантах спостерігається поступове або прискорене зростання вихідного сигналу, а також ефекти насичення, які обмежують керуючий вплив при великих значеннях помилки.

Коефіцієнти посилення

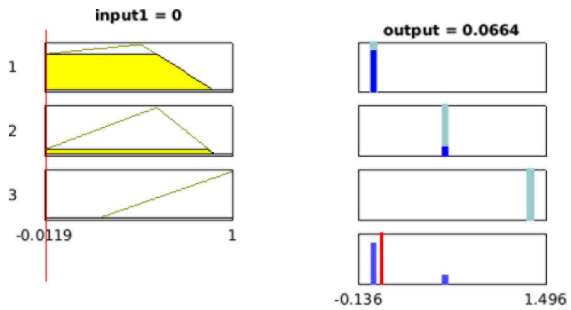
На рис. 5 показано точки даних (X, Y), що відповідають коефіцієнтам посилення для відповідних відрізків поверхневої діаграми нелінійного регулятора 2. Ці точки також подано у табл. 1, де у третьому стовпчику обчислюється відношення Y/X.

Тлумачення:

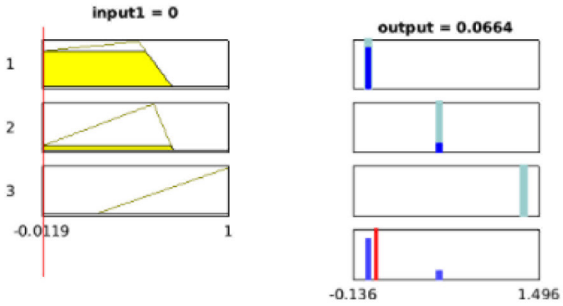
- **X**: Представляє вхід регулятора (помилка).
- **Y**: Представляє вихід регулятора (сигнал керування).
- **Y/X**: Представляє коефіцієнт посилення регулятора на конкретному відрізку.



