

УДК 621.398.39

Н.І. Кунах, доктор технічних наук, професор,
професор кафедри Одеської національної академії зв'язку
ім.О.С.Попова, м. Одеса

О.М. Ткаленко, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри Державного університету телекомунікацій, м. Київ

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ НЕЧІТКИХ ТА НЕЙРОРЕГУЛЯТОРІВ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ

У статті розглянуто вдосконалену методику параметричного синтезу нечітких (що працюють на базі нечіткої логіки) регуляторів на основі математичної теорії нечіткої логіки й розроблено основну модель нечіткого регулятора. Отримано перехідні процеси нечіткого та нейрорегулятора.

Ключові слова: нечітка логіка, цифровий нечіткий регулятор, нейрорегулятор, якість, синтез, математична модель, моделювання, фазі-система.

В статье рассмотрена усовершенствованная методика параметрического синтеза нечетких (работающих на базе нечеткой логики) регуляторов на основе математической теории нечеткой логики и разработана основная модель нечеткого регулятора. Получены переходные процессы нечеткого и нейрорегулятора.

Ключевые слова: нечеткая логика, цифровой нечеткий регулятор, нейрорегулятор, качество, синтез, математическая модель, моделирование, фаззи-система.

Features of the use of digital fuzzy and neuroregulator in control systems are considered. In the paper the improved technique of parametric synthesis of fuzzy (working on the basis of fuzzy logic) regulators on the basis of mathematical theory of fuzzy logic is considered and the basic model of fuzzy controller is developed. The transient processes of fuzzy and neuroregulator are obtained.

Keywords: fuzzy logic, digital fuzzy controller, neural regulator, quality, synthesis, mathematical model, modeling, fuzzy system.

Вступ

У зв'язку з бурхливим розвитком сучасних інтелектуальних технологій у вітчизняній і зарубіжній промисловості, доводиться розв'язувати проблеми підвищення ефективності роботи систем управління складними технічними установками. У системах управління складними технічними установками досить часто використовуються стандартні регулятори: інтегральний (І), інтегрально пропорційний (ІІ), інтегрально пропорційний диференціальний (ПІД), які широко зарекомендували себе завдяки своїй простоті і високій надійності [1]. Проте вони не можуть оперативно самонавчатися і перебудовуватися при зміні нелінійних параметрів складних елементів технічних установок, особливо у випадках нечітких зовнішніх збурюючих впливів. Замість цих регуляторів із жорсткою структурою актуально використовувати нечіткі та нейрорегулятори на базі нейронних мереж, які легко перебудовуються й перенавчаються, змінюючи свої

коефіцієнти і пристосовуючись до зовнішнього навколишнього середовища. Аналіз роботи більшості елементів технічних установок складний і неформалізований через неточність вихідних даних. Багато характеристик неможливо виміряти, наприклад, параметри електричної дуги в іонно-плазмовій установці, тертя в електродвигунах, моменти інерції, які змінюються під час роботи. Тому для покращання ефективності й якості управління актуально використовувати нечітку логіку з м'якими обчисленнями.

Основна частина

У більшості випадків складна технічна установка з початковими параметрами за своїми динамічними властивостями не задовольняє бажаним вимогам: вона виявляється нестійкою або має погані показники якості. Покращання характеристик складних технічних установок може бути досягнуте при правильно сконструйованому регуляторі. Регулятор – це один з найбільш важливих функціональних елементів [2]. Він забезпечує необхідні динамічні властивості – стійкість, якість перехідних процесів. Від правильності вибору й виконання регуляторів залежить у більшості випадків працездатність технологічної установки. Вибір місця включення, схеми та параметрів регуляторів є одним з основних етапів синтезу. Розроблені методи синтезу нечітких та нейрорегуляторів з використанням нечітких технологій із бажаними характеристиками дозволяють суттєво підвищити і покращити статичні і динамічні параметри систем управління складними технічними установками, що є на сьогодні важливим і актуальним завданням.

