

## СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ В КАМЕРНІЙ СУШАРЦІ

Г.М. Худолей, Д.І. Захарченко

Шосткинський інститут Сумського державного університету  
hudoley1951@gmail.com

В роботі [1] на основі конструктивно-технологічного аналізу об'єкта управління (камерної сушарки періодичної дії) була розроблена математична модель динаміки процесу сушіння, а також надані результати дослідження, які дозволили зробити висновок щодо її адекватності реальному процесу. Опираючись на аналіз вимог щодо ведення технологічного процесу сушіння та маючи на увазі результати дослідження отриманої в [1] математичної моделі, вдалось сформулювати основні завдання системи управління, що синтезується, а саме:

Для забезпечення зменшення бракованої продукції в умовах наявності зовнішніх збурень необхідно жорстко витримувати норми технологічного регламенту щодо розрахункової температури  $T_{rov}$  в камері сушарки та гідродинамічного режиму обдування матеріалу шляхом стабілізації величини об'ємного приходу теплоносія на вході  $G_{rov}^0$ .

Зменшення непродуктивних витрат теплової енергії на сушіння матеріалу можна забезпечити своєчасним завершенням кожного окремого циклу висушування в умовах початкових умов, що міняються. Розрахунок тривалості кожного циклу висушування доцільно виконувати шляхом імітаційного моделювання попередньо ідентифікованої математичної моделі динаміки [1].

В цій роботі наводяться результати реалізації першого з наведених вище завдань.

Функціональна схема системи управління технологічним процесом сушіння в камерній сушарці періодичної дії, що реалізує першу з вимог, може мати вигляд, наведений на рис. 1.

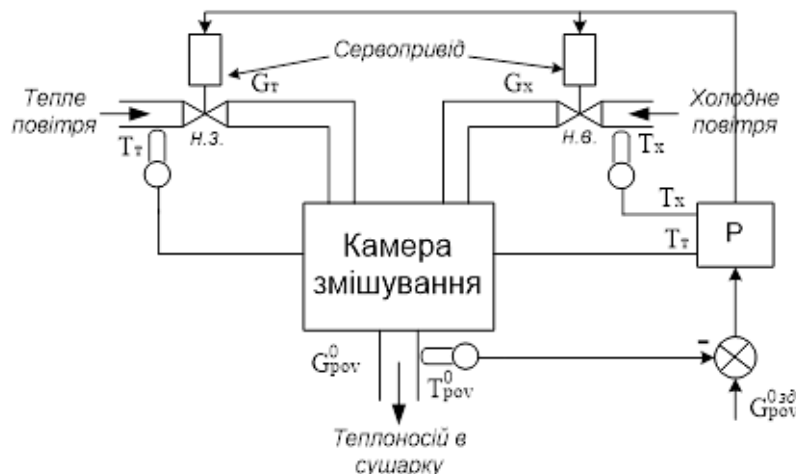


Рисунок 1 Функціональна схема системи управління температурою теплоносія

Так як процес сушіння йде при незмінній температурі поверхні матеріалу, а значить головними факторами, що можуть порушити тепловий режим є зовнішні впливи, а також маючи на увазі суттєву теплову інерцію камерної сушарки, що ускладнює створення високоякісної системи стабілізації, прийнято рішення стабілізувати температуру теплоносія на вході в сушарку  $T_{rov}^0$  шляхом зміни

співвідношення об'ємної витрати потоків теплового повітря  $G_T$  з температурою  $T_T$  та холодного повітря  $G_X$  з температурою  $T_X$ . Температури  $T_T$  та  $T_X$  потоків повітря мають властивість непередбачуване мінятись, тобто виступають в ролі контрольованих збурень.

Щоб одночасно забезпечити постійну задану величину об'ємного приходу в камеру сушарку теплоносія з заданою температурою  $T_{rov}^0$ , для управління використаємо два сервоприводи, які працюють асинхронно, тобто при переміщенні заслінки теплового повітря в одну сторону одночасно заслінка холодного повітря переміщується в іншу, чим забезпечується незмінність подачі об'єму теплоносія при зміні його температури.

Об'єкт управління являє собою (див. рис. 1) камеру змішування, в яку підводяться для змішування до необхідної температури  $T_{rov}^0$  потік теплового повітря з температурою  $T_T$  та холодного – з температурою  $T_X$ . Для зміни величини об'ємної витрати використовуються сервоприводи, які працюють в асинхронному режимі.

