

**СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНИХ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ ДВОКОНТУРНОЇ САК РЕЖИМАМИ ПЛАВЛЕННЯ В ДСП ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИМИ КРИТЕРІЯМИ**

**Вступ.** Проблема комплексного поліпшення показників електротехнологічної ефективності плавлення сталей в дугових сталеплавильних печах (ДСП) є важливою для електрометалургійної галузі України. Стосується це як електрометалургійних заводів, так і ливарного виробництва. У цьому контексті особливо гострою є проблема зниження енергоємності, поліпшення показників якості металопродукції, продуктивності дугових печей, а також підвищення надійності і продовження терміну служби силового та технологічного обладнання. Зауважимо, що енергоємність металопродукції підприємств України у 3-4 рази вища ніж у багатьох промислово розвинутих країнах світу. Зрозуміло, що покращання цього та інших показників електротехнологічної ефективності ДСП дасть змогу підвищити конкурентоспроможність продукції електрометалургії на внутрішньому та зовнішньому ринку, що є особливо важливим у сучасних умовах членства України в СОТ, неперервного підвищення цін на енергоносії, зокрема на природний газ та електроенергію, а також зважаючи на те, що продукція електрометалургійної галузі складає значну частку експортного потенціалу держави.

**Постановка задач дослідження.** Автоматизація процесу електросталеплавлення та реалізація стратегій оптимального адаптивного керування режимами і регулювання координат електричного і технологічного процесів є генеральним напрямом комплексного поліпшення показників електротехнологічної ефективності дугових сталеплавильних печей. Окремим і вагомим підходом у реалізації окресленого вище напрямку є розроблення моделей синтезу вектора оптимального керування для підтримання екстремальних значень показників якості на всьому інтервалі плавки. Зважаючи на те, що параметри стохастичних характеристик параметричних та координатних збурень у силовому колі і плавильному просторі ДСП неперервно і у широких межах змінюються зі зміною технологічних стадій плавлення, необхідною умовою для отримання процесів екстремального керування за вибраними критеріями є адаптація складових елементів вектора керування системи до відповідних параметричних змін. Проблема оптимізації режимів ДСП диктується також значною встановленою потужністю силового електрообладнання, інтенсифікацією режимів розплавлення шихти на сучасних високоімпедансних печах та негативним впливом роботи печі на показники якості електроенергії на шинах живлення ДСП. Тому розроблення ефективних моделей синтезу вектора оптимального керування для комплексного поліпшення показників електротехнологічної ефективності плавлення в ДСП є важливим і на часі.

**Аналіз стану проблеми.** В роботі [1] запропоновано низку системних та алгоритмічних рішень для зниження енергоємності плавлення в дугових печах трифазного струму шляхом зниження втрат потужності в елементах системи живлення і короткій мережі печі. Ґрунтуються вони на реалізації в структурі двоконтурної системи керування режимів та швидкодійного регулювання координат «енергоощадних» штучних зовнішніх характеристик (ШЗХ) дугової печі. На основі видозміни залежностей такого типу ШЗХ ДСП реалізуються багатокритеріальні стратегії оптимального адаптивного керування режимами сталеплавлення в ДСП. Зазначені рішення, зважаючи на відсутність точних математичних моделей режимів плавлення за причини їх динамічності, стохастичності, нелінійності та пофазної несиметрії і взаємозв'язаності, реалізуються на основі використання новітніх інтелектуальних методів керування, зокрема нейронних мереж, методів теорії нечітких множин та генетичних алгоритмів. Використання запропонованого сімейства ШЗХ ДСП дає змогу отримати Парето-оптимальні рішення для комплексного поліпшення інтегральних значень показників електротехнологічної ефективності та показників динаміки регулювання координат системи керування процесом плавлення.

