УДК 681.51: 537.528

В. С. Блінцов, С. С. Козирєв

СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВІ ІНВЕРСНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОВИБУХОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Побудовано інверсну модель процесу електровибухового перетворенням енергії як об’єкта керування на базі експериментальних даних з використанням методу фаззі-апроксимації. На базі інверсної моделі синтезовано нечіткий регулятор для корекції параметрів адаптивної системи керування електровибуховим перетворенням енергії в умовах нестаціонарності технологічних параметрів та непередбачуваних зовнішніх впливах.

Построена инверсная модель процесса електровзрывного преобразования энергии как объекта управления на базе экспериментальных данных с использованием метода фаззи-аппроксимации. На базе инверсной модели синтезирован нечеткий регулятор для коррекции параметров адаптивной системы управления електровзрывным преобразованием энергии в условиях нестационарности технологических параметров и непредсказуемости внешних воздействий.

The inverse model of the discharge energy conversion as an object of control was built based on the experimental data using fuzzy approximation method. Fyzzy regulator for correction of the adaptive control system's parameters was created based on the inverse model. The regulator provides control under variable technological parameters and unpredictable external conditions.

Вступ

Результати теоретичного і експериментального дослідження електровибухового перетворення енергії як об’єкта керування показують, що об’єкт відноситься до дискретно-неперервних багатовимірних стохастичних нестаціонарних систем [1]. Оператор відповідності між координатами вхідного і вихідного векторів об’єкта та статистичні характеристики інформаційних координат залежать від положення в просторі станів, тому для реалізації основної переваги електровибухового перетворення енергії – керованості – необхідно синтезувати адаптивне керування, яке забезпечує оптимальні режими в умовах нестаціонарності параметрів середовища та невизначеності зовнішніх збурень.

Постановка задачі

Метою статті є синтез нечіткого регулятора для адаптивної системи керування електровибуховим перетворенням енергії на основі його інверсної моделі, побудованої на базі експериментальних даних із застосуванням сучасних методів фаззі-апроксимації.

Виклад основного матеріалу дослідження

Попередній **а**наліз існуючих моделей та систем керування електровибуховим перетворенням енергії показав, що вони побудовані на основі лінеаризації об'єкта і забезпечують керування тільки в околі точки номінального режиму при певних припущеннях відносно збурень [1-3].

Забезпечення керованості електровибухового перетворення енергії у всьому просторі станів потребує введення механізмів адаптації для врахування нестаціонарності та стохастичності об'єкта. Механізм адаптації можна реалізувати, використовуючи системи керування на основі інверсних моделей об'єкту керування, які генерують реакцію на збурення, визначаючи керуючий вплив, що гарантує необхідні значення вихідних координат. Достовірність інверсної моделі забезпечується точністю та повнотою опису властивостей об'єкта та його статистичних характеристик. Побудова інверсної моделі передбачає отримання зворотної функції об'єкта керування, тобто функції, що дає змогу знаходити таке значення керуючого впливу, яке забезпечить задане значення вихідної інформаційної координати, а відповідно, і заданий режим електровибухового перетворення енергії та необхідний технологічний вплив, при поточному стані контрольованих параметрів об'єкта.

Аналітично пряму та інверсну моделі електровибухового перетворення енергії, які адекватно описують об'єкт у всьому просторі станів, побудувати складно, оскільки фізичні процеси, що відбуваються в каналі розряду, неоднозначні, недостатньо вивчені, важко піддаються формалізації [4]. У зв'язку з цим для отримання вказаних залежностей пропонується застосувати сучасні методи фаззі-апроксимації на основі нечіткої логіки, використовуючи бази експериментальних даних для побудови нечітких моделей керування [5].

