

УДК 621.4+681.534

В. В. КОРОБКО<sup>1</sup>, О. В. КОРОБКО<sup>1</sup>, Г. В. КОНДРАТЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup> Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна<sup>2</sup> Чорноморський державний університет імені Петра Могили, Україна

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНОЮ ТЕПЛОВОЮ МАШИНОЮ ТИПУ «ДВИГУН-ТЕПЛОВИЙ НАСОС» НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

В статті здійснено аналіз сучасних методів побудови математичних моделей термоакустичних теплових машин. Розглянуто підхід синтезу спрощеної математичної моделі з використанням експериментальних даних та регресійних методів побудови парних залежностей. На базі отриманої моделі авторами синтезовано ряд нечітких регуляторів, в тому числі з комбінованим принципом керування. На основі імітаційного моделювання здійснено порівняльний аналіз та продемонстровано доцільність застосування нечітких регулюючих пристроїв в системах керування термоакустичними тепловими машинами типу «двигун-тепловий насос».

**Ключові слова:** теплові машини, термоакустичні процеси, математична модель, нечіткі регулятори.

## Вступ

Сучасний стан суспільства та промисловості зумовлює високий рівень споживання енергії, виробництво якої призводить до зменшення запасів непоновлюваних корисних копалин та зростання обсягу глобальних екологічних проблем. На поточний момент досягнуто певного прогресу в створенні ефективних теплових двигунів, але саме ці машини продукують низькотемпературні теплові викиди. В деяких випадках маємо ситуацію, коли традиційні технології енергозбереження є малоефективними або економічно недоцільними. Тому розробка та впровадження інноваційних технологій раціонального використання скидної енергії стає першочерговою задачею. Одним із перспективних напрямків утилізації вторинних енергоресурсів є використання систем на базі термоакустичного ефекту. Термоакустичні апарати дозволяють створювати ефективні технічні рішення, призначені для використання низькотемпературних вторинних та відновлювальних теплових енергоресурсів [1, 2].

Термоакустичні теплові машини (ТАТМ) бувають двох типів – двигуни (ТАД) та теплові насоси (ТАТН) [3, 4]. Конструкція ТАТМ має певні переваги, що до механічних пристроїв: відсутність рухомих частин, висока надійність, відсутність шкідливих робочих речовин та забруднюючих викидів. В ТАД різниця температур генерує потужні пульсації робочого тіла, яких достатньо для приводу електрогенераторів або підтримання роботи ТАТН. Деякі сучасні ТАД здатні працювати від температурної різниці у 60 °С відносно довкілля, а ТАТН забезпечують «температурний ліфт» на рівні 100 – 350 гра-

дусів. Це дозволяє, завдяки поєднанню «ТАД-ТАТН», збільшити обсяг утилізації вторинних енергоресурсів за рахунок вживання низькотемпературних скидних ресурсів для вирішення різноманітних потреб: виробництва механічної або електричної енергії, для задач рефрижерації, кріотехніки тощо.

Робочий процес ТАТМ базується на взаємоперетвореннях акустичної та теплової енергії, крім того ці теплові машини є резонансними системами, що зумовлює їх високу чутливість до властивостей робочого тіла (в'язкості, щільності, теплопровідності), а також до впливів зовнішнього середовища (температури, тиску, тощо). Вважаючи на ці обставини, стає зрозумілою потреба у здійсненні постійного контролю термоакустичних процесів.

## 1. Постановка задачі

Робочі процеси в елементах термоакустичних ТМ описуються класичною системою рівнянь механіки та термодинаміки [3-6], яка є складною для розв'язання. Ротт в роботі [5], спростивши цю систему, розробив лінійну теорію термоакустики, яка зведена до системи з рівнянь стану та «хвильового термоакустичного рівняння» відносно  $p_1$  у формі

$$\left[ 1 + \frac{(\gamma - 1)}{(1 + \epsilon_S)} f_K \right] p_1 + \frac{a^2}{\omega^2} \rho_m \frac{d}{dx} \left[ \frac{(1 - f_V)}{\rho_m} \times \frac{dp_1}{dx} \right] + \frac{a^2}{\omega^2} \frac{(f_K - f_V)}{(Pr - 1)(1 + \epsilon_S)} \times \beta \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} = 0, \quad (1)$$

де  $\gamma$  – показник адіабати;

$a$  – швидкість звуку;

$\rho_m$  – щільність середовища;

$Pr$  – стала Прандтля;  
 $\omega$  – кутова швидкість акустичної хвилі;  
 $\varepsilon_s$  – фактор, що враховує теплофізичні властивості;

$\beta$  – коефіцієнт теплового розширення;

$T_m$  – функція розподілу поля температур по вздовж резонатора;

$p_1 = p_0 \cos(kx)$  – розподіл акустичного тиску за довжиною резонатора;

$f_v$  та  $f_k$  – параметри, що названі функціями Ротта, залежать від геометрії стеку та теплофізичних якостей газу та матеріалу стеку.

В подальшому Свіфт [4], використовуючи результати Ротта, створив власну модель ТАТМ, взявши до уваги процеси у стеку, бо саме там відбуваються термоакустичні перетворення.

