

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ РЕЖИМОМ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ТРИФАЗНОГО СТРУМУ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Вступ. Електрометалургійна галузь України відноситься до базових галузей народного господарства. Значна частка її продукції експортується, що дає вагому частку валютних надходжень у бюджет держави. В електрометалургійному та машинобудівному комплексах України експлуатуються дугові сталеплавильні печі (ДСП) місткістю від 1.5 до 100 т. На жаль, їх продукція характеризується значною енергоємністю, і за цим показником Україна значно поступається таким промислово розвинутим країнам, як США, Німеччина, Японія, Швеція та ін. Основною причиною такого стану в галузі є морально застаріле та фізично зношене силове електрообладнання та системи керування, а також неефективні технології електросталеплавлення. В основу подальшого успішного розвитку електрометалургійної галузі України та підвищення її конкурентоспроможності на внутрішньому і зовнішньому ринку металопродукції в сучасних умовах дефіциту і невпинного зростання цін на енергоносії повинна бути покладена політика підвищення ефективності енерговикористання, енергозбереження та зменшення енергоємності процесу сталеплавлення, що узгоджується з директивними матеріалами з реалізації державної політики підвищення ефективності використання електричної енергії.

Аналіз стану проблеми і постановка задач дослідження. Основною перешкодою на шляху успішного вирішення окресленої вище проблеми є вкрай динамічний несиметричний та стохастичний характер навантаження дугових сталеплавильних печей і наявність суттєвих нелінійностей у силовому колі трифазної системи дуг та в системі автоматичного керування (САК) електричним режимом (ЕР), що переводить дугові печі в ранг одних з найскладніших технологічних об'єктів з точки зору їх автоматизації та реалізації оптимальних режимів керування.

Характерною ознакою світового розвитку сталеплавлення на сучасному етапі є інтенсифікація електричного режиму, що реалізується шляхом підвищення питомої потужності силового електрообладнання з 0.5-0.7 до 0.8-1.0 МВА/т. Для втілення цієї тенденції проектується пічні трансформатори і елементи короткої мережі печі з відповідними цьому підвищеними напругами живлення трифазної системи дуг: до 700-1000В для потужних та надпотужних печей [1]. Вказана тенденція розвивається швидкими темпами і є одним з найважливіших напрямків підвищення ефективності всього електросталеплавильного виробництва. Але за причини дії динамічних несиметричних збурень і нелінійного характеру навантаження печі реалізація вказаної тенденції підвищення питомої потужності силового електрообладнання, що відбувається у переважній більшості без відповідного підвищення потужності електропостачальної системи, загострює проблему електромагнітної сумісності дугової печі та електропостачальної системи.

Успішно вирішити окреслену проблему можна, на наш погляд, лише на основі **комплексного системного підходу**, за якого дугова сталеплавильна піч та електропостачальна мережа розглядаються як єдина складна електротехнологічна система, вектор керування якої синтезується з умови отримання **екстремуму узагальненого функціоналу мети керування режимами ДСП та електромережі**. Реалізувати таке керування і отримати зазначений ефект можна, на наш погляд, лише в **ієрархічних структурах систем екстремального адаптивного (ситуаційного) керування та швидкодіяного регулювання координат електричного режиму** [2]. Зазначимо тут, що з техніко-економічної точки зору задачі оптимізації процесу керування загалом і якісного регулювання збурень електричного режиму дугової печі нерівнозначні. Синтез та реалізація оптимального керування з точки зору підвищення продуктивності печі та зниження питомих витрат електроенергії є у два-три рази ефективнішим підходом за розроблення рішень на якісну стабілізацію координат ЕР [3]. У той же час, ці задачі є взаємопов'язані і повинні розв'язуватися у комплексі з врахуванням зазначених вище пріоритетів, бо якісна стабілізація координат на рівні синтезованих оптимальних значень додатково підвищує ефективність оптимального керування. У розвиток цього зазначимо, що, зважаючи на неперервну упродовж плавки зміну стохастичних характеристик збурень у плавильному просторі та силовому колі печі та необхідність зміни параметрів потоку електричної енергії по ходу зміни фізико-хімічного стану і температурного режимів шихти та розплаву, синтез оптимального керування ЕР повинен виконуватися оперативно як у функції зміни технологічного стану (ситуації) в плавильному просторі, так і у функції зміни стохастичних характеристик збурень електричного режиму.