(а) Нелінійна відповідність 2



(б) Нелінійна відповідність 3



(в) Нелінійна відповідність 4

Рис. 3. Перегляд нечітких правил для регуляторів

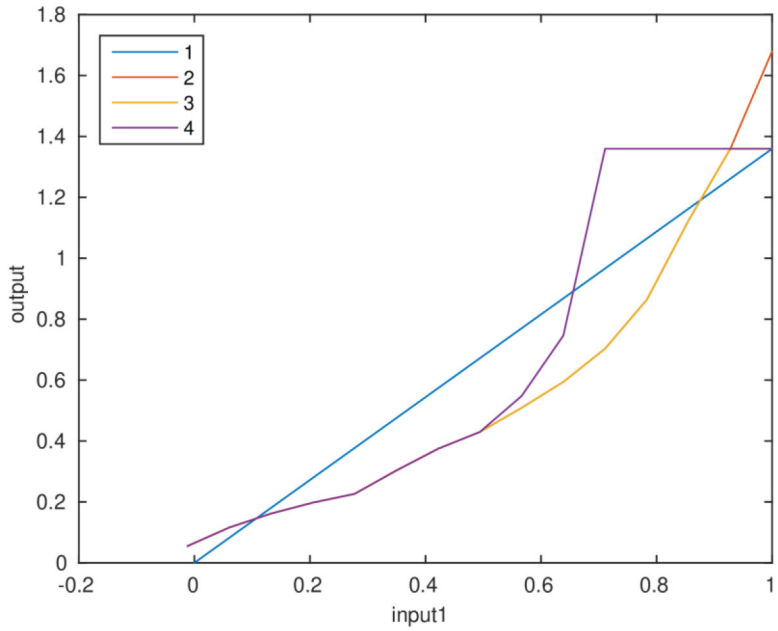


Рис. 4. Поверхневі діаграми регуляторів

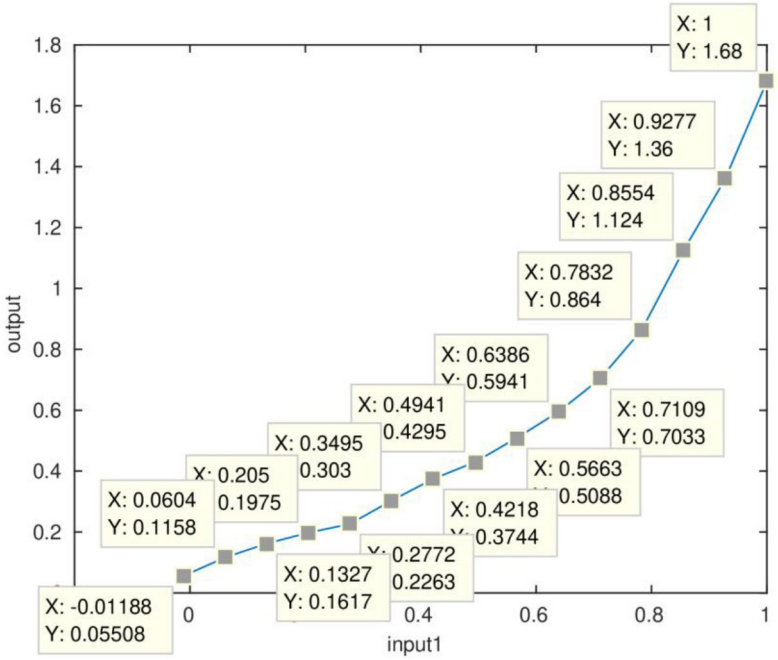


Рис. 5. Точки характеристики регулятор

Аналіз точок характеристики регулятора (рис. 5, табл. 1) дає змогу оцінити ефективний коефіцієнт посилення для кожної області. На відміну від лінійного регулятора, де коефіцієнт посилення є сталим, тут він змінюється залежно від робочої точки. При малих значеннях помилки спостерігається підвищений коефіцієнт посилення, що сприяє зменшенню статичної похибки. У середній області значень помилки коефіцієнт посилення зменшується, що дозволяє уникнути надмірної реакції системи та зменшити ймовірність перерегулювання і коливань. При подальшому зростанні помилки коефіцієнт посилення знову збільшується, забезпечуючи більш інтенсивний вплив на об'єкт керування та пришвидшене повернення системи до заданого режиму.

Зростання коефіцієнта посилення при великих похибках дозволяє швидше стабілізувати струм плазмової дуги після збурення, тоді як зменшення посилення поблизу робочої точки знижує ймовірність коливань та перевищення струму.

Таблиця. 1. Зріз нелінійних характеристик коефіцієнта посилення нечіткого регулятора

X	Y	Y / X
–0.0119	0.0551	–4.6366
0.0604	0.1158	1.9178
0.1327	0.1617	1.2187
0.2050	0.1975	0.9637
0.2772	0.2263	0.8162
0.3495	0.3030	0.8670
0.4218	0.3744	0.8877
0.4941	0.4295	0.8693
0.5663	0.5088	0.8983
0.6386	0.5941	0.9303
0.7109	0.7033	0.9893
0.7832	0.8640	1.1033
0.8555	1.1245	1.3145
0.9277	1.3596	1.4655
1.0000	1.6798	1.6798

СИМУЛЯЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Для оцінювання впливу конфігурації функцій належності на характеристики замкненої системи було побудовано імітаційну модель, у межах якої виконано порівняння класичного лінійного пропорційного регулятора та трьох нечітких пропорційних регуляторів типу Sugeno нульового порядку. Усі нечіткі регулятори були сформовані на основі єдиної базової структури, що містить три правила нечіткого висновку та одну вхідну змінну – похибку регулювання. Відмінність між окремими варіантами полягала переважно у конфігурації вхідних функцій належності. В одному з варіантів структуру розширено для локалізованого збільшення коефіцієнту осилення. Початкова лінійна структура з рівномірно розташованими трикутними функціями належності використовувалася як опорна модель, після чого виконувалося цілеспрямоване ручне налаштування параметрів нечітких множин для формування різних нелінійних законів керування.

Імітаційна модель, наведена на рис., побудована за принципом паралельного моделювання. Вона складається з чотирьох незалежних гілок, які містять регулятор, модель об'єкта керування та блоки реєстрації параметрів системи. Така структура забезпечує ідентичні початкові умови та однакові зовнішні впливи для всіх досліджуваних варіантів, що дозволяє здійснювати безпосереднє порівняння їхніх динамічних характеристик. Крім того, використання паралельної архітектури виключає вплив зміни параметрів однієї системи на результати інших експериментів і підвищує достовірність отриманих висновків.

Три досліджувані нечіткі регулятори реалізують різний характер залежності між похибкою регулювання та керуючим сигналом. Перший регулятор відповідає базовій лінійній структурі, у якій вихідний сигнал змінюється лінійно в усьому робочому діапазоні. Інші три регулятори отримано шляхом модифікації геометрії функцій належності, що призвело до формування нелінійного розподілу коефіцієнта посилення. У результаті регулятори набули властивості змінювати інтенсивність впливу керування залежно від величини поточної похибки: забезпечувати більш агресивне керування за значних відхилень та більш