Ним отримано вирази для термоакустичного потоку теплоти в стеку ТАТМ (2) та роботи, яку продукує або споживає ТАТМ (3).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{TAD} &= \frac{1}{4} \Pi \delta_k \frac{T_m \beta p_s u_s}{(1 + Pr)(1 + \varepsilon_s) \Lambda} \times \\ &\times \left[ \Gamma \frac{1 + Pr^{1/2} + Pr(1 + \varepsilon_s)}{1 + Pr^{1/2}} - \left( 1 + Pr^{1/2} - \frac{\delta_v}{y_0} \right) \right] - \\ &- \Pi (y_0 k + L k_s) \frac{dT_m}{dx}, \\ \dot{W}_{TAD} &= \frac{1}{4} \Pi \delta_k L_s \frac{(\gamma - 1) \varpi(p_s)^2}{\rho_m C^2 (1 + \varepsilon_s)} \times \\ &\times \left( \frac{\Gamma}{\left( \frac{1 + Pr^{1/2}}{\Lambda} \right)} - 1 \right) - \frac{1}{4} \Pi \delta_v L_s \frac{\omega \rho_m u_s^2}{\Lambda}. \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\Pi, L$  – периметр та довжина стеку;

$T_m, p_m, \rho_m, c_p$  – теплофізичні параметри, відповідно – середня температура, тиск, щільність, теплосмність;

$\delta_s = \sqrt{2\lambda_s / \rho_s c_s \omega}$  – товщина термічного граничного шару в матеріалі стеку;

$\delta_k = \sqrt{2\lambda_k / \rho_m c_p \omega}$  – товщина термічного граничного шару в газі, що контактує зі стінкою;

$\delta_v = \sqrt{2\nu / \omega}$  – величина в'язкісного пограничного шару;

$\Lambda = 1 - \delta_v / y_0 + \delta_v^2 / 2y_0^2$  – масштабний фактор;

$\nabla T_{crit} = p_1 \omega / \rho_m c_p u_s$  – критичний температурний градієнт;

$\Gamma = \nabla T_m / T_{crit}$  – нормалізований градієнт температури.

Ця лінійна модель є загально визнаною і дозволяє робити розрахунки ТАТМ. Але вона має певні обмеження, оскільки не враховує вплив зовнішніх умов, температури джерел теплової енергії, особливості взаємодії робочого тіла з теплообмінниками ТАТМ тощо. Зрозуміло, що такий підхід ускладнює створення ефективних промислових термоакустичних систем [7].

Висока залежність ефективності термоакустичних систем від низки неконтрольованих параметрів [2, 3, 8], які практично неможливо врахувати на етапі проектування (точне значення шорсткості складових елементів резонатора, конструктивні недоліки виготовлення теплообмінників та стеку, умови навколишнього середовища, тощо), призводить до необхідності проведення додаткових налаштувань в процесі роботи ТАТМ з метою компенсації збурюючих факторів та стабілізації робочого режиму. Саме тому, розробка систем автоматичного керування ТАТМ в режимі реального часу є важливим напрямком наукових досліджень.

## 2. Розробка математичної моделі ТАТМ типу «двигун-тепловий насос»

Для спрощення задачі симуляції робочих процесів термоакустичних систем типу «термоакустичний двигун – термоакустичний тепловий насос» авторами з використанням експериментальних даних та регресійних методів побудови парних залежностей [9, 10] синтезована модульна математична модель [11, 12]. Отримана модель складається з передаточних функцій, що характеризують залежності акустичного тиску (4) та об'ємної швидкості (5) від підведеної потужності  $P_{supl}$  та температурних флуктуацій стеку (6) від акустичного тиску в резонаторі ТАТН, а також матриці перехідних характеристик між структурними ланками ТАД та ТАТН (7), що базується на лінії моделі Ротта [5] та експериментально отриманій [8] нелінійної залежності (рис. 1) амплітуди акустичного тиску в резонаторі ТАА від робочої частоти (8)  $p_m(f_{res})$ .

$$W_p(p) = \frac{14,66}{48,72 p + 1}, \quad (4)$$

$$W_U(p) = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{41,36 p + 1}, \quad (5)$$

$$W_T(p) = \frac{7,18 \cdot 10^{-4} p + 6,05 \cdot 10^{-6}}{p^2 + 0,12 p + 5,49 \cdot 10^{-4}}, \quad (6)$$

$$W_{TATH}(p) = \begin{bmatrix} 0,9 + 0,002j & 10^3 + 9,1 \cdot 10^4 j \\ -9,7 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-6} j & 0,9 + 0,002j \end{bmatrix}, \quad (7)$$

