

## КРИТЕРІЇ НЕОБХІДНОЇ ТА ДОСТАТНЬОЇ КІЛЬКОСТІ ІТЕРАЦІЙ ФІЛЬТРАЦІЇ НЕПЕРІОДИЧНИХ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ БАГАТОІТЕРАЦІЙНИМИ МЕТОДАМИ

Н.А. Шидловська чл.-кор. НАН України, С.М. Захарченко, докт.техн.наук, О.П. Черкаський  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.  
E-mail: shydlovska@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net, cherkassky\_a@ukr.net

*Виконано аналіз ефективності відомих процедурно-орієнтованих критеріїв визначення необхідної кількості ітерацій фільтрації нестационарних неперіодичних сигналів багатоітераційним методом ковзного середнього із зростаючою шириною вікна фільтрації на прикладі імпульсів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому. Розглянуто дві основні групи критеріїв, які ґрунтуються на порівнянні сигналу чинної ітерації його фільтрації або з сигналом попередньої ітерації, або з еталонним сигналом, а також критерій, що певною мірою має властивості критеріїв обох цих груп. Показано низьку результативність та неуніверсальність відомих критеріїв. Запропоновано нові об'єктно-орієнтовані критерії необхідної та достатньої кількості ітерацій фільтрації нестационарних неперіодичних сигналів, адаптивні до вимог подальшої обробки сигналів та наведено аналіз їхньої ефективності. Бібл. 13, рис. 2, табл. 4.*

**Ключові слова:** нестационарні неперіодичні сигнали, багатоітераційні методи фільтрації сигналів, критерії необхідної та достатньої кількості ітерацій.

**Вступ.** Для фільтрації неперіодичних нестационарних сигналів [3] сьогодні найбільш широко застосовуються методи емпіричної модової декомпозиції – empirical mode decompositions (EMD), вейвлет-перетворення, ковзного середнього та ковзної медіани [5, 7–10]. У загальному випадку всі вони є багатоітераційними. Використання великої кількості ітерацій фільтрації, з одного боку, підвищує співвідношення сигнал/шум [9, 11, 12] у вихідному сигналі, а з іншого – призводить до збільшення об'ємів обчислень та може спотворювати корисний сигнал [7]. Досягнення компромісу між цими тенденціями в кожному випадку повинні забезпечити критерії достатньої та необхідної кількості ітерацій фільтрації. Основними властивостями таких критеріїв є:

1) універсальність, тобто можливість коректного застосування до широкого загалу як методів фільтрації, так і сигналів, що обробляються;

2) результативність – здатність критерію завжди забезпечити результат для всіх заявлених класів методів фільтрації та сигналів, що обробляються. Для процедурно-орієнтованих критеріїв, в яких не використовуються параметри якості вихідних сигналів (таких як співвідношення сигнал/шум, допустимий рівень шумів та інших), а лише певні алгоритми виконання процедур, застосовується поняття процедурної результативності, тобто забезпечення результату виконання процедури критерію згідно з його алгоритмом, а для об'єктно-орієнтованих критеріїв – об'єктної результативності, тобто забезпечення контролю заданих параметрів якості відфільтрованого сигналу;

3) ефективність – відношення точності визначення ступеня відповідності відфільтрованого згідно з даним критерієм сигналу необхідному для подальших операцій сигналу до трудомісткості критерію.

На сьогодні найбільшого поширення набули критерії визначення необхідної кількості внутрішніх модових функцій – intrinsic mode functions (IMF), які повинні бути відкинуті при фільтрації сигналів за допомогою їх часткового відновлення методами EMD [4, 8, 9, 11, 13], тобто необхідного числа ітерацій фільтрації даним методом. Однак навіть для даного методу фільтрації розроблені спеціально для нього критерії необхідної кількості ітерацій фільтрації [8, 11] часто дають різні результати [7], а при застосуванні їх для визначення необхідного числа ітерацій фільтрації сигналів багатоітераційними методами ковзного середнього та ковзної медіани розкид отриманих результатів ще більший [7]. **Метою** даної роботи є аналіз ефективності відомих критеріїв визначення необхідної і достатньої кількості ітерацій фільтрації сигналів багатоітераційним методом ковзного середнього із зростаючою шириною вікна фільтрації (БМКСЗШВФ) [7] та розроблення нових об'єктно-орієнтованих критеріїв необхідної та достатньої фільтрації.

