

УДК 621.74.043.2

В.С. Богушевський, Р.В. Самарай, В.П. Самарай

## **НЕЧІТКА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПРЕС-ФОРМИ**

*Анотація:* Процес лиття під тиском (ЛПТ) – найбільш перспективний спосіб виробництва виливків, що піддається автоматизації, так як все технологічне устаткування повністю механізоване й підготовлене для функціонування у складі АСК ТП. Головною метою роботи на сьогоднішній день є підвищення ефективності керування процесом ЛПТ шляхом удосконалення й впровадження системи управління, в основі якої лежать моделі нечіткої логіки, з автоматичним вибором структури математичної моделі й самонастроювання її параметрів для безперервного функціонування в режимі керування. Автоматична система керування (АСК) забезпечує нормальну роботу комплексів ЛПТ при мінімальній собівартості продукції, підвищує якість і розширює сортамент відливок, що виплавляються.

*Ключові слова:* нечітка логіка, система регулювання, лиття під тиском.

### **Вступ**

В теперішній час лиття під тиском (ЛПТ) є одним з найбільш розповсюджених спеціальних способів виготовлення високоточних відливок із кольорових сплавів на основі алюмінію, міді, цинку, магнію. Основний недолік ЛПТ – висока собівартість відливок, яка в значному ступені (до 75 %) визначається витратами на проектування і виготовлення прес-форм, а також їх експлуатаційною стійкістю. Остання в значній мірі залежить від кількості теплових ударів [1]. Зменшення кількості цих небажаних явищ досягають регулюванням температури прес-форми. У практиці ЛПТ для попереднього розігріву прес-форми використовують газові пальники й електронагрівачі. В останній час з цією метою все ширше використовують установки для підігріву і охолодження форми рідкими теплоносіями [2]. Найбільш важливий вузол – термостат, що зв'язаний з каналами нагріву-охолодження прес-форм гнучкими з'єднувальними рукавами. При використанні термостатів на перший план висувається точність регулювання температури рідкого теплоносія [3]. При цьому використання типових ПІД-регуляторів не призводить до позитивного ефекту.

Наведені в статті дослідження проводились в Національному технічному університеті України “КПІ” по темі “Система керування машини лиття під тиском на основі нечіткої логіки”, державний реєстраційний номер 0114U002566.

### **Постановка задачі**

Метою досліджень є підвищення точності термостатування прес-форми.

## Результати досліджень

Дослідження проводились на термостаті, що представляє собою теплоізований, заповнений теплоносієм бак.

Теплообмінник є типовим об'єктом управління з запізненням. Останнє значно зменшує швидкість системи і динамічну точність об'єкта управління.

Передаточна функція такого об'єкта  $W_o(s) = e^{-sT}G(s)$ , де  $G(s)$  – передаточна функція об'єкта без запізнення. Найбільш ефективним методом боротьби з запізненням є охоплення регулятора Р ланкою зворотного зв'язку з передаточною функцією  $W_{oc}(s) = (1 - e^{-sT})G(s)$ , яку називають предиктором (випереджувачем) Сміта. Структурні схеми систем автоматичного управління з предиктором Сміта наведені на рис. 1 а,б. Предиктор Сміта може бути включений також паралельно об'єкту управління, як показано на рис. 1в,г [4].

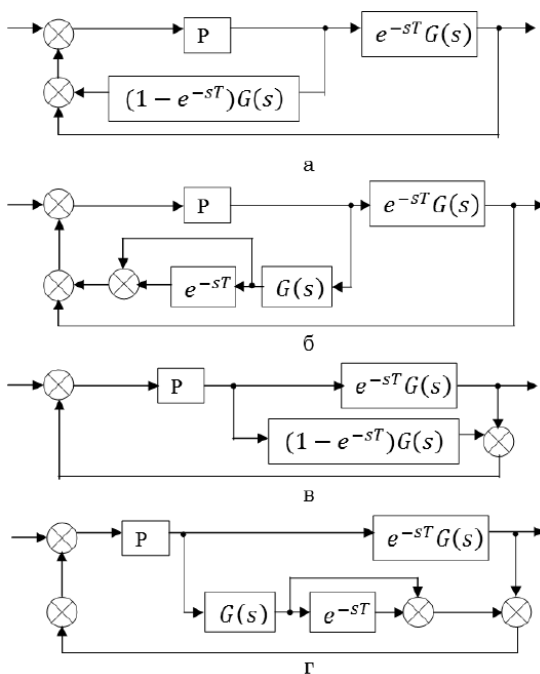


Рис. 1 – Структурні схеми систем автоматичного управління з предиктором Сміта

Для всіх схем передаточна функція замкнутої системи управління  $W_3(s)$  має вигляд

$$W_3(s) = \frac{W_p(s)G(s)}{1 + W_p(s)G(s)}e^{-sT}, \quad (1)$$

де  $W_p(s)$  – передаточна функція регулятора.