Невеликий об'єм камери змішування при відносно великих швидкостях потоків дозволяють припустити, що гідродинамічний режим процесу змішування – ідеальне перемішування, а обмежений діапазон температур теплоносія та його компонентів (не більше  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) дають можливість вважати, що їх тепло-фізичні параметри не залежать від температури та складу и визначаються як деякі середні величини.

Тепловий баланс для камери змішування [2]

$$V_{cm} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT_{rov}^0}{dt} = G_T \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_T + G_X \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_X - (G_X + G_T) \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_{rov}^0, \quad (1)$$

де  $V_{cm}$  – об'єм камери змішування;  $\rho, c_p$  – щільність та питома ізобарна теплоємність теплоносія та його компонентів;  $T_{rov}^0, T_X, T_T$  – температури теплоносія після камери змішування, холодного та теплового повітря, відповідно;  $G_X, G_T$  – об'ємний розхід відповідно холодного та теплового повітря.

Після нескладних перетворень, скорочення на  $\rho \cdot c_p$  та виразивши об'ємну витрату холодного та теплового повітря через його задане значення  $G_{rov}^0$  і ступінь відкриття заслінки  $\Delta u$  (приймаємо, що об'ємна витрата повітря прямо пропорційний ступеню відкриття заслінки, тобто  $G_T = G_{rov}^0 \cdot \Delta u$  та  $G_X = G_{rov}^0 \cdot (1 - \Delta u)$ ), отримаємо

$$\frac{V_{cm}}{G_{rov}^0} \cdot \frac{dT_{rov}^0}{dt} + T_{rov}^0 = \Delta u \cdot T_T + (1 - \Delta u) \cdot T_X. \quad (2)$$

Структурна схема математичної моделі камери змішування продемонстрована на рис. 2,

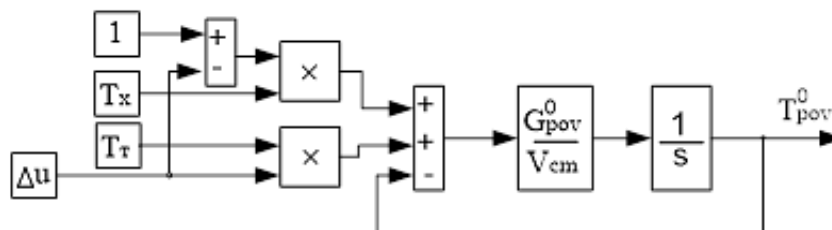


Рисунок 2 Структурна схема математичної моделі камери змішування

а результати моделювання при умовно прийнятих значеннях  $G_{rov}^0=5400\text{ м}^3/\text{год}$ ,  $V_{cm}=0,15\text{ м}^3$ ,  $T_T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_X=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  на рис. 3.

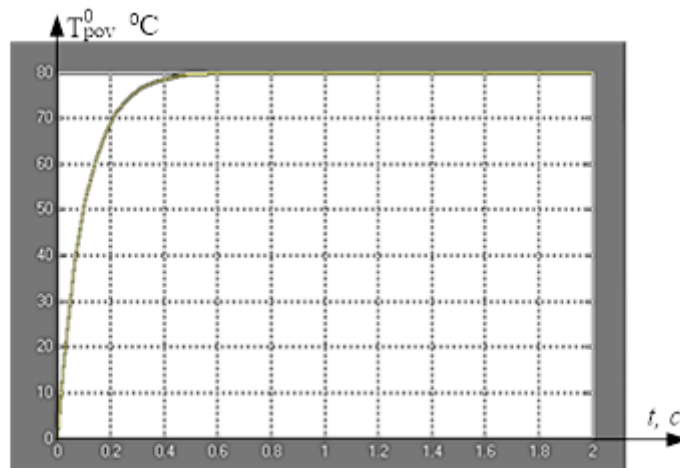


Рисунок 3 Результати моделювання камери змішування

Малогобаритні швидкодіючі сервоприводи в наш час широко використовуються в різноманітних сучасних високоточних системах управління, в тому числі і для переміщення та позиціонування органів регулювання. Найчастіше промислові системи управління положенням приводу будуються за принципами підлеглого регулювання.

