

УДК 681.5.01.23

Т.Ю. Василець<sup>1</sup>, О.О. Варфоломійєв<sup>2</sup>, В.В. Томаш<sup>1</sup>, О.О. Підлісний<sup>1</sup><sup>1</sup> Українська інженерно-педагогічна академія, Харків<sup>2</sup> Технологічний інститут, Нью Джерсі, США

## СИНТЕЗ FUZZY РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ДВОМАСОВОЮ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ

Виконано синтез Fuzzy регулятора для рішення задачі управління двомасовою електромеханічною системою. Наведено порядок синтезу Fuzzy регулятора, реалізованого в пакеті розширення Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB, для заданого об'єкту управління; визначені оптимальні значення параметрів Fuzzy регулятора. Виконано моделювання нечіткої системи. Показано, що синтезований Fuzzy регулятор забезпечує високі динамічні характеристики системи.

**Ключові слова:** нечіткі технології, системи нечіткого висновку, нечітка система, двомасова електромеханічна система, Fuzzy регулятор.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Останнім часом нечітке управління є однією з найактивніших і найрезультативніших областей досліджень застосування теорії нечітких множин. Нечітке управління виявляється особливо корисним, коли технологічні процеси є занадто складними для аналізу за допомогою загальноприйнятих кількісних методів, або коли доступні джерела інформації інтерпретуються якісно, неточно або невизначено.

Експериментально показано, що нечітке управління дає кращі результати, в порівнянні з одержуваними при загальноприйнятих алгоритмах керування. Нечітка логіка, на якій засновано нечітке управління, ближче за духом до людського мислення і природним мовам, ніж традиційні логічні системи. Нечітка логіка, в основному, забезпечує ефективні засоби відображення невизначеностей і неточностей реального світу. Наявність математичних засобів відображення нечіткості вихідної інформації дозволяє побудувати модель, адекватну реальності.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Починаючи з 1965 р. нечітка логіка пройшла шлях від майже антинаукової теорії, практично відкинутаї в Європі і США, до стрімкого розвитку в кінці минулого століття.

У Великобританії Е. Мамдані [1] використав нечітку логіку для управління парогенератором. Рішення цієї задачі звичайними методами було зв'язане з цілим рядом труднощів обчислювального характеру. Запропонований Е. Мамдані алгоритм, заснований на нечіткому логічному висновку, дозволив уникнути надмірно великого об'єму обчислень і був по достоїнству оцінений фахівцями.

В [2] були отримані важливі емпіричні результати по моделюванню за допомогою нечіткої логіки процесів людських міркувань і ухвалення рішень.

Світовим лідером в області нечітких систем є Японія, де налагоджений випуск спеціалізованих нечітких контролерів [3–4].

Корпорація Intel, маючи велику кількість різноманітних контролерів, створила засіб розробки додатків на базі цих контролерів з використанням технології нечіткості. Система від Intel, яка отримала назву fuzzy TECH, завоювала величезну популярність не тільки в США і Європі, але і в усьому світі.

Аналіз останніх публікацій по синтезу сучасних регуляторів електромеханічних систем з використанням нечітких технологій показує, що цей напрям досліджень є актуальним.

**Метою роботи** є синтез Fuzzy регулятора, реалізованого в системі MATLAB, для рішення задачі управління двомасовою електромеханічною системою.

### Основний розділ

#### 1. Схема моделі нечіткої системи, розроблена в SIMULINK системи MATLAB

Для реалізації процесу нечіткого моделювання в середовищі MATLAB призначений спеціальний пакет розширення Fuzzy Logic Toolbox. В рамках цього пакету можна виконувати необхідні дії по розробці і використанню нечітких моделей в одному з наступних режимів:

– у інтерактивному режимі за допомогою графічних засобів редагування і візуалізації всіх компонентів систем нечіткого висновку;

– у режимі команд за допомогою введення імен відповідних функцій з необхідними аргументами безпосередньо у вікно команд системи MATLAB.

Побудуємо нечітку модель управління двомасовою електромеханічною системою в інтерактивному режимі за допомогою графічних засобів пакету Fuzzy Logic Toolbox.

Будемо оцінювати якість регулювання системи по величині миттєвої помилки регулювання  $\epsilon$ , тоб-

то різниці між заданим значенням швидкості обертання механізму  $\omega_3$  і реальною швидкістю обертання механізму  $\omega_m$ .

Оскільки двомасова система є інерційною, то при регулюванні слід враховувати похідну від помилки регулювання, в якості якої можна використовувати момент пружності  $M_{пр}$  в кінематичному ланцюзі електроприводу.

