

## СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГАРЯЧОГО ЦИНКУВАННЯ

**Л. І. Бугрім**, кандидат технічних наук, доцент

**І. С. Білюк**, кандидат технічних наук, доцент

**С. О. Гаврилов**, кандидат технічних наук

**А. В. Курган**, магістр

Національний університет кораблебудування  
ім. адмірала Макарова

*Синтезована система оптимального керування процесом гарячого цинкування. Наведено методику розрахунку параметрів оптимальної системи керування. У якості критерію оптимальності обрано квадратичний показник якості. Виконано розрахунок параметрів оптимальної системи керування процесом гарячого цинкування. Проведено імітаційне моделювання спроектованої системи керування. Показано, що синтезована система оптимального керування забезпечує плавність та високу швидкодію процесу гарячого цинкування.*

**Ключові слова:** система автоматичного керування, оптимальна система керування, гаряче цинкування, математична модель, перехідний процес, імітаційна модель.

**Постановка проблеми.** Будь-який метал потребує створення захисного покриття від іржі, корозії та інших шкідливих впливів, здатних зруйнувати виріб. У світовій практиці з металевих покриттів найчастіше використовуються цинкові. Головними причинами, що обумовлюють вибір на користь цинкових покриттів для виробів з металу, є невисока ціна цинку та вартості цинкування, а також наявність більш електронегативного стаціонарного потенціалу, ніж залізо, при впливі агресивних середовищ [1-3].

Якість процесу цинкування залежить від дотримання на належному рівні вимог технологічного процесу. Однією зі складових технологічного процесу є підтримання із заданою точністю температурного режиму за допомогою систем автоматичного керування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показав, що в системах керування процесом гарячого цинкування використовуються різні типи промислових регуляторів, але опти-

мізація процесу нагріву стінки ванни для електрохімічного нанесення покриття не проводилася.

Так, в роботі [4] пропонується методика розрахунку і прогнозування температурних режимів осадження гальванічних покриттів. Для отримання необхідної якості покриття використовується проведення гальванічного процесу на індивідуальних температурних режимах.

В роботі [5] було розглянуто математичну модель ванни гарячого цинкування як об'єкта регулювання (ОР) температури зовнішньої стінки корпусу ванни. Розроблено алгоритм для розрахунку параметрів на сталому режимі та виконано розрахунок коефіцієнтів математичної моделі. У результаті отримано можливість дослідження впливу на динамічні характеристики ОР керуючого і декількох збурюючих впливів і конструктивних параметрів.

У роботі [6] виконано дослідження системи автоматичного регулювання температури стінки ванни для гарячого цинкування при використанні різних регуляторів.

У роботі [7] було з'ясовано, що сучасні системи керування мають можливість з високою точністю контролювати і управляти товщиною покриття на смузі. За їх допомогою на смугу можна рівномірно наносити покриття по довжині і ширині. Для видалення надлишку цинку в даних системах використовують нову конструкцію газового ножа з регульованим профілем сопла.

У роботі [8] розглянуто математичну модель об'єкта з оптимальним регулятором температури рідини. На основі лінійно-квадратичного критерію оптимальності знайдено параметри оптимального регулятора та досліджено управління в системі візуального програмування Simulink (MATLAB).

Таким чином, питання синтезу оптимальної системи керування процесом гарячого цинкування є актуальним.

**Метою статті є** синтез системи керування процесом гарячого цинкування, яка забезпечує оптимізацію процесу нагріву стінки ванни для електрохімічного нанесення покриття.

**Викладення основного матеріалу.** Ванна піч для гарячого цинкування, як об'єкт регулювання, представляє п'ять

взаємозалежних частин, кожна з яких характеризує одну вихідну величину. Це – температури нагрівача, зовнішньої стінки ванни, розплаву цинку в ванні, виробу, внутрішньої стінки футерівки. Якість цинкування більше залежить від температур розплаву цинку і виробу. Оскільки технологічно найбільш просто вимірювати зовнішню температуру стінки ванни, то її найчастіше обирають регульованою величиною при проектуванні систем керування процесом гарячого цинкування [1]. Температура стінки залежить від температури нагрівача і цинку.