Функціональна схема системи автоматичного управління на базі нечіткої логіки (системи управління з нечітким регулятором або системи фазі-управління) наведена на рис. 1.

Схема складається із пристрою порівняння, нечіткого регулятора НР, об'єкта управління ОУ та ланки зворотного зв'язку.

Нечіткий регулятор (фазі-регулятор, fuzzy-controller) включає три основних блоки – блок фазіфікації (fuzzyfication), блок формування логічного рішення (inference) та блок дефазіфікації (defuzzyfication).

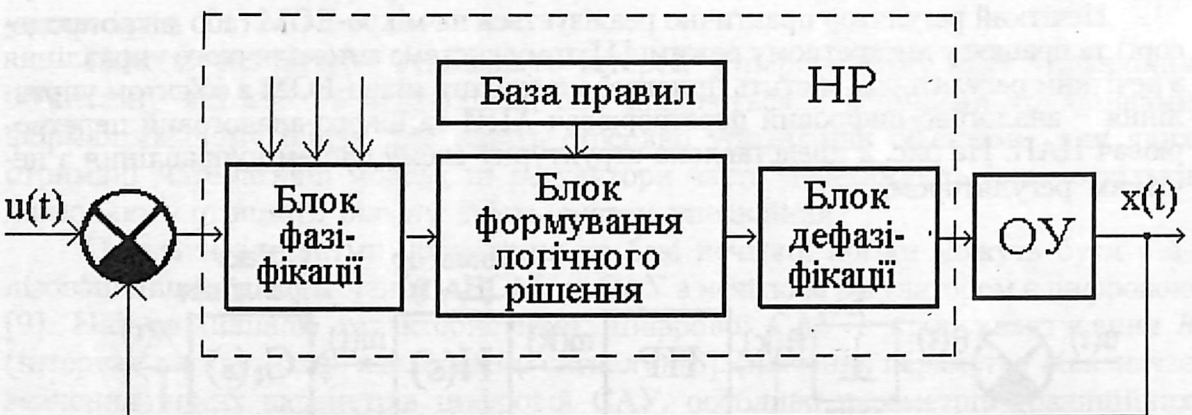


Рис. 1. Функціональна схема системи автоматичного управління на базі нечіткої логіки

У блоці фазіфікації вхідні лінгвістичні змінні $x_i, i = \overline{1, n}$, такі як *похибка системи* θ , *швидкість зміни (перша похідна) похибки* $\dot{\theta}$, *прискорення (друга похідна) похибки* $\ddot{\theta}$, якісно характеризуються терм-множинами (лінгвістичними

величинами) a_i^j , такими як *від'ємна мала (ВМ)*, *нульова (Н)*, *позитивно мала (ПМ)*, *позитивно середня (ПС)*, *позитивна (П)*, які описуються на універсальній множині U функціями приналежності ФП $\mu(u)$. ФП визначає ступінь приналежності кожного елемента u множині U числом між 0 та 1, яке називають ступенем істинності розглянутої лінгвістичної змінної цього терму. Діапазони зміни вхідних змінних, наприклад, $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$, $[\ddot{\theta}_{\min}, \ddot{\theta}_{\max}]$, та поточні значення вхідних змінних перераховуються (відображаються) на єдину універсальну множину $U_i = [0, L_i - 1]$, де L_i – число, яке відповідає кількості термів кожної лінгвістичної змінної x_i , $i = 1, n$. (як правило, кількість термів j для кожної лінгвістичної змінної вибирається однією й тією ж). Таким чином, для кожного поточного значення вхідної змінної визначається ступінь приналежності (величина істинності) до тих термів (нечітким підмножинам), які характеризують визначену лінгвістичну змінну. Оскільки ФП зазвичай перекривають одна одну, то для однієї й тієї ж вхідної змінної декілька ФП можуть повідомляти різні величини істинності, відмінні від нуля.