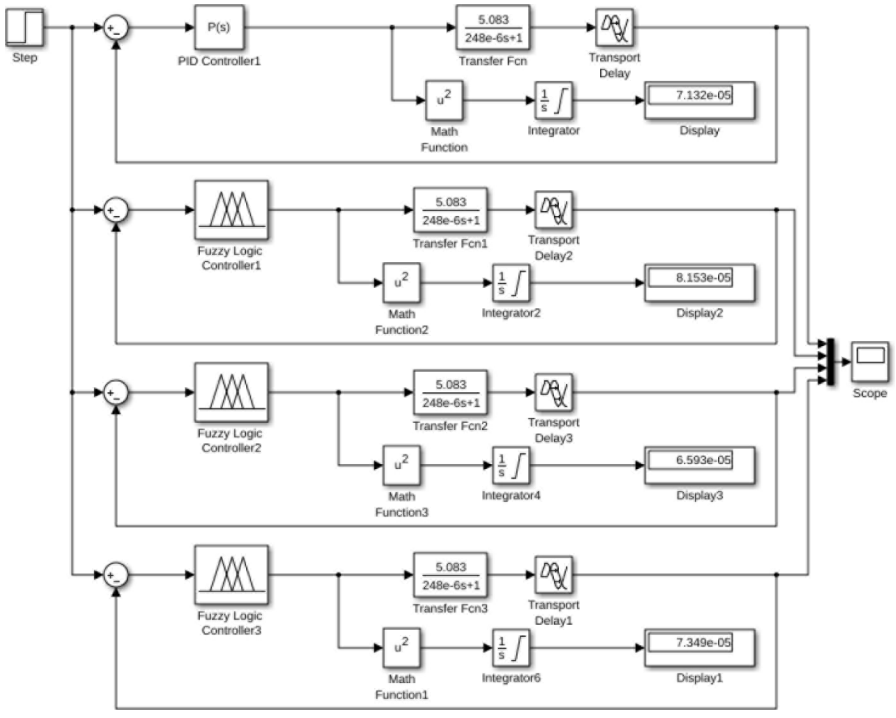


Рис. 6. Симуляційна модель для дослідження регуляторів

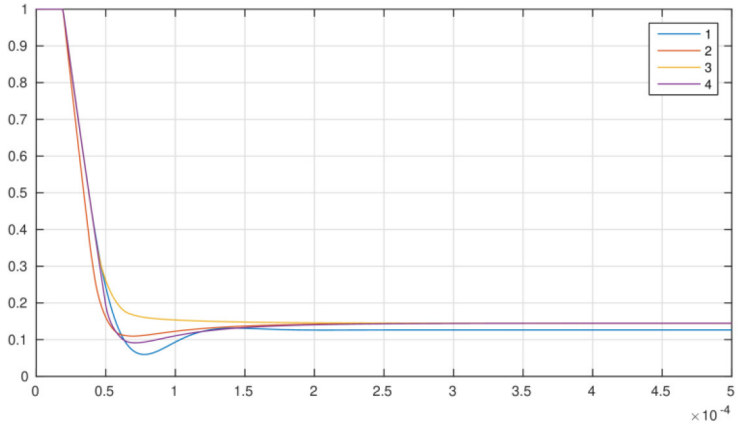


Рис. 7. Сигнал помилки

м'яке регулювання з наближенням до усталеного режиму.

Аналіз похибки регулювання

Часові залежності похибки регулювання, наведені на рис., свідчать про однакові початкові умови для всіх варіантів системи. На початковому етапі перехідного процесу всі регулятори демонструють інтенсивне зменшення похибки, що є наслідком значного початкового керуючого впливу. Однак подальший характер процесу суттєво залежить від структури закону керування.

Лінійний пропорційний регулятор характеризується постійним коефіцієнтом посилення, тому швидкість зменшення похибки є практично пропорційною її поточному значенню. Такий підхід забезпечує простоту реалізації, проте не дозволяє адаптувати інтенсивність керування до поточного режиму роботи системи. Унаслідок цього спостерігається відносно більша усталена похибка та дещо вищий рівень перерегулювання.

На відміну від лінійного регулятора, усі три нечіткі системи демонструють близькі між собою характеристики та забезпечують меншу усталену похибку. Причиною цього є нелінійна зміна еквівалентного коефіцієнта посилення, яка формується шляхом відповідного розташування функцій належності. Завдяки такому механізму система зберігає високу швидкодію на значних відхиленнях і одночасно забезпечує більш точне позиціонування поблизу робочої точки.

Аналіз сигналів керування

Порівняння сигналів керування (рис. 8) дає змогу виявити фундаментальні відмінності між лінійним і нечіткими підходами. У випадку класичного пропорційного регулятора форма сигналу керування повністю визначається поточним значенням похибки, а коефіцієнт передачі залишається незмінним протягом усього процесу регулювання.

Нечіткі регулятори формують керуючий вплив відповідно до механізму нечіткого висновку та конфігурації функцій належності. Унаслідок цього залежність між входом і виходом набуває нелінійного характеру. На великих значеннях похибки формується інтенсивніший сигнал керування, який сприяє швидкому наближенню системи до заданого режиму. Із зменшенням відхилення ефективне підсилення регулятора поступово знижується, що забезпечує плавніше підведення системи до усталеного стану та зменшує ймовірність виникнення коливань.

