

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ ЗАСОБАМИ FUZZY-АПРОКСИМАЦІЇ ІНВЕРСНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОВИБУХОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Козирев С.С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України

iipt@iipt.com.ua

The paper deals with method of inverse fuzzy model design for discharge-pulse technologies. The inverse fuzzy model of control of discharge energy conversion was developed. The model is based on experimental data with fuzzy approximation. The fuzzy inverse model provides adaptability of control system under variable technological parameters and external conditions. The results may be used for development of control systems for discharge-pulse technologies.

Вступ. Результати теоретичного і експериментального дослідження електровибухового перетворення енергії як об'єкта керування показали, що об'єкт відноситься до дискретно-неперервних багатовимірних стохастичних нестационарних 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, що полягає в керованості процесу, необхідно синтезувати адаптивне керування, яке забезпечує оптимальні режими в умовах нестационарності параметрів середовища та невизначеності зовнішніх збурень, що потребує побудови інверсної моделі.

Мета роботи – розробка методики синтезу інверсної моделі електровибухового перетворення енергії на базі експериментальних даних із застосуванням сучасних методів фаззи-апроксимації, що базуються на теорії нечітких множин, та синтез на її основі нечіткого регулятора для адаптивної системи керування електровибуховим перетворенням енергії в умовах невизначеності. Результатом чого стане розширення зони керованості, підвищення точності підтримки оптимальних технологічних режимів електроімпульсних установок.

Основна частина. Аналіз 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.

Забезпечення керованості електровибухового перетворення енергії у всьому просторі станів потребує введення механізмів адаптації для врахування нестационарності та стохастичності об'єкта. Механізм адаптації можна реалізувати, використовуючи системи керування на основі інверсних моделей, 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 модель електровибухового перетворення енергії, які адекватно описують об'єкт у всьому просторі станів, побудувати складно, так як фізичні процеси, що відбуваються в каналі розряду неоднозначні, недостатньо вивчені, погано піддаються формалізації [2].

Пропонується наступна методика синтезу нечіткої інверсної моделі з застосуванням сучасних засобів fuzzy-апроксимації на основі теорії нечітких множин з використанням бази експериментальних даних для побудови моделі керування. З метою отримання бази експериментальних даних для побудови нечіткої інверсної моделі процесу електровибухового перетворення енергії, адекватної на всьому просторі станів, проведено експериментальне дослідження залежності найбільш статистично ефективною вихідної інформаційної координати $\Sigma[n] = i_m[n] + k U_{np}[n]/i_m[n]$, яка отримана як лінійна комбінація корельованих вихідних координат $i_m[n]$ – амплітуди розрядного струму і U_{np} – пробивної напруги, від змін координат вхідного вектора $X < l[n], \rho[n] >$, де $l[n]$ – довжина розрядного проміжку або керована 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 будемо у вигляді $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$, для чого необхідна база навчальних даних, тобто множини груп сигналів $(\Sigma[n], \rho[n])$, що будуть поступати на вхід системи керування, та відповідно очікувані (еталонні) значення керуючого сигналу $l[n]$. Такі групи сигналів формуємо, використовуючи базу експериментальних даних, наведену в [2].

Першим кроком при побудові нечіткої інверсної моделі є розподіл простору вхідних і вихідних сигналів на діапазони, які будуть слугувати термами при побудові функцій приналежності. Використаємо прямий метод побудови функцій приналежності, який не вимагає абсолютно точного визначення функцій приналежності, 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 приналежності. Одна з вершин ФП 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, а у нашому випадку термів – числових діапазонів) для кожної змінної вибираємо рівною кількості рівнів значень за планом факторного експерименту. В даному випадку кількість термів дорівнює 5 та 4. Функції приналежності (ФП- $mf_r-\mu^T(x)$) координат вектора стану $\rho[n]$, $M_\Sigma[n]$ апроксимуємо трикутною функцією (рис. 1).

