

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА СИСТЕМА АДАПТИВНОГО ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ ДУГ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Вступ. Проблема поліпшення показників електротехнологічної ефективності роботи дугових сталеплавильних печей (ДСП) трифазного струму, режимам навантаження яких властивий нелінійний динамічний нестаціонарний та пофазно несиметричний і взаємозв'язаний характер, є однією з пріоритетних для електрометалургійної галузі України. Одними з основних серед цих показників є питомі витрати електроенергії, продуктивність печі, втрати потужності в короткій мережі печі та системі електропостачання, коефіцієнт потужності тощо. Невідповідність цих показників сучасним вимогам і світовому рівню призводить до зниження конкурентноздатності продукції електрометалургійної галузі України на світовому та внутрішньому ринку, і перш за все за ціною, а також за показниками якості.

Постановка задач дослідження. Одним з пріоритетних і найефективніших сучасних підходів для суттєвого підвищення зазначених показників є технічне переоснащення галузі і реалізація на основі цього передових енергоощадних технологій плавлення сталей в ДСП. Актуальність реалізація енергоощадних стратегій керування режимами сталеплавлення особливо загострюється для сучасних високоімпульсних дугових печей, у яких питома встановлена потужність підвищена до 0.8-1.0 МВт/т, завдяки чому значно інтенсифікується електричний режим на стадіях розплавлення шихти.

Аналіз стану проблеми. Як показують результати досліджень, перспективними напрямками підвищення показників електротехнологічної ефективності є адаптивна оптимізація процесу керування і якісна стабілізація координат електричного режиму (ЕР) на рівні синтезованих оптимальних уставок, причому реалізація оптимального керування є у два-три рази ефективнішою для поліпшення зазначених показників, тим не менше якісна стабілізація координат ЕР додатково підвищує ефективність реалізації оптимальних стратегій керування плавлення [1].

Метою дослідження є розроблення ієрархічної структури системи автоматичного керування (САК) для провадження стратегій адаптивної багатокритеріальної оптимізації процесу електросталеплавлення в дугових печах, що дасть змогу комплексно підвищити показники електротехнологічної ефективності, електромагнітної сумісності та поліпшити низку екологічних показників.

Виклад основного матеріалу. Об'єкт керування, силове коло (СК) ДСП характеризується наявністю нелінійних елементів і, перш за все, дугових проміжків з нелінійними вольт-амперними характеристиками, і випадково змінюваними параметрами, наявністю взаємних впливів між фазними каналами системи регулювання, експлуатаційним контролем наруг на дугах з невисокою точністю, а також невисокою точністю вимірювання інших координат і параметрів силового кола дугової печі. Зважаючи на це, а також на нестаціонарність процесу збурень у трифазному силовому колі ДСП і відсутність точних математичних моделей режимів сталеплавлення, синтез і реалізація керування режимами плавлення виконуються в умовах неповної і неточної інформації про хід технологічного процесу, що не дає змоги провадити процес плавлення за високих показників електротехнологічної ефективності, зокрема отримати низьку енергоємність металопродукції дугових печей.

За таких умов доцільним і ефективним підходом для реалізації стратегій оптимального керування режимами і якісного регулювання, зокрема якісної стабілізації координат ЕР, є застосування нейромережових технологій для ідентифікації [2], керування і регулювання координат ЕР. За умови використання в структурах САК і регулювання нейронних мереж (нейроконтролерів), показники ефективності керування і якості регулювання переважно залежать від фундаментальних властивостей багатопарових нелінійних нейронних мереж (НМ), а не від апріорно синтезованих законів оптимального керування на основі детермінованих моделей процесів при лінеаризованих та незмінних параметрах об'єкта керування – силового кола ДСП. Використання в нейронних мережах нейронів з нелінійними активаційними функціями дає змогу реалізувати на їх основі оптимальні процеси керування режимами нелінійних об'єктів, до яких у повній мірі відносяться дугові печі.

