

вальних пристроїв додати коефіцієнти реактивної потужності та гармонічного спотворення форми вхідного струму.

1. Маевский О. А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с. 2. Супрунович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с. 3. Полупроводниковые выпрямители // Е.И. Беркович, А.И. Боровой, В.М. Венделанд и др. – М.: Энергия, 1967. – 480 с. 4. Rashid M.H. Power electronics: circuits, devices, and applications. – New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 5. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 248 с.

УДК 519.6, 621.365

В.В. Лізанець, Я.С. Паранчук

Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМІВ ТА НАПРУГ ДУГ ДЛЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СТАДІЙ ПЛАВЛЕННЯ В ДСП

© Лізанець В.В., Паранчук Я.С., 2007

Розроблено структуру, алгоритм функціонування та математичну модель струмів та напруг дуг для підсистеми інформаційного забезпечення нейромережевої системи розпізнавання технологічних стадій плавлення в дуговій сталеплавильній печі.

A structure, algorithm of functioning and mathematical model of currents and tensions of arcs, is developed for the subsystem of the informative providing of the neuron system of recognition of technological stages of melting in an arc steel-smelting furnace.

Постановка проблеми. Проблема підвищення електротехнологічної ефективності керування режимами дугових сталеплавильних печей (ДСП) трифазного струму диктується необхідністю поліпшення техніко-економічних показників роботи цих установок, поліпшення показників електромагнітної сумісності режимів ДСП та електропостачальної системи, а також підвищення якісних показників електросталей. При цьому як першочерговим постає завдання розроблення високоефективних рішень, скерованих на зниження питомих витрат електроенергії та зменшення негативного впливу роботи дугової печі на показники якості електроенергії на шинах живлення дугової печі. Одним із шляхів успішного розв’язання окресленого вище завдання є синтез та реалізація адаптивного оптимального керування згідно з окремими частковими критеріями оптимальності чи відповідного до поставленого завдання оптимального керування узагальненого функціоналу мети.

Аналіз останніх досліджень. Реалізація названого способу підвищення електротехнологічної ефективності керування режимами електросталеплавлення в ДСП вимагає передусім розв’язання підзавдання автоматизованого розпізнавання технологічних стадій електросталеплавлення та моментів їх зміни. У роботі [1] описано теоретичні основи та алгоритм функціонування автоматизованої системи розпізнавання технологічних стадій плавлення в ДСП, що ґрунтується на Баєвській стратегії перевірки гіпотез. Інформаційне забезпечення цієї системи реалізоване на аналоговій елементній базі. Аналіз ефективності роботи останньої на діючих печах ДСП-100НЗА показав деякі її недоліки, що полягають насамперед у складній процедурі оперативного

переналадження аналогових фільтрів для отримання високої точності розпізнавання стадій плавлення різних марок сталі під час завантаження різних типів шихти, способів її укладання тощо. У разі зміни вказаних зовнішніх збуджуючих впливів необхідним є також зміна параметрів апріорних законів розподілу ймовірності інформативних параметрів. Зазначені причини, а також інші, ставлять актуальним завдання реалізації автоматизованої системи розпізнавання на інших теоретичних засадах, функціональні можливості і принципи яких, відповідали б стохастичній моделі процесів, що відбуваються в силовому колі плавильного простору печі, а також для оперативної адаптації до змінюваних стохастичних характеристик інформативних параметрів на всьому інтервалі плавки, зокрема на основі використання інтелектуальних принципів керування.

Постановка задачі та мета дослідження. Одним із доцільних і ефективних підходів для реалізації вище поставленого завдання, на наш погляд, є використання теорії штучних нейронних мереж як концептуальної засади для функціонування автоматизованої системи розпізнавання технологічних стадій плавлення в ДСП і моментів їх зміни. Для функціонування такої штучної нейронної мережі необхідним передусім є розроблення схемних та програмних рішень для підсистеми інформаційного забезпечення з метою формування на її виході вектора інформативних параметрів \vec{X} . Зважаючи на це, як першочергове, постає завдання обґрунтування та розроблення методу аналізу інтегральних інформативних параметрів форми струмів та напруг дуг, що оперативно реалізується у сталеплавленні.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 показано розроблену функціональну блок-схему підсистеми інформаційного забезпечення для розпізнавання технологічних стадій сталеплавлення.

Вхідною інформацією для підсистеми інформаційного забезпечення є вихідні сигнали вимірювальних трансформаторів струму та напруги, які одночасно є вхідними сигналами фазних каналів регулятора потужності дуг, що використовується на дуговій печі.

