https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj24-00-039
DOI: 10.30888/2663-5712.2024-24-00-039

УДК 681.511.46:681.515.622.24

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF DIGITAL FUZZY-REGULATORS

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВИХ FUZZY-РЕГУЛЯТОРІВ

Lahoida A. / Лагойда А.І.
ORCID: 0000-0002-0862-7786
Mateik H./ Матеїк Г.Д.
0000-0003-0286-389X
Lahoida L. / Лагойда Л.І.
ORCID: 0000-0002-2328-8276
Zvarych H. / Зварич Г.Г.
ORCID: 0000-0002-7866-542X
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Karpatskaya, 15,76019
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, вул.Карпатська,15,76019

***Анотація.**. У роботі розглядаються проблеми, пов'язані з оптимізацією параметрів цифрових Fuzzy-регуляторів, зокрема в контексті високоточних систем автоматичного керування. Використовуються інноваційні методи та алгоритми для підбору оптимальних значень параметрів Fuzzy-логіки, що дозволяє покращити якість регулювання та знизити вплив зовнішніх чинників на систему.*

***Ключові слова:** цифровий Fuzzy-регулятор, систем автоматичного керування, функція належності, критерій якості.*

Вступ.

Оптимізація параметрів цифрових Fuzzy-регуляторів зосереджується на дослідженні та розвитку методів оптимізації параметрів Fuzzy-логіки для цифрових регуляторів. Fuzzy-системи вже довгий час використовуються в автоматичному керуванні для моделювання нечітких та нестійких систем. Однак ефективне налаштування параметрів Fuzzy-регуляторів є важливим завданням, що впливає на точність та швидкість реакції системи. Дослідження включає аналіз впливу різноманітних параметрів Fuzzy-регулятора на характеристики системи, розробку методів оптимізації та їх практичне застосування для підвищення продуктивності та стійкості автоматичного керування. Результати цієї роботи можуть мати значущий вплив на розвиток сучасних систем автоматичного керування, забезпечуючи оптимальні умови функціонування в умовах невизначеності та змін.

Основні дослідження.

Застосування нечіткого регулятора (НР) для керування різними об`єктами показує їх високу ефективність і в ряді випадків суттєві переваги перед лінійними цифровими регуляторами [1,2]. Основними параметрами цифрових НР, при яких відбувається їх синтез і розрахунок, є, кількість і форма функцій належності (ФН) $\mu^T(u)$ лінгвістичних величин і діапазони зміни вхідних і вихідної лінгвістичних змінних помилка системи **θ**, перша похідна помилки $\dot{\theta}$, друга похідна помилки $\ddot{\theta}$, керуючий вплив на об’єкт m**,** тобто $[\theta_{min}, \theta_{max}]$, $[\dot{\theta}_{min}, \dot{\theta}_{max}]$ і $[m_{min}, m_{max}]$.

Вибір ФН при синтезі НР для систем автоматичного керування (САК) має специфічні особливості, які обумовленні тим, що на вхід НР, як правило, поступають три лінгвістичні змінні: помилка системи θ, швидкість зміни (перша похідна) помилки $\dot{\theta}$, прискорення(друга похідна) помилки $\ddot{\theta}$, які якісно можна охарактеризувати (за допомогою спрощення розрахунків), наприклад негативна -1, позитивна – 2.

Ці терм-множини описуються на універсальній множині U відповідно двома ФН: $\mu^1(u)$ і $\mu^2(u)$. ФН визначає степінь належності кожного елементу u множині U числом між 0 і 1, яке називають степенем істинності даної лінгвістичної змінної даному терму. Тому функції $\mu^1(u)$ і $\mu^2(u)$ повинні бути симетричними одна відносно одної і перетинатися при $u = 0{,}5$. Крім того, функція $\mu^1(u)$ повинна бути спадаючою, а $\mu^2(u)$ - зростаючою.

