

Рокотяна и И.М.Шапиро – 3-ое изд., перераб. и доп. – М.: Энергия. 1985. – 350 с. 3. Управляемые электропередачи // Выпуск № 8 (23), труды Института энергетики АН Молдовы за 2001-2007 гг. Составители: Постолатий В.М., Быкова Е.В. – Кишинев, 2007. – С. 7-16. 4. Программный комплекс «RASTR», разработанный в УПИ (УГТУ), кафедра автоматизированных электрических систем (Екатеринбург) и файл исходных данных для расчетов установившихся режимов объединенной энергосистемы стран СНГ.

*Поступила в редколлегию 14.05.2008*

УДК 681.51:537.528

***О.І.ВОВЧЕНКО***, докт.техн.наук; ***С.С.КОЗИРЄВ***;

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв

## **ПОБУДОВА ІНВЕРСНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОВИБУХОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЗАСОБАМИ FUZZY-АПРОКСИМАЦІЇ**

На основі експериментального дослідження електровибухового перетворення енергії як об'єкта керування побудовано його інверсну модель засобами fuzzy-апроксимації.

The experimental research of the discharge energy conversion as an object of control was done. The inverse model of discharge energy conversion was built using fuzzy-approximation method.

**Вступ.** Реалізація основної переваги електровибухового перетворення енергії - керованості, потребує синтезу адаптивного керування, яке забезпечує необхідні режими в умовах нестационарності параметрів середовища та невизначеності зовнішніх збурень. Механізм адаптації можна реалізувати за рахунок використання інверсної моделі, яка генерує реакцію на збурення, що гарантує підтримку заданих режимів перетворення енергії.

**Мета роботи** – побудова інверсної моделі керування електровибуховим перетворенням енергії на основі експериментальних даних із застосуванням сучасних методів fuzzy-апроксимації, що базуються на теорії нечітких множин. Використання інверсної моделі при синтезі системи керування забезпечить адаптивність в умовах значних змін параметрів середовища і невизначеності збурюючих впливів, результатом чого стане розширення зони керованості, підвищення точності підтримки оптимальних технологічних режимів в реальних умовах.

**Побудова інверсної моделі.** 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. Адаптивність можна забезпечити, використовуючи системи керування на основі інверсних моделей, які генерують реакцію на збурення, обчислюючи значення керуючого впливу, який забезпечить відповідне значення вихідної координати. 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 неоднорозмірні, недостатньо вивчені, погано піддаються формалізації, тому пропонуємо для отримання цих залежностей застосувати сучасні методи fuzzy-апроксимації на основі нечіткої логіки, використовуючи бази експериментальних даних для побудови нечітких моделей 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 ефективної вихідної інформаційної координати

$$\Sigma[n] = i_m[n] + k U_{\text{пр}}[n]/i_m[n],$$

яка отримана як лінійна комбінація корельованих вихідних координат  $i_m[n]$  – амплітуди розрядного струму і  $U_{\text{пр}}$  – 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, для синтезу системи керування проведено також дослідження залежності статистичних характеристик інформаційної координати  $\Sigma[n]$  ( $\sigma_{\Sigma}$  – 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. При проведенні експерименту значення інформаційної координати  $\Sigma[n]$  береться у відносних одиницях, за базове значення прийнято амплітудне значення розрядного струму при короткому замиканні  $I_{\text{кз}}$ , а середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{\Sigma}$  приводиться до математичного очікування інформацій-

ної координати  $M_{\Sigma}[n]$ .

Інверсну модель будуємо у вигляді  $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$ , для чого необхідна база навчальних даних у вигляді 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 [1].

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. Нерівномірний поділ числових значень координат на терми прийнято з метою більш точного врахування нелінійності властивостей електровибухового перетворення енергії як об'єкта керування.

Функції приналежності (ФП –  $mf_i - \mu^T(x)$ ) координат вектора стану  $\rho[n]$ ,  $M_{\Sigma}[n]$  апроксимуємо трикутною функцією (рис. 1).

Процедура фазуфікації 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. 2).

