

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 669.713 : 681.3

КОРЖИК М. В., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

### АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ПІЧЧЮ ГРАФІТАЦІЇ В НЕШТАТНОМУ РЕЖИМІ

Розроблено алгоритм керування графітацією в печі Ачесона, який, на основі аналізу терморужного стану виробів під час кампанії, дозволяє одержувати вироби високої якості за регламентного й нештатного режимів підведення потужності.

**Ключові слова:** піч графітації Ачесона, алгоритм керування, терморужний стан.

#### Постановка проблеми

Сучасною тенденцією розвитку виробництва графітованої продукції є використання великовантажних печей високої потужності [1]. Виробництво габаритної продукції, до якої належать електроди дугових сталеплавильних печей, подові блоки алюмінієвих електролізерів тощо, зазвичай здійснюють в електричних печах опору за технологією Ачесона.

У печах Ачесона пришвидшення розігріву зменшує непродуктивні втрати теплоти в навколишнє середовище [2]. З іншого боку, інтенсифікація процесу збільшує нерівномірність температурного поля в печі. Як наслідок, зростають термічні напруження у виробках, що спричинюють їхнє руйнування. У разі застосування великовантажних печей це призводить до значних економічних збитків.

З огляду на це, побудова енергоощадної системи керування графітацією, що забезпечує високу якість кінцевої продукції за будь-яких режимів, є надзвичайно актуальним науковим і технічним завданням.

#### Аналіз попередніх досліджень

Відома стратегія керування, здатна забезпечувати реалізацію оптимального енергоощадного режиму підведення потужності на основі аналізу електротермічних і механічних станів печі Ачесона [3]. У загальному вигляді опис термоелектричного стану печі базується на системі диференціальних рівнянь теорії потенціалу й теплопровідності з відповідними крайовими умовами. Система складається із нестационарного нелінійного неоднорідного рівняння теплопровідності та квазістационарного рівняння безвихрового поля електричного потенціалу для кожної просторової області, що утворюють загальний об'єм печі [4]:

$$\begin{cases} \frac{dH_i(T)}{d\tau} - \nabla(\lambda_i(T) \nabla T) \Big|_{\tau=0} = \mathbf{J}_i^2 \rho_i(T); \\ H_i(T) = \int_0^T \gamma_i(T) c_i(T) dT; \\ \mathbf{J}_i \Big|_{\tau=\text{const}} = -\frac{\nabla \varphi_i}{\rho_i(T)}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $i$  – індекс області, визначеної в просторових координатах  $x, y, z \in \Omega, m$ ;  $H$  – тепловміст просторової області, Дж/м<sup>3</sup>;  $c$  – ефективна масова ізобарна теплоємність, що враховує теплоту фазового переходу для відповідних просторових областей, Дж/(кг · К);  $\gamma$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м · К);  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу просторової області, Ом · м;  $\mathbf{J}$  – вектор густини струму, А/м<sup>2</sup>;  $\varphi$  – електричний потенціал, В;  $T$  – розрахункова температура, К;  $\tau$  – час, с;  $\nabla$  – диференціальний оператор Гамільтона.

Для замикання системи (1) задають початкові теплові  $T_0$  і межові теплові та електричні умови. При цьому керування піччю  $U(\tau)$  розглядають як перепад потенціалів, заданих відповідними межовими умовами на струмопідводах печі.

Розв'язок задачі (1) з крайовими умовами описує динаміку просторового температурного поля печі  $T(x, y, z, \tau)$ , адекватність якого перевіряють порівнянням розрахункового струму печі  $I_m$  із вимірним безпосередньо під час кампанії  $I_a$ . Розрахунковий струм печі  $I_m = \int_S \mathbf{J} dS$ , де  $S$  – площа поперечного перерізу керна печі,  $m^2$ .

Нестационарне температурне поле  $T(x, y, z, \tau)$  спричиняє напружений стан виробів, що також змінюється з часом. Оскільки швидкість зміни переміщень є значно вищою, аніж швидкість зміни температури в суцільному середовищі, термопружний стан виробів під час кампанії можна описати системою рівнянь механічного руху, розглядаючи динамічну задачу термопружності як послідовність рівноважних станів, розрахованих для кожного кроку навантаження печі [2].