Побудова системи високоякісного регулювання (стабілізації) координат ЕР на основі нейрорегулятора вимагає проектування і синтезу НМ для відтворення (ідентифікації) і прогнозування режимів об'єкта керування – силового кола ДСП. Для реалізації цього, на першому етапі обґрунтовується архітектура нейромоделі режимів, а потім, на другому етапі, необхідно розробити алгоритм оперативного синтезу сигналу регулювання координат ЕР згідно поставленого критерію якості регулювання, зокрема якісної їх стабілізації на рівні оптимальних уставок, що відповідають умовам плавлення і характеристикам збурень на поточній технологічній стадії (етапі) плавки.

Аналіз структур систем регулювання координат суттєво нелінійних об'єктів показує, що найдоцільнішим є використання концепції нелінійного предиктивного регулювання та ідентифікації координат та параметрів, що не піддаються безпосередньому експлуатаційному контролю, на основі нейронних мереж [3-5].

При керуванні режимами сталеплавлення в ДСП з прогнозуванням процесів зміни регульованої координати - напруги на дугах (довжин дугових проміжків), модель об'єкта керування - силового кола дугової печі, слугує для оперативного прогнозування процесу зміни вихідної координати, а алгоритм оптимізації використовується

для оперативного розрахунку такого сигналу керування на переміщення електрода, що призводить до мінімізації відхилення між бажаним і отримуваним (реальним) процесом зміни вихідного сигналу моделі, тобто критерієм оптимізації є мінімум середньоквадратичної похибки регулювання $e = I_n - l$. Описаний процес регулювання використаний у структурі контролера з прогнозування вихідного сигналу NN Predictive Control, що реалізований у додатку Neural Network Toolbox математичного пакету MatLAB. Такий регулятор, як показали результати досліджень, є найбільш ефективним при регулюванні режимів нелінійних об'єктів, що піддані дії випадкових нестационарних випадкових впливів, якими є електромеханічні та електрогідравлічні системи регулювання положення електродів ДСП.

Модель об'єкта керування – силового кола дугової печі, реалізується на основі НМ, зокрема нейронної мережі прямого поширення типу багатoshарового перцептрона, якій властива універсальність при моделюванні об'єктів з різними характеристиками. Структурна схема системи для ідентифікації моделі силового кола дугової печі показана на рис.1, а на рис.2 зображено будову нейронної мережі, що слугує регулятором напруг дуг (довжин дуг) у фазних каналах регулювання потужності дуг дугової сталеплавильної печі.

Нейромережа містить один прихований шар. На вході НМ містить лінії затримки, що запам'ятовують попередні значення вхідних та вихідних сигналів метою точнішого розрахунку (прогнозування) процесу зміни вихідної координати – напруг (довжин) дуг, на наступних кроках регулювання. Для нейронів прихованого шару доцільно використати гіперболічну тангенціальну функцію активації нейронів, а для вихідного нейрона – лінійну. Навчається така мережа автономно на основі експериментальних даних, що отримані у пасивних експериментах на дуговій печі у типових плавках. Навчання нейромережі, як показали дослідження, можна виконувати за методом зворотного поширення похибки чи за методом Лавенберга-Марквардта, що забезпечують для даного застосування належну точність і збіжність навчання.

