Пастух О.Р. Статична стійкість режимів енергоблока з додатковим робочим трансформатором власних потреб // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2006. – № 563. – С. 56–64. 3. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки. – К.: ОЕП "ГРІФРЕ", 2002. – 23 с. 4. Букович Н.В. Протиаварійна режимна автоматика електроенергетичних систем: Навч. посібник. – Львів: Бескид. Біт, 2003. – 224 с. 5. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.; Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с. 6. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с. 7. Скрипник О.І. ДАКАР – обчислювальний комплекс аналізу режимів і процесів електроенергетичних систем // Технічна електродинаміка. – 1998. – Спец. вип. – С. 56–61.

УДК 519.6, 621.365

В.В. Лізанець
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра ЕАП

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТІВ ФОРМИ СТРУМІВ ДУГ ДСП НА ОСНОВІ ШВИДКОГО WAVELET-ПЕРЕТВОРЕННЯ

© Лізанець В.В., 2007

Обґрунтовано використання швидкого wavelet-перетворення для аналізу форми струмів дуг дугової сталеплавильної печі. Наведено алгоритм розрахунку коефіцієнтів форми струмів дуг на основі швидкого wavelet-перетворення з використанням їх як інформативні параметри в системі автоматизованого розпізнавання технологічних стадій плавлення в дуговій сталеплавильній печі.

The use of rapid wavelet-transformation is grounded for the analysis of form of currents of arcs of arc steel-smelting stove. The algorithm of calculation of coefficients of form of currents of arcs is resulted on the basis of rapid wavelet-transformation from the use of them as informing parameters in the system of the automated recognition of technological stages of melting in an arc steel-smelting stove.

Постановка проблеми. Для задачі ідентифікації технологічних стадій плавлення в дуговій сталеплавильній печі важливим є отримання точної та оперативної інформації про зміну форми струмів дуг у кожній фазі. Важливість останнього диктується необхідністю точної ідентифікації стадій плавлення та моментів їх зміни для оперативної зміни електричних та технологічних керуючих впливів по ходу фізико-хімічних перетворень шихти та розплаву, що відчутно впливає на собівартість електросталей, ресурс печі, вплив печі на електромережу та на якість виплавленої сталі [1].

Аналіз останніх досліджень. Для опосередкованої оцінки технологічної стадії плавлення в ДСП як правило використовують такі інформативні параметри, як величину спожитої енергії, величину теплового потоку через водоохолоджувальне склепіння печі, температуру шихти, параметри шуму та вібрації технологічного обладнання, параметри форми кривої струмів та напруг дуг та їх обвідної у кожній фазі печі. Але із наведених характеристик (інформативних параметрів), які найповніше відображають фізико-хімічні перетворення у плавильному просторі печі, і опосередковано віддзеркалюють технологічні стадії, потрібно відзначити інформативні параметри форми кривої струмів дуг у кожній фазі.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Інформативні параметри форми струму дуги є тісно корельовані зі ступенем іонізації дугового проміжку і найповніше віддзеркалюють стан розплаву та інтенсивність його випаровування, температуру розплаву й шлаку, а також, частково, хімічний склад металу й шлаку, дію електромагнітних сил на дуги. Їх поточні значення залежать від конструкції магнітопроводу пічного трансформатора та конструкції короткої мережі печі, схеми з'єднання обмоток пічного трансформатора, товщини шлаку й інших чинників [1]. Для отримання поточної інформації про інформативні параметри кривої струмів дуг традиційно використовують аналогові смугові фільтри та фільтри низької частоти. У результаті отримують значення амплітуд гармонічних складових струму дуги, а також додаткову інформацію – значення дисперсії обвідної струмів дуг, кількість перетинів обвідної струмів дуг, лінію їх математичного сподівання (частотна характеристика процесу зміни інформативного параметра) тощо. У [1, 2] описано спосіб та схемні рішення для оперативного отримання цієї інформації на аналоговій елементній базі. Але такому рішенню властиві деякі недоліки, зокрема, складність оперативного переналагодження фільтрів на інший гармонічний ряд, чутливість до температурних змін тощо.