Квазістационарна задача термопружності ( $\tau = \text{const}$ ) для просторових областей, якими є електродні заготовки, описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} \nabla \Sigma_i + \gamma_i \mathbf{b}_i = 0; \\ \mathbf{E}_i = (\mathbf{u}_i \nabla + \nabla \mathbf{u}_i) / 2; \\ \boldsymbol{\varepsilon}_i = (T - T_0) \boldsymbol{\varepsilon}_i(T) + \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\sigma}_i, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\mathbf{b}$  – вектор масових сил, Па/м;  $\mathbf{u}$  – вектор переміщень, що містить відповідні просторовим координатам компоненти, м;  $\Sigma$  та  $\mathbf{E}$  – тензори напружень і малих деформацій відповідно,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  – вектор малих деформацій, що враховує відносні лінійні й кутові деформації;  $\mathbf{e}$  – вектор термічних подовжень;  $\boldsymbol{\sigma}$  – вектор напружень, що враховує нормальні й дотичні напруження, Па;  $\mathbf{C}^{-1}$  – зворотна матриця пружності, що містить відповідні модулі пружності для напрямів ортотропного середовища просторової області.

Для замикання системи (2) задають відповідні геометричні й статичні межові умови.

Числові моделі, побудовані на базі задач (1) і (2), забезпечують спостереження температурного стану печі й термопружного стану виробів під час кампанії графітації. Поточний аналіз полів напружень дозволяє визначити динаміку максимальних термічних напружень для будь-якого напрямку ортотропного середовища виробів:

$$s(\tau) = \max_{|\Omega} (|\boldsymbol{\sigma}(x, y, z, \tau)|). \quad (3)$$

Діючі системи керування здатні забезпечити виробництво графітованої продукції високої якості, якщо кампанія графітації відбувається за регламентом. Проте сучасна виробнича практика свідчить про велику ймовірність ситуацій, коли під час кампанії відбувається тимчасове припинення живлення печі ( $U = 0$ ), здебільшого пов'язане з регіональним регулюванням споживання електроенергії промисловими підприємствами.

**Мета** статті – за допомогою наведених моделей дослідити термопружний стан виробів під час кампанії графітації за нештатного режиму енергопостачання, вдосконаливши алгоритми керування в такий спосіб, щоб їхня реалізація забезпечила високу якість кінцевої продукції незалежно від тривалості перебоїв в електроживленні печі Ачесона.

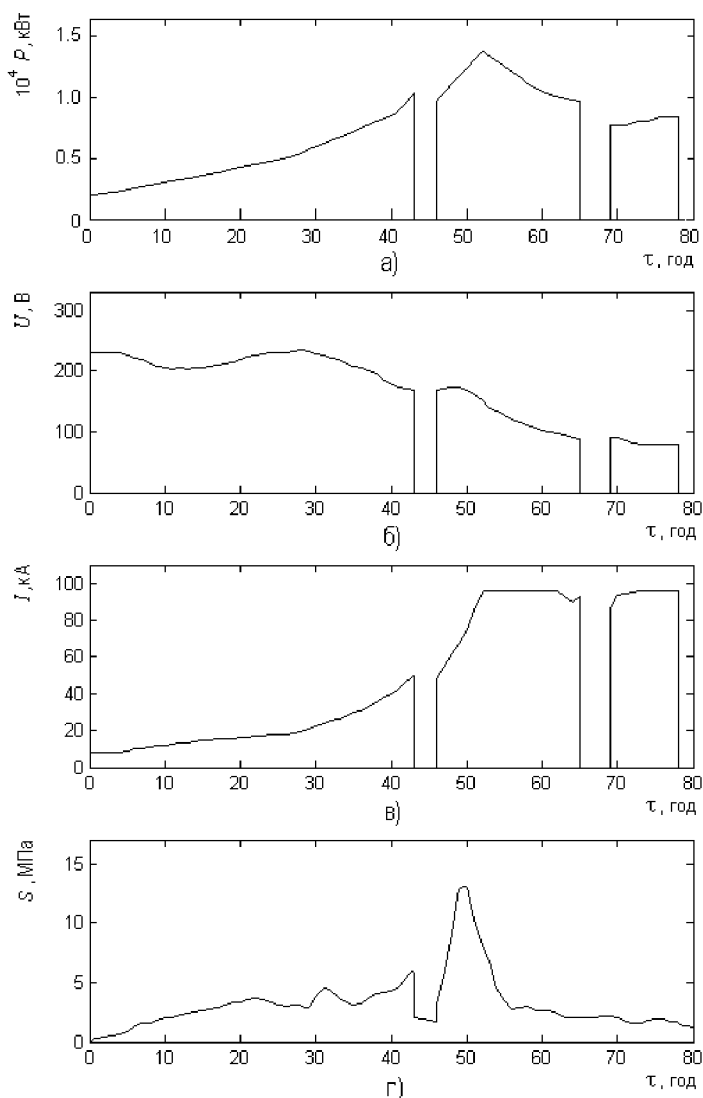
#### Дослідження ординарної кампанії графітації

