

СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕЧІТКИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ В СУДНОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Проблема регулювання (стабілізації) температури в приміщеннях морських рухомих об'єктів знаходиться постійно в полі зору спеціалістів в області суднової автоматики. При цьому постійно підвищуються вимоги до систем стабілізації температури з точки зору забезпечення необхідних показників якості. Як правило, суднові системи управління температурою повітря функціонують в умовах нестационарних збурень. Зокрема, при проектуванні автоматичних систем управління температурою в суднових приміщеннях необхідно враховувати той факт [5, 7], що параметри повітря в приміщенні безперервно змінюються під дією таких збурювальних впливів, як теплообмін даного приміщення з сусідніми і зовнішнім середовищем та тепловиділення людей, що знаходяться в приміщенні. При недостатньому рівні герметизації приміщень найбільш суттєвим збурювальним фактором є зовнішнє повітря, яке за температурою відрізняється від параметрів повітря в приміщенні. Оскільки значення збурювальних впливів постійно змінюються в різних режимах експлуатації судна, а часто і досить інтенсивно (температура навколишнього повітря, напрямок та сила вітру, сонячна або хмарна погода, кут падіння сонячних променів, кількість людей в приміщенні й т. і.), то система автоматичного управління температурою шляхом відповідного настроювання параметрів повітря, що примусово надсилається до приміщення, повинна компенсувати впливи збурюючих факторів для підтримки в приміщенні необхідного рівня температури повітря згідно з вимогами максимального комфорту [2].

Пошук найкращих алгоритмів та схемотехнічних рішень для проектування та реалізації систем управління температурою в приміщенні призвів до використання нечітких законів управління, що спираються на теорію нечітких множин та нечіткої логіки [6, 16]. Відповідно до теореми про нечітку апроксимацію, будь-яка математична система може бути апроксимована системою, заснованою на нечіткій логіці. Інакше кажучи, за допомогою природно-мовних висловлювань-правил "Якщо..., - то...", з наступною їхньою формалізацією засобами теорії нечітких множин, можна скільки завгодно точно відтворити довільний взаємозв'язок "вхід-вихід" без використання складного апарату диференційних та інтегральних

розрахунків, що традиційно застосовуються в керуванні й ідентифікації [1, 14]. Подібні системи, що базуються 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 [10, 11]. Зокрема, прикладами використання нечіткої логіки є: інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень для управління суднами в екстремальних умовах [8] та при проходженні вузькостей і проток [9]; система управління світлофором, в якій вхідні та вихідні сигнали (кількість машин, середня швидкість на вулиці, середня відстань до перехрестя, час горіння зеленого світла) описуються нечіткими лінгвістичними термами; система управління автономною вітроенергетичною установкою; нечіткі системи управління робототехнічними комплексами [3, 15] та ін.

В роботі [9] розглядається нечітка модель управління кондиціонером в приміщенні, а в ряді моделей кондиціонерів концерну Mitsubishi Heavy Industries для створення найбільш сприятливого клімату використовується спосіб, який отримав назву "нейротехнологія та нечітка логіка" (Neuro&Fuzzylogic) [14]. При роботі кондиціонера з нечіткою логікою сигнали датчиків фазифікуються, подальша інформація обробляється на основі нечітких правил, а після етапу дефазифікації отримані керувальні сигнали надходять на частотний регулятор двигуна компресора, швидкість обертання якого змінюється в залежності від відповідних значень функцій належності. Коливання температури при цьому зменшуються навіть у порівнянні з використанням ПД-регуляторів. Не дивлячись на вплив збурень температура в приміщенні підтримується на мінімально допустимому рівні, завдяки чому зменшується енергоспоживання.

Нечіткі алгоритми дозволяють застосовувати лінгвістичний опис для моделювання складних процесів, встановлювати нечіткі відношення між поняттями, описувати одні нечіткі поняття іншими, уже певними, прогнозувати поведінку об'єкта управління, формувати безліч альтернатив і здійснювати формальний опис нечітких правил для ухвалення рішення [4, 12].

Метою даної статті є дослідження методів структурно-алгоритмічного синтезу нечітких ПД-регуляторів типу Сугено та Мамдані для систем автоматичного управління температурою в судових приміщеннях, моделювання систем управління з синтезованими нечіткими регуляторами в умовах збурень та порівняльний аналіз властивостей і показників якості систем автоматичного управління, спроектованих на основі традиційного та нечітких ПД-регуляторів.

