

мінними у системі дистанційного навчання, особливо із розвитком інформаційних та Інтернет-технологій.

1. Аванесов В.С. Методологические и теоретические основы тестового педагогического контроля: Автореф. дис... д-ра пед. наук: 13.00.01 / Санкт-Петербургский гос. ун-т. - СПб., 1994.
2. Аванесов В.С. Научные проблемы тестового контроля знаний. - М., 1994.
3. Балыкина Е.Н. Принципы конструирования тестовых заданий в контексте компьютерной реализации (на примере гуманитарных дисциплин) // Информационный Бюллетень Ассоциации "История и компьютер", № 30: Материалы VIII конференции АИК. - М., 2002.;
4. Майоров А.Н. Теория и практика создания тестов для системы образования. (Как выбирать, создавать и использовать тесты для целей образования). - М., 2001.
5. Пак Н.И., Филиппов В.В. О технологии создания компьютерных тестов // ИНФО.– 1997.– № 5.
6. Пак Н.И., Симонова А.Л. Методика составления тестовых заданий // ИНФО.– 1998.– № 5.
7. Шмелев А.Г. Компьютеризация экзаменов: проблема защиты от фальсификаций / XI Международная конференция-выставка "Информационные технологии в образовании": Сб. трудов участников конференции. Часть V. - М., 2001.

Ю.Кондратенко, І. Аль Зубі, О.Гарашенко

Український державний морський технічний
університет ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв

УДК 62-55: 618.515

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

© Кондратенко Ю., Аль Зубі І., Гарашенко О., 2002

Розглядаються проблеми проектування нечітких регуляторів для систем управління об'єктами різного призначення. Наводиться аналіз методів проектування, що суттєво впливають на розв'язок ряду компромісних задач, пов'язаних з мінімізацією ступеня складності апаратної реалізації нечітких цифрових регуляторів та забезпеченням необхідних показників якості систем управління. Обговорюються шляхи підвищення ефективності процесів проектування нечітких регуляторів на основі їх структурно-параметричної оптимізації.

The present article deals with the problems of fuzzy controllers' de-sign, which are components of control systems for various controlled objects. The analysis of design

methods solving compromise tasks between minimization of complication for fuzzy controllers' realization and providing desired performance measures of control systems is given. The various approaches for increasing efficiency of fuzzy controllers' design processes are discussed based on their structural-parametric optimization.

Вступ

Проблеми проектування систем управління об'єктами, що функціонують в умовах невизначеності [5], пов'язані, перш за все, з розробкою ефективних методів і засобів для підвищення показників якості управління при дотриманні відповідних обмежень щодо складності апаратної реалізації керуючих пристроїв - регуляторів. Дослідженнями, що проводяться в різних країнах [1,4,11-16], доведено, що для багатьох об'єктів управління, параметри яких змінюються в процесі функціонування або умови функціонування яких змінюються випадково, доцільним є використання нечітких систем автоматичного управління (НСАУ) або систем управління з нечіткими регуляторами (фаззі-контролерами). Ефективне поєднання методів теорії управління, теорії нечітких множин та нечіткої логіки дозволяє формувати лінгвістичні моделі важкоформалізованих процесів та об'єктів управління, а також забезпечувати формування керуючих сигналів адекватно процесам прийняття рішень спеціалістом-експертом [1,7,8,16]. У багатьох випадках ПД фаззі-контролери за своїми показниками перевершують традиційні ПД-регулятори з оптимальними апіорними настройками їх параметрів [1].

У сучасній науково-технічній літературі наводиться багато прикладів ефективного застосування нечітких контролерів (НК) при управлінні:

- змішувачами в системах водопідготовки; нелінійними електроприводами на основі асинхронних двигунів та двигунів постійного струму з послідовним збудженням при керуванні швидкістю;
- паротурбінними агрегатами [1];
- складними комплексами типу "нагрівний котел + будівля, що обігрівається" [2];
- активними системами віброгасіння [14], процесами абсорбційного осушування газу [9], електродинамічними процесами на основі фаззі-систем управління, регуляторами змінної напруги [6];
- напівпровідниковими перетворювачами електромеханічних систем [10] та ін.

1. Аналіз процесів проектування нечітких контролерів

При проектуванні НК виникає компромісна проблема мінімізації ступеня складності апаратно-алгоритмічної реалізації нечітких цифрових регуляторів та забезпечення необхідних показників якості НСАУ.