У блоці формування логічного рішення на основі матриці знань (бази правил) записуються лінгвістичні правила на зразок **ЯКЩО** (вихідний стан), **ТО** (реакція відповіді), які разом зазвичай називають робочим правилом. Взаємодія між вхідними та вихідними ФП типу **ЯКЩО-ТО** позначається як імплікація (логічна зв'язка). Частина **ЯКЩО** (перед посилення) означає спряження логічних операцій, а частина **ТО** (розв'язок, висновок) зазвичай являє собою просте вказування на лінгвістичну величину для вихідної дії (керівну дію, спрямовану на об'єкт управління) нечіткого регулятора. За допомогою відповідного формулювання правил досягається результат, за якого для будь-якої лінгвістичної величини управляючої дії щонайменше одне з правил є прийнятним. Найчастіше використовується "мінімаксий" (Max-Min Inference) метод логічного розв'язку, коли спочатку ФП частини **ТО** кожного з правил об'єднуються з величиною істинності частини **ЯКЩО** (при цьому ФП частини **ТО** обмежується величиною істинності частини **ЯКЩО** – це "міні"-операція), а потім з обмежених ФП частини **ТО** шляхом взаємного накладення обирається результуюча ФП з максимальною величиною істинності ("максі"-операція). Ця результуюча ФП визначає собою поточну дію бази правил. Процедура оброблення бази правил з формуванням результуючої ФП являє собою логічне рішення для розрахунку вихідної величини НР.

Нечіткий регулятор практично реалізується на мікро-ЕОМ (або мікропроцесорі) та працює у дискретному режимі [1], тому система автоматичного управління з нечітким регулятором містить пристрої спряження мікро-ЕОМ з об'єктом управління – аналогово-цифровий перетворювач АЦП та цифро-аналоговий перетворювач ЦАП. На рис. 2 представлено структурну схему системи управління з нечітким регулятором.

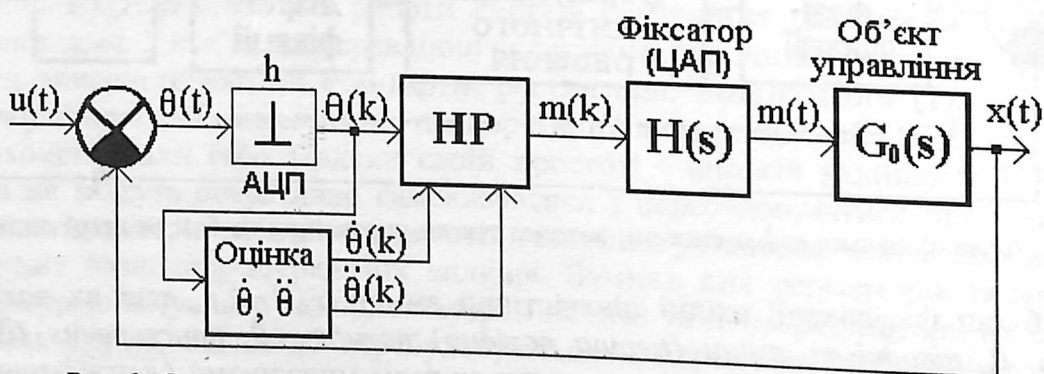


Рис. 2. Структурна схема системи управління з нечітким регулятором

АЦП квантує неперервну похибку $\theta(t)=u(t) - x(t)$ із кроком квантування h . Як першу та другу похідні від похибки зазвичай обчислюють першу та другу різниці за формулами:

$$\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)] / h; \quad (1)$$

$$\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)] / h = [\theta(k) - 2\theta(k-1) + \theta(k-2)] / h^2; \quad (2)$$

де (k) – квантована помилка на виході АЦП. ЦАП становить, як правило, фіксатор нульового порядку з передавальною функцією:

$$H(s) = (1 - e^{-hs}) / s. \quad (1)$$

Зазначимо деякі особливості нечіткого регулятора. НР працює в дискретному режимі, тому на кожному кроці квантування h він повинен виконувати всі необхідні обчислення. НР опрацьовує всі вхідні змінні, тому на нього можна подавати додаткові змінні, які характеризують процеси в об'єкті управління, і тим самим забезпечити більш широку дію на динаміку управління. Система з НР стійка відносно змін параметрів об'єкта управління, що пов'язано з нечіткою природою правил функціонування. Традиційні методи опису регуляторів за допомогою передавальних функцій для НР не підходять. НР є нелінійним та його особливістю є відсутність динаміки в самому НР. Відсутність "пам'яті" та процедура проектування, а також словесний опис процесу управління, що характеризується лінгвістичними правилами, є головними особливостями НР [2–5].