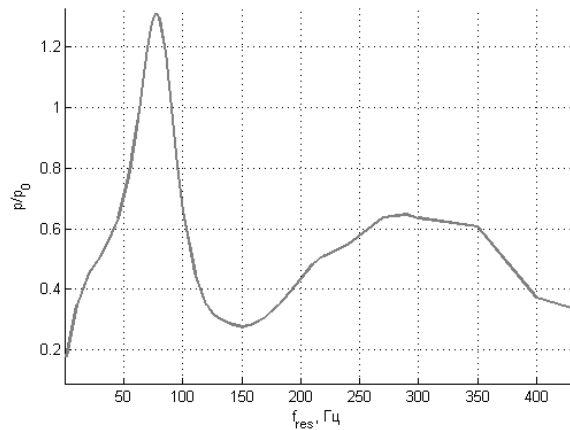


Рис. 1. Нормована залежність амплітуди акустичного тиску від частоти звукової хвилі в резонаторі ТАТН

$$f_{\text{res}} = \frac{a}{\lambda} = \frac{\sqrt{\gamma k T / m}}{nL}, \quad (8)$$

де  $f_{\text{res}}$  – резонансна частота звукової хвилі;

$\lambda$  – довжина звукової хвилі;

$k$  – стала Больцмана;

$T$  – абсолютна температура;

$m$  – молекулярна маса газу;

$nL$  – довжина резонатора ТАА, що обчислюється з врахуванням його типу.

Запропонована математична модель дозволяє досліджувати режими роботи ТАТМ, де в якості вхідних величин використовуються підведена до термоакустичної системи потужність  $P_{\text{supl}}$  та бажана температура  $T_{\text{уст}}$  гарячого кінця стеку теплового насосу, а її поточне значення  $T_H$  є виходом системи. Результати моделювання системи (4)–(7) для вхідної потужності двигуна  $P_{\text{supl}}=146$  Вт наведено на рис. 2.

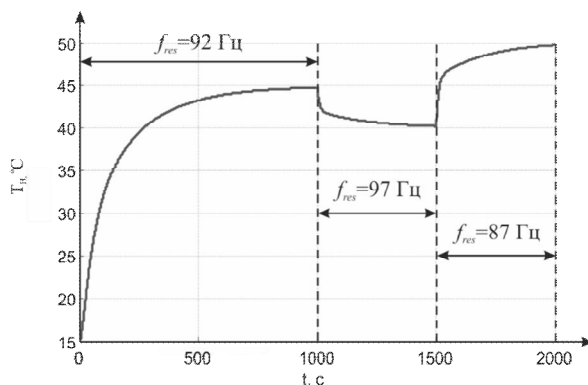


Рис. 2. Перехідні процеси термоакустичної системи ТАД+ТАТН для вхідної потужності 146 Вт

В період  $t = [0..1000]$  с відбувається стартовий розігрів установки, а термоакустичний двигун працює на частоті  $f_{\text{res}}=92$  Гц. В момент часу  $t=1000$  с відбувається раптове збільшення частоти в резона-

торі ТАТМ ( $f_{\text{res}}=97$  Гц), що призводить до зменшення амплітуди акустичного тиску  $i$ , як наслідок, до поступового зменшення вихідної температури теплового насосу з  $T_H=45$  °C до  $T_H=40$  °C. В момент часу  $t=1500$  с відбувається зменшення робочої частоти ( $f_{\text{res}}=87$  Гц), яке викликає збільшення амплітуди акустичного тиску та зростання вихідної температури  $T_H$  на проміжку часу  $t=[1500..2000]$  с з  $T_H=40$  °C до  $T_H=50$  °C.

Висока залежність ефективності термоакустичних систем від низки неконтрольованих параметрів, які практично неможливо врахувати на етапі проектування (точне значення шорсткості складових елементів резонатору, конструктивні недоліки виготовлення теплообмінників та стеку, умови навколишнього середовища, тощо), призводить до необхідності проведення додаткових налаштувань в процесі роботи ТАТМ з метою виведення її на сталий режим роботи, а тому актуальною є задача синтезу цифрової системи керування термоакустичними процесами. Порівняльний аналіз результатів моделювання з отриманими експериментальними даними [11] підтверджує адекватність синтезованої моделі термоакустичної системи. Вважаючи на ці обставини, в подальшому проведемо синтез системи керування термоакустичною установкою, що базується на непрямому впливі на амплітуду акустичного тиску за рахунок зміни довжини резонатора ТАТН з використанням моделі (4)–(7).

### 3. Синтез неперервного регулятора для системи керування ТАТМ

Схему дослідної установки непрямого контролю термоакустичних процесів [11], що поєднує термоакустичний двигун та термоакустичний тепловий насос, наведено на рис. 3, а, а фотографія дослідного стенду представлена на рис. 3, б. Принцип дії синтезованої системи базується на корекції довжини резонатора гілки теплового насосу, що в свою чергу змінює значення частоти в резонаторі ТАТМ. Зважаючи на нелінійну залежність [8] між частотою акустичної хвилі та тиском всередині резонатору (рис. 1), відбувається зміна акустичного тиску, яка призводить до зміни температури на кінцях стеку ТАТН (ДТЗ, ДТ4). Корекція довжини резонатору відбувається за рахунок перетворення обертового руху двигуна постійного струму (ДПС) в поступальний рух поршня в резонаторі гілки ТАТН із використанням редукторної передачі  $k_p$  та блоку інтегрування. Схema системи автоматичного управління установкою типу «ТАД+ТАТН» з регулятором наведена на рис. 3, а зображення експериментального стенду представлено на рис. 4.

