

С. 77—84. 6. *Справочник по проектированию электроэнергетических систем/ В.В. Ершевич, А.А. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.; Под. ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шатира. — М., 1985.* 7. *Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования // Учебн. пособие для вузов. — М., 1980.*

УДК 62.503.56+519.85

О. Лозинський, Я. Паранчук

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електроприводу і автоматизації промислових установок

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ ЗА КРИТЕРІЄМ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

© Лозинський О., Паранчук Я., 2004

Hierarchical control system structure and model of control of arc steel melting furnace for a heightening of an electrical power effectivity using is described. The results of study of operation of furnace indexes are received by optimization of electrical steel melting process behind different electric energy usage criteria are given.

Постановка проблеми. Підвищення частки електросталей у світовому виробництві сталі зумовлене збільшенням обсягів виплавлених сталей в дугових сталеплавильних печах (ДСП). Сучасна тенденція збільшення одиничної потужності і кількості ДСП призводить до загострення проблеми електромагнітної сумісності з електропостачальною мережею, що, своєю чергою, збільшує чутливість дугової печі до показників якості вхідної електроенергії, а конкретно — до погіршення техніко-економічних показників ДСП через неякісне живлення.

Одним з основних показників функціонування дугових сталеплавильних печей є питомі витрати електроенергії, що, зважаючи на значну частку електричної енергії серед складових енергетичного балансу дугової сталеплавильної печі, визначально впливають на отримувану собівартість електросталей. Зважаючи на це, зниження питомих витрат електроенергії, значення яких істотно впливають на собівартість електросталей, є однією з пріоритетних задач електрометалургії на сучасному етапі її розвитку.

Враховуючи це, а також те, що на діючих печах питомі витрати електроенергії є значними (на застарілих печах вони перевищують 750 кВт·год/т, у той час як на ДСП країн Західної Європи цей показник становить 350 кВт·год/т), проблема підвищення ефективності використання електричної енергії є важливою та актуальною [1].

Аналіз останніх досліджень. Основні зусилля, що скеровуються на розв’язання поставленої задачі в існуючих системах керування режимами триелектродних сталеплавильних печей змінного струму, полягають у розробленні алгоритмічних рішень для знаходження оптимальних уставок, що визначають положення робочої точки печі на її зовнішній характеристиці [2, 3, 4].

Але такий односторонній підхід не дає змоги якісно вирішити окреслену вище проблему. Причиною цього є те, що дугова сталеплавильна піч є складною взаємозв’язаною динамічною системою з нестационарними випадковими збуреннями і тому вирішувати проблему зниження питомих витрат електроенергії без належного розв’язання задачі стабілізації координат електричного режиму на заданому рівні некоректно і малоефективно. Тому розв’язати поставлену задачу можна, на наш погляд, лише на підставі комплексного системного підходу, що передбачає розроблення високоефективних системо- та схемотехнічних рішень, спрямованих на реалізацію електроощадних

технологій плавлення сталей в ДСП, які забезпечують одночасне вирішення проблем регулювання координат та керування режимом електросталеплавлення.

Задачі досліджень. Відомо, що значення координат електричного режиму (ЕР) визначально впливають на загальні та питомі витрати електроенергії при виплавленні сталей в ДСП. Так, під час роботи на довгих (особливо відкритих) дугах, тобто роботи на більших уставках напруги дуги $U_{\partial,уст}$ електромеханічних чи електрогідравлічних підсистем регулювання положення електродів (регуляторів потужності дуг) та вищих ступенях пічного трансформатора (напругах живлення дуг $U_{2\phi}$) витрати електроенергії зростають. Якщо падіння напруг на дугах менші, то меншими будуть і витрати електроенергії. На величину витрат електроенергії істотно впливають також і значення струмів дуг при фіксованих напругах на дугах, що визначаються зовнішньою характеристикою печі $I_{\partial} = \Psi(U_{\partial})$ [5], залежність якої при використанні в структурі системи керування режимами ДСП швидкодійної підсистеми регулювання струмів дуг можна змінювати, а також дисперсія зазначених режимних координат, що визначається динамічними показниками якості підсистем регулювання довжин та струмів дуг відповідно. Але необхідно враховувати, що важливіше, витрати електроенергії чи продуктивність печі, бо відповідним вибором зазначених задавальних впливів системи можна добитися мінімальних витрат електроенергії, значно знизивши продуктивність (середню потужність дуг печі).