Нечіткі регулятори реалізуються на практиці, як правило, у формі програмного забезпечення високого рівня. При цьому за результатами моделювання та випробувань системи управління, яка містить нечіткий регулятор у замкнутому контурі, можна змінювати кількісні діапазони лінгвістичних змінних, функції приналежності та модифікувати базу правил з метою отримання необхідної якості управління.

Нечіткі регулятори становлять інтерес, у першу чергу, для управління об'єктами, які або не піддаються, або піддаються з великими труднощами формалізованому опису, але навіть стосовно управління об'єктами, для яких отримані математичні моделі, ці регулятори часто переважають інші, оскільки дозволяють отримати більшу якість систем управління.

Оскільки алгоритми управління на базі нечіткої логіки можуть бути реалізовані лише з використанням ЕОМ, то САУ з нечітким регулятором є цифровою [9]. Найважливішою характеристикою цифрової САУ є крок квантування h (інтервал дискретизації аналогового сигналу) [8]. Значення параметру h визначає значення інших параметрів цифрової САУ, особливо параметрів традиційних цифрових регуляторів. Тому при проектуванні систем управління з нечіткими регуляторами необхідно приділяти увагу вибору значення кроку квантування h .

При формуванні структурних схем систем управління з нечіткими регуляторами важливим є вибір вхідних параметрів нечіткого регулятора [4]. Лінгвістичні правила управління самі собою не можуть бути реалізовані на сучасних ЕОМ. Необхідна процедура їх формалізації. Тому дуже важливим є завдання

вибору методу формалізації експертних знань. Крім того, оскільки нечіткі множини формалізуються за допомогою функцій приналежності, важливу роль відіграє вибір їх типу та параметрів [3]. При реалізації нечіткого управління важливою є методика параметричного настроювання нечіткого регулятора [5].

Для моделювання нечітких регуляторів MATLAB має спеціальний інструментарій. Повна структурна схема нечіткого регулятора (рис. 3, а) в системі управління складається з фіксатора *Zero-Order Hold* (який працює з кроком моделювання h_0), блоків оцінки першої та другої похідних похибки системи, двох блоків нормування вхідних (*normin*) та вихідного (*normout*) сигналів, центрального блоку нечіткого регулятора *Fuzzy Logic Controller* та вихідного фіксатора *Zero-Order Hold1* (який працює з кроком квантування h_0). Блоки нормування вхідних (*normin*) та вихідного (*normout*) сигналів та центральний блок *Fuzzy Logic Controller* в системі MATLAB об'єднані у блок *Controller*.