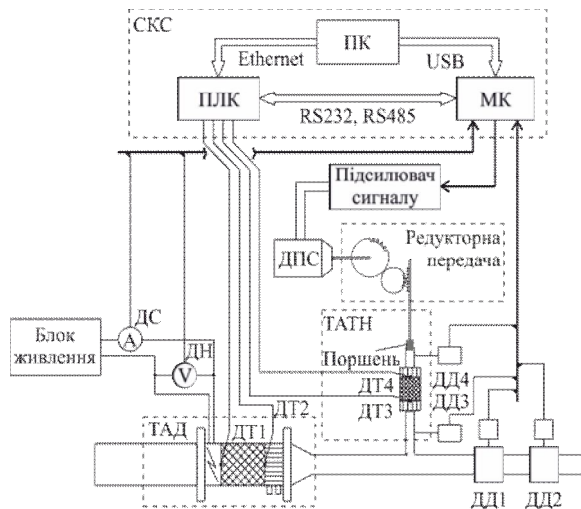


Рис. 3. Структурна схема системи автоматичного управління установкою типу «ТАД+ТАТН»

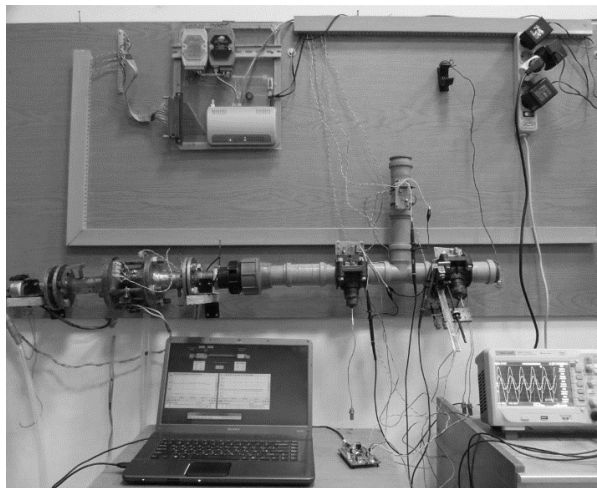


Рис. 4. Експериментальний стенд для дослідження робочих процесів термоакустичної теплової машини

Одним із найпоширеніших законів керування автоматичними системами на теперішній час є пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон [13, 14]. Створений на його основі, ПІД-регулятор використовується в системах автоматичного управління для формування керуючого сигналу з метою отримання необхідних точності і якості перехідного процесу. ПІД-регулятор формує керуючий сигнал, який є сумою трьох додатків, перший з яких пропорційний до різниці вхідного сигналу і сигналу зворотного зв'язку (сигнал неузгодженості), другий – до інтегралу сигналу неузгодженості, третій – до похідної сигналу неузгодженості.

В загальному випадку ПІД-закон регулювання можна записати рівнянням

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) = k_P \varepsilon(t) + k_I \int_0^t \varepsilon(t) dt + k_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt}. \quad (9)$$

У випадку синтезу регулятора для системи стабілізації вихідної температури ТАТМ застосування інтегральної складової призведе до погіршення якісних характеристик системи через наявність суттєвих нелінійностей в керуючому контурі та відсутності прямого зв'язку між керованою величиною та контуром регулятора. Тому, в якості основного керуючого пристрою обрано ПД-регулятор (10)

$$W_{\text{рег}} = k_P + \frac{k_D p}{\tau_D p + 1}, \quad (10)$$

де  $k_P$  – коефіцієнт пропорційної складової;  
 $k_D$  – коефіцієнт диференційної складової;  
 $\tau_D=0,1k_D$  – постійна часу аперіодичної ланки.

Слід відзначити, що в системі застосована паралельна реалізація ПД-регулятора, що використовує диференційно-інтегральну ланку, постійна часу аперіодичної складової якої є на порядок більша за коефіцієнт посилення диференційної складової ( $\tau_D \geq 10k_D$ ).

Користуючись синтезованою моделлю термоакустичної системи ТАД+ТАТН (4)-(7) та використовуючи метод Зіглера-Нікольса [14] з подальшим емпіричним налаштуванням, авторами отримано наступні коефіцієнти неперервного ПД-регулятора:  $k_P=0,71$ ;  $k_D=0,57$ .

Результати порівняльного моделювання системи автоматичної стабілізації вихідної температури термоакустичної установки з використанням неперервного ПД-регулятора та без нього наведені на рис. 5.