Якщо синтезувати регулятор для об'єкта без запізнювання  $G(s)$ , то при наявності запізнення якість перехідного процесу не зміниться, а відбувається лише зміщення вихідної змінної системи на час запізнення  $T$ . Ланку запізнення з передаточною функцією  $e^{-sT}$  при моделюванні реалізуємо наближенням Паде першого порядку

$$e^{-sT} \approx \frac{2 - Ts}{2 + Ts} \quad (2)$$

або наближенням Паде другого порядку

$$e^{-sT} \approx \frac{12 - 6Ts + T^2s^2}{12 + 6Ts + T^2s^2}. \quad (3)$$

### Вибір вхідних та вихідних параметрів процесу з побудовою функцій приналежності

При проектуванні системи управління з оптимальним за швидкістю цифровим регулятором і об'єктом управління з чистим запізненням так, щоб система “апроксимувала” довільне вхідне діяння сигналом, який лінійно змінюється на інтервалах регулювання, необхідно визначати оптимальні керуючі діяння на об'єкт управління. Ці діяння на об'єкт управління з передаточною функцією  $e^{-sT}G(s)$  можна знайти модифікуючи формули, що отримані в роботах [5–7], для оптимальних керуючих діянь на об'єкт управління з передаточною функцією  $G(s)$  наступним чином:

1. Інтервал регулювання визначити як  $t_p = Nh + \tau$ , де  $N$  – порядок передаточної функції об'єкта управління,  $h$  – крок квантування у цифровому регуляторі,  $T \equiv \tau$  – час запізнення.

2. Оскільки за час запізнення помилка змінюється на величину  $\tau\Delta\sigma$ , то замість помилки системи  $\theta_n$  в момент початку  $n$ -го інтервалу регулювання (в момент  $nt_p$ ) у формули необхідно підставити  $\theta_n + \tau\Delta\sigma$ , де  $\Delta\sigma = \sigma_n - \sigma_{n-1}$ , тут  $\sigma_n$  – перша різниця вхідного діяння на  $n$ -му інтервалі регулювання  $nt_p \leq t \leq (n+1)t_p$ ,  $\sigma_{n-1}$  – перша різниця вхідного діяння на  $(n-1)$ -му інтервалі регулювання  $(n-1)t_p \leq t \leq nt_p$ .

Наприклад, на вхід об'єкта управління, математична модель якого описується передаточною функцією  $G(s) = \alpha [s(s+a)(s+b)]^{-1}$  на  $n$ -му інтервалі регулювання  $nt_p \leq t \leq (n+1)t_p$  необхідно подавати діяння:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_0 = K_0 (\Delta U + S_0 \Delta \sigma) + R \sigma_{n-1}; nt_p \leq t \leq nt_p + h; \\ m_1 = K_0 [q_1 (\Delta U + S_0 \Delta \sigma) + h \Delta \sigma] + R \sigma_{n-1}; nt_p + h \leq t \leq nt_p + 2h; \\ m_2 = K_0 [q_2 (\Delta U + S_0 \Delta \sigma) + h \Delta \sigma (1 + q_1)] + R \sigma_{n-1}; \\ \quad nt_p + 2h \leq t \leq nt_p + 3h; \end{array} \right. \quad (4)$$

де  $K_0 = \frac{ab}{\alpha h(1-A)(1-B)}$ ;  $S_0 = 3h + \frac{a+b}{ab} - \frac{h(2+q_1)}{(1-A)(1-B)}$ ;  $R = \frac{ab}{\alpha}$ ;  $q_1 = -(A+B)$ ;  $q_2 = AB$ ;  $A = e^{-ah}$ ;  $B = e^{-bh}$ .  $\Delta U = \theta_n$ .

Тут  $\theta_n$  – помилка системи в момент  $n$ -го інтервала регулювання, тобто помилка системи в момент  $nt_p$ . Інтервал регулювання  $t_p = Nh = 3h$   $N = 3$  – порядок об'єкта;  $h$  – крок квантування; на  $(n-1)$ -му інтервалі регулювання  $(n-1)t_p \leq t \leq nt_p$  вхідне діяння характеризується першою різницею  $\sigma_{n-1}$ , на  $n$ -му інтервалі регулювання  $nt_p \leq t \leq (n+1)t_p$  – першою різницею  $\sigma_n$ ;  $\Delta \sigma = \sigma_n - \sigma_{n-1}$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$

Підкреслимо, що  $m_0, m_1, m_2$  – прямокутні керуючі імпульси, кожний з яких має тривалість  $h$  і відповідну амплітуду. Якщо число імпульсів  $N$ , де  $N$  – порядок об'єкта, то інтервал регулювання  $t_p = Nh$ .