Для цифрової реєстрації миттєвих значень сигналів струмів та напруг дуг, що формуються на виході БГРНО, і змінюються в діапазоні $\pm 5\text{В}$, використано плату ADA1292. Ця плата призначена для перетворення аналогових сигналів струмів та напруг дуг у цифрову форму (паралельний 12-розрядний двійковий код) і подавання їх на шину персонального IBM сумісного комп'ютера. Плата ADA1292 виконана в стандарті IBM PC AT і встановлюється у будь-який вільний роз'єм типу ISA на материнській платі комп'ютера. Плата ADA1292 є функціонально повним комплексом, яка включає в себе багатоканальний 12-розрядний АЦП із можливістю програмування діапазону зміни вхідного сигналу $\pm 10\text{В}$ чи $\pm 5\text{В}$ й частоти перетворення (до 200кГц при використанні одного каналу). У цьому застосуванні аналогово-цифровий перетворювач налаштований на введення інформації по семи диференціальних каналах: трьох сигналів струмів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ дуг, трьох сигналів напруг $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$ дуг та сигналу спожитої активної енергії.

Для керування процесом цифрової реєстрації миттєвих значень струмів та напруг дуг, значень спожитої активної енергії, розроблено відповідний алгоритм, блок-схема якого показана на рис. 2.

Алгоритм передбачає багаторазове виконання на часових інтервалах $T=1\text{с}$ послідовності наступних дій. Блок 1 – формування файла даних з номером N; блок 2 – присвоєння значень змінним: i – кількість точок сигналу, m – маска для розпізнавання 7-го біта, який інформує про закінчення процесу оцифрування сигналу ($m = 1000000\text{b}$); блок 3 – ідентифікація моменту закінчення реєстрації на інтервалі $T = 1\text{с}$; блок 4 – присвоєння значень змінним: rule – керуюче слово, яке складається з семи біт, що задає режими і канали опитування плати АЦП; блок 5 – перевірка кількості опитаних аналогових каналів (0-6); блок 6 – подача керуючого слова на плату АЦП; блоки 7–9 – реалізація алгоритму часової затримки; блок 10 – програмний запуск АЦП; блоки 11–15 – контроль 7-го біта в комірці з адресою 0300h для ідентифікації моменту закінчення перетворення аналогового сигналу в цифровий код; блоки 16–18 – отримання оцифрованого значення вхідного сигналу та вивід його у файл даних із номером N; блок 19 – зміна керуючого

слова для перемикавання каналу введення сигналу; блок 20 – перехід до введення наступних точок вхідних сигналів.