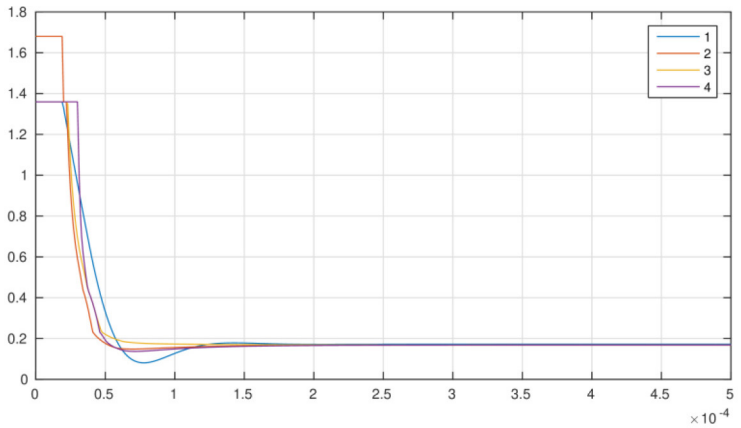


Рис. 8. Сигнал керування

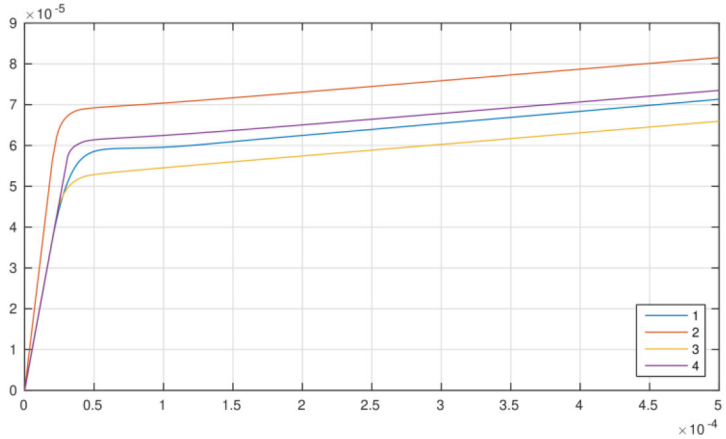


Рис. 9. Енергія керування

Важливо зазначити, що зміна лише параметрів функцій належності дозволяє суттєво змінювати форму сигналу керування без модифікації бази правил або алгоритму нечіткого висновку. Це підтверджує доцільність використання початкової лінійної нечіткої структури як відправної точки для подальшого синтезу спеціалізованих нелінійних регуляторів.

Аналіз енергії керування

Інтегральна оцінка енергії керування, наведена на рис. 9, характеризує сумарну інтенсивність впливу регулятора на об'єкт керування протягом перехідного процесу. Отримані результати показують, що всі нечіткі регулятори витрачають більшу частину енергії на початковому етапі регулювання. Таке явище є закономірним, оскільки нелінійний закон керування цілеспрямовано формує підвищене посилення за великих значень похибки.

Після суттєвого зменшення відхилення енергетичні витрати нечітких регуляторів починають знижуватися. У результаті вплив керування стає менш агресивним, а система переходить у режим плавного наближення до усталеного стану. Лінійний регулятор, навпаки, характеризується більш рівномірним розподілом енергетичних витрат у часі, що є прямим наслідком незмінності коефіцієнта посилення.

Таким чином, використання нелінійних нечітких законів керування дає змогу перерозподілити енергетичні витрати на користь початкового етапу перехідного процесу, де вони забезпечують найбільший позитивний вплив на швидкодію системи.

Аналіз перехідних характеристик

Порівняння реакцій замкнених систем (рис. 10) показує, що всі три нечіткі регулятори забезпечують кращі показники якості регулювання порівняно з класичним пропорційним регулятором. Для нечітких систем характерні вища швидкість відгуку, менша усталена похибка та нижча схильність до перерегулювання. При цьому різні конфігурації функцій належності формують різний характер зміни еквівалентного коефіцієнта підсилення, що дозволяє отримувати різні компроміси між швидкодією, точністю та інтенсивністю впливу керування.