На вхід об'єкта керування з передаточною функцією  $G(s) = \alpha e^{-\tau s} [s(s+a)(s+b)]^{-1}$  необхідно, починаючи з моменту  $nt_p$ , подавати діяння:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_0 = K_0 (\Delta U + \tau \Delta \sigma + S_0 \Delta \sigma) + R \sigma_{n-1}; nt_p \leq t \leq nt_p + h; \\ m_1 = K_0 [q_1 (\Delta U + \tau \Delta \sigma + S_0 \Delta \sigma) + h \Delta \sigma] + R \sigma_{n-1}; \\ \quad nt_p + h \leq t \leq nt_p + 2h; \\ m_2 = K_0 [q_2 (\Delta U + \tau \Delta \sigma + S_0 \Delta \sigma) + h \Delta \sigma (1 + q_1)] + R \sigma_{n-1}; \\ \quad nt_p + 2h \leq t \leq nt_p + 3h; \end{array} \right. \quad (5)$$

а також  $m_3 = R \sigma_{n-1}$ , якщо  $nt_p + 3h \leq t \leq nt_p + 3h + \tau$ . (6)

Порівнюючи вирази (4) і (5) відмітимо, що для об'єкта із запізнюванням можна використовувати формули (4) замість формул (5) для керуючих імпульсів, але для цього необхідно у формулах (4) величину  $S_0$  замінити новим значенням  $S_0^* = S_0 + \tau$ :

$$S_0^* = 3h + \frac{a+b}{ab} - \frac{h(2+q_1)}{(1-A)(1-B)} + \tau. \quad (7)$$

При розрахунках можна час запізнювання  $\tau$  (особливо при великому запізнюванні) виражати через ціле число кроків квантування  $\tau = Lh$ . Тоді інтервал регулювання можна визначити як  $t_p = (N+L)h$ . При цьому у кожному інтервалі регулювання після  $N$  прямокутних керуючих імпульсів проходить  $L$  прямокутних імпульсів однакової амплітуди  $R \sigma_{n-1}$ .

Якщо  $\tau$  менше  $h$ , то зручно крок квантування  $h$  виражати через ціле число інтервалів запізнювання  $\tau$ :  $h = M\tau$ . Тоді інтервал регулювання можна визначити як  $t_p = Nh + \tau = (NM+1)\tau$ .

Застосуємо стандартну схему системи керування з нечітким регулятором (НР) [8] (рис. 2).

НР реалізується на мікропроцесорі, й працює у дискретному режимі. Тому система автоматичного керування з НР вміщує пристрої зв'язку з об'єктом – АЦП і ЦАП. АЦП квантує неперервну помилку  $\theta(t) = u(t) - x(t)$  з кроком квантування  $h$ . В якості першої і другої похідної обчислювали першу і другу різницю за формулами

$$\theta(k) = [\theta(k) - \theta(k - 1)] / h; \tag{8}$$

$$\theta(k) = [\theta(k) - \theta(k - 1)] / h = [\theta(k) - 2\theta(k - 1)] / h^2, \tag{9}$$

де  $\theta(k)$  – квантована помилка на виході АЦП.

ЦАП представляє собою фіксатор нульового порядку з передаточною функцією  $W(s) = (1 - e^{-hs}) / s$ .

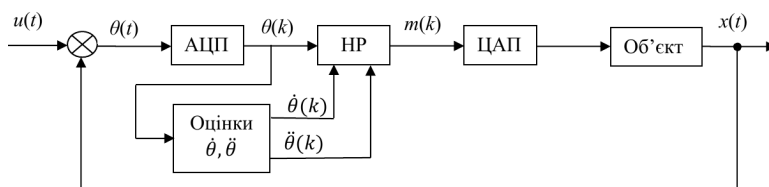


Рис. 2 – Схема керування з цифровим регулятором: АЦП — аналого-цифрової перетворювач; ЦАП — цифро-аналоговий перетворювач