Побудувати нечітку інверсну модель означає синтезувати базу правил, яка забезпечить алгоритм пошуку адекватної реакції об'єкта на збурення. 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 [2]. Спочатку визначаються ступені приналежності навчальних даних ( $\rho[n]$ ,  $M_{\Sigma}[n]$  та  $l[n]$ ) до кожного виділеного діапазону, які будуть виражатися значеннями функцій

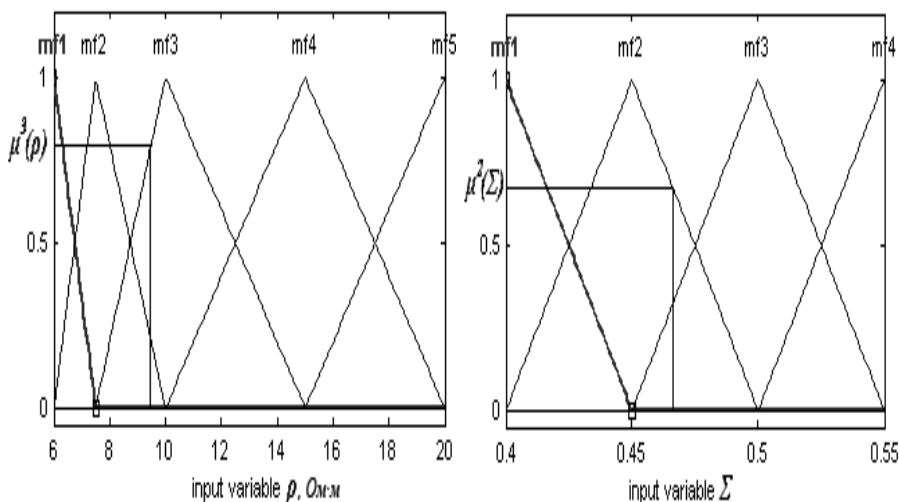


Рисунок 1 – Функції приналежності  $\rho[n]$ ,  $M_\Sigma[n]$

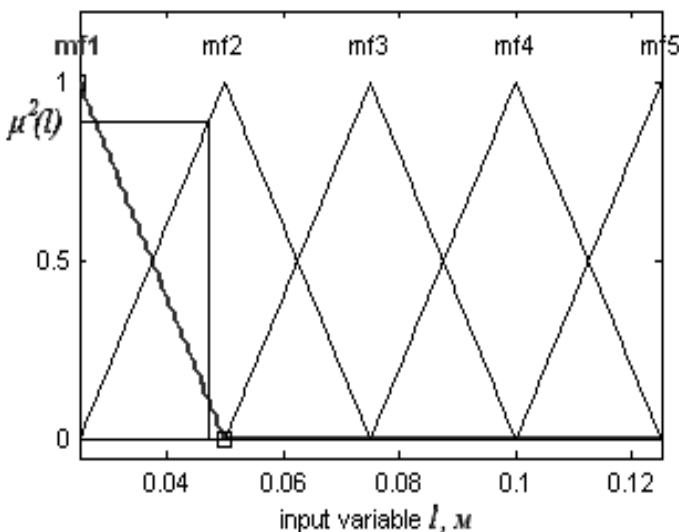


Рисунок 2 – Функція приналежності вихідної змінної  $l[n]$

приналежності відповідних нечітких множин для кожної групи даних  $\mu^T(x)$ . Вибираючи діапазони з максимальним значенням функцій приналежності, отримуємо остаточно 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. Іс-

нує 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:

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

До бази правил включається правило, яке має найвищу ступінь істинності. Таким чином розв'язується проблема суперечливості правил, а також 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, отримано несуперечливу базу знань (табл. 1), яка є табличною формою запису бази правил 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

$M_{\Sigma}$	$\rho$ , 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 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:

База правил нечіткої інверсної моделі  $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$ :

