

УДК 681.51: 537.528

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОВИБУХОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ  
МЕТОДАМИ FUZZY-АПРОКСИМАЦІЇ*Козирєв С.С., м.н.с.**Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України**54018, м. Миколаїв, пр. Жовтневий, 43А**E-mail: [iipt@iipt.com.ua](mailto:iipt@iipt.com.ua)*

Проведен аналіз існуючих моделей електровзривного преобрання енергії. На основі результатів експериментального дослідження побудована нечітка модель управління електровзривним преобранням енергії методами fuzzy-апроксимації, використання якої при синтезі систем управління забезпечує їх адаптивність в разі зміни технологічних параметрів і зовнішніх впливів.

**Ключевые слова:** електровзривное преобразование энергии, fuzzy-аппроксимация, нечеткая модель.

The analysis of existent models of discharge energy conversion was done. The fuzzy model of control of discharge energy conversion based on the experimental data was developed. The fuzzy approximation was used. The fuzzy model provides adaptability of control system under variable technological parameters and external conditions.

**Key words:** discharge energy conversion; fuzzy approximation; fuzzy model.

**Вступ.** Електровибухове перетворення енергії використовується в розрядно-імпульсних технологіях як джерело концентрованого, дозованого впливу у заданих локальних об'ємах з високими питомими енергетичними показниками. Відбувається воно в каналі високовольтного розряду в рідині, де енергія електричного поля зарядженої конденсаторної батареї перетворюється в механічну роботу розширення каналу. Імпульс тиску, який виникає внаслідок миттєвого розширення каналу розряду під дією енергії високої густини, використовується в якості основного фактора технологічного впливу на об'єкти обробки. До основних переваг електровибухового перетворення енергії відноситься можливість досягнення високих питомих енергетичних показників та можливість забезпечення керованості процесу. Реалізація основної переваги електровибухового перетворення енергії - керованості, потребує його всебічного вивчення та формалізації, тобто побудови математичної моделі керування.

Існуючі моделі функціонування, які побудовані на основі вивчення електро- та гідродинамічних перехідних процесів і описуються системою нелінійних диференціальних рівнянь [1], навіть при значних спрощеннях, є занадто складними. Вони до того ж не враховують багатьох факторів впливу на режим розряду та стохастичності процесу, обумовленого статистичними закономірностями елементарних процесів на стадії формування каналу розряду, тому не можуть бути застосовані в процесі керування. Аналіз моделей, на основі яких синтезовані сис-

теми регулювання та стабілізації окремих параметрів процесу електровибухового перетворення енергії [2], показав, що всі вони побудовані з використанням лінеаризації передатних функцій об'єкта і описують роботу в околі точки номінального режиму при певних припущеннях відносно збурень. Враховується тільки вхідне збурення по координаті  $l$  - довжина розрядного проміжку, яке апроксимується лінійною функцією часу та вважається адитивним, тобто таким, що поступає на вхід об'єкта керування та додається до поточного значення координати.

Прийняті припущення при побудові моделей керування електровибуховим перетворенням енергії допустимі для дуже вузького класу задач. В реальних умовах існує значна кількість не врахованих збурень, які суттєво впливають на режим розряду. До таких збурень необхідно віднести зменшення питомого опору рідини  $\rho$ , в якій відбувається високовольтний електричний розряд, за рахунок забруднення залишками формуючих сумішей, поглинання  $CO_2$ , підвищення температури. Швидкість зміни  $\rho$  визначається складом формуючих сумішей, інтенсивністю режимів обробки. При відсутності систем регенерації нехтувати змінами питомого опору неможливо, тому необхідно розглядати додаткову координату  $\rho[n]$ , яка впливає на оператор об'єкта керування та статистичні характеристики інформаційних координат. Припущення про лінійність збурення по координаті  $l[n]$  також діє тільки при обробці поверхонь з незначними перепадами висот та в околі точки оптимального режиму. Тому існуючі моделі ке-

рування не придатні для використання при синтезі адаптивних систем керування, які повинні забезпечувати керованість процесу в усьому просторі станів при зміні технологічних параметрів в широкому діапазоні та дії непередбачуваних зовнішніх впливів.