Основними елементами НК є база правил (сформована на основі нечіткої логіки) та компоненти для обробки нечіткої інформації, зокрема, для реалізації алгоритмів фаззифікації, агрегації, активації, акумуляції та дефаззифікації при формуванні керуючих сигналів [4,12].

Процес проектування НК завжди починається з вибору структури, параметрів та апаратної платформи для їх реалізації. Використання цифрових нечітких регуляторів

у складі НСАУ неперервними об'єктами супроводжується аналого-цифровим та цифро-аналоговим перетворенням сигналів.

Розглянемо більш детально основні етапи проектування нечітких цифрових контролерів, враховуючи, що на даний момент [1] відсутні узагальнюючі методи аналітичного проектування, настроювання та налагодження НСАУ.

Етап 1. Аналіз показників якості, вимог та можливостей апаратної реалізації НСАУ. Вибір принципу управління і його схемотехнічної реалізації на основі НК, який може використовуватись: замість традиційного регулятора (на наступних етапах обговорюється саме цей варіант), як модель об'єкта управління, як пристрій, що забезпечує поточне підстроювання параметрів нейро-системи чи традиційного регулятора тощо [10,12]).

Етап 2. Вибір типу НК згідно з реалізацією П-, І-, ПІ-, ПД- чи ПІД-закону управління, враховуючи, що П-складова (X_1) особливо чутлива в області робочих точок, І-складова (X_2) забезпечує компенсацію нечутливості статичної характеристики з зоною нечутливості, а Д-складова (X_3) має суттєвий вплив при значних відхиленнях ε регульованої величини Y від заданого значення $Y_{зад}$: $\varepsilon = Y_{зад} - Y$. При цифровій реалізації замість інтегральної складової обчислюється сума відповідних величин у межах встановленого інтервалу, а замість диференціальної – різниця двох останніх величин відносно поточного моменту часу. Важливо, що на відміну від традиційних регуляторів НК може включати в свою стратегію управління будь-які інші за своєю природою вхідні параметри.

Етап 3. Вибір діапазонів існування $[X_{i \min}, X_{i \max}]$, $i = 1, 2, \dots, M$, $[G_{\min}, G_{\max}]$ та кількості лінгвістичних термів L_x, L_G (як правило, $L_x, L_G = 2..7$) вхідних X_i та вихідного G сигналів НК, наприклад, 3-х термів $\{H, O, P\}$: де "H" – негативний, "O" – нульовий, "P" – позитивний. Доцільність та лінгвістична розв'язувальна можливість є критеріями при виборі кількості термів для конкретної задачі управління. При збільшенні кількості термів підвищується гнучкість управління, але при цьому зростає обсяг обчислень та об'єми пам'яті.

Етап 4. Формування нечіткої бази правил типу "ЯКЩО - ТО" з відповідними ваговими коефіцієнтами $v_j, j = 1..R$ для кожного j -го правила, наприклад при $M = 3$,

$$R_j(v_j): \text{ якщо } (X_1 = H) \cap (X_2 = O) \cap (X_3 = O) \text{ то } (G_j = H).$$

Етап 5. Вибір алгоритмів: - фаззифікації для формування значень ФН $\mu_H(X_i)$, $\mu_O(X_i)$, $\mu_P(X_i)$, $i = 1..M$ вхідних сигналів X_i НК на відповідних лінгвістичних термах $\{H, O, P\}$;

- агрегації для кожного j -го правила R_j , наприклад,

$$\mu_H(G_j) = \mu_H(X_1) \cap \mu_O(X_2) \cap \mu_O(X_3) = \min\{\mu_H(X_1), \mu_O(X_2), \mu_O(X_3)\},$$

де \cap - оператор І (AND);

- активації для всіх груп правил, кожна з яких належать до одного з лінгвістичних термів $\{H, O, P\}$ вихідного сигналу G . Наприклад, якщо терму "H" відповідає

множина правил $\{R_1, R_4, R_5, R_8\}$, то алгоритм активації, де \cup оператор АБО (OR), можна записати так:

$$\mu_H(G) = \mu_H(G_1) \cup \mu_H(G_4) \cup \mu_H(G_5) \cup \mu_H(G_8) = \max\{\mu_H(G_1), \mu_H(G_4), \mu_H(G_5), \mu_H(G_8)\};$$

- акумуляції всіх нечітких правил бази знань НК для формування нечіткої множини \underline{G} з результуючою ФН

$$\mu_{res}(\underline{G}) = \sup_{G \in R^*} \{\mu_H(\underline{G}), \mu_O(\underline{G}), \mu_\Pi(\underline{G})\};$$

- дефаззифікації $G^* = Defuzzyfication(\mu_{res}(\underline{G}))$ вихідної нечіткої множини \underline{G} з результуючою функцією належності $\mu_{res}(\underline{G})$ для формування чіткого значення керуючого сигналу G^* (найчастіше застосовується метод обчислення центра ваги [1, 2, 12]).

