

УДК 685.5.011

В.Ю. Зінченко, доцент, к.т.н.

Ю.М. Пазюк, доцент, к.т.н.

І.А. Овчиннікова, доцент, к.т.н.

## ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ПІД ЧАС ФОРСУВАННЯ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ НАГРІВАЛЬНИХ КАМЕРНИХ ПЕЧЕЙ

Запорізька державна інженерна академія

Рассмотрены структурные схемы систем управления процессами нагрева металла при форсировании тепловой работы камерных нагревательных печей. Представлены оптимальные температурные режимы форсированного нагрева термически тонких и термически массивных тел.

Ключевые слова: камерная нагревательная печь, форсирование тепловой работы, система управления, температурный режим нагрева, оптимизация

Розглянуто структурні схеми систем управління процесами нагрівання металу під час форсування теплової роботи камерних нагрівальних печей. Подано оптимальні температурні режими форсувального нагрівання термічно тонких і термічно масивних тіл.

Ключові слова: камерна нагрівальна піч, форсування теплової роботи, система управління, температурний режим нагрівання, оптимізація

Structure diagrams of control system by the processes of heating of metal at forcing of thermal work for chamber heater furnaces have been considered. Optimal temperature regims of the forced heating thermal thin and thermal massive bodies have been presented.

Keywords: chamber heating furnace, forcing of heat work, system of controlling, temperature regime of heating, optimization

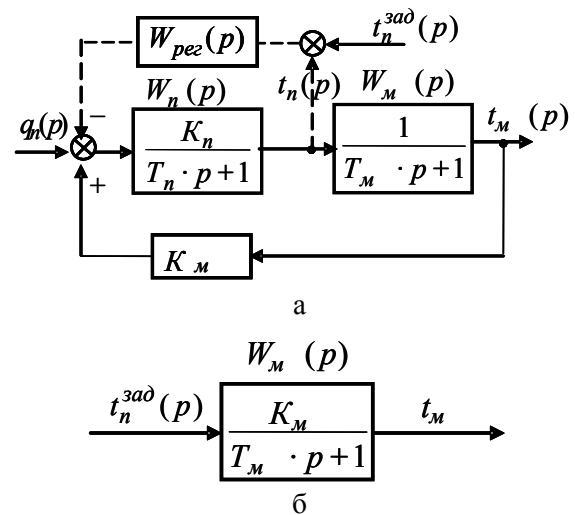
*Вступ.* Необхідність форсування теплової роботи камерних нагрівальних печей виникає під час їх оперативного управління для узгодження роботи, як між собою, так і з іншим технологічним обладнанням. За швидкісними режимами нагрівання металу підвищується продуктивність теплових агрегатів, знижується створення окалини та зневуглюцювання. Проте при цьому зростає питома витрата палива, та підвищуються вимоги до точності забезпечення заданих температурних режимів, а також якості металу, що нагрівають.

З позиції теорії управління швидкісне нагрівання відносять до задпч оптимальної швидкодії та вирішують методами математичної оптимізації, зокрема, з використанням принципу максимуму [1] на основі математичних моделей динаміки системи у вигляді диференційних рівнянь.

Виходячи з того, що камерні нагрівальні печі найчастіше є агрегатами з концентрованим підведенням теплової потужності та відведенням продуктів горіння, управління їх роботою здійснюють змінюванням теплового навантаження залежно від температури, що вимірюють в одній (рідше у декількох точках) робочого обсягу. Динаміку нагрівання металу можна подати у вигляді зосередженої моделі, яку наведено на рис. 1,а.

Під час відповідного вибирання закону регулювання та настроювань регулятора на практиці, як

правило, забезпечують задовільну відповідність заданої температури у печі її фактичній величині, тобто  $t_n^{зад}(p) = t_n(p)$ . Нехтуючи динамікою перехідних процесів у системі регулювання температури, структуру системи можна суттєво спростити, привівши її до вигляду, показаного на рис. 1,б.