**Метою дослідження** є розроблення моделей синтезу вектора оптимального керування режимами сталеплавлення за частковими електротехнологічними критеріями оптимальності, використання яких дало б змогу комплексно поліпшити низку показників електротехнологічної ефективності, зокрема продуктивності печі, питомих витрат електроенергії, потужності електричних втрат в короткій мережі та низки екологічних показників.

**Виклад основного матеріалу.** Особливо важливим є синтез і реалізація оптимальних режимів на етапах розплавлення шихти, що є найенергоємнішим і найтривалішим на повному інтервалі плавки, для печей різної місткості і особливо середніх і потужних печей. Реалізації керування на цих етапах з максимальною продуктивністю і максимальним електричним к.к.д. (з максимальним відбиранням шихтою і розплавом технологічної теплоти, що виділяється дугами) відповідає режим, при якому коефіцієнт зношування футерівки приймає максимальне значення  $k_{\phi} \Rightarrow \max$ . Для оптимізації режимів на етапах окислення та рафінування доцільним є режим з максимальним значенням коефіцієнта інтенсивності нагрівання  $k_{ін} \Rightarrow \max$ , за якого отримується максимальна швидкість нагрівання розплаву, що сприяє підвищенню продуктивності і зниженню теплових втрат, максимізується електричний к.к.д., покращуються показники якості електроенергії на шинах живлення ДСП.

Ведення плавки при малих значеннях  $k_{ін}$  «затягує» плавку, а при великих значеннях має місце локальний перегрів шихти і розплаву безпосередньо в області дугових проміжків через обмеженість теплопровідності. Це призводить до інтенсивного випаровування металу і зниження на відповідну частку ваги злитого металу (зни-

ження продуктивності печі), а також підвищує ефективність утворення токсичних хімічних сполук (діоксидів) і, як наслідок, відповідного погіршення екологічних показників. Водночас, недотримання оптимального співвідношення між напругами, струмами і потужності дуг призводить до відповідного зростання опромінення склепіння і бокових стінок (футерівки печі), збільшуючи їх вигоряння (зношування) і до відповідного скорочення терміну міжремонтних періодів, що теж знижує продуктивність печі.

Зважаючи на це, розроблення моделей синтезу вектора оптимального керування для ведення плавки при екстремальних значеннях зазначених вище електротехнологічних показників  $k_{\phi}$  і  $k_{ін}$  у структурі двоконтурної системи регулювання координат електричного режиму (ЕР) є важливим і актуальним.

Важливою функціональною особливістю двоконтурної САК електричного режиму ДСП у контексті поставленої задачі є можливість підтримання з високою динамічною точністю середньої потужності дуг при різних співвідношеннях між напругами і струмами дуг. Реалізується ця функціональна можливість шляхом формування відповідних поставленим критеріям оптимальності залежностей штучних зовнішніх характеристик ДСП:

$$i_{д}^* = i_{д}^*(u_{д}^*, \gamma, \gamma_1(u_{д}^*)) = \frac{\left[ -u_{д}^* + \sqrt{1 + \gamma_1(u_{д}^*)^2 \cdot (1 - u_{д}^{*2})} \right] \cdot \sqrt{1 + \gamma^2}}{1 + \gamma_1(u_{д}^*)^2}, \quad (1)$$

де  $u_{д}^* = U_{д} / U_{2\phi}$  – відносна діюча напруга на стовпі дуги;  $i_{д}^* = \frac{I_{д}}{I_{д}^6} = \frac{I_{д} \cdot \sqrt{\gamma^2 + x^2}}{U_{2\phi}}$  – відносний струм дуги;

