УДК 681.511 DOI 10.31548/energiya2019.05.005

МЕТОД СИНТЕЗУ ШВИДКОДІЮЧИХ FUZZY-РЕГУЛЯТОРІВ

Ю. О. Ромасевич, доктор технічних наук, доцент

В. С. Ловейкін, доктор технічних наук, професор

А. П. Ляшко, кандидат технічних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: romasevichyuriy@ukr.net

Анотація. *Розроблено метод синтезу швидкодіючих автоматичних регуляторів на основі fuzzy-логіки. Метод є багатоетапною процедурою, в якому результати попереднього етапу використовуються у поточному. Ідея, на якій ґрунтується метод, полягає в тому, що тривалість доступу до отриманої в ході застосування методу функції є значно меншою, ніж тривалість доступу до функції вихідного fuzzy-регулятора. Сутність методу полягає у синтезі fuzzy-регулятора, побудові на його основі табульованої функції у вигляді „вхід-вихід”, апроксимації отриманих даних за допомогою поліноміальної або сплайнової моделі та оптимізації параметрів моделі. Наведено детальний опис окремих етапів методу та вказані рекомендації стосовно їх виконання.*

Для підтвердження ефективності розробленого методу було виконано синтез швидкодіючого fuzzy-регулятора для задачі регулювання швидкості руху транспортного засобу. Вектор вхідних змінних містив дві компоненти: похибку швидкості та її інтеграл. Вихідний сигнал регулятора відповідав рушійному зусиллю приводу транспортного засобу. Для вхідних змінних було прийнято по три терми, для вихідної – п’ять. У розрахунках використані найпростіші л- та z-подібні функції приналежності.

На основі розробленого fuzzy-регулятор, був отриманий його швидкодіючий аналог, який дозволив покращити якість регулювання швидкості за величиною середньоінтегральної похибки.

Проведено статистичний аналіз швидкодії доступу до функцій швидкодіючого та вихідного fuzzy-регуляторів. Встановлено, що швидкодія першого на два порядки більша, що позитивно відобразиться на зниженні вимог до апаратного забезпечення fuzzy-регуляторів.

Ключові слова: **fuzzy-регулятор, алгоритм, швидкодія, моделювання, якість, апроксимація**

Актуальність. Автоматичні регулятори, які побудовані на основі fuzzy-логіки, в основному використовуються при недостатній ідентифікації об’єкта регулювання, але наявності досвіду його регулювання, в нелінійних системах, ідентифікація яких занадто складна, а також у випадках, коли за умовами задачі

необхідно використовувати знання експерта [1]. Прикладами використання fuzzy-регуляторів може бути доменна піч або колона ректифікації, математичні моделі яких містять багато емпіричних коефіцієнтів, що змінюються в широкому діапазоні і викликають велику складність при їх ідентифікації [1, 2]. У той же час кваліфікований оператор досить добре керує такими об'єктами, користуючись показами приладів і накопиченим досвідом.

При достатньо великій розмірності вхідного та вихідного векторів fuzzy-регулятора, а також у випадку, коли база експертних правил є доволі об'ємною, виникає необхідність виконання значної кількості арифметичних та логічних розрахунків у режимі реального часу. Усунення цього недоліку є актуальною задачею, яка дозволить підвищити швидкодію fuzzy-регуляторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існує значна кількість наукових публікацій стосовно теоретичних та прикладних питань нечітких систем керування, зокрема fuzzy-регуляторів. Наприклад, у наукометричній базі Web of Science (Core Collection) на 4 вересня 2019 року знаходилось 11547 наукових праць з цієї тематики. У базі Scopus на цю ж дату налічувалось 16870 праць (запити у обох базах виконувались за темою „fuzzy-controller"). Це говорить про високий ступінь зацікавленості наукової спільноти у розвитку і використанні технологій автоматичного регулювання, які базуються на fuzzy-логіці.

У цих працях наведено результати застосування нечітких регуляторів для: руху мобільних роботів [3, 4] та груп роботів [5]; керування передачею даних у мережах (зокрема, для підвищення якості передачі потокового відео [6] та для передачі голосових повідомлень через мережу інтернет [7]); регулювання параметрів технологічних процесів металургії (зокрема, температури змієвика полосового стану гарячої прокатки сталі [8], продуктивності шнекового опорного верстата [9]); регулювання руху двигунів змінного струму (зокрема, для синхронних двигунів із постійними магнітами [10] та для лінійних синхронних двигунів [11], асинхронних двигунів [12]); регулювання руху двигунів постійного струму [13]; регулювання енергетичних систем [14], керування повітряними суднами [15].

Аналізуючи ці праці можна вказати переваги fuzzy-регуляторів: 1) вони дозволяють отримати навіть для нелінійних систем керування властивість робастності; 2) для їх синтезу не потрібна математична модель об'єкта регулювання; 3) вони дозволяють проектувати систему регулювання на основі лінгвістичних даних (із використанням досвіду експертів). Разом з тим, fuzzy-регуляторам властиві певні недоліки: 1) відносна складність синтезу нечітких регуляторів (наприклад, у частині складання бази експертних правил, задання форм функцій приналежності, їх кількості та розташування тощо); 2) неможливість ґрунтовного математичного аналізу нечітких систем регулювання існуючими методами теорії автоматичного регулювання; 3) невисока точність регулювання; 4) збільшення вхідних змінних регулятора значно ускладнює обчислення, які у fuzzy-регуляторі повинні виконуватись у режимі реального часу.