Принципова схема двоканальної системи [5, 13] управління температурою повітря в судновому приміщенні представлена на рис. 1. Повітря надходить в приміщення з магістралей I (холодне повітря) та II (тепле повітря) двоканальної системи кондиціонування. Співвідношення кількості повітря визначається положенням засувки 1. При повороті засувки, наприклад, за годинникову стрілкою кількість холодного повітря, яке надходить до змішувальної камери 9, збільшується, а кількість теплого повітря - зменшується.

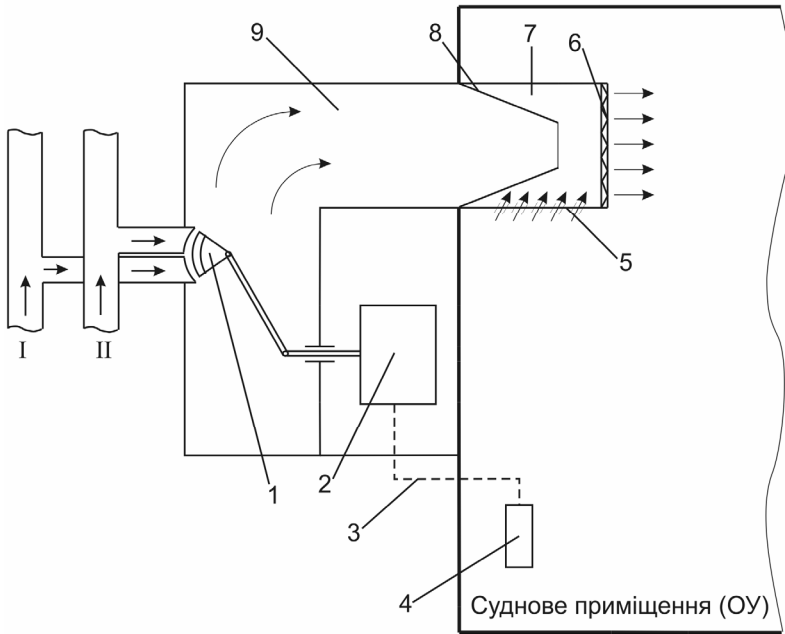


Рис. 1. Принципова схема регулювання температури повітря в приміщенні

При будь-якому положенні засувки загальна кількість повітря, яке надходить в змішувальну камеру 9 з обох каналів, залишається постійною. Зі змішувальної камери повітря через сопло 8 надходить в іншу змішувальну камеру 7. Завдяки наявності сопла здійснюється інжектування внутрішнього повітря приміщення через жалюзі 5. Свіже повітря через фільтр 6 надходить до приміщення, витісняючи зайве повітря через відповідні вентиляційні решітки.

Отже об'єктом управління є суднове приміщення, а регулюючим параметром – температура повітря в приміщенні t_{II} . Система автома-

тичного управління неперервно порівнює вихідний сигнал об'єкта управління t_{Π} з задавальним сигналом $t_{3\text{Ад}}$, зокрема відхилення регулюючого параметру від заданого значення $\varepsilon = t_{3\text{Ад}} - t_{\Pi}$ сприймається чутливим елементом (датчиком температури 4) і в відповідно перетвореному вигляді за допомогою лінії зв'язку 3 передається до керованого виконавчого механізму 2, що призначений для безпосереднього механічного переміщення s регулюючого органу (засувки 1).

При цьому керуючим впливом для об'єкта управління є зміна ϕ кількісного співвідношення теплого та холодного повітря, що надходить до приміщення:

$$\phi = \frac{G_X}{G_X + G_T} = \frac{G_X}{G_C}, \quad (1)$$

де G_X - витрати холодного повітря, кг/год; G_T - витрата теплого повітря, кг/год; $G_C = G_X + G_T$.

Доки тепловтрати та тепловиділення в приміщенні компенсуються кількістю тепла, що надходить зі свіжим повітрям, регулювальний орган (засувка) системи автоматичного керування знаходиться в фіксованому стані. Але, як тільки під дією тих чи інших факторів динамічна теплова рівновага порушується, система керування забезпечує відповідне переміщення засувки, намагаючись відновити порушену динамічну рівновагу. В подальшому дію всіх збурювальних факторів об'єднано в одне сумарне збурення Q_{Π} .