Температура нагрівача регулюється зміною потужності, що підводиться до нього від тиристорного перетворювача, і на цю температуру впливають температури стінок ванни і футерівки, між якими розміщено нагрівач. При отриманні математичної моделі вважаємо температуру навколишнього середовища незмінною. В цьому випадку температура футерівки залежить тільки від нагрівача [5].

У роботі [5] отримано структурну схему ванни як об'єкта регулювання температури зовнішньої стінки ванни представлено на рис 1.

На рисунку позначені:  $T_n$ ,  $T_c$ ,  $T_\phi$ ;  $T_\psi$ ;  $T_b$  – постійні часу відповідно нагрівача, стінки ванни, футерівки, ванни з цинком та виробів;  $K_{n1}$ ;  $K_{n2}$ ;  $K_{n3}$ ;  $K_{c1}$ ;  $K_{c2}$ ;  $K_{\phi1}$ ;  $K_{\psi1}$ ;  $K_{\psi2}$ ;  $K_{\psi3}$ ;  $K_b$  – коефіцієнти передачі по відповідному входу.

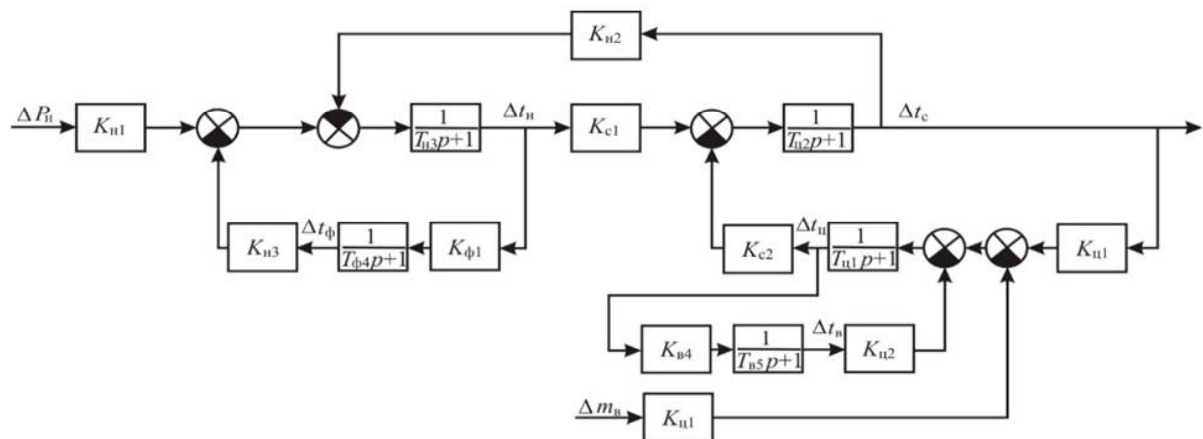


Рис. 1. Структурна схема системи керування температурою зовнішньої стінки ванни

Виконавши структурні перетворення, отримаємо передачу функцію об'єкта керування:

$$W(p) = \frac{K_1 p^3 + K_2 p^2 + K_3 p + K_4 + 1}{T_1 p^5 + T_2 p^4 + T_3 p^3 + T_4 p^2 + T_5 p + T_6 + 1},$$

$$\text{де } K_1 = K_{\text{н1}} \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \left( K_{\text{с1}} T_{\phi 4} \right) \right);$$

$$K_2 = K_{\text{н1}} \left( \left( T_{\phi 4} + T_{\text{у1}} \right) \left( K_{\text{с1}} T_{\phi 4} \right) + T_{\phi 4} T_{\text{у1}} K_{\text{с1}} \right);$$

