

УДК 62-55:681.515

## ВИЗНАЧЕННЯ І АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЧІТКОГО П-РЕГУЛЯТОРА

М. Луцків, Б. Федина

Українська академія друкарства  
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна

*Визначено прями та інверсні статичні характеристики «вхід-вихід» нечіткого П-регулятора з двома функціями належності нечітких множин лінгвістичних змінних з нечіткими перетвореннями сигналу похибки регулювання і алгоритму нечіткого виводу із застосуванням оператора MAX-Prod. Розроблена структурна схема моделі нечіткого регулятора і симулятор статичних характеристик в пакеті MATLAB: Simulink. Подані результати імітаційного моделювання статичних характеристик залежності управління від сигналу похибки для нечіткого П-регулятора. Здійснено порівняльний аналіз статичних характеристик і встановлено, що вони суттєво відрізняються від характеристик традиційного регулятора. При нульовому сигналі похибки створюється випередження управління на об'єкт, що збільшує швидкодію системи автоматичного керування і підвищує статичну точність.*

*Запропоновано визначати інверсні статичні характеристики регуляторів за умови, що сигнал похибки на вході лінійно змінюється в межах  $[1 \leq e \leq 0]$ , які більш повно і наочно описують властивості регулятора в системі автоматичного керування при дії ступеневого завдання, що є перевагою. Визначено інверсні статичні характеристики традиційного і нечіткого П-регуляторів. Вони розташовуються вище характеристики традиційного регулятора, що забезпечує випереджене управління і зменшує статичну похибку системи автоматичного керування.*

**Ключові слова:** *нечіткий регулятор, модель, симулятор, аналіз, статичні характеристики, форсоване управління, точність.*

**Постановка проблеми.** На сьогодні вимоги щодо якості продукції та зменшення затрат на її виготовлення ставлять нові задачі при проектуванні систем автоматичного керування технологічними процесами і об'єктами при неповній інформації про об'єкт, зміні його параметрів та дії різних впливів. Основним недоліком систем автоматичного керування з традиційними П- та ПІ-регуляторами є те, що вони не забезпечують якості регулювання. Наприклад, збільшення коефіцієнта передачі П-регулятора викликає значні коливання в системі, що погіршує якість продукції, а при зменшенні коефіцієнта передачі – збільшується статична похибка [2, 6, 7]. Введення І-складової управління значно «відстає» від сигналу похибки, внаслідок чого зменшується швидкодія системи, що є недоліком [2, 6].

Сьогодні спостерігається розвиток і практичне застосування нечітких систем у різних галузях науки і техніки, у тому числі в системах автоматичного керування різноманітними об'єктами [2, 6]. В доступних джерелах мало уваги приділяється фізичній сутності синтезу і формуванню нечіткого управління на об'єкт, які принципово відрізняються від класичного. Традиційні регулятори описуються однією формулою (законом управління) і мають не більше двох - трьох параметрів налагодження. Натомість, нечіткі регулятори описуються великим числом (набором) часткових правил. Їх властивості залежать від прийнятої бази нечітких правил, кількості лінгвістичних термів, прийнятим нечітким виводом яких може бути декілька, тощо [1, 5].