Мета дослідження – розробка методу синтезу швидкодіючих fuzzy-регуляторів.

Матеріали і методи дослідження. Дамо опис методу підвищення швидкодії регуляторів, які ґрунтуються на основі fuzzy-логіки. Першим етапом методу є синтез fuzzy-регулятора, який виконується на основі бази експертних знань (правил). Цей етап полягає у використанні алгоритмів нечіткого висновку за Мамдані, Цукамото, Ларсена або Сугено [16].

На другому етапі виконується моделювання процесу регулювання для типових, для даного об'єкта регулювання, режимах його експлуатації. При цьому за допомогою оціночних показників (наприклад, за показниками *ITAE*, *IAE*, *ISE*, *ITSE*, часом регулювання, перерегулюванням тощо) визначається якість регулювання. Якщо вона прийнятна, то переходять до наступного етапу, якщо ні – то змінюють параметри функцій приналежності до термів та/або кількість термів вхідних та вихідних змінних регулятора.

Наступний етап полягає у побудові багатоаргументної табульованої функції fuzzy-регулятора у вигляді „вхід-вихід" (вхід і вихід у загальному випадку представляють собою вектори). Це виконується шляхом подачі на вхід fuzzy-регулятора наборів вхідних величин та розрахунку його вихідних значень. Вхідні

величини повинні відповідати можливим на практиці комбінаціям. Можна рекомендувати два способи побудови таких комбінацій вхідних змінних x_i ($i \in (\overline{1,\ n})$, тут n – кількість вхідних змінних або розмірність вхідного вектору), які змінюються в областях $x_{i.\min} \ldots x_{i.\max}$. Перший полягає у тому, що встановлюють крок дискретизації для кожного із компонентів вхідного вектору Δx_i і виконують рівномірний перебір усіх можливих комбінацій компонентів вхідного вектор для дискретних значень x_i. У цьому випадку об'єм вибірки „вхід-вихід" буде складати:

$$N = \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{x_{i.\max} - x_{i.\min}}{\Delta x_i} + 1 \right). \tag{1}$$

Другий спосіб побудови комбінацій для вхідних змінних x_i відповідає випадковому вибору їх дискретних значень у областях $x_{i.\min} \ldots x_{i.\max}$. Для того, щоб забезпечити достатню рівномірність можливих комбінацій вхідних змінних об'єм вибірки повинен бути достатньо значним (сотні або тисячі пар „вхід-вихід"). Зазначимо, що третій етап є доволі тривалим і складним (у сенсі кількості розрахунків). Це зумовлено тим, що тривалість доступу до функції fuzzy-регулятора є відносно значною. Для зберігання табульованої функції fuzzy-регулятора необхідно мати необхідний об'єм пам'яті. Очевидно, що для цієї мети не підходить пам'ять мікроконтролера, тому ці розрахунки необхідно проводити із використанням спеціалізованого програмного забезпечення на ПК.

На четвертому етапі виконують апроксимацію табульованої функції із використанням однієї або декількох моделей (як правило, поліноміальної, або сплайнової). На цьому етапі також перевіряють параметри апроксимаційних моделей (наприклад, коефіцієнтів полінома) на предмет їх статистичної достовірності.

На п'ятому етапі виконується оптимізація параметрів апроксимаційної моделі на основі чисельних методів. Знайдені на попередньому етапі чисельні значення параметрів моделі (наприклад, коефіцієнти апроксимаційного полінома) є початковим наближенням до оптимальних, які знаходяться на п'ятому етапі у ході ітераційної процедури чисельної оптимізації. У цьому випадку параметри моделі є аргументами оптимізаційної задачі, а критерієм оптимізації може

виступати: *ITAE, IAE, ISE, ITSE*, час регулювання, перерегулювання або інший показник.

На шостому етапі виконують оцінку якості регулювання за комплексом оціночних показників. Вона повинна бути не гіршою, ніж у вихідного fuzzy-регулятора. Якщо якість регулювання гірша, то повертаються до четвертого етапу та змінюють апроксимаційну модель (наприклад, замінюють поліном сплайн-моделлю), або змінюють кількість її параметрів (наприклад, збільшують порядок полінома).

Результати досліджень та їх обговорення. Для того, щоб проілюструвати розроблений метод синтезу швидкодіючих fuzzy-регуляторів наведемо приклад виконання розрахунків для задачі регулювання швидкості транспортного засобу. Зазначимо, що у розрахунках використані відносно прості моделі та залежності. Це викликано необхідністю якомога точніше, по можливості без несуттєвих деталей, передати сутність застосування методу.

Нехай рух транспортного засобу описується таким диференціальним рівнянням:

$$m\ddot{x} = u\left(e, \int_0^t e dt\right) - w, \tag{2}$$

де x – узагальнена координата руху транспортного засобу; m – зведена до поступального руху маса транспортного засобу; w – збурення, що діє на транспортний засіб; u – керування, яке є функцією поточної похибки e відпрацювання заданої швидкості (уставки) v та інтеграла похибки $\int_0^t e dt$; e – поточна похибка регулювання швидкості руху транспортного засобу, яка визначається наступним чином: $e=\dot{x}-v$. Таким чином, ми розглядаємо найпростіший випадок fuzzy-ПІ-регулятора.