Розробку системи управління двомасовою електромеханічною системою з Fuzzy регулятором виконуємо таким чином. На входи Fuzzy регулятора подамо помилку регулювання  $\varepsilon$  і момент пружності

$M_{пр}$  (точніше – різницю між моментом пружності  $M_{пр}$  і моментом статичного навантаження  $M_c$  тобто  $M_{пр} - M_c$ ) в кінематичному ланцюзі машини. За допомогою Fuzzy регулятора формуватимемо управляючу дію  $U$  на динамічну систему.

Схема такої системи, побудована в MATLAB в режимі Simulink показана на рис. 1. На рис. 2 показана схема підсистеми Subsystem1 тобто моделі керованого об'єкту Fuzzy регулятора. Дана модель з'являється у відповідному вікні при активізації блоку Subsystem1 подвійним клацанням лівої кнопки миші.

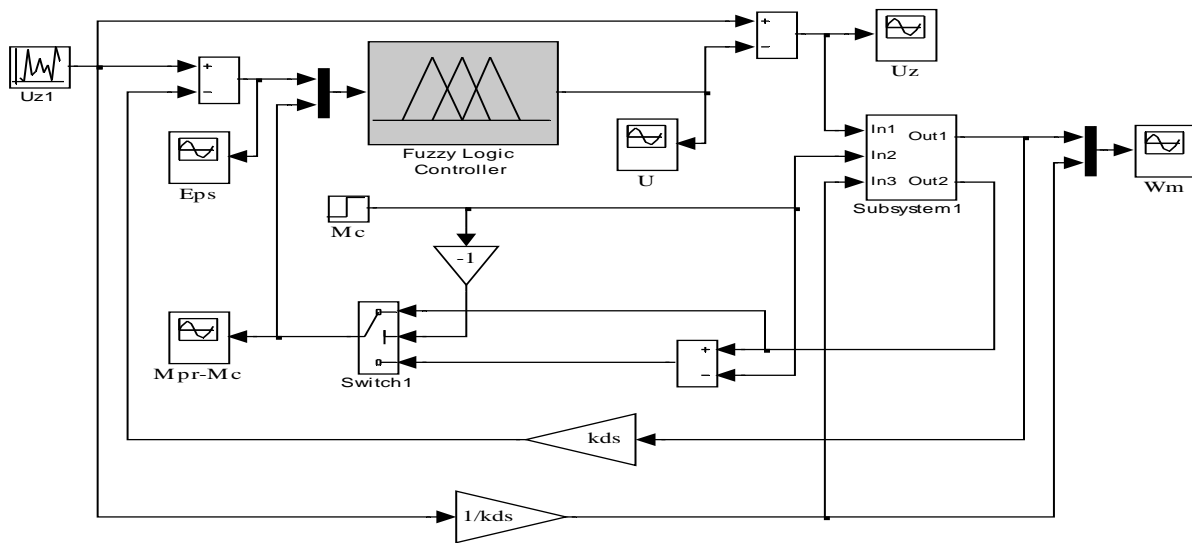


Рис. 1. Схема системи з Fuzzy регулятором

Схема складена відповідно до рівнянь динаміки двомасової системи регулювання швидкості електроприводу промислової установки. У якості привідного двигуна застосовано двигун постійного струму незалежного збудження. Якірна обмотка живиться від тиристорного перетворювача. Систем управління електроприводом побудована за принципом підлеглого регулювання і містить два контури: контур регулювання струму і контур регулювання швидкості із зворотним зв'язком по ЕДС двигуна. У якості послідовних коректуючих пристроїв в кожному контурі включені ПІ-регулятори. Замкнений контур струму настроєний на модульний оптимум, а контур швидкості – на симетричний оптимум.

## 2. Синтез Fuzzy регулятора, реалізованого в пакеті Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB

Для проектування Fuzzy регулятора необхідно вибрати лінгвістичні змінні і задати терм-множини всіх лінгвістичних змінних. У якості лінгвістичних змінних приймаємо помилку регулювання  $\varepsilon$ , момент пружності  $M_{пр}$  і вихідний сигнал  $U$  Fuzzy регулятора.

Як терм-множини використовуватимемо множини  $T_{1,2,3} = \{ \text{"негативна велика"}, \text{"негативна мала"}, \text{"близька до нуля"}, \text{"позитивна мала"}, \text{"позитивна велика"} \}$ . Функції приналежності кожного терма кожної множини задаються далі.