При вирішенні задачі синтезу нечіткого регулятора приймаємо число термів, з допомогою якого оцінюють лінгвістичні змінні (вхідні й вихідний параметр НР) помилки системи в регулюванні температури  $\theta$ , швидкість зміни (перша похідна) помилки  $\dot{\theta}$ , прискорення (друга похідна) помилки  $\ddot{\theta}$ , керуюче діяння на об'єкт  $m$ , таким, що дорівнює 3. Установимо діапазони зміни лінгвістичних змінних рівними  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ ,  $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$ ,  $[\ddot{\theta}_{\min}, \ddot{\theta}_{\max}]$ , і  $[m_{\min}, m_{\max}]$ . Перерахунок значень кожної лінгвістичної змінної  $x_i, i = 1, n, n = 4$ , у відповідний елемент керування  $u^* \in [0, 1]$  визначається виразом

$$u_i^* = (x_i - x_{ni}) / (x_{ei} - x_{ni}), \tag{10}$$

на основі якого знаходимо:

$$\begin{cases} u_1^* = (\Theta - \Theta_{\min}) / (\Theta_{\max} - \Theta_{\min}); \\ u_2^* = (\dot{\Theta} - \dot{\Theta}_{\min}) / (\dot{\Theta}_{\max} - \dot{\Theta}_{\min}); \\ u_3^* = (\ddot{\Theta} - \ddot{\Theta}_{\min}) / (\ddot{\Theta}_{\max} - \ddot{\Theta}_{\min}); \end{cases} \tag{11}$$

$$u_c^* = (m - m_{\min}) / (m_{\max} - m_{\min}). \tag{12}$$

При завданні функцій приналежності (ФП) трикутної форми на єдиній універсальній множині  $u = [0, 1]$  отримуємо наступні аналітичні вирази для кожної лінгвістичної величини:

$$\mu_1(u) = 1 - u, u \in [0, u]; \mu_2 = u, u \in [0, 1];$$

$$\mu_3(u) = \begin{cases} 2u, & u \in [0, 1/2]; \\ 2(1 - u), & u \in [1/2, 1] \end{cases} \quad (13)$$

При поданні на НР значень вхідних змінних  $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$  з кроком квантування  $h$  виконується розрахунок величин  $u_1, u_2$  і  $u_3$  по формулам (11) і ФП  $\mu^j(u), j = \overline{1, 3}$ , по формулам (13).

Лінгвістичне правило управління представляємо у вигляді:

$$\text{якщо } (\theta^* = a_1^j) \text{ і } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ і } (\ddot{\theta}^* = a_3^j), \text{ то } (m^* = a_c^j), j = \overline{1, 3}, \quad (14)$$

де  $a_1^j, a_2^j, a_3^j$  – лінгвістичні оцінки похибки, її першої і другої похідної, що розглядаємо як нечіткі множини, які визначені на універсальній множині,  $j = \overline{1, 3}$ ;

$a_c^j$  – лінгвістичні оцінки керуючого діяння на об'єкт, що обираються із терм-множини змінної  $m$ . Лінгвістичні оцінки обираються із терм-множини лінгвістичних змінних  $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$  і  $m$ :  $a_c^j \in [ \text{від'ємна } (j = 1), \text{ додатна } (j = 2), \text{ наближена до нуля – нульова } (j = 3) ]$ .

При попаданні рідкого металу в ливарну форму остання нагрівається, причому товщина шару від робочій поверхні форми, в якому виникає значний температурний градієнт становить біля 30 мм [9]. Середню температуру приграничного шару контролюють з допомогою термометри, гарячий спай якої установлюють на глибині, що дорівнює половині приграничного шару. Таким чином, можна вважати, що надлишкова ентальпія ливарної форми внаслідок нагріву відливкою зосереджена в деякій приведеній масі  $m_\phi^{np}$ , кг, що дорівнює

$$m_\phi^{np} = Km_\phi, \quad (15)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності, що залежить від маси форми і дорівнює 0.10 – 0.14;

$m_\phi$  – маса ливарної форми, кг.

Надлишкову ентальпію ливарної форми можна виразити як

$$\Delta Q = c_\phi m_\phi^{np} (t_\phi - t_3), \quad (16)$$

де  $\Delta Q$  – надлишкова ентальпія ливарної форми, Дж;

$c_\phi$  – середня питома теплоємність ливарної форми, Дж/(кг $^\circ$ C);

$t_\phi$  – температура ливарної форми по показанням термометри в момент вилучення відливки,  $^\circ$ C;

$t_3$  – задана температура ливарної форми,  $^\circ$ C.

Для робочого діапазону температур (150 – 300<sup>0</sup>С) середня питома теплоємність ливарної форми становить 500 Дж/(кг<sup>0</sup>С).

Надлишкова ентальпія ливарної форми компенсується охолодженням з допомогою теплоносія і теплових втрат у навколишнє середовище відповідно виразу

$$\Delta Q = \int_{(\tau)} c_m(t_2 - t_1)V_m d\tau + q\tau_u, \quad (17)$$

де  $c_m$  – середня питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг<sup>0</sup>С);  
 $t_2$  і  $t_1$  – температура теплоносія відповідно на виході й вході порожнини теплообмінника ливарної форми, <sup>0</sup>С;

$\tau$  – поточний час, с;

$q$  – теплової потік в навколишнє середовище, що залежить від конструкції ливарної форми і дорівнює 10 – 20 кВт;

$\tau_u$  – тривалість циклу виготовлення відливки, с.

