

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

ГЕРМАН ЕДУАРД ЄВГЕНОВИЧ



УДК 519.85

**МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ НЕЧІТКИХ КОНТРОЛЕРІВ
ДЛЯ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ
ПРОМИСЛОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Спеціальність 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі автоматизації хіміко-технологічних систем та екологічного моніторингу в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Дербунович Леонід Вікторович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри автоматизації та управління
в технічних системах

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Фурман Ілля Олександрович,
Харківський національний технічний університет
сільськогосподарства ім. П. Василенка,
завідуючий кафедри автоматизації
та комп’ютерно-інтегрованих технологій

кандидат технічних наук, доцент
Шкіль Олександр Сергійович,
Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент ка-
федри автоматизації проектування
обчислювальної техніки

Захист відбудеться “ 25 ” квітня 2013 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “ 23 ” березня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І.Г. Ліберг

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток і впровадження сучасних інформаційних та наноелектронних технологій, поява на ринку електронних послуг систем і мереж на одному кристалі (SOC і NOC), потужних по обчислювальним можливостям ПЛІС типу FPGA, смартфонів, смартмоніторів, телевізорів та ін., визначає можливість створення покоління інформаційно-керуючих комп'ютерних і телекомунікаційних систем, що мають принципово нові функціональні характеристики: робастність, самоорганізація, штучний інтелект.

Перманентне зростання складності, продуктивності інформаційно-керуючих, комп'ютерних систем і наноелектронних компонент є предтечею розвитку теорії нечітких множин, введеної професором Лотфі Заде в шістдесятих роках ХХ століття. На даний час нейро-нечіткі моделі, нечітка логіка та м'які обчислення (Soft Computing) стали основним математичним інструментом при створенні складних систем та пристроїв з інтелектуальними властивостями, моделі яких неможливо адекватно формалізувати апаратом класичної математики.

Нечіткі логічні контролери, основи та розвиток яких представлені роботами вчених К.А. Пупков, Л.Г. Раскін, А.О. Каргін, А.Г. Корченко, С.Д. Штовба, Н.П. Деменков, Е.Н. Mamdani, М. Sugeno, Т. Takagi, А. Pegat, К.S. Lee, J. Jansen, та інших, знаходять широке застосування в системах управління промисловими об'єктами, роботами, поїздами метрополітену, підйомними кранами, в приладах побутової техніки та багатьох інших. У більшості з численних робіт основний акцент робиться на розвитку логічних, реляційних аспектів нечіткого моделювання та управління. При цьому дуже мало уваги приділяється питанням розробки суворого теоретичного обґрунтування формальних методів проектування нечітких логічних контролерів (НЛК), доцільності заміни класичних методів управління нечітким, класичних контролерів – нечіткими, комплексним задачам технічної імплементації, формалізації та розробці методів проектування й налагодження параметрів НЛК.

Досвід практичного використання НЛК показує, що в більшості реалізацій НЛК поступаються за швидкістю класичним контролерам, що ускладнює їх використання в промислових технологіях. Однак сучасні наноелектронні НВІС, частота функціонування яких досягає 10 ГГц, дозволяють ефективно реалізувати нечіткі логічні і арифметичні операції та в поєднанні з паралелізмом обробки нечітких даних на базі SOC, NOC і ПЛІС, підвищити швидкість та продуктивність НЛК в комп'ютеризованих багатопроцесорних системах управління динамічними об'єктами.

Отже розробка теоретичних основ інженерно-технічних методів аналітичного проектування, оптимізації та настроювання параметрів НЛК, підвищення швидкості та ефективності використання НЛК в промислових умовах недетермінованості вихідних потоків даних та впливів різних збурень є актуальною науково-технічною задачею, яка визначила напрям дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизації хіміко-технологічних систем та екологічного моніторингу НТУ "ХПІ". Здобувач, як виконавець, провів дос

лідження в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи МОН Молодь-спорту України: “Розробка методів ухвалення рішень в умовах неповної інформації про об’єкт управління” (№ ДР0103U001511); “Темп” – пошукова тема НАН України “Розробка нових систем та алгоритмів автоматизованого управління вирощуванням великогабаритних кристалів”(№ ДР0103U003476), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності комп’ютеризованих систем контролю і управління складними динамічними об’єктами на основі використання НЛК та створення теоретичних, методичних та інженерно-технічних основ проектування і налагодження структур НЛК промислового призначення.

Мета роботи досягається вирішенням таких завдань:

– аналіз стану і тенденцій розвитку типових структур ПЛК, особливостей їх функціонування в якості компонентів комп’ютеризованих систем управління промислового призначення;

– розробка математичних моделей та методів проектування НЛК, заснованих на експертних знаннях об’єкта управління, механізмах вибору множини функцій нечіткої логіки, зв’язності правил нечіткого висновку та прийняття нечітких рішень;

– розробка методів синтезу НЛК для МІМО систем управління та обробки даних, заснованих на процедурах мінімізації нечітких логічних функцій і апаратної реалізації бази правил НЛК;

– розробка аналітичних методів проектування та оптимізації параметрів нечітких контролерів, заснованих на функціональних оціночних підходах і аналізі характеристик НЛК з мінімальною кількістю налагоджувальних параметрів;

– розробка методів налаштування параметрів нечітких ПІД контролерів (НПІДК) в комп’ютеризованих системах управління нестационарними об’єктами;

– комп’ютерне моделювання та експериментальне дослідження НЛК в структурі цифрової системи управління установкою “РОСТ” для вирощування великогабаритних функціональних монокристалів.

Об’єкт дослідження – процеси проектування програмно-апаратних компонентів комп’ютеризованих систем контролю і управління промисловими об’єктами.

Предмет дослідження – методи, моделі та процедури проектування та налагоджування нечітких контролерів промислового призначення.

Методи дослідження представлені апаратом нечітких множин і нечіткої математики для отримання і формування математичних моделей і керуючих впливів у системах промислового застосування, мінімізації нечітких логічних функцій та побудови таблиць рішень; апаратом теорії булевих функцій та перемикальних схем, нечіткого моделювання для розробки методів проектування НЛК з використанням імплікацій для опису можливих станів нечітких моделей об’єкта управління; апаратом нечіткого управління для проектування структур

нечітких контролерів та налагодження параметрів НПДК. Оцінка ефективності розроблених методів, моделей і алгоритмів виконана на основі засобів візуального програмування та комп'ютерних експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

вперше:

– розроблено метод та алгоритм мінімізації нечітких баз правил НЛК, представлених у вигляді нечітких логічних функцій, шляхом використання спеціальних операцій перетворення нечітких термів в четвірковій системі числення, що дозволило підвищити швидкодію формування вихідного сигналу НЛК по мінімальній нечіткій таблиці рішень;

– розроблена процедура нечіткого виводу в системі управління з внутрішньою нейронною моделлю у вигляді мережі Хопфілда, в процесі навчання якої здійснюється формування ваг вхідних сигналів і налаштування параметрів НПДК, що дозволяє мінімізувати помилки нечіткого виводу та визначити необхідну місткість асоціативної пам'яті мережі для формування образу об'єкта управління;

– розроблено метод синтезу нечітких логічних формул на основі використання нечітких логічних модулів, що реалізують операції: І, АБО, НІ, ІМПЛІКАЦІЇ та операції МІНІМАКСА, що дозволяє здійснити апаратну імплементацію на ПЛІС нечітких баз правил з мінімальними апаратними витратами;

удосконалено:

– теоретичне обґрунтування та узагальнення методів функціонального й параметричного проектування структур НПДК для керування динамічними об'єктами з нечіткими моделями, які забезпечують незалежність налаштування коефіцієнтів НПДК від характеристик об'єкта управління;

отримали подальший розвиток:

– метод та процедура настроювання коефіцієнтів НПДК шляхом застосування правил налаштування класичного ПД контролера (КПДК), що дозволяє автоматизувати процес налаштування, скоротити час переходу в усталений режим та зменшити статичну помилку керування.