На переважній більшості дугових сталеплавильних печей трифазного струму для керування режимами сталеплавлення використовуються одноконтурні електромеханічні та електрогідролічні регулятори потужності дуг, такі як АРДМ-Т, АРДГ, АРДМ-М та ін., яким властива значна інерційність, наслідком чого є низька динамічна і статична точність регулювання координат ЕР. Використання серійних регуляторів електричного режиму типу СПУ та СТУ з електронними регулюючими компонентами та типу РММ, РМДМ, РМА з мікропроцесорною регулюючою системою дає змогу дещо підвищити швидкодію регулювання та розширити функціональні можливості з реалізації бажаних раціональних режимів керування і підвищити на основі цього продуктивність печі, зменшити питомі витрати електроенергії та собівартість електросталей. Зміна керуючих впливів у вказаних серійних регуляторах виконується у функції зміни технологічних стадій плавлення, що ідентифікуються сталеваром чи технологом. За причини наявності суб'єктивного фактору рішення про моменти зміни останніх приймаються з певною похибкою.

Для підвищення швидкодії процесу регулювання струмів дуг фірмою Danieli запропоновано систему живлення дугової печі трифазного струму через реактор, що насичується [4]. Система відпрацьовує відхилення струмів дуг на одному періоді напруги, проте допускає у процесі регулювання значні спотворення синусоїдності струмів дуг, тобто

мізації запропоновано використовувати децентралізований підхід, за якого структурна та параметрична оптимізація локальних підсистем виконується на основі важливих для цих підсистем критеріїв, а на загальносистемний рівень синтезу оптимального керування делегуються вказані вище задаючі та керуючі впливи локальних підсистем.

Аналіз режимів на рівні локальних підсистем показав, що процеси регулювання координат ЕР проходять в умовах значних і неперервних параметричних збурень, зокрема змін параметрів силового кола ДСП, дії міжфазних перехресних зв'язків і нестационарних випадкових збурень. Отримати точні математичні моделі опису режимів локальних підсистем та точні аналітичні моделі синтезу оптимального керування за таких особливостей структури САК та характеристик режимів є неможливо. Ефективним підходом для реалізації оптимальних процесів керування та регулювання координат ЕР упродовж всієї плавки на всьому діапазоні їх зміни є використання новітніх інтелектуальних методів керування, зокрема принципів нечіткого керування, генетичного алгоритму та стохастичної адаптації до змін інтегральних характеристик збурень впродовж плавки [6-11]. Використання запропонованих підходів дає змогу отримати оптимальні та інваріантні до параметричних збурень і до змін інтегральних характеристик збурень процеси регулювання координат локальних підсистем на повному діапазоні їх зміни.

Як показали дослідження, ефективним для синтезу загальносистемного керування $\vec{x}(U_{2ф}, U_{дуст}, I_d(U_d), U_m^3)$ за багатьма критеріями $Q_i(\vec{x})$ є використання положень Соболя-Статнікова та формалізованих методик багатопараметричної оптимізації на основі Парето рішень багатокритеріальної стратегії знаходження оптимального збалансованого співвідношення між значеннями інтегральних характеристик і техніко-економічних показників ДСП та електромережі. Зокрема одним із ефективних підходів для багатопараметричної **багатокритеріальної оптимізації є синтез оптимальних за Парето рішень на основі узагальненого адитивного функціоналу мети керування** [12]:

$$\Phi(\vec{Q}(\vec{x})) = \min_{x \in D} \sum_{i=1}^s \lambda_i \cdot Q_i(\vec{x}), \quad (1)$$

де $\lambda_i \geq 0$ - вагові коефіцієнти часткових критеріїв $Q_i(\vec{x})$ оптимальності; D - область допустимих рішень.

Для синтезу оптимально-компромiсного вектора керування режимами комплексу \vec{x}^* та вектора $\vec{\lambda}^*$ вагових коефіцієнтів в умовах невизначеності, відсутності точного математичного опису процесів та неповноти інформації запропоновано експертні методики, що ґрунтуються на алгоритмах експертної оцінки оперативної економічної, технологічної, енергетичної та виробничої ситуації на певних періодах сталеплавлення в ДСП [13].

Як показали результати досліджень, найбільш доцільним для реалізації оптимальних стратегій керування в умовах функціонування комплексу є синтез керування за відповідним частковим критерієм оптимальності, який приймається як головний на певному етапі сталеплавлення і який якнайповніше відповідає поточним зовнішнім умовам і вимогам до показників функціонування комплексу. **Найефективнішим керуючим впливом для реалізації таких стратегій керування є синтез та встановлення штучної зовнішньої характеристики дугової печі $I_d(U_d)$** (точніше формування сімейства подібних ШЗХ, що мають однакову аналітичну залежність, а один-два її коефіцієнти є варіативними параметрами при синтезі оптимальної серед них), що відповідає кожному частковому критерію, а також використання схемних та алгоритмічних рішень для оперативної реалізації синтезованої ШЗХ печі.

