

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ПЛАВЛЕННЯ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

**Вступ.** Проблема комплексного підвищення показників електротехнологічної ефективності виплавлення сталей в дугових сталеплавильних печах (ДСП) є пріоритетною для електromеталургійної галузі України. Ефективним напрямом вирішення цієї проблеми є автоматизація та оптимізація керування електричним режимом, що дасть змогу скоротити електричні і теплові витрати, а, значить, зменшить питомі витрати електроенергії і собівартість електросталей за незмінної чи вищої продуктивності печі. Дієвість практичного використання вказаних напрямків у значній мірі визначається також і якістю регулювання координат електричного режиму (ЕР). Тому акценти при розроблюванні рішень з автоматизації та оптимізації режимів і стабілізації координат для конкретної ДСП повинні ґрунтуватися на результатах комплексного моніторингу її режимів плавлення.

**Постановка задач дослідження.** Для отримання таких результатів необхідним є виконання експериментальних досліджень координат режимів плавлення, що полягають у проведенні цифрової реєстрації координат упродовж плавки і наступним статистичним опрацюванням сформованих файлів даних. Отримані дані слугуватимуть не лише для аналізу режимів і формування напрямків автоматизації та стратегій оптимізації але і для проектування системи автоматичного керування (САК) і регулювання (САР) координат електричного режиму (ЕР).

**Аналіз стану проблеми.** Дослідження у вказаному напрямку повинні виконуватися для конкретної ДСП з метою отримання інтегральних показників роботи і якості регулювання координат в робочих та екстремальних режимах [1], у тому числі і на цифрових моделях їх режимів [2]. Наведені у цих і інших роботах дані отримувалися лише межах, що необхідні розв'язування конкретних (часткових) задач керування чи регулювання.

**Метою дослідження** є розроблення методики і математичних моделей для розрахунку інтегральних показників статистики, динаміки і електротехнологічної ефективності роботи дугової печі, що необхідні для проведення аналізу САК і САР режимів плавлення, а також для проектування регуляторів режимних координат процесу плавлення, у тому і числі і інтелектуальних: для формування навчальної і тестової вибірки даних при проектуванні нейрорегуляторів чи обґрунтуванні функцій належності і бази правил нечітких регуляторів режимних координат процесу плавлення тощо.

**Виклад основного матеріалу.** У переважній більшості синтез керуючих впливів режимами плавлення в ДСП реалізується на основі детермінованих моделей, за якого складові вектора керування синтезуються апріорно за результатами аналізу показників ефективності і характеристик збурень в досліджених типових плавках. На основі цих керуючих впливів складають типові директивні графіки плавлення певних марок сталей чи сплавів, які реалізуються по ходу сталеплавлення у функції зміни технологічних стадій, що визначаються (розпізнаються) технологом чи сталеваром на основі оперативної інформації про хід технологічного процесу: температури і фізико-хімічного стану шихти і розплаву, спожитої електроенергії тощо. Ефективність прийнятих рішень на керування режимами плавлення за такого підходу у значній мірі визначається кваліфікацією, досвідом і інтуїцією обслуговуючого персоналу і тому фактор суб'єктивності є присутній.

Зазначені чинники за умов дії стохастичних нестационарних збурень в об'єкті керування – силовому колі ДСП, і використанні детермінованих моделей синтезу вектора керування унеможливають реалізацію чи значно знижують ефективність оптимальних стратегій керування. Тому у такій ситуації доцільним видається використання інтелектуальних методів керування. Зокрема процедури розпізнавання технологічних стадій плавлення і ідентифікації моментів їх зміни та оперативного синтезу вектора керування доцільно виконувати на основі використання штучної нейронної мережі. За цих же причин ефективне регулювання координат ЕР в електромеханічних САР переміщення електродів можна отримати за використання нейромережових чи фаззи регуляторів.

Для практичного впровадження окресленої вище стратегії синтезу і реалізації оптимального керування розроблено методику і проведено цифрову реєстрацію процесів зміни струмів дуг та напруг на дугах і елементах короткої мережі дугової печі ДСП-3 і ДСП-0.5 НВО «Розліт» і виконано їх статистичне опрацювання. Опрацьовувалися файли даних, у кожному з яких зберігалися оцифровані значення струмів і напруг силового кола дугової печі на послідовних 10 секундних інтервалах. Дискретизація виконана з частотою 2 кГц. Розраховувалися показники якості регулювання та інтегральні значення (математичні сподівання та дисперсії) процесів зміни координат ЕР: струмів дуг, напруг дуг, потужності дуг, реактивної потужності печі, потужності електричних втрат в елементах короткої мережі, а також техніко-економічних показників, а саме питомих витрат електроенергії, питомої продуктивності печі на кожному часовому інтервалі тривалістю  $T = 10\text{с}$ .

