

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.2.167504

УДК 681.516.75

Т.Г. Баган*, М.Ю. Кузін

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*corresponding author: mtbagan@ukr.net

FUZZY-LOGIC КОНТРОЛЕР ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Проблематика. Нечітка логіка надає широкі можливості до застосування і дає змогу виводити бази знань та експертні системи нового типу, які здатні пам'ятати і обробляти неточну інформацію. До того ж системи з нечіткою логікою застосовуються в автоматичних системах різного призначення. Однак апарат теорії нечітких множин є нетривіальним для реалізації та вимагає чіткого розуміння процесу і коректності задання правил.

Мета дослідження. Метою дослідження є аналіз математичних методів при проектуванні та налагодженні регуляторів на базі нечіткої логіки.

Методика реалізації. Алгоритм синтезу нечіткого логічного регулятора складається із 4 етапів: фазифікації, опису нечітких правил, за допомогою яких проходить вибір керуючого впливу, агрегації та дефазифікації. За основу дослідження був взятий газотурбінний двигун, який являє собою складну термодинамічну систему. Було використано 3 терми для опису вхідних та вихідних логічних змінних. Вхідною змінною є величина помилки між діючою та необхідною частотами обертання силової турбіни, а вихідною – величина необхідної похідної частоти обертання ротора турбокомпресора. Результатом проведеного синтезу стає нечіткий пропорційний регулятор (П-регулятор), визначений як статичний з нелінійним коефіцієнтом підсилення.

Результати дослідження. Отримані результати моделювання доводять, що нечіткий П-регулятор забезпечує достатній запас стійкості, високу статичну точність і аперіодичний перехідний процес, що є суттєвими перевагами при роботі газотурбінного двигуна, оскільки коливальність процесу може призвести до порушення роботи ротора та виведення його з ладу.

Висновки. Введення нечіткого логічного пристрою П-типу кардинально змінює перехідний процес до аперіодичного типу із плавним пуском. Складена нечітка база правил підвищує швидкодію системи на 43 %, збільшуючи статичну точність у 10 разів, та зовсім анулює перерегулювання. Застосування нечітких регуляторів приводить до збільшення якості регулювання в умовах неможливості використання традиційних регуляторів.

Ключові слова: нечітка логіка; fuzzy-контролер; система керування.

Вступ

З часу свого заснування нечітка логіка надавала широкі можливості до застосування: від простого прогнозування до керування в умовах невизначеності. Проте апарат теорії нечітких множин виявився нетривіальним для реалізації. З розвитком рівня науки і технології нечітка логіка посіла певне місце серед інших спеціальних наукових дисциплін. На сьогодні її місце можна ідентифікувати між експертними системами та нейронними мережами.

Класична логіка оперує тільки двома основними поняттями: ІСТИНА і ХИБНІСТЬ, без будь-яких проміжних значень. Аналогічно цьому булева логіка не визнає нічого, крім одиниць і нулів. Нечітка логіка спирається на теорію нечітких множин, у якій функція приналежності елемента множини не бінарна ("0" чи "1"), а може набувати будь-якого значення в діапазоні від 0 до 1 включно [1]. Це надає пер-

спективу визначати такі поняття, які нечіткі за самою своєю природою: "кращий", "низький", "сильний" тощо. Нечітка логіка дає змогу виконувати над подібними лінгвістичними змінними широкий діапазон стандартних логічних операцій: об'єднання, перетин, заперечення та інші. До того ж нечітка логіка надає можливість виводити бази знань та експертні системи нового типу, які здатні пам'ятати і обробляти неточну інформацію. Іншою областю застосування нечіткої логіки є електронні системи різного призначення – від автоматизованих систем керування заводських цехів і технологічних процесів до систем оцінки глобального забруднення атмосфери і передбачення землетрусів.

Постановка задачі

Метою дослідження є аналіз математичних методів при проектуванні та налагодженні регуляторів на базі нечіткої логіки.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- дослідити роль математичних методів та їх використання в теорії керування;
- дослідити основи теорії множин при проектуванні нечітких регуляторів;
- провести дослідження відмінності системи регулювання із лінійним регулятором та системи із регулятором, побудованим на нечіткій логіці.

Математичні методи елементів нечіткої логіки fuzzy-контролера

Формально лінгвістична змінна задається набором $\{X, T(X), U, G, M\}$, де X – назва цієї змінної; $T(X)$ – терм-множина змінної X , тобто множина її значень; U – універсальна множина; G – синтаксичне правило, яке породжує назву значень змінної X ; M – семантичне правило, яке ставить у відповідність кожному значенню лінгвістичної змінної її сенс.