– метод та процедура перетворення класичного ПД контролера в лінійний НПДК, що спрощує процедури синтезу структури НПДК та його налагодження.

Практичне значення одержаних результатів полягає в прикладній спрямованості результатів наукових досліджень, що пов'язані з розробкою моделей і методів проектування перспективного класу програмованих контролерів, заснованих на теорії нечітких систем та м'яких обчислень для промислового використання в багатопроекторних реактивних системах контролю, керування та обробки інформації в області хімічних виробництв, енергетики, металургійної та будівельної промисловості, аерокосмічної техніки і т.д.

Методи розробки і проектування НПДК в якості компонентів багатопроекторних систем управління процесами вирощування великогабаритних функціональних монокристалів експериментально перевірені на установках "РОСТ" дослідного виробництва в Інституті сцинтиляційних матеріалів (ІСМА) НАН України, (м. Харків). Практичне використання результатів

дисертаційної

роботи

ти дозволило спростити процедуру налаштування контролерів, підвищити точність стабілізації діаметра вирощуваних кристалів і ефективність виробництва.

Основні положення дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри автоматизації хіміко-технологічних систем та екологічного моніторингу НТУ “ХП” в курсах “Моделювання та оптимізація систем управління”, “Програмне забезпечення мікропроцесорних систем” та при виконанні дипломних робіт.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем самостійно. Серед них: розробка методів проектування нечітких логічних контролерів, заснованих на експертних оцінках фахівців, функціональному і параметричному підходах вибору структури НЛК, модулів зв’язності правил нечіткого висновку та прийняття рішень, методів синтезу структури НЛК з використанням процедур мінімізації нечітких логічних формул, функцій і апаратної реалізації бази правил на універсальних мінімакських логічних елементах; розробка аналітичних методів оптимізації параметрів нечітких контролерів, заснованих на аналізі характеристик різних структур НЛК, методів ручної та аналітичної настройки їх параметрів в комп’ютеризованих системах управління нестационарними об’єктами та застосуванням розроблених методів, моделей і структур у системі управління установками “РОСТ” дослідного виробництва ІСМА НАН України для вирощування великогабаритних монокристалів.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та результати роботи доповідалися й обговорювалися на: XII, XV-XVII Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології» (м.Харків 2004, 2007-2009рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», (м.Львів, 2009р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики і моделювання», (м.Вінниця, 2010р.); Міжнародній конференції «Перспективні системи управління на з/д, промисловому та міському транспорті», (м.Алушта, 2010р.) та на наукових семінарах НТУ “ХП”.

Публікації. Результати наукових досліджень відображені в 19 наукових публікаціях у фахових виданнях ВАК України, з них: 12 статей, 7 тез доповідей матеріалів конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 212 сторінки, з них 50 рисунків в тексті та 1 рисунок на 1 окремій сторінці, 18 таблиць в тексті, список використаних джерел із 168 найменувань на 18 сторінках, 3 додатки на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкривається сутність науково-технічної задачі розробки методів проектування НЛК для комп’ютеризованих систем управління промислового призначення. Обґрунтовано актуальність, формулюється мета та завдання досліджень, представлені: зв’язок роботи з науковими планами і програмами,

об'єкт, предмет та методи досліджень; наукова новизна одержаних результатів та їх практична корисність, а також дані про публікації результатів роботи та їхньої апробації.

У **першому розділі** проведено аналіз стану і перспектив розвитку типових структур програмованих логічних контролерів (ПЛК). Наведено класифікацію ПЛК, що використовуються в системах детермінованого управління. Аналізуються типові структури НЛК, функціонування яких засноване на процедурах нечіткої логіки: фазифікації, імплікації, агрегації нечітких висновків і дефазифікації. Проведено порівняльний аналіз характеристик НЛК з класичними аналогами. Аналізується НПДК прямого й інкрементного управління, які застосовуються для управління нелінійними об'єктами. Ведуться інтенсивні дослідження з імплементації гібридних контролерів, що поєднують НЛК і КПДК, в яких інтелектуальна стратегія управління на базі нечітких правил коригує правила функціонування КПДК.

Проведено аналіз методів проектування НЛК для МІМО і SISO систем, вибору баз правил, оптимізації параметрів НЛК та процедур настроювання параметрів для формування нелінійного зворотного зв'язку. Показано, що сучасна наноелектронна елементна база дозволяє ефективно реалізувати нечіткі логічні і арифметичні операції в НЛК, розв'язанні систем нечітких логічних рівнянь і нечітких таблиць рішень. Таким чином, була обґрунтована необхідність досліджень і розробки методів аналітичного проектування, оптимізації характеристик і налагоджування параметрів НЛК, що використовуються в комп'ютеризованих системах управління нелінійними і нестационарними об'єктами.

Другий розділ присвячено розробці методів синтезу нечітких контролерів на основі експертного знання про об'єкт управління. Експертна оцінка фахівця представляється набором логічних правил, які задають причинно-наслідкові відносини між нечіткими значеннями вхід/вихідних змінних НЛК у вигляді правил нечіткої імплікації:

$$\{R_j\}: \text{ЯКЩО } x_1 \in A_1 \text{ І } (x_1 \in A_2 \text{ АБО } x_2 \in A_3) \text{ ТО } y \in B, \quad (1)$$

де $j = \overline{1, k}$ – кількість логічних рівнянь в базі нечітких правил НЛК, $(x_1, x_2)/y$ – вхідні/вихідні змінні, A/B – значення функції належності вхід/вихідних змінних.

Проведено порівняльний аналіз властивостей функцій нечіткої імплікації, визначені п'ять класів: числення висловів та його розширення, матеріальна імплікація, узагальнені *modus ponens* та *modus tollens*.

В результаті аналізу існуючих методів вибору функцій нечіткої імплікації показано, що керуючий вплив у НЛК визначається значенням вхідних сигналів, правилами нечіткого управління та їх зв'язністю, коли висновок одного правила є умовою для іншого і функціонує під впливом нечіткого виводу, який управляється даними – узагальнений *modus ponens*

$(A \rightarrow B = \sup\{c \in [0,1], A * c \leq B\})$ з незначним впливом механізму узагальненого *modus tollens* ($A \rightarrow B = \inf\{t \in [0,1], B * t \leq A\}$).