З наведених міркувань випливає, що поставлена оптимізаційна задача належить до класу багатокритеріальних та багатопараметричних. З огляду на це необхідним є розроблення математичної моделі синтезу оптимального керування за критерієм максимуму ефективності використання електричної енергії у процесі електросталеплавлення в ДСП.

Виклад основного матеріалу. За такого підходу та особливостей розв'язуваної задачі, алгоритми функціонування системи керування режимами комплексу повинні розроблятися на засадах векторної оптимізації режимів електросталеплавлення. Для реалізації зазначеної стратегії оптимізації режимів комплексу ДСП-ЕПМ розроблено дворівневу ієрархічну структуру системи автоматичного керування (САК) режимами комплексу, що включає ряд локальних підсистем [6, 7] регулювання режимних координат і якій властиві широкі функціональні можливості з адаптивної оптимізації режимів комплексу. Вектор керування такої системи, як зазначено вище, складають задаючі впливи та варіативні параметри окремих локальних підсистем $\vec{x} = \{x_i\} = \{U_{\partial,уст}, U_{2\phi}, \Psi(U_{\partial})\}$, а складовими вектора вихідних характеристик $\vec{Q}(\vec{x}) = \{Q_i(\vec{x})\}$ є показники електричної, економічної, технологічної, екологічної ефективності функціонування електросталеплавильного комплексу ДСП-ЕПМ.

На верхньому рівні цієї системи розв'язують задачі синтезу загальносистемного вектора керування системи на основі моделей, що відповідають оперативним вимогам до показників та зовнішніх умов функціонування комплексу, а на нижньому рівні реалізуються задачі якісної стабілізації режимних координат плавки (струмів, напруг та потужностей дуг) локальними підсистемами в умовах неперервної дії інтенсивних випадкових збурень.

Співвідношення між складовими вхідного та вихідного вектора енергетичних потоків по ходу плавки залежно від зовнішніх впливів та вибраної технології плавлення сталей неперервно змінюється. Оптимізацію співвідношення між складовими цих потоків пропонується отримати, використавши узагальнений критерій електричної ефективності чи інших оптимізаційних моделей, що використовують чи не використовують додаткову апріорну інформації про важливість часткових критеріїв, поданої у вигляді ряду пріоритетів, за якою часткові критерії оптимальності упорядковуються у послідовності спадання їх важливості.

У переважній більшості реальних умов та вимог до показників функціонування печі у процесі електросталеплавлення додаткова інформація про важливість часткових критеріїв оптимальності

відсутня, тобто невідомим є ні їх ряд пріоритетів $Q_1 \succ Q_2 \succ Q_3 \succ \dots \succ Q_s$, ні експертні оцінки $\mu_{i,j}$ їх попарних порівнянь чи значення їх вагових коефіцієнтів λ_i . У такому разі часткові критерії оптимальності можна вважати однаковими за важливістю, тобто рівноцінними. За такої властивості часткових критеріїв оптимальності $\bar{Q}_i(\vec{x})$, $i=1,2,\dots,m$, для особи, що приймає рішення, природним є рівномірне та одночасне зменшення кожного із часткових критеріїв оптимальності. Зрозуміло, що для такої моделі синтезу оптимального рішення всі часткові критерії оптимальності повинні бути нормалізованими, тобто зведеними до безрозмірного вигляду та однакового діапазону зміни, що виконується за виразом:

$$\bar{Q}_i(\vec{x}) = \psi_i(Q_i(\vec{x})) = (Q_i(\vec{x}) - Q_i^*) / (Q_i^+ - Q_i^*),$$

де $Q_i^+ = \max_{\vec{x} \in D} Q_i(\vec{x})$, $Q_i^* = Q_i(\vec{x}^*) = \min_{\vec{x} \in D} Q_i(\vec{x})$ — максимальне та мінімальне значення часткового критерію Q_i на множині $\vec{x}_i \in D$;

$\psi_i(Q_i)$ — функція додатного лінійного перетворення.

