

УДК 658.012.011.56

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-53-62

СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИМ ДВИГУНОМ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

О. В. Кучмистенко, М. В. Шавранський, Б. С. Незамай, О. Г. Малько

Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019; тел. (03422)4-60-67, e-mail: kafatp@ukr.net

В роботі викладений синтез нечіткого регулятора системи управління частотою обертання ротора газотурбінного двигуна. Продемонстровані результати математичного моделювання системи з цифровими нечітким регулятором, які формують керуючий вплив на нестационарний об'єкт керування. Подана порівняльна оцінка адаптивного управління на базі нечіткої логіки (НЛ) розглянутого нестационарного об'єкта. Порівняльна оцінка роботи, яка характеризується поточною помилкою системи адаптивного управління і системи, розрахованої на базі НЛ, дає можливість зробити висновок, що застосування fuzzy (нечіткого) - регулятора для систем управління розглянутими типовими нестационарними об'єктами є доцільним, оскільки поточна помилка в системі з fuzzy-регулятором не перевищує поточну помилку в адаптивній системі. При формуванні структурних схем СУ з fuzzy-регуляторами важливим видається вибір вхідних параметрів fuzzy-регулятора. Лінгвістичні правила управління самі по собі не можуть бути реалізовані на сучасних ЕОМ. Необхідна процедура їх формалізації. У зв'язку з цим дуже важливим є задача вибору методу формалізації експертних знань. Крім того, оскільки нечіткі множини формалізуються за допомогою функцій належності чимало роль відіграє вибір їх вигляду і параметрів. При реалізації нечіткого управління в сучасних ЕОМ необхідно задавати конкретні значення параметрів функцій належності, зокрема межі їх зміни. Тому важлива методика параметричного налаштування fuzzy-регулятора. При проектуванні регулятора із розрахованих для різних варіантів мінімальних критеріїв якості, вибрано використання експоненціальних функцій належності (ФН), які при оптимізації параметрів НР дають найменше із мінімальних значень показника J.

Ключові слова: газотурбінний двигун, нечітка логіка, функції належності, система управління, нестационарний об'єкт, fuzzy (нечіткий) – регулятор.

В работе изложен синтез нечеткого регулятора системы управления частотой вращения ротора газотурбинного двигателя. Продемонстрированы результаты математического моделирования системы с цифровыми нечетким регулятором, которые формируют управляющее воздействие на нестационарный объект управления. Представленная сравнительная оценка адаптивного управления на базе нечеткой логики (НЛ) рассматриваемого нестационарного объекта. Сравнительная оценка работы, которая характеризуется текущей ошибкой системы адаптивного управления и системы, рассчитанной на базе НЛ, позволяет сделать вывод, что применение fuzzy (нечеткого) - регулятора для систем управления рассмотренными типичными нестационарными объектами целесообразно, поскольку текущая ошибка в системе с fuzzy-регулятором не превышает текущую ошибку в адаптивной системе. При формировании структурных схем СУ с fuzzy-регуляторами важным представляется выбор входных параметров fuzzy-регулятора. Лингвистические правила управления сами по себе не могут быть реализованы на современных ЭВМ. Необходимая процедура их формализации. В связи с этим очень важно задача выбора метода формализации экспертных знаний. Кроме того, поскольку нечеткие множества формализуются с помощью функций принадлежности немалую роль играет выбор их вида и параметров. При реализации нечеткого управления в современных ЭВМ необходимо задавать конкретные значения параметров функций принадлежности, в частности пределы их изменения. Поэтому важна методика параметрической настройки fuzzy-регулятора. При проектировании регулятора с рассчитанных для различных вариантов минимальных критериев качества, выбрано использование экспоненциальных функций принадлежности (ФП), которые при оптимизации параметров НР дают наименьшее из минимальных значений показателя J.

Ключевые слова: газотурбінний двигател, нечеткая логика, функции принадлежности, система управления, нестационарный объект, fuzzy (нечеткий) - регулятор.

The synthesis of the fuzzy regulator of the rotor speed control system of a gas turbine engine is presented in the work. The results of mathematical modeling of a system with a digital fuzzy controller, which form a control effect on a non-stationary control object, are demonstrated. A comparative assessment of adaptive control based on fuzzy logic (FD) of the considered nonstationary object is given. A comparative evaluation of the work, which is characterized by the current error of the adaptive control system and the system calculated on the basis of NL, allows us to conclude that the use of fuzzy controller for control systems considered typical non-stationary objects is appropriate because the current error in the system fuzzy-regulator does not exceed the current error in the adaptive system. When forming the structural schemes of SU with fuzzy-regulators, it seems important to choose the input parameters of the fuzzy-regulator. Linguistic control rules alone cannot be implemented on modern computers. The procedure of their formalization is necessary. In this regard, the task of choosing a method of formalizing expert knowledge is very important. In addition, since fuzzy sets are formalized by membership functions, the choice of their form and parameters plays a significant role. When implementing fuzzy control in modern computers, it is necessary to set specific values of the parameters of membership functions, in particular the limits of their change. Therefore, the technique of parametric adjustment of the fuzzy controller is important. When designing the controller from the minimum quality criteria calculated for different variants, the use of exponential membership functions is chosen, which when optimizing the HP parameters give the least of the minimum values of the indicator J.

Key words: gas turbine engine, fuzzy logic, membership functions, control system, non-stationary object, fuzzy-regulator.