Для скорочення запису правил використовуватимемо наступні символічні позначення для найменування окремих термів вхідних і вихідних лінгвістичних змінних: NG – негативна велика; NS – негативна мала; ZR – близька до нуля; PS – позитивна мала; PG – позитивна велика. Тоді терм-множини всіх лінгвістичних можна записати в скороченому вигляді:  $T_{1,2,3} = \{NG, NS, ZR, PS, PG\}$ .

На підставі аналізу експериментальних перехідних процесів при пуску і набросі навантаження сформовано базу правил нечітких продукцій. Оскільки розглядаються дві вхідні лінгвістичні змінні, кожна з яких має 5 термів, то система нечіткого висновку міститиме 25 правил нечітких продукцій наступного виду:

ПРАВИЛО\_1: ЯКЩО " $\varepsilon \in NG$ " І " $M_{пр} \in NG$ "  
ТО " $U \in NG$ ".

Базу правил нечітких продукцій представимо для зручності у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

База правил формування лінгвістичних змінних Fuzzy регулятора

		Помилка регулювання				
		NG	NS	ZR	PS	PG
Момент пружності	NG	NG	NS	NS	NS	NS
	NS	NS	NS	ZR	ZR	ZR
	ZR	NS	NS	ZR	PS	PS
	PS	ZR	ZR	ZR	PS	PS
	PG	PS	PS	PS	PS	PG

Представлену інформацію досить для проектування нечіткої системи. Така система матиме 2 вхо-

ди, один вихід, двадцять п'ять правил типу «якщо..., то...» (відповідно до табл. 1) і по п'ять функцій приналежності входів і виходу. Побудуємо дану систему, використовуючи алгоритм виведення Mamdani.

Командою (функцією) Fuzzy з режиму командного рядка запускається основна інтерфейсна програма пакету Fuzzy Logic – редактор нечіткої системи висновку (FIS-редактор). Вид вікна, що відкривається при цьому, приведений на рис. 3.

Рядок меню редактора містить наступні позиції:

File – робота з файлами моделей (їх створення, збереження, прочитування і друк);

Edit – операції редагування (додавання і виключення входних і вихідних змінних);

View – перехід до додаткового інструментарію.

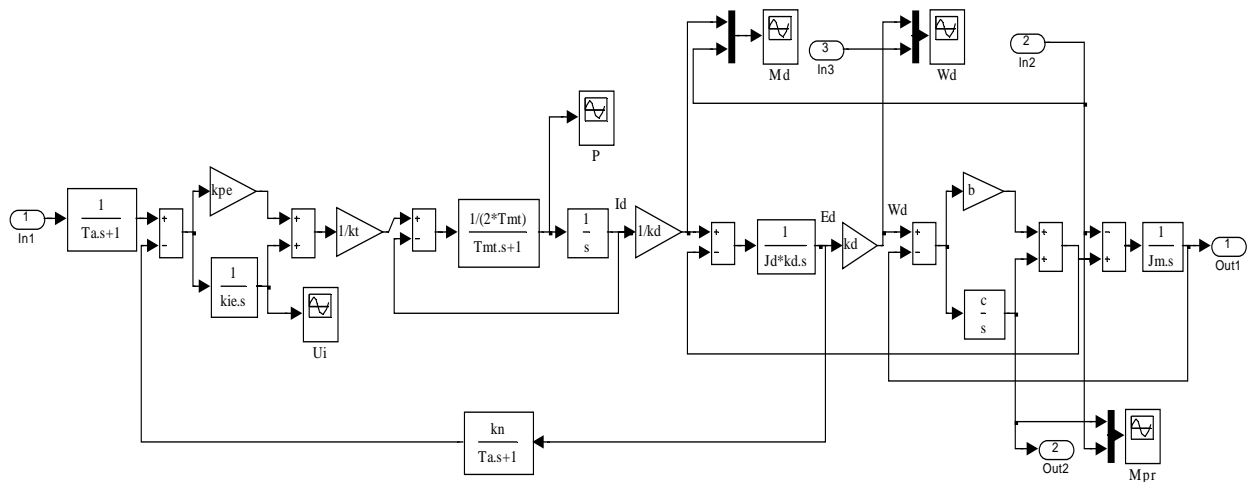


Рис. 2. Схема моделі об'єкту управління (Subsystem1)