Із врахуванням вищезазначеного можна записати наступні аналітичні вирази, які часто використовуються на практиці ФН для вхідних лінгвістичних змінних при проектуванні цифрових НР САК:

- для трикутних ФН:

$$\begin{aligned}
&\mu^1(u) = \mathrm{u} / \mathrm{c},\ 0 \le \mathrm{u} \le \mathrm{c};\\
&\mu^1(u) = (1\text{-}\ \mathrm{c} - \mathrm{u}) / (1\text{-}\ 2\mathrm{c}),\ \mathrm{c} \le \mathrm{u} \le 1 - \mathrm{c};\\
&\mu^1(u) = 0,\ 1 - \mathrm{c} \le \mathrm{u} \le 1;\\
&\mu^2(u) = 0,\ 0 \le \mathrm{u} \le \mathrm{c};\\
&\mu^2(u) = (\mathrm{u} - \mathrm{c}) / (1\text{-}\ 2\mathrm{c}),\ \mathrm{c} \le \mathrm{u} \le 1 - \mathrm{c};\\
&\mu^2(u) = (1\text{-}\ \mathrm{u}) / \mathrm{c},\ 1\text{-}\ \mathrm{c} \le \mathrm{u} \le 1;
\end{aligned} \tag{1}$$

- для трапецеєвидних ФН:

$$\begin{aligned}
&\mu^1(u) = 1,\ 0 \le \mathrm{u} \le \mathrm{c};\\
&\mu^1(u) = (1\text{-}\ \mathrm{c} - \mathrm{u}) / (1\text{-}\ 2\mathrm{c}),\ \mathrm{c} \le \mathrm{u} \le 1 - \mathrm{c};\\
&\mu^1(u) = 0,\ 1 - \mathrm{c} \le \mathrm{u} \le 1;\\
&\mu^2(u) = 0,\ 0 \le \mathrm{u} \le \mathrm{c};\\
&\mu^2(u) = (\mathrm{u} - \mathrm{c}) / (1\text{-}\ 2\mathrm{c}),\ \mathrm{c} \le \mathrm{u} \le 1 - \mathrm{c};\\
&\mu^2(u) = 1,\ 1 - \mathrm{c} \le \mathrm{u} \le 1;
\end{aligned} \tag{2}$$

(у формулах (1) і (2) параметром c можна варіювати в межах $0 \le \mathrm{c} \le 0{,}49$;

При $c = 0$ $\mu^1(u) = (1\text{-}\ \mathrm{u})$, $\mu^2(u) = \mathrm{u},\ 0 \le \mathrm{u} \le 1$;

- для піднесених в степінь трикутних ФН:

$$\mu^1(u) = (1\text{-}\ \mathrm{u})^{\mathrm{c}},\quad \mu^2(u) = \mathrm{u}^{\mathrm{c}}. \tag{3}$$

- для дзвоноподібних ФН:

$$\mu^1(u) = \frac{1}{1+\left(\dfrac{u}{c}\right)^2},\quad \mu^2(u) = \frac{1}{1+\left(\dfrac{u-1}{c}\right)^2}. \tag{4}$$

- для гаусових ФН

$$\mu^1(u) = \exp[-\frac{u^2}{2c^2}], \quad \mu^2(u) = \exp[-\frac{(1-u)^2}{2c^2}]. \qquad (5)$$

- для експоненціальних ФН:

$$\mu^1(u) = \exp(-cu), \qquad \mu^2(u) = \exp[-c(1-u)]. \qquad (6)$$

ФН, які аналітично визначаються формулами (3)- (6), мають лише один параметр – коефіцієнт *c*, яким можна варіювати при налаштуванні НР, що влаштовує з практичної точки зору.

Для вихідної лінгвістичної змінної – *керуючого впливу на ОК* ***m*** можна використовувати такі ж ФН, як і для вхідних лінгвістичних змінних.

Як приклад на рис.1 показані експоненціальні ФН на універсальній множині і діапазони змінних, а також результуюча ФН (жирна лінія) для конкретних змінних. Результуюючу ФН отримують як правило «мінімаксним» методом, а розрахунок абсциси «центру тяжіння» $s_c = S(u_c, \mu_c)$ ділянки площі, що охоплена результуючою ФН $\mu(u)$ в межах зміни змінної u від $u = U_1$ до $u = U_2$, зручно виконувати, використовуючи чисельне інтегрування за методом трапецій (з кроком дискретизації u_0), за формулою:

$$u_c = \frac{\dfrac{U_1\mu_0}{2} + \sum_{i=0}^{M-1} u_i\mu_i + \dfrac{U_2\mu_M}{2}}{\dfrac{\mu_0}{2} + \sum_{i=0}^{M-1}\mu_i + \dfrac{\mu_M}{2}}, \qquad (7)$$

де $(U_2 - U_1) / M = u_0$ – крок дискретизації, M – число дискретне інтервалі $U_2 - U_1$, $i = 1,2,3,\ldots, M-1$.