На відміну від класичної теорії множин, що оперує поняттям приналежності та неналежності елемента множині, теорія нечітких множин допускає різний ступінь приналежності до них, який визначається функцією приналежності елемента, значення якої змінюються в інтервалі $[0,1]$.

Таким чином, сенс лінгвістичного значення X характеризується деякою функцією приналежності $\mu: U \rightarrow [0,1]$, яка кожному елементу U ставить у відповідність число з інтервалу $[0,1]$.

Застосування традиційної нечіткої логіки в сучасних системах вкрай обмежене такими факторами [2]:

- 1) як правило, складна система керування має більшу кількість входів, ніж сам звичайний нечіткий додаток;
- 2) додавання вхідних змінних збільшує складність обчислень експоненціально;
- 3) як наслідок попереднього пункту, збільшується база правил, що призводить до важкого її прийняття.

Основна структура та принцип роботи системи нечіткої логіки

Блок фазифікації здійснює перетворення вимірних реальних даних (наприклад, швидкості, температури, тиску тощо) у відповідні для цього значення лінгвістичних змінних.

Нечітка база правил містить дослідні дані про процес керування і знання експертів у даній галузі. Блок виведення, який є ядром систем із нечіткою логікою (СНЛ), моделює процедуру прийняття рішення людиною. Організація виведення заснована на проведенні нечітких міркувань з метою досягнення необхідної стратегії керування.

Блок дефазифікації застосовується для виведення чіткого рішення або дії, що керує у відповідь на результати, отримані в блоці виведення.

У процесі функціонування СНЛ обчислюються значення керуючих змінних (або змінних впливу) на основі даних, одержуваних при спостереженні або вимірі змінних стану керованого процесу, для досягнення бажаної мети керування.

Отже, правильний вибір змінних стану керованого процесу, а також керуючих змінних об'єкта керування дуже важливий для характеристики роботи СНЛ і чинить основний вплив на її продуктивність [3].

Досвід експерта й інженерні знання відіграють дуже велику роль на етапі вибору змінних стану і керуючих змінних. Зазвичай вхідними сигналами для СНЛ є стан об'єкта, помилка обчислення стану, похідна помилки, інтеграл від помилки тощо. Із дотриманням правил задання лінгвістичних змінних вхідний вектор \mathbf{X} і вектор вихідного стану \mathbf{Y} , який містить можливі стани (або керуючі сигнали) об'єкта керування, можуть бути визначені відповідно як:

$$\mathbf{X} = \{(x_i, U_i, [T_{xi}^1, T_{xi}^2, \dots, T_{xi}^{ki}]),$$

$$[\mu_{xi}^1, \mu_{xi}^2, \dots, \mu_{xi}^{ki}] |_{i=1, n}\},$$

$$\mathbf{Y} = \{(y_i, V_i, [T_{yi}^1, T_{yi}^2, \dots, T_{yi}^{ki}]),$$

$$[\mu_{yi}^1, \mu_{yi}^2, \dots, \mu_{yi}^{ki}] |_{i=1, m}\},$$

де x_i – вхідні лінгвістичні змінні, які утворюють нечітку множину стану входів $U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$; y_i – вихідні лінгвістичні змінні, що утворюють нечітку множину стану виходів $V = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_m$.

Із цих рівнянь слідує, що вхідна лінгвістична змінна x_i у предметній області U_i характеризується як

$$T(x_i) = [T_{xi}^1, T_{xi}^2, \dots, T_{xi}^{ki}] \text{ і}$$

$$\mu(x_i) = [\mu_{xi}^1, \mu_{xi}^2, \dots, \mu_{xi}^{ki}],$$

де $T(x_i)$ – множина термів для x_i , тобто множина імен значень лінгвістичної змінної i , пов'язаних із кожним зі значень.

Аналогічно вихідна лінгвістична змінна y_i пов'язана із множиною

$$T(y_i) = [T_{yi}^1, T_{yi}^2, \dots, T_{yi}^{ki}] \text{ і}$$

$$\mu(y_i) = [\mu_{yi}^1, \mu_{yi}^2, \dots, \mu_{yi}^{ki}].$$

Розмір (або потужність) множини термів $T(x_i) = k_i$ визначає число нечіткого розбиття вхідного простору на підмножини відповідно до вибраної ступенем деталізації опису об'єкта керування [4]. На рис. 1, а зображені три нечіткі підмножини на інтервалі $[-1, +1]$. Випадок семи нечітких підмножин, що перетинаються, показаний на рис. 1, б.