Етап 6. Вибір форм ФН $\mu_{Term}(x)$ лінгвістичних термів $Term = \{H, O, \Pi\}$ для обчислення ступеня істинності лінгвістичних оцінок вхідних X_i та вихідного G сигналів НК, наприклад [12],

$$\mu_{Term}(x, x_0, \sigma) = \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right]; \quad \mu_{Term}(x, x_0, \sigma) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{x-x_0}\right)^\alpha\right];$$

$$\mu_{Term}^{\pi}(x, x_{R1}, x_{L1}, x_{R2}, x_{L2}) = \min\{\mu_{Term}^s(x, x_{R1}, x_{L1}), \mu_{Term}^z(x, x_{R2}, x_{L2})\};$$

$$\mu_{Term}(x, x_0, \sigma) = \left[1 + \frac{-(x-x_0)^2}{\sigma}\right]^{-1}; \quad \mu_{Term}(x, \underline{x}, x_0, \bar{x}) = \begin{cases} (x-\underline{x})(x_0-\underline{x})^{-1}, & \underline{x} \leq x \leq x_0 \\ (\bar{x}-x)(\bar{x}-x_0)^{-1}, & x_0 \leq x \leq \bar{x} \end{cases};$$

$$\mu_{Term}^z(x, x_R, x_L) = \begin{cases} 1, & x < x_L \\ 0,5 \left[1 + \cos\left(\pi(x-x_R)(x_R-x_L)^{-1}\right)\right], & x_L \leq x \leq x_R \\ 0, & x > x_R \end{cases};$$

$$\mu_{Term}(x, \underline{x}, x_{01}, x_{02}, \bar{x}) = \begin{cases} (x-\underline{x})(x_{01}-\underline{x})^{-1}, & \underline{x} \leq x \leq x_{01} \\ 1, & x_{01} \leq x \leq x_{02} \\ (\bar{x}-x)(\bar{x}-x_{02})^{-1}, & x_{02} \leq x \leq \bar{x} \end{cases};$$

$$\mu_{Term}^s(x, x_R, x_L) = \begin{cases} 0, & x < x_L \\ 0,5 \left[1 + \cos \left(\pi (x - x_R) (x_R - x_L)^{-1} \right) \right], & x_L \leq x \leq x_R \\ 1, & x > x_R \end{cases},$$

де $\sigma, x_0, x_{01}, x_{02}, x_L, x_R, x_{L1}, x_{R1}, x_{L2}, x_{R2}, \underline{x}, \alpha$ – параметри ФН, на основі яких в подальшому може здійснюватись параметрична оптимізація НК, що є одним із шляхів підвищення ефективності систем управління [3].

Еман 7. Вибір параметрів ФН. Спочатку параметри ФН вибираються такими, щоб вони якнайкраще відповідали суб'єктивним уявленням експертів про природу сигналів та їх відповідність лінгвістичним термам.

Еман 8. Оцінка стійкості НСАУ. Оскільки НК є нелінійним елементом, то для оцінки стійкості НСАУ використовують підходи, що базуються на дослідженні функції Ляпунова [10], використанні секторних критеріїв стійкості для одно- (критерій В.М.Попова, круговий критерій) та багатопараметричних нелінійностей [1]. Суттєвий вплив на стійкість НСАУ з цифровими фаззі-контролерами має вибір періоду квантування за часом ΔT , оскільки НК працюють в дискретних режимах, здійснюючи на кожній i -й ітерації значний обсяг обчислень. Це окрема задача для досліджень.

Еман 9. Тестування НК шляхом моделювання або експериментального дослідження НСАУ. Якщо якість управління замкненої системи відповідає вимогам на проектування, то можна вважати синтез НК НСАУ завершеним.