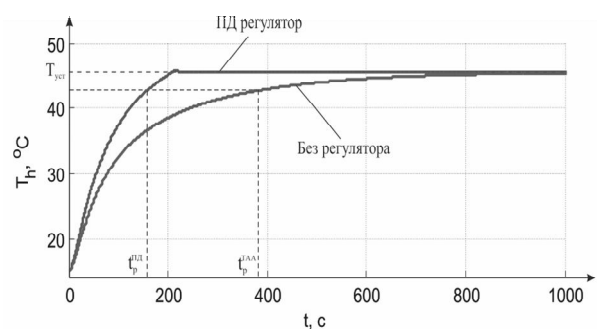


Рис. 5. Результати порівняльного моделювання системи автоматичної стабілізації вихідної температури ТАТМ з використанням неперервного ПД-регулятора та без нього

#### 4. Синтез нечітких регуляторів для системи керування ТАТМ

Аналіз алгоритмів та схемотехнічних рішень для проектування і реалізації систем управління термоакустичними процесами показує доцільність використання принципів нечіткого управління, що

спираються на теорію нечітких множин та нечітку логіку [15, 16].

Системи, засновані на нечіткій логіці, розроблені й успішно впроваджені в таких областях, як: керування технологічними процесами, керування транспортом, медична діагностика, технічна діагностика, фінансовий менеджмент, біржове прогнозування, розпізнавання образів. Для розробленої системи авторами синтезовано нечіткі регулятори Мамдані та Сугено типу [15]. Вхідними сигналами регуляторів є сигнал розузгодження між температурою уставки  $T_{уст}$  та поточною температурою гарячого кінця стеку ТАТН ( $\varepsilon = T_{уст} - T_H$ ), а також перша похідна сигналу розузгодження.

Вхідні сигнали нечітких регуляторів описуються за допомогою п'яти трикутних термів, а вихідний сигнал  $u_{рег}$  – за допомогою семи термів для регулятора Мамдані (табл. 1) та поліномів нульового та першого порядків для регулятора Сугено. Запропонована база знань складається з 25 правил, що характеризують роботу регуляторів на різних режимах.

Таблиця 1  
Параметри лінгвістичних термів нечіткого ПД-регулятора Мамдані типу

| Терм                                  | Тип функції належності | Діапазон значень |
|---------------------------------------|------------------------|------------------|
| Для вхідної змінної $\varepsilon$     |                        |                  |
| BN – велика від'ємна                  | Трикутна               | [-1,5 -1 -0,5]   |
| SN – мала від'ємна                    | Трикутна               | [-1 -0,5 0]      |
| Z – нульова                           | Трикутна               | [-0,5 0 0,5]     |
| SP – мала додатна                     | Трикутна               | [0 0,5 1]        |
| BP – велика додатна                   | Трикутна               | [0,5 1 1,5]      |
| Для вхідної змінної $d\varepsilon/dt$ |                        |                  |
| BN – велика від'ємна                  | Трикутна               | [-1,5 -1 -0,5]   |
| SN – мала від'ємна                    | Трикутна               | [-1 -0,5 0]      |
| Z – нульова                           | Трикутна               | [-0,5 0 0,5]     |
| SP – мала додатна                     | Трикутна               | [0 0,5 1]        |
| BP – велика додатна                   | Трикутна               | [0,5 1 1,5]      |
| Для вихідної змінної $u_{рег}$        |                        |                  |
| BN – велика від'ємна                  | Трикутна               | [-1,5 -1 -0,67]  |
| MN – середня від'ємна                 | Трикутна               | [-1 -0,67 -0,33] |
| SN – мала від'ємна                    | Трикутна               | [-0,67 -0,33 0]  |
| Z – нульова                           | Трикутна               | [-0,33 0 0,33]   |
| SP – мала додатна                     | Трикутна               | [0 0,33 0,67]    |
| MP – середня додатна                  | Трикутна               | [0,33 0,67 1]    |
| BP – велика додатна                   | Трикутна               | [0,67 1 1,5]     |

База правил синтезованого нечіткого регулятора Мамдані типу наведена в табл. 2. Характеристичні поверхні [15] синтезованих нечітких регуляторів наведені на рис. 6 та 7.

Синтезовані регулятори мають наступні значення коефіцієнтів: регулятор Мамдані типу –  $k_P=0,2$ ;  $k_D=7$ ; регулятор Сугено типу –  $k_P=0,3$ ;  $k_D=5$ .

Таблиця 2  
База знань нечіткого ПД-регулятора Мамдані типу

|                        |    | Швидкість зміни похибки, $d\varepsilon/dt$ |    |    |    |    |
|------------------------|----|--------------------------------------------|----|----|----|----|
|                        |    | BN                                         | SN | Z  | SP | BP |
| Похибка, $\varepsilon$ | BN | BN                                         | BN | BN | MN | SN |
|                        | SN | BN                                         | MN | MN | SN | SP |
|                        | Z  | SN                                         | SN | Z  | SP | SP |
|                        | SP | SN                                         | SP | MP | MP | BP |
|                        | BP | SP                                         | MP | BP | BP | BP |