Середня питома теплоємність теплоносія може бути визначена як

$$c_m = (c_0[1 + 0,5\alpha(t_1 + t_2)]), \quad (18)$$

де  $c_0$  – питома теплоємність теплоносія при 0<sup>0</sup>С, Дж/(кг<sup>0</sup>С);

$\alpha$  – температурний коефіцієнт, <sup>0</sup>С<sup>-1</sup>.

При використанні у якості теплоносія мастила значення  $c_0 = 1785$  Дж/(кг<sup>0</sup>С) і  $\alpha = 0.74 \cdot 10^{-3}$ С<sup>-1</sup>.

Із співвідношень (16) – (18) отримуємо

$$c_{\phi} m_{\phi}^{np}(t_{\phi} - t_3) - q\tau_u = \int_{(\tau)} c_0[1 + 0,5\alpha(t_1 + t_2)](t_2 - t_1)V_m d\tau. \quad (19)$$

Рівність правої й лівої частин виразу (19) визначається тривалістю подачі теплоносія. Таким чином, подачу теплоносія необхідно припинити в момент досягнення рівності виразу (19).

Вираз (19) також використовується для регулювання тривалості подачі теплоносія для нагрівання ливарної форми. В цьому випадку обидві частини виразу (19) будуть менше нуля.

Замкнута система автоматичного управління “регулятор + об’єкт управління” має вигляд (рис. 3). Синтез НР виконано по формулам (4) – (13) для трикутних функцій приналежності з кроком квантування  $h = 0.1$  с. Помилка на виході АЦП  $\theta(k)$ , її перша  $\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)]/h$  і друга  $\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)]/h$  різниці подаються на вхід НР. Сигнал з виходу НР поступає на ЦАП (фіксатор нульового порядку з передаточною функцією  $H(s) = (1 - e^{-hs})/s$  і далі в неперервну частину системи (теплообмінник + прес-форма).

Система регулювання (рис. 3) виконана на стандартних засобах вимірювання і регулюючому мікроконтролері.

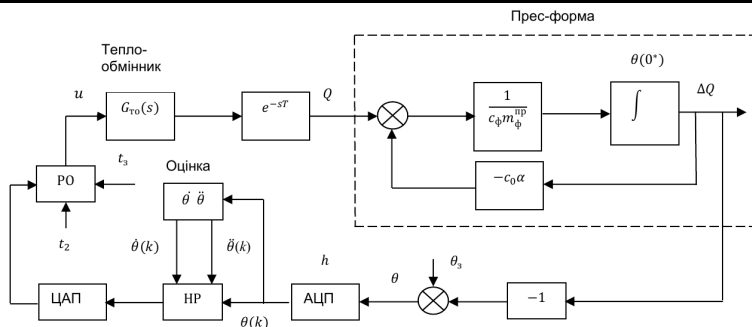


Рис. 3 – Замкнута система автоматичного управління

В якості датчиків температури використані датчики системи Метран-270МП [10], датчиків тиску і витрати – датчики системи Метран-100, датчики вилучення відливки і наявності металу в прес-формі виконані на базі безконтактного датчика положення типу БК. Блоки управління охолодженням і нагрівом представляють собою підсилювачі, що перетворюють одиничний вихідний сигнал контролера в напругу  $\sim 110$  В для включення відповідно електромагнітного клапана магістралі охолоджуючої води і магнітного пускателя, який управляє нагрівом теплоносія.

Регулювання температури прес-форми проводимо за рахунок зміни температури термостатуючої рідини. Тому за входні параметри процесу обрано – температуру термостатуючої рідини і прес-форми, відхилення температури прес-форми від заданного значення, (помилка регулювання), швидкість та прискорення зміни відхилення та задане значення температури термостатуючої рідини.

Поточне значення температури прес-форми, термостатуючої рідини на вході й виході порожнини теплообмінника ливарної форми вимірюється термопарами.

Значення кожного параметру розділені на терм-множини (табл. 1) та обрані відповідні діапазони зміни для кожного терму.

Як було відмічено ФП мають різний вигляд. Для того, щоб визначити який вид ФП найбільше підходить для побудови нечіткої моделі регулювання температури термостатуючої рідини, розглянемо декілька їх видів, такі як: а) у вигляді рівнобедреного трикутника, б) гаусові, в) трикутні, що перетинають весь діапазон зміни значень параметру.