Вступ. В наш час велика увага приділяється побудові (синтезу) і інтелектуалізації системи управління (СУ) нестационарними процесами, як об'єктами керування (ОК), оскільки вирішення задач при швидкій зміні режимів роботи цих об'єктів покладається саме на СУ. Процес прийняття рішень і СУ такими об'єктами є достатньо складною, оскільки функціонує в умовах невизначеності і багатьох факторів впливу. Це пов'язано з відсутністю достатньо повних апіорних даних, а також з необхідністю застосування методів і засобів керування, які знижують ступінь невизначеності вхідної інформації. Рівень невизначеності визначається інтенсивністю збурюючих впливів, точні кількісні характеристики, яких важко, а інколи неможливо вимірювати в реальному часі, від складності математичної формалізації процесу прийняття рішень, від впливу людського фактора та суб'єктивності будь-яких оцінок і рішень людини-оператора при управлінні складними об'єктами в інтерактивному режимі.

Існуючі СУ не дозволяють враховувати неповноту інформації, а також лінгвістичну невизначеність керуючих рішень, які приймаються оперативно-диспетчерським персоналом. Таким чином виникає необхідність в розробці і представленні в розпорядження диспетчера засобів аналізу ситуації з метою прийняття керуючих рішень. Динаміка і невизначеність СУ нестационарними процесами і об'єктами роблять задачу керування досить складною. Бажану ступінь надійності СУ можна

отримати тільки при повному інформаційному забезпеченні і оптимальному керуванні такими об'єктами.

На даному етапі спостерігається інтенсивний розвиток і практичне застосування нечітких систем для цілей управління і регулювання багатьма технічними об'єктами. Класичне управління істотно обмежувало теоретично можливі різновиди цілей, у зв'язку з необхідністю представляти мету узагальненою функцією. При нечіткому управлінні необхідність в цільових функціях і в рішенні задач оптимального управління відпадає, тому можна успішно справлятися зі всім різноманіттям цілей і навіть з цілями, що взаємно суперечать. У багатьох наукових працях управління на базі теорії нечітких множин і нечіткої логіки розглядають в контексті методології штучного інтелекту, де наголошується, що основу проектування інтелектуальних нечітких регуляторів складає конструювання знань з використанням методів уявлення і пошуку знань. Тому пропонується створення нечітких промислових регуляторів здійснювати на принципах теорії штучного інтелекту.

У роботі [1] нечіткі регулятори розглядаються як одна з базових моделей регуляторів інтелектуальних систем управління (ІСУ). При цьому наголошується, що значним обмеженням практичного застосування регуляторів ІСУ є відсутність формальних підходів, властивих теорії автоматичного управління (ТАУ), для вирішення завдань

аналізу і синтезу СУ. Проте наголошується, що fuzzy-регулятори володіють найбільшими "здібностями" до формалізації процесів проектування. Але штучний інтелект є процесом обробки символів, а нечітка логіка - ні. У багатьох випадках регулятор на базі НЛ здатний виробляти рішення швидше, ніж експертна система на основі правил ЯКЦО-ТО. Тим часом, все більший інтерес представляє можливість розробки так званих "гібридних" ІСУ [2, 3], які об'єднують властивості штучних нейронних мереж до навчання і наочність фаззі-логіки.

Постановка завдання: Проаналізувати особливості управління газотурбінним двигуном на базі методів теорії нечітких множин (ТНМ) і нечіткої логіки. Удосконалити відому структурну схему СУ із fuzzy-регулятором;

Метою даної роботи є аналіз і застосування методів нечіткої логіки для синтезу fuzzy-регулятора СУ нестационарними процесами, як об'єктами керування.

Об'єктом дослідження є нестационарні процеси у газотурбінному двигуні, які функціонують за умов невизначеності та обмежень на параметри ОК.

Результати: здійснено моделювання невизначеності експертних знань про СУ нестационарним об'єктом шляхом використання термів лінгвістичних змінних: „негативна” і „позитивна”, що дозволило на основі матриці знань розробити логіко-лінгвістичну модель прийняття раціональних рішень для СУ нестационарним процесом, як ОК.

Все ширше в різних галузях промисловості і народного господарства знаходять застосування газотурбінні двигуни (ГТД). І це не тільки авіація вони також використовуються в якості приводів нагнітачів газоперекачуючих агрегатів компресорних станцій при транспортуванні газу, приводів електрогенераторів пересувних і пікових електростанцій в суднових енергетичних установках і на інших промислових об'єктах, де вимагається розвиток великих одиничних потужностей (від 1 до 25 МВт) в одному агрегаті при його мінімальній масі і габаритах.

Комплекс вимог, які висуваються до газотурбінних двигунів пов'язані з їх енергетичною ефективністю, безпекою, надійністю і екологічністю експлуатації. Поряд

з цими вимогами, актуальними є вимоги до якості перехідних процесів, пов'язаних із запуском агрегату, різкою зміною відібраного навантаження (потужності). В більшості рішення задач задоволення всім цим вимогам покладається на СУ ГТД.

В переважній більшості ГТД частота обертання ротора (роторів) є керуючою величиною. В якості керуючого фактора в СУ частотою обертання ротора n використовується витрата (подача) палива G_T в камеру згоряння. На різних режимах роботи і при різних зовнішніх умовах параметри двигуна істотно змінюються.