Постановка задачі та мета дослідження. Для підвищення точності, швидкодії та універсальності отримання вказаної вхідної інформації про форму струмів дуг пропонується використовувати швидке wavelet-перетворення. Цей метод лінійного перетворення легко реалізувати на цифрових фільтрах, із використанням спеціалізованих мікросхем чи на програмованих мікропроцесорних пристроях. За такого підходу є можливість виконувати оперативне переналагодження фільтрів на інший гармонічний ряд, такі пристрої менш чутливі до температурних коливань, дають змогу опрацьовувати результати аналізу на комп'ютерах без застосування додаткових оцифровувальних пристроїв, отримувати точніші результати спектрального аналізу, а також підвищують швидкість опрацювання струмів дуг навіть порівняно з програмною реалізацією швидкого Фур'є-перетворення.

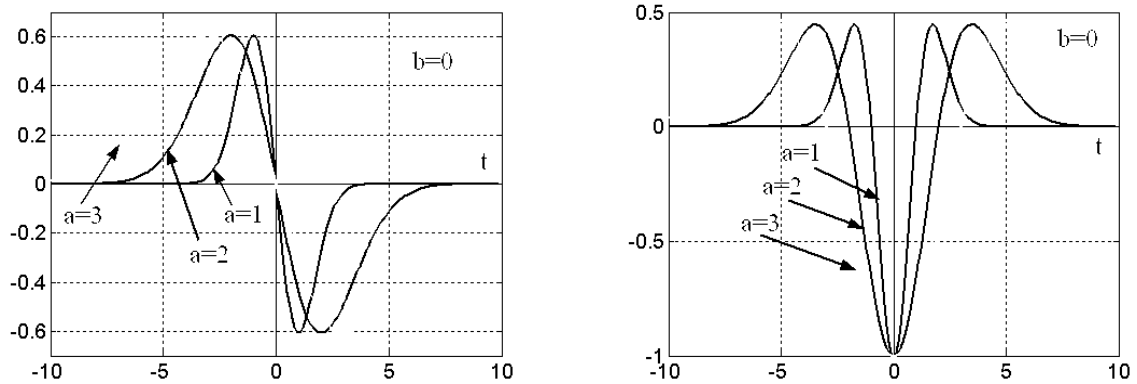
Виклад основного матеріалу. Wavelet-перетворення, теорія якого сформувалась на початку 90-х років, є не менш поширеною, ніж класичне перетворення Фур'є. Базова ідея Wavelet-перетворення має понад 200-літню історію і належить Фур'є: полягає в апроксимації складної функції зваженою сумою простих функцій, кожна з яких, своєю чергою, отримується з однієї функції-прототипу. Ця функція-прототип має значення "будівельного" блока, а шукана апроксимація отримується як комбінація однакових за структурою блоків. При цьому, якщо хороша апроксимація отримується у разі використання невеликої кількості блоків, то цим самим досягається значне стискання інформації. Такими блоками Фур'є використав синусоїду з різними періодами. У теорії wavelet-перетворення, на відміну від Фур'є-перетворення, набір аналізуючих функцій (wavelet-функцій) надзвичайно широкий і їх вибір залежить від розв'язання конкретних задач обробки сигналів. У загальному wavelet-функції можна поділити на [3]:

- грубі wavelet-функції: wavelet Гауссового типу (gaus), Морле (morlet) і "мексиканська шляпа" (mexihat). Ці wavelet-функції володіють мінімумом властивостей, якими повинні володіти wavelet, що забезпечують повноцінні можливості в техніці обробки сигналів;
- нескінченно регулярні wavelet-функції. До них відносять wavelet Мейера (meyr);
- - ортогональні wavelet-функції з компактним носієм: wavelet Добеші (dbN), Сімплета (symN) і Койфлета (coifN);
- біортогональні wavelet із компактним носієм;
- комплексні wavelet.