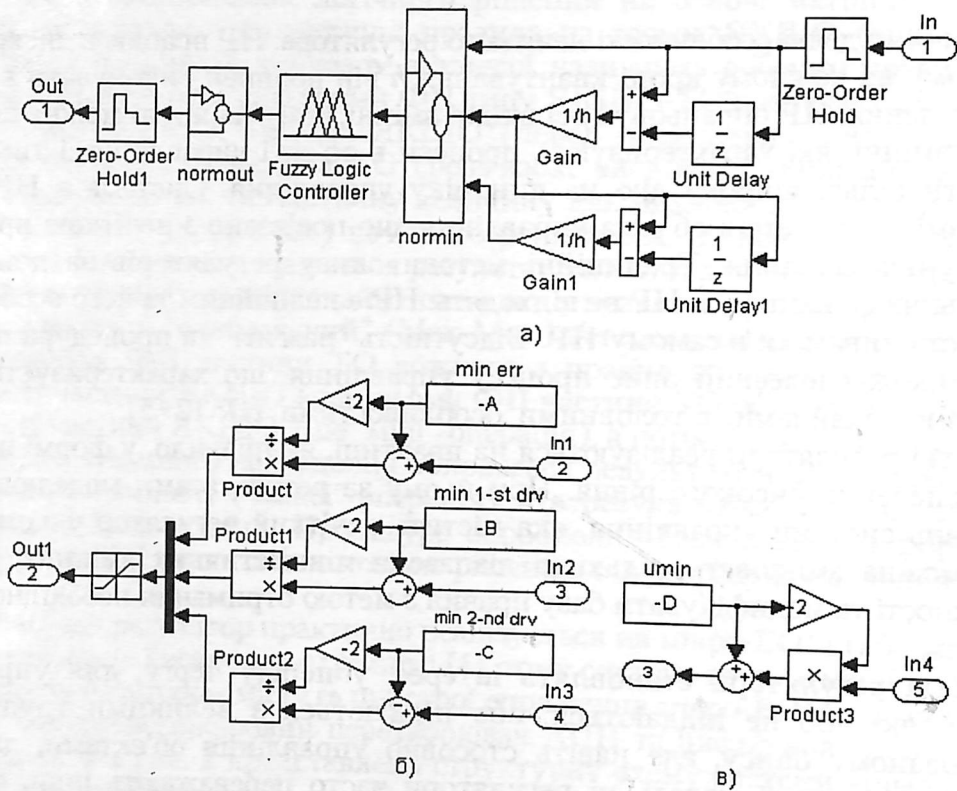


Рис. 3. а), б), в)

Блоки оцінки першої та другої похідних від похибки реалізують управління:

$$\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)] / h, \ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)] / h. \quad (4)$$

Для спрощення нормування (перерахунку значень сигналів у значення елементів єдиної універсальної множини) діапазони зміни вхідних та вихідного сигналів (параметрів нечіткого регулятора) приймаємо симетричними [5; 6]:

$$\theta_{max} = -\theta_{min}; \dot{\theta}_{max} = -\dot{\theta}_{min}; \ddot{\theta}_{max} = -\ddot{\theta}_{min}; m_{max} = -m_{min} \quad (5)$$

Тому формули перерахунку набувають вигляду:

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

$$u_2 = -(\dot{\theta} - \dot{\theta}_{min}) / (2\dot{\theta}_{min}); \quad (7)$$

$$u_3 = -(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_{min}) / (2\ddot{\theta}_{min}); \quad (8)$$

$$m = m_{min}(1 - 2u_c). \quad (9)$$

На основі формул (6–9) побудовані структурні схеми блоків нормування вхідних (*normin*) та вихідного (*normout*) сигналів. Блок нормування вхідних (*normin*) сигналів показаний на рис. 3, б. Блок нормування вихідного (*normout*) сигналу – на рис. 3, в. Значення діапазонів *A*, *B*, *C*, *D* при настроюванні (оптимізація параметрів) нечіткого регулятора підбираються вручну або автоматично шляхом розв'язку оптимізаційної задачі.

У центральному блоці нечіткого регулятора *Fuzzy Logic Controller* (рис. 3, а) обираються функції приналежності *membership functions* та задається база правил *rules*.

На основі зазначеного вище математичного апарату сформулюємо методику параметричного синтезу нечітких цифрових регуляторів. Вона полягає в такому.

1. Як вхідні змінні НР використовуємо похибку θ , першу похідну $\dot{\theta}$ та другу похідну $\ddot{\theta}$ похибки. Вихідна змінна – управляючий вплив на об'єкт управління m .