Розглянемо газотурбінний двигун як нестационарний об'єкт, для якого частота обертання ротора n – керуюча змінна, а витрата палива G_T - керуючий вплив. Лінеаризуючи залежність моменту турбіни M_T і компресора M_K від частоти обертання ротора n і не враховуючи впливу теплової і масової ємності двигуна, для конкретного режиму роботи записують передавальну функцію двигуна наступним чином [4]:

$$G_{ГТД}(s) = \frac{n(s)}{G_T(s)} = \frac{K_{ГТД}}{T_{ГТД}s + 1},$$

де коефіцієнт підсилення $K_{ГТД}$ і постійна часу $T_{ГТД}$ визначається як:

$$K_{ГТД} = \frac{\left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} - \frac{\partial M_K}{\partial G_K} \right)_o G_{T0}}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n} - \frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_o n_o}; \quad T_{ГТД} = \frac{2\pi J}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n} - \frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_o},$$

при чому, вхідний і вихідний сигнали записуються у відносних безрозмірних відхиленнях від усталеного режиму ($n = \Delta n / n_o$; $G_T = \Delta G_T / G_{T0}$, де n_o , G_{T0} – базові значення параметрів, які вибрані для визначного режиму роботи двигуна, наприклад номінального або максимального). На різних режимах роботи і при різних зовнішніх умовах коефіцієнт підсилення і постійна часу двигуна суттєво змінюються, тому для кожного режиму необхідно визначати свої значення коефіцієнтів $K_{ГТД}$ і $T_{ГТД}$.

Відмітимо, що передавальна функція $G_{ГТД}(s)$ для нестационарного ОК, яким є газотурбінний двигун, отримана методом „заморожених” коефіцієнтів при умові достатньо повільної зміни параметрів об’єкта.

Структурна схема аналогової електромеханічної СУ частотою обертання ротора двигуна при ведені на рис. 1 [4].

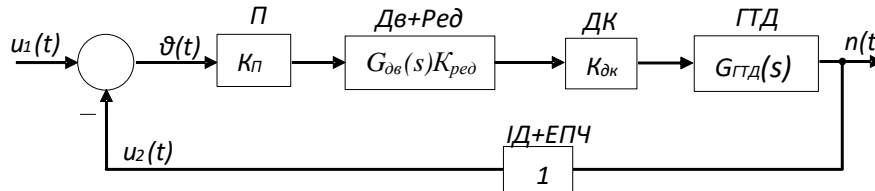


Рисунок 1 – Структурна схема аналогової електромеханічної СУ частотою обертання ротора ГТД

Частота обертання ротора газотурбінного двигуна задається напругою $u_1(t)$ і вимірюється імпульсним давачем ІД, частота вихідного сигналу якого визначається виразом $f = kmn$, n - число обертів двигуна, m - число зубців індуктора, k – коефіцієнт передачі. Змінна напруга, яка знімається з виходу ІД, за допомогою електронного перетворювача частоти ЕПЧ перетворюється в сигнал $u_2(t)$, величина якого пропорційна числу обертів двигуна n . Напруга $u_2(t)$ порівнюється з заданою напругою і сигнал помилки після підсилювача П поступає на двофазний асинхронний двигун Дв, який через редуктор Ред регулює дросельний кран ДК, змінюючи витрату палива в газотурбінний двигун. Імпульсний давач разом з електронним перетворювачем частоти можна описати пропорційною ланкою з передавальною функцією, яка рівна 1. При цьому система (див. рис. 1) має одиничний від’ємний зворотній зв’язок [4].

дросельного крана, газотурбінного двигуна і частотного давача з електронним перетворювачем частоти в якості загального ОК і застосовуючи цифровий НР, можна перетворити структурну схему на рис. 1 в структурну схему, яка зображена на рис. 2, де $u_1(t)$ - вхідний вплив, а $u_2(t)$ – вихід системи, а $u_1(t) - u_2(t) = \theta(t)$ – помилка системи. Використання цифрового НР вимагає додаткового застосування аналого-цифрового (АЦП) і цифро-аналогового (ЦАП) перетворювачів.

Тепер передавальну функцію ОК в структурній схемі на рис. 1 можна записати у вигляді:

$$G(s) = K_{\Pi} G_{ДВ}(s) K_{РЕД} K_{ДК} G_{ГТД}(s) = \alpha [s(s+a)(s+b)]^{-1},$$

де $\alpha = abK_{\Pi}K_{ДВ}K_{РЕД} K_{ДК}K_{ГТД}$, $a = 1/T_{ДВ}$, $b = 1/T_{ГТД}$.

Розглянемо систему управління з цифровим нечітким регулятором НР (рис. 2):

Розглядаючи послідовне з’єднання підсилювача, асинхронного двигуна,

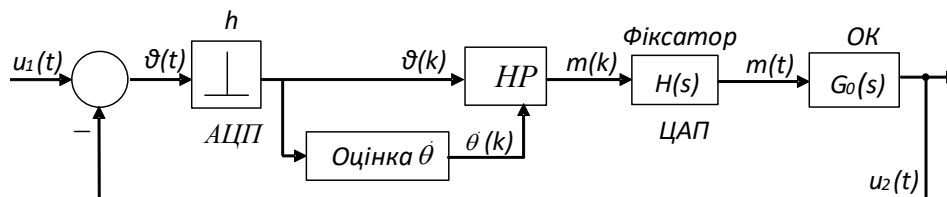


Рисунок 2 – Структурна схема системи управління з цифровим нечітким регулятором

Для визначеності будемо припускати, що число термів, за допомогою яких оцінюються лінгвістичні змінні (вхідні і вихідні параметри нечіткого регулятора) помилка системи θ , швидкість зміни (перша похідна) помилки $\dot{\theta}$,