В роботі [4] наводиться методика побудови математичної моделі сервопривода на основі електродвигуна постійного струму з незалежним збудженням з підпорядкованим керуванням положення та швидкості.

Зазвичай в системах підпорядкованого управління використовують три контури. Якщо необхідно регулювати положення, то найкраще, чим можна при цьому керувати – це швидкістю (частотою обертання), оскільки саме швидкість безпосередньо впливає на зміну положення (швидкість – це похідна від положення), інші величини (струм, напруга і інше) впливають на положення опосередковано, не зручно для регулювання. Якщо треба регулювати швидкість, то для її регулювання краще вибрати момент двигуна, оскільки момент визначає прискорення приводу, а воно простим математичним законом пов'язане зі швидкістю. Так як для двигуна момент - це струм, то для регулювання моменту потрібно керувати напругою на інверторі перетворювача, тому що струм і напруга теж пов'язані у першому наближенні простим диференціальним рівнянням.

Якщо якийсь внутрішній контур опустити, то положення буде регулюватися, але погано, не з такою швидкодією, як у системі з трьома контурами. Якщо немає, наприклад, контуру струму, то залишиться безконтрольний момент приводу (струм) – він змінюватиметься довільно. Проте в сервоприводах, призначених для переміщення органів регулювання запірної арматури суттєвої зміни моменту не очікується, а значить схему управління можна спростити.

Рівняння замкнутої системи в операторній формі мають вигляд [4]

$$\begin{cases} \omega = \frac{rK_d^2}{T_{MP}}(M - M_c), \\ M = \frac{1/rK_d}{T_{яp+1}}\left(U - \frac{1}{K_d}\omega\right), \\ \varphi = \frac{n\omega}{p}, \\ U = K_p(\varphi_3 - \varphi). \end{cases} \quad (3)$$

Тут  $r$  – повний активний опір якірного ланцюга (Ом);  $\omega$  – механічна швидкість

обертання ротора (рад/с);  $M$  – момент обертання, що створюється двигуном ( $H^*M$ );  $M_c$  – момент статичного навантаження, приведений до валу двигуна ( $H^*M$ );  $K_d = K\Phi$  (рад/В\*с), де  $K$  – безрозмірний конструктивний коефіцієнт двигуна,  $\Phi$  – магнітний потік збудження двигуна, який створюється постійним магнітом (Вб);  $T_M$  – електромеханічна постійна часу привода (с);  $T_\gamma$  – електромагнітна постійна якійного ланцюга (с);  $U$  – напруга на обмотці якоря двигуна (В);  $\varphi$  – кут повороту вихідного валу сервопривода (рад);  $n$  – передаточне число редуктора;  $K_p$  – коефіцієнт підсилення П-регулятора (В/рад);  $\varphi_3$  – заданий кут повороту вихідного валу сервопривода (рад).

Структурна схема сервопривода відповідно до моделі (3) наведена на рис. 4.

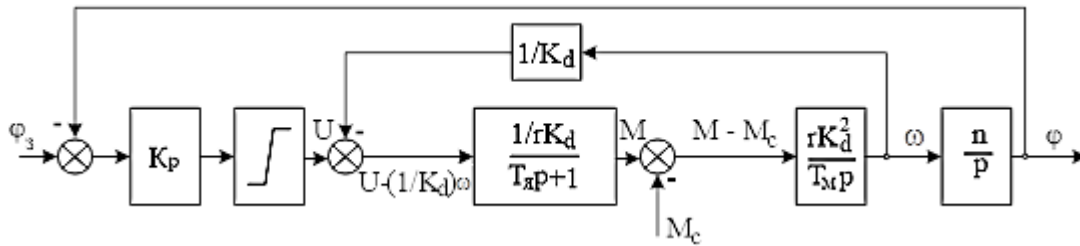


Рисунок 4 Структурна схема математичної моделі сервоприводу

Якщо розв'язати систему рівнянь (3) відносно  $\varphi$ , то отримаємо

$$\varphi(p) = \frac{\varphi_3(p) - r \frac{K_d}{K_p} (T_\gamma p + 1) M_c}{T_\gamma T_M T_c p^3 + T_M T_c p^2 + T_c p + 1}, \quad (4)$$

де  $T_c = \frac{1}{n K_d K_p}$ .