2. Виконуємо вибір виду функцій приналежності ФП нечітких термів, які оцінюють вхідні та вихідні змінні НР на універсальній множині $[0,1]$. Число термів для кожної змінної вибираємо рівним двом, наприклад, *похибка – позитивна, негативна*. При цьому ФП – неперервні на універсальній множині, симетричні (одна – спадаюча, друга – зростаюча), що перетинаються при значенні абсциси 0,5.

3. Формуємо два (за кількістю термів) лінгвістичних правила управління і здійснюємо формалізацію лінгвістичних правил управління системою логічних рівнянь.

4. Задаємо початкові значення оптимізованих діапазонів зміни вхідних та вихідних змінних НР та параметрів ФП.

5. Задаємо крок квантування h , часовий інтервал спостереження, обираємо критерій якості та метод оптимізації.

6. Розраховуємо критерій якості методом моделювання з кроком замкнутої системи при заданих задавальному та завадовому впливах для вибраного інтервалу спостереження. При цьому:

а) відбувається перехід від значень вхідних змінних НР, виражених у фізичних величинах, до відповідних значень універсальної множини, на якій задані ФП нечітких термів;

б) здійснюється вибір метода дефазифікації та виконується розрахунок виходу НР;

- в) здійснюється перехід від отриманого значення виходу НР на універсальній множині до значення управляючого впливу m ;
- г) здійснюється розрахунок виходу об'єкта управління при заданому m ;
- г) визначається значення поточної похибки в САУ для кожного h_0 ;
- д) для вибраного часового інтервалу спостереження розраховується значення критерію якості.

7. Процедура повторюється доти, поки не буде отримане або мінімальне значення критерію якості, або якість системи управління з НР, яка задовольняє виробника. Відповідні цій ситуації значення параметрів НР (діапазонів зміни вхідних та вихідної змінних і параметрів ФП) обираються як оптимальні.

Якщо систему управління з нечітким регулятором (рис. 3) замінити на еквівалентний нейронний регулятор (рис. 4), отримаємо перехідні процеси, які представлені на рис. 5.

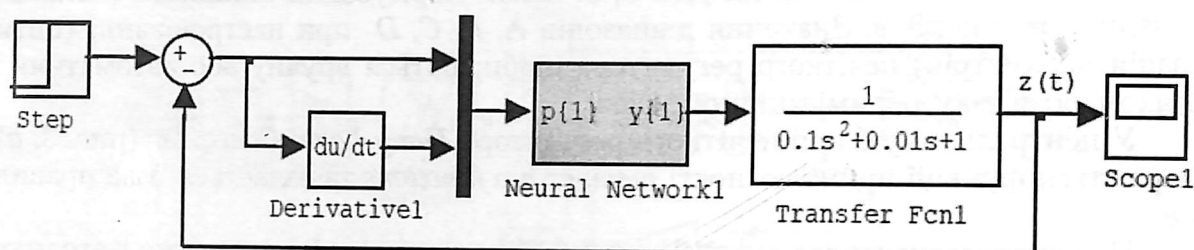


Рис. 4. Нейронний регулятор

Перехідні процеси вихідного регулятора та його нейронної моделі практично збігаються.