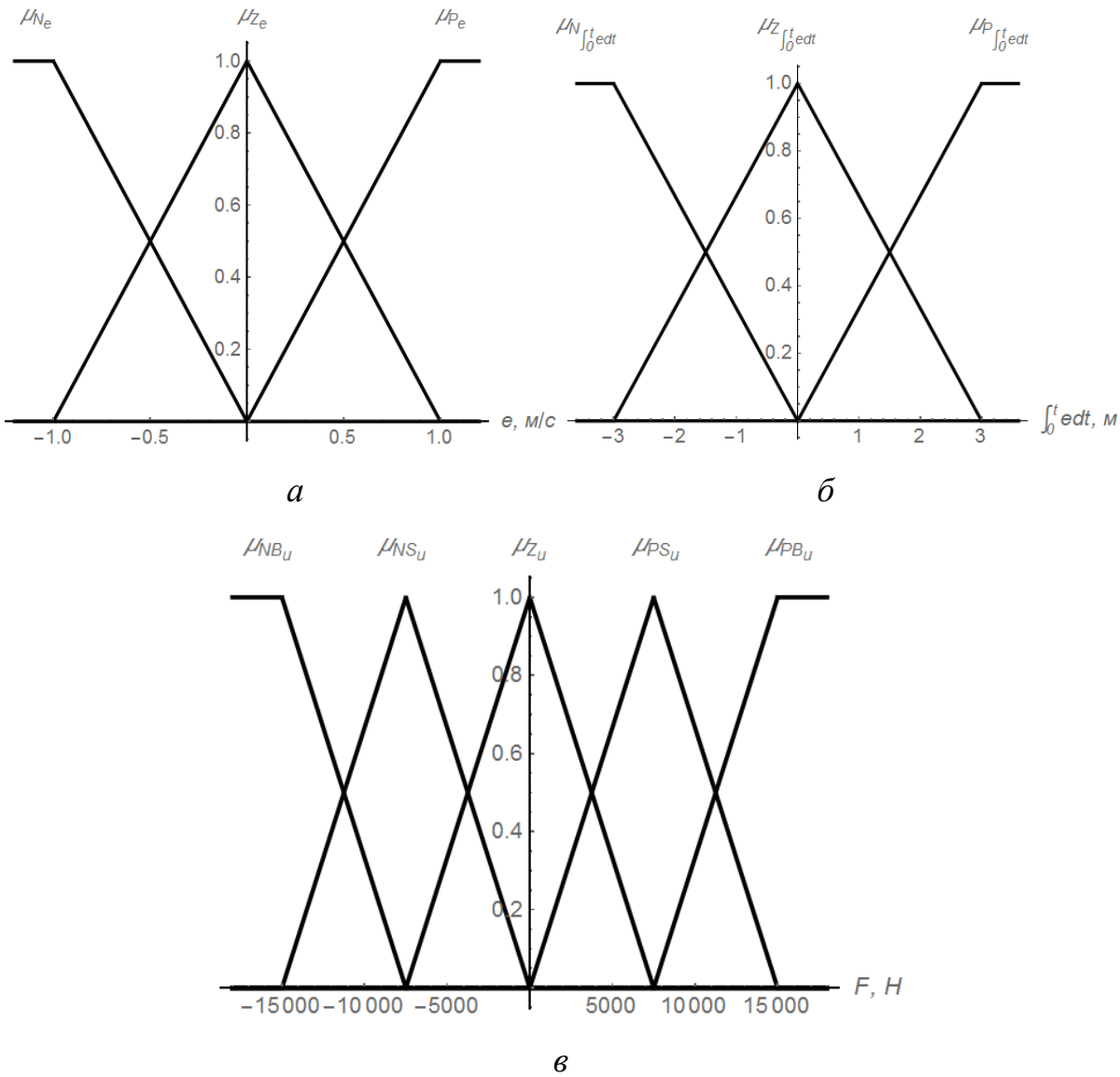

Рис. 1. Графіки функцій приналежності до термів:

а - похибки; *б* - інтеграла похибки; *в* - керування (вихідна величина fuzzy-регулятора)

Задача синтезу fuzzy-регулятора полягає у стабілізації швидкості руху транспортного засобу відносно уставки *v*. Вихідним етапом такого синтезу є виділення термів для вхідних та вихідних змінних. Для розглядуваного випадку виділимо по три терми (*N*, *Z*, *B*) для кожної вхідної змінної. Для вихідної змінної fuzzy-регулятора *u* оберемо п’ять термів (*NB*, *NS*, *Z*, *PS*, *PB*). У розрахунках обрані л- та z-подібні форми функцій приналежності до термів (рис. 1). Нижніми індексами на рис. 1 позначені терми відповідних вхідних та вихідних величин.

Наступним етапом є побудова бази експертних правил. Оскільки вхідних величин лише дві, а вихідна – одна, то зручно вказану базу правил представити у вигляді таблиці (табл. 1). Правила, які наведені у формі табл. 1, логічно випливають із практичного досвіду регулювання швидкості руху транспортного засобу.

1. База експертних правил для синтезу fuzzy-регулятора

e \ $\int_0^t edt$	$N_{\int_0^t edt}$	$Z_{\int_0^t edt}$	$P_{\int_0^t edt}$
N_e	PB_u	PS_u	Z_u
Z_e	PS_u	Z_u	NS_u
P_e	Z_u	NS_u	NB_u

Для реалізації етапу дефазифікації використаємо підхід Мамдані, тобто чисельне значення керування u будемо шукати як центр ваги складної фігури. У результаті отримаємо функцію, яка реалізує fuzzy-регулятор: її аргументами є похибка e та її інтеграл $\int_0^t edt$, а виходом – керування u.