Проведено порівняльний аналіз і оцінка механізмів прийняття рішень в МІМО контролерах і процедур нечіткого виводу. Показано, що якщо входні змінні є нечіткими синглетами, то використання правила операції мінімуму Мамдані та операції множення Ларсена не тільки спрощує процес обчислення, але також забезпечує простоту графічного представлення механізмів нечіткого виводу в МІМО системах.

Представлено в узагальненій формі чотири процедури нечіткого виводу, які отримали найбільше застосування в НЛК, – алгоритм: нечіткого виводу Мамдані, нечіткого виводу Ларсена, нечіткого виводу Цукамото, нечіткого виводу Такагі-Сугено.

У структурі системи управління з НПДК і внутрішньою нейронною моделлю (рис. 1) у вигляді мережі Хопфілда (НМХ) запропонована і розроблена процедура розрахунку місткості асоціативної пам'яті (АП) НМХ, яка залежить від способу навчання мережі та початкових умов, а облік кореляційних зв'язків вищого порядку дозволяє збільшити місткість АП. Так, у випадку довільних образів, місткість можна збільшити до

$$D(c) = \frac{n(p-1)}{n^2} \approx \frac{p}{n}, \text{ де } n - \text{кількість}$$

входів/виходів НСХ, p – кількість навчальних образів. Якщо образи корельовані, місткість НМХ можна збільшити до 2^{n-1} , що доводиться за допомогою наступних теорем:

Теорема 1: Для запам'ятовування множини образів в НМХ, відстань Геммінга між будь-якими двома образами повинна бути не менше 2.

Теорема 2: Нейронна мережа Хопфілда може запам'ятати 2^{n-1} образів.

Показано, що в структурі НПДК з внутрішньою нейронною моделлю Хопфілда формування ваг входних сигналів та налаштування параметрів НПДК здійснюється в процесі навчання. Це дозволяє мінімізувати помилки нечіткого висновку та визначити необхідну ємність АП для формування образу об'єкта управління.

Проведено аналіз та оцінку процедур дефазифікації. Показано, що в даний час недостатньо розроблена концепція вибору процедури дефазифікації. Запропоновано для кожного конкретного об'єкта управління вибір одного з методів дефазифікації – центру ваги, центру площі різних модальних значень – здійснювати на основі показників: вартості обчислень, вплив виду функцій належності, чутливості до змін ступеня активізації висновків бази правил.

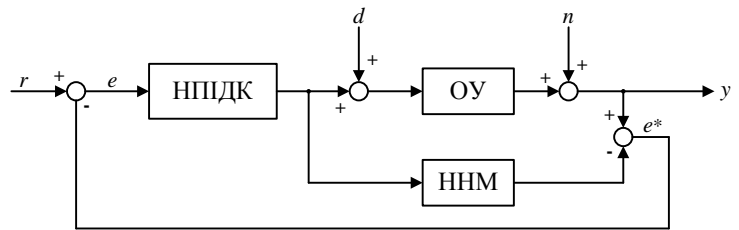


Рис.1. Структура системи управління, яка включає НПДК і внутрішню моделлю.

Третій розділ присвячено синтезу нечітких логічних контролерів для багатомірних систем управління. В більшості випадків для обробки інформації в нечітких моделях та алгоритмах, процедурах формування баз правил, нечіткого виводу, дефаззифікації використовуються операції, розглянуті у розділі 2.

В повній аналогії з класичними ПЛК, ці нечіткі логічні операції є розширенням логічних операцій І, АБО, НІ, ІМПЛІКАЦІЇ булевої алгебри. Запропоновано та обґрунтовано метод синтезу та проектування нечітких логічних схем, який є розвитком методології синтезу цифрових автоматів і булевих функцій і може використовуватися при синтезі НЛК для МІМО систем управління та обробки інформації.

Нечітка логічна функція $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \in F$ є розширенням поняття логічної (булевої) функції n змінних и визначається як відображення $f: V^n \rightarrow V$, де V^n – n -мірний простір НЛЗ, $V = [0, 1]$. Функція f може бути представлена нечітким логічним рівнянням (формулою) з використанням операцій: нечіткого логічного заперечення (інверсії) (2), нечіткого логічного додавання (диз'юнкції) (3), нечіткого логічного множення (кон'юнкції) (4), нечіткої імплікації (5):

$$\mu_A(\bar{x}) = 1 - \mu_A(x); \quad (2)$$

$$\mu_A(x_i + x_j) = \max(\mu_A(x_i), \mu_A(x_j)); \quad (3)$$

$$\mu_A(x_i \cdot x_j) = \min(\mu_A(x_i), \mu_A(x_j)); \quad (4)$$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x_i, x_j) = \max(1 - \mu_A(x_i), \mu_A(x_j)). \quad (5)$$

Визначення 1. Нечітким мінтермом НЛФ n змінних $x_i, i = \overline{1, n}$ називається терм-фраза, що включає всі змінні x_i у вигляді множини значень $\{x_i, \bar{x}_i, x_i \cdot \bar{x}_i\}$.

Визначення 2. Нечіткою досконалою диз'юнктивною нормальною формою (НДДНФ) називається диз'юнкція мінтермів, що входять в задану НЛФ.

Визначено поняття: нечіткої диз'юнктивної нормальної форми (НДНФ), нечіткої простої імпліканти (НП), нечіткої мінімальної диз'юнктивної нормальної форми (НМДНФ), які аналогічні відповідним поняттям та формам представлення булевих функцій.

В нечіткій логіці визначені нечіткі операції поглинання, склеювання і викреслювання НЛЗ, що входять у різні терми ДНФ функцій. Ці операції використовуються для синтезу алгоритму знаходження НМДНФ вихідної функції, що забезпечує реалізацію схем на основі нечітких логічних формул з мінімальними апаратними затратами.

Операція нечіткого поглинання:

а) $x_1 + x_1 x_2 = x_1$ – аналогічна операції поглинання булевої алгебри.

б) $(x_1 + \bar{x}_1) + x_2 \cdot \bar{x}_2 = (x_1 + \bar{x}_1)$ – так як $(x_1 + \bar{x}_1) \geq 0.5$, а $x_2 \cdot \bar{x}_2 \leq 0.5$, то $(x_1 + \bar{x}_1)$ поглинає кон'юнкцію $x_2 \cdot \bar{x}_2$. У загальному випадку $(x_i + \bar{x}_i) + x_j \bar{x}_j X = (x_i + \bar{x}_i)$, де X – довільна нечітка формула.

Операція нечіткого склеювання: $x_1 x_2 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_2 = x_2 \bar{x}_2$.

Операція викреслювання НЛЗ: $x_1 + \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_2 = x_1 + x_2 \bar{x}_2$.