За такого лінійного перетворення часткові критерії $Q_i(\vec{x})$ зводяться до загального початку відліку і єдиного інтервалу зміни $[0, 1]$, тобто вони стають однорідними (допускають порівняння в одній розмірності) і їх значення можна використовувати в узагальнених функціоналах якості. Тоді значення кожної функції $\bar{Q}_i(\vec{x})$ можна інтерпретувати як оцінку втрати оптимальності по i -му частковому критерію, тобто проміжні її значення $0 < \psi_i(Q_i(\vec{x})) < 1$ характеризують віддалення точки $Q_i(\vec{x})$ від точки мінімального значення Q_i^* i -го часткового критерію оптимальності. Для зміни типу екстремуму (з мінімуму на максимум) необхідно використовувати лінійне перетворення виду $1 - Q_i(\vec{x})$.

За такої моделі справедливий компроміс для рівноцінних критеріїв полягає у намаганні зрівняти всі часткові критерії оптимальності між собою. Найпростішою моделлю розв'язання, що реалізує цей принцип, є метод рівності часткових критеріїв:

$$\Phi(\vec{x}) = \min_{\vec{x} \in D} (\bar{Q}_k(\vec{x})) \quad (1)$$

за умови, що $\bar{Q}_1(\vec{x}) = \bar{Q}_2(\vec{x}) = \dots = \bar{Q}_s(\vec{x})$.

У разі наявності додаткової інформації про те, що часткові критерії можуть відрізнятися один від одного не більше ніж на Δ , можна використати операцію згортання критерія оптимальності, яка реалізує метод квазірівності часткових критеріїв оптимальності (1) за умови, що $|\bar{Q}_i(\vec{x}) - \bar{Q}_j(\vec{x})| \leq \Delta$, $i, j = 1, 2, \dots, m, i \neq j$.

Недоліком методу є залежність компромісного розв'язання \vec{x}^* від вибору в цій моделі критерію, якому цим неявно віддається перевага.

За умови рівноцінності часткових критеріїв оптимальності процедура їх згортання може бути реалізована також на основі адитивного критерію оптимальності при однакових вагових коефіцієнтах $\lambda_i = 1/s$, $i=1,2,\dots,m$:

$$\Phi(\vec{x}) = \min_{\vec{x} \in D} \left\{ \frac{1}{s} \sum_{i=1}^m \bar{Q}_i(\vec{x}) \right\} \quad (2)$$

При отриманні розв'язання за моделлю (2) забезпечується отримання компромісного рішення $\vec{x}^* \in D$, яке є “найкращим у середньому”.

Отримати компромісне розв'язання $\vec{x}^* \in D$, що забезпечує найкраще наближення для критерію, найвіддаленішого від свого оптимального значення, можна використанням мінімаксного методу (методу рівномірного наближення):

$$\Phi(\vec{x}) = \min_{\vec{x} \in D} \max_{1 \leq k \leq m} \left| \frac{Q_k(\vec{x}) - Q_k^*}{Q_k^*} \right| \quad (3)$$

Розв'язання задачі (3) забезпечує найкращу рівномірність всіх часткових критеріїв оптимальності за рахунок підтягування “найгіршого критерію”, тобто критерію з найбільшим значенням, до рівня всіх решти критеріїв.