$q_n(p)$ ,  $t_n^{зад}(p)$ ,  $t_m(p)$ ,  $t_n(p)$  - параметри потужності, що підводять, завдання температури печі, металу та грючих газів відповідно

Рисунок 1 - Структурна схема управління нагріванням металу в печі

Згідно з вибраною структурою, температурний режим, як часова функція температури печі  $t_n(p)$ , повністю визначає кінцеву температуру металу, що нагрівають  $t_m(p)$ .

**Постановка задачі.** Задачею даної роботи є вивчення камерної нагрівальної печі як об'єкту управління з позиції теорії оптимальних систем, а також оптимізації температурних режимів нагрівання під час форсування теплової роботи зазначених агрегатів.

**Основна частина досліджень.** Розглядають задачу нагрівання термічно тонкого тіла, динаміка якого описується лінійним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами. Нехтуючи інерційністю гріючого середовища, передавальна функція об'єкту  $W_{об}(p)$  має вигляд

$$W_{об}(p) = \frac{t_m(p)}{t_n(p)} = \frac{C_1 \cdot p + C_0}{a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}, \quad (1)$$

де  $C_1 = T_{кл}$ ;  $C_0 = K_n$ ;  $a_2 = T_{кл} \cdot T_m \cdot (1 - K_m)$ ;  
 $a_1 = T_m \cdot (1 - K_{кл}) + T_{кл} \cdot (1 - K_m)$ ;  $a_0 = 1 - (K_m - K_{кл})$

Зазначену функцію можна записати як

$$W_{об}(p) = \frac{K \cdot (T_3 p + 1)}{T_1 \cdot T_2 \cdot p^2 + (T_1 + T_2) \cdot p + 1}, \quad (2)$$

де  $T_1, T_2$  – коріння полінома знаменника функції (1),  $T_3$  – корінь полінома її чисельника;  $K$  – коефіцієнт передавання,  $K = C_0 / a_0$ .

Наявність оператора  $p$  у чисельнику функції (1) ускладнює застосування принципу максимуму, оскільки вирішення правої частини рівняння зазнає розриви, а принцип максимуму є застосовним для безперервної функції. У аналогічних класичних задачах оптимізації таку перешкоду долають переходом від реального об'єкту до фіктивного, якого створено двома паралельно сполученими ланками з безперервними вихідними величинами  $Y_1(p)$  і  $Y_2(p)$  [2].

Згідно з прийнятим поданням об'єкту

$$t_m(p) = Y_1(p) + Y_2(p) \quad (3)$$

за сталим режимом маємо

$$t_m^{кін} = t_n^{кін} \cdot (K_1 + K_2) \quad (4)$$

де  $t_m^{кін}$ ,  $t_n^{кін}$  – кінцева температура металу та печі відповідно.

У такій постановці задачу оптимізації вирішують з використанням принципу максимуму. Тоді керівне діяння на першій ділянці управління  $U_1$  буде релейним і його описують рівнянням

$$U_1 = \left| t_n^{max} \right| \cdot \text{sign}(t_m^{кін} - t_m), \quad (5)$$

тобто реалізують один інтервал управління.

На другій ділянці управління керівне діяння  $U_2$  можна визначити у вигляді рівняння з роботи [2]:

$$U_2(p) = U_1(p) \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_3 \cdot p + 1}, \quad (6)$$

Тоді, застосовуючи зворотне перетворення Лапласа, одержують

$$U_2(f) = U_1(f) \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_3} \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right), \quad (7)$$

Отже, після досягнення параметром  $t_m(\tau)$  розрахункового значення керівне діяння має бути зменшеним за експоненціальною залежністю від теплової місткості футерівки печі, яку характеризують параметром  $T_3$ .

Оптимальний графік змінювання температури гріючих газів залежить від чисельних значень  $K_1, K_2, T_1, T_2$  і  $T_3$ , проте вигляд управління залишається загальним для об'єктів, що вміщують похідну від керуючого діяння, та поданим на рис. 2.