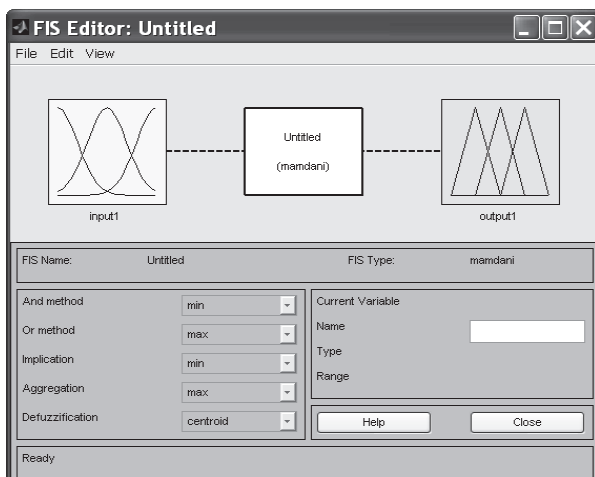


Рис. 3. Вид вікна FIS Editor

За умовчанням в редакторі пропонується алгоритм виведення типу Mamdani (про що говорить напис в центральному білому блоці) і тут ніяких змін не потрібно, але в системі повинні бути два входи, тому через пункт меню Edit /Add Variable/Input додаємо в систему цей другий вхід (у вікні редактора з'являється другий жовтий блок з ім'ям input2). Роблячи, далі, од-

норазове клацання на блоку input 1, міняємо його ім'я на «Epsilon» (помилка регулювання  $\epsilon$ ), завершуючи введення нового імені натисненням клавіші Enter. Аналогічним чином встановлюємо ім'я «Му» ( $M_{np}$ ) блоку input2 і «U» (U) – вихідному блоку (справа вгорі) output 1. Присвоємо відразу ж і ім'я всій системі «KranPodem\_4», виконавши це через пункт меню File/Export/To Workspace (Зберегти в робочому просторі). Вид вікна редактора після вказаних дій приведений на рис. 4.

Задамо тепер функції приналежності змінних. Вкажемо, що програму – редактор функцій приналежності можна відкрити трьома способами:

- 1) через пункт меню Edit/Membership functions;
- 2) подвійним клацанням на значку, що відображає відповідну змінну;
- 3) натисненням клавіш Ctrl+2.

Будь-яким з приведених способів перейдемо до даної програми.

Завдання і редагування функцій приналежності почнемо із змінній «Epsilon» (рис. 5).

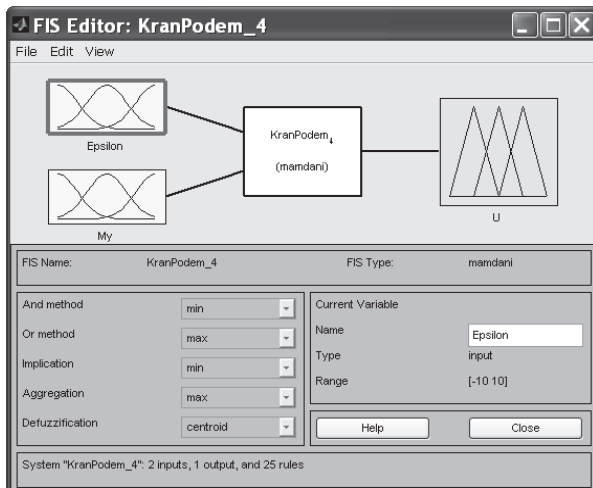


Рис. 4. Вид вікна FIS Editor після завдання структури системи

Спочатку в полях Range і Display Range встановимо діапазон зміни і відображення цієї змінної – від -10 до +10, підтверджуючи введення натисненням клавіші Enter.

Потім через пункти меню Edit/Remove All MFs, Edit/Add MFs перейдемо до діалогового вікна виду рис. 6 і задамо в ньому п'ять функцій приналежності трикутної форми (trimf) (або гауссова типу (gaussmf)).

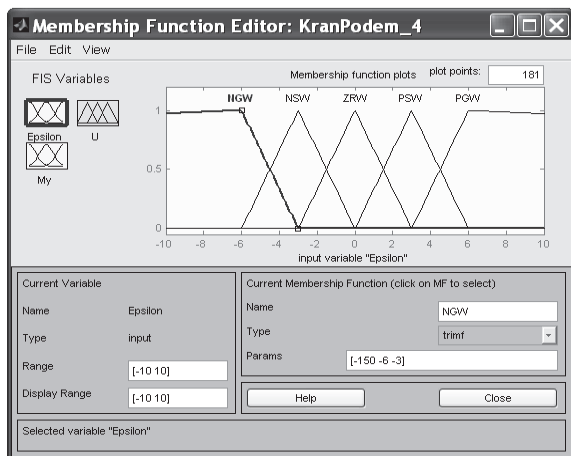


Рис. 5. Функції приналежності змінної «Epsilon» (помилка регулювання  $\epsilon$ )