З метою отримання бази експериментальних даних для побудови нечіткої інверсної моделі процесу електровибухового перетворення енергії, адекватної на всьому просторі станів об'єкту керування, проведено експериментальне дослідження залежності статистично найбільш ефективної вихідної інформаційної координати $\Sigma[n] = i_m[n] + k\, U_{пр}[n]/i_m[n]$, яка отримана як лінійна комбінація корельованих вихідних координат $i_m[n]$ – амплітуди розрядного струму і $U_{пр}$ – пробивної напруги, від змін координат вхідного вектора $\boldsymbol{X}<l[n], \rho[n]>$, де $l[n]$ – довжина розрядного проміжку або ке-

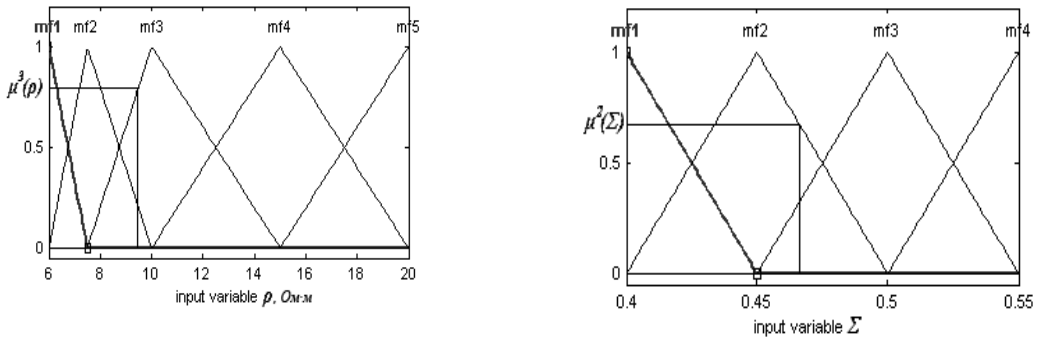
рована координата, та $\rho[n]$ – питомий опір рідини або контрольована параметрична координата. Враховуючи стохастичний характер процесу електровибухового перетворення енергії, з метою синтезу системи керування проведено також дослідження залежності статистичних характеристик інформаційної координати $\Sigma[n]$ (σ_Σ – середньоквадратичного відхилення) від координат вхідного вектора. Для цього поставлено дробовий факторний експеримент при одночасному варіюванні усіх незалежних змінних $l[n]$, $\rho[n]$ на усіх вибраних рівнях значень з використанням методів планування експерименту.

Інверсну модель будуємо у вигляді $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$, для чого необхідно мати базу навчальних даних, тобто множини груп сигналів ($\Sigma[n]$, $\rho[n]$), що будуть надходити на вхід системи керування, та відповідно очікувані (еталонні) значення керуючого сигналу $l[n]$. Такі групи сигналів формуємо, використовуючи базу експериментальних даних, наведену в [4]. Першим кроком при побудові нечіткої інверсної моделі є розподіл простору вхідних і вихідних сигналів на діапазони, які будуть слугувати термами при побудові функцій належності. Використаємо прямий метод побудови функцій належності, який не вимагає абсолютно точного визначення функцій належності, а лише тип функції та характерні значення, в даному випадку – значення в експериментальних точках за планом експерименту, які є опорними для діапазонів, прийнятих в якості термів. Приймаємо трикутну форму функцій належності (ФН). Одна з вершин ФН знаходиться в центрі кожного числового діапазону значень координати і їй відповідає значення функції $\mu^T(x)$, рівне 1, дві інші вершини лежать в центрах сусідніх діапазонів, їм відповідає значення функції, рівне 0.

В якості лінгвістичних вхідних змінних приймаємо координати $\rho[n]$, $M_\Sigma[n]$. Кількість термів (лінгвістичних значень, у нашому випадку – числових діапазонів) для кожної змінної обираємо рівною кількості рівнів значень за планом факторного експерименту. В даному випадку кількість термів дорівнює 5 та 4. Функції належності (mf_i, $\mu^T(x)$) координат вектора стану $\rho[n]$, $M_\Sigma[n]$ апроксимуємо трикутними функціями (рис. 1).

Процедура фаззіфікації вхідних сигналів, тобто визначення належності поточного значення координат вхідного вектора до того чи іншого діапазону, проводиться за максимальним значенням функції належності $\mu^T(x)$.

Для вихідної координати (керуючого сигналу $l[n]$) виконуємо такі ж процедури: розподіл простору значень сигналу на діапазони, які будуть слугувати термами при побудові функцій належності; побудова трикутних



а *б*

Рис. 1. Функції належності $\rho[n]$, $M_{\sum}[n]$

функцій належності, координати вершин яких є еталонними очікуваними значеннями вихідної координати $l[n]$ (рис. 2).