При визначенні результуючої ФН необхідно абсциси точок перетину ФН нечітких підмножин (наприклад, термів позитивни-1, негативний-2) з горизонтальними прямими. Найбільш просто це виконати для трикутних ФН.

Для ФН виду: $\mu^1(u) = (1-u)^2$, $\mu^2(u) = u^2$ $u \in [0,1]$ – абсциси точок перетину визначаються як: $u^* = 1 - \sqrt[c]{\mu^1(u^*)}$ і $u^* = 1 - \sqrt[c]{\mu^2(u^*)}$.

Для ФН дзвоноподібного виду:

$$\mu^1(u) = \frac{1}{1 + (u/c)^2}, \quad \mu^2(u) = \frac{1}{1 + \left(\dfrac{u-1}{c}\right)^2}, \; u \in [0, 1],$$

абсциси точок перетину визначаються як:

$$u^* = \mathrm{c} \times \sqrt{\frac{1}{\mu^1(u^*)} - 1} \; \text{ і } \; u^* = 1 + \mathrm{c} \times \sqrt{\frac{1}{\mu^2(u^*)} - 1}. \qquad (8)$$

Для гаусових ФН виду (8) абсциси точок перетину визначаються як:

$$u^* = \mathrm{c}\sqrt{-2\ln \mu^1(u^*)} \; \text{ і } \; u^* = 1 - \mathrm{c}\sqrt{-2\ln \mu^2(u^*)}. \qquad (9)$$

Для експоненціальних ФН виду:

$$\mu^1(u) = e^{-cu}, \quad \mu^2(u) = e^{-c(1-u)}, \; u \in [0, 1],$$

абсциси точок перетину визначаються як:

$$u^* = -\frac{1}{c} ln\, \mu^1(u^*) \quad i \quad u^* = 1 + \frac{1}{c} ln\, \mu^1(u^*). \qquad (10)$$

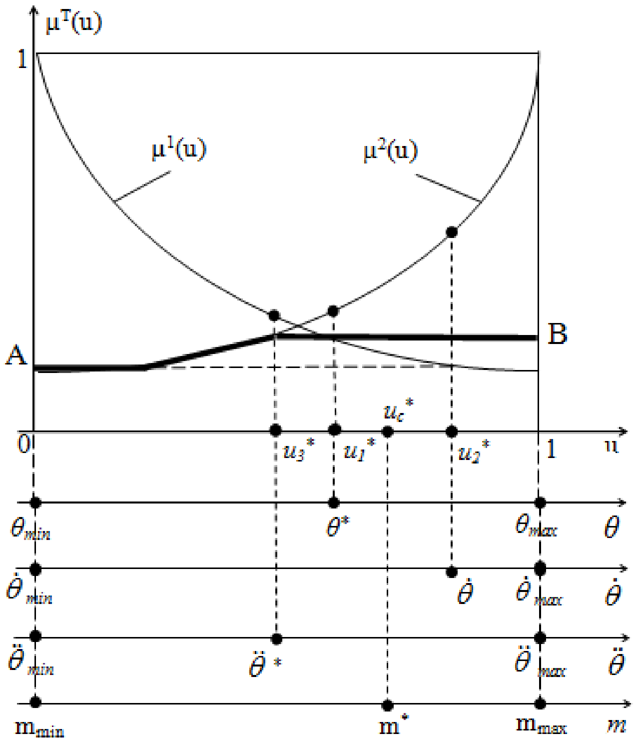

Рисунок 1 - Експоненціальні ФН на універсальній множині змінних з результуючою ФН (лінія АВ)

Джерело: [2]

Остаточний вибір ФН для НР в САК можливий лише при оптимізації основних параметрів регулятора (діапазонів зміни ЛЗ, форми і параметрів ФН лінгвістичних величин).