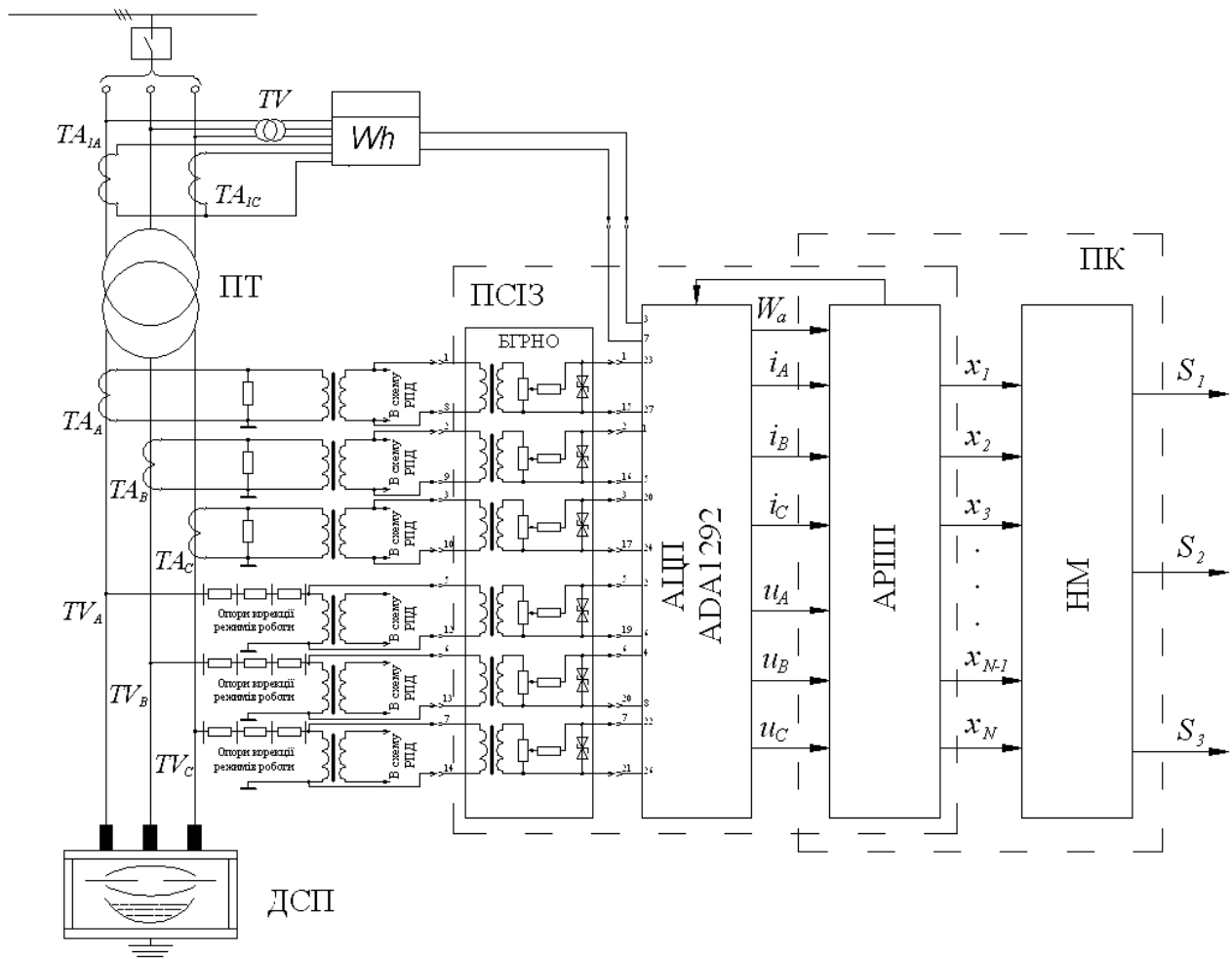


Рис. 1. Функціональна блок-схема підсистеми інформаційного забезпечення у структурі нейромережової системи розпізнавання технологічних стадій плавлення в ДСП: РПД – регулятор потужності дуг; ПТ – пічний трансформатор; ПСІЗ – підсистема інформаційного забезпечення; БГРНО – блок гальванічної розв’язки, нормування та обмеження; АРПІ – алгоритм розрахунку інтегральних інформаційних параметрів; НМ – нейромережа; TA_{1A} , TA_{1C} , TA_A , TA_B , TA_C , TV_A , TV_B , TV_C , TV – вимірювальні трансформатори струму та напруги; i_A , i_B , i_C , u_A , u_B , u_C , W_a – оцифровані значення струмів та напруг дуг ДСП, спожита активна енергія; x_1 , x_2 , x_3 , ... x_{N-1} , x_N – елементи вектора інформативних параметрів; S_1 , S_2 , S_3 – виходи нейромережі, що подають інформацію про наявність однієї із трьох стадій плавлення в ДСП

Реалізацію розробленого алгоритму виконано у середовищі програмування C++.

Внаслідок виконання описаного алгоритму, на кожному з інтервалів $T=1c$, формуються файли даних, що складаються із 2501 записів, кожен з яких має сім полів, у яких записано миттєві значення струмів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ та напруг $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$ дуг на i -му кроці цифрової реєстрації ($i \in [0, 2500]$), а також значення спожитої від початку поточної стадії активної енергії.

У результаті опрацювання за відповідним алгоритмом інформації, що знаходиться у таких файлах даних, розраховуються поточні значення інформативних параметрів форми струмів та напруг дуг на j -му інтервалі $T=1c$ – циклічні компоненти із певним періодом повторення і достатньо гладким характером зміни. Кількісною характеристикою вказаних циклічних складових є енергія коливальних у вузькому діапазоні частот із центральною частотою, що відповідає частотам 1-ї, 2-ї, 3-ї,

4-ї, 5-ї, 7-ї та 9-ї гармонік, а також складові енергії коливань сигналів струмів та напруг дуг на діапазоні інфрагармонік, тобто в діапазоні частот 0.5–6 Гц. Окрім названих, як інформативні параметри обчислюється також діюче чи середньовипрямлене значення струмів I_d та напруг U_d дуг на кожному j -му інтервалі $T=1$ с. Розраховані значення інформативних параметрів – числові оцінки циклічних складових, середньовипрямлене чи діюче значення струмів та напруг дуг, зводяться (нормуються) до оцінки енергетичного спектра на частоті першої гармоніки.