Першим етапом роботи нечіткого регулятора є фазифікація. У реальних СНЛ дані, що спостерігаються, зазвичай є чіткими (хоча вони можуть бути зашумлені). Природний і простий метод вхідного перетворення полягає в тому, щоб перетворити чітке значення x_0 у нечіткий Сингтон (Singleton) A . Це означає, що функція приналежності $\mu_a(x)$ буде дорівнювати 1 у точці x_0 і нулю у всіх інших точках. У цьому випадку будь-яке конкретне значення $x_i(t)$ у момент часу t відображається на нечітку множину T_{xi}^1 зі значенням $\mu_{xi}^1(x_i(t))$, а на нечітку множину T_{xi}^2 – зі значенням $\mu_{xi}^2(x_i(t))$ і т.д.

Наступним елементом нечіткого регулятора є наявність бази правил нечіткої логіки, які представляються набором нечітких конструкцій типу “якщо–то”, в яких передумови і укладен-

ня мають на увазі використання лінгвістичних змінних. Такий набір керуючих правил нечіткої логіки (або нечітких керуючих тверджень) чітко визначає зв'язок входу системи з її виходом. Загальна форма подання правил нечіткої логіки для випадку СНЛ із множиною входів і одним виходом (MISO – “multi–input–single–output”) така:

$$R^i : \text{IF } x \text{ is } A_i, \dots, \text{ AND}$$

$$y \text{ is } B_i \text{ THEN } z = C_i, i = 1, n,$$

де x, \dots, y і z – лінгвістичні змінні, що представляють змінні стану деякого керованого процесу і керуючі змінні відповідно; A_i, \dots, B_i і C_i – лінгвістичні значення змінних x, \dots, y і z у предметних областях U, \dots, V і W відповідно.

Переважає більшість реально працюючих прикладних систем, що використовують проміжні нечіткі оцінки, є системами, заснованими на нечітких продукційних правилах [5]. При виконанні нечітких висновків використовуються нечіткі відносини R , задані між однією областю (множина X) та іншою областю (множина Y) у вигляді непарної підмножини прямого виразу $X \times Y$, який визначається згідно з формулою

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{[\mu_R(x_i, y_j)](x_i, y_j)\},$$

де $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – область посилянь; $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ – область висновків; $\mu_R(x_i, y_j)$ – функція приналежності (x_i, y_j) нечіткому відношенню R ; $\mu_R(x_i, y_j) \in [0, 1]$, а знак \sum означає сукупність множин.

Останнім етапом роботи СНЛ має бути дефазифікація. Ця процедура є необхідною в тих випадках, коли потрібна інтерпретація не-

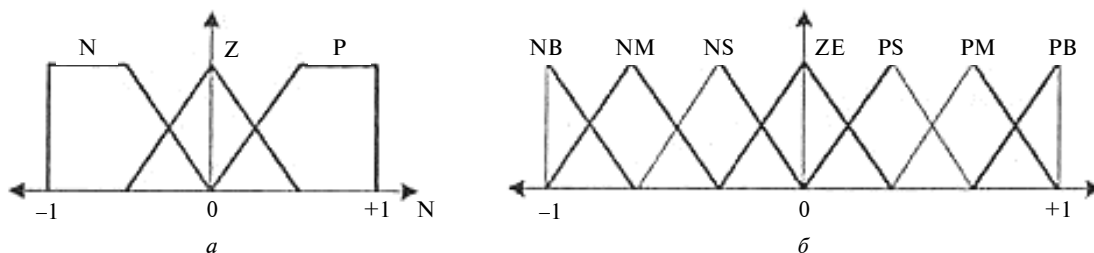


Рис. 1. Графічне представлення нечіткої логіки: а – груба нечітка декомпозиція з трьома нечіткими підмножинами: N – негативний, Z – нуль, P – позитивний; б – більш детальна нечітка декомпозиція із сімома компонентами: NB – негативний великий, NM – негативний середній, NS – негативний маленький, ZE – нуль, PS – позитивний маленький, PM – позитивний середній, PB – позитивний великий

чітких висновків конкретними чіткими величинами, тобто коли на основі функції приналежності $\mu_C(Z)$ виникає потреба визначити для кожної точки в Z конкретні числові значення.