$$K_3 = K_{\text{н1}} \left( K_{\text{с4}} K_{\text{у2}} \left( K_{\text{с1}} T_{\phi 4} \right) + \left( T_{\text{у1}} + T_{\phi 4} \right) K_{\text{с1}} \right);$$

$$K_4 = K_{\text{н1}} \left( K_{\text{с1}} + \left( K_{\text{с4}} K_{\text{у2}} \right) \right);$$

$$T_1 = \left( T_{\text{у2}} \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \right) \right) \left( T_{\phi 4} T_{\text{н3}} \right);$$

$$T_2 = \left( T_{\text{у2}} \left( T_{\phi 4} + T_{\text{у1}} \right) \right) + \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \right) \left( T_{\phi 4} T_{\text{н3}} \right) + \left( T_{\text{у2}} \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \right) \right) \left( T_{\phi 4} + T_{\text{н3}} \right);$$

$$T_3 = \left( T_{\text{у2}} \left( K_{\text{с4}} K_{\text{у2}} \right) + T_{\text{у2}} + \left( T_{\text{у4}} + T_{\text{у1}} \right) + K_{\text{с2}} K_{\text{у1}} T_{\phi 4} \right) \left( T_{\phi 4} T_{\text{н3}} \right) + \left( T_{\text{у2}} \left( T_{\phi 4} + T_{\text{у1}} \right) \right) + \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \right) \left( T_{\phi 4} + T_{\text{н3}} \right) + \left( T_{\text{у2}} \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \right) \right) \left( K_{\text{н3}} K_{\phi 1} \right) + T_{\text{у2}} \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \right) + \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \left( K_{\text{с1}} T_{\phi 4} \right) \right) K_{\text{н2}};$$

$$T_4 = \left( K_{\text{с4}} K_{\text{у2}} + K_{\text{с2}} K_{\text{у1}} \right) \left( T_{\phi 4} T_{\text{н3}} \right) + \left( T_{\phi 4} T_{\text{н3}} \right) + \left( T_{\text{у2}} \left( K_{\text{с4}} K_{\text{у2}} \right) + T_{\text{у2}} + \left( T_{\text{у4}} + T_{\text{у1}} \right) \right) + K_{\text{с2}} K_{\text{у1}} T_{\phi 4} \left( T_{\phi 4} + T_{\text{н3}} \right) + \left( T_{\text{у2}} \left( T_{\phi 4} + T_{\text{у1}} \right) \right) + \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \right) \left( K_{\text{н3}} K_{\phi 1} \right) + \left( T_{\text{у2}} \left( T_{\phi 4} + T_{\text{у1}} \right) \right) + \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \right) + \left( \left( T_{\phi 4} + T_{\text{у1}} \right) \left( K_{\text{с1}} T_{\phi 4} \right) + \left( T_{\phi 4} T_{\text{у1}} \right) K_{\text{с1}} \right) K_{\text{н2}};$$

$$T_5 = \left( K_{\text{с4}} K_{\text{у2}} + K_{\text{с2}} K_{\text{у1}} \right) \left( T_{\phi 4} + T_{\text{н3}} \right) + \left( T_{\phi 4} + T_{\text{н3}} \right) + \left( T_{\text{у2}} \left( K_{\text{с4}} K_{\text{у2}} \right) + T_{\text{у2}} + \left( T_{\text{у4}} T_{\text{у1}} \right) \right) + K_{\text{с2}} K_{\text{у1}} T_{\phi 4} \left( K_{\text{н3}} K_{\phi 1} \right) + \left( T_{\text{у2}} \left( K_{\text{с4}} K_{\text{у2}} \right) + T_{\text{у2}} + \left( T_{\text{у4}} + T_{\text{у1}} \right) + K_{\text{с2}} K_{\text{у1}} T_{\phi 4} \right) + \left( \left( K_{\text{с4}} \cdot K_{\text{у2}} \right) \left( K_{\text{с1}} T_{\phi 4} \right) + K_{\text{с1}} \left( T_{\phi 4} + T_{\text{у1}} \right) \right) K_{\text{н2}};$$

$$T_6 = \left( K_{\text{с4}} K_{\text{у2}} + K_{\text{с2}} K_{\text{у1}} \right) + \left( K_{\text{н3}} K_{\phi 1} \right) + \left( K_{\text{с1}} \left( K_{\text{с4}} K_{\text{у2}} \right) \right).$$