### Визначення необхідної кількості ітерацій фільтрації сигналів за відомими критеріями.

Існують дві основні групи таких критеріїв. До першої входять критерії, основані на порівнянні сигналів чинної  $i$ -ої та попередньої  $(i-1)$ -ої ітерацій їх фільтрації [11, 13]. Такі критерії належать до процедурно-орієнтованих. Одним із них є перший локальний мінімум залежності від номеру ітерацій послідовної середньоквадратичної похибки – consecutive mean square error (CMSE) чинної та попередньої ітерацій фільтрації сигналу [11, 13]

$$CMSE(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\hat{y}(t_j)_i - \hat{y}(t_j)_{i-1}]^2, \quad (1)$$

де  $\hat{y}(t_j)_i$  та  $\hat{y}(t_j)_{i-1}$  – значення відфільтрованого сигналу після  $i$ -ої та  $(i-1)$ -ої (попередньої) ітерації фільтрації відповідно;  $N$  – загальна кількість відліків у відфільтрованих сигналах  $\hat{y}(t_j)_i$  та  $\hat{y}(t_j)_{i-1}$ .

Даний критерій широко застосовується для визначення кількості IMF, які треба вилучити з вхідного сигналу  $y(t_j)$  при його фільтрації методами часткового відновлення за його неповною EMD [8, 9, 11, 13], тобто кількості ітерацій багатоітераційних методів фільтрації у загальному випадку. Згідно з даним критерієм відновлення сигналу починається з наступної IMF за тою, якій відповідає перший локальний мінімум (1). Логіка критеріїв даної групи полягає в оцінці ефективності ітерацій фільтрації. Якщо ефект від чинної ітерації суттєво нижчий, ніж від попередньої, то подальші ітерації не виконуються. Такий підхід характерний для методів фільтрації, які потребують значних об'ємів обчислення на кожній ітерації.

У [7] було наведено порівняння ефективності фільтрації імпульсних сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні і струму в ньому методом часткового відновлення сигналу за його неповною EMD та БМКЗШВФ при використанні даного критерію, яке засвідчило його низькі об'єктну результативність, універсальність та узагальнюючу здатність. Вхідні для фільтрації сигнали напруги на плазмоерозійному навантаженні  $\bar{u}(t)$  та струму в ньому  $\bar{i}(t)$  були отримані як результат усереднення вибірки з 20 пар синхронних осцилограм, знятих у квазіоднакових умовах (рис. 1) [7]. Результати їх фільтрації шістьма ітераціями БМКЗШВФ  $\bar{u}(t)_{MMA}$  та  $\bar{i}(t)_{MMA}$  відповідно показані на рис. 2.

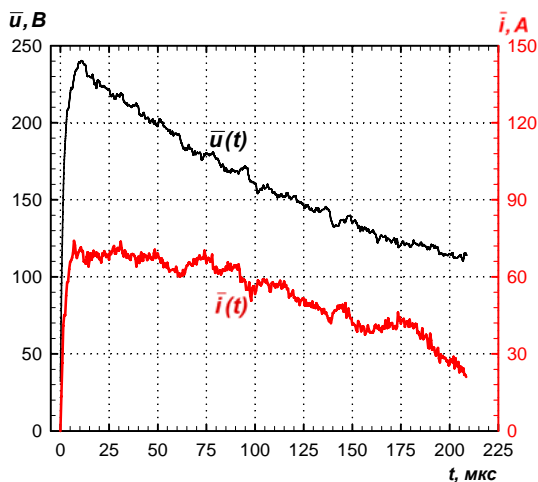


Рис. 1

За критерієм першого локального мінімуму (1) для методу часткового відновлення сигналу за його неповною EMD потрібно було виконати по дві ітерації для фільтрації сигналів напруги і струму. При застосуванні БМКЗШВФ згідно з тим самим критерієм потрібно було виконати дві ітерації для сигналу напруги і три для сигналу струму. При цьому найкращий збіг відфільтрованих за допомогою обох методів сигналів спостерігався для трьох ітерацій фільтрації сигналів як напруги, так і струму БМКЗШВФ, що свідчить про те, що розглянутий критерій не є абсолютним.

Друга група критеріїв необхідної кількості ітерацій фільтрації базується на порівнянні відфільтрованого на  $i$ -й ітерації сигналу з еталонним. При цьому еталонним сигналом можуть виступати як повністю очищений від шумів сигнал, якщо є можливість його визначити, так і вхідний сигнал, якщо такої можливості немає. У першому випадку все очевидно: чим менша різниця між повністю очищеним від шумів і відфільтрованим на  $i$ -й ітерації сигналами, тим якісніше здійснена його фільтрація. Мінімум її залежності від номеру ітерації (у разі, якщо він існує) або її обмеження заданим числом лежить в основі ряду критеріїв необхідної та достатньої кількості ітерацій фільтрації [9, 11, 12], які за таких умов належать до об'єктно-орієнтованих.