**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[5,5 \ 6 \ 7,5]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$ ), **то** ( $l = 0,047$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[6 \ 7,5 \ 10]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$ ), **то** ( $l = 0,05$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[7,5 \ 10 \ 15]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$ ), **то** ( $l = 0,056$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[10 \ 15 \ 20]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$ ), **то** ( $l = 0,094$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[15 \ 20 \ 25]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$ ), **то** ( $l = 0,1$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[5,5 \ 6 \ 7,5]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,4 \ 0,45 \ 0,5]$ ), **то** ( $l = 0,04$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[6 \ 7,5 \ 10]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,4 \ 0,45 \ 0,5]$ ), **то** ( $l = 0,042$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[7,5 \ 10 \ 15]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,4 \ 0,45 \ 0,5]$ ), **то** ( $l = 0,048$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[10 \ 15 \ 20]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,4 \ 0,45 \ 0,5]$ ), **то** ( $l = 0,081$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[15 \ 20 \ 25]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,4 \ 0,45 \ 0,5]$ ), **то** ( $l = 0,09$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[5,5 \ 6 \ 7,5]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,45 \ 0,5 \ 0,55]$ ), **то** ( $l = 0,032$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[6 \ 7,5 \ 10]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,45 \ 0,5 \ 0,55]$ ), **то** ( $l = 0,035$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[7,5 \ 10 \ 15]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,45 \ 0,5 \ 0,55]$ ), **то** ( $l = 0,038$ ), **інакше**

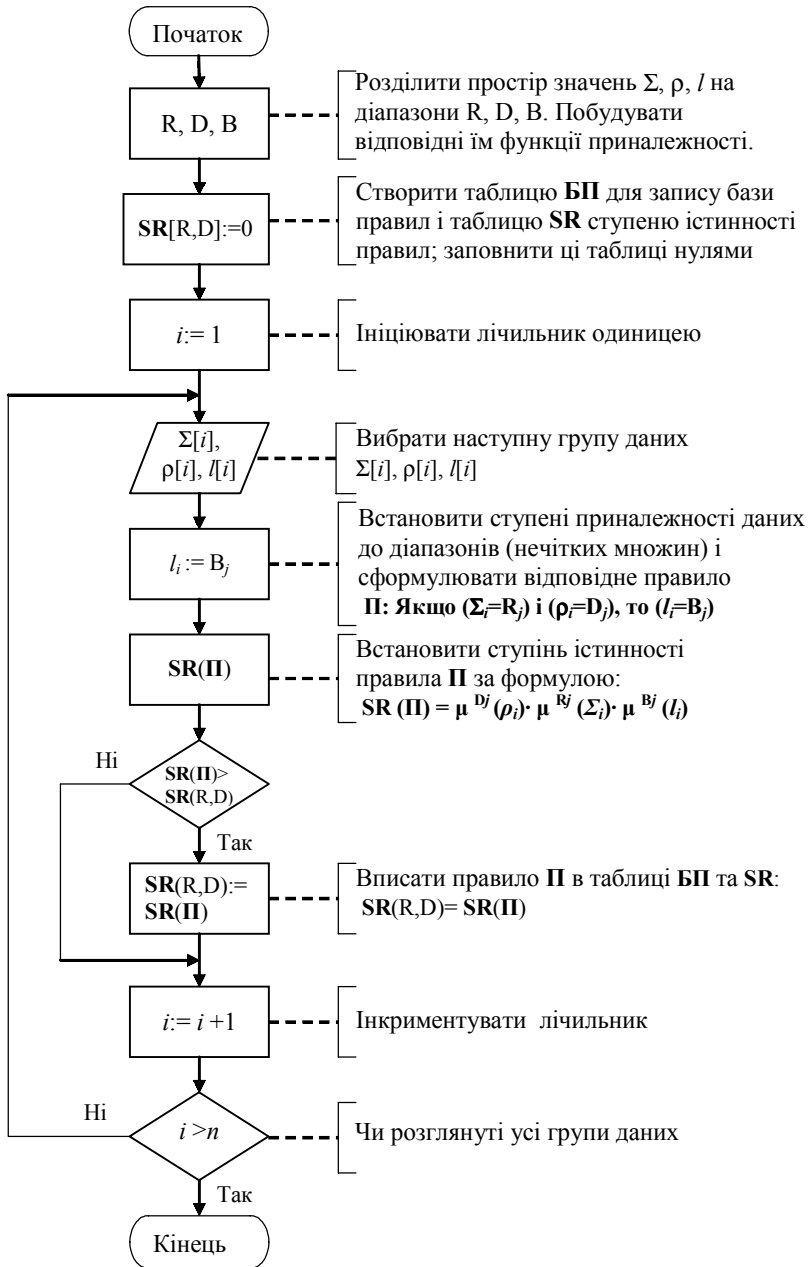


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму побудови інверсної моделі