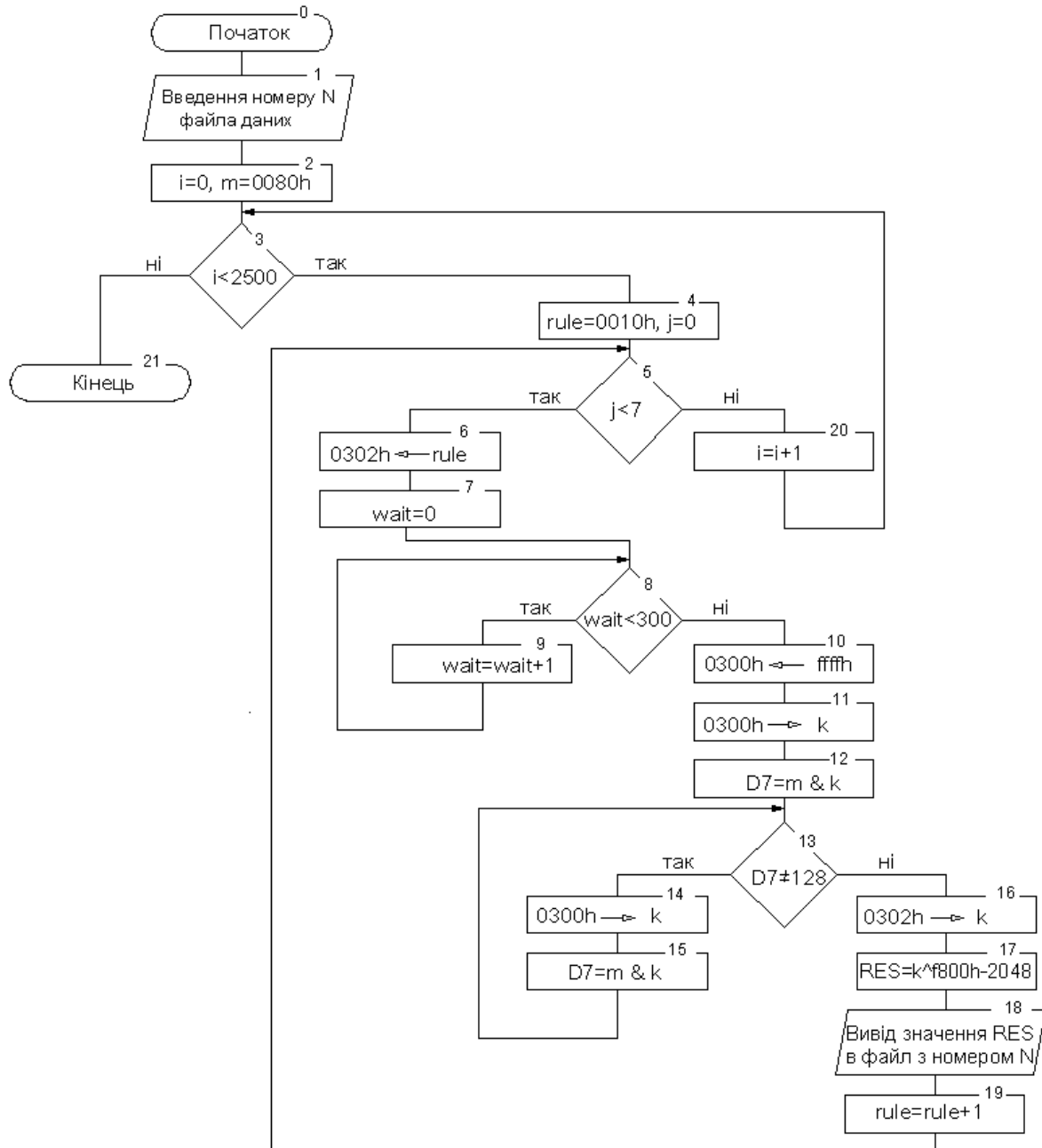


Рис. 2. Блок-схема алгоритму функціонування режимами цифрового реєстратора сигналів

Для числової оцінки енергетичного спектра запропоновано використання апарата швидкого wavelet-перетворення, що ґрунтується на принципі кратномасштабного аналізу. За його використання сигнали струмів та напруг дуг подають у вигляді сукупності їх послідовних наближень [2]. Такий підхід дає змогу аналізувати не весь частотний спектр сигналу, а концентрувати увагу лише на інформативних діапазонах частотного спектра. Наприклад, при аналізі низькочастотної ділянки спектра в діапазоні 0,5–6 Гц, числові оцінки якої є інформативними для розпізнавання стадій

плавлення, запропоновано розглядати огрублену версію сигналу (за яким оцінюються коефіцієнти wavelet-розкладу нижнього рівня), а для аналізу високочастотних складових сигналів $u_o(t)$, $i_o(t)$ – аналізувати уточнений сигнал (отримувати оцінки коефіцієнтів wavelet-розкладу верхніх рівнів деталізації).