В теорії керування у загальному випадку розглядаються системи (об'єкти), на поведінку яких можна впливати (якими можна керувати) шляхом зміни параметрів керування. Останні обираються з урахуванням певних обмежень [9]. У нашому випадку за критерій оптимальності приймемо час перехідного процесу нагріву стінки ванної печі для гарячого цинкування.

Структурну схему оптимальної системи керування зображено на рис. 2.

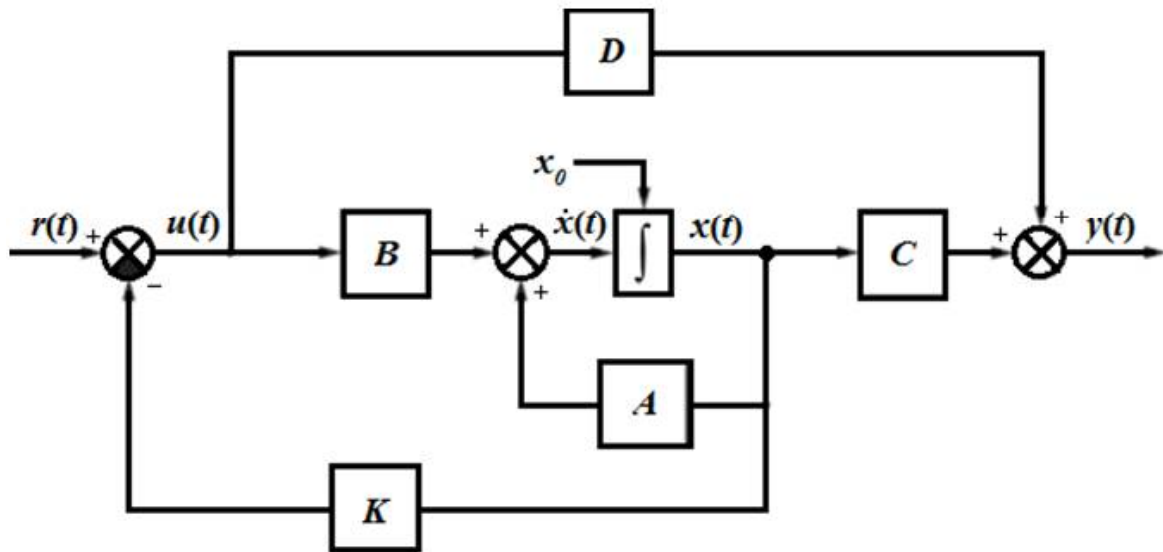


Рис. 2. Структурна схема оптимальної системи керування :  $r(t)$  – вхід системи;  $x(t)$  – змінна стану системи;  $y(t)$  – вихід системи;  $u(t)$  – закон керування;  $A$  – матриця об’єкта;  $B$  – матриця керування;  $C$  – матриця спостереження;  $D$  – матриця зв’язку  $K$  – матриця зворотних зв’язків

Для розробки математичної моделі системи оптимального керування процесом гарячого цинкування необхідно обрати таке керування об’єктом, при якому розглянута система наводиться з початкового стану в нуль із забезпеченням мінімуму функціонала [8, 10]:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) N u(t)] dt,$$

де  $Q$  і  $N$  – позитивно визначені матриці. Перша складова підінтегральної функції характеризує динамічну точність регулювання, а друга складова – затрати енергії на керування.