Підбором відповідного характеристичного полінома замкнутої системи (4) можна отримати задовільні динамічні властивості сервопривода (підбором величини коефіцієнта підсилення  $K_p$ ). Як еталонний поліном використаємо характеристичний поліном на основі бінома Ньютона [3]

$$H(p) = (p + \omega_0)^n, \quad (5)$$

де  $\omega_0$  – параметр полінома;  $n = 3$  – порядок полінома. Для забезпечення монотонності перехідного процесу без перерегулювання корні полінома (5) вибираємо кратні, дійсні та від'ємні. Порівнявши характеристичні поліноми (4) та (5) Знаходимо розрахункові співвідношення  $T_M = 1/\omega_0$ ;  $T_c = 3/\omega_0$ ;  $T_\gamma = 1/3\omega_0$ . Перехідна характеристика сервопривода при  $\omega_0 = 1$  представлена на рис. 5.

Порівнюючи перехідні характеристики на рис. 3 та рис. 5 бачимо, що інерційні властивості камери змішування на порядок кращі, чим сервопривода. Тому при синтезі системи управління необхідно ставити задачу стабілізації роботи сервоприводів каналів подачі теплого та холодного повітря в умовах високого рівня зовнішніх збурень.

Структурна схема математичної моделі об'єкта управління – камери змішування, при сумісній роботі з сервоприводами, що регулюють величину об'ємних потоків теплого та холодного повітря наводиться на рис. 6.

Результати моделювання камери змішування, при сумісній роботі з сервоприводами, виконаного в математичному пакеті MatLab (додаток Simulink), продемонстровані на рис. 7. Моделювання показало, що об'єкт управління має властивість самовирівнювання та значну інерційність, яка визначається динамічними характеристиками сервопривода.

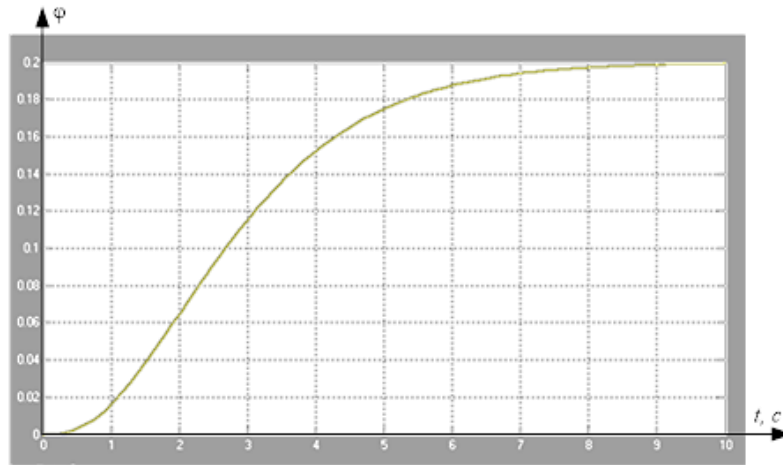


Рисунок 5 Перехідна характеристика сервоприводу за ступінчатоївхідного сигналу на величину  $\varphi=0.2$

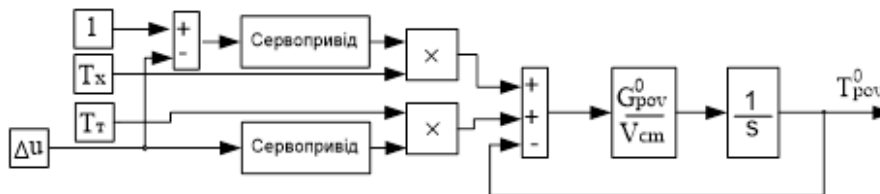


Рисунок 6 Структурна схема математичної моделі камери змішування за сумісної роботи з сервоприводами