Під час реалізації алгоритму швидкого wavelet-перетворення найчастіше використовують wavelet-функцію Добеші. Цю функцію прийнято нами як аналізуючий wavelet. В z -формі батьківський wavelet-Добеші записується так:

$$\Phi(z) = 2 \cdot \left(\frac{1+z}{2}\right)^p \cdot \left(\frac{1+z^{-1}}{2}\right)^p \sum_{k=0}^{p-1} \frac{(p+k-1)!}{k!(p-1)!} \cdot \left(\frac{1-z}{2}\right)^k \cdot \left(\frac{1-z^{-1}}{2}\right)^k, \quad (1)$$

де p – порядок wavelet-функції Добеші.

На основі використання такої явної форми wavelet-функції із заданим порядком p і отриманих її нулів $\Phi(z)=0$, розраховуються коефіцієнти батьківської wavelet-функції Добеші, які є значеннями при степенях z . Так для $p=4$ отримуємо: $h = [0.23, 0.715, 0.631, -0.028, -0.187, 0.031, 0.033, -0.011]$.

Для отримання коефіцієнтів материнської wavelet-функції Добеші, необхідно скористатись виразом:

$$g_k = (-1)^k \cdot h_{N-k}, \quad (2)$$

де $N=2p$ – кількість коефіцієнтів wavelet-функції Добеші.

Згідно з виразом (2) значення коефіцієнтів материнського wavelet-фільтра:

$$g = [-0.011, -0.033, 0.031, 0.187, -0.028, -0.631, 0.715, -0.23].$$

З використанням отриманих таким чином значень h_k та g_k ($k=1 \dots N$), які можна трактувати як імпульсний відгук wavelet-функції, реалізують процедуру швидкого прямого дискретного wavelet-перетворення сигналів струмів та напруг дуг на кожному j -му інтервалі $T=1$ с, а саме знаходять апроксимуючі та деталізуючі коефіцієнти wavelet-перетворення:

– апроксимуючі коефіцієнти на m -му рівні:

$$c_{m+1,i} = \sum_{k=1}^N h_k \cdot c_{m,2i+k}, \quad (3)$$

– деталізуючі коефіцієнти на m -му рівні:

$$d_{m+1,i} = \sum_{k=1}^N g_k \cdot c_{m,2i+k}, \quad (4)$$

де i – кількість відліків сигналу струму чи напруги дуги.

Сутність операцій, що виконуються за формулами (3) та (4), полягає ось у чому. На першому етапі перетворення перший цифровий фільтр з коефіцієнтами h_k із сигналу $s_k = c_{0,k}$ виділяє параметр спектра низьких частот $|\omega| \leq \pi/2$, а другий (октавний) фільтр з коефіцієнтами g_k виділяє параметр спектра верхніх частот $\pi/2 \leq |\omega| \leq \pi$. Оскільки на виході фільтра з коефіцієнтами h_k відсутня верхня половина частот, то частота дискретизації вихідного сигналу може бути зменшена в 2 рази, тобто виконана децимація вихідного сигналу, що і реалізовано у формулі (3) зсувами $(2i+k)$ через два відліки вхідного сигналу. Відповідно, на виході фільтра з коефіцієнтами g_k звільняється місце в області низьких частот, і аналогічне проріджування вихідного сигналу призводить до транспонування верхніх частот на звільнене місце. Отже, кожний з вихідних сигналів несе інформацію про свою половину частот, при цьому вихідна інформація подана такою самою кількістю відліків, що і вхідна.

Як показали результати досліджень, для деяких з wavelet-коефіцієнтів отримуються малі значення, що означає низьку енергетику сигналів струмів та напруг дуг на відповідних частотних смугах у сигналі. Тому ці коефіцієнти можна відкидати і не розраховувати, а обчислювати і приймати для аналізу лише ті коефіцієнти, смуга частот для яких є вагомою та інформативною.