Математичну модель приміщення як об'єкта управління, що характеризує поведінку регулюючого параметра t_{Π} (температури повітря) в різних умовах, можна представити у вигляді [5]

$$T_{Oy} \frac{d\psi}{d\tau} + \psi = k_{Oy}\mu + f(\tau), \quad (2)$$

де τ - параметр поточного часу; T_{Oy} - постійна часу приміщення; k_{Oy} - коефіцієнт передачі, що враховує базові значення $\phi_0, t_{\Pi 0}$; $f(\tau)$ - виражений у відносних одиницях зовнішній збурювальний вплив; $\psi = \Delta t_{\Pi} / t_{\Pi 0}$ - вихідний сигнал об'єкта керування у відносних одиницях; $\mu = \Delta\phi / \phi_0$ - вхідний (керувальний) сигнал об'єкта керування у відносних одиницях. При цьому параметри визначаються наступним чином:

$$T_{Oy} = \frac{V\gamma C_p}{\frac{\partial Q_{\Pi}}{\partial t_{\Pi}} - \frac{\partial Q_C}{\partial t_{\Pi}}};$$

$$k_{Oy} = \frac{\Phi_0}{t_{\Pi 0}} \frac{\frac{\partial Q_C}{\partial \varphi}}{\frac{\partial Q_{\Pi}}{\partial t_{\Pi}} - \frac{\partial Q_C}{\partial t_{\Pi}}};$$

$$f(\tau) = \frac{\Phi(\tau)}{t_{\Pi 0} \left(\frac{\partial Q_{\Pi}}{\partial t_{\Pi}} - \frac{\partial Q_C}{\partial t_{\Pi}} \right)},$$

де Q_C - кількість тепла, яке заноситься в приміщення зі свіжим повітрям, ккал/год; Q_{Π} - сума тепловтрат у навколишнє середовище та теплових виділень людей, які знаходяться в приміщенні, ккал/год; V - об'єм повітря в приміщенні, m^3 ; γ - густина повітря в приміщенні, kg/m^3 ; C_p - ізобарна масова теплоємність повітря в приміщенні, ккал/ $kg \cdot$ град; $\Phi(\tau) = (\partial Q_C / \partial t_{\Pi}) \Delta t_{\Pi} - F(\tau)$ та $F(\tau)$ - функція, що характеризує собою зовнішнє збурення.

Рівняння (2) характеризує даний об'єкт керування як аперіодичну ланку першого порядку.

Проаналізувавши математичні моделі основних компонентів системи автоматичного керування, зокрема для прикладу, коли автоматичне регулювання температури повітря в приміщенні здійснюється за допомогою регулятора прямої дії з дистанційним датчиком температури, представленим в роботі [5].

Динаміка датчика температури та виконавчого механізму (як єдиної ланки) визначається рівнянням другого порядку:

$$T_{p2} \frac{d^2 \eta}{d\tau^2} + T_{p1} \frac{d\eta}{d\tau} + \eta = k_1 \psi, \quad (3)$$

де $\eta = \Delta S / S_0$ - відносне переміщення вихідного штоку виконавчого механізму; T_{p1} та T_{p2} - постійні часу регулятора; k_1 - коефіцієнт підсилення ланки.

Оскільки має місце співвідношення $T_{p2} \ll T_{p1}$, то рівняння (3) можна спростити до виду:

$$T_{p1} \frac{d\eta}{d\tau} + \eta = k_1 \psi. \quad (4)$$

Керувальний орган (засувка) є останньою ланкою контуру регулювання, рівняння динаміки якої відповідає рівнянню типової підсилювальної ланки

$$\mu = k_2 \eta, \quad (5)$$

де k_2 - коефіцієнт підсилення керувального органу; $\mu = \Delta\phi/\phi_0$ - відносна зміна доли холодного повітря в загальному потоці свіжого повітря, яке надходить до приміщення.

В даному випадку регулятор об'єднує в собі, як в одній ланці, чутливий елемент (датчик температури), виконавчий механізм та керувальний механізм. При цьому входом регулятора є величина ψ (вихідний сигнал об'єкта керування), а виходом – величина μ (вхідний сигнал об'єкта керування).

На основі рівнянь (3) - (5) сформуємо рівняння П-регулятора у вигляді:

$$T_p \frac{d\mu}{d\tau} + \mu = k_p \psi, \quad (6)$$

де $T_p = T_{p1}$ - постійна часу регулятора; $k_p = k_1 k_2$ - коефіцієнт підсилення регулятора.

Для моделювання системи автоматичного управління температурою повітря, динаміка якої базується на рівняннях (3) - (6), сформуємо відповідну структурну схему (рис. 2), де позначено: ВМ – виконавчий механізм; РО – керувальний робочий орган; ОУ – об'єкт управління (суднове приміщення); $t_{вх} = t_{зАд}$; $t_{вИХ} = t_{п}$.