Більшість науковців, інженерів та спеціалістів з теорії автоматичного керування, не мають базових знань з нечіткої логіки і нечіткого керування, які мають своєрідну специфіку і належним чином не вивчені. Зокрема, статичні властивості нечітких регуляторів, що утрудняє розробку, синтез, налагодження і впровадження нечітких систем автоматичного керування. Тому, задача визначення та аналіз статичних характеристик нечіткого П-регулятора є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Популярність нечітких систем обумовлена тим, що вони розробляються швидше, простіше і дешевше ніж традиційні промислові контролери. Їх можна розташувати на платі контролера [1, 7]. У монографії [5] викладено проблематику нечіткого моделювання і нечіткого керування. Подано арифметику нечітких чисел, математику нечітких множин, нечіткі моделі та методи їх моделювання. Розглянута проблематика проектування нечітких регуляторів на основі знань експерта керованого об'єкта і на основі моделі об'єкта регулювання. У книзі [8] розглянуті задачі проектування нечітких систем в пакеті *Fuzzy Logic Toolbox* обчислювальними засобами середовища MATLAB. Подані відомості в області теорії нечітких множин і нечіткої логіки та їх застосування для екстракції нечітких правил і методу прийняття рішень в нечітких умовах. У монографії [1] в загальному плані викладені методи проектування нечітких регуляторів, оснований на аналітичних виразах для управляючих впливів на виході нечіткого регулятора для різних функцій належності. Основну увагу приділено синтезу нечітких цифрових регуляторів різноманітних об'єктів із застосуванням пакету MATLAB: *Simulink*.

У монографіях [6, 7] подані різні версії нечітких контролерів, бази правил, структурні схеми різних типів регуляторів і їх аналіз. У роботах автора [3, 4] проведено аналіз систем автоматичного керування із спрощеною версією нечіткого П-регулятора, подані результати моделювання при збільшенні коефіцієнта передачі об'єкта. Встановлено, що при двократному збільшенні коефіцієнта в системі з нечітким регулятором перехідний процес практично не змінився. Натомість, в системі з традиційним П-регулятором перехідний процес досить коливальний, а перерегулювання більше 70 %. Отже, нечіткий П-регулятор стабільно працює при варіаціях коефіцієнта передачі об'єкта, що є перевагою.

Метою роботи є визначення прямих та інверсних статичних характеристик «вхід-вихід» нечіткого П-регулятора з двома функціями належності нечітких множин, розробка структурної схеми моделі регулятора і симулятора статич-

них характеристик в пакеті MATLAB: *Simulink*, налаштування параметрів і порівняльний аналіз властивостей нечіткого і традиційного П-регуляторів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Класичні посібники з теорії автоматичного керування розглядають математичні методи аналізу регуляторів і систем автоматичного керування, однак, мало уваги приділяють практичним задачам розробки, реалізації і визначенню параметрів налагодження регуляторів, фізичним процесам і обмеженням [2]. Зазвичай, аналоговий регулятор описують передавальною функцією або алгоритмом управління. У простому випадку вхідний сигнал регулятора – це похибка вихідної величини фізичного процесу (об'єкта регулювання). Для порівняння і зручності викладу матеріалу розглянемо класичний П-алгоритм управління

$$U(t) = k \times e(t), \quad (1)$$

де  $U(t)$  – управління об'єктом;

$e(t)$  – похибки регулювання (різниця між заданим значенням  $Y_0(t)$  і виходом  $Y$  об'єкта);

$k$  – підсилення регулятора (основний параметр налагодження).

Якщо припустити, що похибка регулювання лінійно змінюється від нуля до заданого значення, тоді вираз (1) буде виразом статичної характеристики регулятора, графік якої – пряма лінія, а нахил визначатиметься коефіцієнтом підсилення.

Для формування управління нечітким регулятором здійснюються нечіткі перетворення сигналу похибки відповідно до прийнятого нечіткого алгоритму управління, зокрема, фузифікація, дефузифікація, нечіткий вивід – формування управляючої дії на об'єкт, тощо. Розглянемо нечітку версію П-регулятора, яка базується на значеннях стану процесу регулювання. Для цього застосуємо лінгвістичні змінні: якщо стан процесу (похибка) від'ємна – В, додатна – D [1, 5, 6]. Число терм-множин за допомогою яких оцінюються лінгвістичні змінні, рівне двом, тоді управління описується нечіткою базою правил

$$R1 : \text{ЯКЩО } (e = B) \text{ ТО } (U = L), \quad (2)$$

$$R2 : \text{ЯКЩО } (e = D) \text{ ТО } (U = P)$$

де  $e$  – нормований сигнал похибки регулювання [ $-1 \leq e \leq 0$ ], вхід нечіткого регулятора;

$U$  – розмите управління, вихід нечіткого регулятора;

$L, P$  – нечіткі множини типу ліва і права зовнішні.