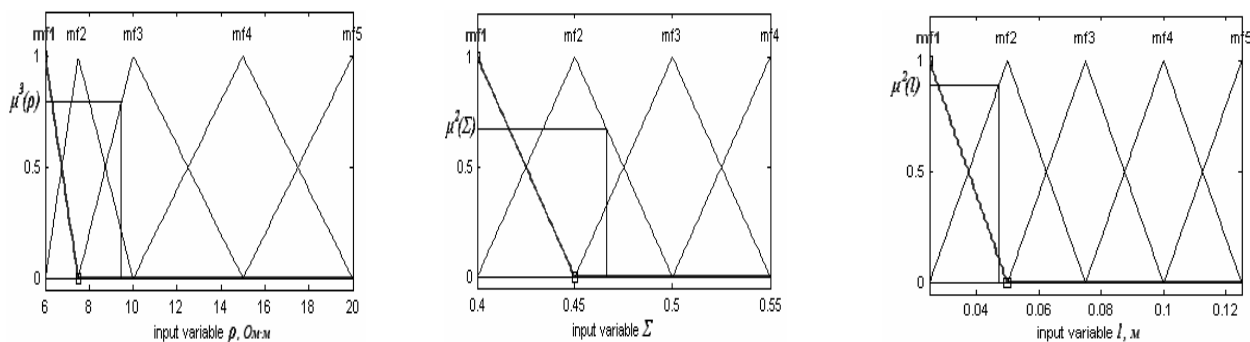


Рисунок 1 - Функції приналежності $\rho[n]$, $M_\Sigma[n]$, $l[n]$

Процедура фаззифікації вхідних сигналів, тобто визначення приналежності поточного значення координат вхідного вектора до того чи іншого діапазону, проводиться за максимальним значенням функції приналежності $\mu^T(x)$. Для вихідної координати, тобто керуючого сигналу $l[n]$, виконуємо такі ж процедури: розподіл простору значень сигналу на діапазони, які будуть слугувати термами при побудові функцій приналежності; побудова трикутних функцій приналежності, координати вершин яких є еталонними очікуваними значеннями вихідної координати $l[n]$ (рис.1).

База правил нечіткої інверсної моделі формується на основі бази навчальних даних, в якості якої використано експериментальні дані, за спеціальним алгоритмом побудови бази нечітких правил на основі чисельних даних. Спочатку визначаються ступені приналежності навчальних даних ($\rho[n]$, $M_\Sigma[n]$ та $l[n]$) до кожного виділеного діапазону, які будуть виражатися значеннями функцій приналежності відповідних нечітких множин для кожної групи даних $\mu^T(x)$. Вибираючи діапазони з максимальним значенням функцій приналежності, 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 велика 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 приводять до різних висновків. Розв'язати таку проблему можна, приписуючи кожному правилу ступінь істинності: $SR(\Pi) = \mu^{D_j}(\rho_i) \cdot \mu^{R_j}(\Sigma_i) \cdot \mu^{B_j}(l_i)$. До бази правил включається правило, яке має найвищу ступінь істинності. Таким чином розв'язується проблема суперечливих правил, а також значно зменшується їх загальна кількість. Блок-схема алгоритму побудови бази правил на основі чисельних даних наведена на рис. 2.