На рис. 4 (а, б, в) відповідно зображені функції приналежності з різними термами по температурі термостатуючої рідини ( $t_p$ ), по температурі прес-форми,  $^{\circ}\text{C}$  ( $t_{\phi} = \gamma$ ), а також по швидкості ( $S$ ) та прискоренню зміни зміни температури прес-форми ( $a$ ).



## Вхідні та вихідні параметри, чіткі та лінгвістичні змінні, та інтервали зміни

Вхідні/вихідні параметри	Символ	Чіткі та лінгвістичні змінні, та інтервали зміни				
Температура прес-форми, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\phi}$	Набагато нижча заданої K 155-180 $^{\circ}\text{C}$	Нижче заданої L 180-205 $^{\circ}\text{C}$	Задана M 205-225 $^{\circ}\text{C}$	Вище заданої I 225-250 $^{\circ}\text{C}$	Набагато вище заданої G 250-275 $^{\circ}\text{C}$
Швидкість зміни температури прес-форми (10 <sup>-2</sup> ) $^{\circ}\text{C}/\text{c}$	$S$	Велика від'ємна N (-5)(-3)	Невелика від'ємна Z (-3)(-1)	Нульова P (-1)(+1)	Невелика додатна R (+1)(+3)	Велика додатна E (+3)(+5)
Прискорення, зміни температури прес-форми (10 <sup>-3</sup> ) $^{\circ}\text{C}/\text{c}^2$	$a$	Від'ємне n -4	Нульова p 0	Додатна e +4	-	-
Задане значення температури термостатуючої рідини, $^{\circ}\text{C}$	$t_z$	Низьке A 145-175	Нижче середнього B 175-205	На середині C 205-225	Вище середнього D 225-255	Високе F 255-285

**Формування бази правил систем нечіткого виводу**

Після побудови функцій приналежності, були розроблені нечіткі лінгвістичні правила. Правила розроблялись так: якщо температура прес-форми набагато вище заданого значення, а швидкість зміни її від'ємна, а прискорення додатне, то поточне задане значення температури термостатуючої рідини, треба встановити на рівні нижче середнього.

Таким чином розроблено 74 правила, у даному розділі представлено тільки фрагмент.

**Правило 1.** Якщо температура термостатуючої рідини знаходиться на середньому рівні, температура прес-форми набагато вище заданого значення, а швидкість зміни її невелика додатна, а прискорення додатне, то поточне задане значення температури термостатуючої рідини, треба встановити на рівні низьке.

**Правило 2.** Якщо температура термостатуючої рідини знаходиться на середньому рівні, температура прес-форми набагато вище заданого значення, а швидкість зміни її невелика від'ємна, а прискорення додатне, то поточне задане значення температури термостатуючої рідини, треба встановити на рівні нижче середнього.

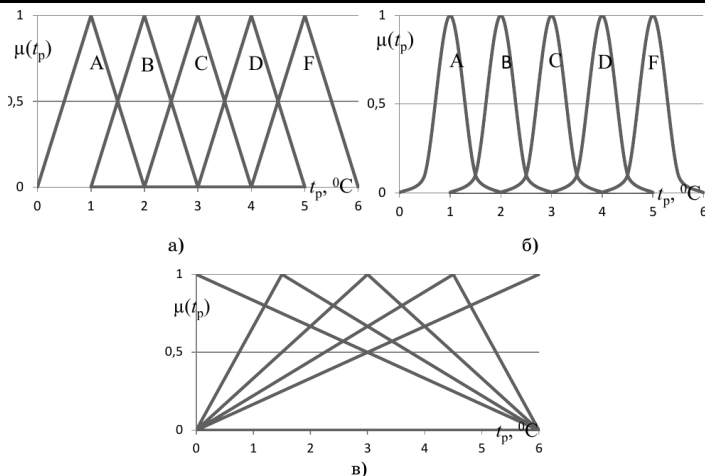


Рис. 4 – Функції приналежності поточного значення температури термостатуючої рідини: а) з трикутними термами; б) з гаусовими термами; в) з трикутними термами, що перетинають весь діапазон

Правило 3. Якщо температура термостатуючої рідини знаходиться на середньому рівні, температура прес-форми вище заданого значення, а швидкість зміни її невелика від’ємна, а прискорення додатне, то поточне задане значення температури термостатуючої рідини, треба залишити на середньому рівні.

Правило 4. Якщо температура термостатуючої рідини знаходиться на середньому рівні, температура прес-форми вище заданого значення, а швидкість зміни її велика додатна, а прискорення додатне, то поточне задане значення температури термостатуючої рідини, треба встановити на рівні низьке.

Правило 5. Якщо температура термостатуючої рідини знаходиться на середньому рівні, температура прес-форми відповідає заданому значенню, а швидкість зміни її велика від’ємна, а прискорення додатне, то поточне задане значення температури термостатуючої рідини, треба встановити на рівні вище середнього.