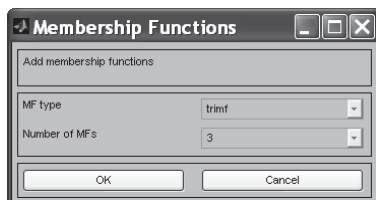


Рис. 6. Вид вікна завдання типу і кількості функцій приналежності

Натиснемо кнопку ОК і повернемося у вікно редактора функцій приналежності. Замінімо імена заданих функцій, для чого підводимо покажчик до потрібної кривої і клацаємо лівою кнопкою миші.

Крива вибирається, забарвлюючись в червоний колір, після чого за допомогою миші її можна посунути в потрібну сторону (точнішу установку можна провести, змінюючи числові значення в полі Params (Параметри). Кожній функції приналежності трикутної форми відповідають три параметри, при цьому перший і третій визначає розмах кривої (чисельні значення вказаних параметрів відповідають точкам перетину з віссю  $x$ ), а третій – положення її центру. У разі завдання функцій приналежності гауссова типу (gaussmf) задаються два параметри, при цьому перший визначає розмах кривої, а другий – положення її центру. У полі Name змінюємо ім'я для вибраної кривої (завершуючи введення кожного імені натисненням клавіші Enter). Задамо всім п'яти кривим нові імена, наприклад, так: найлівіша – NGW (негативна велика для швидкості); наступна – NSW (негативна мала для швидкості); центральна – ZRW (дуже мала для швидкості); наступна за нею справа – PSW (позитивна мала для швидкості); найправіша – PGW (позитивна велика для швидкості).

Діапазон зміни, тип, розмах і положення заданих функцій вибирається в процесі настройки Fuzzy регулятора шляхом багатократного розрахунку перехідних процесів багатомасової системи при різних типах і параметрах функцій приналежності і вибору оптимального варіанту.

Клацанням на значку «My» ( $M_{np}$ ) увійдемо до вікна редагування функцій приналежності для цієї змінної (рис. 7). Задамо спочатку діапазон її зміни від -60 до +60, а потім, поступаючи як раніше, задамо п'ять функцій приналежності трикутної форми (trimf) (або гауссова типу (gaussmf)) з іменами відповідно «NGM («негативна велика для моменту»», «NSM («негативна мала для моменту»», «ZRM («дуже мала для моменту»», «PSM («позитивна мала для моменту»») і «PGM («позитивна велика для моменту»»).

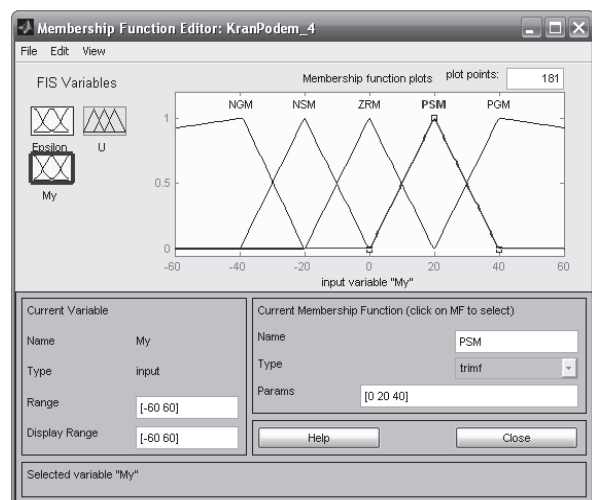


Рис. 7. Функції приналежності змінної «My» ( $M_{np}$ )

Для вихідної змінної «U» (U) вкажемо спочатку діапазон зміни (від -5 до +5), потім задамо п'ять функцій приналежності гауссова типу: для центральної функції gauss2mf, а для інших – gaussmf з іменами «NGU («негативна велика для вихідний змінної U(t)»), «NSU» («негативна мала для вихідний змінної U(t)»), «ZRU» («дуже мала для вихідний змінної U(t)»), «PSU» («позитивна мала для вихідний змінної U(t)») і «PGU» («позитивна велика для вихідний змінної U(t)») так, як це представлено на рис. 8.