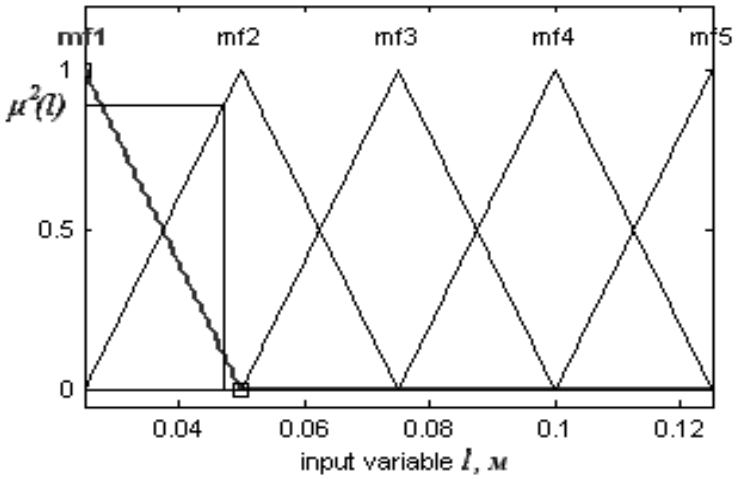


Рис. 2. Функція належності вихідної змінної $l[n]$

База правил нечіткої інверсної моделі формується на основі бази навчальних даних, в якості якої використано експериментальні дані, за алгоритмом побудови бази нечітких правил на основі чисельних даних [5]. Спочатку визначаємо ступені належності навчальних даних ($\rho[n]$, $M_{\sum}[n]$ та $l[n]$) до кожного виділеного діапазону, які будуть виражатися значеннями функцій належності відповідних нечітких множин для кожної групи даних $\mu^{T}(x)$. Обираючи діапазони з максимальним значенням функцій належності, отримуємо остаточне для кожної групи навчальних даних правило:

П: Якщо ($\Sigma_i = R_j$) і ($\rho_i = D_j$), то ($l_i = B_j$).

В базі даних знаходиться значна кількість груп навчальних даних, по кожній з яких може бути сформоване одне правило. Існує висока ймовірність, що деякі з них виявляться суперечливими, коли одні і ті ж умови призводять до різних висновків. Для виключення такої ситуації приписуємо кожному правилу ступінь істинності:

$$SR(\Pi) = \mu^{Dj}(\rho_i)\cdot \mu^{Rj}(\Sigma_i)\cdot \mu^{Bj}(l_i).$$

До бази правил включається правило, яке має найвищу ступінь істинності. Таким чином розв’язується проблема суперечливих правил, а та-

кож значно зменшується їх загальна кількість. Блок-схема алгоритму побудови бази правил на основі чисельних даних наведена на рис. 3.

Після застосування наведеного алгоритму до бази даних, отриманих при експериментальному дослідженні електровибухового перетворення енергії [2], отримано несуперечливу базу знань (табл. 1), яка є табличною формою запису бази правил нечіткого регулятора НР1 на основі нечіткої інверсної моделі. Значення інформаційної координати $\Sigma[n]$ дано у відносних одиницях, за базове значення прийнято амплітудне значення розрядного струму при короткому замиканні $I_{кз}$.

Таблиця 1.

Значення координати $l[n]$, м

M_Σ	ρ, Ом м				
	6,0	7,5	10,0	15,0	20,0
0,40	0,047	0,050	0,056	0,094	0,100
0,45	0,040	0,042	0,048	0,081	0,090
0,50	0,032	0,035	0,038	0,069	0,082
0,55	0,025	0,027	0,030	0,052	0,065

База правил у вигляді нечітких логічних рівнянь дає змогу зв’язати вихідний сигнал $l[n]$ та ФН координат вектора стану $\rho[n]$, $M_\Sigma[n]$, в результаті чого отримуємо значення керуючого впливу для певних діапазонів числових значень координат вектора стану.