Останній етап синтезу fuzzy-регулятора полягає у моделюванні його роботи та її оцінці. Для цього побудуємо графіки функцій, які відповідають розгону транспортного засобу масою m=5000 кг зі стану спокою до усталеної швидкості v=5 м/с при дії зовнішніх збурень w, які моделюються за допомогою випадкової функції, що змінюється у межах від 0 до 3750 Н.

На рис. 2 представлені відповідні графічні залежності, з яких видно значне перерегулювання швидкості та відносно повільний вихід на задану швидкість (уставку v).

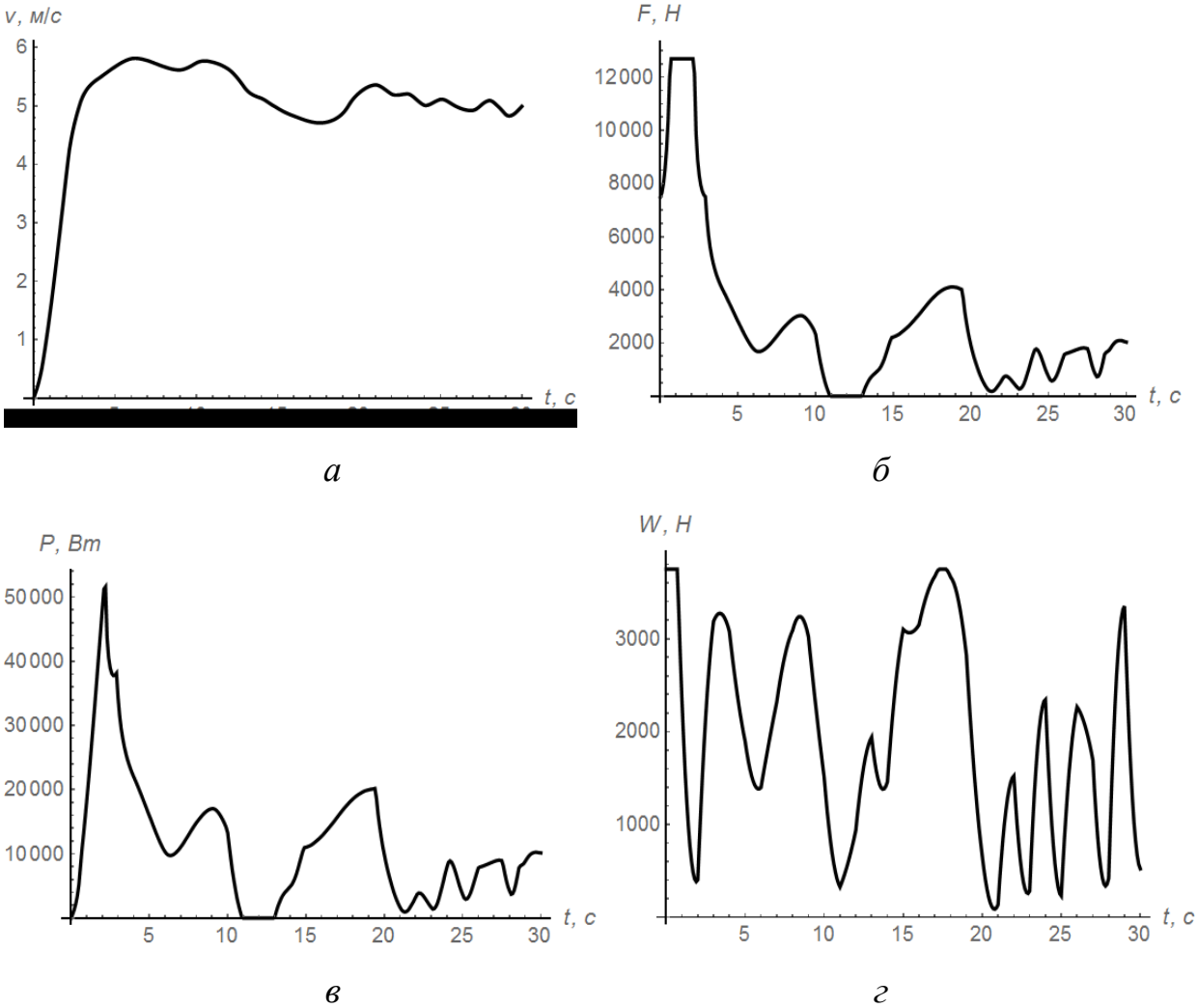

Рис. 2. Графіки функцій:

а - швидкості руху транспортного засобу $\dot{x}$; *б* - рушійного зусилля F; *в* - потужності приводу; *г* - зовнішніх збурень w

Для мінімізації перерегулювання та інших небажаних показників, наприклад, значної пікової потужності приводу транспортного засобу (рис. 2, *в*), яка рівна 51591 Вт, необхідно модифікувати базу правил та/або змінювати кількість та/або форму функцій приналежності до термів вхідних та вихідної змінних регулятора. Однак, вказані розрахунки виходять за рамки даного дослідження.

Графіки, які представлені на рис. 2, показують прийнятну якість регулювання в околі уставки швидкості. Таким чином, fuzzy-регулятор руху транспортного засобу синтезовано.

У подальшому виконаємо синтез швидкодіючого регулятора, який би мав бажані властивості отриманого fuzzy-регулятора та характеризувався значно кращою швидкодією.