Фізично така поведінка пояснюється тим, що регулятори на основі нечіткої логіки реалізують змінне підсилення залежно від поточного стану системи. У діапазоні малих похибок коефіцієнт підсилення може зменшуватися для пригнічення коливальних

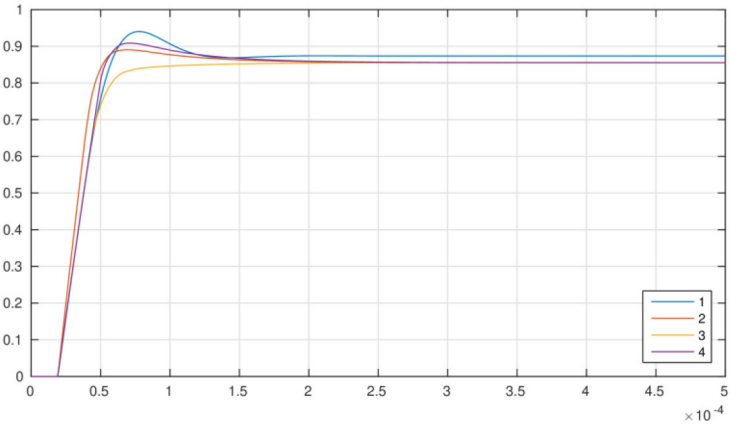


Рис. 10. Відгук системи

процесів і забезпечення плавного виходу на усталений режим. У середній області зміна посилення спрямована на підтримання компромісу між швидкістю та стійкістю. Для значних відхилень, навпаки, коефіцієнт посилення збільшується, що дозволяє істотно прискорити процес компенсації похибки.

Отримані результати підтверджують, що навіть відносно прості модифікації геометрії функцій належності можуть суттєво впливати на властивості замкненої системи. Тому запропонований підхід до ручного налаштування нечітких множин може розглядатися як ефективний інструмент синтезу нелінійних регуляторів без необхідності ускладнення структури нечіткої системи або збільшення кількості правил логічного висновку.

Обмеження дослідження

Незважаючи на отримані позитивні результати, проведене дослідження має певні обмеження. По-перше, використана імітаційна модель передає динаміку об'єкта керування зі значними спрощеннями та не враховує всіх фізичних процесів реальної системи. По-друге, дослідження обмежується лише пропорційними регуляторами, тоді як використання інтегральної та диференціальної складових потенційно може забезпечити додаткове покращення характеристик регулювання. По-третє, наведені результати ґрунтуються виключно на комп'ютерному моделюванні та потребують подальшої експериментальної валідації.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено дослідження можливостей синтезу нелінійних пропорційних регуляторів на основі нечіткої логіки Sugeno нульового порядку для системи керування джерелом живлення плазмового різання. За вихідну модель обрано лінійну нечітку систему з трьома трикутними функціями належності та трьома правилами нечіткого висновку, яка забезпечує кусково-лінійний закон керування і характеризується високою інтерпретованістю параметрів. На основі цієї структури шляхом ручного налаштування конфігурації вхідних функцій належності сформовано три варіанти нечітких регуляторів, що реалізують різні нелінійні залежності між похибкою регулювання та сигналом керування.

Результати комп'ютерного моделювання показали, що всі досліджувані нечіткі регулятори забезпечують покращення показників якості регулювання порівняно з класичним лінійним пропорційним регулятором. Зокрема, для нечітких систем спостерігаються вища швидкість реакції, менший рівень перерегулювання та менша похибка в усталеному режимі. Отримані характеристики пояснюються властивістю нечітких регуляторів реалізовувати змінний коефіцієнт посилення залежно від поточного значення похибки. Такий підхід дає змогу забезпечити інтенсивне керування на значних відхиленнях від заданого режиму та більш плавне регулювання в області малих помилок.

Проведений аналіз показав, що, незважаючи на різну конфігурацію функцій належності, усі три нечіткі регулятори демонструють близькі динамічні характеристики. Це свідчить про наявність певної множини конфігурацій нечітких систем, здатних забезпечити подібну якість регулювання. Зокрема, регулятор з обмеженням величини сигналу керування потребує максимально агресивного керування протягом тривалішого часу порівняно з регулятором без такого обмеження. Отже, під час синтезу нечітких регуляторів існує достатній ступінь свободи у виборі параметрів функцій належності, що є важливою перевагою з практичної точки зору. Наявність альтернативних конфігурацій дає можливість додатково враховувати вимоги до енергоспоживання, обмежень виконавчих пристроїв, допустимого рівня впливів керування або особливостей конкретного об'єкта керування.

Окремої уваги заслуговують результати аналізу сигналів керування та енергії регулювання. Встановлено, що нечіткі регулятори витрачають більшу частину керуючого ресурсу на початковому етапі перехідного процесу, забезпечуючи швидке зменшення похибки та скорочення часу виходу системи на заданий режим. При цьому варіанти регуляторів із додатковими обмеженнями величини сигналу керування потребують більш тривалого збереження інтенсивного керуючого впливу порівняно зі структурами без таких обмежень. Отримані результати свідчать про необхідність урахування взаємозв'язку між динамічними характеристиками та енергетичними витратами під час проєктування систем керування для джерел живлення плазмового різання.