2. Параметрична оптимізація нечітких контролерів

Для покращення показників якості НСАУ після отримання незадовільного результату на етапі 9 перш за все здійснюється параметрична оптимізація НК на основі мінімізації квадратичного критерію $J(\varepsilon, \mathbf{B}, \mathbf{v})$, наприклад,

$$J(\varepsilon, \mathbf{B}, \mathbf{v}) = \frac{\sum_{i=0}^{N_{\max}-1} (Y_{зад}[i] - Y_{вих}[i])^2}{\sum_{i=1}^{N_{\max}} \Delta T(i)} = \frac{\sum_{i=0}^{N_{\max}-1} (\varepsilon[i])^2}{T_{\max}},$$

де $\varepsilon[i] = (Y_{зад}[i] - Y_{вих}[i])$ – похибка НСАУ в поточний момент часу $t_i \Delta T$, $t_i = i \Delta T$; $Y_{зад}[i]$ – задаючий сигнал НСАУ; $Y_{вих}[i]$ – вихідний сигнал НСАУ; $T_{\max} = \Delta T N_{\max}$ – час моделювання; $i = 0..N_{\max}$; $\mathbf{B} = (B_{X1}, B_{X2}, \dots, B_{XM}, B_Y)$ – вектор параметрів ФН відповідних координат X_1, X_2, \dots, X_M ; Y ; $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_R)$ – вектор вагових коефіцієнтів нечітких правил $R_j, j = 1..R$; R – кількість правил в базі правил НК. Слід відзначити, що найбільш поширеними [1,12,13] для реалізації НК є алгоритми Мамдані, що використовують вищезгадані лінгвістичні терми з відповідними ФН при формуванні вихідного сигналу Y_j кожного правила R_j , та алгоритми Такагі-Сугено, що забезпечують формування вихідних сигналів Y_j у вигляді функціональних залежностей

$$Y_j(X_1, X_2, X_3, \mathbf{K}^j) = k_{1j}^j X_1 + k_{2j}^j X_2 + k_{3j}^j X_3,$$

де $\mathbf{K}^j = (k_{1j}^j, k_{2j}^j, k_{3j}^j)$ – вектор параметрів j -го правила.

Параметрична оптимізація НК з метою мінімізації наведеного критерію $J(\varepsilon, \mathbf{V}, \nu)$ може здійснюватись відносно вагових коефіцієнтів ν_j нечітких правил, параметрів ФН та параметрів \mathbf{V} нечітких правил $\mathbf{K}^j, j = 1..R$.

3. Структурна оптимізація НК

Якщо після здійснення параметричної оптимізації НК необхідні показники якості НСАУ не задовольняються, то переходять до структурної оптимізації НК шляхом послідовних або комбінованих змін структури алгоритмів обробки нечіткої інформації НК.

Одним з варіантів структурної оптимізації НК є вибір для конкретної НСАУ найбільш ефективних алгоритмів агрегації-акумуляції, що базуються на використанні [12] міні-максного гравітаційного методу (min-max gravity method), при реалізації якого застосовуються такі алгоритми обробки нечіткої інформації

$$\mu_A \cap \mu_B = \min(\mu_A, \mu_B); \quad \mu_A \cup \mu_B = \max(\mu_A, \mu_B),$$

"добуток-сума" гравітаційного методу (product-sum gravity method) на основі алгоритмів

$$\mu_A \cap \mu_B = \mu_A \mu_B; \quad \mu_A \cup \mu_B = \mu_A + \mu_B.$$

Структурна оптимізація НК також може бути здійснена на основі застосування аналогів імовірнісної обробки нечіткої інформації

$$\mu_A \cap \mu_B = \mu_A \mu_B; \quad \mu_A \cup \mu_B = \mu_A + \mu_B - \mu_A \mu_B,$$

алгоритмів [15] "нечітке І" (fuzzy AND) та "нечітке АБО" (fuzzy OR)

$$\mu_A \cap \mu_B = \gamma \min(\mu_A, \mu_B) + (1 - \gamma) \frac{(\mu_A + \mu_B)}{2};$$

$$\mu_A \cup \mu_B = \gamma \max(\mu_A, \mu_B) + (1 - \gamma) \frac{(\mu_A + \mu_B)}{2},$$

чи компенсаційних алгоритмів [16]

$$\mu_A \cap \mu_B = (\mu_A + \mu_B - \mu_A \mu_B)^{(1-\gamma)} (\mu_A \mu_B)^\gamma; \quad \mu_A \cup \mu_B = (\mu_A \mu_B)^{(1-\gamma)} (\mu_A + \mu_B - \mu_A \mu_B)^\gamma,$$

де γ – компенсаційний параметр.

Інші шляхи здійснення структурної оптимізації НК полягають в корекції бази знань НК при зміні кількості лінгвістичних термів (L_x, L_y), кількості нечітких правил R та структури кожного j -го правила.