Після нечітких перетворень сигналу похибки, фузифікації і висновкування застосуємо алгоритм нечіткого виводу *MAX-Prod* [1, 5]. Для спрощення розв'язання задачі застосуємо моделювання нечіткого регулятора в пакеті MATLAB: *Simulink*. На основі викладеного розроблена структурна схема моделі нечіткого П-регулятора і симулятора статичних характеристик, яка подана на рис. 1.

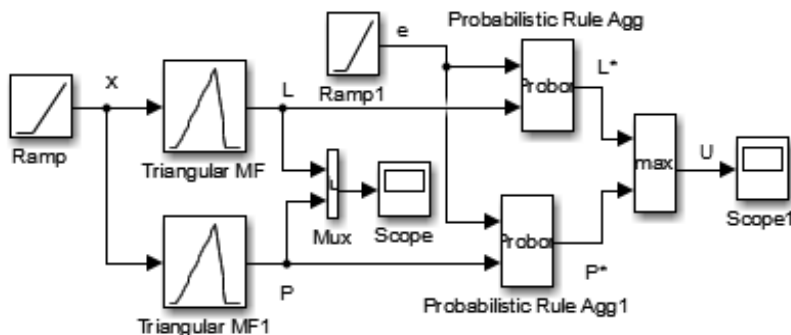


Рис. 1. Структурна схема моделі нечіткого регулятора і симулятора статичних характеристик

Схема нечіткого регулятора складається із двох основних блоків: фузифікації і висновкування, які реалізовані за виразом (1) засобами *Simulink*. Схема фузифікації складається з двох блоків *Triangular MF* функцій належності, які налаштовані на *L*-ліва і *P*-права зовнішні та активуються сигналом *X* блоку *Ramp*. Висновкування здійснюється операторами *MAX-Prod* на перші входи яких подаються функції належності, а на другі входи – сигнал похибки. На виході блоку *MAX* одержується нечітке управління *U*. Блоки *Scope* призначені для візуалізації і налаштування регулятора. Блоки нечітких функцій належності *Triangular MF* налагоджено на наступні параметри *L* [-2000; -1; 1], *P* [-1; 1; 2000] і для бази даних (2) та *L* [-2000; 0; 2], *P* [0; 2; 2000]. Результати імітаційного моделювання функцій належності подані на рис. 2.

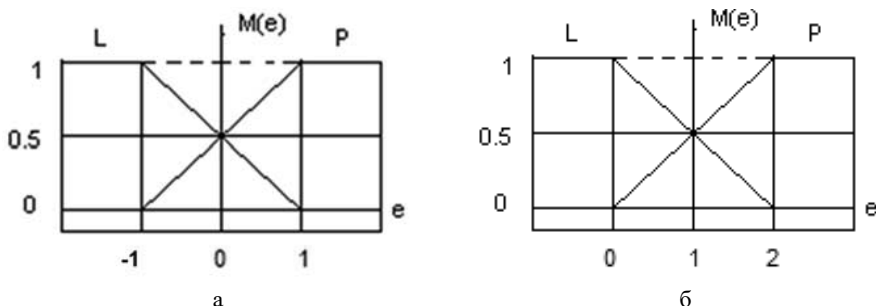


Рис. 2. Графіки функцій належності нечіткого П-регулятора

Графіки функцій належності подані на рис. 2,а для другої нечіткої бази даних є симетричні, натомість графіки для третьої бази даних є зміщені праворуч. Отже, розташування функцій належності залежить від прийнятої бази даних. Для побудови статичної характеристики «вхід-вихід» нечіткого регулятора налагодили другий блок *Ramp* на генерування лінійно-наростаючого сигналу похибки в межах  $[0 \leq e \leq 1]$ . Результати імітаційного моделювання статичних характеристик «вхід-вихід» нечіткого регулятора для другої нечіткої бази даних подані на рис. 3.