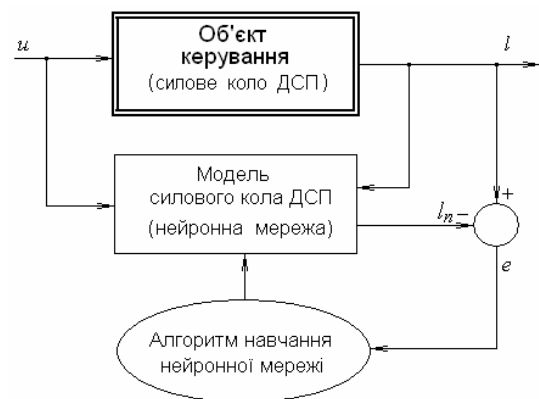


Рис.1. Структурна схема системи ідентифікації моделі силового кола ДСП

На рис.3 показано структурну схему системи керування процесом переміщення електродів з прогнозуванням. Регулятор складається з нейромережевої моделі підсистеми регулювання положення електродів ДСП і блоку оптимізації процесу регулювання. Останній формує сигнал $u'(t)$, що мінімізує критерій якості регулювання, а сигнал u призначений для реалізації відповідної стратегії регулювання довжини дуги на кожному поточному кроці. Нейромодель у наведеній структурі прогнозує (відтворює) на виході реакцію об'єкта керування (зміну напруги (довжини) дуги) на наступних кроках керування. Процес зміни сигналу u' подає тестовий сигнал керування, I_n - фактична та l - очікувана (бажана) реакція моделі керованого процесу $I_d(t)$. Нейромодель навчається на відтворення на виході образу сигналу u на переміщення електродів за критерієм мінімізації похибки $e = I_n - l$ на послідовність

пробних вхідних сигналів u на певному інтервалі часу.

Прогнозований процес зміни вихідного сигналу $I_d(t)$ (пропорційного $U_d(t)$) системи переміщення електроду використовується процедурою чисельної оптимізації, за результатом виконання якої мінімізується середньоквадратичний критерій якості регулювання:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [l(t+j) - I_n(t+j)]^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} [u'(t+j-1) - u'(t+j-2)]^2,$$

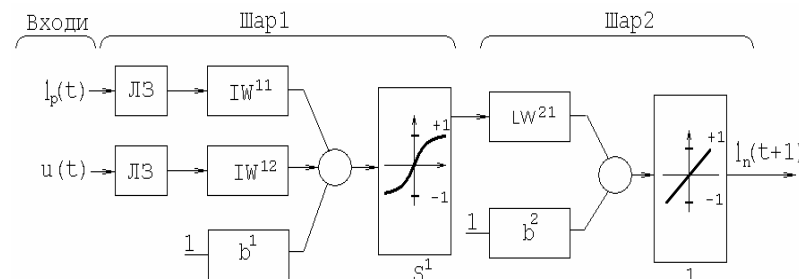


Рис.2. Структурна схема нейрорегулятора напруг дуг ДСП

де N_1, N_2 - сталі, що задають нижню і верхню межі прогнозування (обчислення похибки спостереження);

N_n - величина, що подає частку, яку вносить потужність сигналу керування в обчислення функціонала J ;

ρ - ваговий коефіцієнт потужності керування у критерії якості.

Необхідність адаптації керування режимами сталеплавлення диктується,

перш за все, дією інтенсивних випадкових збурень як безпосередньо у плавильному просторі печі, так і в СК ДСП і неперервною зміною їх стохастичних характеристик. Визначальний вплив на погіршення показників електротехнологічної ефективності роботи ДСП справляють флуктуації довжин дуг, зміна градієнта напруги на дугових проміжках, зміна параметрів елементів короткої мережі, зокрема залежності динамічної вольт-амперної характеристики дуг, а також коливання та відхилення напруги на шинах живлення ДСП. Зазначені

фактори призводять до зміни дисперсії струмів дуг, коливань напруги живлення трифазної системи дуг і створення синусоїдності струмів дуг. Наслідком цього є зміна координат екстремуму робочих характеристик дугової печі, зокрема координат екстремуму максимуму потужності дуг, питомих витрат електроенергії, вартості тони виплавленої сталі, продуктивності печі та інших.