**Мета роботи** – побудова адекватної моделі керування електровибуховим перетворенням енергії в умовах значних змін параметрів середовища і збурюючих впливів з урахуванням суттєвої нелінійності та стохастичності об'єкта на основі сучасних методів апроксимації з використанням апарату нечіткої логіки, що при синтезі системи керування забезпечить розширення зони керованості об'єкта, під-

вищення точності підтримки оптимальних режимів в реальних умовах.

**Матеріал і результати дослідження.** Аналітично модель керування електровибуховим перетворенням енергії для всього простору станів побудувати практично не можливо, так як фізичні процеси, що відбуваються в каналі розряду дуже складні, нелінійні, недостатньо вивчені, мають стохастичний характер, погано піддаються формалізації, тому пропонується, використовуючи базу експериментальних даних, застосувати сучасні методи fuzzy-апроксимації для побудови нечітких моделей керування.

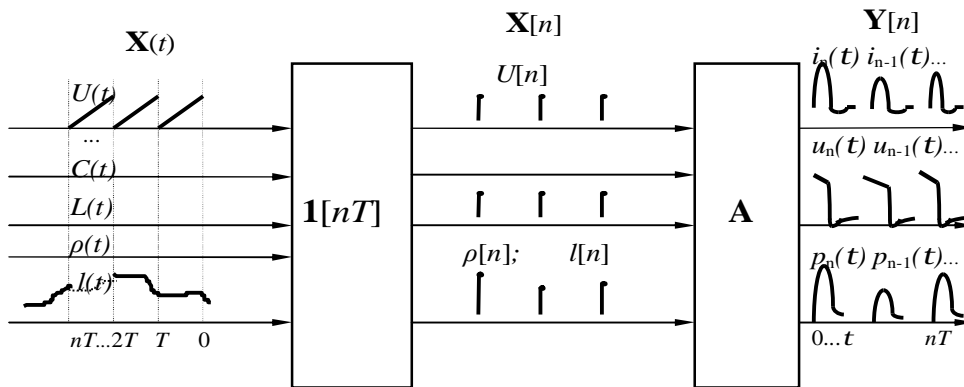


Рисунок 1 – Структурна схема електровибухового перетворення енергії

З метою побудови нечіткої моделі керування режимом електровибуху на всьому просторі станів проведено теоретичне і експериментальне дослідження процесу дискретного, з періодом  $T$ , електровибухового перетворення енергії в розрядному контурі генератора імпульсних струмів.

На основі вивчення процесів та закономірностей електровибухового перетворення енергії як об'єкта керування побудована його структурна схема (рис. 1), яка враховує дискретний характер процесу ( $1[nT]$  - функція комутатора), діючі фактори та параметри середовища, стохастичність вихідних функцій.

Координатами вхідного вектора  $X[n]$  можна вважати параметри розрядного контуру:  $U$  – зарядна напруга накопичувача;  $C$  – ємність батареї конденсаторів;  $L$  – індуктивність розрядного контуру,  $l[n]$  – величина розрядного проміжку, яка може змінюватися в процесі обробки внаслідок руйнування формувальних сумішей і непередбачуваної зміни конфігурації оброблюваної поверхні, та  $\rho[n]$  – питомий опір рідини, що також зазнає змін за рахунок розчинення сумішей та продуктів розряду.

Вихідний вектор  $Y[n]$  - результат електровибухового перетворення енергії в каналі розряду, характеризується випадковими імпульсними функціями:

$i(\tau)$  – розрядного струму,  $u(\tau)$  – напруги на розрядному проміжку,  $p(\tau)$  – тиску в каналі розряду,  $\tau$  – тривалість розряду ( $\tau \ll T$ ). В якості координат вихідного вектора  $Y[n]$  можуть бути прийняті функціонали цих функцій, які кількісно і однозначно їх характеризують, наприклад, максимальні значення розрядного струму  $i_m[n]$  і тиску  $p_m[n]$  та пробивна напруга  $u_{пр}[n]$ . Експериментальне дослідження координат вихідного вектора [2] показало, що вони є дискретними випадковими функціями з нормальним законом розподілу в кожній точці факторного простору (відповідно критерію згоди  $\chi^2$  це не суперечить істині з рівнем значимості  $\alpha=0,01$ ) і можуть бути представлені у вигляді:

$$y_m[n] = M_y[n] + y^0, \quad (1)$$

де  $M_y[n]$  – математичне сподівання вихідної координати,  $y^0$  – завада - стаціонарна випадкова величина з законом розподілу Гауса, статистичні характеристики якої визначаються процесами формування каналу розряду і залежать від положення об'єкта в просторі станів. Оператор об'єкта  $A$  множині вхідних станів  $X$  ставить у відповідність множину  $Y$  функціонального простору можливих реалізацій вихідних функцій.