При оптимізації параметрів цифрових регуляторів необхідно задавати критерій якості і функції впливу (керуючий і/або збурюючий вплив) на систему. Найбільш часто використовують один із квадратичних критеріїв якості, наприклад:

$$\boldsymbol{J} = \frac{1}{L}\sum_{\nu=0}^{L-1}\theta_\nu^2 \Rightarrow \min, \qquad (11)$$

де помилка системи θ_ν обчислюється з кроком моделювання h_0 , а число L визначає інтервал спостереження.

Оптимальні параметри відповідають мінімальному значенню критерію якості, а мінімізація критерію якості автоматично приводить до оптимізації перехідних процесів в САК. Можна використовувати різні алгоритми умовної і безумовної оптимізації.

Розглянемо САК (рис.2) з цифровим НР і нестаціонарним ОК, «заморожена» ПФ якого визначається формулою: $G(s) = \frac{\alpha(s)}{m(s)} \frac{\alpha}{s(s^2 + bs + a)}$.

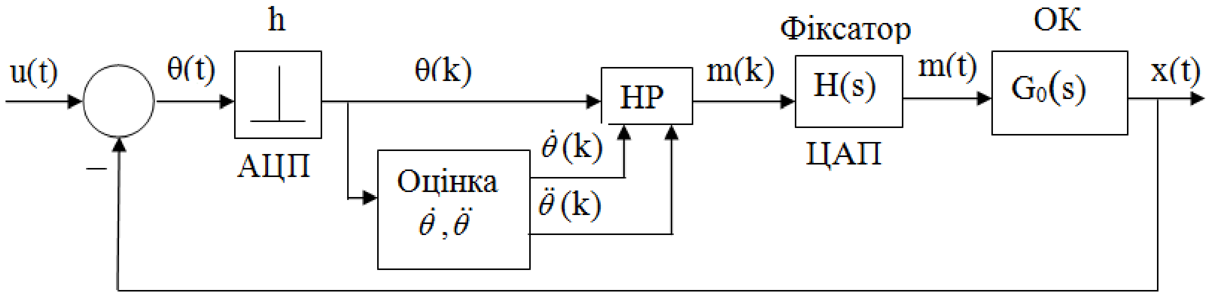

Рисунок 2 – Структурна схема САК з нечітким регулятором
Джерело: [2]

Припустимо, що синтез НР виконаний при заданих законах зміни параметрів функції передачі ОК, вхідного впливу і трикутних ФН. При цьому вибрані без оптимізації (налаштування «вручну») діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів НР (діапазони зміни змінних θ, $\dot\theta$, $\ddot\theta$, m) визначаються:

$$[\theta_{min}, \theta_{max}] = [-1{,}02;\ 1{,}02], \quad [\dot\theta_{min}, \dot\theta_{max}] = [-4;\ 4],$$
$$[\ddot\theta_{min}, \ddot\theta_{max}] = [-24;\ 24] \text{ І } [m_{min}, m_{max}] = [-1,\ 1]. \quad (12)$$

Крок квантування в цифровому НР h = 0,01с, крок моделювання h_0 = *0,0005с.* Квадратичний критерій якості має показник: J = 0,021.

Після оптимізації отримуємо наступні діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів НР (діапазони зміни змінних θ, $\dot\theta$, $\ddot\theta$, m):

$$[\theta_{min}, \theta_{max}] = [-1{,}02;\ 1{,}02], \quad [\dot\theta_{min}, \dot\theta_{max}] = [-2{,}75;\ 2{,}75],$$
$$[\ddot\theta_{min}, \ddot\theta_{max}] = [-16{,}52;\ 16{,}52] \text{ І } [m_{min}, m_{max}] = [-1,\ 1]. \quad (13)$$

Квадратичний критерій якості має показник: J = 0,0168.

Можна використати різні форми ФН (3)–(6) і, варіюючи одночасно коефіцієнтом c і діапазонами зміни вхідних і вихідних параметрів (діапазони зміни змінних θ, $\dot\theta$, $\ddot\theta$, m), визначати мінімальне значення показника J.