На кожному інтервалі $T_c \in [30, 100]$ стаціонарності процесів $u_d(t)$, $i_d(t)$ розраховані поточні значення інформативних параметрів піддаються процедурі усереднення. На основі виконаних досліджень отримано, що реалізувати процедуру усереднення доцільно на основі розрахунку ковзного середнього, на основі методу експотенціального згладження чи обчислення середнього на основі поліномів. Ефективність цих методів залежить від їх налаштування. Зважаючи на те, що стохастичні характеристики процесів зміни струмів та напруг дуг істотно змінюються упродовж періоду плавки, то ефективність використання названих методів є неоднакова на різних стадіях плавки. Це вимагає їх комбінованого використання або перелаштування параметрів на інтервалі плавки, що вимагає додаткових досліджень стосовно кожної дугової печі.

Описана процедура усереднення поточних інформативних параметрів виконується для тих їх значень на інтервалі стаціонарності, які оцифровані на кожному j -му інтервалі $T=1c$, у яких існували нормальні режими горіння дуг у всіх трьох фазах, тобто були відсутні режими обривів дуг, коротких замикань чи безпосередньо близьких до них. Такі електричні режими названі інформативними, бо значення обчислюваних параметрів кривих струмів та напруг дуг у цих режимах найповніше корелюються із перебігом фізико-хімічних перетворень шихти та розплаву, тобто з технологічними стадіями. Ці електричні режими запропоновані ідентифікувати за значеннями напруг U_d на дугах: $U_d^l \leq U_d \leq U_d^h$, де U_d^l , U_d^h – граничні значення напруг на дугах, що обмежують інформативні електричні режими роботи дугової печі. Поточні значення інформативних параметрів форми струмів та напруг дуг, які виміряні у неінформативних електричних режимах, тобто в режимах обривів дуг, експлуатаційних коротких замикань та безпосередньо близьких до них, ігноруються (опускаються) і в процедурі усереднення не використовуються. Доцільність та коректність використання напруг на дугах для ідентифікації інформативних електричних режимів диктується тим, що напруга на дугах є незалежною координатою (на відміну від струмів дуг) і їх значення визначаються лише значенням довжин дуг l_d , градієнтом напруги на стовпі дуги β та анод-катодним падінням напруги α на дузі: $u_d = \alpha + \beta \cdot l_d$.

На основі отриманих таким чином процесів зміни усереднених значень інформативних параметрів, на кожному інтервалі стаціонарності процесів $u_d(t)$, $i_d(t)$ розраховуються їх інтегральні значення, а саме нормовані до першої гармоніки математичні сподівання складових енергетичного спектра сигналів струмів та напруг дуг, дисперсія діючого чи середньовипрямленого значення цих сигналів D_I^* , D_U^* , частотна характеристика процесу зміни діючого (середньовипрямленого) значення сигналів струмів та напруг дуг $I^*(t)$, $U^*(t)$ – число перетинів P_I , P_U цими сигналами, рівень їх усередненого значення на інтервалі стаціонарності, час кореляції τ_I , τ_U (час τ першої зміни знака автокореляційної функції $R_I(\tau)$, $R_U(\tau)$ процесів $I^*(t)$, $U^*(t)$).

Перелічені вище інтегральні інформативні параметри, що розраховуються на основі цифрової реєстрації сигналів струмів, напруг дуг та активної енергії, у загальному випадку складають вектор інформативних параметрів, що є вхідним вектором нейронної мережі розпізнавання технологічних стадій плавлення та ідентифікації моментів їх зміни на кожному k -му інтервалі стаціонарності процесів зміни напруг та струмів дуг $u_d(t)$, $i_d(t)$. На рис. 3 показано блок-схему алгоритму описаного процесу формування вектора інтегральних інформативних параметрів підсистемою інформаційного забезпечення.

Вектору інтегральних значень інформативних параметрів у загальному випадку властива певна інформаційна надлишковість. У кожному конкретному застосуванні, тобто при реалізації завдання автоматизованого розпізнавання технологічних стадій у процесі електросталеплавлення на дуговій печі певного типорозміру, на основі аналізу рівня інформаційності кожного з перелічених вище елементів вектора інтегральних значень інформативних параметрів визначаються, зокрема на основі аналізу характеристик законів розподілу цих параметрів для кожної з технологічних стадій чи періодів сталеплавлення, виокремлюються ті з них, що мають найтісніший кореляційний зв'язок з перебігом фізико-хімічних перетворень шихти та розплаву, і ті з них, яким властивий доволі розмитий функціональний зв'язок зі зміною технологічних стадій. Останні доцільно вилучати зі

складу елементів вектора інформативних параметрів процесу електросталеплавлення. Це дещо спростить та пришвидшить як процедуру навчання (тренування) і тестування, так і процедуру розпізнавання технологічних стадій при функціонуванні навченої нейронної мережі.