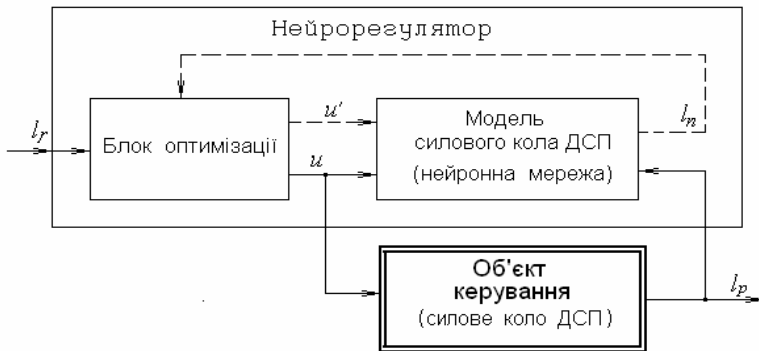


Рис.3. Неймережева система оптимальної стабілізації ЕР ДСП

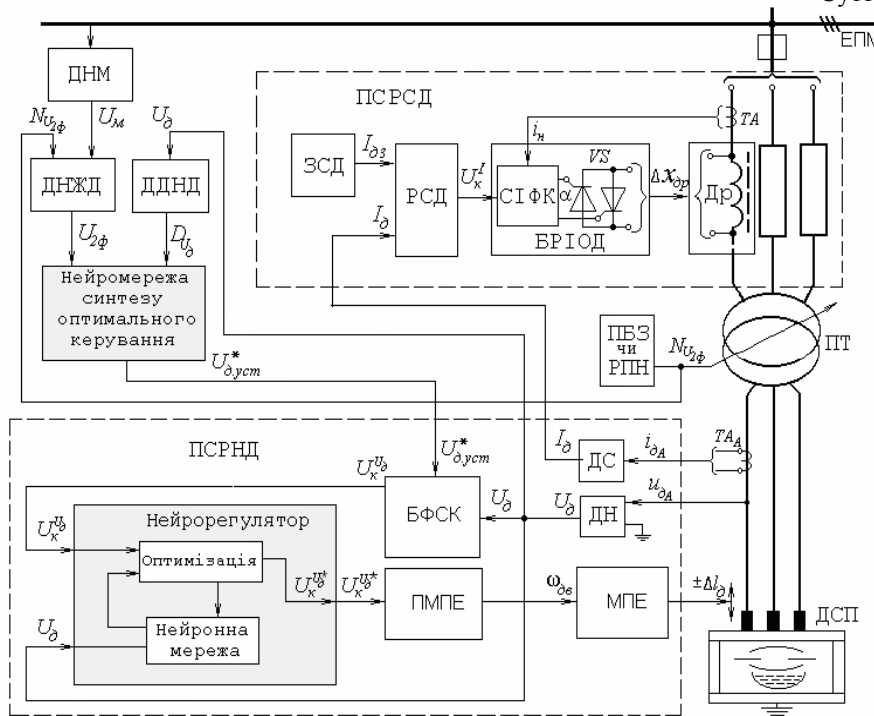


Рис.4. Ієрархічна структура інтелектуальної САК режимами ДСП

чно трансформатора ПТ, уставка за напругою дуги підсистеми регулювання положення електроду ПРСРПЕ $U_{d,уст}$, залежність бажаної ШЗХ печі $I_d(U_d)$, що оперативно реалізується ПРСРД та сигнал завдання ПРСРД

$I_{д3}$. На виході нейрорегулятора формується сигнал керування $U_{k,уст}^*$, який через привід механізму переміщення електродів ПМПЕ і сам механізм переміщення електродів МПЕ реалізує оптимальний процес переміщення електродів за критерієм мінімуму похибки відхилення бажаного і фактичного значення напруг на дугах. Нейронна мережа нейрорегулятора налаштована (навчена) на відтворення моделі ділянки підсистеми регулювання довжини дуги: вхід приводу переміщення електродів – вихід давача напруги ДН.