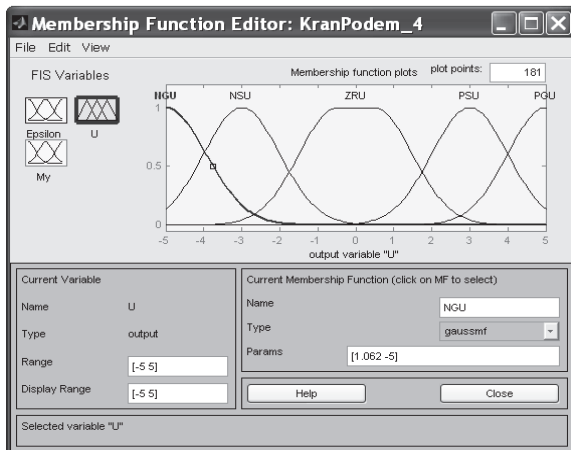


Рис. 8. Функції приналежності «U» (вихідної змінної U(t))

Як указувалося раніше, діапазон зміни змінних, тип і параметри функцій уточнюються в процесі настройки Fuzzy регулятора.

Для конструювання правил виберемо пункт меню Edit/Rules. Далі введення правил проводиться відповідно до пропозицій, що описують завдання. Вікно редактора правил відображене на рис. 9.

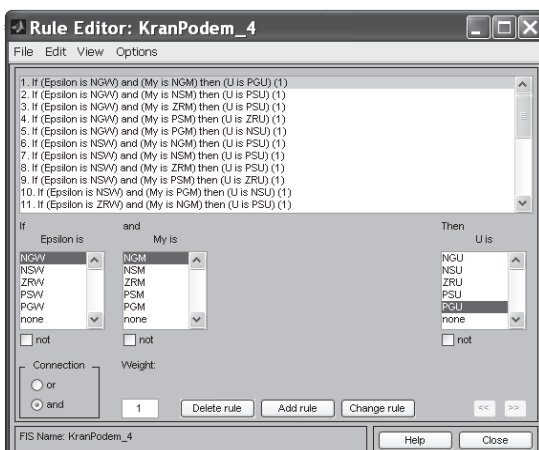


Рис. 9. Вікно редактора правил

Для перевірки системи у дії розкриємо меню View. Виберемо команду Rules, при цьому відкриється вікно (рис. 10) ще однієї програми – перегляду правил (Rule Viewer). У правій частині вікна в графічній формі представлені функції приналежності

аргументів «Epsilon» (помилка регулювання  $\epsilon$ ), і «My» (моменту пружності  $M_{np}$ ), в лівій – функції приналежності змінної виходу «U» (U) з поясненням механізму ухвалення рішення.

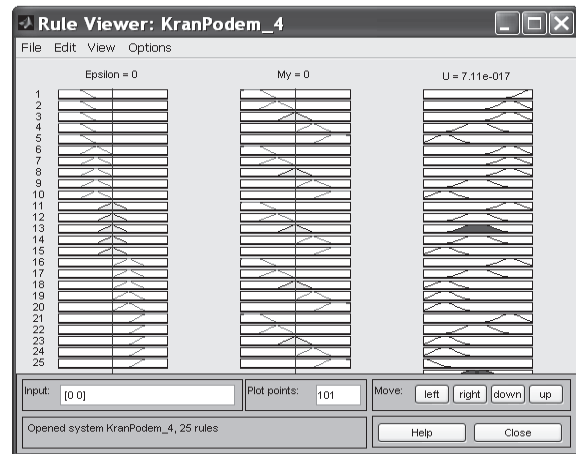


Рис. 10. Вікно перегляду правил

Червона вертикальна межа, що перетинає графіки в правій частині вікна, яку можна переміщати за допомогою миші, дозволяє змінювати значення змінних входу (це ж можна робити, задаючи числові значення в полі Input (Вхід)), при цьому відповідно змінюються значення «Epsilon» і «My» в правій верхній частині вікна і, відповідно, значення вихідний змінної «U» (U(t)). Таким чином, за допомогою побудованої моделі і вікна перегляду правил можна вирішувати задачу синтезу Fuzzy регулятора. Зміна аргументу шляхом переміщення червоної вертикальної лінії дуже наочно демонструє, як система визначає значення виходу.

Закриємо вікно перегляду правил і вибором команди меню View/Surface перейдемо до вікна перегляду поверхні відгуку (виходу) (рис. 11). За допомогою мишки графік можна повертати на всі боки.