Перехідні характеристики досліджуваних нечітких регуляторів підтверджують потенційну перевагу нечіткого підходу для застосування в системах плазмового різання, де до динаміки регулювання висуваються підвищені вимоги. Саме нечіткі регулятори виявили здатність більш ефективно враховувати нелінійний характер процесів, що відбуваються в системі живлення плазмової дуги, забезпечуючи краще співвідношення швидкості, точності, та стійкості замкненої системи.

Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність використання нечіткої логіки та застосування базової лінійної нечіткої системи Sugeno як відправної точки для синтезу більш складних нелінійних законів керування. Запропонований підхід, заснований на ручному налаштуванні геометрії функцій належності дає змогу цілеспрямовано формувати необхідні динамічні властивості регулятора та забезпечує достатню гнучкість під час його адаптації до конкретних умов експлуатації.

Практична цінність проведеного дослідження полягає в тому, що отримані закономірності можуть бути безпосередньо використані під час подальшого синтезу інтелектуальних систем керування вищого порядку, зокрема нечітких PI- та PID-регуляторів, а також нейро-нечітких систем керування. Оскільки основні показники якості перехідних процесів частково піддаються екстраполяції на більш складні структури регуляторів, результати даної роботи можуть слугувати теоретичною та методологічною основою для подальшого розвитку високоточних систем керування джерелами живлення плазмового різання.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на синтез нечітких PI- та PID-регуляторів, розроблення формалізованих методів налаштування функцій належності та проведення експериментальної перевірки запропонованих підходів на реальному об'єкті керування.

REFERENCES

[1] Wikipedia. (2019). *Avtomatychnyi rehuliator [Automatic controller]*. https://uk.wikipedia.org/wiki/Автоматичний_регулятор [in Ukrainian].

[2] Shi, L., Miao, X., & Wang, H. (2019). An improved nonlinear proportional-integral-differential controller combined with fractional operator and symbolic adaptation algorithm. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, *42*(5), 927–941. https://doi.org/10.1177/0142331219879332

[3] Holovchuk, A. F. (2015). *Avtomatyka teplovykh protsesiv: Navchalnyi posibnyk [Automation of thermal processes: A textbook]* (p. 54). DIIT [in Ukrainian].

[4] Larycheva, L. P. (2016). *Konspekt lektsii z dystsypliny "avtomatychne rehuliuvannia ta upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy." [Lecture notes for the "automatic regulation and control of technological processes" course]* (p. 75). Dniprodzerzhynsk State Technical University. https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/7/2-7-kl31.pdf [in Ukrainian].

[5] Jin, Y., Li, Y., Jiang, C., & Yu, H. (2023). Review on the research progress of arc plasma power sources in china. *IEEE Access*, *11*, 141394–141405. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3342646

[6] Duarte-Mermoud, M. A., Aguila-Camacho, N., Gallegos, J. A., & Travieso-Torres, J. C. (2017). *Fractional-order model reference adaptive controllers for first-order integer plants* (pp. 121–151). springer.

[7] Jamil, A. A., Tu, W. F., Ali, S. W., Terriche, Y., & Guerrero, J. M. (2022). Fractional-order PID controllers for temperature control: A review. *Energies*, *15*(10). https://doi.org/10.3390/en15103800

[8] Li, S., Yu, X., Fridman, L., Man, Z., & Wang, X. (Eds.). (2017). *Advances in variable structure systems and sliding mode control-theory and applications* (1st ed.). Springer International Publishing.

[9] Wikipedia. (2024a). *Nonlinear control*. https://en.wikipedia.org/wiki/Nonlinear_control

[10] Wang, B., Hu, S. J., Sun, L., & Freiheit, T. (2020). Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, *56*, 373–391. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020

[11] Wikipedia. (2025). *Fuzzy control system*. https://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_control_system

[12] Wikipedia. (2024b). *Intelligent control*. https://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_control

[13] Garasumiv, V. M. (2020). Algorithm of adjustment of sub-regulator coefficients with fuzzy logic methods using. *Methods And Devices Of Quality Control*, *2*(45), 102–108. https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-2(45)-102-108 [in Ukrainian].