Усереднені на періоді  $T_{50} = 0.02\text{с}$  значення струмів дуг і напруг на дугах та елементах короткої мережі до вихідних шин трансформатора на низькій стороні та їх математичні сподівання на кожному  $n$ -у інтервалі  $\Delta t = 10\text{с}$   $n=1..M$  ( $M=500-750$  – кількість сформованих файлів даних на інтервалі плавки) обчислювалися за такими виразами:

$$I_{\partial m,j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{i,m,j}^2}; \quad U_{jm,j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{i,m,j}^2}; \quad \bar{I}_{\partial n,j} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{500} I_{\partial m,n,j}; \quad \bar{U}_{\partial n,j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^{500} U_{\partial m,n,j}^2} \quad (1)$$

Дисперсії струмів  $D_{I_{\partial j,n}}$  дуг та напруг  $D_{U_{j,n}}$  на дугах та елементах короткої мережі до нерухокої точки гнучких шинопроводів на  $n$ -у інтервалі  $\Delta t = 10\text{с}$   $n=1..M$ ,  $M=500-750$  розраховувалися за такими формулами:

$$D_{I_{\partial n,j}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^{500} (\bar{I}_{\partial n,j} - I_{\partial m,n,j})^2}; \quad D_{U_{n,j}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^{500} (\bar{U}_{\partial n,j} - U_{\partial m,n,j})^2}, \quad (2)$$

де  $n=1..(500-700)$  – номер періоду  $T_{50} = 0.02\text{с}$  на кожному інтервалі  $\Delta t = 10\text{с}$  отриманих файлів даних.

На рис.1 показано розраховані процеси зміни усереднених на інтервалах  $\Delta t_n = 10\text{с}$  діючих значень струмів дуг  $\bar{I}_{\partial k,A}$  та напруг  $\bar{U}_{\partial k,A}$  ( $k=300, \dots, 600$ ) на інтервалі закінчення стадії розплавлення шихти.

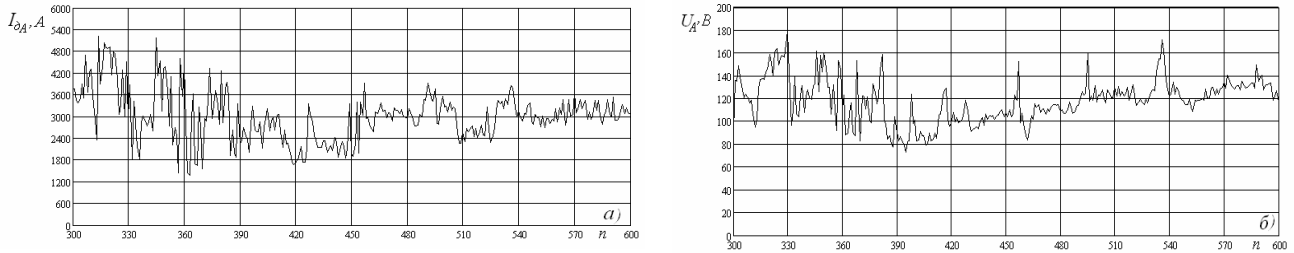


Рис.1. Часові залежності усереднених діючих значень струмів  $\bar{I}_{\partial k,A}$  а) і напруг  $\bar{U}_{\partial k,A}$  б) фази А

Потужність електричних втрат в елементах короткої мережі  $P_{ев}$ , потужність дуг  $P_{\partial}$  і реактивна потужність  $Q$  у кожній  $j$ -й фазі ДСП розраховувалася за такими лінійними моделями:

$$P_{ев n,j} = I_{\partial n,j}^2 \cdot r; \quad Q_{n,j} = I_{\partial n,j}^2 \cdot x; \quad P_{\partial n,j} = I_{\partial n,j} \cdot U_{\partial n,j}, \quad (3)$$

де  $r$  і  $x$  – еквівалентний сумарний активний і реактивний опір елементів короткої мережі (КМ) ДСП відповідно.