Перед кожним наступним кроком структурної оптимізації НК доцільно здійснювати параметричну оптимізацію за всіма вищезгаданими параметрами оптимізації ФН та нечітких правил, а також за параметром алгоритмів γ обробки нечіткої інформації.

Висновки

При проектуванні НСАУ на основі структурно-параметричної оптимізації НК необхідно враховувати компромісність проблем їх реалізації, оскільки підвищення складності програмно-алгоритмічного забезпечення НК для покращення показників якості НСАУ призводить до збільшення кількості обчислень, а відповідно, до зниження швидкодії НК, тобто до збільшення кроку квантування ΔT , що в деяких випадках може призвести до втрати стійкості НСАУ.

Резервними шляхами підвищення швидкодії НК є застосування таблиць запам'ятовування величин "входи/вихід" в матричній формі для безпосереднього використання характеристичних поверхонь [13] бази знань НК при формуванні необхідних керуючих сигналів на виходах НК (з застосуванням інтерполяційних алгоритмів).

Для скорочення обсягу обчислень при здійсненні процедури дефазифікації нечітких сигналів доцільно застосовувати методіку, що базується не на багатократній дефазифікації у часі, а на попередній (на етапах проектування НК) дефазифікації ФН для виводу складових керуючого сигналу за кожним лінгвістичним правилом [1].

У деяких випадках при проектуванні НК виникає необхідність в зміні кількості вхідних сигналів та закону нечіткого управління, що попередньо визначаються на 2-му етапі проектування НК.

1. Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Грабовский Г.Г., Рюмшин Н.А. Системы фуцци - управления. К. : Техніка, 1997. - 208 с.
2. Гостев В.И., Крайнев В.В., Скуртов С.Н. Выбор функций принадлежности и настройка нечетких регуляторов систем автоматического управления // Автоматизация виробничих процесів, 2002. - № 1(14). - С. 162 - 167.
3. Ковела І. Параметричний синтез неперервних і цифрових автоматичних систем регулювання з ПІ- та ПІД-регуляторами // Вісн. НУ "Львівська політехніка", 2002, № 450, - С.55-59.
4. Кондратенко Ю.П., Сидоренко С.А. Методи синтезу нечітких пристроїв для підвищення швидкодії та точності процесів формування управляючих сигналів // Зб. наук. праць УДМУ, Миколаїв, 2002. - Вип. 1(379). - С. 121 - 129.
5. Кунцевич В.М. Решение одной оптимизационной задачи управления в условиях неопределенности. // Проблемы управления и информатики, 2002. - № 3. - сс. 85-100.
6. Липківський К.О., Кирик В.В. Основні підходи до створення fuzzy-систем управління регуляторами змінної напруги / Праці ІЕД НАН України, 2001. - С.13-16.
7. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. - М., Наука, 1986. - 312 с.
8. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. - Винница: "УНІВЕРСУМ-Вінниця", 1999. - 300 с.
9. Семенов Г.Н., Борин В.С. Автоматизоване керування процесом абсорбційної осушки газу на базі нечіткої логіки // Вісн. технологічного університету Поділля. - Хмельницький, 2002. - № 3, Том 2. - С. 23-27.
10. Смирнов В.С. Синтез електромеханічних систем з використанням нечіткої логіки та аналіз їх стійкості // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 1999. - № 1. - С. 52 - 60.
11. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Липківський К.О., Кирик В.В. Fuzzy-системи - новий технологічний інструмент систем управління // Технічна електродинаміка, 2001. - № 3. - С.17-20.
12. Jantsen J. Design of Fuzzy Controllers. Tech. Report no. 98 E 864, Technical University of Denmark, Dept.

Of Automation, Lyngby, 1998. - pp. 1-26.

13. Mizumoto M. Realization of PID controls by fuzzy control methods // *Fuzzy Sets and Systems*, 1995. - No. 70. - pp. 171-182.

14. Leniowska L. Active control of plate vibration with fuzzy controller. *Technical News*, Lviv, 2002. - Vol. 1(14), 2(15). - pp.19-21.

15. Werners B. Aggregation Models in Mathematical Programming. NATO ASI Series. Vol. F48, *Mathematical Models for Decision Support* (Ed. G. Mitra), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988. - pp. 295-305.

16. Zimmermann H.-J., Zysno P. Latent connectives in human decision making // *Fuzzy Sets and Systems*, 1979. - No. 3. - pp.37-51.