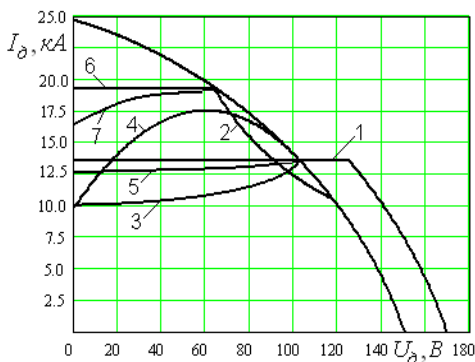


Рис.2. ШЗХ дугової печі ДСП-6 для багатокритеріальної оптимізації режимів

На рис.2 показано декілька типових ШЗХ печі, що обґрунтовані як доцільні (ефективні) для реалізації стратегії керування за відповідним критерієм оптимальності, що вибраний як головний.

Зокрема, розроблено ефективні схемні та алгоритмічні рішення – швидкодійні багатоконтурні САК для оптимізації процесу керування за критерієм мінімуму дисперсії струмів дуг (доцільною для використання є ШЗХ типу 1 (рис.2)), мінімізації дисперсії потужності дуг (якісна стабілізація процесу електроперетворення у плавильному просторі печі (ШЗХ типу 2 з ділянкою гіперболічного закону регулювання струмів дуг)) [14,15], мінімізації рівня споживання і якісної стабілізації реактивної потужності печі (ШЗХ типу 3) [16], максимальної ефективності використання електричної енергії (ШЗХ типу 4) [17] та мінімізації коефіцієнта несиметрії навантаження по фазах дугової печі (ШЗХ типу 5 чи 1) [18] та інші.

Оригінальним підходом для отримання **відчутного поліпшення ефективності оптимально-компромiсних за Парето рішень є реалізація** у структурі розробленої багатоконтурної САК електричним режимом **принципу зонного керування** (ШЗХ типу 2,6 чи 2,7) [19,20].

Реалізація вказаних стратегій оптимального керування на основі розроблених системних, схемних та алгоритмічних рішень, запропонованих складових та методик синтезу вектора керування дає змогу комплексно покращити інтегральні показники дугової печі та електромережі, зокрема призводить до суттєвого поліпшення показників якості електроенергії на шинах під'єднання дугової печі, зменшення питомих витрат електроенергії, зростання продуктивності печі, зменшення собівартості тони переробленої сталі та поліпшення її якісних показників.

Синтез векторів оптимальних стратегій керування виконується на основі отриманих для кожної із цих стратегій узагальнених функціоналів мети і реалізується у відповідних для кожного критерію структурах САК. Так для реалізації керування за критерієм максимальної ефективності використання електроенергії як один із доцільних варіантів є синтез вектора оптимального керування з умови мінімізації запропонованого функціоналу [17]:

$$\Phi(I_{д.уст}, U_{2ф}, U_{д.уст}) = \frac{W_T}{T} \cdot \int_0^T \frac{P_{д}(I_{д.уст}, U_{2ф}, U_{д.уст}, U_{д}(t)) + P_{ев}(I_{д.уст}, U_{2ф}, U_{д.уст}, U_{д}(t))}{P_{д}(I_{д.уст}, U_{2ф}, U_{д.уст}, U_{д}(t)) - P_{ев}(I_{д.уст}, U_{2ф}, U_{д.уст}, U_{д}(t))} \cdot dt \Rightarrow \min, \quad (2)$$

де $W_T = 340 \text{ кВт} \cdot \text{год} / T$ - теоретична кількість електроенергії для розплавлення 1т шихти з врахуванням тепла, акумульованого стінами печі у попередній плавці і переданих шихті на початкових стадіях плавлення; $I_{д.уст}$ - параметр доцільної для реалізації цього критерію штучної зовнішньої характеристики печі $I_{д}(U_{д})$ з горизонтальною ділянкою стабілізації струмів дуг; T - інтервал стаціонарності процесу зміни напруги на дугах $U_{д}(t)$.

Зважаючи на значну складність отриманих для вказаних стратегій функціоналів мети керування, зокрема для режимів структур із зонним принципом керування [20], **для синтезу вектора оптимального керування \vec{x}^* ефективним є використання методу генетичного алгоритму [8,21]**. Застосування генетичного алгоритму як математичної процедури для розв'язування оптимізаційних задач, тобто для знаходження координат екстремуму цільової функції чи функціоналу мети керування режимами сталеплавлення, який поєднує випадковий вибір і ціле-направлений пошук розв'язку в просторі допустимих рішень, дає змогу в порівнянні з іншими пошуковими методами швидше знайти розв'язок (координати глобального екстремуму) за будь-якого рельєфу функціоналу у допустимому просторі знаходження рішення, тобто без зупинки алгоритму в області локального екстремуму.

У загальному випадку вектор оптимального керування режимами плавлення синтезується для кожної технологічної стадії плавлення певної марки сталі чи сплаву і типу шихти апріорно і реалізується у моменти їх зміни. У процесі сталеплавлення виконується адаптація цього вектора до зміни зовнішніх умов плавки, зокрема до зміни інтегральних характеристик процесу збурень за довжиною дуги, зміни градієнта напруги на стовпі дуги тощо. Тому реалізація такої стратегії керування вимагає точної ідентифікації технологічних стадій та моментів їх зміни.