**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[10\ 15\ 20]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,45\ 0,5\ 0,55]$ ), **то** ( $l = 0,069$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[15\ 20\ 25]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,45\ 0,5\ 0,55]$ ), **то** ( $l = 0,082$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[5,5\ 6\ 7,5]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,5\ 0,55\ 0,6]$ ), **то** ( $l = 0,025$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[6\ 7,5\ 10]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,5\ 0,55\ 0,6]$ ), **то** ( $l = 0,027$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[7,5\ 10\ 15]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,5\ 0,55\ 0,6]$ ), **то** ( $l = 0,03$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[10\ 15\ 20]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,5\ 0,55\ 0,6]$ ), **то** ( $l = 0,052$ ), **інакше**  
**Якщо** ( $\rho = \text{trimf}[15\ 20\ 25]$ ) **і** ( $\Sigma = \text{trimf}[0,5\ 0,55\ 0,6]$ ), **то** ( $l = 0,065$ ).

Базу правил нечіткої залежності  $\sigma_{\Sigma} = F(l[n], \rho[n])$  синтезуємо на основі експериментальної бази даних (табл. 2). Значення середньоквадратичного відхилення  $\sigma_{\Sigma}$  приведені до математичного сподівання.

Таблиця 2 – Середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{\Sigma}$  координати  $\Sigma$

$l, \text{ м}$	$\rho, \text{ Ом м}$				
	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

Інверсну нечітку модель електровибухового перетворення енергії на основі отриманої бази правил будуємо 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:  $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$  електровибухового перетворення енергії та залежності статистичних характеристик інформаційної координати від положення об'єкта у факторному просторі:  $\sigma_{\Sigma} = F(l[n], \rho[n])$  за допомогою fuzzy-апроксиматора представлені на рис. 4, 5.

**Висновки.** Засобами fuzzy-апроксимації побудовано інверсну модель керування електровибуховим 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 fuzzy-апроксимації та 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. Побудовано нечітку модель залежності середньостатистичне відхилення інформаційної координати  $\sigma_{\Sigma}$ , від положення об'єкта в просторі станів  $\sigma_{\Sigma} = F(l[n], \rho[n])$ .

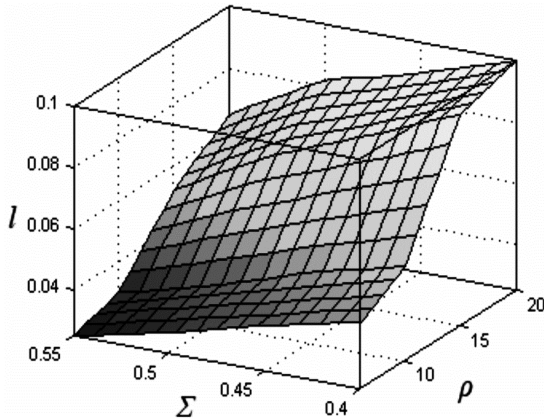


Рисунок 4 – Інверсна модель:  $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$

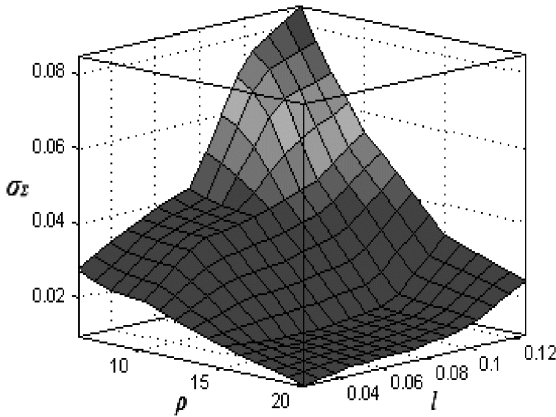


Рисунок 5

Синтезовані на основі нечіткої інверсної моделі системи керування електровибуховим перетворення енергії забезпечать адаптивність керування у всьому просторі станів при нестационарності параметрів середовища та непередбачуваних збурюючих впливах. Така система керування зможе генерувати адекватну реакцію на збурення за рахунок визначення відповідного керуючого впливу за допомогою інверсної моделі.

**Список літератури:** 1. Козирев С.С. Удосконалена модель керування електровибухового перетворення енергії / Збірник наукових праць НУК. – № 4 (415). – Миколаїв. – 2007. – С. 101-109. 2. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с. 3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.

*Надійшла до редколегії 03.06.2008.*