$\gamma = x/r$ ;  $\gamma_1(u_{д}^*) = (x + x_{др}(u_{д}^*)) / r$  – характеристичні нормовані параметри силового кола дугової печі;  $x_{др}(u_{д}^*)$  – закон регулювання еквівалентного індуктивного опору дроселя  $D_r$ , що визначає необхідний закон регулювання певної режимної координати печі;  $r$ ,  $x$ ,  $x_{др}$  – сумарний активний та індуктивний опір однієї фази печі та еквівалентний індуктивний опір тиристорно-регульованого дроселя  $D_r$ . Характеристичні параметри силового кола печі  $\gamma$  та  $\gamma_1(u_{д}^*)$  однозначно визначають вигляд будь-якої електричної чи робочої характеристики печі, тобто відповідні характеристики, що побудовані у відносних одиницях за цією методикою, для різних печей з однаковими параметрами  $\gamma$  та  $\gamma_1(u_{д}^*)$  співпадатимуть. На рис.1 показано природну  $I_{д}(U_{д})$  і «енергощадні» штучні 2-6 зовнішні характеристики (ШЗХ) дугової печі типу ДСП-3 відповідні їм характеристики потужності електричних втрат  $P_{ев}(U_{д})$  в короткій мережі.

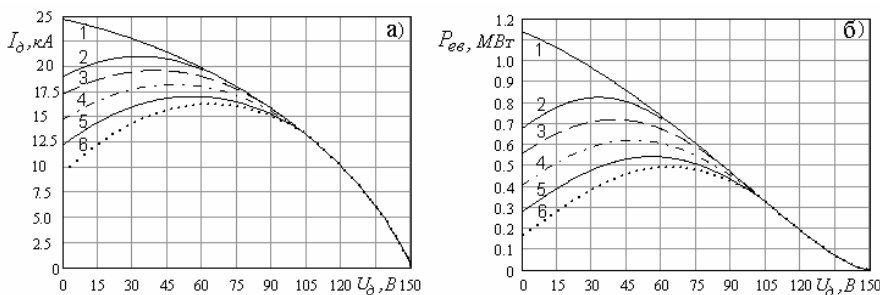


Рис.1. Природна 1 і штучні 2-6 зовнішні характеристики печі ДСП-6  $I_{д}(U_{д})$  а) та відповідні їх характеристики потужності електричних втрат  $P_{ев}(U_{д})$  б)

Шляхом реалізації різних співвідношень між уставкою за напругами дуг і залежністю  $i_{д}^* = i_{д}^*(u_{д}^*, \gamma, \gamma_1(u_{д}^*))$  ШЗХ печі можна реалізувати стратегії керування режимами плавлення з підтриманням екстремальних значень  $k_{\phi} \Rightarrow \max$  і  $k_{ін} \Rightarrow \max$  з одночасною реалізацією бажаного графіка введення активної потужності  $\bar{P}_{д}^*(t)$  у плавильний простір.

Зважаючи на те, що коефіцієнт зношування футерівки пропорційний добутку потужності і напруги дуг, модель синтезу оптимального керування за критерієм максимуму коефіцієнта  $k_{\phi} \Rightarrow \max$  у двоконтурній САК є такою:

$$k_{\phi}^*(u_{д}^*, \gamma, \gamma_1(u_{д}^*)) = \left( \frac{\left[ -u_{д}^* + \sqrt{1 + \gamma_1(u_{д}^*)^2 \cdot (1 - u_{д}^{*2})} \right] \cdot \sqrt{1 + \gamma^2}}{1 + \gamma_1(u_{д}^*)^2} \right) \cdot u_{д}^2 \Rightarrow \max. \quad (2)$$

Також у відносних одиницях вимірювання модель синтезу вектора оптимального керування двоконтурної САК електричного режиму дугової печі за критерієм максимуму коефіцієнта інтенсивності нагрівання шихти і розплаву  $k_{ін} \Rightarrow \max$  подається такою критеріальною залежністю:

$$k_{ін}^*(u_{д}^*, \gamma, \gamma_1(u_{д}^*)) = \frac{\left[ -u_{д}^* + \sqrt{1 + \gamma_1(u_{д}^*)^2 \cdot (1 - u_{д}^{*2})} \right]^2 \cdot (1 + \gamma^2)}{(1 + \gamma_1(u_{д}^*)^2)^2} \cdot u_{д} \Rightarrow \max. \quad (3)$$