Основною задачею підсистеми регулювання струмів дуг ПРСРД є реалізація обмеження і якісної стабілізації струмів дуг на заданому рівні $I_{д3}$, що отримується в цій підсистемі завдяки реалізації штучної зовнішньої характеристики ДСП з ділянкою стабілізації струму на рівні $I_{д3}$, використанню пропорційно-інтегрального регулятора струмів дуг РСД і високій швидкодії реалізації керуючого впливу, яким є прирости еквівалентного індуктивного опору дроселя $\Delta x_{др}$, що включений у коло первинної обмотки ПТ.

Таким чином, завдяки реалізації оптимальної динаміки регулювання напруг і струмів дуг обома локальними підсистемами: ПРСРД і ПРСРД, у розробленій двоконтурній швидкодійній системі досягається якісне вирішення основної задачі системи регулювання електричного режиму – рівномірне введення (якісна стабілізація) активної потужності у плавильний простір дугової печі.

Зважаючи на нестационарний характер зміни зазначених вище збурень, реалізувати оперативну адаптацію процесу оптимального керування за вибраним критерієм до цих змін на основі апріорної інформації (детермінованої моделі) про їх зміни з належною точністю неможливо. Тому доцільним підходом для реалізації адаптивного оптимального керування у вказаних умовах плавлення, як зазначено вище, є реалізація оперативного синтезу оптимальних керуючих впливів на основі нейронної мережі прямого поширення

Суттєве розширення функціональних можливостей зі синтезу та реалізації оптимальних режимів сталеплавлення та якісної стабілізації координат ЕР досягається, перш за все, завдяки використанню у запропонованій САК нового керуючого впливу - оперативної зміни та реалізації бажаної штучної зовнішньої характеристики (ШЗХ) печі $I_d(U_d)$. Реалізується цей вплив шляхом плавного неперервного тиристорного регулювання опору дроселя D_r в колі первинної обмотки пічного трансформатора ПТ у замкненій підсистемі регулювання струмів дуг ПРСРД.

Елементами загальносистемного вектора керування $\vec{x}(U_{2\phi}, U_{d,уст}, I_d(U_d), I_{д3})$ на поточну технологічну стадію є напруга ступені вторинної обмотки $U_{2\phi}$ пі-

Друга основна задача – підтримання потужності дуг на максимально можливому рівні в умовах динамічних координатних і параметричних збурень вирішується у розробленій ієрархічній структурі на другому рівні, де виконується оперативний синтез оптимальної уставки за напругою дуги $U_{д.уст}^*$, що дає змогу реалізувати оптимальне (екстремальне) керування потужності в умовах зазначених нестационарних збурень.

Дія вказаних вище збурень призводить до зміни координат екстремуму характеристики потужності дуг $P_d(U_d)$. Як показали результати проведених на дугових печах експериментальних досліджень, найвідчутніше на координати екстремуму характеристик $P_d(U_d)$ впливають дисперсія напруг дуг D_{U_d} і зміна напруги живлення трифазної системи дуг (зміна напруги на шинах живлення дугової печі) U_M .

Ідентифікація процесу зміни абсциси екстремуму характеристики $P_d(U_d)$ виконується нейронною мережею. Для цього на її вхід подаються поточні значення (сигнал) напруги живлення дуг $U_{2ф}$ і сигнал поточних значень дисперсій напруг на дугах D_{U_d} , які формуються на виході давача напруги живлення дуг ДНЖД і давача дисперсії напруг дуг ДДНД відповідно у функції зміни діючих (усереднених на періоді) значень напруг на дугах $U_d(t)$ та усереднених на періоді значень напруги $U_M(t)$ на шинах живлення ДСП і номера N поточної ступені напруги пічного трансформатора ПТ, що поступають на входи ДНЖД та ДДНД.

Нейронна мережа для оперативного синтезу оптимальних уставок напруг дуг $U_{д.уст}^*$ підсистеми регулювання напруг на дугах – це нейронна мережа прямого поширення з одним прихованим шаром. Як показали проведені дослідження, для оперативного синтезу оптимальних уставок $U_{д.уст}^*$ підсистеми регулювання положення електродів ПСРПЕ дугової печі типу ДСП-3 Нововолинського ливарного заводу, прихований шар повинен містити 33-37 нейронів з активаційною функцією TANSIG, а нейрон на виході нейронмережі повинен мати функцію активації типу PURELIN.