Для скорочення запису запишемо правила у символічному вигляді (фрагмент):

Правило 1. Якщо  $t_\phi = G, S = R, a = e$ , то  $t_3 = A$ .

Правило 2. Якщо  $t_\phi = G, S = Z, a = e$ , то  $t_3 = B$ .

Правило 3. Якщо  $t_\phi = I, S = Z, a = e$ , то  $t_3 = C$ .

Правило 4. Якщо  $t_\phi = I, S = E, a = e$ , то  $t_3 = A$ .

Правило 5. Якщо  $t_\phi = M, S = N, a = e$ , то  $t_3 = D$ .

де  $t_p, t_3$  – поточне та задане значення температури термостатуючої рідини,  $^{\circ}C$ ;



на у блоці Constant2, і далі перемикачем Switch2 зміна коефіцієнту виконується за залежністю представленою у блоці Fsp4. Аналогічним чином представлені інші коефіцієнти.

Сигнали коефіцієнтів, у відповідних блоках множення Dot Product множаться на вихідний сигнал  $m(t)$  відповідно записаному вище диференційному рівнянню нестационарної коливальної ланки.

В систему управління входить аналого-цифровий перетворювач АЦП, що представлений фіксатором Zero-Order Hold, який працює з кроком квантування  $h_0$ , і вихідний цифроаналоговий перетворювач, що представлений фіксатором Zero-Order Hold 1.

Регулятор нечіткої логіки представлений блоком Fuzzy Logic Controller with ruleviewer, у даному блоці задаються вхідні та вихідні параметри процесу, обираються функції приналежності membership functions, діапазони зміни значень та задається база правил rules.

За вихідні параметри обрано помилку  $\theta$ , першу ( $S$ ) та другу ( $a$ ) похідні від помилки, які реалізують рівняння:  $S \approx \{\theta(n) - \theta(n-1)\} / h$ ,  $a \approx \{s(n) - s(n-1)\} / h$ .

Налаштування регулятора виконані з метою отримання найменшої помилки невідповідності.

На рис. 6 зображено функцію приналежності по помилці невідповідності, яку розроблено в системі Matlab. Аналогічним чином розроблено функції приналежності для інших вхідних та вихідних параметрів. Час моделювання задано 10 с.

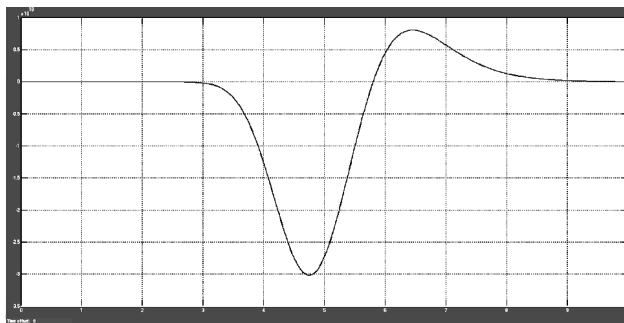


Рис. 6 – Результат розв’язання задачі нечіткого моделювання методом Мамдані, графік похибки Err

## Висновки

В даній схемі були застосовані нечіткі регулятори на основі методів Мамдані та Сугено, а також ПІД регулятора. Усього отримано 3 схеми. Час циклу моделювання становить 10 одиниць (10 секунд)

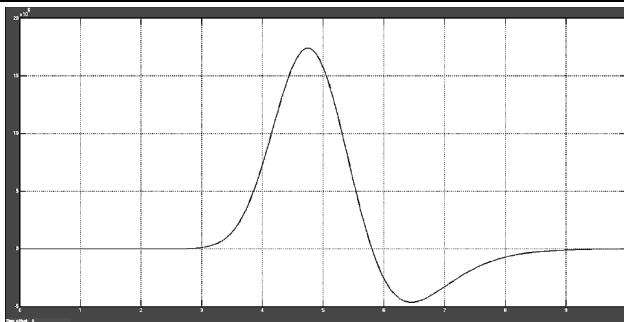


Рис. 7 – Результат розв'язання задачі нечіткого моделювання алгоритмом Сугено, графік похибки  $E(t)$

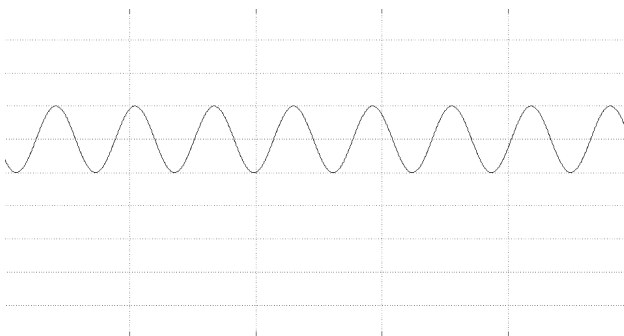


Рис. 8 – Результат розв'язання задачі нечіткого моделювання з ПІД регулятором, графік похибки  $E(t)$

в процесі). Крок квантування  $h = 0.01$ . Нечіткі регулятори налаштовані конкретно під модель і мають 74 правила, 3 вхідних величини по (5, 5, 3 терми кожна) і одна вихідна величина, яка має 5 термів. ПІД регулятор налаштований за допомогою функції TUNE, яка підбрала для нього оптимальні коефіцієнти.