керуючий вплив на об’єкт m , рівне 7. Відобразимо діапазони: $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$ і $[m_{\min}, m_{\max}]$ зміни вхідних і вихідних параметрів на єдину універсальну множину $U_i = [0, L_i - 1] = [0, 6]$, де $L_i = 7$ - число, яке відповідає

кількості термів кожної лінгвістичної змінної x_i , $i = \overline{1, n}$, $n = 3$. При цьому перерахунок фіксованого значення параметра $x_i^* \in [x_{ni}, x_{ei}]$ у відповідний елемент $u^* \in [0, 6]$ визначається пропорцією [5]:

$(x_{ei} - x_{ni}) / (6 - 0) = (x_i^* - x_{ni}) / (u^* - 0)$, із якої отримуємо:

$$u^* = 6(x_i^* - x_{ni}) / (x_{ei} - x_{ni}). \quad (1)$$

Таким чином, на основі виразу (1) знаходимо:

$$u_1^* = 6(\theta^* - \theta_{min}) / (\theta_{max} - \theta_{min}); \quad (2)$$

$$u_2^* = 6(\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{min}) / (\dot{\theta}_{max} - \dot{\theta}_{min}); \quad (3)$$

$$u_3^* = 6(m^* - m_{min}) / (m_{max} - m_{min}). \quad (4)$$

На множині $U = [0, 6]$ задамо 7 нечітких підмножин, функції належності яких показані на рис. 3:

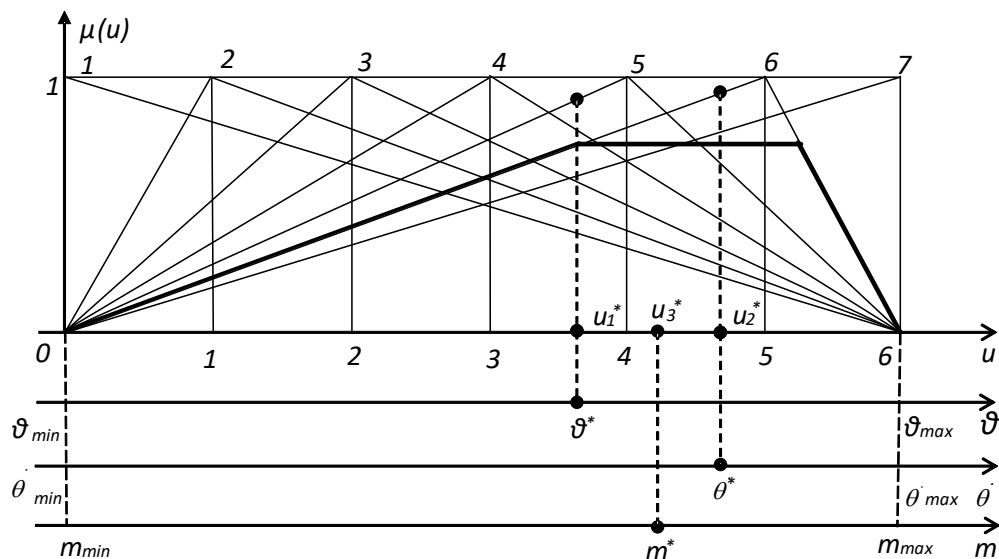


Рисунок 3 – Функції належності семи нечітких підмножин на множині $U = [0, 6]$

Для одержання аналітичних виразів запропонованих ФН скористаємось рівнянням прямої, що проходить через точки з координатами (u_1, μ_1) і (u_2, μ_2) , вигляду (6).

Тоді, відповідно до рис. 3, одержимо наступні ФН для кожної лінгвістичної величини [6, 7]:

$$\mu^1(u) = 1 - u/6, \quad u \in [0, 6];$$

$$\mu^2(u) = \begin{cases} u, & u \in [0, 1]; \\ (6-u)/5, & u \in [1, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^3(u) = \begin{cases} u/2, & u \in [0, 2]; \\ (6-u)/4, & u \in [2, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^4(u) = \begin{cases} u/3, & u \in [0, 3]; \\ (6-u)/3, & u \in [3, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^5(u) = \begin{cases} u/4, & u \in [0, 4]; \\ (6-u)/2, & u \in [4, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^6(u) = \begin{cases} u/5, & u \in [0, 5]; \\ 6-u, & u \in [5, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^7(u) = u/6, \quad u \in [0, 6].$$

При подачі на нечіткий регулятор (НР) значень вхідних змінних θ^* і $\dot{\theta}^*$ з кроком квантування h здійснюється перерахунок величин u_1^* і u_2^* за формулами (2) і (3) і ФН $\mu^j(u)$, $j = \overline{1, 7}$.