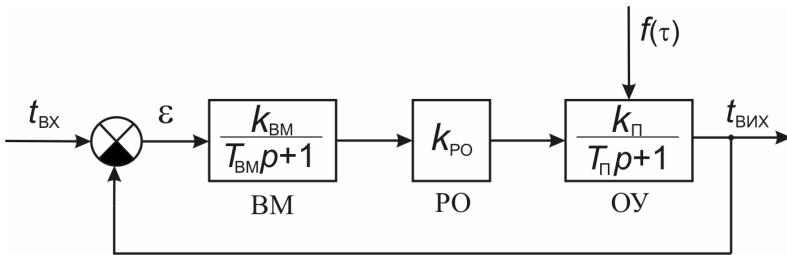


Рис. 2. Структура традиційної системи керування

Передаточні функції елементів системи керування мають наступний вигляд:

а) для виконавчого механізму ВМ

$$W_{\text{ВМ}}(p) = \frac{k_{\text{ВМ}}}{T_{\text{ВМ}}p + 1}, \quad (7)$$

де $k_{\text{ВМ}}$ - коефіцієнт передачі ВМ; $T_{\text{ВМ}}$ - постійна часу;

б) для керувального органу РО

$$W_{\text{РО}}(p) = k_{\text{РО}}; \quad (8)$$

в) для об'єкта управління ОУ

$$W_{\text{ОУ}}(p) = \frac{k_{\text{ОУ}}}{T_{\text{ОУ}}p + 1}. \quad (9)$$

В подальшому для здійснення порівняльного аналізу ефективності традиційних та нечітких регуляторів (на прикладі регуляторів ПД-типу) дослідження проводились при наступних параметрах моделювання: $k_{\text{ОУ}} = 45$; $T_{\text{ОУ}} = 63$ с; $k_{\text{РО}} = 1,45$; $k_{\text{ВМ}} = 1,5$; $T_{\text{ВМ}} = 0,3$ с; $t_{\text{зАд}} = 20$ град.; збурювальний вплив задано у вигляді ступінчатих сигналів різної ширини та амплітуди.

На рис. 3 представлена функціональна схема системи автоматичного управління (САУ) температурою в судновому приміщенні з нечітким ПД-регулятором. На вхід нечіткого регулятора подається похибка ε системи та похідна від похибки $d\varepsilon/dt$, а на виході – формується сигнал управління U , який поступає на вхід ВМ.

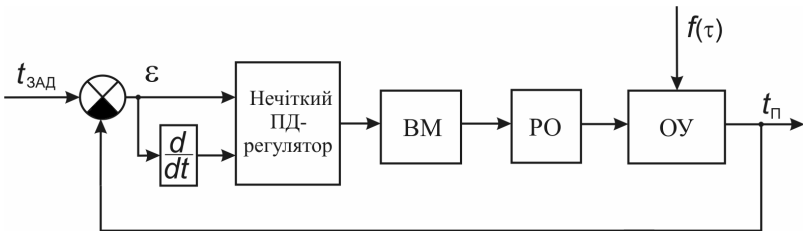


Рис. 3. Функціональна схема САУ з нечітким ПД-регулятором

Основними етапами нечіткого логічного виводу Мамдані-типу є: фазифікація, агрегація, активізація, акумуляція та дефазифікація [1].

На етапі фазифікації для кожної вхідної та вихідної змінної визначається відповідне їй лінгвістичне значення та ступінь належності до відповідної нечіткої множини. Для першої вхідної змінної ε та для другої вхідної змінної $d\varepsilon/dt$ обрано по 5 лінгвістичних термів, а для вихідної змінної U – 7 лінгвістичних термів. Параметри лінгвістичних термів представлені в табл. 1.