У загальному wavelet – це функції, які мають вигляд коротких хвильових пакетів із нульовими інтегральними значеннями, є локалізовані на осі незалежної змінної t, можуть зсуватись вздовж осі t , а також масштабуватись (стискатись чи розтягуватись). Wavelet-функції (материнські wavelet) $\Psi(\frac{t-b}{a})$ створюють за допомогою спеціальних базових функцій (батьківських wavelet) $\Phi(\frac{t-b}{a})$, які і визначають їх вид та властивості. Так wavelet Гауссового типу отримують

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

диференціюванням функції Гаусса (батьківського wavelet), при цьому отримують різних порядків wavelet $\Psi(\frac{t-b}{a})$, в якому параметр *b* задає положення wavelet на часовій осі, а параметр *a* ширину (частотні властивості) wavelet (див. рис. 1). Wavelet функції по локалізації у часовій і частотній області, займають проміжне місце між гармонічними (синусоїдними) функціями, які локалізовані по частоті, і функцією Дірака, яка локалізована в часі.



а б

Рис. 1. Wavelet Гауссового типу:
а – першого порядку; б – другого порядку

Як і Фур'є-перетворення, wavelet-перетворення слугує для опрацювання як неперервних сигналів, так і дискретних. При цьому також для пришвидшення алгоритму опрацювання сигналів існує швидке wavelet-перетворення, яке пропонується для аналізу форми струмів дуг, оскільки при порівняно невеликих затратах на їх апаратну та програмну реалізацію, забезпечують швидке опрацювання сигналів струмів дуг з отриманням необхідної інформації про їх частотний склад.

Швидке wavelet-перетворення ґрунтується на принципі кратномасштабного аналізу, який полягає в зображені сигналу у вигляді сукупності його послідовних наближень. Тобто під кратномасштабним аналізом розуміють опис простору ієрархічно, через ієрархічно вкладені підпростори V_m, які не не перетинаються і об'єднання яких дає $L^2(R)$ [4].

Для задачі аналізу форми струмів дуг такий підхід дає змогу аналізувати не весь частотний спектр сигналу, а сконцентрувати увагу лише на інформативних частотах, тобто на аналізі низькочастотної ділянки спектра, наприклад 0.5–2 Гц, яка є інформативною при розпізнаванні стадій плавлення, розглядати огрублену версію сигналу (оцінювати коефіцієнти wavelet-розкладу нижнього рівня), а для аналізу більш високочастотних складових – аналізувати уточненений сигнал (аналізувати коефіцієнти wavelet-розкладу верхніх рівнів деталізації).

Отже, будь-яку функцію *s(t)* можна розглядати на будь-якому *m*-му рівні деталізації. Для цього розраховують апроксимуючі та деталізуючі коефіцієнти, для яких необхідними є коефіцієнти wavelet функцій, які розраховуються, маючи явний вигляд wavelet-функції. Оскільки при реалізації алгоритму швидкого wavelet-перетворення найчастіше використовують wavelet-Добеші, то він був прийнятий нами як аналізуючий wavelet. У z-формі батьківський wavelet-Добеші записується як:

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

де p – порядок wavelet Добеші.

Маючи явну форму wavelet, задаючись його порядком p, і знаходячи нулі функції $\Phi(z)$, отримуємо коефіцієнти батьківського wavelet Добеші, які є значеннями при степенях z. Так для p=4 отримуємо такі значення:

$$h = [0.23 \quad 0.715 \quad 0.631 \quad -0.028 \quad -0.187 \quad 0.031 \quad 0.033 \quad -0.011].$$

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Для отримання коефіцієнтів материнського wavelet Добеші, користуються таким співвідношенням:

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

де N = 2p – кількість коефіцієнтів wavelet Добеші.