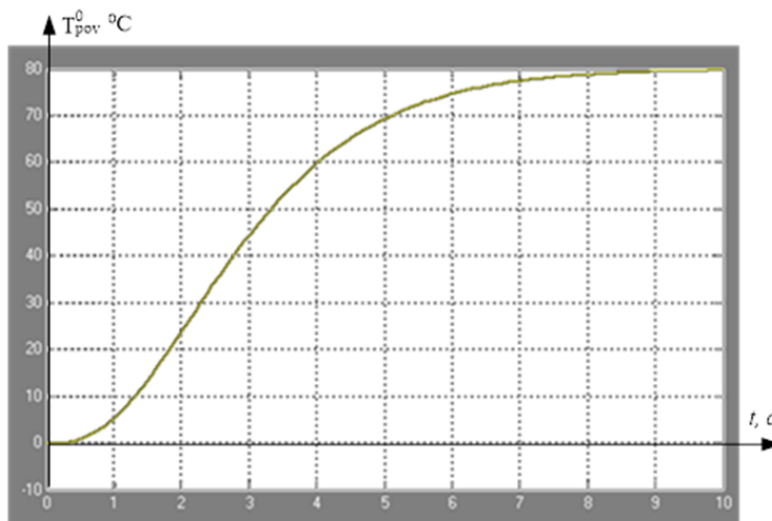


Рисунок 7 Перехідна характеристика камери змішування з сервоприводами за ступінчатої зміни сигналу керування  $\Delta u=1$ , що відповідає максимальній температурі

Структурна схема замкнутої системи управління температурою на вході до камерної сушарки  $T_{rov}^0$  наведена на рис. 8.

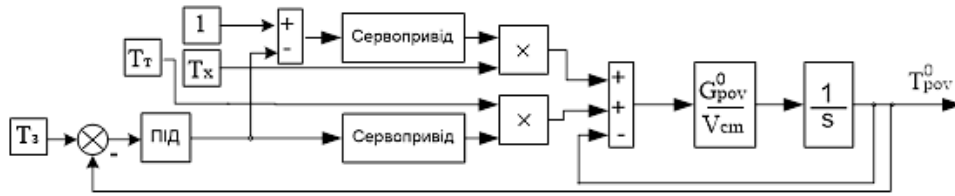


Рисунок 8 Структурна схема замкнутої системи управління температурою на вході в сушарку

Для оптимізації параметрів вибраного для регулювання ПІД-регулятора було прийнято рішення використати інструментальний пакет *Nonlinear Control Design Blockset* (NCD-Blockset), який надає графічний інтерфейс для знаходження таких параметрів динамічних об'єктів, що забезпечують бажану якість перехідних процесів [5]. Як засіб досягнення зазначеної мети приймається оптимізаційний підхід, базований на мінімізації функції штрафу порушення динамічних обмежень. За допомогою цього інструменту можна налаштовувати параметри нелінійної *Simulink*-моделі. Особливе значення має те, що в процесі налаштування враховуються невизначеності моделі параметричного типу, що дозволяє синтезувати робастні закони управління.

Динамічні обмеження задаються у візуальному режимі. На базі цих обмежень *NCD-Blockset* автоматично генерує задачу оптимізації так, щоб точка екстремуму в просторі параметрів, що налаштовувалися, відповідала виконанню всіх вимог, що пред'являються до якості перехідного процесу. Ця задача вирішується із залученням спеціалізованої процедури квадратичного програмування з пакету *Optimization Toolbox*. Хід оптимізації контролюється на екрані в вигляді графіка контрольованого процесу, а результат фіксується у робочому просторі.

Вихідні дані для виконання синтезу налаштувань ПІД-регулятора з математичним описом  $R(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s$ :

перерегулювання  $\sigma \leq 5\%$ ;

час перехідного процесу  $t_p \leq 2\text{ с}$ .

Побудуємо *Simulink*-модель об'єкта управління відповідно до рис. 8 та з урахуванням підключення до виходу блока *NCD Output* як це показано на рис. 9.

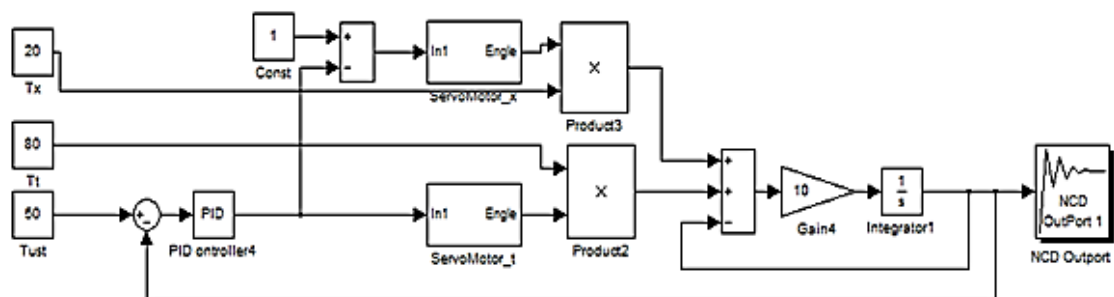


Рисунок 9 Структурна схема моделі замкнутої системи управління температурою на вході в сушарку в середовищі *Simulink* для оптимізації налаштувань