[14] Ling, Y. (2024). Enhanced control mechanisms in autonomous systems: Integrating fuzzy logic with PID controllers. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, *111*, 423–431. https://doi.org/10.54097/2t5ch313

[15] Dranyshnykov, L. (2022). Fuzzy modeling in control systems. *Matematične Modelûvannâ*, *46*(1), 7–15. https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(46)2022.258341

[16] Aner, E. A., Awad, M. I., & Shehata, O. M. (2024). Performance evaluation of PSO-PID and PSO-FLC for continuum robot's developed modeling and control. *Scientific Reports*, *14*. https://doi.org/10.1038/s41598-023-50551-0

[17] Putra, A. M., Maradona, H., & Rohmah, R. A. (2024). Comparison of proportional integral derivative and fuzzy logic controllers: A literature review on the best method for controlling direct current motor speed. *International Journal of Robotics and Control Systems*. https://doi.org/10.31763/ijrcs.v5i1.1701

[18] Miron, A., Cziker, A., & Beleiu, H. G. (2024). Fuzzy control systems for power quality improvement–a systematic review exploring their efficacy and efficiency. *Applied Sciences*. https://doi.org/10.3390/app14114468

[19] Petrovic, D. J., Lazic, M. M., Lazic, B. V. J., Blanusa, B. D., & Aleksic, S. O. (2022). Hybrid power supply system with fuzzy logic controller: Power control algorithm, main properties, and applications. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. https://doi.org/10.35833/mpce.2020.000069

[20] Sekar, R., Arunachalam, M., & Subramanian, K. (2024). Fuzzy-Proportional Integral Derivative Controller With Interactive Decision Tree. *Revue Roumaine Des Sciences Techniques – Série Électrotechnique Et Énergétique*. https://doi.org/10.59277/rrst-ee.2024.69.4.5

[21] Vereshchaho, Y. M., & Stohniienko, Y. V. (2023). Vplyv osoblyvostei imitatsiinoi modeli protsesiv plazmovoho obroblennia na pokaznyky yakosti upravlinnia dzherelom zhyvlennia plazmotrona [The influence of the characteristics of a simulation model of plasma processing on the quality metrics of plasmatron power supply control]. *Suchasni Problemy Avtomatyky Ta Elektrotekhniky – 2023: Materialy Vseukrainskoi Naukovo-Tekhnichnoi Konferentsii*, 39–41 [in Ukrainian].

[22] Vereshchago, E. M., Kostiuchenko, V. I., & Novogretskyi, S. M. (2023). Analysis of a DC converter working on a plasma arc. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (5), 31–36. https://doi.org/10.20998/2074-272x.2023.5.05

[23] Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *SMC-15*(1), 116–132. https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399

[24] Vereshchaho, Y. M., Stohniienko, Y. V., Zivenko, O. V., & Yeremenko, A. P. (2024). Stvorennia neiro-nechitkoho kontrolera dlia keruvannia dzherelom zhyvlennia [Design of a neuro-fuzzy controller for power supply control]. In A. V. Obrubov (Ed.), *Suchasni problemy avtomatyky ta elektrotekhniky: Materialy vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (pp. 52–59). Admiral Makarov National University of Shipbuilding; NUOS. https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/8246 [in Ukrainian].

[25] Vereshchaho, Y. M., Stohniienko, Y. V., & Maslyk, V. S. (2024). Rozrobka nechitkoi systemy keruvannia dlia dzherela zhyvlennia plazmotrona [Design of a fuzzy control system for a plasma torch power supply]. *Innovations in Shipbuilding and Ocean Engineering : XV International Scientific and Technical Conference : Proceedings*, 980–984 [in Ukrainian].

[26] Vereshchaho, Y. M., Kostiuchenko, V. I., Stohniienko, Y. V., & Hrieshnov, A. Y. (2024). Control of the dynamics of a pulse converter with soft switching operating with arc load. *Technical Electrodynamics*, (6), 21–30. https://doi.org/10.15407/techned2024.06.021 [in Ukrainian]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Вікіпедія. (2019). *Автоматичний регулятор*. https://uk.wikipedia.org/wiki/Автоматичний_регулятор

[2] Shi, L., Miao, X., & Wang, H. (2019). An improved nonlinear proportional-integral-differential controller combined with fractional operator and symbolic adaptation algorithm. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, *42*(5), 927–941. https://doi.org/10.1177/0142331219879332

[3] Головчук, А. Ф. (2015). *Автоматика теплових процесів: Навчальний посібник* (р. 54). ДНУЗТ.

[4] Ларичева, Л. П. (2016). *Конспект лекцій з дисципліни «автоматичне регулювання та управління технологічними процесами»* (р. 75). Дніпродзержинський державний технічний університет. https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/7/2-7-kl31.pdf

[5] Jin, Y., Li, Y., Jiang, C., & Yu, H. (2023). Review on the research progress of arc plasma power sources in china. *IEEE Access*, *11*, 141394–141405. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3342646

[6] Duarte-Mermoud, M. A., Aguila-Camacho, N., Gallegos, J. A., & Travieso-Torres, J. C. (2017). *Fractional-order model reference adaptive controllers for first-order integer plants* (pp. 121–151). springer.