На рис.2 і 3 показано розраховані за моделями (3) залежності потужності електричних втрат  $P_{ев n,A}$ , потужності дуг  $P_{\partial n,j}$  і реактивна потужність  $Q_{n,j}$  короткої мережі дугової сталеплавильної печі ДСП-3 НВО «Розліт» для однієї з досліджених плавок на інтервалі закінчення розплавлення шихти.

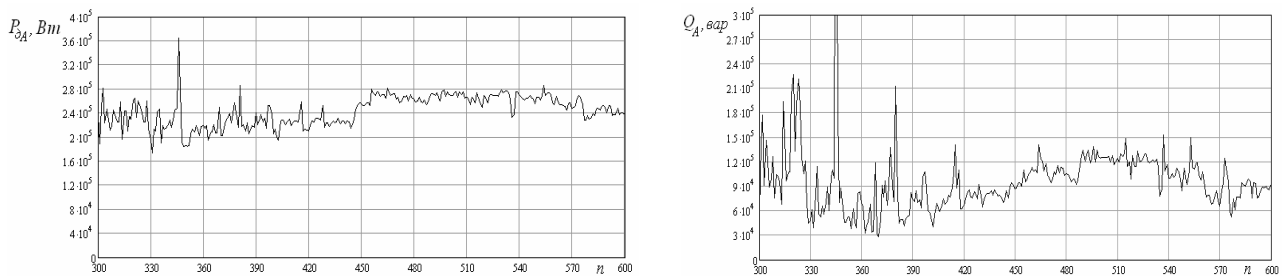


Рис.2. Часові залежності потужності дуг  $P_{\partial n,j}$  та реактивної потужності печі  $Q_{n,j}$  фази А дугової печі ДСП-3

Питомі витрати електроенергії  $W_n$ , питома продуктивність печі  $G_n$  та електричний ккд  $\eta_n$  розраховувались за такими залежностями:

$$W_n = \frac{340 \cdot (P_{\partial n,\Sigma} + P_{ев n,\Sigma})}{P_{\partial n,\Sigma} - P_{тв}}; \quad G_n = (P_{\partial n,\Sigma} - P_{тв})/340; \quad \eta_n = \frac{P_{\partial n,\Sigma} - P_{тв}}{P_{\partial n,\Sigma} + P_{ев n,\Sigma}} \quad (4)$$

де  $P_{\partial \Sigma}$ ,  $P_{ев \Sigma}$ ,  $P_{тв}$  - сумарна у трьох фазах потужність дуг, сумарна потужність електричних витрат і потужність теплових втрат дугової печі на певній стадії плавлення.

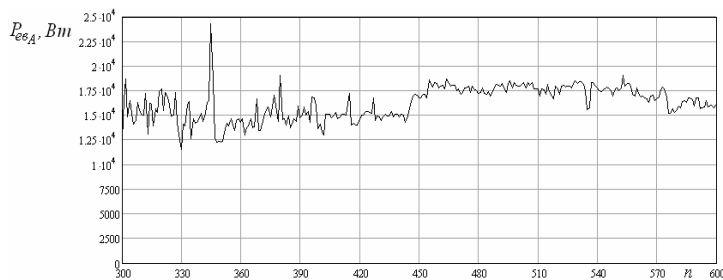


Рис. 3. Часові залежності потужності електричних витрат  $P_{ев n,A}$  фази А на стадії розплавлення шихти

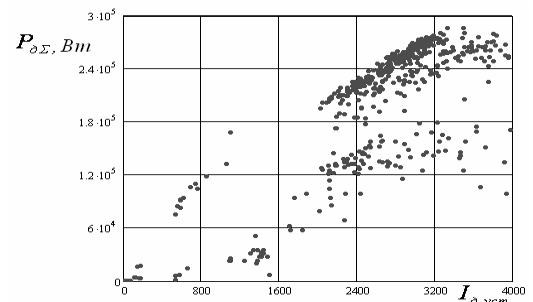


Рис. 4. Залежності потужності дуг від уставок за струмом  $I_{\partial усг}$  на повному інтервалі плавки

Під час цифрової реєстрації процесів зміни струмів та напруг, на кожній технологічній стадії одночасно проводилися активні експерименти з дослідження ефективності впливу на техніко-економічні показники роботи ДСП уставок за струмами дуг електромеханічного регулятора АРДМ-М, що використовується на печі ДСП-3 НВО «Розліт». Для цього на кожній технологічній стадії плавлення встановлювалася робота ДСП на інтервалах  $T=30\text{с}$  з різними уставками за струмами дуг  $I_{д,уст,к}$ ,  $k=10, 12, 14, 16, 18$  за незмінної ступені  $U_{2ф}$  ПТ.