Операція нечіткого розширення. Нехай задана нечітка формула $(x_1 \bar{x}_1 x_2 + x_2 \bar{x}_2 x_3)$. Тоді, відповідно до операції нечіткого склеювання, цю формулу можна розширити, представляючи її у вигляді диз'юнкції мінтермів трьох змінних, тобто:

$$x_1 \bar{x}_1 x_2 (x_3 + \bar{x}_3) + x_2 \bar{x}_2 x_3 (x_1 + \bar{x}_1) = x_1 \bar{x}_1 x_2 x_3 + x_1 \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 + x_2 \bar{x}_2 x_3 x_1 + x_2 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_1$$

Розроблено процедуру мінімізації НЛФ, представлених в НДНФ. Для спрощення програмної реалізації алгоритму мінімізації запропоновано використовувати четверичну систему числення нечітких терм-фраз у вигляді:

$$01(1) = \bar{x}_i; 10(2) = x_i; 11(3) = x_i \bar{x}_i; 00(0) - \text{відсутність } x_i \text{ в термі.} \quad (6)$$

Наприклад, терм $\{x_1 \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_4\}$ НЛФ чотирьох змінних (x_1, x_2, x_3, x_4) кодується наступним чином: $\{x_1 \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_4\} \rightarrow \begin{pmatrix} 11 & 01 & 00 & 10 \\ (3) & (1) & (0) & (2) \end{pmatrix}$.

Розроблений алгоритм мінімізації НЛФ заснований на використанні операції нечіткої логіки. Запропоноване двійково-четвіркове кодування терм-фраз дозволяє визначати пари термів, що склеюються, шляхом виконання порозрядної операції "Г" булевої алгебри. Наприклад, нехай НЛФ задана в НДНФ у вигляді:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1 \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 + x_1 \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_4 + x_1 \bar{x}_1 x_2 x_3 x_4 + x_1 \bar{x}_2 x_3. \quad (7)$$

Застосування операції нечіткого розширення, склеювання, викреслювання і поглинання дозволяє знайти множину НПП, представлених в нечіткій імплікантній матриці (табл. 1). Вибір мінімальної кількості НПП, що покривають множину фундаментальних терм-фраз заданої НЛФ, представляє НМДНФ у вигляді:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1 \bar{x}_2 x_3 + x_1 \bar{x}_1 x_2. \quad (8)$$

Розроблено метод синтезу схем на основі нечітких логічних

Табл. 1 Приклад нечіткої імплікантної матриці.

НПП	Фундаментальні терми НЛФ			
	$x_1 \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3$	$x_1 \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_4$	$x_1 \bar{x}_1 x_2 x_3 x_4$	$x_1 \bar{x}_2 x_3$
$a_1 = x_1 \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3$	+			
$a_2 = x_1 \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_4$		+		
$a_3 = x_1 \bar{x}_1 x_2 x_3 x_4$			+	
$a_4 = x_1 \bar{x}_2 x_3$				+
$a_9 = x_1 \bar{x}_1 x_2$	+	+	+	

формул з використанням нечітких логічних операцій і модулів І, АБО, НІ, оператора імплікації Кліні-Дікса, представлені формулами (2-5). Кожна функція приналежності НЛП представляється у цифровій формі значенням двійкового вектора, записаного в n -розрядному двійковому регістрі. Чотирирозрядний двійковий код значення в інтервалі задається з кроком дискретизації 0,066 (6). Запропонований спосіб кодування без зниження загальності отриманих рішень дозволяє реалізувати цифрові модулі для реалізації операцій інверсій, кон'юнкції, диз'юнкції, імплікації, а також функціональної схеми універсального вхідного перетворювача нечітких логічних змінних і максимінторного (МкМ) модуля (рис. 2).

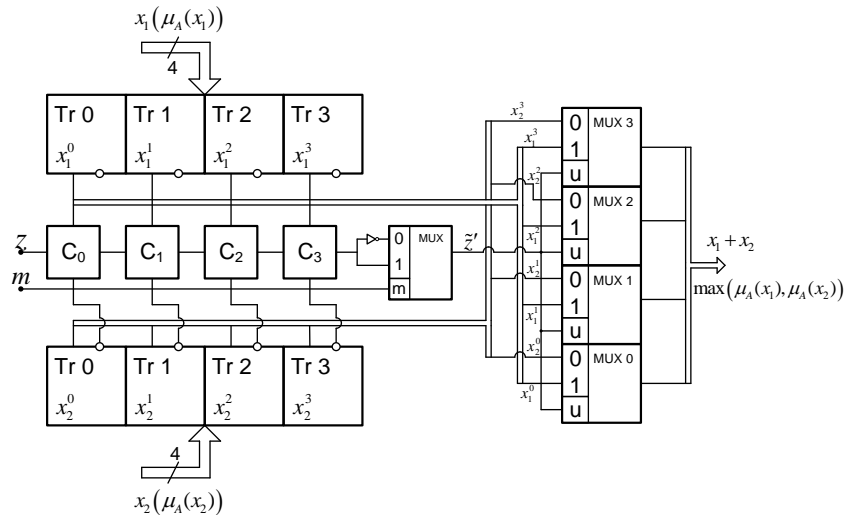


Рис.2. Функціональна схема максимінторного елемента.

Універсальний МкМ модуль включає два чотирирозрядних регістра для запису і зберігання значень функції належності логічних змінних x_1 і x_2 , односпрямовану однорідну мережу з елементами (C_0, C_1, C_2, C_3) для вибору максимінних значень вхідних НЛП.

Четвертий розділ присвячений розробці аналітичних методів проектування та оптимізації параметрів НПДК. Запропоновано та обґрунтовано функціональний оцінний підхід, який використовується для розробки систематичної процедури проектування НПДК. Вибір структури модуля нечіткого виводу, правил міркувань і функцій приналежності заснований на використанні двох основних критеріїв: простоти і нелінійності. Показано, що НПДК прямої дії більш кращий ніж НПДК з диспетчеризацією коефіцієнтів підсилення відповідно до критерію простоти формування нелінійних властивостей.

Лінгвістичні уявлення НПДК мають такий вигляд:

– абсолютне значення виходу

$$\text{Правило R}_i: \text{ЯКЩО } \tilde{e} \in E_i \text{ I } \tilde{e} \in E_j, \text{ ТО } \Delta \tilde{u}_{PD} \in (\Delta U_{PD})_m; \quad (9)$$

– інкрементне значення виходу

$$\text{Правило R}_i: \text{ЯКЩО } \tilde{e} \in E_i \text{ I } \tilde{e} \in E_j, \text{ ТО } \Delta \tilde{u}_{PI} \in (\Delta U_{PI})_m. \quad (10)$$

де \tilde{e} і $\Delta \tilde{e}$ – нормована помилка і змінення нормованої помилки; $E_i, E_j, (\Delta U_{PI})_m$ та $(\Delta U_{PD})_m$ – нечіткі змінні.

Для аналізу функціональних оцінок характеристик НПДК з різними структурами запропоновано використовувати п'ять оціночних показників: композиція керуючого впливу, взаємний вплив вхідних змінних і коефіцієнтів підсилення, варіації значень коефіцієнта посилення, збільшення числа правил, які не залежать від моделі об'єкта управління.