Початковий етап побудови швидкодіючого fuzzy-регулятора передбачає розрахунок табульованої функції. Для того, щоб забезпечити достатню рівномірність дискретизації функції fuzzy-регулятора, об'єм вибірки прийнято рівним 2000. Вибір величин вхідних змінних (похибки та інтеграла похибки), при яких виконувався розрахунок, був випадковим.

Надалі було виконано апроксимацію табульованої функції за допомогою полінома. У розрахунках для цього використана така залежність:

$$u_a = \sum_{i=1}^{n} A_i e^i + \sum_{i=1}^{n} B_i \left(\int_0^t e dt \right)^i , \qquad (3)$$

де A_i та B_i – коефіцієнти полінома, які визначаються виходячи із мінімізації середньоквадратичної похибки апроксимації; n – порядок полінома (у рамках даного дослідження приймемо n=3).

У моделі (3) не використані члени, які відображають добутки степенів похибки та інтеграла похибки. Таке обмеження дозволяє спростити розрахунки, які мають метою лише проілюструвати метод. З цією ж метою порядок полінома (3) обмежений третім степенем.

Оцінки параметрів апроксимаційної функції u_a, які розраховані із використанням методу найменших квадратів, наведені у таблиці 2. Всі розрахунки виконані для довірчого рівня 0,95. Дослідження статистичної значимості параметрів виконано за допомогою критерію Стьюдента.

Уточнена модель апроксимаційної функції (полінома u_a) не має коефіцієнтів A_2 та B_2. Параметри уточненої апроксимаційної функції наступні: A_1=-1655,74, A_3=-34,30, B_1=-4933,99, B_3=-932,04. Коефіцієнт детермінації R уточненої апроксимаційної функції рівний 0,985, що вказує на досить точне відображення моделлю (3) табульованої функції.

2. Параметри функції u_a

Параметр	Оцінка параметра	Статистична значущість
A_1	-1656,06	значущий
A_2	4,23	незначущий
A_3	-34,19	значущий
B_1	-4934,42	значущий
B_2	-50,62	незначущий
B_3	-932,56	значущий

Надалі перейдемо до оптимізації параметрів функції u_a. Для цього використаємо чисельні значення параметрів (коефіцієнтів A_1, A_3, B_1, B_3), у якості першого наближення. Для визначення оптимальних значень коефіцієнтів сформуємо MISO-функцію. В тілі MISO-функції виконується підстановка чисельних значень коефіцієнтів A_1, A_3, B_1, B_3 у вираз (3), чисельне інтегрування рівняння (2) та розрахунок значення критерію оптимізації, який у даному дослідженні описується такою залежністю:

$$I_{IPTEC} = \int_0^T t^{\rho} |e|^{\varepsilon} |u|^{\nu} dt, \tag{4}$$

де ρ, ε і ν – показники степенів часу, похибки та функції регулювання, які у загальному випадку не є цілими числами. У рамках цього дослідження прийнято: ρ=2, ε=2 і ν=2.

Для чисельної оптимізації був використаний метод ME-PSO [17]. При використанні цього методу прийняті такі параметри: кількість ітерацій 20; кількість часточок 20; прийнятна швидкість зменшення глобального найкращого 0,005.

На початковій ітерації значення глобального найкращого (global best) відповідало значенню оптимізаційного критерію I_{IPTEC}, яке було отримано із використанням відомих чисельних значень коефіцієнтів A_1, A_3, B_1, B_3. Пошук оптимальних значень цих коефіцієнтів виконувався у заданих межах, які були отримані із використанням таких залежностей:

$$\begin{cases} A_{i.\max} = A_i(1+\Delta A_i); \\ A_{i.\min} = A_i(1-\Delta A_i), \end{cases} \quad (5)$$

де $A_{i.\max}$ та $A_{i.\min}$ – відповідно верхня та нижня межі області пошуку коефіцієнта A_i; ΔA_i – відносна „віддаленість” меж $A_{i.\max}$ та $A_{i.\min}$ відносно поточного (прийнятого в якості першого наближення) значення коефіцієнта A_i. Зазначимо, що у виразах (5) використана симетрична побудова меж областей пошуку коефіцієнтів. У загальному випадку одна із меж може знаходитись далі від початкового значення коефіцієнта A_i, іж інша. Аналогічні до (4) залежності справедливі і для коефіцієнтів B_i. У рамках даного дослідження прийнято ΔA_i=ΔB_i=0,5. Такі великі значення обґрунтовано тим, що було використано алгоритм ME-PSO, який має досить потужні пошукові властивості.

У результаті роботи методу ME-PSO були отримані оптимізовані значення коефіцієнтів полінома: A_1=-2459,12, A_3=-1429,36, B_1=-807,83, B_3=-19,85. Таким чином, виконано синтез функції u_a, яка може замінити вихідний fuzzy-регулятор.

На етапі оцінки роботи швидкодіючого fuzzy-регулятора розраховано значення показників якості регулювання вихідного та швидкодіючого fuzzy-регуляторів. Такими показниками виступали: середньоінтегральне значення похибки I_{IAE}, $t_p^{-1}\int_0^{t_p} edt$ середньоінтегральне значення регулювання I_{IAC}, $t_p^{-1}\int_0^{t_p} |u|dt$; тривалість регулювання, t_p=t при $|\dot{x}(t)-v|\leq 0{,}005v$; перерегулювання $\varepsilon_{\max}$, $\frac{\max(\dot{x}-v)}{v}\cdot 100$. Всі отримані у ході моделювання дані занесені до таблиці 3.