З отриманими результатами цифрової реєстрації для кожного з цих інтервалів  $T=30\text{с}$ , тобто для кожної уставки  $I_{д,уст,к}$ , розраховано інтегральні значення техніко-економічних показників ДСП (рис.4). На основі аналізу розрахованих значень техніко-економічних показників отримано інформацію про ефективність впливу на їх значення уставок регулятора потужності дуг за струмом, зокрема і ефективність реалізації директивного графіка плавлення, що використовується на цій печі. Отримані на цьому етапі результати, тобто відповідні кожній уставці за струмами дуг на кожній технологічній стадії плавлення значення інтегральних техніко-економічних показників ДСП і параметри стохастичних характеристик процесів зміни струмів і напруг дуг, складають основу для формування навчальних і тестових наборів даних для виконання процедури навчання і тестування нейронної мережі. Ця НМ призначена для оперативного синтезу оптимальних уставок регулятора потужності дуг АРДМ-М за струмом дуги у відповідності з поставленим на кожну плавку чи технологічну стадію за критерієм оптимальності.

У таблиці 1 зведено інтегральні значення деяких з отриманих показників електротехнологічної ефективності роботи печі ДСП-3 НВО «Розліт» на етапі закінчення розплавлення шихти за різних уставок за струмом дуги  $I_{д,уст,к}$  для одної з досліджених плавок.

Показники електротехнологічної ефективності роботи печі ДСП-3 НВО «Розліт» Таблиця 1

Стадія і номер уставки за струмом дуги $I_{д,уст,к}$	Питомі витрати електроенергії, W, кВт год/т	Потужність дуги, $P_{д}$ , кВт	Потужність електричних втрат, $P_{ев}$ , кВт
Проплавлення колодязів	10	802.0	29.6
	12	792.6	32.0
	14	774.5	38.2
	16	791.2	45.2
	18	797.2	59.4
Обвали шихти	10	800.2	28.6
	12	787.1	30.5
	14	774.5	37.0
	16	775.0	43.0
Окислення розплаву	18	785.1	56.5
	10	789.2	27.5
	12	775.1	28.5
	14	755.0	35.0
	16	768.3	39.5
18	790.2	48.3	

Отримані і наведені вище результати експериментальних досліджень та інтегральні значення показників електротехнологічної ефективності слугують вихідними даними для проектування фаззи регуляторів чи регуляторів координат електричного режиму на основі нейронної мережі. Зокрема наведені в табл.1 дані доцільно використовувати для отримання аналітичних виразів для розрахунку керуючого впливу на виході нечіткого регулятора при різних функціях приналежності термів вхідних лінгвістичних змінних, а при проектуванні нейрорегуляторів – для формування навчальних і тестових наборів даних.

**Висновки.** Обґрунтовано доцільність модернізації існуючих САК режимами плавлення та САР координат електричного режиму в дугових печах з метою реалізації стратегій оптимального керування та регулювання координат, а також для оперативної адаптації вектора керування системи та сигналу регулювання довжин дуг до зміни стохастичних характеристик збурень і параметрів елементів КМ ДСП. Запропоновано моделі статистичного опрацювання результатів експериментальних досліджень дугової печі в робочих та екстремальних режимах роботи з метою отримання показників електротехнологічної ефективності керування та якості регулювання координат ЕР. Аналіз отриманих експериментальних даних показав шляхи удосконалення існуючих САК і САР у напрямку отримання узагальнених моделей синтезу екстремального керування показниками електротехнологічної ефективності та якісної стабілізації координат ЕР ДСП.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Уханська Д.В. Система автономного пофазного регулювання координат електричного режиму дугової сталеплавильної печі // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників - 2006». – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – С.142-150.
2. Паранчук Я.С. Дослідження електричної ефективності двоконтурної системи керування режимами дугової сталеплавильної печі // Респ. наук.-техн. журнал «Електромашинобудування та електрообладнання». - Київ: Техніка, 2003. - Випуск. №61. - С.17-24.
3. Gostev V.I. The new method of designing jf one class of the fuzzy controllers // Электроника и связь. – 2007. –№ 2. – С.54-59.