Відповідно до вихідних даних щодо якості перехідного процесу встановлюємо коридор, в межах якого повинен знаходитись вхідний сигнал блока *NCD Output* після оптимізації та запускаємо процес пошуку оптимальних налаштувань. Форма коридора та результати роботи інструментального пакета представлені на рис. 10.



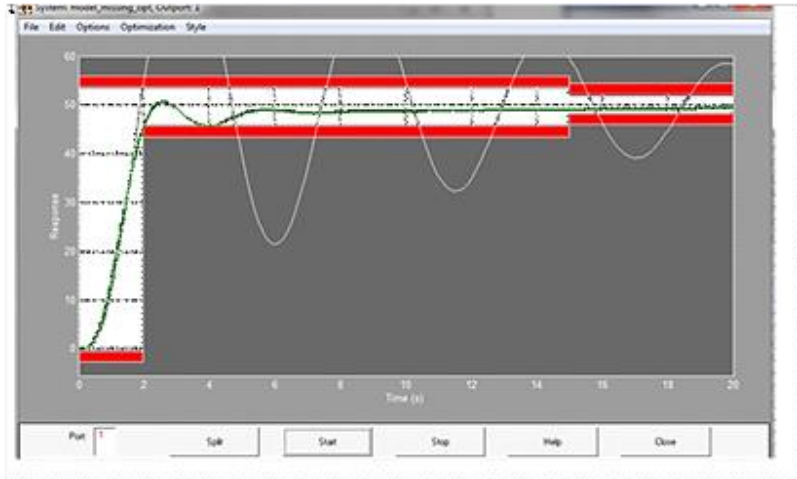


Рисунок 10 Форма заданого коридору та результати оптимізації налаштувань

Можна констатувати, що оптимізація налаштувань виконана успішно (на рис. 10 це демонструє крива, що знаходиться в межах коридора) і показники якості перехідного процесу не перевищують заданих значень (перехідна характеристика системи управління з фактичними показниками якості показана на рис. 11). Оптимальні для цього процесу параметри налаштувань ПІД-регулятора:  $K_p = 0,072$ ;  $K_i = 0,007$ ;  $K_d = 0,058$ .

В нормальних умовах процес сушіння матеріалу в камерній сушарці проходить в умовах наявності зовнішніх збурень двох видів:

високочастотні збурення температури теплого повітря, який поступає в камеру змішування від джерела нагрівання (пічні гази або теплообмінник);

низькочастотні збурення температури холодного повітря викликані добовими змінами температури атмосфери.

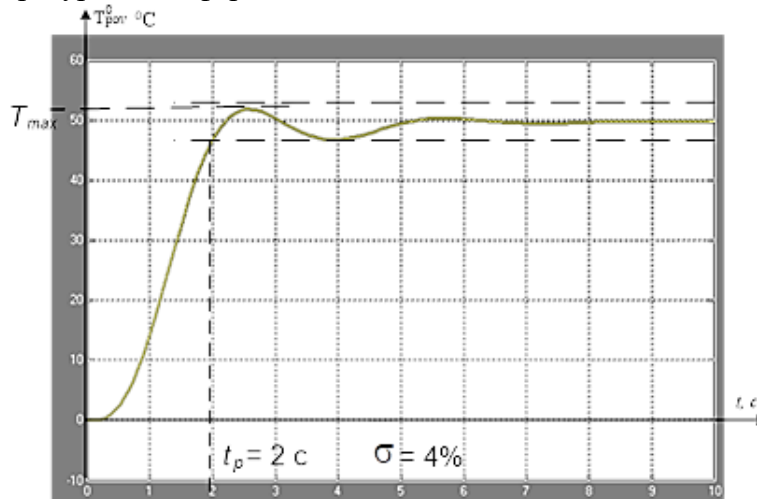


Рисунок 11 Оптимальний перехідний процес системи управління

Для імітації таких збурень та перевірки якості роботи системи управління в відповідних умовах була складена *Simulink*-модель системи (див. рис. 12), в якій до температури теплого повітря  $T_T$  добавляється високочастотний випадковий сигнал з амплітудою  $4^\circ\text{C}$ , до температури холодного повітря  $T_x$  добавляється синусоїдальний сигнал низької частоти з амплітудою  $10^\circ\text{C}$  (середньодобове відхилення температури).