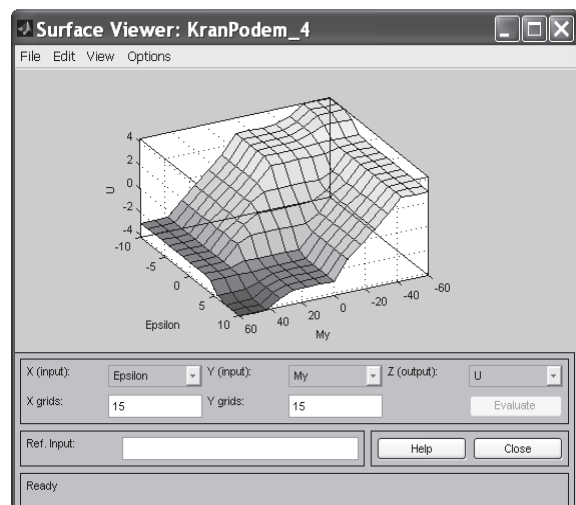


Рис. 11. Графічний вид залежності вихідної змінної від вхідних

У вікні, що відкрилося, міняючи імена змінних в полях введення (X (input) і Y (input)) можна задати і перегляд одновимірних залежностей, тобто «U» ( U ) від «Epsilon» (  $\epsilon$  ), або «U» ( U ) від «Му» (  $M_{np}$  ).

### 3. Моделювання системи з Fuzzy регулятором і аналіз отриманих результатів

Як показали дослідження, змінюючи тип і параметри функцій приналежності, діапазон їх зміни Range можна сконструювати Fuzzy регулятор, що дозволяє понизити динамічні навантаження в багатомасовій системі. Для побудови графіків перехідних процесів

системи з Fuzzy регулятором використовуємо моделі SIMULINK, приведені на рис. 1 або рис. 12.

На рис. 13 показані графіки перехідних процесів швидкості механізму  $\omega_m$ , швидкості двигуна  $\omega_d$  і моменту пружності  $M_{np}$  в замкнутій системі з Fuzzy регулятором в режимі пуску електроприводу. На вхід системи подавався ступінчатий сигнал з випадковою амплітудою.

Як видно з графіків, перехідні процеси мають задовільний характер, що істотно знижує динамічні навантаження в електромеханічній системі.