На сьогодні відсутня систематична процедура вибору стратегії дефазифікації. На практиці часто використовують два найбільш загальних методи: метод центра тяжіння (ЦТ – центроїдного) та метод максимуму (ММ).

Для дискретних просторів у центроїдному методі формула для обчислення чіткого значення вихідної змінної має такий вигляд:

$$Z_{\text{ЦТ}} = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_C(z_j) z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_C(z_j)},$$

у загальному випадку:

$$Z_{\text{ЦТ}} = \frac{\int \mu_C(z) z dz}{\int \mu_C(z) dz}.$$

Стратегія дефазифікації ММ передбачає підрахунок усіх тих z , чий функції приналежності досягли максимального значення [5]. У цьому випадку (для дискретного варіанта)

отримаємо $Z_{\text{ММ}} = \sum_{j=1}^m \frac{z_j}{m}$, де z – вихідна змінна, для якої функція приналежності досягла максимуму; m – число таких величин.

Із цих двох найбільш часто використовуваних стратегій дефазифікації стратегія ММ дає кращі результати для перехідного режиму, а ЦТ – в усталеному режимі через меншу середньоквадратичну помилку [6].

Опис об'єкта керування та моделювання лінійного пропорційно-диференційного регулятора

За основу дослідження взято об'єкт керування – газотурбінний двигун (ГТД), який являє собою складну термодинамічну систему. Основні задачі системи керування ГТД – керування його режимами роботи, підтримка та/або обмеження різноманітних параметрів, діагностика і контроль стану двигуна [7].

Основний контур ГТД – підтримка частоти обертання головного вала $n_{\text{ГВ}}$. Ця задача виконується через керування частотою обертання

силової турбіни (СТ) $n_{\text{СТ}}$ через необхідну витрату палива G_{T} . Величина необхідної витрати палива формується по частоті обертання ротора турбокомпресора (ТК) $n_{\text{ТК}}$ і його похідній $\dot{n}_{\text{ТК}}$ [8].

Вираз, який описує контур підтримання частоти обертання СТ з лінійним пропорційно-диференційним регулятором (далі – ПД-регулятор), має вигляд

$$N_{\text{ТК}} = \Delta n_{\text{СТ}} K_p + n_{\text{СТ}} K_d,$$

де $\Delta n_{\text{СТ}}$ – помилка неузгодженості між поточним та необхідним значеннями частоти обертання СТ.

Коефіцієнти підсилення пропорційної K_p та диференційної K_d ланки визначаються із рівнянь [9]:

$$K_p = K(\Delta n_{\text{СТ}}) K_p^{\text{стат}} G_{\text{T}}^{\text{стат}}(n_{\text{ТК}}) a_{13}(n_{\text{ТК}}),$$

$$K_d = K_d^{\text{стат}} T_{\text{СТ}}(n_{\text{ТК}}),$$

де $G_{\text{T}}^{\text{стат}}$ – характеристика статичної витрати палива, $a_{13}(n_{\text{ТК}})$ – коефіцієнт лінійно-динамічної моделі двигуна по витраті палива, $T_{\text{СТ}}(n_{\text{ТК}})$ – стала часу ротора силової турбіни.

Коефіцієнт $K(\Delta n_{\text{СТ}})$ задається такою системою рівнянь:

$$K(\Delta n_{\text{СТ}}) = \begin{cases} |\Delta n_{\text{СТ}}|, & \Delta n_{\text{СТ}} \leq 1, \\ 1 + 0,5(\Delta n_{\text{СТ}} - 1), & 1 < \Delta n_{\text{СТ}} \leq 3, \\ 2 + \frac{2}{7}(\Delta n_{\text{СТ}} - 3), & \Delta n_{\text{СТ}} > 3. \end{cases}$$

Статичний коефіцієнт пропорційної ланки $K_p^{\text{стат}}$ дорівнює 0,35, а диференційної ланки $K_d^{\text{стат}}$ становить 0,05.

На рис. 2 зображено графік перехідного процесу по частоті обертання силової турбіни при роботі одного двигуна з лінійним ПД-регулятором.