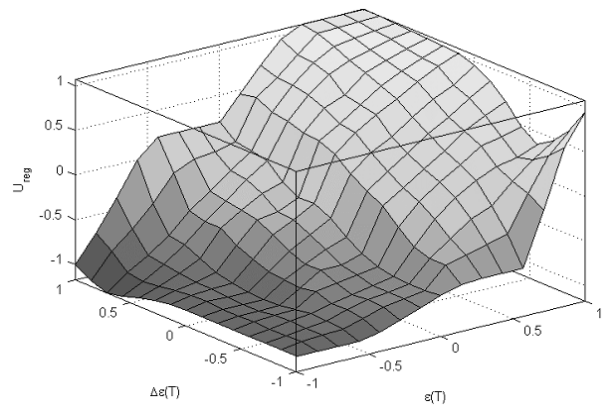


Рис. 6. Характеристична поверхня нечіткого регулятора Мамдані типу

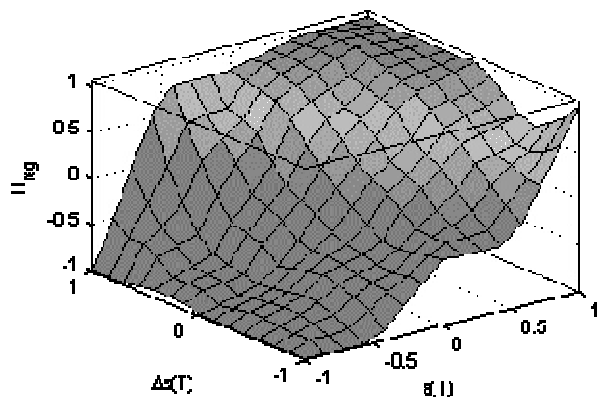


Рис. 7. Характеристична поверхня нечіткого регулятора Сугено типу

Перехідні процеси системи автоматичного управління термоакустичною установкою типу «ТАД+ТАТН» для вхідної потужності 150 Вт та температури установки  $T_{уст}=45\text{ }^{\circ}\text{C}$  наведені на рис. 8.

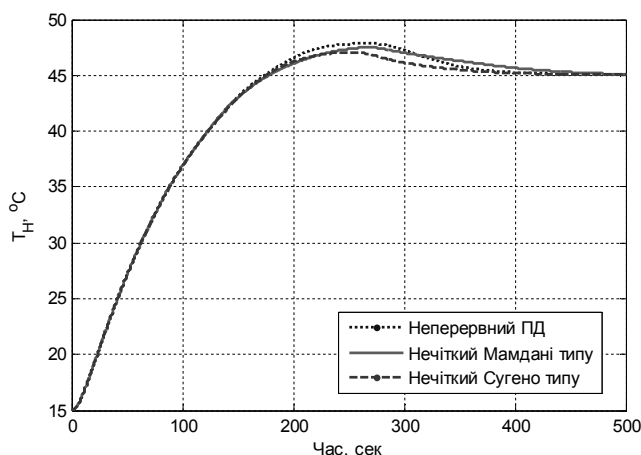


Рис. 8. Моделювання процесу старту термоакустичної системи типу «ТАД+ТАТН»

Слід відзначити, що за наведених значень коефіцієнтів нечіткий регулятор Сугено типу характеризується найкращими показниками якості перехідного процесу, так його перерегулювання не перевищує 5%, а час перехідного процесу становить 148,5 с. Перерегулювання неперервного ПД-регулятора складає 6,3%, а час перехідного процесу відповідно становить 301,3 с. Час перехідного процесу нечіткого регулятора Мамдані типу складає 288,1 с, а перерегулювання – 5,5%.

Застосування парадигм нечіткої логіки для побудови керуючих пристроїв термоакустичної системи типу «двигун-тепловий насос» дозволяє реалізувати гібридний закон керування, що реагує не тільки на зміни в показках температури гарячого теплообмінника гілки теплового насосу, а й на значення похідної тиску всередині термоакустичного двигуна. Синтезований за даним принципом нечіткий регулятор Сугено типу відповідно має три вхідні сигнали, кожен з яких описується за допомогою п'яти трикутних термів та бази знань, що складається з 125 правил. Вихідний сигнал регулятора формується на основі поліномів нульового та першого порядків. Отримані авторами коефіцієнти регулятора мають наступні значення:  $k_{П\Delta T}=0,3$ ;  $k_{Д\Delta T}=6$ ;  $k_{ДР}=0,03$ .

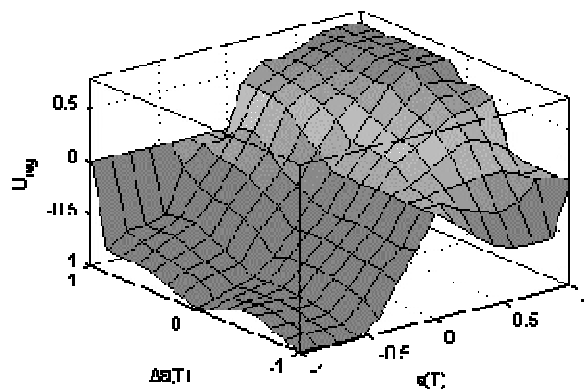
Характеристичні поверхні гібридного контролера наведені на рис. 9, а його перехідні процеси в порівнянні із раніше синтезованими представлені на рис. 10.

Виходячи з результатів моделювання, що наведені на рис. 10, можна зробити висновок, що синтезований гібридний контролер має більший час перехідного процесу, проте характеризується більшою швидкістю при реакції на зовнішні збурення (проміжок часу 600-800 с на рис. 10).