Застосування запропонованих показників для аналізу характеристик різних типів НПДК показало що: а) у структурі НПДК Мамдані з двома вхідними змінними і одним вихідним впливом має місце залежність складових керуючих впливів, що, як правило, виключається в КПДК; б) структура НПДК з однією вхідною змінною і формуванням нечіткого висновку по трьом незалежним скла

довим (пропорційна, інтегральна та диференціальна) (рис. 3) є оптимальною структурою у відповідності з п'ятьма оціночними показниками, порівняно зі структурами, які мають дві або три вихідних змінних.

В таблиці 2 представлені результати аналізу характеристик різних структур НПДК відповідно до запропонованих критеріїв поведінки НЛК і порівняння їх з характеристиками КПДК. У таблиці, N – кількість нечітких множин значень вхідних змінних.

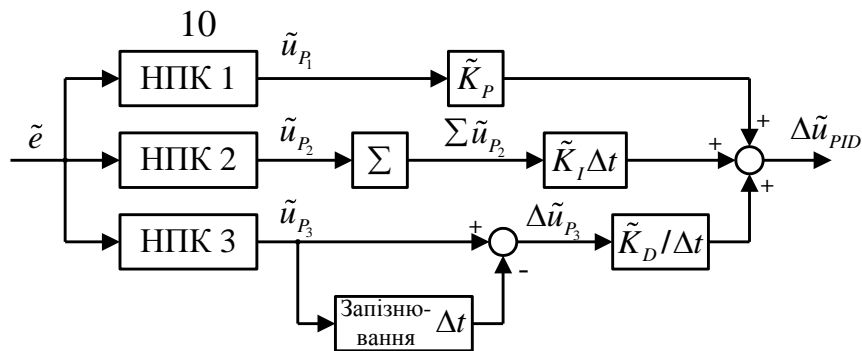


Рис. 3. НПДК з одним входом і відображенням нечіткого виводу 1-в-3.

Табл.2. Характеристики різних структур НПДК

Тип контролера	Роздільне обчислення керуючих впливів	Незв'язність входів	Незалежність налаштування коефіцієнтів	Загальна кількість правил
КПДК	Так	Так	Так	0
НПДК	3-в-1	Ні	Ні	N^3
	2-в-1	Ні	Ні	N^2
	1-в-1	Так	Так	N
	1-в-3	Так	Так	$3N$

Запропоновано оцінку характеристики нелінійності НПДК як апроксиматора нелінійності здійснювати відповідно до трьох концептуальних підходів: функціональна оцінка, оцінка узагальненої здатності апроксимації та оцінка, заснована на варіації нелінійності. Порівняння цих підходів показує, що апроксимація, заснована на варіаціях нелінійностей, є найбільш ефективною оцінкою функціональних здібностей НПДК – схем нечіткого виводу, дефазіфікації та функцій приналежності.

Для оцінки варіації нелінійності НПДК запропоновано використовувати два показники – індекс варіації нелінійності (ІВН):

$$ІВН(N_v, N_t, N_e) = \frac{Q_{N_e}}{U_{N_e}},$$

де Q_{N_e} – припустима область в N_e -мірному просторі, U_{N_e} – універсум в N_e -мірному просторі, N_v, N_t, N_e – сумарна кількість вхідних змінних, параметрів нелінійної налагодження і параметрів перевірки оцінки нелінійності, відповідно; а також апроксимаційний індекс нелінійності (АІН):

$$АІН = 1 - \frac{\max|\tilde{u}_p(\tilde{e}) - \bar{u}_p(\tilde{e})|}{\max|\bar{u}_p(\tilde{e})|},$$

де \bar{u}_p – лінійна функція, яка проходить від точки початку координат $\tilde{u}_p(\tilde{e} = 0) = 0$, до кінцевої точки $\tilde{u}_p(\tilde{e} = 1)$.

ІВН сприяє реалізації контролером довільних нелінійностей, в той час як АН показує здатність контролера до реалізації якісної лінійної апроксимації, що дуже важливо при проектуванні НПДК для реалізації систем управління з гарантованими ПД характеристиками і дозволяє розробнику НПДК вибрати і поліпшити якість функціонування контролера без проведення процедур комп'ютерного моделювання або тестування системи управління конкретним об'єктом.

Розроблена спрощена структура нечіткого блоку НПДК, яка зводиться до використання мінімального числа розбиттів нормованого простору для сигналу помилки та вихідного сигналу нечіткого блоку контролера. Таким чином, задача налагодження нечіткого блоку НПДК зводиться до знаходження тільки одного параметра нечіткого налагодження, що дозволяє також спростити процедуру обчислення керуючого впливу.

П'ятий розділ присвячений розробці методів і процедур налагоджування параметрів нечітких контролерів для нестационарних об'єктів. Розроблено метод і процедуру налагоджування коефіцієнтів НПДК, яка складається з таких кроків: 1) вибір структури КПДК і обчислення коефіцієнтів налагодження за методом Зінглера-Нікольса; 2) перетворення КПДК в еквівалентний лінійний НПДК; 3) перетворення лінійного НПДК в нелінійний; 4) виконання процедури точного налагодження нелінійного НПДК.

Розроблено процедуру ручного налагоджування КПДК, яка використовується в онлайновому режимі функціонування контролерів різних структур. Перетворення КПДК в лінійний НПДК здійснюється шляхом заміни операцій КПД операціями в НПДК та формуванням бази правил, механізму нечіткого виводу та дефазіфікації, які забезпечують лінійне відображення вхід/вихідний і перехідної характеристик аналогічних КПДК. Розроблені процедури переходу від коефіцієнтів КПД до коефіцієнтів лінійного НПДК. Для різних структур НПДК визначено співвідношення між коефіцієнтами КПДК та лінійного НПДК.

Отримано оцінку впливу параметрів налагодження НПДК, табличної квантизації області значень вхідних змінних і впливу шумів на якісні характеристики поведінки системи управління: перехідних і вхід/вихідних реакцій.

Процедура перетворення лінійного НПДК в нелінійний розроблена і показана на прикладі НПДК з двома вхідними лінгвістичними змінними, кількістю правил рівним 9 для чотирьох характерних поверхонь управління.

Розроблено метод налагодження параметрів НПДК, який дозволяє аналітично обчислювати початкові значення його коефіцієнтів через відповідні значення параметрів класичних ПД контролерів для різних методів дефазіфікації і обчислень значень вихідного параметра з урахуванням якісної оцінки результату

ту налаштування за чотирма показниками: $I_1 = \int_0^t e^2(t) dt$ – середньо квадратичне відхилення;

$I_2 = \frac{y_{\max} - r}{r}$ – нормоване перерегулювання; $I_3 = \frac{\min t}{y(t)} = 90\% r$ – час наростання сигналу;

$I_3 = \frac{\min t}{y(t)} \in [95\% r, 105\% r]$ – час регулювання. З урахуванням отриманих коефіцієнтів КППДК, обчислюються параметри НПДК для різних методів дефазифікації, які представлені в таблиці 3.