Одним із важливих критеріїв якості оцінки роботи СТ є перерегулювання. Воно вказує на наявність та величину залишкових коливань у системі після нанесення збурень. Для перехідних процесів, що викликані вхідним збуренням, цей критерій визначається як відношення другого (від'ємного) максимального відхилення до першого максимального відхилення. З рис. 2 видно, що вихід на режим супроводжу-

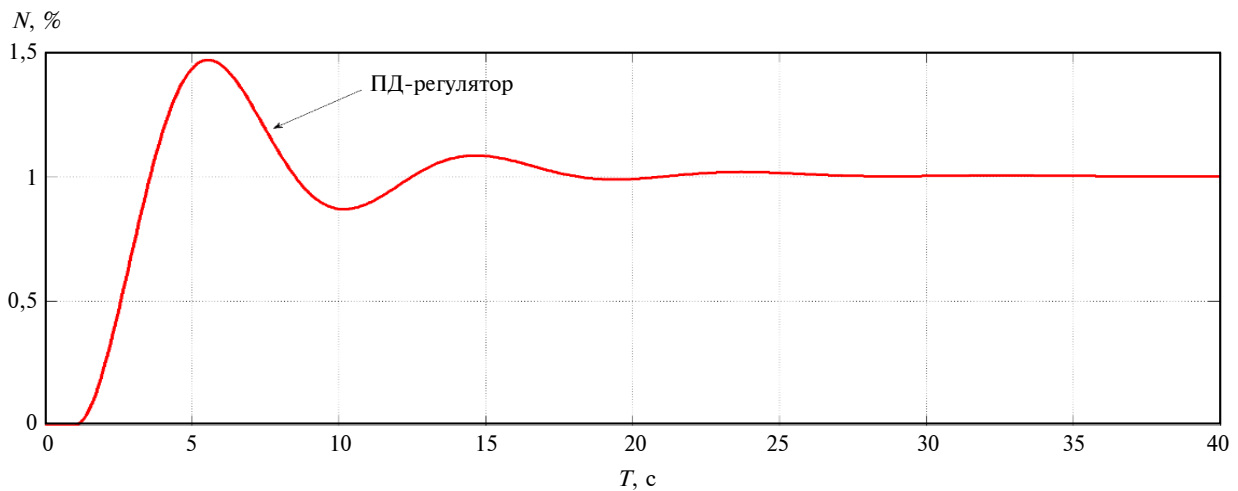


Рис. 2. Перехідний процес по частоті обертання при роботі одного двигуна з лінійним пропорційно-диференціальним регулятором контуру підтримки частоти обертання силової турбіни

ється перерегулюванням майже 14 %. Амплітуда незатухаючих коливань становить 0,38. Час переходного процесу – близько 35 с.

Синтез нечіткого логічного регулятора

Стандартний алгоритм синтезу нечіткого логічного регулятора (НЛР) складається з таких 4 етапів: фазифікація, опис нечітких правил, за якими проходить вибір керуючого впливу, агрегація та дефазифікація.

Результатом синтезу стає нечіткий пропорційний регулятор (П-регулятор), визначений як статичний з нелінійним коефіцієнтом підсилення. Регулятор описується виразом вигляду: $n_{TK} = f(\Delta n_{CT})$, при цьому функція $f(\Delta n_{CT})$ є нелінійною.

У НЛР П-типу використано 3 терми для опису вхідних та вихідних логічних змінних [10]. Вхідною змінною є величина помилки між діючою та необхідною частотами обертання СТ (Δn_{CT}), а вихідною – величина необхідної похідної частоти обертання ротора ТК n_{TK} . Терми та діапазони їх зміни на чіткій множині для вхідних і вихідних лінгвістичних змінних подані в табл. 1.

Ступінь приналежності чітких значень до термів N і P визначається сигмоїдною функцією приналежності, яка описується виразом вигляду

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + e^{-A(x-B)}}.$$

Ступінь приналежності чітких значень до терма Z визначається трикутною функцією

приналежності, яка описується виразом вигляду [6]

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < A, \\ \frac{x-A}{B-A}, & A \leq x \leq B, \\ \frac{C-x}{C-B}, & x > C, \end{cases}$$

де x – елемент чіткої множини; A , B і C – підмножини нечіткої множини, $\mu_A(x)$ – величина ступеня приналежності чітких вхідних та вихідних значень до кожного із термів нечіткої множини.

Таблиця 1. Терми вхідних і вихідних лінгвістичних змінних нечіткого логічного регулятора П-типу контуру підтримання частоти обертання силової турбіни

Терми вхідних лінгвістичних змінних	N	$[-30, 0]$	Терми вихідних лінгвістичних змінних	N	$[-1,2, 0]$
	Z	$[-25, 25]$		Z	$[-0,6, 0.6]$
	P	$[0, 30]$		P	$[0, 1,2]$

Примітка. N – (Negative) від'ємна величина; Z – (Zero) нульова величина; P – (Positive) позитивна величина.