Упродовж 1982-1989 рр. за участю авторів було розроблено і впроваджено на дугових печах типу ДСП-100 Донецького металургійного заводу систему автоматичного розпізнавання технологічних стадій плавлення, яка функціонує на основі використання апріорної та оперативної інформації про зміну упродовж плавки параметрів тривимірних розподілів інформативних параметрів (гармонічних складових струмів дуг та стохастичних параметрів їх огинаючої) та басовської стратегії перевірки гіпотез. Але, як показали результати багаторічної експлуатації цієї системи, процедура адаптації процесу розпізнавання до зміни зовнішніх умов плавки (зношення футерування печі, перерозподіл теплових потоків, зміна типу шихти тощо, які дещо змінюють встановлені раніше функціональні залежності між стадіями плавлення і характеристиками розподілів інформативних параметрів) вимагає оперативного опрацювання значних обсягів інформації для адаптації бази даних, тобто для розрахунку нових статистичних характеристик розподілів інформативних параметрів, що відповідають поточним зовнішнім умовам плавки. Ігнорування цієї математичної процедури дещо знижує точність розпізнавання стадій та ідентифікації моментів їх зміни.

Для усунення цього недоліку, а значить і усунення невідповідності моментів зміни вектора керування системи до реального процесу зміни технологічних стадій, що призводить до зниження електротехнологічної ефективності керування процесом сталеплавлення, а за певних умов може спричинити виникнення нештатних ситуацій, чи, навіть, призвести до виникнення аварійних режимів, нами **запропоновано використання і розроблено теоретичні основи розпізнавання технологічних стадій плавлення на основі нейромережних алгоритмів ідентифікації**, які апріорі краще функціонують в умовах невизначеності, неповноти інформації, мінливості параметрів системи, зокрема силового кола печі, стохастичності процесів сталеплавлення та відсутності точних математичних моделей об'єкта керування.

Як один із можливих варіантів для реалізації такого підходу в [22] запропоновано архітектуру нейронної мережі для ідентифікації технологічних стадій на основі самоорганізованих карт Кохонена. **Інформативні параметри p_1, p_2, \dots, p_n сигналів струмів $i_{дА}(t), i_{дВ}(t), i_{дС}(t)$ та напруг $u_{дА}(t), u_{дВ}(t), u_{дС}(t)$ дуг**, тобто коефіцієнти декомпозиції цих сигналів (компоненти енергетичного спектру в діапазоні канонічних і інфрагармонік цих сигналів і стохастичні параметри процесу зміни їх огинаючої) **запропоновано оперативно отримувати на підставі виконання процедури кратномасштабного аналізу**, що є варіантом швидкого **wavelet перетворення** [23]. Процедура кратномасштабного аналізу, нормування та згладжування поточних значень інформативних параметрів p_1, p_2, \dots, p_n , які тісно корельовано з фізико-хімічним станом та температурним режимом шихти та розплаву, реалізується в модулі інформаційного забезпечення, який разом з комплексною нейромережею з прошарком Кохонена складають підсистему розпізнавання технологічних стадій плавлення ПСРТСП (рис. 1).

Вихідні сигнали u_1, u_2, u_3, u_4 нейромережі, що несуть інформацію про ідентифіковану поточну технологічну стадію, є вхідними для експертної підсистеми синтезу вектора керування, що знаходиться на найвищому рівні в ієрархії запропонованої структури системи багатокритеріального адаптивного оптимального керування режимами комплексу. За результатами синтезу для кожної технологічної стадії чи періоду сталеплавлення з врахуванням поточних зовнішніх умов плавки, інтегральних характеристик збурень та поточних вимог до показників функціонування комплексу (дугової печі та електромережі) формується вектор оптимального керування \vec{x}^* з можливою, при необхідності, подальшою його оперативною адаптацією до змінюваних умов плавлення.

Для дослідження ефективності розроблених схемних та алгоритмічних рішень для багатокритеріальної оптимізації режимів комплексу, дослідження роботи печі в аварійних режимах та нештатних ситуаціях (наприклад в режимах обмеження потужності на часових інтервалах пікових навантажень енергосистеми), а також для викорис-

тання у процедурі синтезу оптимального керування ЕР розроблено математичну та цифрову моделі повної трифазної системи живлення дугової печі та багатоконтурної системи керування у миттєвих координатах з врахуванням всіх основних нелінійностей силового кола печі і САК та адекватним за стохастичними характеристиками відтворенням процесів збурень, що діють на досліджуваній стадії електросталеплавлення [24].