Лінгвістичні терми нечіткого регулятора Мамдані-типу

Терм	Тип функції належності	Діапазон значень
<i>Для вхідної змінної ε</i>		
BN – велика від’ємна	Трикутна	[-150 -100 -50]
SN – мала від’ємна	Трикутна	[-100 -50 0]
Z – нульова	Трикутна	[-50 0 50]
SP – мала додатна	Трикутна	[0 50 100]
BP – велика додатна	Трикутна	[50 100 150]
<i>Для вхідної змінної $d\varepsilon/dt$</i>		
BN – велика від’ємна	Трикутна	[-1200 -800 -400]
SN – мала від’ємна	Трикутна	[-800 -400 0]
Z – нульова	Трикутна	[-400 0 400]
SP – мала додатна	Трикутна	[0 400 800]
BP – велика додатна	Трикутна	[400 800 1200]
<i>Для вихідної змінної U</i>		
VBN – дуже велика від’ємна	Трикутна	[-73 -55 -37]
BN – велика від’ємна	Трикутна	[-55 -37 -18]
SN – мала від’ємна	Трикутна	[-37 -18 0]
Z – нульова	Трикутна	[-18 0 18]
SP – мала додатна	Трикутна	[0 18 37]
BP – велика додатна	Трикутна	[18 37 55]
VBP – дуже велика додатна	Трикутна	[37 55 73]

Для реалізації нечіткого логічного виводу необхідно сформувати базу знань. Правила бази знань за алгоритмом Мамдані являють собою лінгвістичні твердження виду [10]:

$$\text{ЯКЩО } " \varepsilon = x " \text{ I } " d\varepsilon/dt = y ", \text{ ТО } " U = z ",$$

де x , y , z – відповідні значення лінгвістичних термів.

Для даного випадку база знань складається з 25 нечітких правил, які відповідають всім комбінаціям двох вхідних змінних ε та $d\varepsilon/dt$. Структура бази правил нечіткого ПД-регулятора Мамдані-типу представлена в табл. 2.

Нечітка база правил Мамдані-регулятора

Швидкість зміни похибки, $d\varepsilon/dt$	Похибка, ε				
	<i>BN</i>	<i>SN</i>	<i>Z</i>	<i>SP</i>	<i>BP</i>
<i>BN</i>	VBN	VBN	VBN	BN	SN
<i>SN</i>	VBN	BN	BN	SN	SP
<i>Z</i>	SN	SN	Z	SP	SP
<i>SP</i>	SN	SP	BP	BP	VBP
<i>BP</i>	SP	BP	VBP	VBP	VBP

Наступний етап – етап агрегації являє собою процедуру визначення ступенів істинності кожного з правил системи нечіткого виводу, а подальші етапи активізації та акумуляції – процедуру знаходження ступенів істинності кожного з сьоми підзаключень правил нечітких продукцій, тобто процедуру знаходження функцій належності для кожної з вихідних лінгвістичних змінних. Метою акумуляції є об'єднання ступенів істинності всіх нечітких правил для формування результуючої функції належності нечіткого рішення, яке потрібно перетворити в чітке значення вихідного сигналу. Процедура знаходження чіткого числового значення вихідного сигналу U являє собою процедуру дефазифікації.

Існує кілька методів дефазифікації: метод центру тяжіння, метод центру площини, метод лівого модального значення, метод правого модального значення та ін. Для даного випадку обираємо метод центру тяжіння, згідно з яким значення вихідного сигналу розраховується за формулою [10]:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \cdot \mu(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)},$$

де n – кількість вихідних лінгвістичних змінних; u_i – значення відповідної вихідної лінгвістичної змінної; $\mu(u_i)$ – значення функції належності відповідної вихідної лінгвістичної змінної.

В нечіткому регуляторі Сугено-типу на етапі фазифікації для першої вхідної змінної ε та для другої вхідної змінної $d\varepsilon/dt$ обрано по 5 лінгвістичних термів, як і в попередньому випадку. Параметри лінгвістичних термів входів регулятора представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Лінгвістичні терми нечіткого регулятора Сугено-типу

Терм	Тип функції належності	Діапазон значень
<i>Для вхідної змінної ε</i>		
BN – велика від’ємна	Гаусівська	[17,3 -100]
SN – мала від’ємна	Гаусівська	[17,3 -50]
Z - нульова	Гаусівська	[17,3 0]
SP – мала додатна	Гаусівська	[17,3 50]
BP – велика додатна	Гаусівська	[17,3 100]
<i>Для вхідної змінної $d\varepsilon/dt$</i>		
BN – велика від’ємна	Гаусівська	[144,5 -800]
SN – мала від’ємна	Гаусівська	[144,5 -400]
Z - нульова	Гаусівська	[144,5 0]
SP – мала додатна	Гаусівська	[144,5 400]
BP – велика додатна	Гаусівська	[144,5 800]

Для реалізації нечіткого логічного виводу також необхідно сформувати відповідну нечітку базу правил. Правила бази знань за алгоритмом Сугено [10] являють собою лінгвістичні твердження виду:

ЯКЩО " $\varepsilon = x$ " І " $d\varepsilon/dt = y$ ", ТО " $U = k_{\Pi}\varepsilon + k_{Д}d\varepsilon/dt$ ".