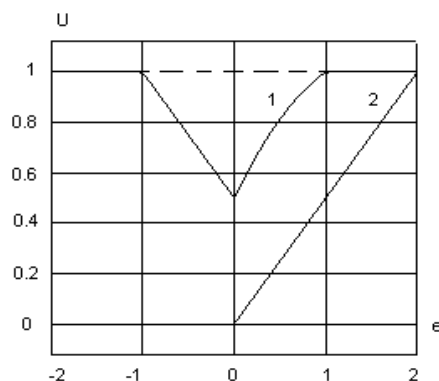


Рис. 3. Статична характеристика нечіткого П-регулятора із симетричними функціями належності

Для порівняння на рисунку подана статистична характеристика традиційного П-регулятора визначена за виразом (1), яка є прямою лінією 2. Якщо сигнал похибки  $e=0$ , тоді управління рівне нулеві. Статистична характеристика нечіткого П-регулятора для симетричних функцій належності є  $V$ -подібною кривою і обмежена  $U=1$ , що обумовлено обмеженістю функції належності. Якщо сигнал похибки  $e=0$ , тоді управління становить  $U=0,5$ . При збільшенні сигналу похибки управління майже лінійно збільшується. Оскільки, статична характеристика «вхід-вихід» регулятора визначає його головні властивості, а саме здатність нечіткого регулятора змінювати динамічні властивості системи автоматичного керування, тому проаналізуємо як створюється управління в традиційному П-регуляторі, якщо сигнал похибки  $e=0$ . Відповідно до алгоритму (1) управління створюється шляхом підсилення сигналу похибки. Оскільки, сигнал похибки  $e=0$ , тому традиційний П-регулятор не забезпечує управляючої дії на об'єкт регулювання. Для її створення необхідна похибка. Щоб зменшити похибку необхідно збільшувати коефіцієнт підсилення регулятора, це викликає коливання в системі автоматичного керування, що є відомим недоліком П-регулятора [1, 6, 7]. Натомість нечіткий П-регулятор при нульовому сигналі похибки створює управління  $U=0,5$  і забезпечує управляючу дію на об'єкт, що є його перевагою.

В контексті викладеного виникає питання, як впливає вибір нечіткої бази даних на властивості регулятора. Застосуємо дещо інші лінгвістичні змінні – похибка мала (М), похибка велика (В). Тоді управління описуватиметься іншою нечіткою базою даних

$$R1: \text{ЯКЩО } (e = M) \text{ ТО } (U = L), \quad (3)$$

$$R2: \text{ЯКЩО } (e = B) \text{ ТО } (U = P)$$

де  $L, P$  – нечіткі лінгвістичні множини, які описують сигнал похибки  $L$  – сигнал малий,  $P$  – сигнал великий, кожному правилу відповідає сформоване розмите управління  $U$ .

Для побудови статичної характеристики «вхід-вихід» нечіткого регулятора налагодили параметри функцій належності  $L$   $[-2000; 0; 2]$ ,  $P$   $[0; 2; 2000]$ . Результати імітаційного моделювання статичних характеристик нечіткого регулятора для третьої нечіткої бази даних подані на рис. 4.

Для порівняння на рисунку подана статична характеристика 2 для традиційного П-регулятора, яка є прямою лінією і визначена за виразом (1). Якщо сигнал похибки  $e=0$ , тоді управління рівне нулеві, тобто відповідає алгоритму (1). Натомість статична характеристика нечіткого П-регулятора з несиметричними функціями належності є  $V$ -подібною кривою обмеженою до  $U=1$ . На відміну від попередньої характеристики (див. рис. 3) при похибці  $e=0$ , управління удвічі більше і становить  $U=1$ . Отже, створюється випередження початкового управління до максимального значення, що є перевагою.