Оригінальним є рішення стосовно використання такої цифрової моделі у математичній процедурі синтезу оптимального керування режимами сталеплавлення. Його суть полягає у використанні цифрової моделі у процесі виконання генетичного алгоритму для отримання числової оцінки пристосованості хромосом на кожній популяції (тобто обчислення значення функціоналу мети, наприклад типу (2)), що отримується шляхом виконання відповідного математичного експерименту на цифровій моделі.

Нижче, як приклад комплексного використання розробленої цифрової моделі режимів сталеплавлення для вирішування окреслених вище задач, на рис.2 подано отримані на цифровій моделі режимів дугової печі типу ДСП-50 осцилограми процесів зміни координат електричного режиму цієї печі та електромережі на періоді розплавлення підвалки, аналіз яких дає змогу оцінити :

- ефективність розробленої дворівневої ієрархічної структури САК режимом компенсації реактивної потужності електротехнологічного комплексу у порівнянні із типовою (серійною) одноконтурною структурою системи керування режимами сталеплавлення типу АРДГ, що використовується на цій печі;
- ефективність реалізації оптимального керування режимами сталеплавлення у цих структурах САК, синтезованого за методом генетичного алгоритму із залученням цифрових моделей режимів цих структур САК при оптимізації режимів на вказаному етапі сталеплавлення за критерієм мінімуму дисперсії напруги мережі на шинах під'єднання дугової печі (з певною точністю це відповідає частковому критерію мінімуму дози флікера).

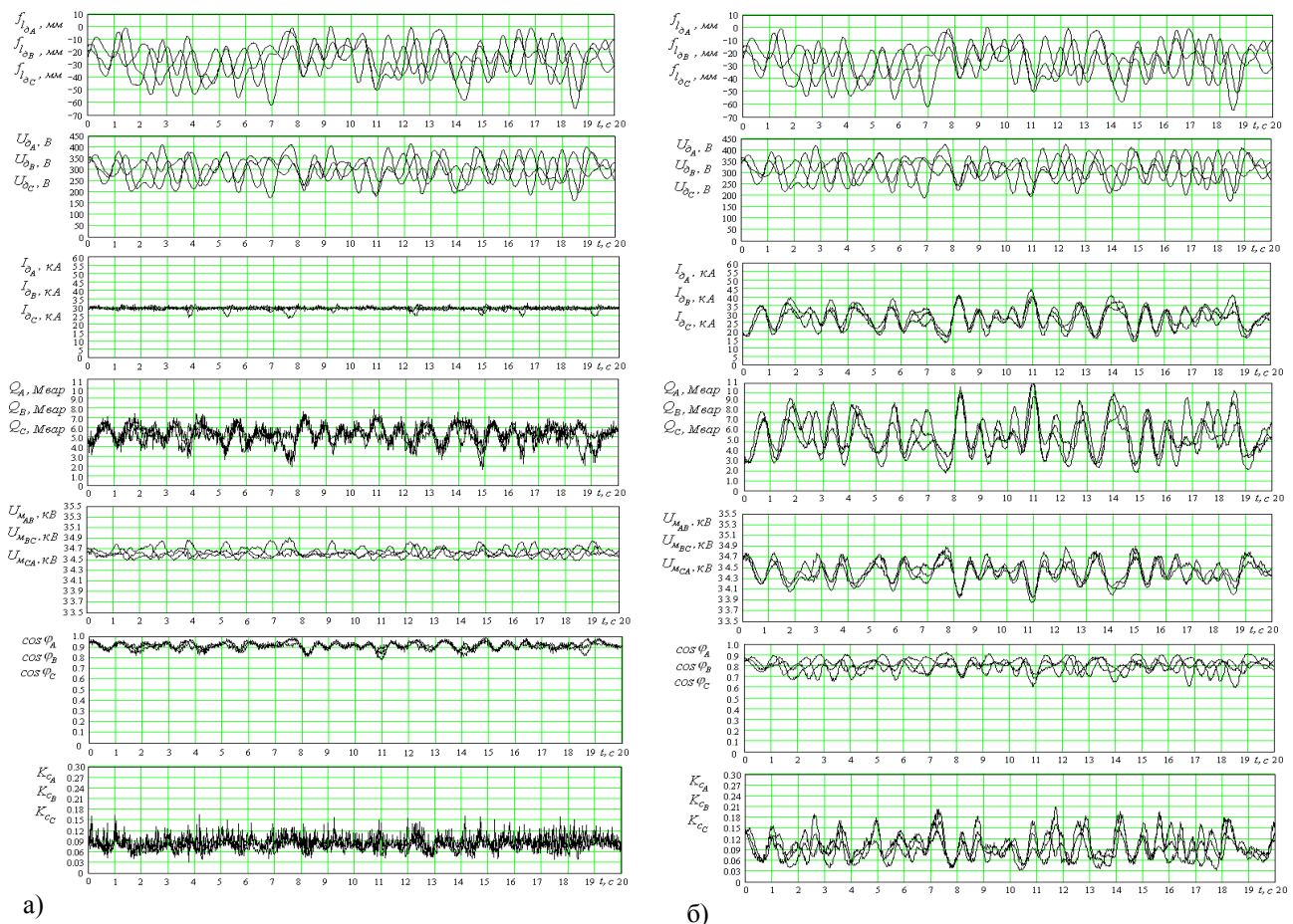


Рис.2. Часові залежності режимних координат дугової печі ДСП-50 та напруги мережі у процесі відпрацювання стаціонарних випадкових збурень дворівневою структурою САК а) та серійним регулятором потужності дуг типу АРДГ б)