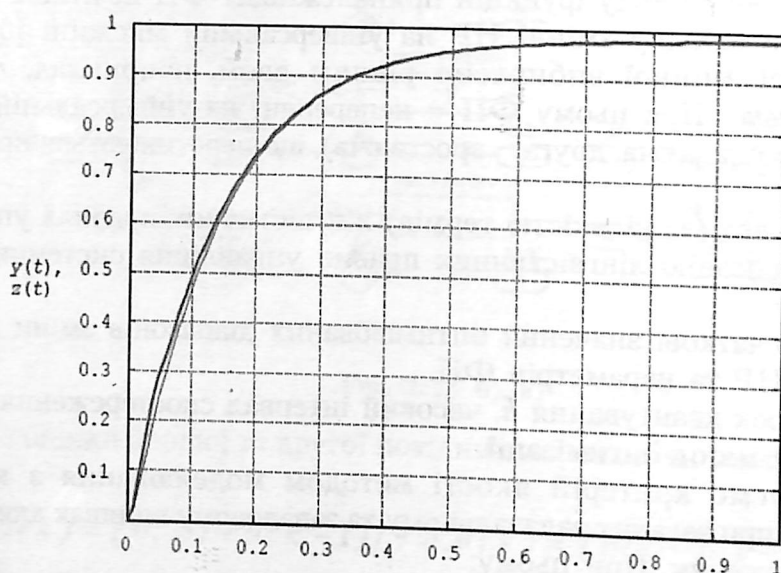


Рис. 5. Порівняння перехідних процесів

Висновки

У сфері управління технічними системами нечітке моделювання дозволяє отримувати більш адекватні результати порівняно з результатами, які ґрунтуються на використанні традиційних аналітичних моделей та алгоритмів управління.

Актуальність нечіткого моделювання та його переваги над відомими і класичними концепціями моделювання та управління полягає в тенденції до збільшення складності математичних та формальних моделей реальних систем та процесів управління, яка пов'язана з бажанням підвищити їх адекватність та врахувати дедалі більшу кількість різних факторів, які впливають на процеси прийняття рішень.

З одного боку, традиційні методи побудови моделей не призводять до задовольняючих результатів, коли вихідний опис проблеми, яку необхідно розв'язати, завідомо є неточним або неповним. З іншого боку, прагнення отримати всю вицерпну інформацію для побудови точної математичної моделі реальної ситуації будь-якої складності може призвести до втрати часу та засобів, оскільки це може бути в принципі неможливо.

У подібних ситуаціях найбільш доцільно скористатися такими методами, які спеціально орієнтовані на побудову моделей, що враховують неповноту та неточність вихідних даних.

Представлене в роботі вдосконалення методики параметричного синтезу цифрових нечітких регуляторів на основі математичної теорії нечіткої логіки з розробкою основної моделі нечіткого регулятора доводить, що технологія нечіткого моделювання є найбільш конструктивною, оскільки на сьогодні на її основі розв'язуються сотні практичних завдань з управління та прийняття рішення.

Правильне поєднання нейронних мереж з нечіткою логікою дозволяє отримати необхідні статичні й динамічні характеристики систем управління складними технічними установками. Усе це призводить до інтеграції у нейроуправлінні нечітких інтелектуальних технологій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гостев В.И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления. К.: Издательство "Радиоаматор", 2003. 512 с.
2. Гостев В.И., Крайнев В.В., Криховецкий Г.Я. Статические характеристики "вход-выход" цифровых нечетких регуляторов. Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. 2004. Т. 2. № 2. С. 73–76.
3. Гостев В.И., Крайнев В.В., Криховецкий Г.Я. Функции принадлежности для нечетких регуляторов систем автоматического управления. Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. 2004. Т. 2, № 1. С. 30–32.
4. Гостев В.И., Крайнев В.В., Скуртов С.Н. Выбор входных параметров при настройке нечетких регуляторов систем автоматического управления. Вісник технологічного університету Поділля (м. Хмельницький). 2002. № 3. Т. 2(41). С. 15–18.
5. Гостев В.И., Крайнев В.В., Скуртов С.Н. Выбор функций принадлежности и настройка нечетких регуляторов систем автоматического управления. Автоматизація виробничих процесів. 2002. № 1(14). С. 162–167.
6. Гостев В.И., Лесовой И.П., Чуприн А.Е. Оптимизация параметров цифровых нечетких регуляторов. Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2001. № 1. С. 148–151.
7. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
8. Кондрашов В.Е., Королев С.Б. MATLAB как система программирования научно-технических расчетов. М.: "Мир", 2002. 359 с.
9. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Перепбург, 2003. 736 с.
10. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. Юбилейный сб. трудов ЦИТиС, 2009. 480 с.

11. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. М.: Финансы и статистика, 2004. 176 с.
12. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учеб. пособ. СПб.: ГУАП, 2013. 284 с.

Отримано 20.12.2017

Рецензент Хорошко В.О., д.т.н., професор