Виконувати навчання (тренування) цієї нейронної мережі доцільно на основі методу зворотного поширення похибки, що ґрунтується на швидкому розрахунку градієнта функції похибки відтворення образу на виході НМ. Обчислення виконуються у напрямку від вихідного шару до вхідного за рекурентними формулами, що не потребує перерахунку вихідних значень сигналу нейронів і є одним з найефективніших методів тренування нейронних мереж за необхідними обсягами обчислень.

На рис.5,а зображено еталонний (бажаний) $U_{д.уст}^e(t_j)$ (залежність 1) і фактично отриманий за результатом навчання $U_{д.уст}^*(t_j)$ (залежність 2) процеси зміни уставок за напругою дуги підсистеми регулювання напруг $U_d(t)$ (довжин) дуг дугової печі ДСП-3 Нововолинського ливарного заводу.

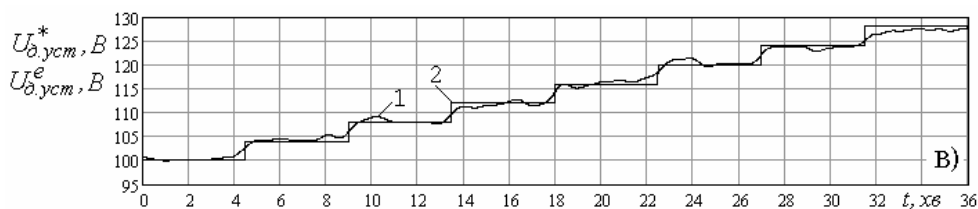


Рис.5. Фактично отриманий (1) та еталонний (2) процеси зміни уставок $U_{д.уст}^*(t_j)$

тенденції інтенсифікації процесу сталеплавлення відчутно підвищити електротехнологічну ефективність керування цим процесом та значно покращити показники електромагнітної сумісності режимів ДСП і та електромережі.

Висновки. 1. Розроблено ієрархічну двоконтурну структуру для реалізації стратегій адаптивного оптимального керування режимами плавлення в ДСП, у якій синтез вектора керування виконується на основі використання НМ прямого поширення сигналу. 2. Створено системи оптимальної стабілізації напруг дуг на основі нейронного регулятора. 3. Запропоновано структурні та алгоритмічні рішення для адаптивного оптимального керування процесом плавлення за критерієм максимуму потужності дуг. 4. Обґрунтовано архітектуру, виконано тренування і тестування нейронної мережі для синтезу оптимальних значень уставок за напругою дуг ПСРПЕ. 5. Аналіз результатів тестування НМ показав отримання необхідної точності синтезу оптимальних уставок за напругою дуг.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андрианова А.Я., Паранчук Я.С., Лозинский А.О. Некоторые вопросы использования интеллектуального управления в дуговых сталеплавильных печах // *Электрометаллургия*. - 2004. - №3. - С.30-37.
2. Паранчук Р.Я. Эксплуатационный контроль параметров та напруг дуг дугової сталеплавильної печі на основі нейронної мережі // *Вісник НТУ ХП*. “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика”. – Харків: НТУ ХП, 2008.- С. С.580-581.
3. Зайченко Ю.П. Основы проектирования интеллектуальных систем. К.: Слово, 2004. – 352с.
4. Рудковский Д., Пилинский М., Рудковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452с.
5. Паранчук Р.Я. Эксплуатационный контроль параметров та напруг дуг ДСП на основі нейронної мережі // *Вісник НТУ ХП*. “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика”. – Харків: НТУ ХП, 2008.- С. С.580-581.

Використання нейронної мережі для синтезу вектора керування багатоконтурної системи керування процесом електросталеплавлення в ДСП дає змогу на платформі сучасної