Аналізуючи дані, наведені в табл. 3, приходимо до висновків, що оптимізація коефіцієнтів A_1, A_3, B_3, B_3 за критерієм I_{IPTEC} дає змогу значно зменшити значення величини I_{IAE} при практично незмінних інших показниках якості регулювання.

Однією із суттєвих переваг розробленого fuzzy-регулятора є те, що він має значно більшу швидкодію. Це пов’язано з тим, що для розрахунку вектору керування необхідно лише підставити значення вхідних змінних у поліноміальну залежність (3). Такі розрахунки не представляють проблеми (у сенсі швидкодії їх виконання) для сучасних мікроконтролерних пристроїв. Швидкодіючий fuzzy-

регулятор не вимагає значних обчислювальних ресурсів і доступ до функції, яка його реалізує, виконується значно швидше. З іншого боку, для розрахунку вихідного вектору у класичному fuzzy-регуляторі виконується достатньо значна кількість логічних та арифметичних операцій. Це тягне за собою збільшення тривалості виконання розрахунків та більші вимоги до обчислювальних ресурсів (зокрема, об'єму оперативної пам'яті мікроконтролера).

3. Значення оціночних показників роботи fuzzy-регуляторів

fuzzy-регулятор	Значення показників			
	I_{IAE}	I_{IAC}	t_p, с	$\varepsilon_{\max}$, %
вихідний	0,72	0,68	21,7	16,3
швидкодіючий	0,55	0,69	21,4	16,7

Для оцінки швидкодії доступу до функцій вихідного та швидкодіючого fuzzy-регуляторів проведемо порівняльний аналіз. Усі розрахунки виконані в програмному середовищі Mathematica на ПК, який має такі характеристики: об'єм оперативної пам'яті 3 Гб, тактова частота процесора 1,9 ГГц, процесор AMD Turion 64 X2.

Для того, щоб отримати статистично достовірні дані було розраховано тривалості доступу до функцій fuzzy-регуляторів при двотисячній повторюваності. Аргументи функцій обирались випадковим чином із області: для похибки -1 - 1 м/с, для інтеграла похибки -3 - 3 м. На основі отриманих даних були розраховані статистичні показники, які занесені до таблиці 4.

Аналіз даних, які наведені у табл. 4, показує, що тривалість доступу до обох функцій є доволі нерівномірною, про що свідчать значні коефіцієнти варіації. Враховуючи цю обставину, аналіз будемо проводити за величинами медіан. Відношення медіан тривалостей доступу до функцій fuzzy-регуляторів складає $6{,}34 \cdot 10^2$. Отже, у середньому тривалість доступу до функції швидкодіючого fuzzy-регулятора на два порядки нижча, ніж до вихідного fuzzy-регулятора. Таке значне зменшення тривалості доступу позитивно відобразиться на зниженні вимог до

апаратного забезпечення fuzzy-регуляторів. Відношення максимальних та мінімальних значень тривалостей доступу до функцій fuzzy-регуляторів складає $3{,}74 \cdot 10^3$ та $5{,}75 \cdot 10^2$ відповідно.

4. Статистичні показники тривалості доступу до функцій вихідного та швидкодіючого fuzzy-регуляторів

Статистичний показник	Значення показника, що відповідають fuzzy-регулятору	
	вихідному	швидкодіючому
Максимальне значення, с	$1{,}62 \cdot 10^{-1}$	$4{,}33 \cdot 10^{-4}$
Мінімальне значення, с	$7{,}88 \cdot 10^{-3}$	$1{,}37 \cdot 10^{-5}$
Середнє значення, с	$1{,}34 \cdot 10^{-2}$	$1{,}57 \cdot 10^{-5}$
Медіана, с	$9{,}00 \cdot 10^{-3}$	$1{,}42 \cdot 10^{-5}$
Коефіцієнт варіації, %	107,7	119,5

Необхідно зазначити, що при синтезі швидкодіючого fuzzy-регулятора була виконана побудова табульованої функції. Саме під час цього етапу був виконаний багатократний доступ до вихідної функції fuzzy-регулятора, що звичайно ж відобразилось на тривалості етапу. Для більш складних задач автоматичного регулювання синтезовані на основі відомих підходів fuzzy-регулятори будуть складнішими. Це означає, що тривалість виконання розрахунків на цьому етапі буде більшою. Таким чином, зростання об’єму розрахунків при синтезі fuzzy-регулятора дає змогу зменшити їх кількість при його роботі.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Розроблено метод синтезу швидкодіючих fuzzy-регуляторів, який складається із окремих етапів. Сутність методу полягає у побудові табульованої функції „вхід-вихід”, апроксимації отриманих даних та оптимізації параметрів апроксимаційної функції.

2. З метою ілюстрації використання розробленого методу синтезу швидкодіючих fuzzy-регуляторів розв’язана задача синтезу регулятора швидкості руху транспортного засобу.

3. Результати порівняння якості регулювання вихідного та швидкодіючого fuzzy-регуляторів показали зниження для останнього на 30,9 % середньоінтегральної похибки регулювання при практично рівних інших показниках: середнього значення керування, перерегулювання та тривалості регулювання.

4. Статистичний аналіз тривалості доступу до функцій швидкодіючого та вихідного fuzzy-регуляторів показав перевагу першого (у середньому в $6{,}34 \cdot 10^2$ разів). Це дозволяє знизити вимоги до апаратної частини fuzzy-регуляторів за рахунок зростання об’єму розрахунків при його синтезі.