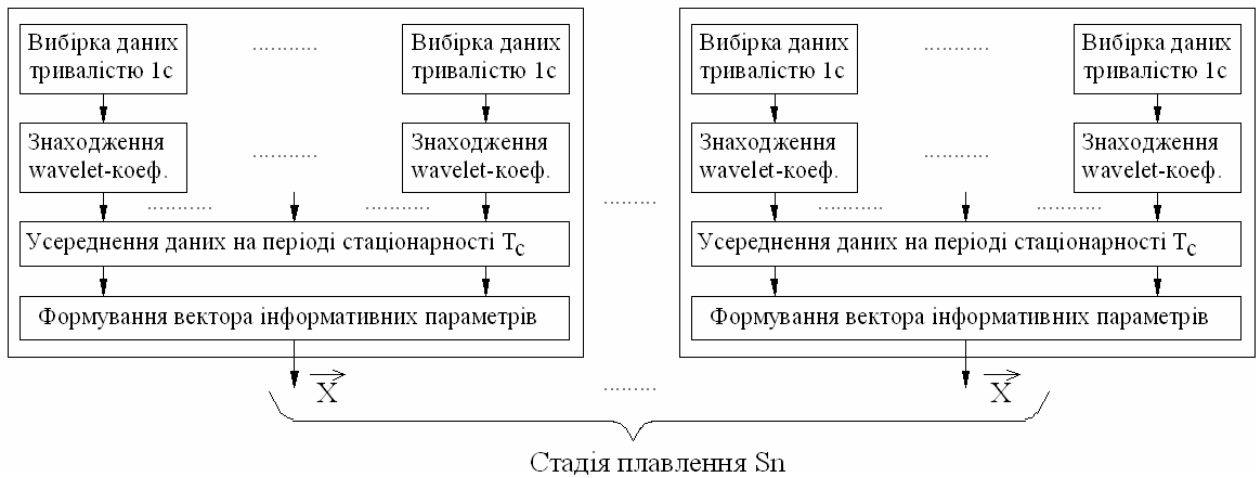


Рис. 3. Блок-схема алгоритму функціонування підсистеми інформаційного забезпечення у структурі нейромережної системи розпізнавання технологічних стадій плавлення сталі в ДСП

Одним із можливих типів нейромереж, які можуть розпізнавати моменти зміни стадій плавлення на основі вектора інформативних параметрів, є нейромережа Кохонена [3]. Основна її перевага та особливості – це можливість самоорганізації у результаті конкурентного навчання за алгоритмом Кохонена (рис. 4).

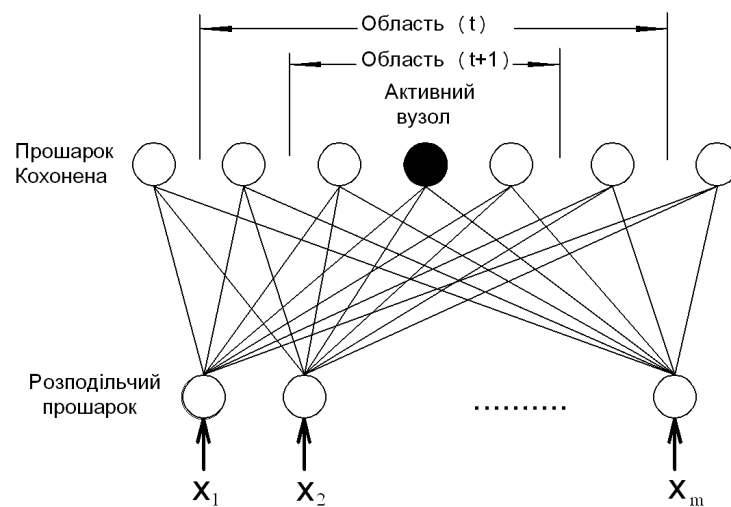


Рис. 4. Архітектура нейромережі з прошарком Кохонена для ідентифікації моментів зміни стадій плавлення сталі в ДСП