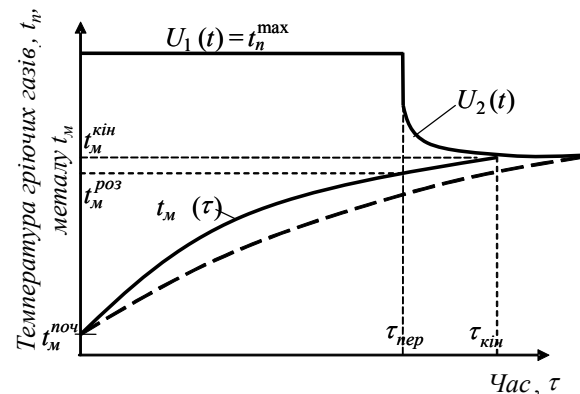


Рисунок 2 - Оптимальний графік змінювання температури гріючих газів

Переключення управління  $U_1 = \left| t_n^{max} \right|$  відбувається по досягненні температурою металу певного розрахункового значення  $t_m^{роз}$  на момент  $\tau_{пер}$ , що визначають з вирішення диференціального рівняння, яке відповідає передавальній функції (2).

Оскільки вирішення (7) представляється трансцендентним рівнянням, то аналітичне визначення температури  $t_m^{роз}$  і  $\tau_{пер}$  є неможливим та їх необхідні значення можливо знайти тільки графічним або чисельним методами.

Під час практичної реалізації такого алгоритму є можливим перерегулювання, що знижує ефективність управління. У зв'язку з цим застосовують графік нагрівання за постійної заданої температури гріючих газів (показано на рис. 3 пунктирною лінією, яка відповідає  $t_n^{зад} = t_m^{кін}$ ) або двоступінчатий

графік з достроковим переключенням управління [суцільна лінія  $t_n(\tau)$ ]. Такий двоступінчатий алгоритм є близьким до оптимального та його простіше реалізувати.

Виходячи з того, що процес нагрівання металу відбувається з поглинанням теплоти з робочого обсягу печі та компенсується під час автоматичного регулювання температури за рахунок теплової потужності, що підводять, визначаємо залежність теплової потужності за часом від температури металу.

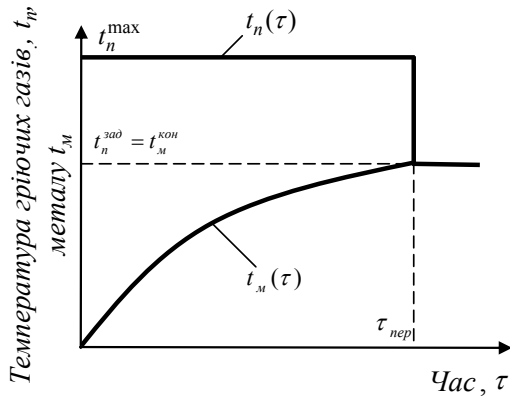


Рисунок 3 - Температурний режим форсованого нагрівання металу

Приймаючи, що відношення

$$\frac{W_{екв}(p) \cdot W_{рег}(p)}{1 + W_{екв}(p) \cdot W_{рег}(p)} = \frac{t_n(p)}{q_n(p)} = 1, \quad (8)$$

із структурної схеми (рис. 1) одержують передавальну функцію замкнутої системи за каналом  $q_n(p) - t_n(p)$  у вигляді

$$q_n(p) = \frac{W_{рег}(p)}{W_m(p)} \cdot t(p), \quad (9)$$

Таким чином, нехтуючи інерційністю регулятора у замкнутих системах автоматичного регулювання температури печі, функція  $t_m(\tau)$  повністю віддзеркалює накопичення теплоти у металі, що нагрівають. По досягненні рівності температури печі  $t_n$  та температури металу  $t_m$  теплове навантаження витрачають тільки на компенсацію втрат холостого ходу печі. Отже, момент завершення періоду нагрівання металу можна фіксувати за моментом стабілізації теплового навантаження на мінімальному рівні.

Температурні графіки нагрівання термічно масивних тіл, як мінімум, є двоступінчатыми: мають період нагрівання (перший) та період ізотермічної витримки (другий) [3,4], причому скорочення тривалості першого періоду супроводжується подовженням його другого періоду.

Згідно із законом Фур'є, перенесення теплоти у металі визначається не лише його теплофізичними властивостями, але й величиною градієнта температури в нім. Під час форсованого нагрівання металу підвищується температура його поверхні, зростає градієнт температури, а також швидкість поширення теплоти.