Частина правила "ТО" представляє собою в даному випадку лінійну комбінацію входів. Кожна лінійна комбінація визначається вектором коефіцієнтів

$$mf_i = [k_{\Pi}, k_{Д}],$$

де i – номер правила, що приймає значення від 1 до 25; k_{Π} – коефіцієнт пропорційності для сигналу похибки ε ; $k_{Д}$ – коефіцієнт пропорційності для диференційної складової $d\varepsilon/dt$.

В процесі проектування нечіткого регулятора постає завдання визначення всіх коефіцієнтів $mf_i = [k_{\Pi}, k_{Д}]$ шляхом навчання відповідного Сугено-регулятора.

В табл. 4 зведено значення всіх знайдених в процесі навчання регулятора коефіцієнтів для визначення відповідних складових вихідного сигналу.

Для процедури дефазифікації у випадку Сугено-регулятора також обрано метод центру тяжіння.

Таблиця 4

Оптимізовані параметри Сугено-регулятора (k_{Π} , $k_{\text{Д}}$)

№ пра- вила і	k_{Π}					$k_{\text{Д}}$				
	1-5	95,14	74,31	28,12	87,53	64,37	7,603	5,281	3,645	6,232
6-10	37,24	12,11	44,35	23,17	36,44	2,605	0,340	-3,872	2,104	-2,716
11-15	24,43	56,29	48,74	32,11	64,32	1,981	2,783	-4,371	1,562	-3,704
16-20	76,32	24,19	47,29	54,42	43,16	6,481	1,576	2,143	3,267	4,756
21-25	64,76	32,19	52,87	42,19	66,48	5,348	3,173	-4,488	3,236	5,372

Передаточна функція ПД-регулятора має вигляд:

$$W_{\text{ПД}}(p) = k_{\Pi} + k_{\text{Д}} p .$$

Для моделювання обираємо наступні значення коефіцієнтів k_{Π} та $k_{\text{Д}}$, знайдені в результаті параметричної оптимізації: $k_{\Pi} = 27,64$; $k_{\text{Д}} = 5,61$.

В табл. 5 представлено порівняльний аналіз показників якості систем управління з традиційним та нечіткими ПД-регуляторами для різних значень вхідних сигналів (задавальних впливів) $t_{\text{Зад}} \in \{17^{\circ} \text{C}, 20^{\circ} \text{C}, 22^{\circ} \text{C}\}$, де позначено: σ – перерегулювання, $\sigma = (t_{\text{МАХ}} - t_{\text{УСТ}}) \cdot t_{\text{УСТ}} \cdot 100\%$; $\tau_{\text{ПД}}$ – час регулювання (тривалість передічного процесу); Δ – статична похибка, $\Delta = (t_{\text{Зад}} - t_{\text{УСТ}}) \cdot t_{\text{Зад}} \cdot 100\%$; β – коливальність (число переходів кривої $t_{\Pi}(\tau)$ через усталене значення $t_{\text{УСТ}}$ за час $\tau_{\text{ПД}}$).

На рис. 5 представлено перехідні процеси для систем управління з різними типами регуляторів: а) при нульових початкових умовах; б) для $t_{\text{Зад}} = 20^{\circ} \text{C}$; в) при відсутності збурювальних впливів. Порівняльний аналіз наведених на рис. 5 результатів показує, що найкращі показники якості має система з регулятором Сугено-типу, а саме: час регулювання $\tau_{\text{ПД}}$ складає 0,4 с, а параметри σ , β та Δ дорівнюють нулю. В системі управління з традиційним ПД-регулятором також відсутнє перерегулювання, але час регулювання $\tau_{\text{ПД}}$ складає 1,3 с.

Таблиця 5

Показники якості САУ з різними типами ПД-регуляторів

Задана температура, $t_{\text{зад}}, ^\circ\text{C}$	Тип регулятора	Показники якості			
		$\sigma, \%$	$\tau_{\text{ПД}}, \text{c}$	$\Delta, \%$	β
17	ПД-регулятор	0	1,3	0	0
	Регулятор Мамдані	2	3,15	0,7	2
	Регулятор Сугено	0	0,4	0	0
20	ПД-регулятор	0	1,3	0	0
	Регулятор Мамдані	1,5	0,25	0,65	2
	Регулятор Сугено	0	0,4	0	0
22	ПД-регулятор	0	1,3	0	0
	Регулятор Мамдані	0,7	3,55	0,6	2
	Регулятор Сугено	0	0,45	0	0

Система управління з регулятором типу Мамдані має нижчі показники в порівнянні з іншими системами, оскільки дана система, згідно її перехідному процесу, має перерегулювання $\sigma = 1,5 \%$, час регулювання $\tau_{\text{ПД}} = 3,25 \text{ c}$, коливальність $\beta = 2$ та статична похибка $\Delta = 0,65 \%$.