На рис.2 показано залежності коефіцієнта зношування (опромінення) футерівки  $k_{\phi}(U_{\text{д}})$  та коефіцієнта інтенсивності нагрівання  $k_{\text{ін}}(U_{\text{д}})$  для природної 1 і різних ШЗХ 2-6 дугової печі ДСП-3. Ці характеристики відповідають нульовій

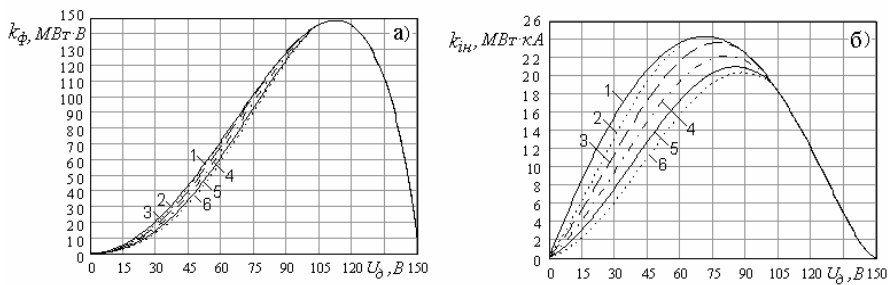


Рис.2. Залежності електротехнологічних коефіцієнтів  $k_{\phi}(U_{\text{д}})$  а) і  $k_{\text{ін}}(U_{\text{д}})$  б)

установки за напругою дуг. Такі характеристики наведені на рис.3 і розраховані вони на основі такого виразу:

$$\bar{k}_{\phi}(U_{\text{д.уст}}, \sigma_{U_{\text{д}}}) = \int_0^{U_{2\phi}} k_{\phi}(U_{\text{д}}) \cdot f(U_{\text{д.уст}}, \sigma_{U_{\text{д}}}, U_{\text{д}}) \cdot dU_{\text{д}} \quad (4)$$

де  $f(U_{\text{д.уст}}, \sigma_{U_{\text{д}}}, U_{\text{д}})$  - функція щільності розподілу ймовірності нормованого процесу  $U_{\text{д}}(t)$ ;  $U_{\text{д.уст}}, \sigma_{U_{\text{д}}}$  - математичне сподівання (установка за напругою дуги) та середньоквадратичне відхилення процесу зміни напруг на дугах  $U_{\text{д}}(t)$ ;  $U_{2\phi}$  - напруга вторинної обмотки пічного трансформатора (напруга живлення дуг).

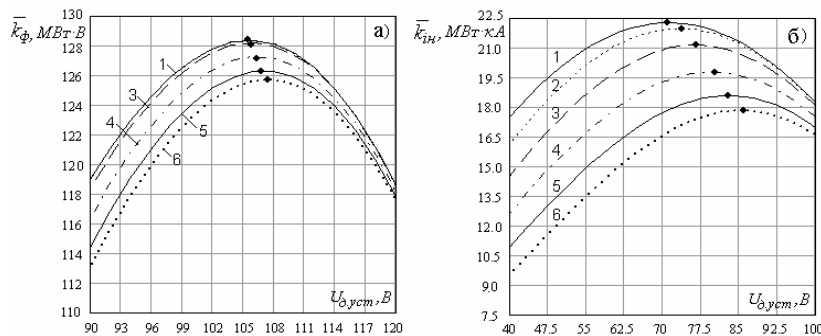


Рис.3. Залежності інтегральних коефіцієнтів  $\bar{k}_{\phi}(U_{\text{д}})$  а) і  $\bar{k}_{\text{ін}}(U_{\text{д}})$  б)

установки за напругами дуг для розглядуваних «енергоощадних» ШЗХ ( $j=1..6$ ) та трьох значень дисперсій  $\sigma_{U_{\text{д}}}$  показані на рис.4. Залежності ШЗХ  $I_{\text{д}}(U_{\text{д}})$  синтезуються за узагальненими функціоналами енергоефективності з урахуванням поставлених обмежень на значення координат чи показників на поточну стадію плавлення.