Знайдемо керування із зворотним зв’язком, при якому замкнута система асимптотична стійка і критерій оптимальності приймає мінімальне значення. Рішення задачі можна записати у вигляді

$$u(t) = -K(t)x(t),$$

де  $K(t) = N^{-1} B^T P(t)$ , а  $P(t)$  – розв’язання матричного рівняння Ріккати

$$A^T P(t) + P(t)A - P(t)BN^{-1}B^T P(t) + Q = 0.$$

Таким чином, оптимальний закон регулювання набуває вигляду  $u(t) = -N^{-1}B^T P(t)x(t)$ .

Для чисельних даних, представлених в роботі [5], отримаємо:

$$A = \begin{pmatrix} -7,905 & -2,578 & -0,5723 & -0,1521 & -0,042 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & 0,03125 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} 0,03125 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; C = (0 \quad 0,00324 \quad 0,00862 \quad 0,00555 \quad 0,00356); D = (0);$$

$$K = (0,0105 \quad 0,203 \quad 0,515 \quad 0,434 \quad 0,325).$$

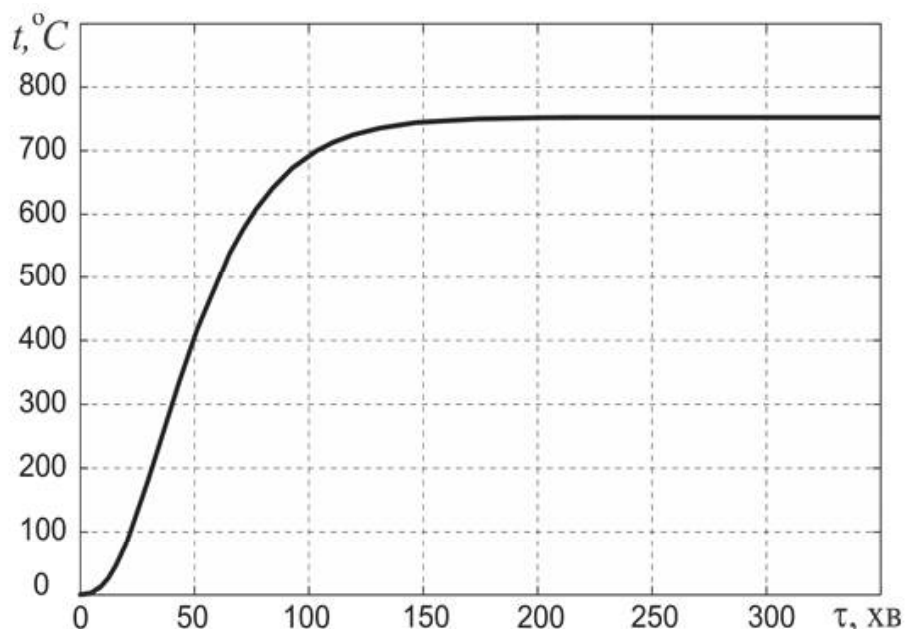
Матриця Рікати Р в цьому випадку:

$$P = \begin{pmatrix} 3,361 & 6,52 & 16,495 & 13,908 & 10,423 \\ 6,52 & 12,996 & 32,661 & 27,545 & 20,645 \\ 16,495 & 32,661 & 85,839 & 72,581 & 54,437 \\ 13,908 & 27,545 & 72,581 & 71,929 & 54,722 \\ 10,423 & 20,645 & 54,437 & 54,722 & 74,352 \end{pmatrix}.$$

Результати імітаційного моделювання представлено на рис. 3. Тут відображено залежність температури нагріву стінки ванни у часі. Як приклад розглянуто регулювання температури при наступних вимогах до регулювання: початкова температура рідини та температура навколишнього середовища – 20°C, необхідна температура стінки ванни дорівнює 760°C.



З перехідного процесу можна побачити, що нагрів стінки ванни до заданого параметру відбувається плавно та триває 150 хв, що є оптимальним для процесу цинкування.