Для перевірки актуальності поставленої задачі здійснено моделювання станів печі Ачесона сталого струму в кампанії графітації електродних заготовок  $\varnothing 555$  мм за традиційної трирядної схеми пакетування. Результати експериментального дослідження цієї кампанії наведено в праці [5]. Кампанія тривала 78 год. 20 хв. При цьому впродовж кампанії спостерігали два тривалих перебої в електроживленні, внаслідок яких піч простоювала загалом 7 год. 40 хв.

Досліджували напруження в заготовках середнього ряду, оскільки результати експериментів і моделювання термопружного стану печі (за виразом (3) в осьовому напрямі) свідчать, що ці заготовки розігріваються найшвидше і зруйнуються першими за неналежного керування.

Під час розігрівання, поки потужність печі ще не досягла максимального значення (рис. 1, а), напруження в заготовках є незначними порівняно з межею міцності на розтягнення  $\sigma_{\text{max}} = 15,2$  МПа. Це свідчить про можливість істотного пришвидшення процесу на цій стадії. Але після тимчасового припинення підведення енергії (на 44-й годині), напруження в осьовому напрямі стає порівняним із межею міцності (рис. 1, б). Це явище є потенційно небезпечним за традиційного способу графітації і має бути обов'язково врахованим під час розроблення алгоритмів керування для нештатного режиму.

Триваліше припинення підведення енергії (на 65-й годині), коли піч працювала за максимальної сили струму (етап зменшення потужності) (рис. 1, в), майже не змінило термічні напруження, що свідчить про доцільність підвищення потужності пічних трансформаторів для великовантажних печей графітації.



*a – потужність, б – напруга, в – сила струму, г – максимальні осьові напруження*

**Рис. 1 – Динаміка параметрів ординарної кампанії графітації**

#### Алгоритм визначення оптимального керування

Процес графітації можна пришвидшити шляхом синтезу керування [3]:

$$U(\tau) = \arg \min_{U \in U} \{ \sigma_{\max} - s(\tau) \mid s(x, y, z) \leq \sigma_{\max} \}, \quad (4)$$

де  $U = \overline{0, U_{\max}}$  – область припустимих керувань.

Щоб оптимізувати керування в сенсі критерію (4) в реальному часі розглянемо кампанію графітації як послідовність дискретних кроків навантаження печі  $\tau = \psi k$ , де  $\psi$  – тривалість кроку, год;  $k$  – номер кроку, причому на кожному кроці керівний вплив вважають сталим  $U(k) = \text{const}$ . Тоді керування на наступний крок навантаження печі можна здійснити так (рис. 2):

1. Процедура згідно з (1) розраховує оцінку температурного стану печі  $T(k+1)$  на наступний крок навантаження (блок 2) на основі поточного керування  $U_a$  (блок 1) та на основі (2) – оцінку термопружно-

го стану заготовок середнього ряду  $\sigma(k+1)$  (блок 3). Згідно з (3) розраховують максимальні абсолютні напруження  $s(k+1)$  заготовки середнього ряду (блок 4).