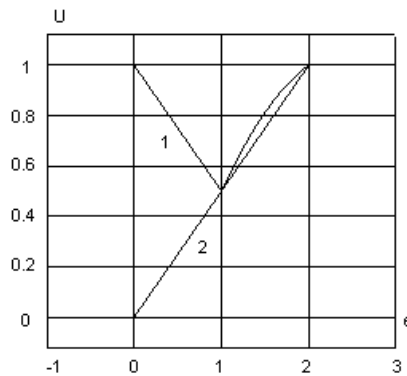


Рис. 4. Статична характеристика нечіткого П-регулятора для третьої бази даних із несиметричними функціями належності

Запропоновано оцінювати властивості регулятора інверсними статичними характеристиками «вхід-вихід», за умови що сигнал похибки лінійно змінюється в межах  $[1 \leq e \leq 0]$ . Результати імітаційного моделювання інверсних статичних характеристик нечіткого П-регулятора для несиметричних функцій належності подані на рис. 5.

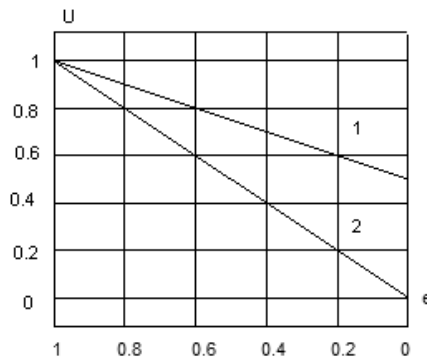


Рис. 5. Інверсні статичні характеристики нечіткого П-регулятора з несиметричними функціями належності

Для порівняння на рисунку подана інверсна статична характеристика для традиційного П-регулятора, яка є прямою лінією 2. Якщо сигнал похибки  $e=1$ , тоді управління  $U=1$ , поступово лінійно зменшується і прямує до нуля, тобто відповідає алгоритму (1). Інверсна статична характеристика нечіткого П-регулятора розташована вище попередньої, поступово лінійно зменшується і прямує до  $U=0,5$ . Інверсні статичні характеристики більш повно фізично описують властивості регулятора при їх роботі в системі автоматичного керування при дії ступеневого завдання, що є їх перевагою.

**Висновки.** Описано просту версію нечіткого П-регулятора значеннями стану процесу регулювання за допомогою лінгвістичних змінних: похибка від'ємна, додатна, у якому застосовано дві функції належності нечітких множин і оператор *MAX-Prod* для організації виводу нечіткого управління. Розроблено структурну схему моделі регулятора і симулятор в пакеті MATLAB: *Simulink* для побудови статичних характеристик. Подано результати імітаційного моделювання статичних характеристик «вхід-вихід» нечіткого П-регулятора. Встановлено, що його статичні характеристики суттєво відрізняються від традиційного регулятора. При нульовому сигналі похибки створюється випередження управління на об'єкт, що є його перевагою.

Запропоновано оцінювати властивості регуляторів інверсними статичними характеристиками за умови що сигнал похибки лінійно змінюється в межах  $[1 \leq e \leq 0]$ , які більш повно і фізично описують властивості регулятора при його роботі в системі автоматичного керування при дії ступеневого завдання, що є їх перевагою. Подані результати імітаційного моделювання інверсних статичних характеристик для традиційного і нечіткого П-регуляторів. Встановлено, що інверсна статична характеристика нечіткого П-регулятора розташована вище характеристики традиційного регулятора, тому забезпечує випереджене управління і підвищує статичну точність регулювання в системі автоматичного керування.