5. Перспективи подальших досліджень полягають у застосуванні методу для інших задач синтезу автоматичних регуляторів та аналізу ефективності їх застосування.

Список літератури

1. Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова, 2-е изд. − М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. − 744 с.

2. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Часть 2. // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 1. – С. 86-99.

3. Biglarbegian, M., Melek,W., Mendel, J.M. Design of Novel Interval Type-2 Fuzzy Controllers for Modular and Reconfigurable Robots: Theory and Experiments. IEEE Trans. Ind. Electron. 2011, 58, 1371–1384.

4. Kumbasar, T., Hagras, H. Big Bang-Big Crunch optimization based interval Type-2 fuzzy PID cascade controller design strategy. Inf. Sci. 2014, 282, 277–295.

5. Allawi, Z.T., Abdalla, T.Y. A PSO-Optimized Type-2 Fuzzy Logic Controller for Navigation of Multiple Mobile Robots. In Proceedings of the IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, Poland, 2–5 September 2014.

6. Jammeh, E.A., Fleury, M., Wagner, C., Hagras, H., Ghanbari, M. Interval Type-2 Fuzzy Logic Congestion Control for Video Streaming Across IP Networks. IEEE Trans. Fuzzy Syst. 2009, 17, 1123–1149.

7. Jammeh, E., Mkwawa, I., Sun, L., Ifeachor, E. Type-2 fuzzy logic control of PQoS driven adaptive VoIP scheme. Electron. Lett. 2010, 46, 137–138.

8. Méndez, G.M., Leduc-Lezama, L., Colás, R., Murillo-Perez, G., Ramirez-Cuellar, J., López, J.J. Modelling and control of coiling entry temperature using interval Type-2 fuzzy logic systems. Ironmak. Steelmak. 2010, 37, 126–134.

9. Méndez, G.M., Castillo, O., Colás, R.; Moreno, H. Finishing mill strip gage setup and control by internal Type-1 non-singleton Type-2 fuzzy logic systems. Appl. Soft Comput. 2014, 24, 900–911.

10. Barkat, S., Tlemçani, A., Nouri, H. Noninteracting Adaptive Control of PMSM Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems. IEEE Trans. Fuzzy Syst. 2011, 19, 925–936.

11. Chen, C.-S., Lin, W.-C. Self-adaptive interval Type-2 neural fuzzy network control for PMLSM drives. Expert Syst. Appl. 2011, 38, 14679–14689.

12. Naik, N.V., Singh, S.P. Improved Torque and Flux Performance of Type-2 Fuzzy-based Direct Torque Control Induction Motor Using Space Vector Pulse-width Modulation. Electr. Power Compon. Syst. 2014, 42, 658–669.

13. Yu, W.-S., Chen, H.-S. Interval Type-2 fuzzy adaptive tracking control design for PMDC motor with the sector dead-zones. Inf. Sci. 2014, 288, 108–134.

14. Panda, M.K., Pillai, G.; Kumar, V. An interval Type-2 fuzzy logic controller for TCSC to improve the damping of power system oscillations. Front. Energy 2013, 7, 307–316.

15. Yang, F., Yuan, R., Yi, J., Fan, G., Tan, X. Direct adaptive Type-2 fuzzy neural network control for a generic hypersonic flight vehicle. Soft Comput. 2013, 17, 2053–2064.

16. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 202 с.

17. Romasevych, Yu., Loveikin, V., 2018. A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique, Cybernetics and Information Technologies, 18(3), pp. 62-74.

References

1. Ehupov, N.D. (2002). Metody robastnoho, neiro-nechetkoho i adaptyvnoho upravlenyia: Uchebnyk [Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control: Textbook]. 2-e izd., Moskow: Yzd-vo MHTU ym. Baumana, 744.

2. Denysenko, V.V. (2008). PYD-Rehuliatory Pryntsypy Postroenyia Y Modyfykatsyy. Chast 2. [PID-controllers: Principlles of Design and Modifications. Part 2]. Sovremennye Tekhnolohy Avtomatyzatsyy, 1, 86-99.

3. Biglarbegian, M., Melek,W., Mendel, J.M. (2011). Design of Novel Interval Type-2 Fuzzy Controllers for Modular and Reconfigurable Robots: Theory and Experiments. IEEE Trans. Ind. Electron, 58, 1371-1384.

4. Kumbasar, T., Hagras, H. (2014). Big Bang-Big Crunch optimization based interval Type-2 fuzzy PID cascade controller design strategy. Inf. Sci., 282, 277-295.

5. Allawi, Z.T., Abdalla, T.Y. (2014). A PSO-Optimized Type-2 Fuzzy Logic Controller for Navigation of Multiple Mobile Robots. In Proceedings of the IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, Poland.

6. Jammeh, E.A., Fleury, M., Wagner, C., Hagras, H., Ghanbari, M. (2009). Interval Type-2 Fuzzy Logic Congestion Control for Video Streaming Across IP Networks. IEEE Trans. Fuzzy Syst., 17, 1123-1149.

7. Jammeh, E., Mkwawa, I., Sun, L., Ifeachor, E. (2010) Type-2 fuzzy logic control of PQoS driven adaptive VoIP scheme. Electron. Lett., 46, 137-138.