2. Перевіряють умову  $s(k+1) < \sigma_{\max} - \xi$ , де  $\xi$  – задана точність визначення напружень в заготовках, Па, що враховує похибки моделей і зміни температури впродовж кроку навантаження (блок 5). Якщо умова виконується, збільшують керування  $U(k+1)$  (блок 6), що має верхнє обмеження  $U_{\max}$  (блоки 7, 8), і повторюють розрахунок оцінок стану об'єкта за нового значення керування (пункт 1).

3. Перевіряють умову  $s(k+1) > \sigma_{\max} - \xi$  (блок 9). Якщо умова виконується, зменшують керування  $U(k+1)$  (блок 10), що має нижнє обмеження 0 В, і повторюють розрахунок оцінок стану об'єкта за нового значення керування (пункт 1). В іншому разі процедуру закінчують, що свідчить про дотримання умов критерію (4) із точністю  $\xi$ .

Змінення керування в пунктах 2 і 3 (блоки 6 і 10) відбувається за схемою одного з методів послідовної одновимірної оптимізації [6].

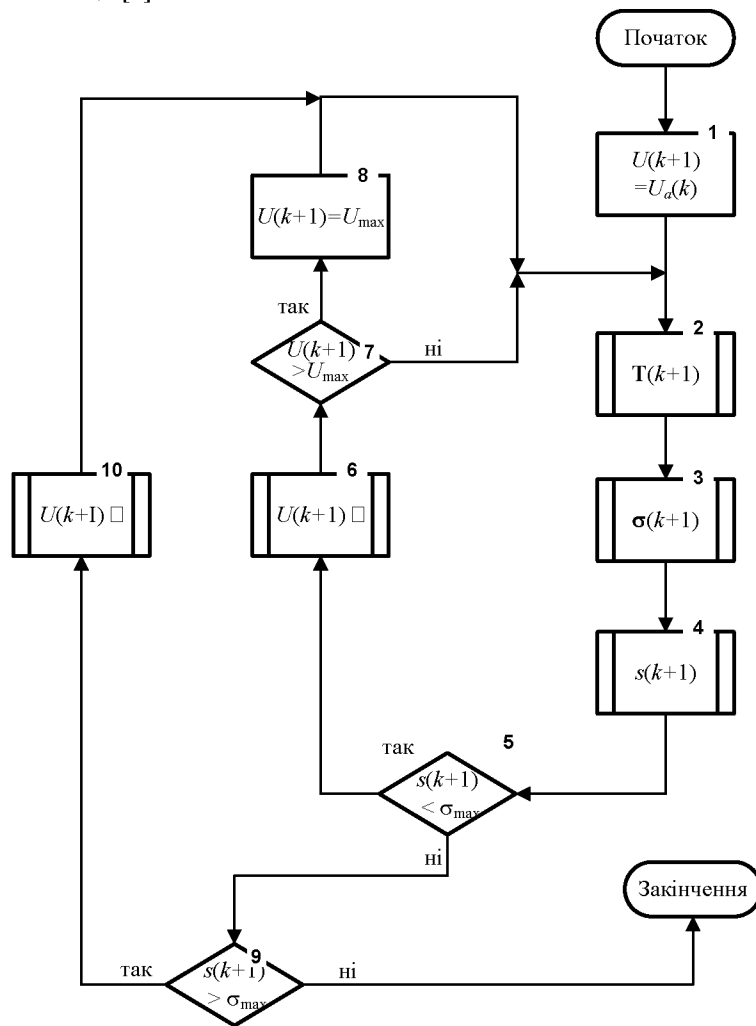


Рис. 2 – Структурна схема алгоритму визначення оптимального керування

#### Керування гравітацією за нештатного режиму

Пуск печі після тривалої зупинки з керуванням (електричною напругою), визначеним системою керування відповідно до алгоритмів штатного режиму (див. рис. 2), здатен спричинити небезпечні термічні напруження у виробках (див. рис. 1, з). Вважатимемо цю ситуацію нештатним режимом роботи печі.