**Висновки.** У результаті проведеного дослідження виконано синтез системи оптимального керування процесом гарячого цинкування; розроблено методику розрахунку параметрів оптимальної системи керування; імітаційне моделювання перехідних процесів, що відбуваються в синтезованій системі керування показало, що синтезована система оптимального керування забезпечує плавність та високу швидкість процесу.

Список використаних джерел:

1. Окулов В.В. Цинкование. Техника и технология / В.В. Окулов. – М. : Глобус, 2008. – 252 с.
2. Ahmad Z. Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control / Ahmad Z. – Butterworth-Heinemann, 2006. – 672 p.
3. Виноградов С.С. Организация гальванического производства. Оборудование, расчет производства, нормирование. / Виноградов С.С. // Под ред. В.Н. Кудрявцева– М.: Глобус, 2008.-208 с.
4. Милованов И.В. Выбор и управление температурными режимами в гальванических ваннах / Милованов И.В., Васильев С.А. // Вестник Тамбовского государственного технического университета – 2002. – №3, том 8. – С. 21-24.
5. Бугрім Л.І. Математичне моделювання ванної печі для гарячого цинкування, як об'єкта регулювання температури стінки ванни / Бугрім Л.І., Білюк І.С. // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – № 5 (52) част. 2. – С.17-20.

6. Бугрім Л.І. Дослідження системи автоматичного регулювання температури стінки ванни для гарячого цинкування / Бугрім Л.І. Білюк І.С. // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2010. – № 5 (64) част. 1. – С. 11-14.
7. Самарина И.Г. Обзор регулирования и измерение толщины цинкового покрытия / Самарина И.Г., Каюмова В.Э. // ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – 2016 - № 2(12) – С. 28-33.
8. Коврыженко Р.В. Моделирование оптимального регулирования температуры жидкости в технологической ванне / Коврыженко Р.В. // Оптимізація виробничих процесів: зб. наук. пр. Вип. 14/2013. — Севастополь, 2013 – С. 157-159.
9. Хлопенко М.Я. Оптимальне керування об'єктами : навчальний посібник / М.Я.Хлопенко, І.С.Білюк, В.В.Шевченко. – Миколаїв : НУК, 2013. – 172 с.
10. Теория автоматического управления : учебник для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / А. А. Воронов, Д. П. Ким, В. М. Лохин [и др.] ; под ред. А. А. Воронова.– М., 1986. – 504 с.

*Л. И. Бугрим, И. С. Билук, С. О. Гаврилов, А. В. Курган. Система оптимального управления процессом горячего цинкования.*

*Синтезирована система оптимального управления процессом горячего цинкования. Приведена методика расчета параметров оптимальной системы управления. В качестве критерия оптимальности выбран квадратичный показатель качества. Выполнен расчет параметров оптимальной системы управления процессом горячего цинкования. Проведено имитационное моделирование спроектированной системы управления. Показано, что синтезированная система оптимального управления обеспечивает плавность и высокое быстродействие процесса горячего цинкования.*

**Ключевые слова:** *система автоматического управления, оптимальная система управления, горячее цинкование, математическая модель, переходный процесс, имитационная модель.*

*L. Bugrim, I. Bilyuk, S. Gavrilov, A. Kurgan. The system of the optimal regulation of the hot-dip galvanizing process.*

*The system of the optimal regulation of the hot-dip galvanizing process is synthesized. The design procedure for the parameters of the optimal system of regulation is given. The quadratic quality index is selected to serve as the optimality criterion. The parameters of the optimal system of the regulation of the hot-dip galvanizing process are calculated. The simulation of the designed regulation system is performed. It is shown that the synthesized system of the optimal regulation ensures smoothness and high speed of the hot-dip galvanizing process.*

**Keywords:** *system of automated regulation, optimal system of regulation, hot-dip galvanizing, mathematical model, transition, imitation model.*