На рис.2 показані фрагменти розрахункових осцилограм зміни усереднених на періоді значень основних режимних координат електротехнологічного комплексу: $U_{dj}(t)$, $I_{dj}(t)$ - напруг та струмів дуг; $U_{MAB}(t)$, $U_{MBC}(t)$, $U_{MAC}(t)$ - лінійних напруг та реактивної потужності $Q_j(t)$ електромережі; $\cos \varphi_j$ - коефіцієнта реактивної потужності навантаження та $K_c(t)$ - коефіцієнта спотворення синусоїдності форми струмів мережі, які отримані при відпрацюванні стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуги $f_{1dj}(t)$.

Показані на рис.2 розрахункові осцилограми, що є оптимальними за вказаним критерієм, отримані за однакової реалізації процесів випадкових збурень, адекватних за стохастичними характеристиками до процесів реальних збурень на

етапі розплавлення підвалки в печі ДСП-50, а вектор оптимального керування синтезований з врахуванням умови отримання середньої потужності дуг при функціонуванні дворівневої САК не меншої, ніж при функціонуванні регулятора потужності дуги типу АРДГ. Складові вектора оптимального керування одноконтурної САК типу АРДГ: $U_{2\Phi}^* = 407\text{В}$,

$U_{\text{дуст}} = 313\text{В}$, а для дворівневої САК режимом компенсації реактивної потужності отримано такі складові вектора

оптимального керування: $U_{2\Phi}^* = 448\text{В}$, $U_{\text{дуст}} = 299\text{В}$, $\gamma^* = 1.15$ - параметр оптимальної залежності ШЗХ дугової печі [16]. Отримані у результаті статистичного опрацювання наведених на рис.2 розрахункових осцилограм середні по трьох фазах інтегральні показники якості функціонування обох структур досліджуваних САК зведені у табл.1.

Структури САК	Дворівнева САК	Одноконтурна САК
Поканики		
\bar{U}_d , В	299.4	313.0
\bar{I}_d , кА	29.1	27.3
D_{I_d} , кА ²	0.939	35.4
\bar{P}_d , МВт	7.05	6.73
\bar{U}_m , кВ	34.67	34.46
D_{U_m} , $\times 10^3$ В ²	7.27	37.58
\bar{I}_m , А	330.2	353.1
\bar{Q}_m , Мвар	5.26	5.61
D_Q , Мвар	859	3354
$\overline{\cos \varphi}$	0.914	0.80
$\bar{K}_{c_{I_m}}$	0.0835	0.0971
δU , %	0.947	1.542
F	0.0379	0.220

Аналіз отриманих показників (табл.1) показує, що при функціонуванні розробленої дворівневої САК режимом компенсації реактивної потужності у 3.0-4.0 рази зменшується дисперсія D_{Q_m} перетво-

рку реактивної потужності і на 6% зменшується її середній рівень \bar{Q} .

Останнє, а також зростання на 4.8% середньої потужності дуг \bar{P}_d призводить до підвищення на 14% коефіцієнта потужності навантаження $\cos \varphi$ з 0.8 до 0.914. За отриманого оптимального співвідношення між активною та реактивною потужністю електромережі на 12.6% зменшуються електричні втрати в мережі, тобто підвищується ефективність електропостачання ДСП, а також на 38% зменшується усталене відхилення напруги мережі $\delta U\%$ з 1.542% до 0.947%. Завдяки використанню спеціальних рішень для тиристорного регулювання струмів шунтового реактора статичного регульованого джерела реактивної потужності і для магніто-тиристорного перетворювача напруги у колі живлення трифазної системи дуг у структурі дворівневої САК у процесі керування режимами сталеплавлення не тільки не отримано зростання коефіцієнта спотворення синусоїдності струмів електромережі (в одноконтурній САК на основі регулятора потужності дуг типу АРДГ жоден силовий тиристорний перетворювач не використовується), а призвело до зменшення його значен-

ня на 14%: з 0.0981 до 0.0835, тобто отримуваний при роботі дворівневої структури САК коефіцієнт спотворення синусоїдності струмів мережі визначається, в основному, нелінійними властивостями силового кола печі, в тому числі і нелінійними властивостями динамічних вольт-амперних характеристик дуг. Використання на локальному рівні швидкодіючої підсистеми якісної стабілізації реактивної потужності печі дало змогу у порівнянні з роботою одноконтурної САК (регулятор типу АРДГ) зменшити дисперсію струмів дуг у 30..40 разів. Комплексне підвищення динамічної точності регулювання координат ЕР на локальному рівні призвело також до зменшення дисперсії напруги електромережі у 4.5-5.0 разів, а дози флікера – 5.5-6.0 разів.