Розроблені методи проектування та налаштування НПДК використовувалися при реалізації контуру ПД управління рівнем розплаву на дослідній установці “РОСТ” ІСМА НАНУ для вирощування великогабаритних монокристалів.

У контурі управління використовувався НПДК з одним входом і одним виходом (рис.4).



Таблиця 3. Характеристики відгуку системи для КППДК і НПДК

Контролер	ПД	Нелінійна дефазифікація	Лінійна дефазифікація
Коеф-ти	$K_P = 1.643,$ $T_I = 3.681,$ $T_D = 0.921.$	$K_e = 0.2367,$ $K_{ce} = 0.6592,$ $K_{ae} = 0.6127.$	$K_e = 0.0451,$ $K_{ce} = 0.3298,$ $K_{ae} = 0.3175.$
I_1	2.19722	2.10194	2.33687
I_2	0.1214 ($t_p=5.7$)	0.4372 ($t_p=4.4$)	0.1817 ($t_p=8$)
Нечіткий вихід	4.1	Чіткий вихід	Нормований вихід
I_3	7.2	2.8	Вихід контролера
			10.7

Рис. 4. Структура НПДК

Рівняння контролера рівня розплаву описується залежністю:

$$\tilde{u}(h) = \tilde{K}_P \tilde{u}_F(h) + \tilde{K}_I \sum_{i=0}^h \tilde{u}_F(i) \Delta t + \tilde{K}_D \frac{\Delta \tilde{u}_F(h)}{\Delta t}, \quad h = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

де $\tilde{u}(h)$ – нормоване значення виходу НПДК; \tilde{u}_F – дефазифікований вихід нечіткого блоку контролера, $\Delta \tilde{u}_F$ – його змінення в період часу $\Delta t = t(h) - t(h-1)$, причому $\Delta \tilde{u}_F(0) = 0$. \tilde{K}_P , \tilde{K}_I та \tilde{K}_D – пропорційний, інтегральний і диференціальний коефіцієнти контролера, відповідно, нормовані на відрізьку $[0, 1]$.

Порівняльний аналіз характеристик КППДК і НПДК проведений шляхом моделювання в пакеті Simulink 6.0 середовища MATLAB у відповідності зі структурою рис. 4. Результати моделювання представлені на рис. 5.

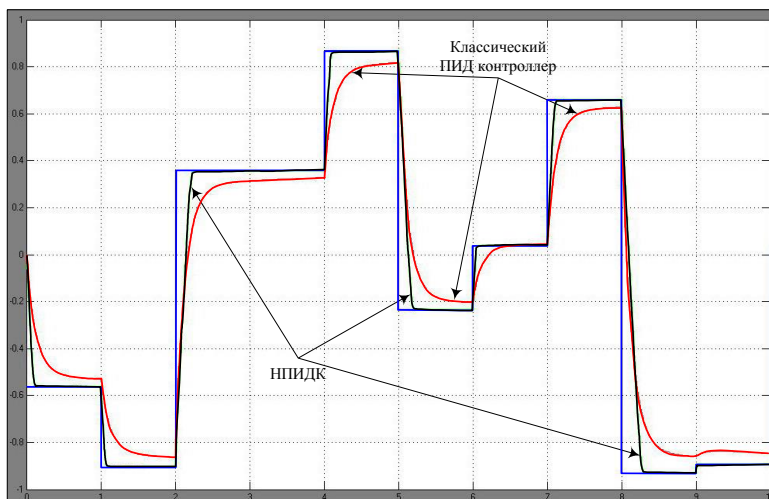


Рис. 5. Перехідна характеристика КПДК і НПДК.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність використання НПДК і дозволили підвищити якість управління контуром стабілізації діаметра кристала та скоротити кількість неоднорідних шарів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу розробки та удосконалення моделей, методів та процедур проектування та налагодження нечітких контролерів промислового призначення на основі використання інноваційної технології м'яких обчислень з метою підвищення ефективності комп'ютеризованих систем контролю складними динамічними об'єктами, що не мають адекватних математичних моделей.

Основні наукові і практичні результати полягають в наступному:

1. Проведено аналіз стану і тенденцій розвитку сучасних структур програмованих логічних контролерів, які широко використовуються в комп'ютеризованих системах управління і обробки інформації, методів їх проектування та налагодження, особливостей використання НЛК в промислових призначеннях, що дозволило сформулювати мету і завдання досліджень дисертаційної роботи.

2. Проведено аналіз та оцінку критеріїв вибору функцій нечіткої імплікації, композиції, кон'юнкції і диз'юнкції, визначено функції нечіткої логіки прийняття рішень, які найбільш часто використовуються при проектуванні НЛК. Показано, що для зниження трудомісткості обчислювальних операцій найбільш прийнятним є правила нечіткої імплікації Мамдані та Ларсена.

3. Запропоновано та розроблено процедуру розрахунку місткості АП НМХ для структури систем управління з НПДК і внутрішньою нейронною моделлю у вигляді мережі Хопфілда, яка залежить від способу навчання мережі та початкових умов, а облік кореляційних зв'язків вищого порядку дозволяє збільшити місткість АП до 2^{n-1} , мінімізувати помилки нечіткого виводу та визначити необхідну місткість АП для формування образу об'єкту управління.

4. Розроблено та обґрунтовано метод синтезу та проектування нечітких логічних схем, який є розвитком методології синтезу цифрових автоматів і буле

вих функцій і може використовуватися при синтезі НЛК для МІМО систем управління та обробки інформації.

5. Розроблена процедура мінімізації нечітких логічних функцій, яка заснована на використанні операцій нечіткої логіки: склеювання, поглинання, викреслювання і розширення терм-фраз, що входять у вихідну НЛФ, і методи двійково-четвертинного представлення нечітких терм-фраз, що дозволяє реалізувати операції нечіткої логіки шляхом виконання логічної операції «І» булевої алгебри та вирішенні задач вибору мінімальної множини нечітких простих імплікант, на основі аналізу імплікантних матриць.

6. Запропоновано та розроблено процедуру апаратної реалізації бази правил НЛК на основі використання нечітких операцій І, АБО, НІ, ІМПЛІКАЦІЇ та де-композиційного методу синтезу цифрових схем. Синтезовано схеми нечітких модулів, що реалізують ці операції, а також універсальний МкМ модуль у вигляді односпрямованої мережі для вирішення максимінного вибору значень функцій приналежності нечітких логічних змінних.

7. Розроблено методи проектування НПДК різного типу на основі функціонального оціночного підходу. Вибір структури модулю нечіткого виводу, правил міркувань і функцій приналежності заснований на використанні двох основних критеріїв: простоти та нелінійності. Показано, що НПДК прямої дії більш кращий ніж НПДК з диспетчеризацією коефіцієнтів підсилення відповідно до критерію простоти формування нелінійних властивостей.

8. Запропоновано використовувати п'ять оціночних показників: композиція керуючого впливу, взаємний вплив вхідних змінних і коефіцієнтів підсилення, варіації значень коефіцієнта посилення, збільшення числа правил для аналізу функціональних оцінок характеристик НПДК з різними структурами, які не залежать від моделі об'єкта управління.