Згідно з формулою (2) отримуємо такі значення параметрів материнського wavelet-фільтра:

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

Маючи значення для h_k та g_k (k=1…N), які можна трактувати як імпульсний відгук функції, можемо побудувати частотні характеристики батьківського та материнського wavelet функцій на основі таких співвідношень:

$$F(w) = \sum_{k=0}^{N} h_k \cdot e^{-i \cdot w \cdot k}, \tag{3}$$

$$R(w) = \sum_{k=0}^{N} g_k \cdot e^{-i \cdot w \cdot k}, \tag{4}$$

де $F(w)$ – частотна передавальна функція фільтра з відгуком h_k; $R(w)$ – частотна передавальна функція фільтра з відгуком g_k.

На рис. 2 показано частотні характеристики вищенаведених фільтрів.

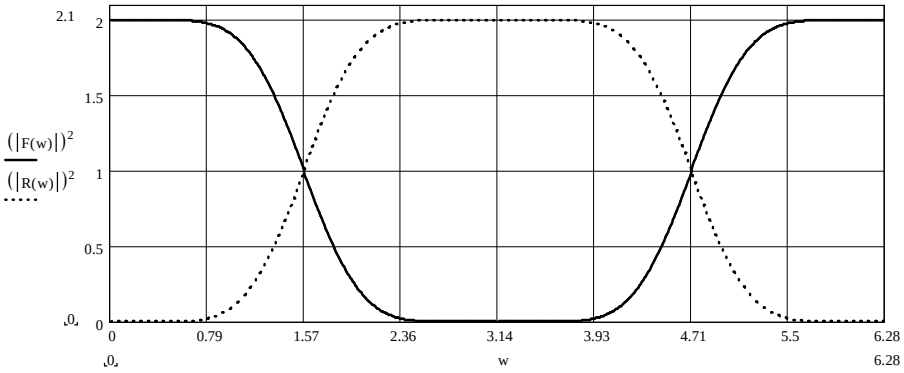


Рис. 2. Частотні характеристики фільтрів батьківського wavelet та материнського wavelet

У часовій області wavelet-функції Добеші мають вигляд, показаний на рис. 3.

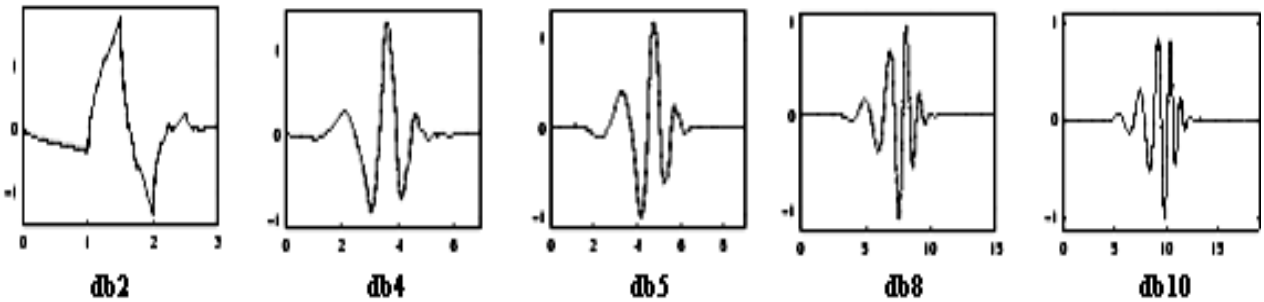


Рис. 3. Wavelet Добеші в часовій області, для порядків 2, 4, 5, 8 та 10

На основі отриманих значень розраховують швидке пряме дискретне wavelet-перетворення, а саме знаходять апроксимуючі та деталізуючі коефіцієнти:

– апроксимуючі коефіцієнти на *m*-му рівні:

$$c_{m+1,i} = \sum_{k=1}^{N} h_k c_{m,2i+k}, \tag{5}$$

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

– деталізуючі коефіцієнти на m-му рівні (коефіцієнти wavelet-перетворення)

$$d_{m+1,i} = \sum_{k=1}^{N} g_k \cdot c_{m,2i+k} \ , \tag{6}$$

де i – кількість відліків сигналу, який аналізують; m – рівень аналізу сигналу.