Ефективніше, як показали результати досліджень, відпрацьовуються у дворівневій структурі САК і екстремальні збурення електричного режиму - експлуатаційні короткі замикання і обриви дуг: амплітуди фронту наростання та наступного спадання напруги електромережі при відпрацьованні обриву дуг є в 2-4 рази менші за значення цих амплітуд при функціонуванні одноконтурної САК дугової печі, а відпрацьовання експлуатаційних к.з. двоконтурною САК практично не викликає зміни напруги електромережі, тоді як процес відпрацьовання режимів експлуатаційних к.з. регулятором типу АРДГ супроводжується зниженням напруги мережі на 1.2-1.8% відносно робочого значення.

Наведені результати досліджень дають підставу стверджувати, що за використання розробленої дворівневої структури САК режимом споживання реактивної потужності електротехнологічного комплексу у порівнянні з регулятором потужності типу АРДГ досягнуто комплексного і суттєвого поліпшення практично всіх показників електротехнологічної ефективності та електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електромережі з одночасним покращанням ряду екологічних факторів, зокрема зменшуються рівень шуму, вібрації, викиди в атмосферу шкідливих сполук за рахунок перш за все якісної струмів дуг та точного дотримання температурного режиму у плавильному просторі печі.

Висновки.

1. Використання комплексного системного підходу при розробленні системних, схемних та алгоритмічних рішень для багатокритеріальної оптимізації режимів сталеплавлення в дугових печах трифазного струму дало змогу на платформі сучасної тенденції інтенсифікації процесу сталеплавлення відчутно підвищити електротехнологічну ефективність керування цим процесом та значно покращити показники електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електропостачальної системи.

2. У результаті практичного використання розроблених системних, схемних та алгоритмічних рішень, а також методів синтезу багатокритеріального оптимального керування при модернізації діючих та проектуванні нових дугових сталеплавильних печей трифазного струму ці печі набувають властивостей швидкодіючого регулювання струмів та потужностей дуг, екологічності режимів, раціонального використання електродійної продукції та мінімізації негативного впливу на стабільність напруги на шині живлення ДСП, які властиві дуговим сталеплавильним печам постійного струму з одночасним збереженням переваг ДСП трифазного струму як оптимального з огляду конструктивних рішень та надійності електротехнологічного агрегату, що отримуються при відносно незначних капіталовкладеннях. Як показали результати розрахунків, термін окупності капіталовк-

ладень не перевищує 0.5-1.0-1.5 роки для дугових печей малої, середньої та великої потужності відповідно.

3. Запропоновані рішення для оперативного синтезу доцільних ШЗХ печі, методи синтезу багатокритеріального адаптивного оптимального керування, принципи та схемні рішення для швидкодіяного регулювання координат електричного режиму, а також для ідентифікації технологічних стадій плавлення є вагомим вкладом у теорію та практику оптимального адаптивного керування режимами електросталеплавлення в ДСП трифазного струму. Доведена ефективність реалізації сучасної світової тенденції інтенсифікації процесу сталеплавлення на платформі запропонованих рішень диктує перспективність та доцільність їх широкого впровадження на ДСП різної тоннажності.

Література.