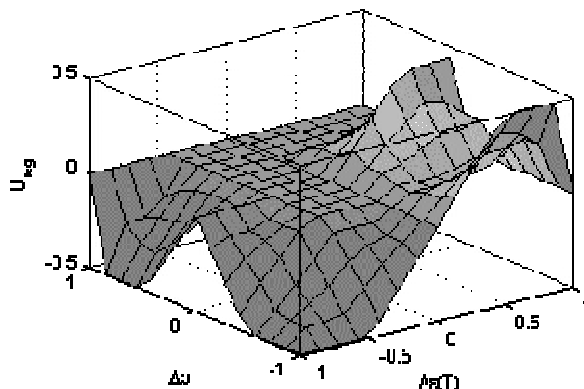
Для детальної оцінки робочих якостей всіх синтезованих контролерів в табл. 3 наведено основні показники якості перехідних процесів термоакусти-

чної системи типу «двигун-тепловий насос» при використанні різних регуляторів.

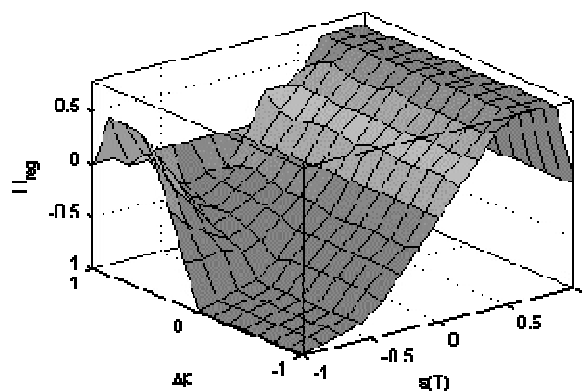
Порівняльний аналіз показників якості та роботи системи під навантаженням свідчить, що нечіткий гібридний регулятор Сугено типу забезпечує кращу точність системи керування термоакустичною системою типу «ТАД+ТАТН» та високу швидкодію при дії сторонніх збурень. Слід відмітити, що введення додаткової змінної до закону регулювання дозволило підвищити робастні властивості синтезованої системи керування.



а)  $u_{reg} = f(\Delta T, T)$



б)  $u_{reg} = f(\Delta p, T)$



в)  $u_{reg} = f(\Delta p, T)$

Рис. 9. Характеристичні поверхні синтезованого нечіткого регулятора Сугено типу з гібридним законом керування

## Висновок

В статті на основі синтезованої авторами в попередніх працях математичної моделі термоакустичної установки типу «двигун-тепловий насос» синтезовано ряд регуляторів, які за рахунок зміни довжини гілки теплового насоса дозволяють стабілізувати вихідну температуру теплового насоса термоакустичної системи. Проведений порівняльний аналіз неперервного ПД регулятора з розробленими нечіткими регуляторами Мамдані та Сугено типів показав доцільність застосування керуючих пристроїв на нечіткій логіці для систем керування термоакустичними апаратами.

Запропонований авторами гібридний контролер на нечіткій логіці, що додатково реагує на зміну амплітуди акустичного тиску в термоакустичному двигуні, дозволив підвищити робастність розробленої системи автоматичного управління за рахунок покращення динамічних показників при реакції на зовнішні впливи.

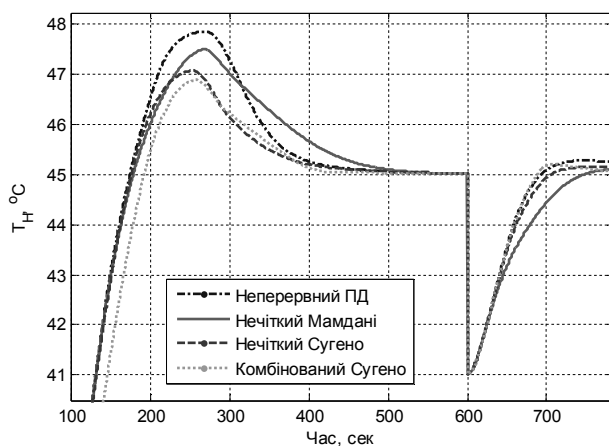


Рис. 10. Моделювання роботи термоакустичної системи типу «ТАД+ТАТН» під навантаженням

Таблиця 3

Показники якості перехідних процесів системи з синтезованими регуляторами

| Показник                | Неперервний ПД | Мамдані | Сугено  | Гібридний Сугено |
|-------------------------|----------------|---------|---------|------------------|
| Час перехідного процесу | 301,3 с        | 288,1 с | 148,5 с | 163,6 с          |
| Перерегулювання         | 6,3%           | 5,5%    | 4,6%    | 4,2%             |
| Статична похибка        | 0,028          | 0,023   | 0,029   | 0,015            |