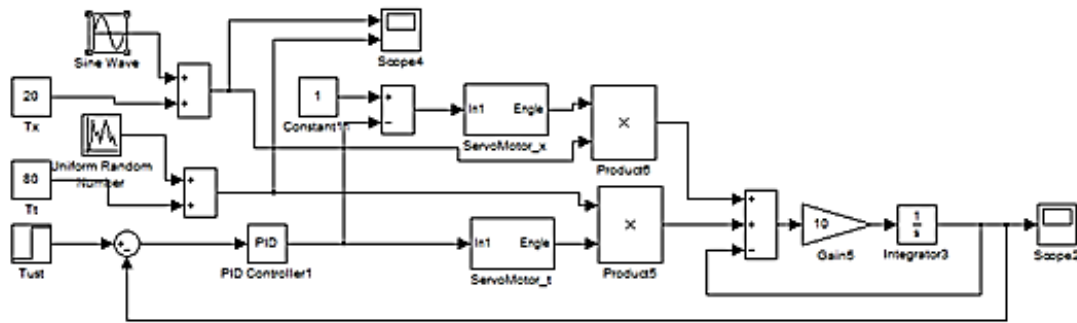


Рисунок 12 Структурна схема моделі замкнутої системи управління температурою на вході в сушарку в середовищі Simulink в умовах дії зовнішніх збурень

Форма вхідних збурень, що поступають в систему та результати роботи системи представлені на рис. 13.

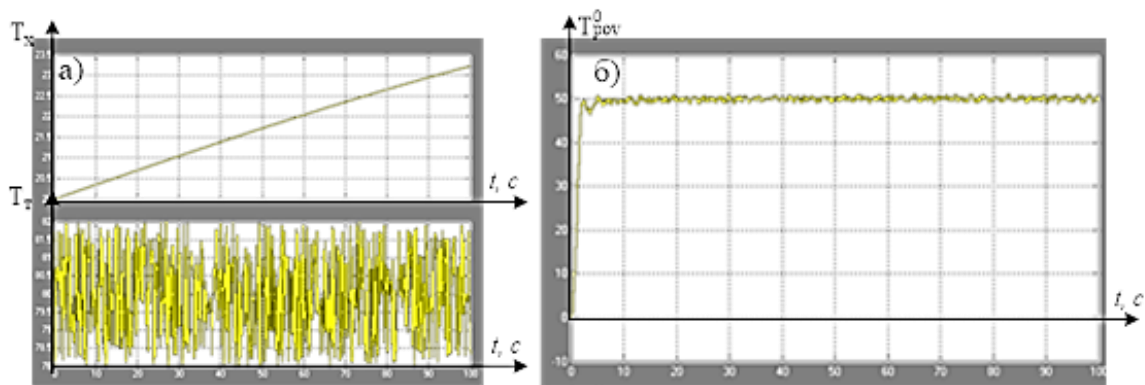


Рисунок 13 а) Вхідні збурення, б) перехідний процес системи управління

Імітаційне моделювання показує, що система управління температурою на вході в сушарку працездатна і має задовільні фільтруючі властивості.

### Список літературних джерел

1 Г.М. Худолей, Д.І. Захарченко, П.О. Васильцов. Математична модель сушіння цегли-сирцю в камерній сушарці. Матеріали VIII Всеукраїнської науково-методичної конференції «ОСВІТА, НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО: РОЗВИТОК ТА ПЕРСПЕКТИВИ» (Шостка, 27 квітня 2023 року), с. 136-141.

2 Математичне моделювання та застосування ЕОМ у хімічній технології: конспект лекцій / укладач Худолей Г.М. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 183 с.

3 Лазарев Ю. Ф. Моделювання на ЕОМ. Навч. посібник. – К.: Корнійчук, 2007. - 290 с.

4 Веремей Е.И, Погожев С.В. Электронное пособие "Nonlinear Control Design Blockset". <http://matlab.exponenta.ru/nonlinecondes/book1/index.php>.