1. Восьмая международная конф. по электрометаллургии стали // Электрометаллургия. – 2005. - № 2. - С.36-43.
2. Ситуаційне керування в дугових сталеплавильних печах: Монографія / Л.Д. Костинюк, А.О. Лозинський, О.Ю. Лозинський, А.В. Маляр, Я.Ю. Марущак, Я.С. Паранчук, В.Я. Перевознюк, Я.Б. Сметанюк; За ред. О.Ю. Лозинського, Я.Ю. Марущака. – Львів: Видавництво НУ “Львівська політехніка”, 2004. – 382 с.
3. Андрианова А.Я., Едемский В.М. Про деякі властивості електричних кіл з дугами і керування ними // ЕЛЕКТРОінформ.- Львів. - №2, 2002.- С.17-18.
4. М.Бедин, М.Романо. Дуговая печь с питанием через насыщающийся реактор // Электрометаллургия. – 2004. - №4. - С.15-20.
5. Патент №52813. Україна. Статичне регульоване джерело реактивної потужності для трифазних мереж/ О.Ю.Лозинський А.О.Лозинський, Я.С.Паранчук, Р.Я.Паранчук.- Опубл 15.01.03.- Бюл. №1.
6. Паранчук Я.С., Лозинський А.О. Параметричний синтез електромеханічного контуру двоконтурної САР електричного режиму дугової печі з адаптацією до зовнішніх характеристик // Вісник Східноукраїнського національного університету ім.В.Даля. - 2003. - №6(64). - С.138-145.
7. Лозинський А.О., Паранчук Я.С. Застосування регуляторів, побудованих на основі правил нечіткої логіки у системах зі змінними параметрами // Актуальні проблеми теоретичної електротехніки: Наука і дидактика. Польща (Словіна). - 2000. - С.93-94.
8. Лозинський А.О., Паранчук Я.С. Оптимізація режимів компенсації реактивної потужності ДСП з використанням методу генетичного алгоритму // Теоретична електротехніка. - 2002. - Вип. 56. - С.81-86.
9. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С. Адаптивна стохастична система регулювання струмів дуг дугової сталеплавильної печі // Вісник НУ “ЛП” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. - 2000. - №400. - С. 92-99.
10. Паранчук Я.С., Лозинський А.О. Оптимізація системи регулювання струмів дуг ДСП на основі принципів нечіткої логіки // Матеріали 7-ої Міжнародної конф. з управління “Автоматика-2000”. – Львів, 2000. - С.67-72.
11. A New Control Strategy for Reducing Flicker of Electric Arc Furnace. – http://www.industry.siemens.de/metals-mining/de/about_us/broschueren_metals.htm/2003-09-01_142057/Anewcontrolstrategy...pdf.
12. Паранчук Я.С. Використання експертних оцінок при багатокритеріальній оптимізації режимів дугової сталеплавильної печі // Вісник НТУ “ХП”. Зб. наук. праць “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. - Харків: НТУ “ХП”, 2003. - №10. - Т.2. - С.490-492.
13. Паранчук Я.С. Теоретичні засади синтезу оптимального керування режимом електроспоживання дугової сталеплавильної печі за декількома критеріями // Вісник Вінницького політехн. ін-ту. - 2003. - №6. - С.52-59.
14. Паранчук Я.С. Стабілізація процесу електроперетворення у плавильному просторі дугової сталеплавильної печі // Вісник НУ “ЛП” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. - 2003. - №479. - С.141-150.
15. Лозинський О.Ю., Марущак Я.Ю., Паранчук Я.С., Уханська Д.В. Стабілізація потужності дуг в електродугових печах за допомогою гіперболічного закону керування струмом дуги // Научные труды Кременчугского ГПУ “Проблемы создания новых машин и технологий”. - 2001. - Выпуск 1/2001 (10). - С.193–197.
16. Паранчук Я.С. Дослідження дворівневої системи компенсації реактивної потужності в мережах з ДСП // Технічна електродинаміка. “Силова електроніка та енергоефективність”. - Ч.2. - 2004. - С.73-78.
17. Паранчук Я.С. Оптимізація двоконтурної системи керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі за критерієм мінімуму питомих витрат електроенергії // Український міжвід. наук.-техн. збірник “Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні”. – 2003. - Выпуск №37. - С.15-20.
18. Паранчук Я.С. Дослідження коефіцієнта асиметрії навантаження двоконтурної САР електричного режиму дугової сталеплавильної печі // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка, автоматизація. – Донецьк: ДНТУ, 2002. – Вип. 48. - С.101-110.
19. Патент №2238616. Россия. Устройство для регулирования электрического режима дуговой многофазной электропечи / О.Ю. Лозинский, А.О. Лозинский, Я.С. Паранчук, Р.Я. Паранчук. - Опубл. 20.10.2004. - Бюл. №29.
20. Паранчук Я.С. Стабілізація режимних координат ДСП з використанням зонного керування // Вісник НТУ “ХП” “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. - 2001. - №10. - С.254-256.
21. Лозинський А.О., Паранчук Я.С., Гайдучок Ю.Р. Розрахунок оптимальних уставок регулятора потужності ДСП методом генетичного алгоритму // Труды Одесского политехнического университета: Научный и произв.-практ. сборник. – 2001. - Вып. 4 (16). - С.67-69.
22. Лозинський А.О., Паранчук Я.С., Лізанець В.В. Самоорганізовані карти Кохонена для ідентифікації технологічних стадій плавлення в ДСП // Електромашинобудування та електрообладнання. – Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика”. – Вип. № 66. – 2006. – С.382-383.
23. Лозинський А.О., Паранчук Я.С., Лізанець В.В. Аналіз форми струмів дугової сталеплавильної печі на основі wavelet-перетворення // Вісник Хмельницького національного університету. - 2007, №2, Т2. С.65-68.
24. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Лозинський А.О., Марущак Я.Ю. Математична модель системи живлення та регулювання режимів електротехнологічного комплексу ДСП-ЕПМ // Науковий вісник Національного гірничого університету “Енергетика та автоматика”. - 2004. - №3. - С.8-15.