## Література

1. De Blok, K. Low operating temperature integral thermo acoustic devices for solar cooling and waste heat recovery [Text] / K. De Blok // *Acoustic-2008, International conference*. – Paris, 2008. – P. 18-24.
2. Spoelstra, S. Thermoacoustic heat pumps for energy savings [Text] / S. Spoelstra, M. E. H. Tijani // *Grensoverschrijdende akoestiek, Nederlands Akoestisch Genootschap*. – Netherlands, 2005. – 23 p.
3. Wheatley, J. C. The natural heat engines [Text] / J. C. Wheatley, G. W. Swift, A. Migliori // *Los Alamos Science*. – 1986. – №2 (14). – P. 28-32.
4. Swift, G. W. Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators [Text] / G. W. Swift. – *American Institute of Physics*, 2002. – 300 p.
5. Rott, N. Thermoacoustics [Text] / N. Rott // *Adv. Appl. Mech.* – 1980. – № 20 (135). – P. 45-50.
6. Tomonaga, T. Fundamental Thermoacoustics [Text] / T. Tomonaga // *Tokyo, Uchida Rokakuno Publishing*, 1998. – 280 p.
7. Коробко, В. В. Исследование процессов теплообмена и гидродинамики в элементах термоакустических двигателей [Текст] / В. В. Коробко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 8 (105). – С. 123-130.
8. Kondratenko, Y. Frequency Tuning Algorithm for Loudspeaker Driven Thermoacoustic Refrigerator Optimization [Text] / Y. Kondratenko, O. Korobko, O. Kozlov // *Lecture Notes in Business Information Processing: Modeling and Simulation in Engineering, Economics and Management*. – Vol. 115. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012. – P. 270-279.
9. Зоркальцев, В. И. Метод наименьших квадратов: геометрические свойства, альтернативные подходы, приложения [Текст] / В. И. Зоркальцев. – Новосибирск : ВО «Наука», 1995. – 220 с.
10. Дейч, А. М. Методы идентификации динамических объектов [Текст] / А. М. Дейч. – М. : Энергия, 1979. – 240 с.
11. Kondratenko, Y. Distributed Somputer System for Monitoring and Control of Thermoacoustic Processes [Text] / Y. Kondratenko, V. Korobko, O. Korobko // *Proceedings of the 7th IEEE int. conf. IDAACS'2013, 12-14 September 2013*. – Vol. 1. – Berlin : Germany, 2013. – P. 249-253.
12. Кондратенко, Ю. П. Спеціалізована комп'ютерна система автоматичного контролю параметрів для оцінювання ефективності термоакустичних процесів [Текст] / Ю. П. Кондратенко, О. В. Коробко // *Системні технології : регіональний міжвузівський зб. наук. праць*. – Вип. 5 (82). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 104-111.
13. Зайцев, Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования [Текст] / Г. Ф. Зайцев. – К. : Вища школа, 1989. – 431с.

14. Попович, М. Г. Теорія автоматичного керування [Текст] / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К. : Либідь, 1997. – 290 с.

15. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление [Текст] / А. Пегат. – М. : БИНОМ Лаборатория Знаний, 2009. – 798 с.

16. Zadeh, L. A. Fuzzy sets [Text] / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338-353.

*Поступила в редакцию 12.06.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., директор С. І. Сербін, Машинобудівний інститут Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв.

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ МАШИНОЙ ТИПА «ДВИГАТЕЛЬ - ТЕПЛОВОЙ НАСОС» НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

***В. В. Коробко, А. В. Коробко, Г. В. Кондратенко***

В статье осуществлён анализ современных методов построения математических моделей термоакустических тепловых машин. Рассмотрен подход синтеза упрощённой математической модели с использованием экспериментальных данных и регрессионных методов построения парных зависимостей. На базе полученной модели авторами синтезирован ряд нечётких регуляторов, в том числе с комбинированным принципом управления. На основе имитационного моделирования проведен сравнительный анализ и продемонстрирована целесообразность применения нечётких регулирующих устройств в системах управления термоакустическими тепловыми машинами типа «двигатель - тепловой насос».

**Ключевые слова:** тепловые машины, термоакустика, математическая модель, нечеткие регуляторы.

## **CONTROL THERMOACOUSTIC THERMAL MACHINE TYPE "ENGINE - HEAT PUMPS" BASED ON FUZZY LOGIC**

***V. V. Korobko, O. V. Korobko, G. V. Kondratenko***

This paper provides the analysis methods of modern thermoacoustic thermal machines mathematical modeling. The approach of synthesis of simplified mathematical model using the experimental data and regression methods for building pairwise dependencies is given. Based on model obtained authors synthesized a series of fuzzy controllers, including the one with combined principle of control. Based on the simulation modeling the comparative analysis demonstrates the practicality of fuzzy control devices application in control systems of thermoacoustic thermal machines of type "engine and heat pump".

**Keywords :** thermal machines, thermoacoustic, mathematical model, fuzzy controllers.

**Коробко Володимир Владиславович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри суднових та стаціонарних енергетичних установок, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com.

**Коробко Олексій Володимирович** – канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютеризованих систем управління, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: oleksii.korobko@nuos.edu.ua.

**Кондратенко Галина Володимирівна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморський державний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна, e-mail: galvlad09@rambler.ru.