На рис. 6 представлено перехідні процеси систем управління з традиційним та нечіткими ПД-регуляторами типу Мамдані та Сугено при наявності збурень $f(t)$, що носять ступінчатий характер (при нульових початкових умовах, для $t_{\text{зад}} = 20^{\circ} \text{C}$).

Реакція на максимальний збурюючий вплив амплітудою 30°C для систем з традиційним чітким регулятором та з регулятором Сугено типу становить близько $1,5 \%$ від значення вихідного сигналу, тоді як для системи з регулятором типу Мамдані – 7% .

Результати моделювання САУ в умовах короткочасних ступінчатих збурюючих впливів показують, що відхилення вихідного сигналу від заданого значення для систем управління з чітким ПД-регулятором та нечітким ПД-регулятором Сугено-типу є незначним, оскільки складає лише $1,5 - 2 \%$ (приблизно $0,4^{\circ} \text{C}$), що з точки зору регулювання температури не має суттєвого значення. Щодо системи управління з нечітким

ПД-регулятором Мамдані-типу, то для неї відхилення вихідного сигналу при короткочасних збурюючих впливах є суттєвим і досягає майже 7 % (при максимальному збуренні величиною $- 30^{\circ}\text{C}$), а це вже відповідає зниженню заданої температури повітря на $1,5 - 2^{\circ}\text{C}$ температури, що може не відповідати вимогам щодо динамічних показників якості.

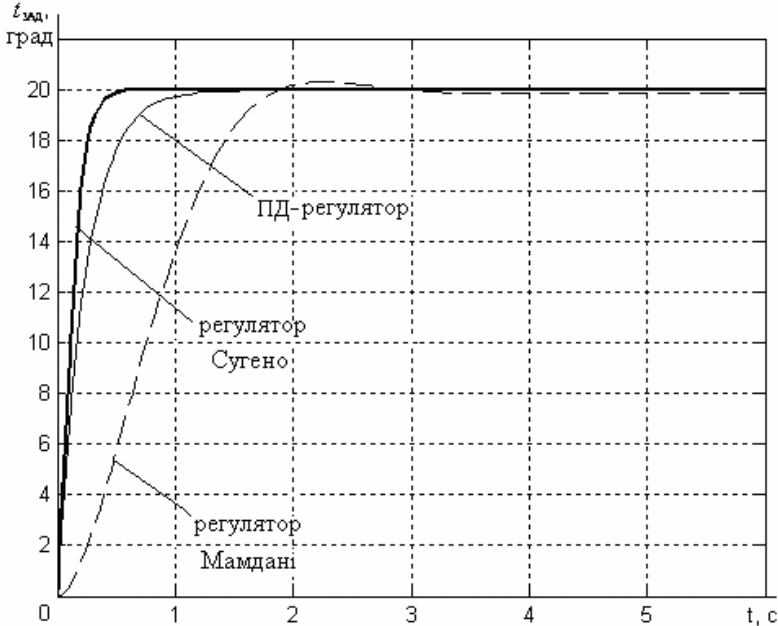


Рис. 5. Перехідні процеси при $t_{\text{зад}} = 20^{\circ}\text{C}$

В даному дослідженні для проведення порівняльного аналізу представлено розробку трьох типів регуляторів, зокрема нечітких ПД-регуляторів типу Мамдані та Сугено та традиційного ПД-регулятора для системи управління температурою в судовому приміщенні. При цьому процедуру параметричної оптимізації здійснено тільки для нечіткого ПД-регулятора Сугено-типу та традиційного ПД-регулятора.