Зважаючи на зазначену вище складність взаємозв'язаної нелінійної стохастичної та нестаціонарної структури системи регулювання режимами комплексу ДСП-ЕПМ, отримати точну аналітичну залежність узагальненого векторного критерію оптимальності $\Phi(\vec{Q}(\vec{x}))$ і на його основі оптимальний загальносистемний вектор варіативних параметрів (задаючих впливів) системи $\vec{x} = (U_{\text{д.уст}}, U_{2\phi}, \Psi(U_{\text{д}}))$ неможливо. Тому для отримання розв'язку поставленої оптимізаційної задачі запропоновано використати методи математичного та цифрового моделювання.

З цією метою виконано серію математичних експериментів на створеній цифровій моделі системи живлення та двоконтурної системи регулювання електричного режиму, складеної у миттєвих координатах [8]. За експериментами на допустимій множині зміни варіативних параметрів системи з врахуванням обмежень, що накладаються на значення показників функціонування електротехнологічного комплексу ДСП-ЕПМ, одержано графічні залежності узагальнених функціоналів якості та часткових критеріїв оптимальності $Q_k(\vec{x})$, які наочно ілюструють складний характер їх зміни. Отримати вектор оптимальних задаючих впливів системи можна виконанням відповідних експериментальних досліджень на цифровій моделі чи діючій дугової печі із залученням методів теорії планування експерименту чи методу генетичного алгоритму [9] з урахуванням обмежень, які накладають на варіативні параметри і показники функціонування системи, реальної динаміки регулювання координат електричного режиму, дії збурень, що за статистичними характеристиками адекватні до реальних, та нелінійностей системи живлення та регулювання режимів.

Дослідження САК ЕР ДСП на цифровій моделі. На рис. 1 показано отримані на цифровій моделі поверхневі графічні залежності техніко-економічних показників якості (потужності дуг $P_{\text{д}}$; потужності електричних втрат $P_{e.gm}$); електричного коефіцієнта корисної дії η ; питомих витрат електроенергії W та дисперсії струмів дуг $D_{I_{\text{д}}}$ і напруги електромережі $D_{U_{\text{д}}}$, що характеризують ефективність використання електричної енергії у процесі електросталеплавлення на періоді основного розплавлення шихти в дугової сталеплавильній печі типу ДСП-6 при функціонуванні обох локальних підсистем. Наведені результати отримані для різних сформованих зовнішніх характеристик печі, що подаються значеннями коефіцієнта γ апроксимуючого виразу штучної зовнішньої характеристики та різних значень уставки за напругою дуги $U_{\text{д.уст}}$ електромеханічної підсистеми регулювання положення електродів. Математичні експерименти виконувалися при зміні коефіцієнта γ в діапазоні [0.6, 3.0] з кроком $\Delta k=0.2$ та уставок за напругою $U_{\text{д.уст}}$ електромеханічної підсистеми в межах 80...130В з кроком $\Delta U_{\text{д.уст}}=5\text{В}$.