База правил нечіткого регулятора НР1 на основі інверсної моделі $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$ має вигляд:

Якщо (ρ = trimf[5.5 6 7.5]) **і** (Σ = trimf[0.35 0.4 0.45]), **то** (l = 0.047), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[6 7.5 10]) **і** (Σ = trimf[0.35 0.4 0.45]), **то** (l = 0.05), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[7.5 10 15]) **і** (Σ = trimf[0.35 0.4 0.45]), **то** (l = 0.056), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[10 15 20]) **і** (Σ = trimf[0.35 0.4 0.45]), **то** (l = 0.094), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[15 20 25]) **і** (Σ = trimf[0.35 0.4 0.45]), **то** (l = 0.1), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[5.5 6 7.5]) **і** (Σ = trimf[0.4 0.45 0.5]), **то** (l = 0.04), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[6 7.5 10]) **і** (Σ = trimf[0.4 0.45 0.5]), **то** (l = 0.042), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[7.5 10 15]) **і** (Σ = trimf[0.4 0.45 0.5]), **то** (l = 0.048), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[10 15 20]) **і** (Σ = trimf[0.4 0.45 0.5]), **то** (l = 0.081), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[15 20 25]) **і** (Σ = trimf[0.4 0.45 0.5]), **то** (l = 0.09), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[5.5 6 7.5]) **і** (Σ = trimf[0.45 0.5 0.55]), **то** (l = 0.032), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[6 7.5 10]) **і** (Σ = trimf[0.45 0.5 0.55]), **то** (l = 0.035), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[7.5 10 15]) **і** (Σ = trimf[0.45 0.5 0.55]), **то** (l = 0.038), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[10 15 20]) **і** (Σ = trimf[0.45 0.5 0.55]), **то** (l = 0.069), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[15 20 25]) **і** (Σ = trimf[0.45 0.5 0.55]), **то** (l = 0.082), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[5.5 6 7.5]) **і** (Σ = trimf[0.5 0.55 0.6]), **то** (l = 0.025), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[6 7.5 10]) **і** (Σ = trimf[0.5 0.55 0.6]), **то** (l = 0.027), **інакше**