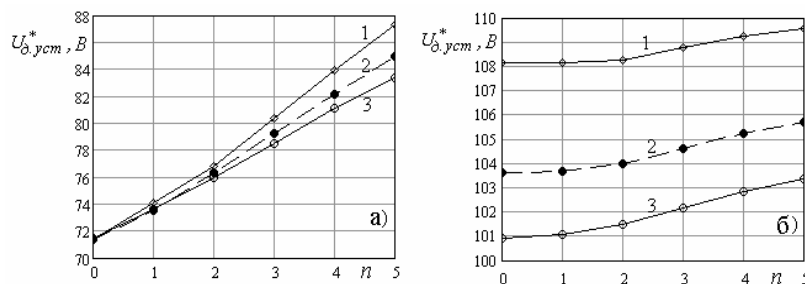


Рис.4. Залежності оптимальних установок  $U_{\text{д.уст}}^*(n)$  за напругою дуг для різних ШЗХ ( $n=1..6$ ) печі ДСП-3 за критеріями  $k_{\phi} \Rightarrow \max$  а) і  $k_{\text{ін}} \Rightarrow \max$  б) при різних значеннях дисперсій напруг дуг  $\sigma_j$  ( $j=1,2,3$ )

математичні моделі синтезу оптимального керування за електротехнологічними критеріями  $k_{\phi} \Rightarrow \max$  і  $k_{\text{ін}} \Rightarrow \max$  і подано концепцію їх реалізації.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Лозинський О.Ю., Лозинський А.О., Паранчук Р.Я., Паранчук Я.С. Система оптимального керування технологічним процесом в дугових сталеплавильних печах // Науково-практичний журнал «Новини науки Придніпров'я». Дніпропетровськ.: Днепр-VAL. - №3-4, 2008. - С.95-98.

дисперсії. Дисперсія ж упродовж плавки змінюється у широких межах і залежить від багатьох факторів і, перш за все від, структури і налаштування САР, типу і способу укладання шихти тощо. Тому практичний інтерес представляють характеристики інтегральних значень цих електротехнологічних параметрів  $\bar{k}_{\phi}$  і  $\bar{k}_{\text{ін}}$  при різних значеннях

Оптимальні значення установок  $U_{\text{д.уст}}^*$  за розглядуваними критеріями  $k_{\phi} \Rightarrow \max$  і  $k_{\text{ін}} \Rightarrow \max$  отримуються як розв'язок відповідних цим критеріям нелінійних рівнянь  $d(k_{\phi}(U_{\text{д.уст}}, \sigma_{U_{\text{д}}}, I_{\text{д}}(U_{\text{д}}))/dU_{\text{д}} = 0$ ,  $d(k_{\text{ін}}(U_{\text{д.уст}}, \sigma_{U_{\text{д}}}, I_{\text{д}}(U_{\text{д}}))/dU_{\text{д}} = 0$  для різних ШЗХ печі, дисперсій  $\sigma_{U_{\text{д}}}$  і математичного сподівання процесів  $\bar{U}_{\text{д}}(t)$ . Розраховані за такими математичними моделями оптимальні

Практична реалізація отриманих моделей оптимального керування за електротехнологічними критеріями  $k_{\phi} \Rightarrow \max$  і  $k_{\text{ін}} \Rightarrow \max$  пропонується на основі нечітких регуляторів, ефективність використання яких доведена саме для умов, що властиві структурам, параметрам і особливостям зміни параметрів і збурень двоконтурної САК режимами плавлення в ДСП. Отримані залежності  $U_{\text{д.уст}}^*(I_{\text{д}}(U_{\text{д}}), \sigma_{U_{\text{д}}})$  використовуються для проектування конкретних фаззи-регуляторів.

**Висновок.** Опрацьовано мате-