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

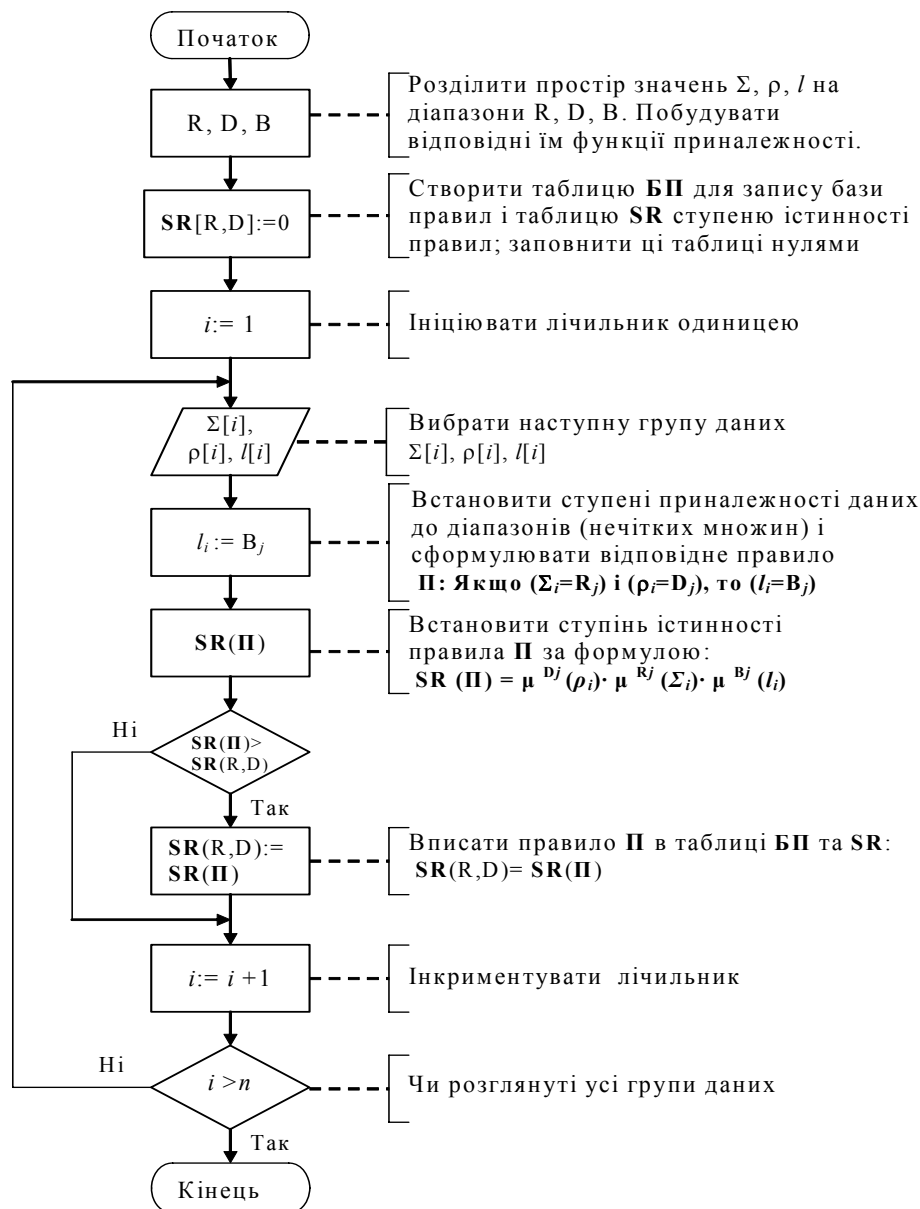


Рисунок 2 - Блок-схема алгоритму побудови інверсної моделі

База правил у вигляді нечітких логічних рівнянь дозволяє пов'язати вихідний сигнал $l[n]$ та ФП координат вектора стану $\rho[n]$, $M_{\Sigma}[n]$, в результаті чого отримуємо значення керуючого впливу для певних діапазонів числових значень координат вектора стану:

Модельовання нечіткого регулятора НР на основі отриманої бази правил проводимо в середовищі MATLAB, використовуючи пакет Fuzzy Logic Toolbox [3], 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 фаззи-апроксиматора представлені на рис. 3, 4.