Для визначення найбільш статистично ефектив-

ної інформаційної координати проведено дослідження статистичних характеристик та кореляційних відношень координат вихідного вектора, за результатами якого в якості статистично ефективної інформаційної координати прийнято їх лінійну комбінацію:

$$\Sigma[n] = i_m[n] + k u_{mp}[n] / i_m[n], \quad (2)$$

З метою отримання бази експериментальних даних для побудови нечіткої моделі процесу електровибухового перетворення енергії проведено експериментальне дослідження залежності вихідної інформаційної координати  $\Sigma[n]$  та її статистичних характеристик ( $\sigma_\Sigma$  – середньоквадратичне відхилення) від змін координат вхідного вектора  $X < I[n], \rho[n] >$  на всьому просторі станів. Експеримент проводився при  $U(t)=const, C(t)=const, L(t) \approx const$  і комбінуванні факторів  $I[n], \rho[n]$  та рівнів їх значень. Відгуком у факторному експерименті були значення спостережуваних координат вихідного вектора  $Y < i_m[n], u_{mp}[n] >$ , на основі яких шляхом математичної обробки визначалось математичне сподівання інформаційної координати  $M(\Sigma[n])$ . Оскільки процес електровибухового перетворення енергії має імовірнісний характер, то величина вибірок складала 100-110 реалізацій в кожній точці факторного простору, що забезпечило отримання довірчих оцінок з надійністю 0,95. Результати математичної обробки експериментальних даних у відносних одиницях наведено у табл. 1, 2. За базові значення прийнято амплітудне значення розрядного струму при короткому замиканні  $I_{кз}$ , початкове значення напруги накопичувача –  $U_0$ .

Таблиця 1 – Математичне сподівання  $M(S[n])$

I, м	$\rho, \text{ Ом м}$				
	6,0	7,5	10,0	15,0	20,0
0,025	0,56	0,57	0,58	0,60	0,64
0,050	0,40	0,42	0,44	0,56	0,60
0,075	0,26	0,28	0,28	0,49	0,53
0,100	0,13	0,16	0,18	0,40	0,42

Таблиця 2 – Середньоквадратичне відхилення  $\sigma_\Sigma$

I, 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	0,043	0,040	0,039	0,015	0,013
0,100	0,074	0,070	0,044	0,017	0,016

Синтез нечіткої моделі електровибухового перетворення енергії проводимо, використовуючи fuzzy-апроксимацію на основі експериментальних даних. В якості лінгвістичних змінних fuzzy-апроксиматора приймаємо координати  $I[n], \rho[n]$ . Кількість термів

(лінгвістичних значень) для кожної змінної вибираємо рівною кількості рівнів значень за планом факторного експерименту. Функції приналежності координат вектора стану апроксимуємо трикутною функцією (рис. 2).

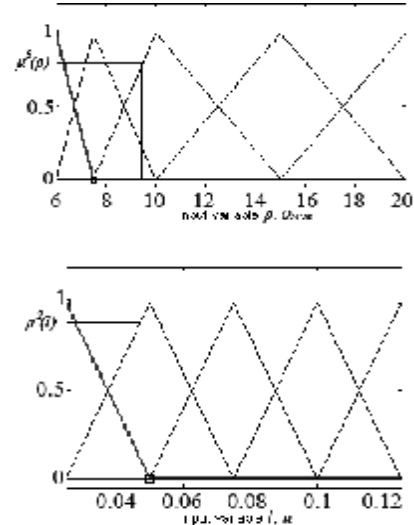


Рисунок 2 – Функції приналежності координат

База правил формується на основі бази даних, в якості якої використовуємо експериментальні дані. База правил у вигляді нечітких логічних рівнянь дозволяє пов'язати функцію приналежності вихідної змінної та координат вхідного вектора, в результаті чого отримуємо лінгвістичні значення вихідної змінної. Нечітке моделювання проводимо в середовищі FuzzyTECH, 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 нечіткої апроксимації залежностей між вхідними і вихідними координатами вектора стану об'єкта керування та залежності статистичних характеристик інформаційної координати від положення об'єкта у факторному просторі представлені на рис. 3, 4.