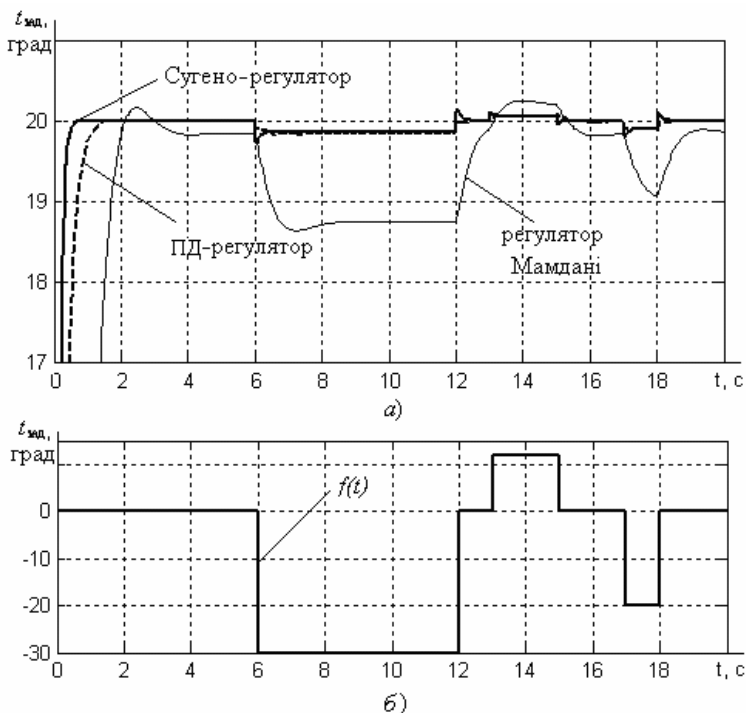


Рис. 6. Перехідні процеси: $a - t_{зад} = 20^0$ С з урахуванням збурень; $b - f(t)$

На основі аналізу результатів моделювання можна зробити висновок, що для даної системи управління доцільно застосовувати нечіткий регулятор Сугено-типу, оскільки система управління з таким нечітким регулятором має кращі показники якості управління в порівнянні з системою, синтезованою на основі традиційного ПД-регулятора. Застосування нечіткого регулятора Мамдані-типу призвело до зниження показників якості відповідної системи управління в порівнянні з вищерозглянутими системами, що підтверджує необхідність проведення процедури параметричної оптимізації для покращення динамічних властивостей і характеристик будь-якої системи управління. В подальшому доцільно провести дослідження нечітких Мамдані регуляторів на основі їх структурно-параметричної оптимізації та здійснити порівняльний аналіз складності апаратно-програмної реалізації розглянутих типів регуляторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Грабовский Г.Г., Рюмшин Н.А. Системы фuzzi-управления. – К.: Техніка, 1997. – 208 с.
2. Голиков В.А. Научные основы управления микроклиматом судна. – Одесса: ОГМА, 1990. – 321 с.
3. Зайченко Ю.П. Основы проектування інтелектуальних систем. – К.: Видавничий дім "Слово", 2004. – 352 с.
4. Захаров В.Н., Ульянов С.В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. I. Научно-организационные, технико-экономические и прикладные аспекты // Техническая кибернетика. – 1992. - № 5. - С. 171 - 196.
5. Калинин Ю.Ф. Регулирование судовых установок кондиционирования воздуха. – Николаев: НКИ, 1975. – 63 с.
6. Кофман А., Хил Алуха Х. Введение теории нечетких множеств в управлении предприятиями. Пер с исп. – Минск: Вышэйшая школа, 1992. – 224 с.
7. Кондратенко Ю.П. Динамика элементов и систем автоматического регулирования холодильных установок. – Николаев: НКИ, 1984. – 56 с.
8. Кондратенко Ю.П. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений при управлении судами в экстремальных условиях // Судостроение. 2004. – №3, – С. 21.
9. Кондратенко Ю.П., Сидоренко С.А. Устройства с нечеткой логикой для автоматизации процессов поддержки принятия решений при прохождении судов в узостях и протоках // Сборник научных трудов УГМТУ. – Николаев: УГМТУ, 2001. – №5, – С. 124 - 134.
10. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – Спб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
11. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
12. Новак В., Перфильева И., Мочкорж И. Математические принципы нечеткой логики. Пер. с англ. /Под ред. Аверкина А.Н. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 352 с.
13. Нелепин Р.А., Соболев Л.Г., Волков А.А. Автоматизация морских судов. – Л.: Судостроение, 1983. – 80 с.
14. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: Нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: "Універсум-Вінниця", 1999. – 320 с.
15. Lewis F.L., Campos J., Selmic R. Neuro-Fuzzy Control of Industrial Systems with Actuator Nonlinearities (Frontiers in Applied Mathematics). – Philadelphia, PA: SIAM, 2002. – 244 p.
16. Zadeh L. Fuzzy sets // Information and control. – 1965. – No. 8. – P. 338 – 353.