Сутність операцій, що виконуються за формулами (5) та (6), полягає в такому: на першому етапі перетворення перший цифровий фільтр h_k із сигналу $S_k = C_{0,k}$ виділяє низькі частоти $|\omega| \le \pi / 2$, а другий (октавний) фільтр g_k виділяє верхні частоти $\pi / 2 \le |\omega| \le \pi$. Оскільки на виході фільтра 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 (5) зсувами ($2i+n$) через два відліки по вхідному сигналі. Відповідно на виході фільтра 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 зображена такою самою кількістю відліків, що і вхідна.

Інформативними для задачі ідентифікації стадій плавлення є вищі канонічні гармоніки з номерами 2, 3, 4, 5, 7, 9 та інфранизькі гармоніки з діапазону 1–8 Гц. Зважаючи на те, що максимальна частота, яка підлягає аналізу є 450 Гц (дев'ята гармоніка), то згідно з теоремами Котельнікова-Шенона, частота дискретизації (вибірки) сигналу струму $f_\partial \ge 900 Гц$. Приймаємо $f_\partial = 1000 Гц$. Найменшою частотою, яку ми повинні проаналізувати для правильного розпізнавання технологічних стадій плавлення, є частота 1 Гц, що вимагає 1024 відліків для роботи алгоритму швидкого wavelet-перетворення.

На рис. 4 показана структурна блок-схема алгоритму Маллата (пірамідального алгоритму) процедури швидкого wavelet-перетворення [3] для отримання інформативних параметрів форми струму дуги.