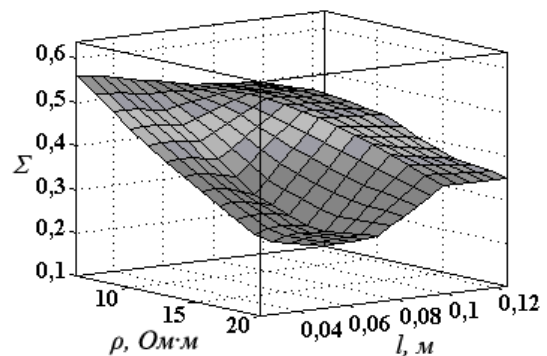
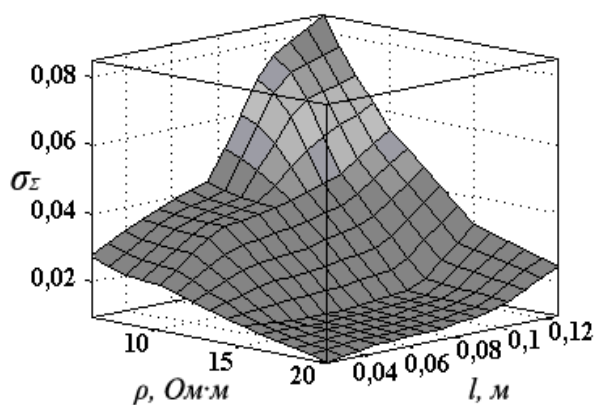


Рисунок 3 – Залежність  $M\Sigma[n]=F(I[n], \rho[n])$

Рисунок 4 – Залежність  $\sigma_z = F(l[n], \rho[n])$ 

Аналіз нечітких моделей, побудованих з допомогою методів fuzzy-апроксимації, підтверджує суттєву нелінійність об'єкта керування, що вимагає для забезпечення керованості в усьому діапазоні змін вхідних координат вносити корективи в закон керування в залежності від положення об'єкта в просторі станів. Залежність статистичних характеристик інформаційних координат також визначається положенням об'єкта в просторі станів та потребує корекції в процесі керування, тобто адаптації.

Синтезовані нечіткі моделі можуть використовуватися в адаптивній системі керування електровибуховим перетворенням енергії для коригування параметрів системи керування в залежності від положення об'єкта в просторі станів, що дозволить розширити зону керованості, підвищити усталену точність керування та надасть системі керування властивість адаптивності.

Побудовано нечітку модель керування електровибуховим перетворенням енергії на основі використання методів fuzzy-апроксимації, яка, оперуючи математичним очікуванням інформаційної

координати  $M(\Sigma[n])=F(l[n], \rho[n])$ , описує об'єкт на всьому просторі станів з врахуванням нелінійності. При синтезі нечіткої моделі в якості бази знань використано базу експериментальних даних, яка при зміні технологічних параметрів може бути легко розширена, забезпечуючи адаптивність керування при різних режимах роботи.

**Висновки.** Побудовано нечітку модель залежності середньоквадратичного відхилення інформаційної координати  $\sigma_z$  від положення об'єкта в просторі станів  $\sigma_z = F(l[n], \rho[n])$ , використання якої в системі керування дасть змогу розширити зону керованості, підвищити усталену точність та надасть системі керування властивість адаптивності.

Використання побудованих засобами fuzzy-апроксимації нечітких моделей при синтезі системи керування забезпечить керованість об'єкта у всьому просторі станів та адаптивність системи керування при непередбачуваних змінах технологічних параметрів та параметрів середовища в широкому діапазоні. Впровадження адаптивної системи керування, синтезованої на основі нечітких моделей, дозволило підвищити продуктивність розрядноімпульсних технологій на (15-20)%.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наукова думка, - 1986. – 206 с.
2. Вовк І.Т., Овчиннікова Л.Е., Назарова Н.С., Козирев С.С. Синтез моделі управління режимом високовольтного розряду в рідині // Збірник наукових праць УДМУ № 1 (367), Миколаїв, 2000. – С. 128 -136.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. – СПб.: БХВ - Петербург, 2003. – 736 с.

Стаття надійшла 14.04.08

Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.