Спільне розташування функцій приналежності, які визначають степінь приналежності кожного точного значення до одного із термів вхідної та вихідної величини лінгвістичної змінної, показано на рис. 3, 4.

У діапазоні змін, що більші за 30 % та менші за 30 %, вихідна величина необхідної похідної частоти обертання ротора ТК покладається сталою, яка дорівнює +10 та -10 %/с відповідно:

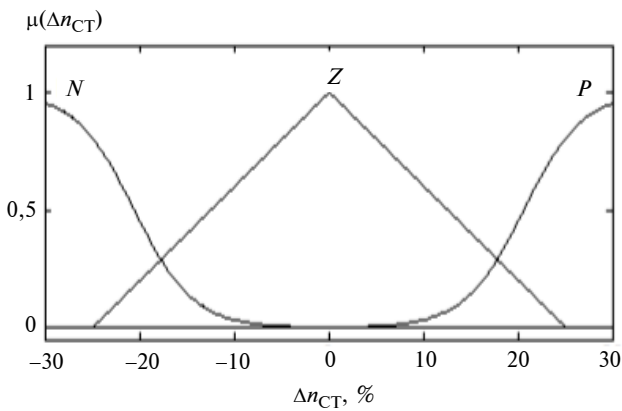


Рис. 3. Опис вхідних термів нечіткого пропорційного регулятора контуру підтримки частоти обертання силової турбіни

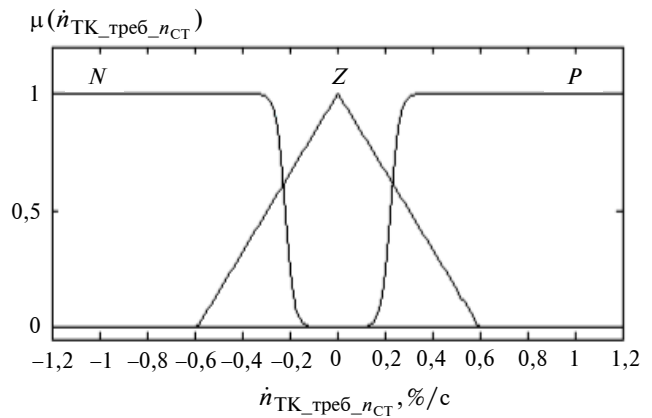


Рис. 4. Опис вихідних термів нечіткого пропорційного регулятора контуру підтримки частоти обертання силової турбіни

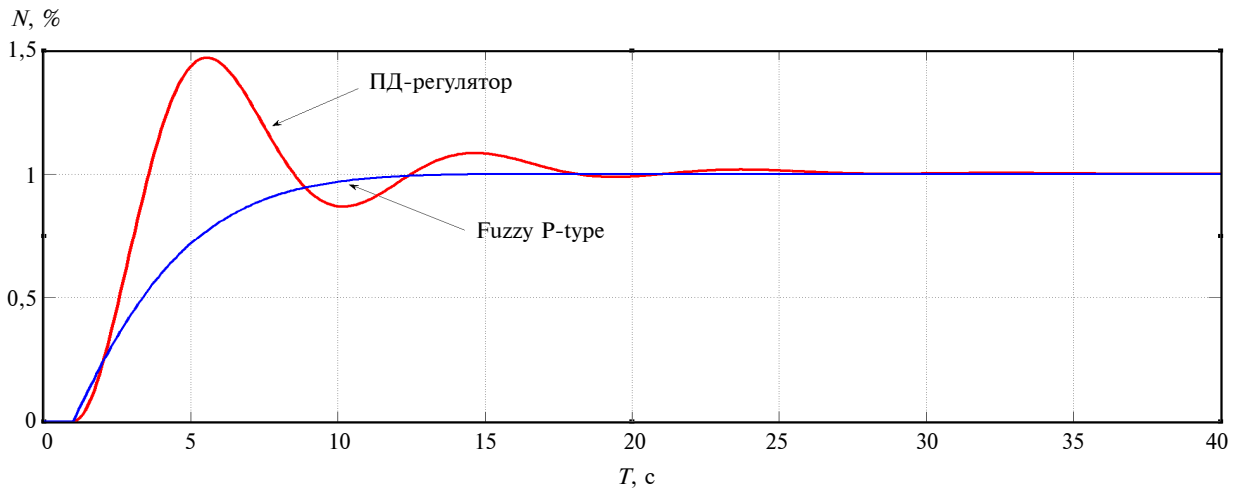


Рис. 5. Перехідна характеристика процесу по частоті обертання силової турбіни при роботі лінійного пропорційно-диференційного регулятора та нечіткого пропорційного регулятора