Зображена на рис. 4 нейронна мережа являє собою дворівневу самоорганізуючу карту Кохонена (SOFM – self-organizing feature map). Вузли розподільчого прошарку отримують вхідні дані, що подаються вектором інформативних параметрів, і розподіляють їх на входи всіх нейронів прошарку Кохонена. Нейрони прошарку Кохонена формують карту організації моделей входу після неконтрольованого процесу навчання. У такій структурі нейромережі прошарок Кохонена подається одномірною множиною, при цьому кожен нейрон має, у загальному випадку, по два найближчих сусіди (зліва і справа). У складнішому варіанті нейрони Кохонена утворюють двомірну сітку з чотирма сусідами у кожного нейрона (зліва, справа, зверху й знизу). У ще складнішому варіанті

структури сітка гексагональна – у кожного нейрона шість сусідів на площині (за циферблатом годинника – 2, 4, 6, 8, 10, 12 година). Вузли розподільчого прошарку зв'язані з кожним нейроном прошарку Кохонена через зв'язки змінної ваги.

Самоорганізуючі карти Кохонена є динамічними системами, які вивчають топологічні відношення й абстрактні структури в багатомірних векторах інформативних параметрів і на основі цього формують їх представлення в просторі меншої розмірності. Тобто самоорганізуючі карти можуть давати локальну густину ймовірності векторів з інформативними параметрами.

Процес самоорганізації за алгоритмом Кохонена полягає в пошуку нейрона, який у прийнятій метриці найближче знаходиться до вектора інформативних параметрів (вхідного вектора нейромережі). Для знайденого нейрона-переможця, а також для його сусідів, корегують вагові зв'язки між розподільчим прошарком мережі і прошарком Кохонена за таким співвідношенням:

$$w_i^{k+1} = w_i^k + \eta_i^k \cdot G^k(i, x^k) \cdot (x^k - w_i^k), \quad (5)$$

де η_i^k – коефіцієнт навчання, який зменшується протягом навчання (із ростом k); $G^k(i, X^k)$ – функція сусідства, яка визначається, як правило, формулою Гаусса:

$$G^k(i, x^k) = \exp\left(-\frac{d^2(i, x^k)}{2 \cdot (\sigma^k)^2}\right),$$

де $d(i, x^k)$ – відстань від i -го нейрона до нейрона переможця з індексом w^k у k -му циклі навчання, σ^k – параметр ширина функції Гаусса (зменшується у процесі навчання); η_i^k – коефіцієнт навчання.

У результаті навчання прошарку Кохонена топологічні сусідні нейрони стають типовими представниками кластерів навчальних даних, що є сусідами у багатомірному просторі.

Зважаючи на те, що процес навчання мережі Кохонена зводиться до самонавчання, тобто відбувається без учителя, то важко (і не треба) передбачати, який саме нейрон прошарку Кохонена буде активуватися для заданого вхідного вектора, тобто буде інформувати про наявність тієї чи іншої стадії плавки. Необхідно лише гарантувати, щоб унаслідок навчання розділялися несхожі вхідні вектори інформаційних параметрів. Таким чином самоорганізована карта Кохонена дає можливість ідентифікувати моменти зміни технологічних стадій плавлення в ДСП.

Для визначення того, який саме нейрон нейромережі Кохонена відповідає за певну стадію плавлення, після самоорганізації мережі Кохонена її вагу зв'язків зафіксують, і виходи нейронів прошарку Кохонена подають на нейромережу, яка є багатошаровим перцептроном. У результаті ми отримуємо комплексну нейромережу для розпізнавання технологічних стадій плавлення в ДСП.

Висновки. 1. Запропоновано структуру підсистеми реєстрації миттєвих значень струмів та напруг дуг і активної енергії ДСП. 2. Запропоновано математичну модель обчислення інтегральних значень інформативних параметрів процесу електросталеплавлення в печі. 3. Розроблено алгоритм функціонування підсистеми інформаційного забезпечення в структурі нейромережної системи розпізнавання технологічних стадій електросталеплавлення. 4. Обґрунтовано архітектуру нейромережі для ідентифікації моментів зміни стадій плавлення сталі в ДСП.

1. Ситуаційне керування в дугових сталеплавильних печах. Монографія / За ред. О.Ю. Лозинського, Я.Ю. Марущака. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2004. – 382 с. 2. Чуи Ч. Введение в вейвлеты: Пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 412 с. 3. Паранчук Я.С., Лізанець В.В. Самоорганізовані карти Кохонена з одновимірною структурою для ідентифікації технологічних стадій плавлення в дугових сталеплавильних печах // Електромашинобудування та електрообладнання. Темат. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – 2006. – Вип. 66. – С. 382–383.