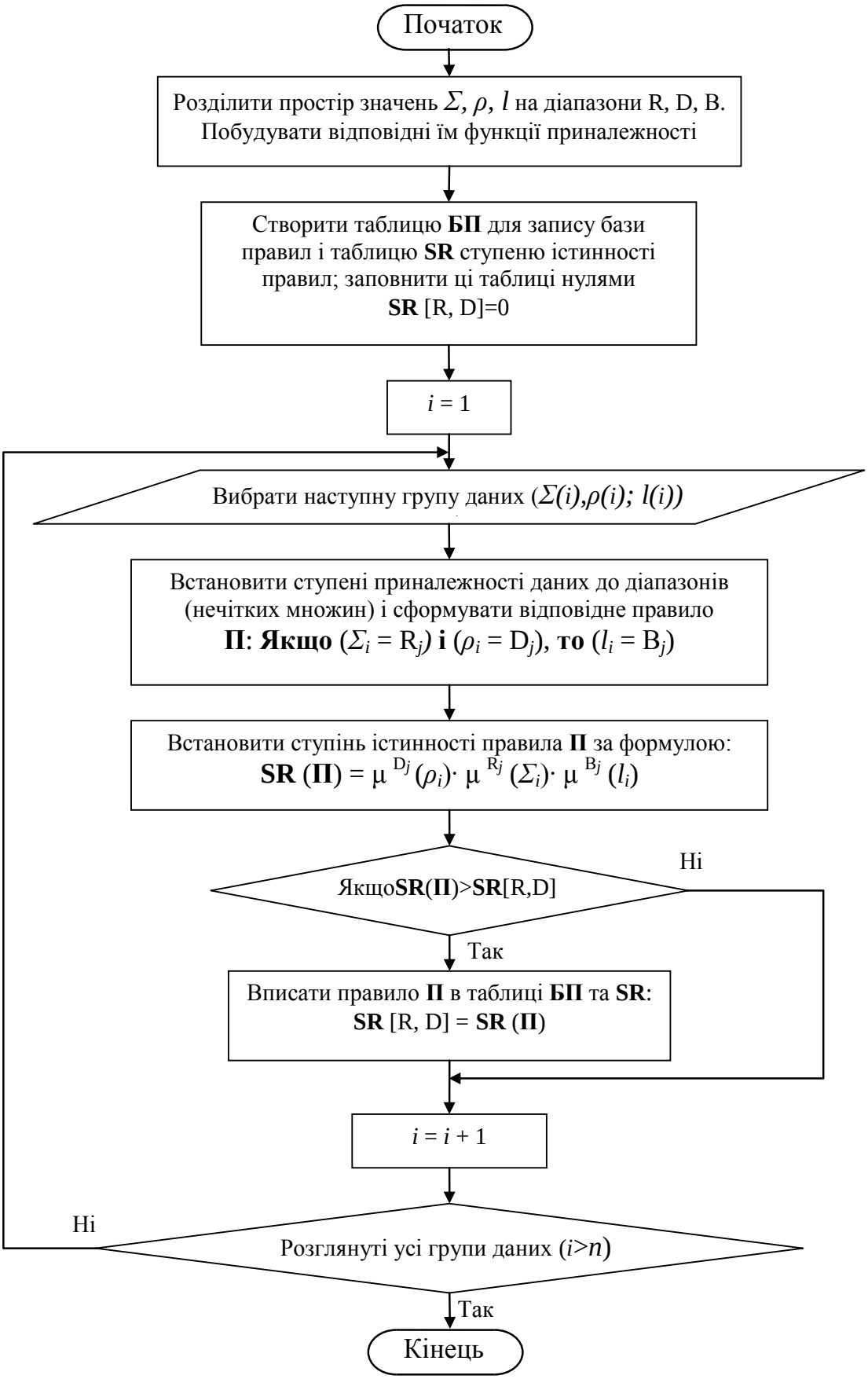


Рис. 3. Блок-схема алгоритму побудови інверсної моделі

Таблиця 2.

Середньоквадратичне відхилення σ_Σ координати Σ

l, м	ρ, Ом м				
	6,0	7,5	10,0	15,0	20,0
0,025	0,028	0,024	0,023	0,015	0,010
0,050	0,037	0,036	0,036	0,014	0,012
0,075	0,042	0,040	0,039	0,015	0,013
0, 100	0,074	0,069	0,044	0,017	0,016
0,125	0,085	0,072	0,055	0,032	0,024

Якщо (ρ = trimf[7.5 10 15]) **і** (Σ = trimf[0.5 0.55 0.6]), **то** (l = 0.03), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[10 15 20]) **і** (Σ = trimf[0.5 0.55 0.6]), **то** (l = 0.052), **інакше**
Якщо (ρ = trimf[15 20 25]) **і** (Σ = trimf[0.5 0.55 0.6]), **то** (l = 0.065).

Базу правил нечіткого регулятора НР2, що відтворює залежність $\sigma_\Sigma = F\,(l[n],\ \rho[n])$, синтезуємо на основі експериментальної бази даних (табл. 2). Значення середньоквадратичного відхилення σ_Σ приведене до математичного сподівання.

Моделювання нечітких регуляторів НР1, НР2 на основі отриманої бази правил проводимо в середовищі MATLAB, використовуючи пакет Fuzzy Logic Toolbox [6], який має простий інтерфейс для проектування і діагностики нечітких моделей. Графічні засоби Fuzzy Logic Toolbox дають змогу інтерактивно відслідковувати поведінку системи. Результати моделювання: НР1 – $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$ та НР2 – $\sigma_\Sigma = F\,(l[n], \rho[n])$ за допомогою фаззі-апроксиматора представлені на рис. 4, 5.

Структура адаптивної системи керування з застосуванням регуляторів НР1 та НР2 для корекції її параметрів в залежності від положення в просторі станів об’єкту керування показана на рис. 6.

Система керування працює наступним чином. З бази даних системи керування вищого рівня в підсистему адаптивного керування електровибуховим перетворення енергії надходить задане для обраного режиму роботи значення інформаційної координати $\Sigma_{зад}$, яке необхідно підтримувати в умовах дії зовнішніх збурень для забезпечення технологічного результату.