$$n_{TK} = \begin{cases} 10 \% / \text{с}, & \Delta n_{ST} > 30 \% , \\ -10 \% / \text{с}, & \Delta n_{ST} < -30 \% . \end{cases}$$

На рис. 5 зображена перехідна характеристика по частоті обертання силової турбіни при роботі НЛР П-типу.

Порівняльний аналіз якості роботи різних регуляторів для об'єкта керування

По отриманих перехідних процесах видно, що нечіткий П-регулятор забезпечує достатній запас стійкості, високу статичну точність і аперіодичний перехідний процес, що є суттєвими ознаками при роботі газотурбінного двигуна, оскільки коливальність процесу може призвести до порушення роботи ротора та виведення його з ладу.

У табл. 2 наведено числовий аналіз якості роботи контуру підтримки частоти обертання силової турбіни з двома регуляторами.

Таблиця 2. Аналіз якості роботи контуру підтримання частоти обертання силової турбіни із різними регуляторами

Характеристика	Початковий ПД-регулятор	НЛР П-типу
Статична точність, %	± 0,02	0,002
Швидкодія, с	35	20
Характер перехідного процесу	Коливальний	Аперіодичний
Величина перерегулювання	14	0

Висновки

У результаті дослідження можна сформулювати такі висновки.

Традиційна система регулювання із лінійним регулятором ПД-типу навіть за оптимальних налаштувань призводить до коливальності процесу, що для такого об'єкта керування, як газотурбінний двигун, є неприпустими, бо можливе виведення з ладу складових системи. Введення нечіткого логічного пристрою П-типу кардинально змінює перехідний процес (див. рис. 5) до аперіодичного типу із плавним пуском.

Складена нечітка база правил забезпечує підвищення швидкодії системи на 15 с, збільшуючи статичну точність, і зовсім анулює перерегулювання.

Застосування нечітких регуляторів призводить до покращення систем керування у випадках, коли необхідно скласти правила регулювання подібно до людського, а також у системах, де рішення повинні набувати проміжних значень у проекції інтервалу $[0, \dots, 1]$.

У сучасних системах регулювання використання принципів нечіткої логіки має великі перспективи, адже заміна традиційних пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів на регулятори, що основані на принципах fuzzy-logic, приводить до кардинальних змін характеристик перехідних процесів та якісної зміни процесів регулювання, які при застосуванні традиційних методів проектування систем керування є недосяжними.

References

- [1] Yu.M. Kovrigo *et al.*, *Modern Theory of Management*, part 2, *Applied Aspects and Theories of Management*. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky KPI, 2018.
- [2] V.I. Gostev, *Synthesis of Fuzzy Regulators of Automatic Control Systems*. Kyiv, Ukraine: Radioammator, 2005.
- [3] V.O. Nikifirov *et al.*, *Intellectual Management in Conditions of Uncertainty*. SPb, Russia: SPbGU ITMO, 2009.
- [4] O. Cordon and F. Herrera, "A general study of genetic fuzzy systems", in *Genetic Algorithms in Engineering and Computer Science*, P. Cuesta, Ed. John Wiley & Sons, 1995, pp. 33–57.
- [5] B. Kosko, "Fuzzy systems as universal approximators", *IEEE Trans. Computers*, vol. 43, no. 11, pp. 1329–1333, 1994. doi: 10.1109/12.324566
- [6] I.S. Kobersi *et al.*, "Control of the heating system with fuzzy logic", *World Appl. Sci. J.*, vol. 23, no. 11, pp. 1441–1447, 2013. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.11.13156
- [7] R. Goswami and D. Joshi, "Performance review of fuzzy logic based controllers employed in brushless DC motor", *Proc. Comp. Sci.*, vol. 132, pp. 623–631, 2018. doi: 10.1016/j.procs.2018.05.061
- [8] H. Sathishkumar and S.S. Parthasarathy, "A novel fuzzy logic controller for vector controlled induction motor drive", *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 686–691, 2017. doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.203
- [9] Y. Krim *et al.*, "Intelligent droop control and power management of active generator for ancillary services under grid instability using fuzzy logic technology", *Control Eng. Practice*, vol. 81, pp. 215–230, 2018. doi: 10.1016/j.conengprac.2018.09.013
- [10] O. Shtifzon *et al.*, "Development of the adaptive fuzzy-logic device for control system in conditions of parametric non-stationary plant", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 30–37, 2018. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121749