Сформуємо матрицю знань (лінгвістичне правило управління) для нечіткого регулятора наступним чином:

$\theta \setminus \dot{\theta}$	a_2^1	a_2^2	a_2^3	a_2^4	a_2^5	a_2^6	a_2^7
a_1^1	H	H	H	H	ПМ	ПС	П

a_1^2	Н	НС	НС	НС	ПМ	ПС	П
a_1^3	Н	НС	НМ	НМ	ПМ	ПС	П
a_1^4	Н	НС	НМ	О	ПМ	ПС	П
a_1^5	Н	НС	НМ	ПМ	ПМ	ПС	П
a_1^6	Н	НС	НМ	ПМ	ПМ	ПС	П
a_1^7	Н	НС	НМ	П	П	П	П

В матриці знань a_1^j і a_2^j - лінгвістичні оцінки помилки і швидкості зміни помилки, які розглядаються як нечіткі множини, визначені на універсальній множині, $j = \overline{1,7}$; a_3^j - лінгвістичні оцінки керуючого впливу на об'єкт, які вибрані із терм-множини змінної t :

$a_3^j \in \{\text{негативна (Н), негативна середня (НС), негативна мала (НМ), нульова (О), позитивна мала (ПМ), позитивна середня (ПС), позитивна (П)}\}$.

Нехай $\mu^j(x_i)$ ФН параметра $x_i \in [x_{ni}, x_{ei}]$ нечіткому терму a_i^j , $i = \overline{1,2}$; $j = \overline{1,7}$. Тоді $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta})$ - залежить від двох змінних ($x_1 \equiv \theta$; $x_2 \equiv \dot{\theta}$) функція належності вектора параметрів рішення (вбраному керуючому впливу на об'єкт) m_j , $j = \overline{1,7}$, визначається із системи нечітких логічних рівнянь:

$$\mu^{m_j}(x_1, x_2) = \bigvee_{p=1}^{k_j} [\mu^l(x_2) \wedge \mu^r(x_3)] \quad (5)$$

де k_j - число однакових термів a_3^j , які розміщені в комірці із координатами (l, r) матриці знань; l - номер рядка, на якому розміщений терм a_1^l ; r - номер стовпця, на якому розміщений терм a_2^r , ($l, r, j = \overline{1,7}$).

Якщо сформуємо лінгвістичне правило управління НР у вигляді:

$$\text{Якщо } (\theta^* = a_1^j) \text{ і } (\dot{\theta}^* = a_2^j), \text{ то } (m^* = a_3^j), \quad j = \overline{1,7},$$

(це відповідає використанню лише головної діагоналі матриці знань), то система нечітких логічних рівнянь (5) значно спроститься і прийме вигляд:

$$\mu^{m_j}(x_1, x_2) = \mu^j(x_1) \wedge \mu^j(x_2);$$

$$\mu^{m^*}(x_1, x_2) = \max_{j=\overline{1,7}} \mu^{m_j}(x_1, x_2). \quad (6)$$

У відповідності з матрицею знань, яка сформалізована рівнянням (5), або (6), fuzzy-регулятор „приймає рішення” про те, до якого терму j і з яким ступенем істинності $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta})$ відноситься керуючий вплив m_j . Для визначення конкретного значення керуючого впливу m^* формується результуюча фігура (чотирикутник): ФН вибраного j -го терму, обмежена прямою з ординатою, рівна $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta})$.

Відбувається пошук абсциси "центру тяжіння" результуючої фігури за формулою:

$$u_3^* = \frac{\sum_{k=1}^4 (a_{k+1} - a_k) [(2a_{k+1} + a_k)b_{r+1} + (2a_k + a_{k+1})b_k]}{3 \sum_{k=1}^4 (a_{k+1} - a_k)(b_{k+1} + b_k)}, \quad (7)$$

де a_k, b_k - координати вершин результуючої фігури.

Одержане значення u_3^* на основі формули (4) перетвориться в значення керуючого впливу на ОК:

$$m^* = m_{\min} + (m_{\max} - m_{\min}) u_3^* / 6. \quad (8)$$

При дослідженні СУ (рис. 4) припустимо, що задана функція зміни частоти обертання ротора газотурбінного двигуна задається вхідною напругою:

$$u_1(t) = \begin{cases} \frac{2t^2}{\tau_r^2} & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{\tau_r}{2}; \\ \frac{1}{2} + \frac{2t - \tau_r}{\tau_r} - \frac{(2t - \tau_r)^2}{2\tau_r^2} & \text{при } \frac{\tau_r}{2} \leq t \leq \tau_r; \\ 1 & \text{при } t \geq \tau_r, \end{cases}$$

де τ_r – час розгону газотурбінного двигуна.

Припустимо, що залежності параметрів передавальної функції $G(s)$ від часу роботи газотурбінного двигуна визначаються як:

$$T_{ГТД}(t) = 0,9849 - 0,1188t + 0,0063t^2 - 0,00012t^3;$$

$$\alpha(t) = 16,5475 - 4,4469t + 0,4843t^2 - 0,02315t^3 - 0,0004t^4;$$

$$T_{ДВ} = 0,35 \text{ с.}$$

При моделюванні системи опишемо динаміку окремих ланок, використовуючи апроксимацію за формулою трапецій.

Для аперіодичної ланки із змінними параметрами:

$$x_v = \frac{2 - b_{v-1}h_0}{2 + b_v h_0} x_{v-1} + \frac{h_0}{2 + b_v h_0} (\alpha_v u_v + \alpha_{v-1} u_{v-1}).$$

Для аперіодичної ланки $(s + a)^{-1}$ із постійними параметрами:

$$x_v = \frac{2 - ah_0}{2 + ah_0} x_{v-1} + \frac{h_0}{2 + ah_0} (u_v + u_{v-1}).$$

Для інтегруючої ланки:

$$x_v = x_{v-1} + \frac{h_0}{2} (u_v + u_{v-1}).$$

В записаних формулах u_v і x_v - вхідна і вихідна змінні ланки; $h_0 = 0,05h$ - крок моделювання; $h = 0,01\text{с}$ - крок квантування (інтервал подачі даних в НР).