[7] Jamil, A. A., Tu, W. F., Ali, S. W., Terriche, Y., & Guerrero, J. M. (2022). Fractional-order PID controllers for temperature control: A review. *Energies*, *15*(10). https://doi.org/10.3390/en15103800

[8] Li, S., Yu, X., Fridman, L., Man, Z., & Wang, X. (Eds.). (2017). *Advances in variable structure systems and sliding mode control-theory and applications* (1st ed.). Springer International Publishing.

[9] Wikipedia. (2024a). *Nonlinear control*. https://en.wikipedia.org/wiki/Nonlinear_control

[10] Wang, B., Hu, S. J., Sun, L., & Freiheit, T. (2020). Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, *56*, 373–391. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020

[11] Wikipedia. (2025). *Fuzzy control system*. https://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_control_system

[12] Wikipedia. (2024b). *Intelligent control*. https://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_control

[13] Гарасимів, В. М. (2020). Алгоритм налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора із використанням методів нечіткої логіки. *Методи Та Прилади Контролю Якості*, *2*(45), 102–108. https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-2(45)-102-108

[14] Ling, Y. (2024). Enhanced control mechanisms in autonomous systems: Integrating fuzzy logic with PID controllers. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, *111*, 423–431. https://doi.org/10.54097/2t5ch313

[15] Дранишников, Л. В. (2022). Нечітке моделювання в системах управління. *Математичне Моделювання*, *46*(1), 7–15. https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(46)2022.258341

[16] Aner, E. A., Awad, M. I., & Shehata, O. M. (2024). Performance evaluation of PSO-PID and PSO-FLC for continuum robot's developed modeling and control. *Scientific Reports*, *14*. https://doi.org/10.1038/s41598-023-50551-0

[17] Putra, A. M., Maradona, H., & Rohmah, R. A. (2024). Comparison of proportional integral derivative and fuzzy logic controllers: A literature review on the best method for controlling direct current motor speed. *International Journal of Robotics and Control Systems*. https://doi.org/10.31763/ijrcs.v5i1.1701

[18] Miron, A., Cziker, A., & Beleiu, H. G. (2024). Fuzzy control systems for power quality improvement – a systematic review exploring their efficacy and efficiency. *Applied Sciences*. https://doi.org/10.3390/app14114468

[19] Petrovic, D. J., Lazic, M. M., Lazic, B. V. J., Blanusa, B. D., & Aleksic, S. O. (2022). Hybrid power supply system with fuzzy logic controller: Power control algorithm, main properties, and applications. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. https://doi.org/10.35833/mpce.2020.000069

[20] Sekar, R., Arunachalam, M., & Subramanian, K. (2024). FUZZY-PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE CONTROLLER WITH INTERACTIVE DECISION TREE. *REVUE ROUMAINE DES SCIENCES TECHNIQUES – SÉRIE ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGÉTIQUE*. https://doi.org/10.59277/rrst-ee.2024.69.4.5

[21] Верещаго, Є. М., & Стогнієнко, Є. В. (2023). Вплив особливостей імітаційної моделі процесів плазмового оброблення на показники якості управління джерелом живлення плазмотрона. *Сучасні Проблеми Автоматики Та Електротехніки – 2023: Матеріали Всеукраїнської Науково-Технічної Конференції*, 39–41.

[22] Верещаго, Є. М., Костюченко, В. І., & Новогрецький, С. М. (2023). Аналіз перетворювача постійного струму, що працює на плазмову дугу. *Електротехніка і електромеханіка*, (5), 31–36. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.05

[23] Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *SMC-15*(1), 116–132. https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399

[24] Верещаго, Є. М., Стогнієнко, Є. В., Зівенко, О. В., & Єременко, А. П. (2024). Створення нейро-нечіткого контролера для керування джерелом живлення. In А. В. Обрубов (Ed.), *Сучасні проблеми автоматики та електротехніки: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції* (pp. 52–59). Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; НУК. https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/8246

[25] Верещаго, Є. М., Стогнієнко, Є. В., & Маслик, В. С. (2024). Розробка нечіткої системи керування для джерела живлення плазмотрона. *Інновації в Суднобудуванні Та Океанотехніці : XV Міжнародна Науково-Технічна Конференція : Матеріали*, 980–984.

[26] Верещаго, Є. М., Костюченко, В. І., Стогнієнко, Є. В., & Грєшнов, А. Ю. (2024). Керування динамікою імпульсного перетворювача з м'яким перемиканням, що працює на дугове навантаження. *Техн. електродинаміка*, (6), 21–30. Проблеми сучасної електротехніки – 2024: XVIII Міжнародна науково-технічна конференція, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, пр. Берестейський, 56, June 25–27, 2024. https://doi.org/10.15407/techned2024.06.021 (Published)

© Стогнієнко Є. В., Маслик В. С.
Дата першого надходження статті до видання: 06.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

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