Регулятор НР1 на основі нечіткої інверсної моделі $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$ обчислює необхідне значення керуючого впливу, який забезпечить відповідне значення координати $l[n]$ при поточному стані контрольованих параметрів об’єкта, в даному випадку питомого опору рідини ρ, значення якого надходить з датчика системи локального рівня на вхід НР1.

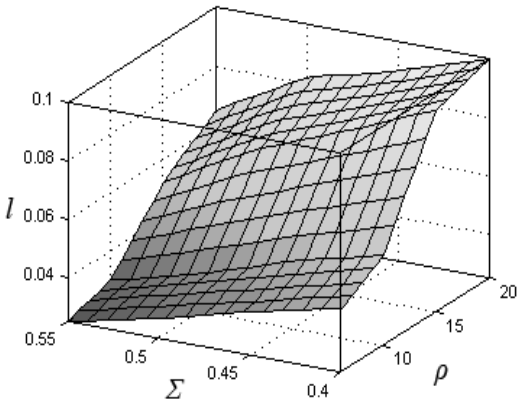


Рис. 4. Модель НР1:
$l[n] = F\,(\Sigma[n], \rho[n])$

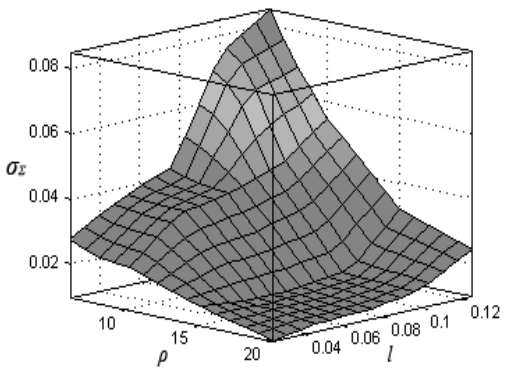


Рис. 5. Модель НР2:
$\sigma_\Sigma = F\,(l[n], \rho[n])$

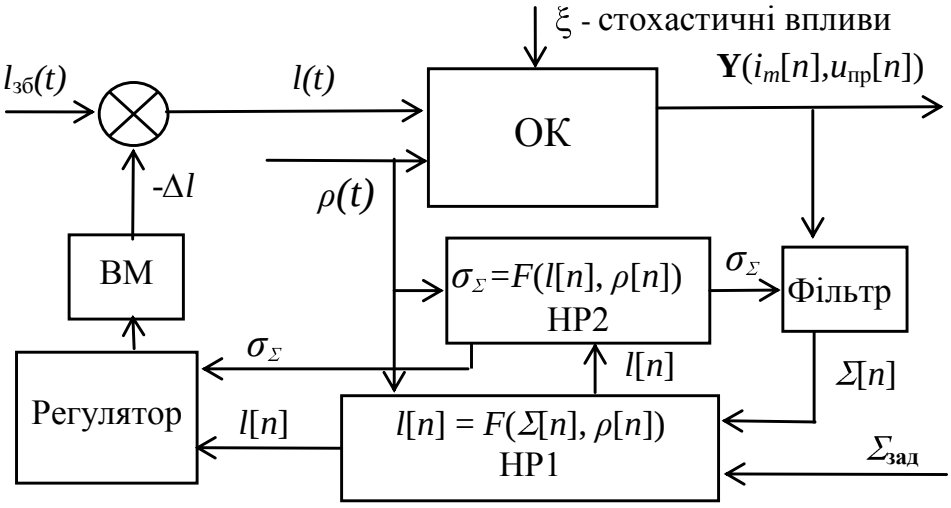


Рис. 6. Блок-схема системи керування з нечіткими регуляторами НР1 та НР2 на основі інверсної моделі

З метою врахування допустимого для поточного стану об’єкта керування відхилення інформаційної координати $\Sigma[n]$ за рахунок стохастичного характеру процесу, в систему керування введено додатковий регулятор НР2, синтезований на основі нечіткої моделі статистичних характеристик інформаційних координат об’єкта, які залежать від поточного положення об’єкта в просторі станів $\sigma_\Sigma = F(l[n], \rho[n])$. На вхід НР2 подаються обчислене значення координати вхідного вектора $l[n]$ – з виходу НР1 та $\rho[n]$ – з датчика питомого опору рідини системи локального рівня.