Динаміка змінювання температури за товщиною металу описують диференціальним рівнянням у частинних похідних (рівняння теплопровідності) і різницево-диференціальним рівнянням. Задачу оптимізації нагрівання масивних тіл відносять до класу задач оптимізації систем з розподіленими параметрами. За існуючими схемами опалювання камерних нагрівальних печей управління здійснюють за інформацією про температуру в печі. В зв'язку з цим представляється можливою апроксимація системи з розподіленими параметрами системою із зосередженими параметрами, де метал, який нагрівають, подають у вигляді великої кількості послідовно включених аперіодичних ланок першого порядку, які характеризуються постійною часу нагрівання елементарного шару. Така структура відповідає математичній моделі вигляду, що описано у роботі [5], коли тіло, яке нагрівають, подають у вигляді  $n$  шарів із зосередженими параметрами, котре відповідає інженерній моделі поширення теплоти Й.Д. Семікіна [6]. Під час нагрівання масивного тіла відбувається послідовне включення до нагрівання умовно виділених шарів. Розподіл теплових потоків і температури у тілі на будь-який момент часу залежить від характеру розподілу поверхневого теплового потоку на період, що є передуючим даному моменту часу. Час запізнювання нагрівання середини тіла визначає інерційність тіла.

Таку модель описують звичайними диференціальними рівняннями другого порядку, для яких є досить розробленою теорія оптимальних процесів. Для таких систем існує оптимальне за швидкістю та єдине вирішення рівняння, що переводить систему з одного (початкового) стану на інший (кінцевий). Чим більшою є кількість шарів, на які поділяють тіло, що нагрівають, тим точніше наблизені рівняння описують реальний перехідний процес. У такому поданні моделі нагрівання задача оптимізації стає класичною. Згідно з теоремою про  $n$  інтервалів [7], оптимальне управління буде релейним з  $n$  інтервалами, тобто температура у печі повинна  $n$  разів ступінчато змінюватися від  $t_n^{\max}$  до  $t_n^{\min}$  або навпаки. За таким управлінням є можливими короточасні перегрівання поверхні металу (в межах припустимого значення), проте за рахунок температурного градієнта усередині тіла створюються умови для швидшого вирівнювання температури за товщиною тіла.

Введення обмежень на граничну температуру поверхні металу  $t_{\text{нов}}^{\text{max}}$ , що нагрівають, і швидкість його нагрівання  $C_{\text{max}}$ , згідно з теоремою про  $n$  інтервалів, збільшує необхідну кількість інтервалів управління. З іншого боку, під час нагрівання масивних тіл, коли загальна тривалість нагрівання складає декілька годин, час перехідних процесів у печі за змінюванням температури в її робочому обсязі з мінімальної величини на максимальну і назад набагато менше будь-якого інтервалу постійності оптимального управління. Встановлено [8,9], що перші два-три інтервали регулювання складають основну частину оптимального процесу управління.

Результатом нагрівання за цей час, зважаючи на кінцеву швидкість поширення теплоти у масивному тілі, служить рівномірне прогрівання тіла. Чим термічно масивнішим є тіло, тим повільніше поширюється теплота від його поверхні до середини та тим більше потребується інтервалів управління. Перші дві-три постійні інтервали управління створюють температурні градієнти для подальшого самостійного вирівнювання температури металу, а наступні інтервали забезпечують рівномірність розподілу температури поблизу поверхні.

За наявності обмежень для масивних тіл наявність перших двох-трьох інтервалів може бути недостатньою для одержання задовільної якості нагрівання, тобто у такому разі слід вводити додаткові інтервали.

На рис. 4 показано оптимальний температурний графік нагрівання термічно масивного тіла під час розбиття на два термічно тонкі шари та наявності обмеження за температурою поверхні  $t_{\text{нов}}^{\text{max}}$  та швидкістю нагрівання  $C_{\text{max}}$ . Як видно, управління  $t_n$  має чотири рівні постійності, а переключення необхідно виконувати на моменти  $\tau_{n1}$ ,  $\tau_{n2}$ ,  $\tau_{n3}$ .