Висновки по отриманим графікам: основні параметри порівняння амплітуда, період та площа графіку процесу. Порівнюємо показання помилки (ERR).

1. Метод Мамдані. Амплітуда макс =  $-3 \cdot 10^{18}$ ,  $0.8 \cdot 10^{18}$  перепад висот становить  $3.8 \cdot 10^{18}$ ; період с 2,7 до 9,8 сек., тобто період регулювання становить 7,1 сек. Площа графіку – середня по величині з трьох методів, графік має коливальну форму, що сходиться.
2. Метод Сугено. Амплітуда макс =  $-4.8 \cdot 10^6$ ,  $17.5 \cdot 10^6$  перепад висот становить  $22.3 \cdot 10^6$ ; період с 2,75 до 10 сек., тобто період

регулювання становить 7,25 сек. Площа графіку – найменша по величині з трьох методів, графік має коливальну форму, що сходиться.

3. ПІД регулятор. Амплітуда макс =  $-1.7 \cdot 1^{015}$ ,  $1.7 \cdot 1^{015}$  перепад висот становить  $3.4 \cdot 1^{015}$ ; період с 2,65 до 10 сек., тобто період регулювання становить 7,35 сек. Площа графіку – найбільша по величині з трьох методів, графік має форму синусоїди. Процес має форму автоколивального і не може закінчити процес регулювання.

На данному етапі аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що найбільш якісне регулювання дає нечіткий регулятор на основі методу Сугено.

4) Теплообмінник є типовим об'єктом управління з запізнюванням. Останнє значно зменшує швидкодію системи і динамічну точність об'єкта управління. Передаточна функція такого об'єкта  $W_o(s) = e^{-sT}G(s)$ , де  $G(s)$  – передаточна функція об'єкта без запізнення. Найбільш ефективним методом боротьби з запізненням є охвачування регулятора Р ланкою зворотного зв'язку з передаточною функцією  $W_{oc}(s) = (1 - e^{-sT})G(s)$ , яку називають предиктором (випереджувачем) Сміта.

5) Дослідження функцій приналежності у вигляді рівнобедреного трикутника, гаусових і трикутних, що перетинають весь діапазон зміни значень параметру показали, що найкращі перехідні характеристики при регулюванні досягаються при використанні трикутних, що перетинають весь діапазон.

### Список використаних джерел

1. Белоухов А.К. Литье под давлением. – М.: Машиностроение, 1975. – 397 с.
2. Литье под давлением / М.Б. Беккер, М.Л. Заславский, Ю.Ф. Игнатенко и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Богушевський В.С. АСКТП комплексу лиття під тиском // Автоматизація виробничих процесів. – 2001. – № 2(13). – С. 53–55.
4. Хасмамедов Ф.И. Автоматизация управления трубчатыми печами. – М.: Химия, 1980. – 216 с.
5. Гостев В.И., Маглюй С.А., Крайнев В.В. Оптимальные управляющие воздействия на объекты управления с форсирующими звеньями второго порядка // Электротехника и электроэнергетика. – 2002. – № 1. – С. 49–53.
6. Гостев В.И., Стеклов В.К. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – К.: "Радиоаматор", 1998. – 704 с.

7. Гостев В.И., Худолий Д.А., Баранов А.А. Синтез цифровых регуляторов систем автоматического управления. – К.: “Радиоаматор”. – 2000. – 400 с.
8. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системе автоматического управления. – К.: “Радиоаматор”, 2008. – 972 с.
9. Богушевский В.С., Самарай Р.В. Система регулирования температуры пресс-формы на основе нечеткой логики // Металл и литье Украины – 2014. – № 3. – С. 16–20.
10. Богушевський В.С., Антоневич Я.К. Система керування машинами лиття під тиском // Наукові праці національного університету харчових технологій. – 2013. – № 48. – С. 10–16.
11. Кузьо І.В. Реалізація математичних моделей вертикальних коливань колісної машини засобами Matlab Simulink / І.В. Кузьо, О.В. Житенко, Г.В. Костельницька // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2011. Вип. 45. – С.84–88.

Отримано 25.20.2015 р.