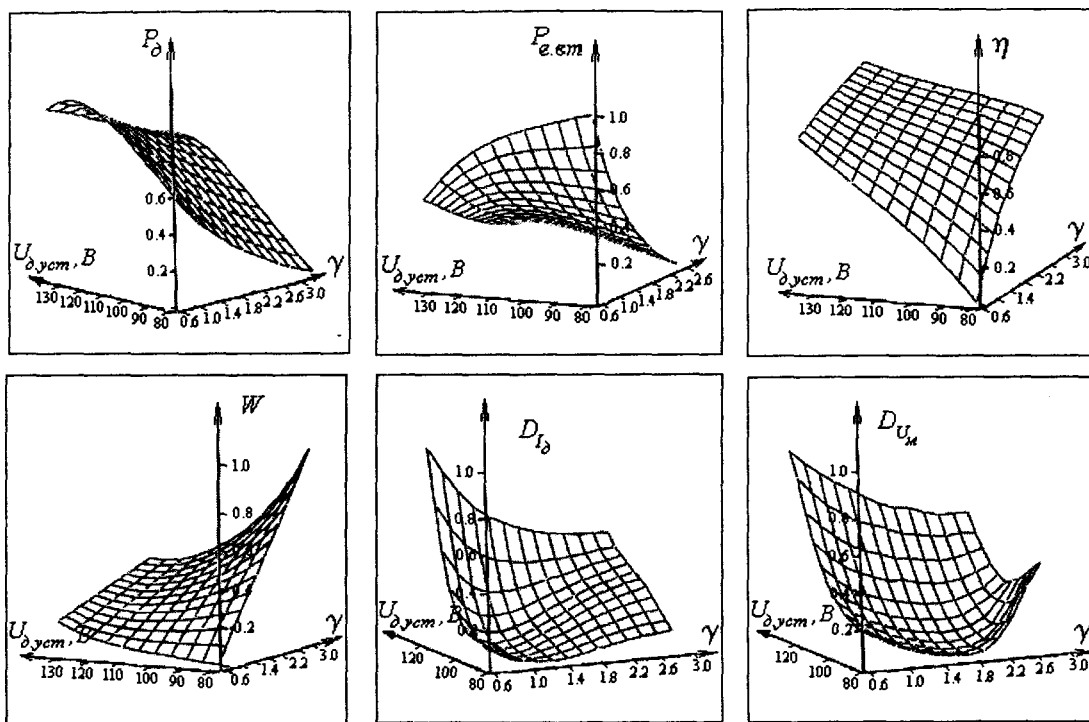


Рис. 1. Залежності показників функціонування печі ДСП-6 для різних уставок за напругою дуги $U_{\delta,уст}$ та формуючого коефіцієнта γ штучних зовнішніх характеристик печі

На рис. 2, а зображено залежності нормованих часткових критеріїв оптимальності: $P_{\delta}(U_{\delta}, \gamma)$ та $1-W(U_{\delta}, \gamma)$, які ілюструють отримання оптимального розв'язання на основі моделі (1) $\max(P_{\delta}(U_{\delta}, \gamma))$ при $P_{\delta}(U_{\delta}, \gamma) = 1 - W(U_{\delta}, \gamma)$, на основі використання цих двох часткових критеріїв. На рис. 2, б показано поверхневий графік узагальненого адитивного функціонала якості

$$\Phi(U_{\delta}, \gamma) = \min(0.25 \cdot (1 - P_{\delta}(U_{\delta}, \gamma)) + 0.25 \cdot \eta(U_{\delta}, \gamma) + 0.25 \cdot D_{I_{\delta}}(M) + 0.25 \cdot W(U_{\delta}, \gamma)), \quad (4)$$

що ілюструє одержання оптимального розв'язання на основі моделі (2).

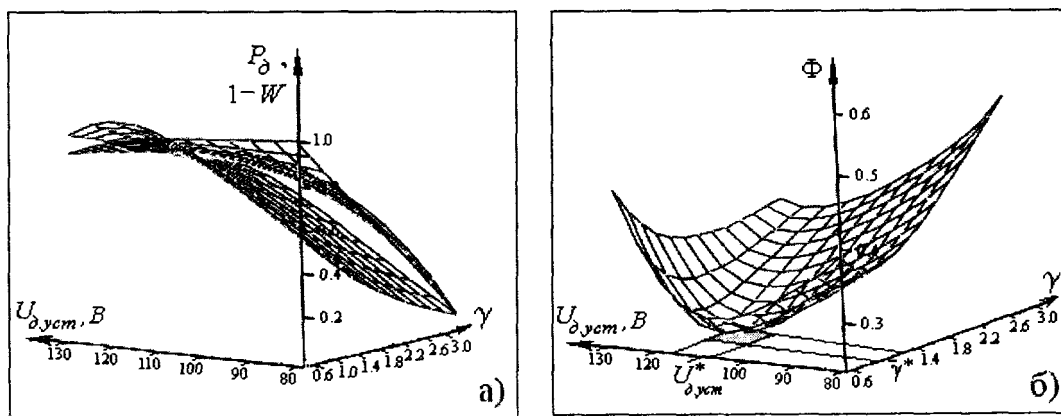


Рис. 2. Залежності часткових критеріїв оптимальності $P_{\delta}(U_{\delta}, \gamma)$ та $1 - W(U_{\delta}, \gamma)$ та узагальненого функціонала якості; (а) для різних уставок $U_{\delta,уст}$ та значень коефіцієнта γ (б)

Лінія перетину залежностей $P_{\delta}(U_{\delta}, \gamma)$ та $1 - W(U_{\delta}, \gamma)$ (рис. 2, а) подає множину ефективних точок, тобто область розв'язань, оптимальних за Парето, а оптимальне розв'язання згідно із сформованим

функціоналом (4) (рис. 2, б) подають координати його екстремуму (мінімуму): $U_{\partial,уст}^* \cong 110B$; $\gamma^* \cong 1.0$. Зважаючи на пологий характер зміни функціонала (4) в області екстремуму, до ефективних можна зарахувати точки, які належать заштрихованій області в площині зміни варіативних параметрів $U_{\partial,уст}$ та γ (рис. 2, б)). Наведені на рис. 2 результати математичних експериментів отримані для ступеня напруги пічного трансформатора з $U_{2\phi} = 1.1 \cdot U_{2\phi n} = 1.1 \cdot 150.7 = 165.8B = U_{2\phi}^*$.

Отже, згідно із запропонованою векторною методикою синтезу оптимального керування режимом електросталеплавлення можна одержати загальносистемний вектор задаючих впливів ієрархічної двоконтурної системи керування для реалізації адаптивного оптимального керування за сформованими критеріями максимальної ефективності використання електричної енергії.

Висновки

1. Запропоновано моделі синтезу оптимального керування режимом електросталеплавлення в ДСП за критеріями ефективного використання електричної енергії.
2. Обґрунтовано структуру вектора керування ієрархічної двоконтурної системи керування режимами електротехнологічного комплексу ДСП-ЕПМ.
3. Аналіз отриманих на цифровій моделі результатів математичних експериментів дослідження показників функціонування ДСП при різних критеріях оптимальності показує можливість та підтверджує доцільність оптимізації режимів комплексу за критеріями максимальної ефективності використання електричної енергії.

1. Кудрин Б.И. Ретроспективный и перспективный взгляды на электропотребление в электрометаллургии. Ч. I // *Электрометаллургия*. — 2003. — № 10. — С. 2—13. 2. Андрианова А.Я., Едемский В.М. Про деякі властивості електричних кіл з дугами і керування ними // *ЕЛЕКТРОінформ*. — Львів. — № 2, 2002. — С. 17—18. 3. Кручинин А.М., Савицкий А. Расчет рабочего тока дуг и сопротивления дополнительного реактора ДСП // *Электрометаллургия*. — 2002. — № 3. — С. 27—32. 4. Немытов В.С. и др. Совершенствование технологий производства электросталей и электродной продукции — взаимосвязанные пути снижения удельного расхода графитированных электродов // *Электрометаллургия*, — 2002. — № 1. — С. 39—40. 5. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С. Методологія побудови та характеристики комплексу “Дугова сталеплавильна піч — електропостачальна мережа” // *Енергетика и электрификация*. — 2002. — № 10. — С. 35—42. 6. Паранчук Я.С., Лозинський О.Ю., Костинюк Л.Д. Адаптивна оптимізація режимів ДСП шляхом переналадження робочих характеристик // *Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вісник ХДПУ. Вып. 113*. — Харків, 2000. — С. 153—156. 7. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования.: Учебное пособие для вузов. — М., 1984. 8. Паранчук Я.С. Моделювання та дослідження режимів електричної системи регулювання струмів дуг дугової сталеплавильної печі // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. — 2000. — № 403. — С. 126—133. 9. Лозинський А.О., Паранчук Я.С., Гайдучок Ю.Р. Розрахунок оптимальних уставок регулятора потужності ДСП методом генетичного алгоритму / *Труды Одесского политехнического института*. — Одесса. — Вып. 4(16), — 2001. — С. 70—73.