Дослідимо точність відпрацювання СУ з цифровим НР закону зміни вхідного впливу. Діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів наступні:

$$[\theta_{\min} = -0,1; \theta_{\max} = 0,1], [\dot{\theta}_{\min} = -0,2; \dot{\theta}_{\max} = 0,2] \text{ і } [m_{\min} = -0,015; m_{\max} = 0,015].$$

Час розгону двигуна $\tau_r = 6 \text{ с.}$

На рис. 4 продемонстровано результати дослідження точності відпрацювання СУ заданого закону зміни вхідного впливу: a - поточна помилка $\theta(t) = u_1(t) - u_2(t)$; b - керуючий вплив на ОК m ; v - вхід $u_1(t)$ і вихід $u_2(t)$ системи.

Розглянемо другий варіант синтезу цифрового нечіткого регулятора СУ частотою обертання ротора газотурбінного двигуна.

Для простоти рішення задачі синтезу НР припустимо, що число термів, з допомогою яких оцінюється лінгвістичні змінні (вхідні і вихідні параметри НР) помилка системи θ , швидкість зміни (перша похідна) помилки $\dot{\theta}$, прискорення (друга похідна) помилки $\ddot{\theta}$, керуючого впливу на об'єкт m , мінімальне, тобто рівне 2. Відобразимо діапазони: $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$, $[\ddot{\theta}_{\min}, \ddot{\theta}_{\max}]$ і $[m_{\min}, m_{\max}]$ зміни вхідних і вихідних параметрів на єдину універсальну множину $U_i = [0, L_i - 1] = [0, 1]$, де $L_i = 2$ - число, що відповідає кількості термів кожної лінгвістичної змінної x_i , $i = \overline{1, n}$, $n = 4$. При цьому перерахунок фіксованого значення параметра $x_i^* \in [x_{ni}, x_{ei}]$ у відповідний елемент $u^* \in [0, 1]$ визначається пропорцією [7]:

$$(x_{ei} - x_{ni}) / (1 - 0) = (x_i^* - x_{ni}) / (u^* - 0),$$

із якої отримуємо:

$$u^* = (x_i^* - x_{ni}) / (x_{ei} - x_{ni}). \quad (9)$$

Таким чином знаходимо:

$$u_1^* = (\theta^* - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min}); \quad (10)$$

$$u_2^* = (\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{\min}) / (\dot{\theta}_{\max} - \dot{\theta}_{\min}); \quad (11)$$

$$u_3^* = (\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}_{\min}) / (\ddot{\theta}_{\max} - \ddot{\theta}_{\min}); \quad (12)$$

$$u_4^* = (m^* - m_{\min}) / (m_{\max} - m_{\min}). \quad (13)$$

На множині $U = [0, 1]$ задамо дві нечіткі підмножини, функції належності, яких трикутної форми ($\mu^1(u)$ і $\mu^2(u)$) показані на рис. 4.

Для одержання аналітичних виразів запропонованих ФН скористаємось рівнянням прямої, що проходить через точки з координатами (u_1, μ_1) і (u_2, μ_2) , вигляду (6)

Тоді, відповідно до рис. 4, одержимо наступні ФН для кожної лінгвістичної величини:

$$\mu^1(u) = 1 - u, \quad u \in [0, 1];$$

$$\mu^2(u) = u, \quad u \in [0, 1]. \quad (14)$$

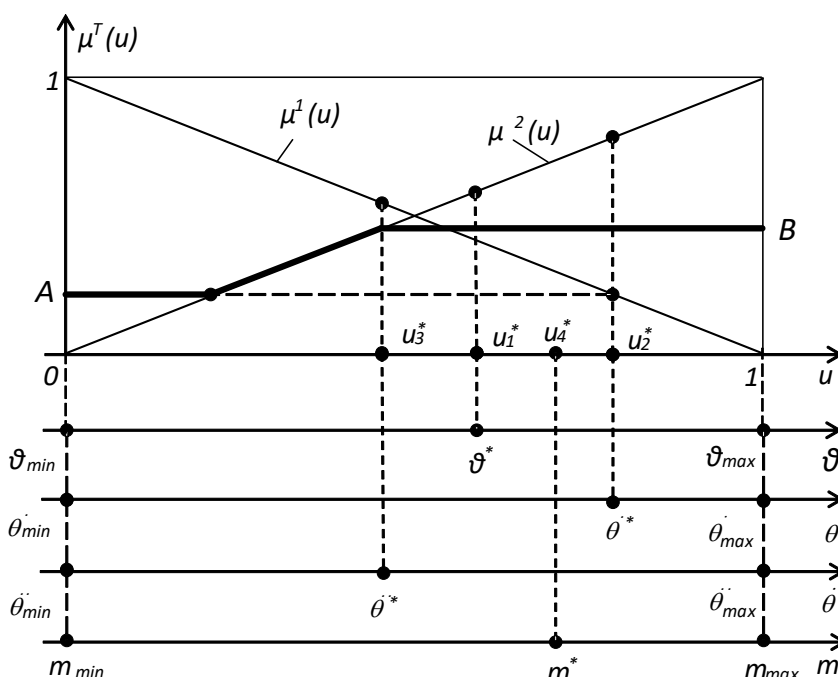


Рисунок 4 – Функції належності двох нечітких підмножин на множині $U = [0, 1]$

Для одержання аналітичних виразів запропонованих ФН скористаємось рівнянням прямої, що проходить через точки з координатами (u_1, μ_1) і (u_2, μ_2) , вигляду (6)