Допустиме для даного режиму значення середньоквадратичного відхилення σ_Σ інформаційної координати, обчислене за допомогою НР2, надходить на вхід адаптивного пристрою оцінки інформаційного сигналу (фільтр) для коригування алгоритму його обробки з метою зменшення дисперсії та на вхід регулятора для корекції зони нечутливості релейного елемента. З регулятора сигнал надходить на локальний рівень керування виконавчим механізмом, який забезпечує включення відповідного приводу

електродної системи для необхідної зміни значення координати $l[n]$ при поточному стані контрольованих параметрів об'єкта та дії зовнішніх збурень $l_{зб}(t)$.

Важливою властивістю системи керування з використанням НР на базі інверсної моделі є те, що вона забезпечує необхідні режими при будь-якому положенні об'єкта в просторі станів.

Синтезована система керування реалізована на базі мікроконтролера архітектури AVR. Ресурси мікроконтролера дають змогу організувати досить складну ієрархічну багатомірну систему керування електровибуховим перетворенням енергії, яка здатна вирішувати завдання керування в реальному масштабі часу із застосуванням різних алгоритмів керування у вигляді підпрограм.

Висновки

Побудовано інверсну нечітку модель процесу електровибухового перетворення енергії $l[n] = F\,(\Sigma[n], \rho[n])$ на основі бази навчальних даних, в якості якої використано результати експериментальних досліджень з застосуванням методів планування експерименту.

Для синтезу несуперечливої бази правил нечіткої інверсної моделі застосовано метод фаззі-апроксимації та алгоритм побудови бази нечітких правил на основі чисельних даних, який приписуючи кожному правилу ступінь істинності, дає змогу відібрати правило, що має найвищу ступінь істинності. Таким чином, розв'язується проблема суперечливих правил, а також значно зменшується їх загальна кількість.

Побудовано нечітку модель залежності середньостатистичного відхилення інформаційної координати σ_Σ від положення об'єкта в просторі станів $\sigma_\Sigma = \mathrm{F}(l[n], \rho[n])$.

Використання отриманої інверсної нечіткої моделі при синтезі нечітких регуляторів для корекції параметрів системи керування електровибуховим перетворення енергії в залежності від положення в просторі станів забезпечить адаптивність системи керування при зміні технологічних параметрів та параметрів середовища в широкому діапазоні.

Синтезована система керування забезпечує ефективне керування електровибуховим перетворенням енергії в усьому просторі станів при невизначеності зовнішніх збурень та нестаціонарності параметрів середовища.

Список використаної літератури

1. *Синтез* моделі управління режимом високовольтного розряду в рідині / Вовк І. Т., Овчиннікова Л. Е., Назарова Н. С., Козирєв С. С. // Збірник нау-

кових праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2000. – № 1 (367). – С. 128-136.

2. *Модель* управления электроимпульсной очисткой оливок / Вовченко А. И., Назарова Н. С., Козырев С. С. // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю „Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів”. – Миколаїв: НУК, травень 2006. – С. 89 – 97.

3. *Регулирование* электрогидроимпульсных установок при изменяющейся электропроводности жидкости / Блинцов В.С., Козырев С.С. // Збірник наукових праць НУК № 3 (408), Миколаїв, 2006. - С. 141-146.

4. *Козирєв С.С.* Удосконалена модель керування електровибуховим перетворенням енергії. / Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – №4 (415). – С. 101-109.

5. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия, Телеком, 2004. – 452 с.

6. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. – СПб.: БХВ - Петербург, 2003. – 736 с.

УДК 629.735

В. В. Бурнашев

СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ МЕТОДОМ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ

Рассмотрена процедура синтеза системы автоматического управления полетом методом аналитического конструирования. Предложена методика определения структуры законов управления. Выполнен инженерный синтез системы автоматического управления полетом малого беспилотного самолета. Приведены результаты моделирования работы полученной системы.

Розглянуто процедуру синтезу системи автоматичного управління польотом методом аналітичного конструювання. Запропоновано методику визначення структури законів управління. Виконано інженерний синтез системи автоматичного управління польотом малого безпілотного літака. Наведено результати моделювання роботи отриманої системи.