Щоб відкоригувати напругу печі за нештатного режиму, визначенню оптимального керування має передувати контрольна процедура (рис. 3):

1. За оцінкою температурного стану печі  $T(k)$  наприкінці поточного кроку, одержаній для поточного керування  $U_a(k)$ , за допомогою моделі (3) оцінюють термопружний стан заготовок середнього ряду  $\sigma(k)$  (блок 1) і згідно з (4) розраховують максимальні абсолютні напруження  $s(k+1)$  (блок 2).

2. Перевіряють умову  $s(k+1) > \sigma_{\max} - \xi$  (блок 3), і, якщо термічні напруження не становлять загрози, подальше керування здійснюють за штатного режиму.

3. Виконання цього пункту означає, що за поточного керування  $U_a(k)$  наприкінці поточного кроку термічні напруження в заготовках перевищують максимально допустимі. Тому поточне керування зменшують (блок 4) і відразу встановлюють на об'єкті (блок 5) за будь-якої стадії кампанії графітації. Далі вимірюють поточні змінні об'єкта (блок 6), що зберігають у базі даних (блок 7) замість одержаних за штатного режиму.

4. Відповідно до (1) оцінюють температурний стан об'єкта на момент закінчення поточного кроку  $k$  (блоки 8, 9), і повторюють пункт 1.

Отже, алгоритм забезпечує зменшення поточного керування до безпечного рівня і дозволяє здійснювати наступні кроки за штатного режиму.

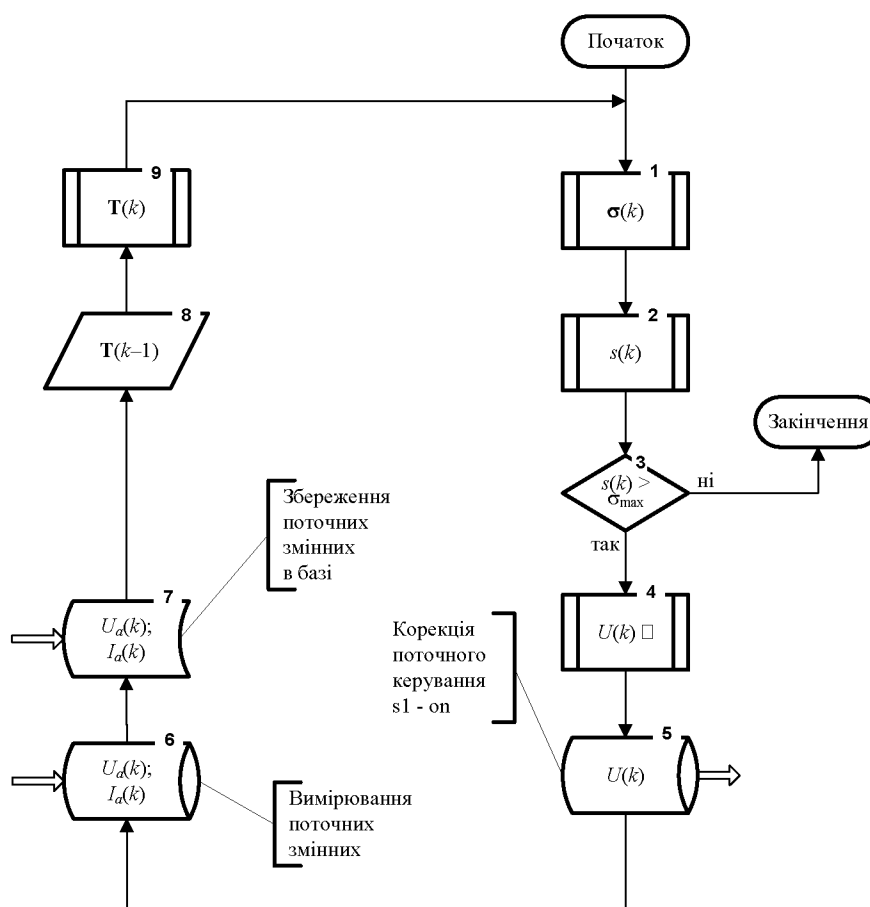


Рис. 3 – Структурна схема алгоритму контрольної процедури

Під час керування стадією розігріву контрольну процедуру слід виконувати на кожному кроці як запобіжний захід, що гарантує цілісність виробів не лише за нештатного режиму, але й можливого неточного відпрацювання системою нижнього рівня визначеного керування  $U(k)$ .