### Список використаних джерел

1. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления Монография. – К.: Радиоаматор, 2008. – 972с.
2. Жуков К. Г. Модельное проектирование встраиваемых систем в LabVIEW. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 688 с.
3. Луцків М. М. Системи автоматичного керування з спрощеною версією нечіткого Р-контролера. Комп'ютерні технології друкарства : зб. наук. праць. – Львів: 2017, № 2(38), С. 16-24.
4. Луцків М. М., Дурняк Б. В. Нечіткий ПІ-регулятор. Опис до патенту на корисну модель. Бюл. № 8. 25.02.2019. С. 1-4.
5. A. Piegat. Modelowanie i sterowanie rozmyte, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa. 2003. – 785 s.
6. I. Brzózka. Regulatore i układy automatyki. Wydawnictwo MIKOMA. , Warszawa. 2004. – 343 s.
7. J. Kwaśniewski. Sterowniki PLC w praktyce inżynierskiej. Wydawnictwo BTC. Legionowo. 2008. – 344 s.

8. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия. Телеком, 2007. – 288 с.

### REFERENCES

1. Gostev V. I. (2008). Nечetkie regulatory v sistemah avtomaticheskogo upravlenija Monografija. – K.: Radioamator– 972s. (in Russian)
2. Zhukov K. G. (2011). Model'noe proektirovanie vstraivaemyh sistem v LabVIEW. – M.: DMK Press - 688 s. (in Russian)
3. Luckiv M. M. (2017). Systemy avtomatichnoho keruvannya z sproshhenoyu versiyeyu nechitkoho R-kontrolera. Komp'yuterni tekhnolohiyi druzarstva : zb. nauk. prac". – L'viv: № 2(38), s. 16-24. (in Ukrainain)
4. Luckiv M. M., Durnyak B. V. (2019). Nечitkyj PI-rehulyator. Opys do patentu na korysnu model". Byul. № 8. 25.02.2019. s. 1-4. (in Ukrainain)
5. A. Piegat. (2003). Modelowanie i sterowanie rozmyte, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa. 785 s. (in Polish)
6. I. Brzózka. (2004). Regulatore i układy automatyki. Wydawnictwo MIKOMA. , Warszawa. 343 s. (in Polish)
7. J. Kwaśniewski. (2008). Sterowniki PLC w praktyce inżynierskiej. Wydawnictwo BTC. Legionowo. 344 s. (in Polish)
8. Shtovba S.D. (2007). Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB. M.: Gorjachaja linija. Telekom, 288 s. (in Russian)

DOI 10.32403/2411-9210-2020-1-43-23-31

### DETERMINATION AND ANALYSIS OF STATIC CHARACTERISTICS OF FUZZY P-REGULATOR

M. Lutskiv, B. Fedyna

*Ukrainian Academy of Printing,  
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine  
lutolen@i.ua*

*The direct and inverse static characteristics of the “input-output” fuzzy P-regulator with two functions of fuzzy sets of linguistic variables with fuzzy transformations of the control error signal and the fuzzy output algorithm using the MAX-Prod operator have been determined. The block diagram of the fuzzy regulator model and the static characteristics simulator in the MATLAB: Simulink package have been developed. The results of simulation modelling of static characteristics of control dependence on error signal for fuzzy P-regulator have been presented. A comparative analysis of static characteristics has been performed and it has been found that they differ significantly from the characteristics of a traditional regulator.*



*A zero error signal creates an advance control over the object, which increases the speed of the automatic control system and increases the static accuracy.*

*It is suggested to determine the inverse static characteristics of the regulators provided that the error signal at the input varies linearly within  $[-1 \leq e \leq 0]$ , which more fully and clearly describe the properties of the regulator in the automatic control system under the action of a step task, which is an advantage. The inverse static characteristics of traditional and fuzzy P-regulators have been determined. They are located above the characteristics of the traditional regulator, which provides the advanced control and reduces the static error of the automatic control system.*

**Keywords:** *fuzzy controller, model, simulator, analysis, static characteristics, forced control, accuracy.*

*Стаття надійшла до редакції 06.08.2020.*

*Received 06.08.2020.*