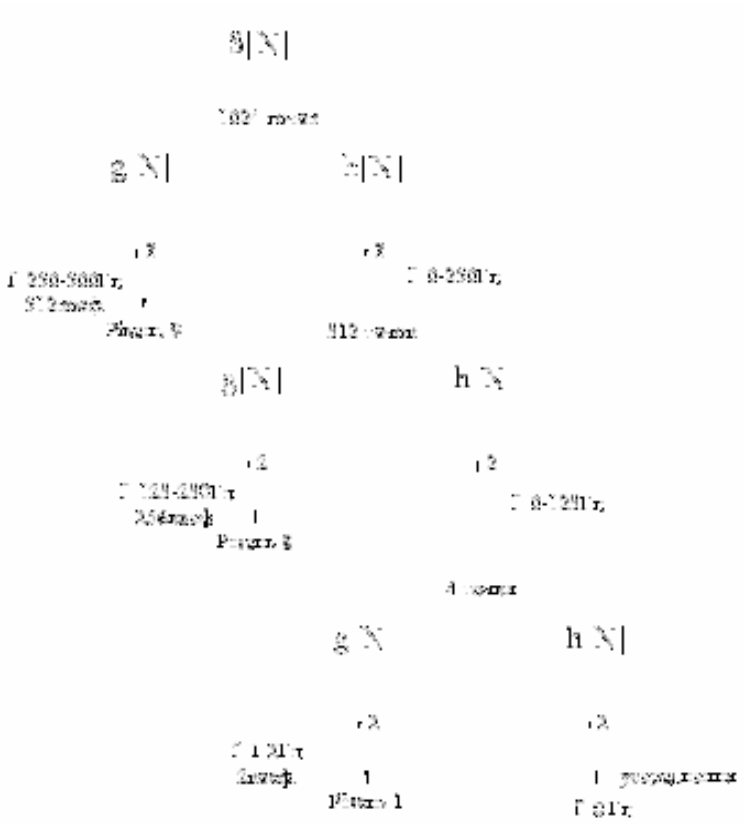


Рис. 4. Пірамідальний алгоритм швидкого wavelet-перетворення

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

З наведеної блок-схеми випливає, що на початку вхідний сигнал струму подається 1024 відліками, що є достатнім для частотного аналізу сигналу в діапазоні 0–500 Гц. Після виконання першого рівня декомпозиції на виході ВЧ фільтра-дециматора залишається 512 відліків. Розширення в часі зменшилось у два рази, але частотний діапазон, який займає сигнал, став від 250–500 Гц, тобто розширення по частоті збільшилось у два рази. Ці 512 відліків є wavelet-коефіцієнти девятого рівня (деталізуючі коефіцієнти). Вихідний сигнал НЧ фільтра містить коливання з частотами від 0–250 Гц. Цей сигнал надходить знову на два фільтри і т. д.

Цей процес продовжується до тих пір, допоки не залишуться два відліки, що для цієї довжини сигналу досягається при 9-ти рівнях декомпозиції. Wavelet-перетворення заданого сигналу отримується об'єднанням wavelet-коефіцієнтів усіх рівнів, починаючи з першого (два коефіцієнти). До них приєднуються спереду коефіцієнти апроксимації сигналу 0-го рівня (два відліки). Отже, число коефіцієнтів перетворення дорівнює числу відліків заданого сигналу.

Найзначніші частоти заданого сигналу будуть відображатися як великі амплітуди wavelet-коефіцієнтів, що "відповідають" за відповідний частотний діапазон.

Малі значення wavelet-коефіцієнтів означають низьку енергетику відповідних частотних смуг у сигналі. Тому ці коефіцієнти можна відкидати і не розраховувати, а рахувати лише ті коефіцієнти, смуга частот для яких є інформативною для задачі ідентифікації стадій плавлення. Крім цього, на відміну від перетворення Фур'є додатково отримуватимемо час появи частоти, але частотна локалізація буде мати розширення, яке залежить від рівня перетворення, на якому з'явилася частота [3]. Якщо основна інформація знаходиться в області високих частот, то часова локалізація цих частот буде точнішою, оскільки вони характеризуються великою кількістю відліків. На низьких частотах навпаки відліків мало. Тому часове розширення буде поганим, але хорошим буде частотне розширення (оскільки сигнал займає вузьку смугу частот).

Для аналізу ефективності наведеного алгоритму було згенеровано несинусоїдальний сигнал з основною частотою 50 Гц із відносним вмістом вищих гармонік для 2-ї – 25 %, 6-ї – 20 %, для 2 Гц – 20 %, що є характерним на початку плавлення шихти в дуговій сталеплавильній печі (рис. 5).

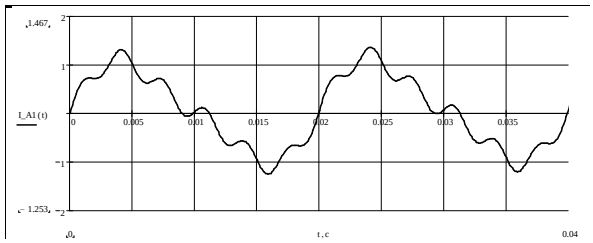


Рис. 5. Форма кривої струму дуги ДСП на початку плавлення шихти

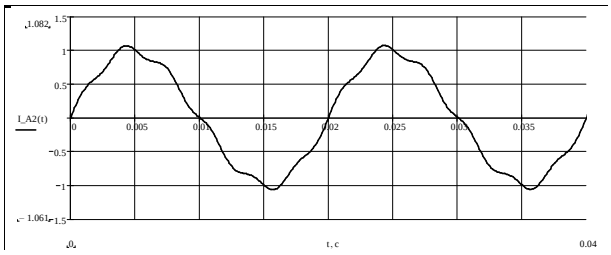


Рис. 6. Форма кривої струму дуги ДСП на стадії окислення

Другий згенерований сигнал є характерним для стадії окислення розплаву сталі, тобто це порівняно спокійний режим горіння, при якому є низький вміст гармонік. При цьому було прийнято такі їх значення: 2-ї – 5 %, 6-ї – 7 %, для 2 Гц – 2 % (рис. 6).