8. Méndez, G.M., Leduc-Lezama, L., Colás, R., Murillo-Perez, G., Ramirez-Cuellar, J., López, J.J. (2010). Modelling and control of coiling entry temperature using interval Type-2 fuzzy logic systems. Ironmak. Steelmak, 37, 126-134.

9. Méndez, G.M., Castillo, O., Colás, R., Moreno, H. (2014). Finishing mill strip gage setup and control by internal Type-1 non-singleton Type-2 fuzzy logic systems. Appl. Soft Comput., 24, 900-911.

10. Barkat, S., Tlemçani, A., Nouri, H. (2011). Noninteracting Adaptive Control of PMSM Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems. IEEE Trans. Fuzzy Syst., 19, 925-936.

11. Chen, C.-S., Lin, W.-C. (2011). Self-adaptive interval Type-2 neural fuzzy network control for PMLSM drives. Expert Syst., 38, 14679-14689.

12. Naik, N.V., Singh, S.P. (2014) Improved Torque and Flux Performance of Type-2 Fuzzy-based Direct Torque Control Induction Motor Using Space Vector Pulse-width Modulation. Electr. Power Compon. Syst., 42, 658-669.

13. Yu, W.-S., Chen, H.-S. (2014). Interval Type-2 fuzzy adaptive tracking control design for PMDC motor with the sector dead-zones. Inf. Sci., 288, 108-134.

14. Panda, M.K., Pillai, G., Kumar, V (2013). An interval Type-2 fuzzy logic controller for TCSC to improve the damping of power system oscillations. Front. Energy, 7, 307-316.

15. Yang, F., Yuan, R., Yi, J., Fan, G., Tan, X (2013). Direct adaptive Type-2 fuzzy neural network control for a generic hypersonic flight vehicle. Soft Comput., 17, 2053-2064.

16. Leonenkov, A. V. (2005). Nechetkoe modelyrovanye v srede MATLAB y fuzzyTECH [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. SPb.: BKhV-Peterburh, 202.

17. Romasevych, Yu., Loveikin, V. (2018). A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. Cybernetics and Information Technologies, 18(3), 62-74.

МЕТОД СИНТЕЗА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ FUZZY-РЕГУЛЯТОРОВ

Ю. А. Ромасевич, В. С. Ловейкин, А. П. Ляшко

Аннотация. *Разработан метод синтеза быстродействующих автоматических регуляторов на основе fuzzy-логики. Метод является многоэтапной процедурой, в которой результаты предыдущего этапа используются в текущем. Идея, на которой основывается метод, заключается в том, что длительность доступа к полученной в ходе применения метода функции, значительно меньше, чем длительность доступа к функции выходного fuzzy-регулятора. Сущность метода заключается в синтезе fuzzy-регулятора, построении на его основе табулированной функции в виде „вход-выход”, аппроксимации полученных данных с помощью полиномиальной или сплайновой модели и оптимизации параметров модели. Приведено подробное описание отдельных этапов метода и указаны рекомендации по их выполнению.*

Для подтверждения эффективности разработанного метода был выполнен синтез быстродействующего fuzzy-регулятора для задачи регулирования скорости движения транспортного средства. Вектор входных переменных содержал два компонента: погрешность скорости и ее интеграл. Исходный

сигнал регулятора отвечал движущему усилию привода транспортного средства. Для входных переменных было принято по три терма, для выходной – пять. В расчетах использованы простейшие л- и z-образные функции принадлежности к термам.

На основе разработанного fuzzy-регулятора был получен его быстродействующий аналог, который позволил улучшить качество регулирования скорости по величине среднеинтегральной погрешности.

Проведен статистический анализ быстродействия доступа к функциям быстродействующего и исходного fuzzy-регуляторов. Установлено, что быстродействие первого на два порядка больше, что положительно отразится на снижении требований к аппаратному обеспечению fuzzy-регуляторов.

Ключевые слова: *fuzzy-регулятор, алгоритм, быстродействие, моделирование, качество, аппроксимация*

SYNTHESIS METHOD OF FAST FUZZY-CONTROLLERS

Yu. Romasevych, V. Loveikin, A. Lyashko

Abstract. *A method for the synthesis of fast automatic controllers based on fuzzy-logic has been developed. The method is a multi-stage procedure in which the results of the previous stage are used in the current. The idea on which the method is based is that the duration of access to the function obtained during the application of the method is much shorter than the duration of access to the function of the original fuzzy-controller. The essence of the method is to synthesize a fuzzy-controller, build on its basis a tabulated function in the form of an input-output of the original fuzzy controller, approximate the data using a polynomial or spline model, and optimize model's parameters. A detailed description of the individual steps of the method has been given as well as recommendations for their implementation have been indicated.*

In order to confirm the effectiveness of the developed method, a fast fuzzy-controller has been synthesized in the problem of a vehicle's speed control. The input vector contains two components: the speed error and its integral. The output signal of the controller corresponds to the driving force of the vehicle's drive. Three terms have been taken as input variables, five – for the output one. In the calculations, the simplest л- and z-shaped membership functions have been used.

On the basis of the developed fuzzy-controller, its fast analog has been obtained, which made it possible to improve the quality of speed control by the value of the integral average error.

A statistical analysis of the speed of access to the functions of the fast and the original fuzzy-controllers has been carried out. The performance of the fast fuzzy-controller has increased by two orders of magnitude, which will positively affect the reduction of hardware requirements for fuzzy-controllers.

Key words: *fuzzy-controller, algorithm, speed, modeling, quality, approximation*