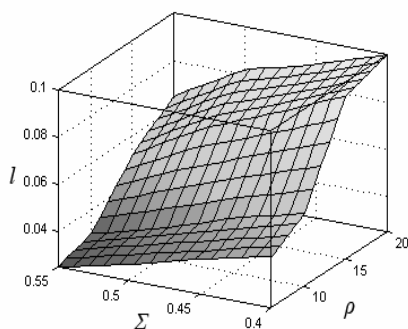


Рисунок 3 - Модель НР1: $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$

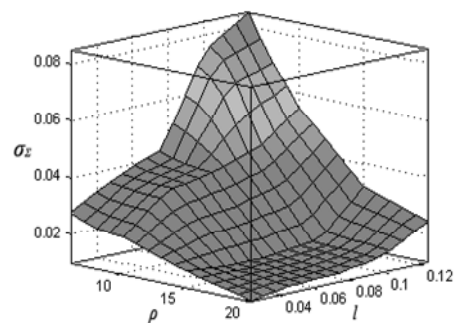


Рисунок 4 - Модель НР2: $\sigma_{\Sigma} = F(l[n], \rho[n])$

Структура адаптивної системи керування з застосуванням НР1, НР2 для корекції її параметрів в залежності від положення в просторі станів показана на рис. 5.

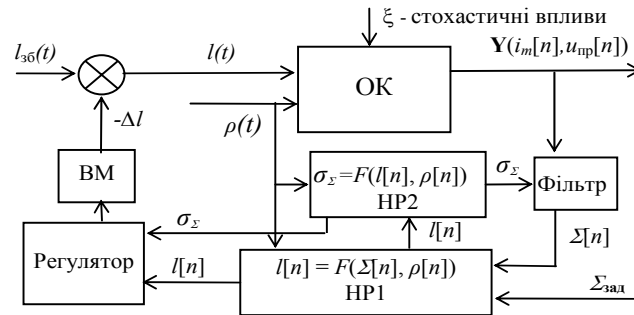


Рисунок 5 - Блок-схема системи керування з НР1,2 на основі інверсної моделі

Система керування працює наступним чином. З бази даних центральної системи керування вищого рівня в підсистему адаптивного керування електровибуховим перетворення енергії надходить задане для вибраного режиму роботи значення інформаційної координати $\Sigma_{\text{зад}}$, яке необхідно підтримувати в умовах дії зовнішніх збурень для забезпечення технологічного результату. НР1 на основі нечіткої інверсної моделі $l[n] = F(\Delta[n], \rho[n])$ 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.

З метою врахування допустимого для поточного стану об'єкта керування відхилення інформаційної координати $\Delta[n]$ за рахунок стохастичного характеру процесу в систему керування введено додатковий НР2, синтезований на основі нечіткої моделі статистичних характеристик інформаційних координат об'єкта, які залежать від поточного положення об'єкта в просторі станів $\sigma_x = F(l[n], \rho[n])$. 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_x 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 $l_{36}(t)$.

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 дозволяють організувати досить складну ієрархічну багатомірну систему керування електровибуховим перетворенням енергії, що здатна вирішувати завдання керування в реальному масштабі часу із застосуванням різних алгоритмів керування у вигляді підпрограм.

Висновки. Розроблено методику синтезу інверсної нечіткої моделі керування електровибуховим перетворення енергії $l[n] = F(\Delta[n], \rho[n])$ 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 fuzzy-апроксимацію та розроблено алгоритм побудови бази нечітких правил на основі чисельних даних, який приписуючи кожному правилу ступінь істинності дозволяє відібрати правило, що має найвищу ступінь істинності. Таким чином розв'язується проблема суперечливих правил, а також значно зменшується їх загальна кількість.

Використання побудованої 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. Така система керування зможе генерувати адекватну реакцію на збурення за рахунок визначення відповідного значення керуючого впливу за допомогою інверсної моделі. Синтезована система керування забезпечує ефективне керування електровибуховим перетворенням енергії в усьому просторі станів при невизначеності зовнішніх збурень та нестационарності параметрів середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Управление электрогидроимпульсными процессами / И.Т.Вовк, В.Б.Друмирецкий, Е.В.Кривицкий, Л.Е.Овчинникова - Киев: Наук.думка, 1984. - 186 с.
2. Козирев С.С. Удосконалена модель керування електровибухового перетворення енергії / Збірник наукових праць НУК № 4 (415), Миколаїв, 2007. - С. 101-109.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB. – СПб.: БХВ - Петербург, 2003. – 736с.
Рекомендовано д.т.н. Коцегубом П.Х.