Результати проведеного розкладу наведені в таблиці у вигляді максимальних значень wavelet-коефіцієнтів.

Максимальні значення коефіцієнтів швидкого wavelet-перетворення (деталізуючі коефіцієнти) для різних стадій плавлення

Коеф. wavelet перетвор.	$C^{<0>}$	$C^{<1>}$	$C^{<2>}$	$C^{<3>}$	$C^{<4>}$	$C^{<5>}$	$C^{<6>}$	$C^{<7>}$	$C^{<8>}$	$C^{<9>}$
Спектр частот, Гц	0	1–2	2–4	4–8	8–16	16–32	32–63	63–125	125–250	250–500
Рівень	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Початок плавлення	0	1,824	1,759	0,569	0,928	0,38	3,229	1,141	0,425	0,295
Період окислення	0	0,139	0,363	0,099	0,845	0,307	3,227	1,016	0,335	0,133

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Аналізуючи отримані результати, бачимо, що коефіцієнти, які відповідають за смугу частот, яка для нас є інформативною відносно змінюють свої значення з більших – на початку плавлення до менших – на періоді окислення, що вказує на можливість їх використання як вхідною інформацією для системи розпізнавання технологічних стадій розплаву, яка побудована на основі нейромережевого ідентифікатора, а саме нейромережі Кохонена [4].

Висновки. Застосування швидкого wavelet-перетворення є ефективним засобом отримання вхідної інформації для функціонування нейромережевої системи розпізнавання технологічних стадій плавлення в ДСП на основі мереж Кохонена. Побудова підсистеми інформаційного забезпечення на основі швидкого wavelet-перетворення може підвищити точність та оперативність ідентифікації технологічних стадій плавлення й моментів їх зміни в дуговій сталеплавильній печі.

Подальшою роботою є аналіз форми струму дуги з іншими базовими типами wavelet-функцій, а насамперед функцій Добеші інших порядків.

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. А. с. 1582366 СССР. Устройство для измерения информативных значений гармоник тока дуги трехфазной дуговой электропечи / О.Ю. Лозинский, Я.С. Паранчук, З.Л. Паранчук. – Опубл. 30.07.1990. – Бюл. № 28. 3. Чуи Ч. Введение в вейвлеты: Пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 412 с. 4. 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. – Вип. 66. – 2006. – С. 382–383.

УДК 621.3.019: 51.001.57

О.Ю. Лозинський, С.В. Щербовських
Національний університет "Львівська політехніка"
кафедра ЕАП

РОЗРАХУНОК БЕЗВІДМОВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ОДНОКРАТНИМ ЗАГАЛЬНИМ ЗАМІЩУВАЛЬНИМ ПОЛЕГШЕНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

© Лозинський О.Ю., Щербовських С.В., 2007

Стаття присвячена синтезу розширеної однорідної Марковської моделі надійності для електромеханічного об'єкта з однократним загальним полегшеним резервуванням. У статті запропоновані моделі відмов складових елементів, які найбільш прийнятні для розв'язання поставленої задачі. Проведено аналіз коректності та адекватності отриманих у статті результатів.

This paper is devoted to synthesis of extended homogeneous Markov reliability model for electromechanical item with single whole stand by reduced redundancy. In the paper failure component model is suggested that the most proper for this problem decision. Correctness and adequacy analysis for received model by result comparison with recognized models is given.

Постановка проблеми. Заміщувальне резервування є одним із найефективніших способів підвищення показників надійності об'єкта. В ідеальному випадку резервний елемент, поки основний елемент справний і виконує покладені на нього функції, відмовити не може. У реальних об'єктах існують стресові фактори, які впливають на елементи резервної групи. Тобто елементові,

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua