

УДК 621.328

О. Ю. Лозинський, д-р. техн. наук, проф.; Я. С. Паранчук, д-р. техн. наук, проф.;
В. І. Мороз, д-р. техн. наук, доц.; Р. Я. Паранчук, канд. техн. наук;
І. А. Андріяс, канд. техн. наук, доц.; О. М. Нечай, канд. техн. наук

СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ПЛАВЛЕННЯ В ДУГОВИХ ПЕЧАХ ЗА КОМПЛЕКСНИМ КРИТЕРІЄМ ПРОДУКТИВНОСТІ

Запропоновано ієрархічну структуру системи оптимального керування режимами плавлення в дугових сталеплавильних печах за комплексним критерієм продуктивності та модель адаптації такого керування на основі системи нечіткого виводу.

Вступ

Проблема зниження енергоємності металопродукції дугових сталеплавильних печей (ДСП) і підвищення конкурентоспроможності електросталей на зовнішньому та внутрішньому ринку є важливою та актуальною для економіки України. Одним з ефективних та дієвих підходів для цього є реалізація стратегії адаптивного оптимального керування режимами, яка повинна передбачати зниження енерговитрат, зокрема зменшення електричних втрат у короткій мережі дугової печі та електропостачальній системі і, водночас, підвищувати продуктивність (потужність дуг) дугової печі.

Процеси електросталеплавлення в дугових печах супроводжуються динамічними нестационарними випадковими координатними та параметричними збуреннями. Зважаючи на це, а також на пофазну несиметричність режимів навантаження та нелінійність силового кола живлення трифазних дуг, електричні та технологічні процеси плавлення не піддаються точному математичному опису.

Стратегія оптимального керування в умовах наведених вище характеристик режимів плавлення в ДСП вимагає неперервної упродовж плавки адаптації вектора керування до параметричних змін. Зважаючи на відсутність точних математичних моделей процесів плавлення, реалізувати ефективну неперервну оперативну адаптацію вектора керування до зазначених збурень режимів можна лише на основі новітніх інтелектуальних методів [1], зокрема на основі засад теорії нечітких множин [2–4].

Метою дослідження є розроблення структури адаптивного оптимального керування режимами плавлення в дугових сталеплавильних печах за комплексним нелінійним функціоналом продуктивності.

Матеріали і результати дослідження

Для реалізації зазначеної стратегії розроблено ієрархічну координатно-параметричну двоконтурну структуру (рис. 1), якій властиві розширені функціональні можливості з реалізацією адаптивного багатокритеріального оптимального керування режимами плавлення в ДСП змінного струму – екстремального керування продуктивністю дугової печі (потужністю дуг) на повному інтервалі плавки.

На верхньому рівні такої ієрархічної системи функціонує підсистема нечіткого виводу ПСНВ, яка на основі двох нечітких регуляторів НР1, НР2 виконує оперативний синтез вектора керування, складовими елементами якого є залежність штучної зовнішньої характеристики (ШЗХ) $F^*(U_d)$ дугової сталеплавильної печі, уставка за напругою дуги $U_{д,уст}^*$ підсистеми регулювання положення електродів ПСРПЕ та ступінь напруги пічного трансформатора $U_{2ф}^*$ ПТ.

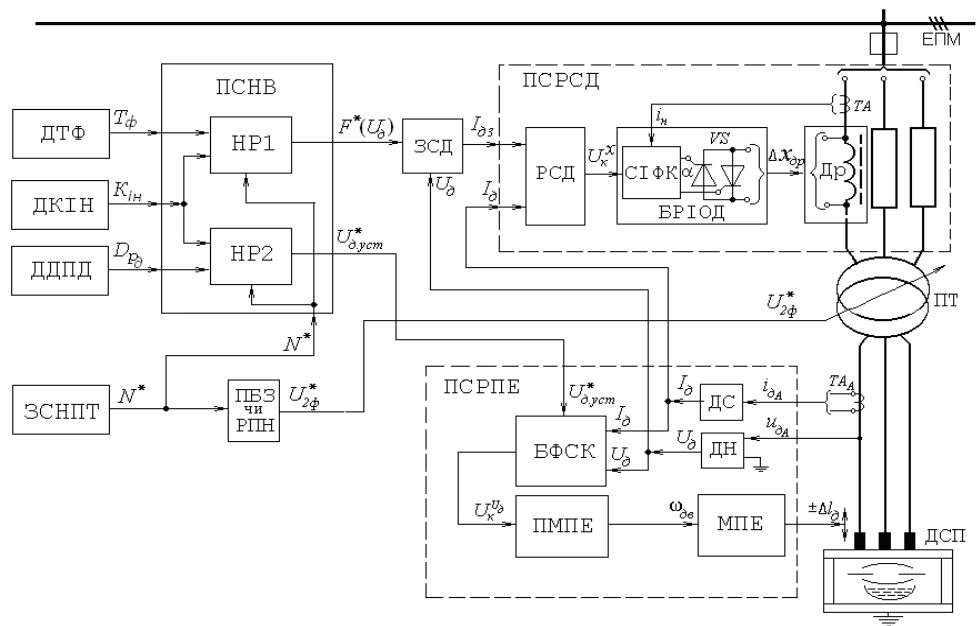


Рис. 1. Система оптимального керування режимами плавлення в ДСП за комплексним критерієм продуктивності

Найефективнішим з точки зору комплексного впливу практично на всі показники електротехнологічної ефективності ДСП є формування відповідно до вибраної стратегії оптимального (екстремального) керування залежностей штучних зовнішніх характеристик печі $I_d = F(U_d)$. Оперативне формування залежностей ШЗХ у контексті поставленої стратегії максимізації потужності дуг у розробленій структурі системи виконується у функції температури T_ϕ футерівки та коефіцієнта інтенсивності нагрівання шихти (розплаву) $k_{ін}$. Температура футерівки отримується на виході датчика температури футерівки ДТФ, а коефіцієнт інтенсивності нагрівання $k_{ін}$ оперативно розраховується у датчі коефіцієнта інтенсивності нагрівання ДКІН.

Коефіцієнт інтенсивності нагрівання шихти та розплаву дорівнює добутку квадрата діючого струму дуги на напругу на стовпі дуги і розраховується у відносних одиницях за таким виразом:

$$k_{ін}^*(U_d^*, \gamma, \gamma_1(U_d^*)) = I_d^*(U_d^*)^2 \cdot U_d^* = \frac{\left[-U_d^* + \sqrt{1 + \gamma_1(U_d^*)^2 \cdot (1 - U_d^{*2})} \right]^2 \cdot 1 + \gamma^2}{\left(1 + \gamma_1(U_d^*)^2 \right)^2} \cdot U_d^*, \quad (1)$$

де $U_d^* = U_d / U_{2\phi}$ – відносна діюча напруга на стовпі дуги; $I_d^* = \frac{I_d}{I_d^6} = \frac{I_d \cdot \sqrt{r^2 + x^2}}{U_{2\phi}}$ – відносний

діючий струм дуги; $\gamma = x / r$; $\gamma_1(u_d^*) = (x + x_{др}(u_d^*)) / r$ – характеристичні нормовані параметри силового кола ДСП; $x_{др}(u_d^*)$ – закон регулювання еквівалентного індуктивного опору дроселя Др, 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 Др.

На рис. 2 показано природну $I_d(U_d)$ і доцільні для реалізації окресленої вище стратегії багатокритеріального оптимального керування за комплексним критерієм максимуму продуктивності (потужності дуг) дугової печі штучні зовнішні характеристики 2–6 дугової печі ДСП-6.

Математичний опис показаного на рис. 2 сім'ї ШЗХ для реалізації керування за комплексним критерієм максимуму продуктивності виконано на основі такого аналітичного виразу:

$$I_d(U_d) = k(U_d) \cdot I_d^{np}(U_d) = k(U_d) \frac{-U_d R + \sqrt{(U_d R)^2 + (R^2 + (X + X_{др}(U_d))^2)(U_{2ф}^2 - U_d^2)}}{R^2 + (X + X_{др}(U_d))^2}, \quad (2)$$

де $I_d^{np}(U_d)$ – природна зовнішня характеристика дугової печі (характеристика 1 на рис. 2); R, X – активний та реактивний опір короткої мережі дугової сталеплавильної печі; $U_{2ф}$ – вторинна фазна напруга електропічного трансформаторного агрегату;

$$k(U_d, z) = \begin{cases} e^{-\frac{(U_1 - U_d)^{1,05}}{z}}, & \text{якщо } U_d \leq U_1; \\ 1, & \text{якщо } U_d > U_1, \end{cases}$$

– сформована функція, що подає нелінійну залежність

масштабного коефіцієнта аналітичної залежності показаних на рис. 2 сім'ї ШЗХ печі ДСП-3; U_1 – уставка за напругою дуги підсистеми регулювання положення електродів ПСРПЕ; z – варіативний коефіцієнт аналітичної залежності ШЗХ дугової сталеплавильної печі, який є елементом вектора керуючих впливів в оптимізаційній моделі багатокритеріального оптимального керування для критерію $P_d(U_d) \Rightarrow \max$ (для формування штучних зовнішніх характеристик 2, 3, 4, 5, 6 на рис. 2 цей коефіцієнт набуває значень: 1250, 500, 300, 200, 125, відповідно).

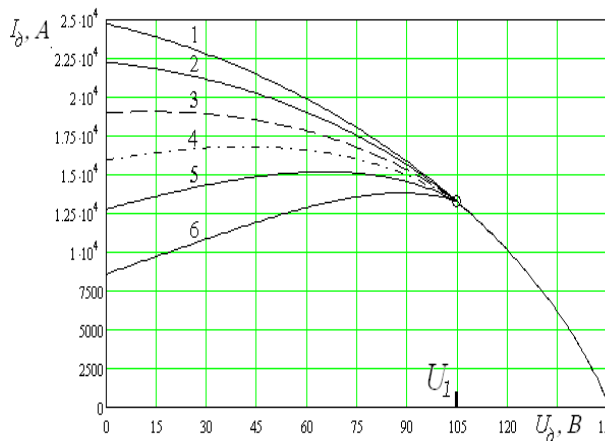


Рис. 2. Природна $I_d(U_d)$ 1 та штучні 2–6 зовнішні характеристики печі типу ДСП-6 для критерію $P_d(U_d) \Rightarrow \max$

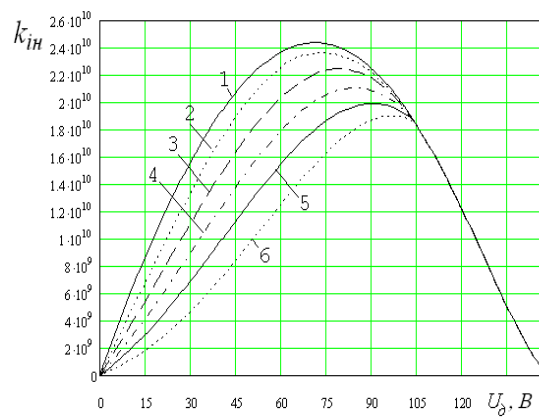


Рис. 3. Залежності коефіцієнта інтенсивності нагрівання шихти і розплаву печі ДСП-6 для природної 1 та штучних 2–6 зовнішніх характеристик

Дисперсія усіх електричних та технологічних координат упродовж плавки змінюється у широких межах і залежить від багатьох факторів і, перш за все, від структури і налаштування електромеханічної ПСРПЕ та швидкодійної електричної підсистеми регулювання струмів дуг ПСРСД, типу і способу укладання шихти тощо. Тому практичний інтерес становлять інтегральні характеристики координат плавлення за різних значень уставки за напругою дуг $U_{д,уст}$.

На рис. 4, як приклад, показано інтегральні характеристики потужності дуг $\bar{P}(U_d)$ та реактивної потужності $\bar{Q}(U_d)$ дугової печі ДСП-6, які розраховані для відповідних до вибраної стратегії оптимального керування $P_d(U_d) \Rightarrow \max$ штучних зовнішніх характеристик 2–6, показаних на рис. 2. Ці інтегральні характеристики наочно ілюструють вплив різних залежностей ШЗХ та уставок $U_{д,уст}$ ПСРПЕ на інтегральні значення потужності дуг і реактивної потужності дугової печі.

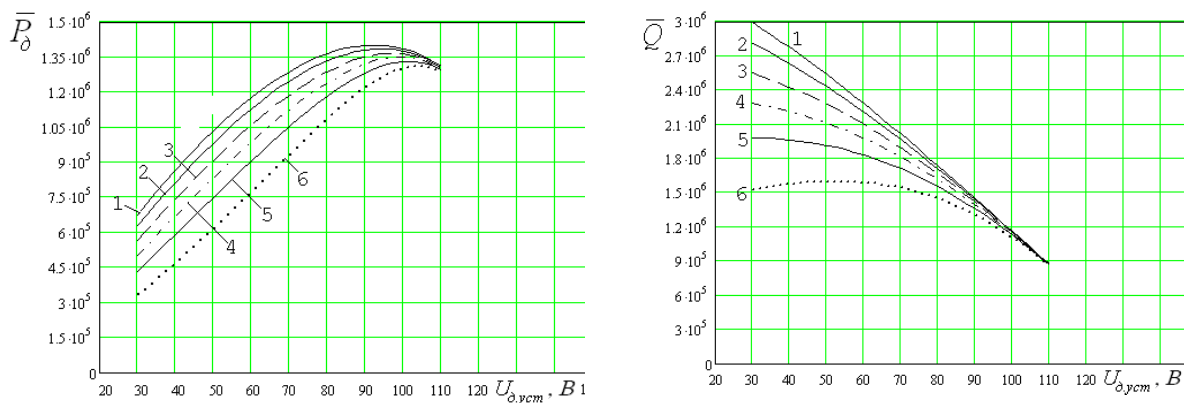


Рис. 4. Інтегральні природна 1 та штучні 2–6 характеристики потужності дуг $\bar{P}(U_d)$ та реактивної потужності $\bar{Q}(U_d)$ дугової сталеплавильної печі ДСП-6 з урахуванням реальних стохастичних характеристик флуктуацій напруг на дугах

Отримані інтегральні характеристики покладено в основу проектування нечітких регуляторів НР1 та НР2 розробленої ієрархічної системи адаптивного екстремального керування потужністю дуг (рис. 1), які призначені для оперативного синтезу оптимальної залежності ШЗХ дугової печі $F^*(U_d)$ та оптимальної уставки за напругою дуг $U_{д,уст}^*$ ПСРПЕ, відповідно. Такі ШЗХ описуються (наближуються) аналітичною залежністю (2), кожна з яких однозначною ідентифікується її коефіцієнтом z .

На виході регулятора НР1 синтезується поточне значення формуючого коефіцієнта z , що відокремлює із сім'ї ШЗХ одну (оптимальну) $F^*(U_d)$. Синтезується коефіцієнт z у функції вхідних сигналів НР1: температури футерівки печі у точці її найбільшого нагрівання T_ϕ , значення якої отримується з виходу датчика температури футерівки ДТФ печі, і коефіцієнта інтенсивності нагрівання шихти та розплаву $k_{ін}$, що знімається з виходу датчика коефіцієнта інтенсивності ДКІН.

Інформація про залежність ШЗХ (значення z) надходить на керуючий вхід задавача струму дуги ЗСД підсистеми регулювання струмів дуг ПСРСД. На другий вхід ЗСД надходить поточне значення наруги дуги U_d відповідної фази, у функції якого згідно із залежністю $I_{дз} = F^*(U_d, z)$ обчислюється сигнал завдання керування $I_{дз}$, який надходить на перший вхід ПІ-регулятора струму дуги РСД. Вихідний сигнал РСД U_k^x надходить на вхід системи імпульсно-фазового керування СІФК блоку регулювання індуктивного опору БРІО дроселя Др ПСРСД. На виході СІФК формуються керувальні імпульси, які надходять на керувальні електроди силових тиристорних ключів VS1 і VS2. Зміною значення кута α відкриваючих імпульсів, здійснюють вплив на еквівалентний індуктивний опір дроселя Др відповідної фази і реалізують, тим самим, необхідний для отримання синтезованої оптимальної ШЗХ $I_{дз} = F^*(U_d, z)$ дугової печі закон регулювання струмів дуг.

Поточне оптимальне дискретне значення уставки за напругою дуги $U_{д,уст}^*$ формується на виході нечіткого регулятора НР2 у функції зміни коефіцієнта $k_{ін}$ і дисперсії потужності дуг D_{P_d} . Включення у вхідний вектор ПСНВ дисперсії потужності дуг D_{P_d} дає змогу ефективно відслідковувати екстремум характеристики потужності дуг $\bar{P}_d(U_d)$, що відповідає вибраному критерію максимізації продуктивності (потужності дуг) $P_d(U_d) \Rightarrow \max$. Оптимальне значення уставки $U_{д,уст}^*$ за напругою дуги з виходу НР2 надходить на керувальний вхід підсистеми регулювання положення електродів ДСП.

Бази правил і функції належності, які реалізовані в нечітких регуляторах НР1 і НР2

ПСПВ, проектується апріорно для кожного ступеня напруги $U_{д,уст}^*$ електропічного трансформатора ПТ. Їх вибір і реалізація виконуються у функції сигналу ступеня напруги пічного трансформатора ПТ N^* , який з виходу задавача ступеня напруги пічного трансформатора ЗСНПТ надходить на вхід пристроїв ПБЗ чи РПН, що встановлюють в ПТ оптимальну вторинну напругу $U_{2ф}^*$ у відповідності з сигналом N^* оптимального ступеня напруги ПТ, що з виходу задавача ЗСНПТ надходить на входи вибору бази правил та функцій належності нечітких регуляторів НР1 і НР2. У функції ступеня напруги $U_{2ф}^*$ включаються у роботу апріорно синтезовані нечіткі регулятори НР1 та НР2, які використовуються для поточного синтезу оптимальних керувальних впливів: $F^*(U_{д})$ та $U_{д,уст}^*$.

Висновки

Обґрунтована стратегія адаптивного екстремального керування продуктивністю дугової печі і її реалізація на основі підсистеми нечіткого виводу (двох нечітких регуляторів НР1 та НР2) дадуть змогу підвищити низку показників електротехнологічної ефективності, зокрема за інших рівних умов підвищити продуктивність (потужність дуг) печі, зменшити втрати потужності в елемента короткої мережі дугової печі, зменшити споживання реактивної потужності, підвищити динамічну точність стабілізації координат електричного режиму тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Нейромережева система адаптивного оптимального керування потужністю дуг дугової сталеплавильної печі / О. Ю. Лозинський, А. О. Лозинський, Р. Я. Паранчук, Я. С. Паранчук // Вестник НТУ ХПИ. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика». — Харків : НТУ ХПИ. — 2010. — С. 583—586.
2. Система оптимального керування технологічним процесом в дугових сталеплавильних печах / О. Ю. Лозинський, А. О. Лозинський, Р. Я. Паранчук [та ін.] // Науково-практичний журнал «Новини науки Придніпров'я». — Дніпропетровськ : Днепр-VAL. — 2008. — № 3—4. — С. 95—98.
3. Паранчук Р. Я. Система багатокритеріальної адаптивної оптимізації електротехнологічної ефективності плавлення сталей в дугових сталеплавильних печах на основі принципів нечіткого керування / Р. Я. Паранчук // Екологія и промышленность. — 2010. — № 3(24). — С. 79—84.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 14.10.11
Рекомендована до друку 12.01.12

Лозинський Орест Юліанович — завідувач кафедри, **Паранчук Ярослав Степанович** — професор, **Мороз Володимир Іванович** — доцент, **Паранчук Роман Ярославович** — молодший науковий співробітник.

Кафедра електроприводу, Національний університет «Львівська політехніка», Львів;

Андріяс Ірина Аркадієвна — доцент.

Кафедра електроприводу, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя;

Нечай Олег Миколайович — доцент.

Кафедра електромеханіки та електроніки, Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Львів