9. Запропоновано оцінку характеристики нелінійності НПДК як апроксиматора нелінійності, здійснювати відповідно до трьох концептуальних підходів: функціональна оцінка, оцінка узагальненої здатності апроксимації та оцінка, заснована на варіації нелінійності. Порівняння цих підходів показує, що апроксимація, що заснована на варіаціях нелінійностей, є найбільш ефективною оцінкою.

10. Запропоновано для оцінки варіацій нелінійності НПДК використовувати два показники – ІВН та АІН. ІВН сприяє реалізації контролером довільних нелінійностей, в той же час як АІН дає можливість реалізації контролером якісної лінійної апроксимації.

11. Розроблено метод і процедуру ручного налаштування параметрів нечітких логічних контролерів, що базуються на використанні відомих методів проектування і налагодження параметрів класичних ПД контролерів.

12. Розроблено метод налагодження параметрів НПДК, який дозволяє аналітично обчислювати початкові значення його коефіцієнтів через відповідні значення параметрів класичних ПД контролерів для різних методів дефазифікації і обчислень значень вихідного параметра з урахуванням якісної оцінки результату налаштування. Верифікація коректності запропонованого методу на

лаштування здійснювалася шляхом моделювання системи управління з трьома різними об'єктами в системі MATLAB.

13. Результати роботи впроваджені в дослідному виробництві ІСМА НАНУ та в навчальному процесі кафедри автоматизації хіміко-технологічних систем та екологічного моніторингу НТУ “ХП”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Герман Э.Е. Оценка емкости ассоциативной памяти на основе нейронной сети Хопфилда / Э.Е. Герман, Л.В. Дербунович // Вісник Національного технічного університету “ХП”. – 2003. – №21. – С. 37–44.

Здобувачем розроблено метод розрахунку місткості асоціативної пам'яті нейронної мережі Хопфилда.

2. Герман Э.Е. Минимизация нечетких логических функций и ее применение / Э.Е. Герман, А.И. Гапон, Л.В. Дербунович // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2005. – №7. – С. 46-54.

Здобувачем розроблено алгоритм мінімізації нечітких логічних функцій.

3. Герман Э.Е. Методы проектирования нечетких ПИД контроллеров / Э.Е. Герман, А.И. Гапон, Л.В. Дербунович // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2005. – №17 – С. 15–21.

Здобувачем розроблено метод проектування нечіткого ПІД контролера базований на функціональній оцінці. Виконано порівняльний аналіз НПІДК 2-1, 3-1, 1-1, 1-3.

4. Герман Э.Е. Система нечеткого управления процессом выращивания функциональных монокристаллов / Э.Е. Герман, А.И. Гапон, Л.В. Дербунович // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2006. – №31. – С. 11–18.

Здобувачем розроблено структуру системи управління вирощування великогабаритних функціональних монокристалів з використанням НПІДК.

5. Герман Э.Е. Нечеткий ПИД контроллер в системах управления установками для выращивания / Э.Е. Герман, Л.В. Дербунович // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2007. – №10 – С. 46–54.

Здобувачем запропоновано НПІДК контролера для використання в системі управління вирощування великогабаритних монокристалів.

6. Герман Э.Е. Оптимизация параметров нечетких ПИД контроллеров / Э.Е. Герман, Л.В. Дербунович, С.В. Белецкий // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2007. – № 36 – С. 3–8.

Здобувачем розроблено метод розбивки нормованої області нечітких функцій для похибки сигналу та керуючого впливу в НПІДК.

7. Герман Э.Е. Современное состояние и перспективы развития систем нечеткого управления / Э.Е. Герман // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2008. – №57. – С. 37–44.

Здобувачем виконано аналіз сучасного стану і перспективи розвитку систем нечіткого управління.

8. Герман Э.Е. Преобразование классического ПИД контроллера в линейный нечеткий ПИД контроллер / Э.Е. Герман // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2009. – № 23. – С.– 42-49.

Здобувачем розроблено алгоритм перетворення класичного ПИД контролера до лінійно-го нечіткого контролеру.

9. Герман Э.Е. Метод настройки параметров нечеткого ПИД контроллера для нестационарных объектов / Э.Е. Герман, Л.В. Дербунович // ЕЛЕКТРОІНФОРМ – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 430-431.

Здобувачем розроблено метод налаштування параметрів НПДК, який дозволяє аналітично обчислювати початкові значення його коефіцієнтів через значення параметрів КПДК для різних методів дефазіфікації.

10. Герман Э.Е. Синтез гибридных контроллеров для управления процессами выращивания крупногабаритных монокристаллов / Э.Е. Герман // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 3. – С. 53–56.

Здобувачем розроблені метод та алгоритм налаштування гібридного регулятора температури ростової установки для вирощування великогабаритних монокристалів.

11. Герман Э.Е. Минимизация нечетких логических формул / Э.Е. Герман, Л.В. Дербунович, И.Г. Либерг // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – С. 31-36.

Здобувачем розроблено метод та алгоритм мінімізації нечітких логічних функцій на основі застосування нечітких операцій І, АБО, НІ та імплікативних матриць.

12. Герман Э.Е. Синтез схем на основе нечетких логических формул / Э.Е. Герман, Л.В. Дербунович // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 3. – С. 75-81.

Здобувачем розроблено функціональні схеми модулів, що реалізують нечіткі операції І, АБО, НІ, ІМПЛІКАЦІЇ, а також універсальний максимінторний модуль.

13. Герман Э.Е. Алгоритм минимизации нечетких логических функций и его применение / Э.Е. Герман, А.И. Гапон, Л.В. Дербунович / Матеріали XII Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 20–24 травня 2004р., Харків / відп. вип. А.І. Грабченко. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2004. – С. 329.

Здобувачем представлено в узагальненій формі алгоритм мінімізації не-чітких логічних функцій.

14. Герман Э.Е. Моделирование систем нечеткого управления процессом выращивания функциональных монокристаллов / Э.Е. Герман / Матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 17–18 травня 2007р., Харків / відп. вип. А.І. Грабченко. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2007. – С. 372.

Здобувачем проведено моделювання систем нечіткого управління процесом вирощування функціональних монокристалів.

15. Герман Э.Е. Реалізація та моделювання нечіткого ПІД контролера з мінімальною кількістю лінгвістичних змінних / Э.Е. Герман / Матеріали XVI Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 4–6 червня 2008р., Харків Ч.1 / відп. вип. Г.В. Лісачук. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2008. – С. 355.

Здобувачем проведено моделювання функціонування НПІДК з мінімальною кількістю лінгвістичних змінних.

16. Герман Э.Е. Сравнение нечеткого и классического ПИД контроллеров / Э.Е. Герман / Матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 20–22 травня 2009р., Харків Ч.1 / відп. вип. Г.В. Лісачук. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2009. – С. 424.

Здобувачем зроблено порівняльний аналіз нечіткого та класичного ПІД контролерів.