Проведені розрахунки методом Хука-Дживса з використанням формул (12) і (13) дають наступні результати. Метод Хука-Дживса використовується для пошуку мінімуму (або максимуму) функції. Цей метод належить до класу безпосередніх методів, де величини зміщення (шаги) обчислюються без використання похідних функції [6]. Найбільше із мінімальних значень показника J одержується при використанні ФН, які визначаються за формулою (3.36), при наступних параметрах цифрового НР: $c = 10^{-4}$;

$$[\theta_{min}, \theta_{max}] = [-1{,}02;\ 1{,}02], \quad [\dot\theta_{min}, \dot\theta_{max}] = [-2{,}14;\ 2{,}14],$$
$$[\ddot\theta_{min}, \ddot\theta_{max}] = [-22{,}23;\ 22{,}23] \text{ і } [m_{min}, m_{max}] = [-1,\ 1].$$

Квадратичний критерій якості має показник: J = 0,0197.

Найменше із мінімальних значенň показника J одержується при використанні експоненціальних ФН, які визначаються за формулою (7) і (8), при наступних параметрах цифрового НР: c =72,5;

$$[\theta_{min}, \theta_{max}] = [-1{,}02;\ 1{,}02], \quad [\dot\theta_{min}, \dot\theta_{max}] = [-3{,}75;\ 3{,}75],$$
$$[\ddot\theta_{min}, \ddot\theta_{max}] = [-22{,}98;\ 22{,}98] \text{ і } [m_{min}, m_{max}] = [-1,\ 1].$$

Квадратичний критерій якості має показник: J = 0,0136.

Таким чином, для розглянутої САК експоненціальні ФН є найкращими при вибраному критерію якості. З метою вибору оптимальних параметрів fuzzy-регуляторів із конкретних об'єктів керування слід проводити розрахунки із різних ФН і, використовуючи оптимізаційні програми, вибирати ФН, при яких обчислений показник якості *J* є мінімальним.

Висновок. Було отримано алгоритм безумовної оптимізації методом Хука-Дживса параметрів fuzzy-регуляторів САК нестаціонарним ОК за допомогою програм Opt_HD та продемонстровано результати дослідження точності відпрацювання САК із НР заданого закону зміни вхідного впливу. Оптимізація параметрів приводить до значного покращення якості СУ, яке характеризується величиною поточної помилки і чисельно визначається показником *J*. Також досліджено та розроблено ефективні методи оптимізації параметрів цифрових Fuzzy-регуляторів, спрямовані на підвищення продуктивності та стійкості автоматичного керування. Одержані результати свідчать про важливість впровадження інноваційних підходів до налаштування Fuzzy-систем в умовах невизначеності та змінних параметрів систем.

Література:

1. Семенцов Г.Н. Автоматизація неперервних технологічних процесів. Регулятори: [навч. посібн.]. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. 2016. 201 с.

2. Горбійчк М.І. Математичні методи оптимізації: [навч. посіб.]. Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018. — 302 с.

3. Лагойда А.І. Використання багатопараметричного регулятора для складних технологічних об'єктів / Нафтогазова нерегетика. 2014. №1(21). С. 94-100.

4. Pirovolou D. Drilling automation: An automatic trajectory-control system / JPT. Desember 2011. P. 84-87. Режим доступу: http://dx.doi.org/10.2118/1211-0084-JPT.

5. Busher V., Aldairi A. Synthesis and technical realization of control systems with discrete fractional integral-differentiating controller [Text]/ Eastern/European Journal of Enterprise Technologies. ISSN 1729-3774. Indusrty Control System. Kharkov: PC Technology Center, 2018. Vol/2, № 4(94). 2018. P. 63-71.

6. Hooke, R., Jeeves, T.A. (1961). "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems". Journal of the ACM, № 8(2). – С. 212-229.

Abstract.. *The paper considers the problems related to the optimization of the parameters of digital Fuzzy controllers, in particular in the context of high-precision automatic control systems. Innovative methods and algorithms are used to select the optimal values of fuzzy logic parameters, which allows to improve the quality of regulation and reduce the influence of external factors on the system. In the work, the main attention is paid to the use of innovative methods and algorithms for the effective selection of optimal values of fuzzy logic parameters. The application of these methods is determined not only by pragmatic aspects, such as increasing the accuracy of regulation, but also by the ability to reduce the influence of external factors that may occur in real operating conditions.*

Keywords: *digital fuzzy controller, automatic control systems, membership function, quality criterion.*

Стаття відправлена: 12.03.2024 р.