Сучасна теорія оптимальних систем із розподіленими параметрами чітко визначає часову функцію керуючого діяння, проте не в змозі визначити необхідну кількість інтервалів управління та моменти переключення. Моменти переключення визначають залежно від прийнятої математичної моделі нагрівання (рівнянь теплопровідності). Так, у роботі [10] запропоновано серії номограм для розрахунків моментів переключення керуючого діяння.

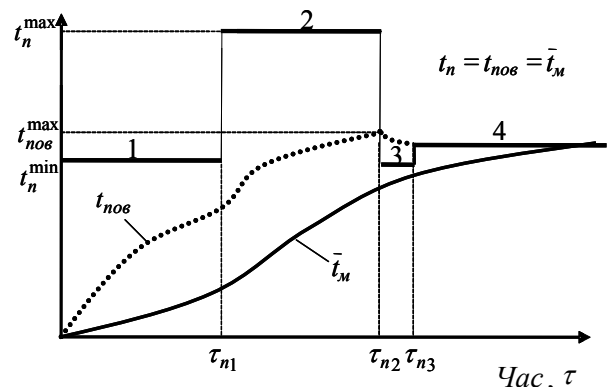


Рисунок 4 – Температурний графік форсованого нагрівання металу

**Висновки.** Нагрівальні печі камерного типу як об'єкт управління можуть бути подані у вигляді сукупності аперіодичних ланок першого порядку, охоплених позитивними зворотними зв'язками. Міра охоплення зворотними зв'язками визначається співвідношенням теплопередавання до металу, що нагрівають, і втратами теплоти з продуктами горіння, а також через футерівку печі, та змінюється протягом нагрівання. За умови рівності теплових потоків до футерівки печі та металу система «гріючі газу-футерівка печі-метал» може стати астатичною, тобто за сталим режимом зникає залежність між приходом теплоти, температурою газового середовища у печі та температурою металу.

### Бібліографічний список

1. Кузин, Л. Т. Основы кибернетики [Текст] : учеб. пособие / Л. Т. Кузин. – М. : Энергия, 1973. – 584 с. – Библиогр.: с. 574-576. – 27000 экз.
2. Олейников, В. А. Основы оптимального и экстремального управления [Текст] / В. А. Олейников. – М. : Высшая школа, 1969. – 296 с. – Библиогр.: с. 293-294. – 11000 экз.
3. Климовицкий, М. Д. Оптимизация работы нагревательных печей [Текст] / М. Д. Климовицкий. – М. : Metallurgiya, 1965. – 164 с. – Библиогр.: с. 161-163. – 1990 экз.
4. Малый, С. А. Некоторые оптимальные режимы нагрева металла [Текст] / С. А. Малый // Известия вузов. Черная металлургия. – 1966. – № 9. – С. 175-179. – Библиогр.: с. 179.
5. Бутковский, А. Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами [Текст] / А. Г. Бутковский. – М. : Наука, 1965. – 474 с. – Библиогр.: с. 467-474. – 8000 экз.
6. Свинолобов, Н. П. Инженерная модель в теории теплопроводности в трактовке И.Д. Семикина [Текст] / Н. П. Свинолобов // Металлургическая теплотехника : сб. научн. трудов государственной металлургической академии Украины. – 1999. – Т. 2. – С. 226-235. – Библиогр.: с. 235.
7. Фельдбаум, А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем [Текст] / А. А. Фельдбаум. – М. : Наука, 1966. – 623 с. – Библиогр.: с. 594-618. – 13000 экз.
8. Маковский, В. А. Алгоритмы управления нагревательными печами [Текст] / В. А. Маковский, А. А. Лаврентик. – М. : Metallurgiya, 1977. – 183 с. – Библиогр.: с. 182-183. – 2300 экз.

9. **Бутковский, А. Г.** Методы управления системами с распределенными параметрами [Текст] / А. Г. Бутковский. – М. : Наука, 1975. – 568 с. – Библиогр.: с. 548-565. – 6000 экз.
10. **Ревун, М. П.** Адаптивные системы управления процессами нагрева металла [Текст] / М. П. Ревун, А. К. Соколов. – Запорожье : ЗГИА, 1998. – 352 с. – Библиогр.: с. 346-351. – 300 экз.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2015 р.  
Рецензент, проф. І.Г. Яковлева

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>