17. Герман Э.Е. Синтез нечітких ПІД контролерів для управління процесом вирощування функціональних монокристалів / Э.Е. Герман, Л.В. Дербунович / Матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 20–22 травня 2009р., Харків Ч.2 / відп. вип. Г.В. Лісачук. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2009. – С. 110.

Здобувачем розроблено процедуру синтезу НПІДК для управління процесом вирощування функціональних монокристалів.

18. Герман Э.Е. Нечеткие ПИД контроллеры для систем управления нестационарными объектами / Э.Е. Герман / Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 19-21 травня 2010 року. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – С. 487.

Здобувачем запропоновано структури НПІДК для систем керування нестационарними об’єктами.

19. Герман Э.Е. Синтез нечетких логических схем с минимальными аппаратными затратами / Э.Е. Герман, Л.В. Дербунович / Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Алушта, Крим, 2010. – № 4. (Додаток) – Р. 8.

Здобувачем розроблено метод синтезу нечітких максимінторних елементів.

АНОТАЦІЇ

Герман Е.С. Методи проектування нечітких контролерів для цифрових систем керування промислового призначення. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти. □ Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2013 р.

У дисертації вирішено науково-технічну задачу підвищення ефективності комп’ютеризованих систем контролю й управління складними динамічними об’єктами на основі використання НЛК; створення теоретичних, методичних та інженерно-технічних основ проектування структур НЛК промислового застосування.

В роботі розроблено метод та алгоритм мінімізації нечітких баз правил НЛК, представлених у вигляді нечітких логічних функцій, шляхом використання спеціальних операцій перетворення нечітких термів в четвірковій системі числення, що дозволило підвищити швидкість формування вихідного сигналу НЛК по мінімальній нечіткій таблиці рішень. Зроблено теоретичне обґрунтування та узагальнення методів функціонального та параметричного проектування структур НЛК для керування динамічними об’єктами з нечіткими моделями, які забезпечують незалежність налаштування коефіцієнтів НЛК від характеристик об’єкта управління. Була отримана оцінка якості функціонування класичного ПД контролера і НЛК в контурі управління діаметром вирощуваного великогабаритного кристала в установці "РОСТ", що дозволило визначити ефективність використання НЛК, підвищити в 1.5 рази точність стабілізації діаметра кристала і знизити кількість бракованих неоднорідних шарів.

Ключові слова: нечіткий ПД контролер, функція належності, нечітка логічна функція, нечітка імплікація, фазифікація, дефазифікація, нечіткий висновок.

Герман Э.Е. Методы проектирования нечетких контроллеров для цифровых систем управления промышленного применения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2013 г.

Диссертация посвящена повышению эффективности компьютеризированных систем контроля и управления сложными динамическими объектами на основе использования НЛК, созданию теоретических методических и инженерно-технических основ проектирования структур НЛК промышленного применения.

Проведен анализ состояния и тенденций развития современных структур программируемых логических контроллеров, широко используемых в компьютеризированных системах управления, обоснована необходимость развития нового класса контроллеров, основанных на принципах и теоретических осно

вах теории нечетких множеств и нечеткой логики. Предложена классификация типов и структура НЛК.

Проведен анализ критериев выбора функций нечеткой импликации, композиции, конъюнкции и дизъюнкции, определены функции нечеткой логики принятия решений, позволяющие провести синтез нечетких контроллеров, основанных на экспертных знаниях. В структуре системы управления с НПЖДК и внутренней нейронной моделью в виде сети Хопфилда предложена процедура расчета емкости ассоциативной памяти НСХ, которая зависит от способа обучения сети и начальных условий.

Разработаны методы синтеза и проектирования нечетких логических схем и процедура минимизации нечетких логических функций, основанная на использовании операций нечеткой логики: склеивания, поглощения, вычеркивания и расширения. Предложен метод двоично-четвертичного представления нечетких терм-фраз, что дало возможность разработать процедуру аппаратной реализации базы правил НЛК на основе использования нечетких операций И, ИЛИ, НЕ, ИМПЛИКАЦИИ и синтезировать схемы нечетких модулей, реализующих эти операции, а также универсальный МкМ модуль для решения максиминного выбора значений функций принадлежности нечетких логических переменных.

Разработаны методы проектирования НПЖДК на основе функционального оценочного подхода. Для анализа функциональных оценок характеристик НПЖДК предложено использовать пять оценочных показателей: композиция управляющего воздействия, взаимное влияние входных переменных и коэффициентов усиления, вариации значений коэффициента усиления, увеличение числа правил. Предложено и осуществлять оценку характеристики нелинейности НПЖДК, как аппроксиматора нелинейности. Для оценки вариаций нелинейности НПЖДК используются два показателя – индекс вариации нелинейности и аппроксимационный индекс нелинейности.

Предложена и обоснована процедура ручной настройки параметров нечетких логических контроллеров, основанная на использовании известных методов проектирования классических ПИД контроллеров, что позволяет улучшить качественные характеристики замкнутой системы управления. Разработан метод настройки параметров НПЖДК, который позволяет аналитически вычислять начальные значения его коэффициентов через соответствующие значения параметров КПЖДК для различных методов дефазификации. Верификация корректности предложенного метода настройки осуществлялась путем моделирования системы управления с тремя различными объектами в системе MATLAB.

Результаты исследований внедрены при проектировании НПЖДК для системы управления установками “РОСТ” для выращивания крупногабаритных монокристаллов. Для вычисления начальных значений коэффициентов НПЖДК использовались известные значения КПЖДК и экспертные оценки специалистов. Экспериментальные проверки подтвердили эффективность и простоту настройки НПЖДК, что позволило повысить качество управления контуром

стабилизации диаметра кристалла, точность стабилизации диаметра и сократить число неоднородных слоев.

Ключевые слова: нечеткий ПИД контроллер, функция принадлежности, нечеткая логическая функция, нечеткая импликация, фаззификация, дефаззификация, нечеткий вывод.

German E.E. Designing Methods of Fuzzy Controllers for digital control system of industrial use. – Manuscript.

Thesis for a granting the Degree of Technical Sciences in specialty 05.13.05 – computer systems and components. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2012.

The thesis addressed important scientific and technical problem of improving the efficiency of computerized monitoring systems and managing complex dynamic objects on the basis of NLC, the creation of theoretical, methodological and technical bases of structures NLC industrial applications.

The paper has been developed a method and algorithm to minimize the fuzzy rule bases NLC represented as fuzzy logic functions by using special operations transform fuzzy terms in quaternary number system, thus improving the performance of output signal shaping NLC on minimum fuzzy decision tables. Made theoretical justification and synthesis methods of functional and parametric design structures FPIDC for managing dynamic objects with fuzzy models, which provide independent adjustment coefficients FPIDC the characteristics of the control object. Visit the estimation quality of the classical PID controller and FPIDC control circuit of large diameter crystal grown in the installation "ПОСТ-5", which allows to determine the effectiveness of FPIDC, increase to 1.5 times the diameter of the crystal stabilization accuracy and reduce the number of defective heterogeneous layers.

Keywords: fuzzy PID controller membership function, fuzzy logic function, fuzzy implication, fuzziness, defuzziness, fuzzy inference.