Тоді, відповідно до рис. 4, одержимо наступні ФН для кожної лінгвістичної величини:

$$\mu^1(u) = 1 - u, \quad u \in [0, 1];$$

$$\mu^2(u) = u, \quad u \in [0, 1]. \quad (14)$$

При подачі на НР значень вхідних змінних $\theta^*, \dot{\theta}^*$ і $\ddot{\theta}^*$ з кроком квантування h здійснюється перерахунок величин u_1^*, u_2^*, u_3^* за формулами (10) - (12) і ФН $j = \overline{1, 2}$, за формулами (14).

Сформулюємо лінгвістичне правило управління НР у вигляді:

$$\text{Якщо } (\theta^* = a_1^j) \text{ і } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ і } (\ddot{\theta}^* = a_3^j), \\ \text{то } (m^* = a_4^j), \quad j = \overline{1, 2}, \quad (15)$$

де a_1^j, a_2^j і a_3^j - лінгвістичні оцінки помилки швидкості зміни (першої похідної) помилки і другої похідної помилки, які розглядаються як нечіткі множини, визначені на універсальній множині, $j = \overline{1, 2}$; a_4^j - лінгвістичні оцінки керуючого впливу на об'єкт, які вибрані із терм-множини змінної m . Лінгвістичні оцінки

вибираємо із терм-множини лінгвістичних змінних $\theta^*, \dot{\theta}^*$ і $\ddot{\theta}^*$ і m :

$$a_i^j \in \{\text{негативний (1), позитивний (2)}\}.$$

Іншими словами, всі сигнали (визначені вище лінгвістичні змінні) в СУ характеризуються як негативні ($j = 1$) або позитивні ($j = 2$).

Нехай $\mu^j(x_i)$ ФН параметра $x_i \in [x_{ni}, x_{bi}]$ нечіткому терму a_i^j , $i = \overline{1, 3}$; $j = \overline{1, 7}$. Тоді $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ - залежить від трьох змінних ($x_1 \equiv \theta$; $x_2 \equiv \dot{\theta}$; $x_3 \equiv \ddot{\theta}$) функція належності вектора параметрів рішення (вибраному керуючому впливу на об'єкт) m_j , $j = \overline{1, 7}$, визначається із системи нечітких логічних рівнянь:

$$\mu^{m_j}(x_1, x_2, x_3) = \mu^j(x_1) \wedge \mu^j(x_2) \wedge \mu^j(x_3) \quad (16).$$

Таким чином, $\mu^{m_1}(x_1, x_2, x_3)$ - функція належності керуючого впливу нечіткій множині „негативний”, а $\mu^{m_2}(x_1, x_2, x_3)$ - функція належності керуючого впливу нечіткій множині „позитивний”. Результуюча ФН для керуючого впливу у відповідності з робочим правилом НР записується у вигляді:

$$\mu^m(x_1, x_2, x_3) = \mu^{m_1}(x_1, x_2, x_3) \vee \mu^{m_2}(x_1, x_2, x_3). \quad (17)$$

У виразах (16) і (17) \wedge - логічне і, \vee - логічне або.

У відповідності з лінгвістичними правилами керування, які формалізовані системою нечітких логічних рівнянь (16) ФН керуючого впливу $\mu^1(u_4)$ нечіткій множині „негативний” обмежена зверху значенням:

$$A = \min[\mu^1(u_1^*), \mu^1(u_2^*), \mu^1(u_3^*)], \quad (18)$$

а ФН керуючого впливу $\mu^2(u_4)$ нечіткій множині „позитивний” обмежена зверху значенням:

$$u_4^* = \frac{\sum_{k=1}^N (a_{k+1} - a_k) [(2a_{k+1} + a_k)b_{r+1} + (2a_k + a_{k+1})b_k]}{3 \sum_{k=1}^N (a_{k+1} - a_k)(b_{k+1} + b_k)}, \quad (22)$$

де N - число вершин, a_k, b_k - координати вершин результуючої фігури.

Одержане значення u_4^* на основі формули (22) перетвориться в значення керуючого впливу на ОК:

$$m^* = m_{min} + (m_{max} - m_{min})u_4^*. \quad (23)$$

Дослідимо точність відпрацювання СУ з цифровим fuzzy-регулятором закону зміни вхідного впливу, заданого поліномом:

$$\alpha_1(t) = 1,3316 \times 10^{-3} + 0,1653269t - 0,4785008t^2 + 0,1037928t^3 - 8,8016 \times 10^{-3}t^4 + 3,404 \times 10^{-4}t^5 - 5,093 \times 10^{-6}t^6.$$

Діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів (вибираються при проектуванні НР і уточнюються шляхом математичного моделювання з метою одержання прийнятних показників якості перехідного процесу в замкнутій системі):

$$[\theta_{min}, \theta_{max}] = [-1,02; 1,02], \quad [\dot{\theta}_{min}, \dot{\theta}_{max}] = [-4; 4],$$

$$[\ddot{\theta}_{min}, \ddot{\theta}_{max}] = [-24; 24] \text{ і } [m_{min}, m_{max}] = [-1, 1].$$