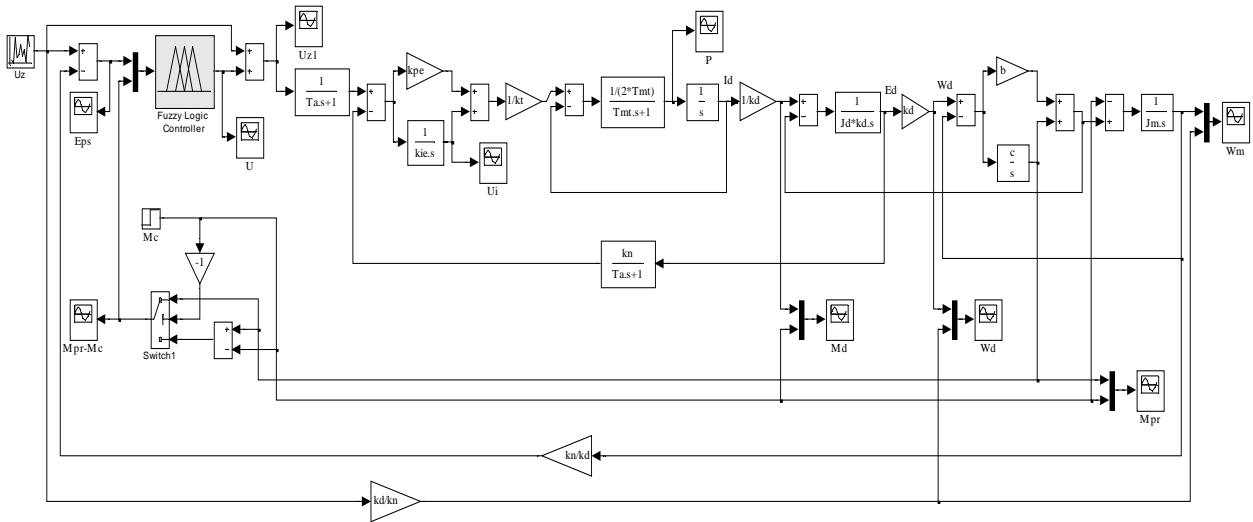


Рис. 12. Схема моделі двомасової системи з Fuzzy регулятором

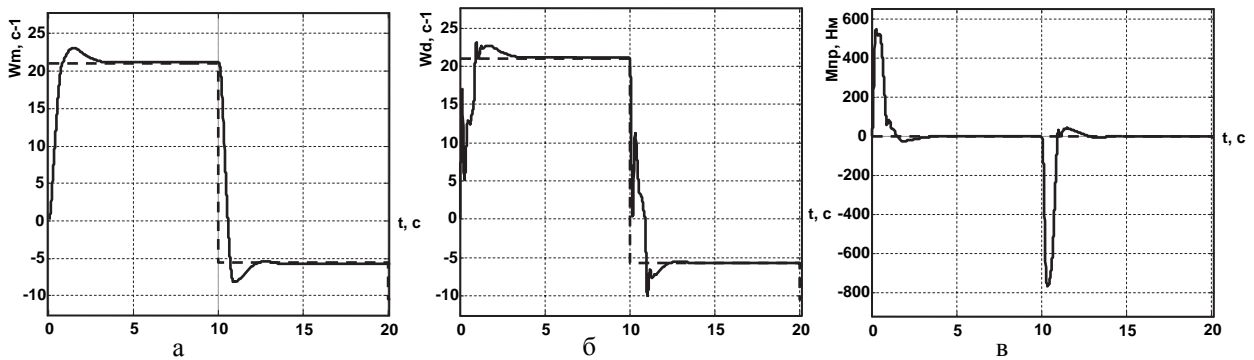


Рис. 13. Графіки перехідні процеси змінних стану двомасової системи з Fuzzy регулятором: а – швидкість механізму  $\omega_m$ ; б – швидкість двигуна  $\omega_d$ ; в – момент пружності

### Висновки

У статті виконаний синтез Fuzzy регулятора для вирішення завдання управління двомасовою електромеханічною системою. При рішенні задачі виконано наступне: розроблена схема моделі нечіткої системи в Simulink системи MATLAB, виконаний синтез Fuzzy регулятора з використанням пакету Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB для заданого об'єкту управління.

При синтезі Fuzzy регулятора вибрані лінгвістичні змінні і задані терм-множини всіх лінгвістичних змінних, сформовано базу правил нечітких продукцій, визначені діапазон зміни, тип і параметри функцій приналежності всіх лінгвістичних змінних, вибрано алгоритм виведення. Як показали дослідження, змінюючи тип і параметри функцій приналежності, діапазон їх зміни можна сконструювати Fuzzy-регулятор, що дозволяє понизити динамічні навантаження в багатомасовій системі.

Проведено моделювання нечіткої системи з синтезованим Fuzzy регулятором. Аналіз результатів моделювання показав, що перехідні процеси змінних стану системи в замкнутій системі з Fuzzy регулятором в режимі пуску і набросу навантаження мають задовільний характер.

*Fuzzy Systems Applications, Iiruka, Japan, Aug. 1988. – Pp. 49-50.*

*4. Sangalli A. and Klir G.R. Fuzzy logic goes to market, New Scientist, 8 Feb., 1992.*

## Список літератури

1. Mamdani E.H. *Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // IEEE Transactions on Computers. – Vol. 26, no. 12. – 1977. – Pp. 1182-1191.*

2. *Прикладные нечеткие системы: пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. – М.: Мир, 1993.*

3. Watanabe H., and Dettloff. *Reconfigurable fuzzy logic processor: A full custom digital VLCI, in Int. Workshop on*

Надійшла до редколегії 14.12.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.Д. Сахацький, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків.

## СИНТЕЗ FUZZY РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВУМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Т.Е. Василец, А.А. Варфоломеев, В.В. Томаш, А.А. Подлесный

*Выполнен синтез Fuzzy регулятора для решения задачи управления двухмассовой электромеханической системой. Приведен порядок синтеза Fuzzy регулятора, реализованного в пакете расширения Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB, для заданного объекта управления; определенные оптимальные значения параметров Fuzzy регулятора. Выполнено моделирование нечеткой системы. Показано, что синтезированный Fuzzy регулятор обеспечивает высокие динамические характеристики системы.*

**Ключевые слова:** нечеткие технологии, системы нечеткого вывода, нечеткая система, двухмассовая электромеханическая система, Fuzzy регулятор.

## SIMULATION OF THE FUZZY CONTROLLER FOR THE TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM

T. Vasilets, A. Varfolomiyev, V. Tomash, A. Podlesnyiy

*Simulated Fuzzy controller for the two-mass electromechanical system. For the given control object, it is presented the algorithm of the fuzzy controller simulation with the MATLAB Fuzzy Logic Toolbox; determined optimal parameters' values. Fuzzy system simulation is performed. And it is shown that the designed fuzzy controller guarantees high dynamic performance of the system.*

**Keywords:** fuzzy technology, fuzzy inference system, fuzzy system, two-mass electromechanical system, Fuzzy regulator.