Керування на етапі зниження потужності здійснює система нижнього рівня. На цій стадії ймовірність пошкодження виробів внаслідок термічних напружень значно зменшується [1], тому контрольну процедуру виконують лише в разі повторного запуску печі після тимчасового простою. Цю подію можна визначити перевіркою умови  $\{U_a(k-1) = 0\}$  and  $\{U_a(k) > 0\}$ .

#### Висновки

Розроблено алгоритми, що на основі аналізу електротермічного й термопружного станів виробів під час кампанії графітації в печі Ачесона забезпечують оптимальне керування процесом, дозволяючи одержувати продукцію високої якості за будь-якого режиму підведення потужності.

На якість оцінювання стану печі вирішальним чином впливає точність визначення параметрів моделей. Визначення властивостей пічних матеріалів за високих температур буде предметом подальших досліджень.

#### Список використаної літератури

1. *Соседов, В. П.* Графитация углеродистых материалов [Текст] / В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых. – М. : Металлургия, 1987. – 176 с.
2. *Коржик, М. В.* Керування стадією розігріву печі графітації [Текст] / М. В. Коржик // Автоматизація виробничих процесів. – 2006. – № 2. – С. 69-78.
3. *Коржик, М. В.* Розробка системи керування процесом графітації в печах Ачесона [Текст] / М. В. Коржик, Г. І. Гурчик // Вісн. НТУУ «КПІ» : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2010. – № 1. – С. 98-103.
4. *Коржик, М. В.* Модель температурного поля печі графітації [Текст] / М. В. Коржик, С. В. Кутузов // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2007. – № 1. – С. 17-23.
5. *Коржик, М. В.* Вдосконалення регламенту графітації електродних виробів [Текст] / М. В. Коржик, І. Л. Шилович, А. І. Жученко, О. Ю. Уразліна // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2004. – № 2. – С. 107-109.
6. *Цирлин, А. М.* Оптимальное управление технологическими процессами [Текст] / А. М. Цирлин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.

*There is developed control algorithm of graphitization process in Acheson kiln which, on the basis of the analysis of a thermoelastic condition of products during campaign, allows to receive final quality products both in routine, and abnormal mode of a supply of capacity.*

**Keywords:** *graphitization Acheson kiln, control algorithm, thermoelastic state.*

Надійшла до редакції 12.01.2012

---

УДК 681.51 : 681.3

ДУБІК Р. М., асп.; ЛАДІЄВА Л. Р., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОНТАКТНОЮ МЕМБРАННОЮ ДИСТИЛЯЦІЄЮ З ВИКОРИСТАННЯМ $\mu$ -СИНТЕЗУ

*Розв'язано задачу оптимального керування контактною мембранною дистиляцією за умов невизначеності. Розглянуто систему керування з субоптимальним  $\mu$ -регулятором, проаналізовано робастність замкненої системи.*

**Ключові слова:** *система керування, субоптимальний  $\mu$ -регулятор, контактна мембранна дистиляція.*

#### Постановка проблеми

Керування контактною мембранною дистиляцією (КМД) ускладнюється протягом експлуатації мембранного модуля (ММ) внаслідок зміння характеристик мембрани, наприклад її пористості, та усередненого коефіцієнта теплопередачі. Синтез закону керування за умов невизначеності здійснювали з метою підвищення робастності перехідних характеристик, що актуально для керування процесом. Для розв'язку поставленої задачі досліджували можливість застосування  $\mu$ -регулятора.

**Метою** статті є проектування системи керування КМД за допомогою  $\mu$ -синтезу, яка б забезпечувала достатню якість перехідних характеристик, необхідну точність і робастність за умов невизначеності. Вимоги до систем керування висували в частотній і часовій області за неповного вимірювання вектора стану.

© Дубік Р. М., Ладієва Л. Р., 2012