Припустимо, що задана функція зміни частоти обертання ротора газотурбінного двигуна $\omega_1(t)$, залежності параметрів $\alpha(t), T_{ГТД}(t)$ і $T_{ДВ}$ передавальної функції $G_O(s)$ від часу роботи газотурбінного двигуна визначаються за приведеними вище формулами. Дослідимо

$$B = \min[\mu^2(u_1^*), \mu^2(u_2^*), \mu^2(u_3^*)]. \quad (19)$$

Результуюча ФН для керуючого впливу на основі виразу (13) визначається як:

$$\mu(u_4) = \mu^1(u_4) \vee \mu^2(u_4), \quad (20)$$

тобто одержується формуванням максимуму (товста лінія на рис. 4):

$$\mu(u_4) = \max[\mu^1(u_4), \mu^2(u_4)]. \quad (21)$$

Для визначення конкретного значення керуючого впливу m^* формується „результуюча фігура”, обмежена результуючою ФН.

Відбувається пошук абсциси "центру тяжіння" результуючої фігури за формулою [9]:

точність відпрацювання СУ з цифровим fuzzy-регулятором закону зміни вхідного впливу.

Діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів наступні:

$$[\theta_{min} = -1; \theta_{max} = 1], \quad [\dot{\theta}_{min} = -4,5; \dot{\theta}_{max} = 4,5],$$

$$[\ddot{\theta}_{min} = -32; \ddot{\theta}_{max} = 32] \text{ і } [m_{min} = -1; m_{max} = 1].$$

Час розгону газотурбінного двигуна $\tau_r = 6$ с. Крок квантування $h = 0,01$ с.

Висновок В роботі досліджена система адаптивного управління частотою обертання ротора газотурбінного двигуна при розглянутих вище параметрах ОК і вхідному впливі. Порівняльна оцінка роботи (характеризується поточною помилкою) системи адаптивного управління і системи, розрахованої на базі НЛ, дає можливість зробити висновок, що застосування НР для управління частотою обертання ротора ГТД є доцільним, оскільки поточна помилка в системі з нечітким регулятором не перевищує поточну помилку в адаптивній системі.

Література

1. Зак Ю. А. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных : Fuzzy-технологии. Зак. - 2-е изд. Москва, 2016. 352 с.
2. Hanss M. Applied Fuzzy Arithmetic [electronic resource]: An Introduction with Engineering Applications / by Michael Hanss. - Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. // Springer e-books - v.: digital
3. Ho H. F., Wong Y. K., Rad A. B. Adaptive PID controller for nonlinear systems with H_{∞} tracking performance. *Physics and Control*, 2003. Proceedings. 2003 International Conference (Volume: 4), 20-22 Aug. 2003. 2003. P. 1315-1319.
4. Тельнов К.А., Файнштейн А. А., Шабашов С. 3. Автоматизация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Учебное пособие. Ленинград: Недра, 1983. 280 с.
5. Macedo Mourelle, Luiza de. Fuzzy Systems Engineering [electronic resource] / Theory and Practice edited by Luiza de Macedo Mourelle, Nadia Nedjah. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag GmbH., 2005 Springer e-books - v.: digital.
6. Sementsov G.N., Kuchmistenko O. V. Fazzi-model for simulation of unauthorized leakage of oil from the pipeline. *Academic Bulletin*. 2004. № 13. P. 84-86.
7. Семенцов Г.Н. Интеллектуальні системи керування технологічними процесами: навч. посіб. ІФ. : ІФНТУНГ, 2012. - 173 с.

References

1. Zak Yu. A. Pryn'yaty'e resheny`j v uslovy`yax nechetky`x y` razmytyx dannyx : Fuzzy-texnologiy`. Zak. - 2-e y`zd. Moskva, 2016. 352 s.
2. Hanss M. Applied Fuzzy Arithmetic [electronic resource]: An Introduction with Engineering Applications / by Michael Hanss. - Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. // Springer e-books - v.: digital
3. Ho H. F., Wong Y. K., Rad A. B. Adaptive PID controller for nonlinear systems with H_{∞} tracking performance. *Physics and Control*, 2003. Proceedings. 2003 International Conference (Volume: 4), 20-22 Aug. 2003. 2003. R. 1315-1319.
4. Tel`nov K.A., Fajnshtejn A. A., Shabashov S. Z. Avtomaty`zacy`ya gazoperekachy`vayushhy`x agregatov s gazoturby`nnym pry`vodom. Uchebnoe posoby`e. Leny`ngrad: Nedra, 1983. 280 s.
5. Macedo Mourelle, Luiza de. Fuzzy Systems Engineering [electronic resource] / Theory and Practice edited by Luiza de Macedo Mourelle, Nadia Nedjah. - Berlin Heidelberg : Springer-Verlag GmbH., 2005 // Springer e-books - v.: digital.
6. Sementsov G.N., Kuchmistenko O. V. Fazzi-model for simulation of unauthorized leakage of oil from the pipeline. *Academic Bulletin*. 2004. # 13. P. 84-86.
7. Sementcov G.N. Intelktualni systemy keruvannya texnologichnymy procesamy: navch. posib. IF.: IFNTUNG, 2012. 173 s.