Т.Г. Баган, М.Ю. Кузин

FUZZY-LOGIC КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Проблематика. Нечеткая логика предоставляет широкие возможности для применения и позволяет выводить базы знаний и экспертные системы нового типа, которые способны помнить и обрабатывать неточную информацию. К тому же системы с нечеткой логикой применяются в автоматических системах различного назначения. Однако аппарат теории нечетких множеств является нетривиальным для реализации и требует четкого понимания процесса и корректности задания правил.

Цель исследования. Целью исследования является анализ математических методов при проектировании и наладке регуляторов на базе нечеткой логики.

Методика реализации. Алгоритм синтеза нечеткого логического регулятора состоит из 4 этапов: фазификации, описания нечетких правил, с помощью которых проходит выбор управляющего воздействия, агрегации и дефазификации. За основу исследования был взят газотурбинный двигатель, представляющий собой сложную термодинамическую систему. Были использованы 3 терма для описания входных и выходных логических переменных. Входной переменной является величина ошибки между действующей и необходимой частотами вращения силовой турбины, а выходной – величина необходимой производной частоты вращения ротора турбокомпрессора. Результатом проведенного синтеза становится нечеткий П-регулятор, определенный как статический с нелинейным коэффициентом усиления.

Результаты исследования. Полученные результаты моделирования показывают, что нечеткий П-регулятор обеспечивает достаточный запас устойчивости, высокую статическую точность и апериодический переходный процесс, что дает существенные преимущества при работе газотурбинного двигателя, поскольку колебательность процесса может привести к нарушению работы ротора и вывода его из строя.

Выводы. Введение нечеткого логического аппарата П-типа кардинально меняет переходный процесс до апериодического типа с плавным пуском. Составленная нечеткая база правил повышает быстродействие системы на 43 %, увеличивая статическую точность в 10 раз, и совсем аннулирует перерегулирование. Применение нечетких регуляторов приводит к увеличению качества регулирования в условиях невозможности использования традиционных регуляторов.

Ключевые слова: нечеткая логика; fuzzy-контроллер; система управления.

T.G. Bahan, M.Yu. Kuzin

FUZZY-LOGIC CONTROLLER FOR TECHNOLOGICAL OBJECTS MANAGEMENT

Background. Fuzzy logic provides many opportunities for application and allows you to display knowledge bases and expert systems of a new type that are able to remember and process inaccurate information. In addition, systems with fuzzy logic are applied in automatic systems for various purposes. However, the apparatus of the theory of fuzzy sets is nontrivial to implement and requires a clear understanding of the process and the correctness of setting the rules.

Objective. The aim of the paper is to analyze mathematical methods in the design and adjustment of regulators based on fuzzy logic.

Methods. The algorithm for the synthesis of the fuzzy logic controller consists of four phases: phasification, a description of fuzzy rules (through which the choice of control influence is carried out), aggregation and dephasing. The basis of the study was a gas turbine engine, which is a complex thermodynamic system. Three terms were used to describe the input and output logical variables. The input variable is the magnitude of the error between the current and the required rotational speed of the power turbine, and the output is the value of the required derivative of the turbocharger rotor speed. The result of the synthesis is a fuzzy P-regulator, defined as static with a nonlinear gain.

Results. The obtained simulation results show that the fuzzy P-controller provides an adequate margin of stability, high static accuracy and aperiodic transient process, which gives significant advantages when the gas turbine engine is operating, since the oscillatory process can lead to disruption of the rotor and its failure.

Conclusions. The introduction of a fuzzy logical P-type apparatus drastically changes the transition process to aperiodic type with a smooth start. A fuzzy rule base has been compiled providing a faster system performance by 43%, increasing the static accuracy by ten times and completely eliminates overshoot. The use of fuzzy regulators leads to an increase in the quality of regulation in the conditions of the impossibility of using traditional regulators.

Keywords: fuzzy-logic; fuzzy-controller; control system.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
16 січня 2019 року

Прийнята до публікації
25 квітня 2019 року