Але на практиці майже завжди повністю очищений від шумів сигнал невідомий, тому у переважній більшості критеріїв цієї групи як еталонний виступає вхідний сигнал. У такому разі ці критерії не будуть об'єктно-орієнтованими. Вони принципово не можуть бути об'єктно-результативними, абсолютними і використовуватися для знаходження достатньої кількості ітерацій фільтрації, оскільки відображають лише відмінність між цими сигналами, а не наближення відфільтрованого сигналу до повністю очищеного.

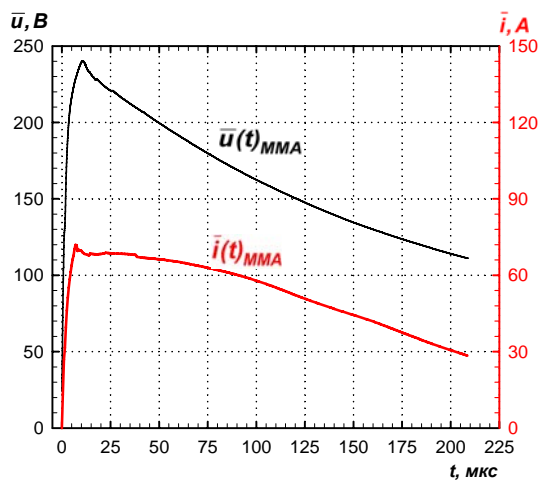


Рис. 2

Одним із таких критеріїв є мінімум залежності від номеру ітерації (у разі, якщо він існує) або обмеження заданим числом значення середньоквадратичного відхилення результатів  $i$ -ої ітерації фільтрації  $\hat{y}(t_j)_i$  від вхідних даних  $y(t_j)$  – mean square error (MSE) [9, 11, 12]

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [y(t_j) - \hat{y}(t_j)_i]^2. \quad (2)$$

Замість (2) у критеріях даної групи також використовують наступні величини. Середнє значення модуля відносної різниці результатів  $i$ -ої ітерації фільтрації та вхідних даних [6]

$$\delta = \frac{100\%}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{y(t_j) - \hat{y}(t_j)_i}{y(t_j)} \right|. \quad (3)$$

Відносне стандартне відхилення результатів  $i$ -ої ітерації фільтрації від вхідних даних [6]

$$\nu = 100\% \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [y(t_j) - \hat{y}(t_j)_i]^2} / \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y(t_j) \right). \quad (4)$$

Відносну середньоквадратичну різницю результатів  $i$ -ої ітерації фільтрації і вхідних даних – percentage root mean square difference (PRD) [9, 10, 12]

$$PRD = 100\% \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N [y(t_j) - \hat{y}(t_j)_i]^2}{\sum_{j=1}^N [y(t_j)]^2}}. \quad (5)$$

У наступному критерії визначення необхідної кількості ітерацій фільтрації сигналів за допомогою їх часткового відновлення за неповною EMD для кожної IMF розраховується відстань у двовимірному гільбертовому просторі між вхідним сигналом і його IMF [11, 13]

$$l_{2 \text{ norm}}(i) = \sqrt{\int_0^\tau \left( \frac{dy}{dt} - \frac{d(IMF_i)}{dt} \right)^2 dt}, \quad (6)$$

де  $[0, \tau]$  – інтервал визначення сигналу  $y(t)$  у часовому вимірі.

Згідно з даним критерієм відновлення сигналу починається з наступної IMF після тої, якій відповідає перший локальний максимум залежності (6) [11, 13]. Придатна для використання в інших багатоітераційних методах фільтрації узагальнена форма запису (6) буде мати вигляд

$$l_{2 \text{ norm}}(i) = \sqrt{\int_0^\tau \left( \frac{dy}{dt} - \frac{d(\hat{y}_i - \hat{y}_{i-1})}{dt} \right)^2 dt}. \quad (7)$$

Як видно з (7), даний критерій містить порівняння вхідного сигналу і різниці між ітераціями його фільтрації, тобто має властивості критеріїв з обох розглянутих груп. Зауважимо, що у загальному випадку не обов'язково існують локальні екстремуми як (1), так і (6) та (7), що знижує результативність та універсальність цих критеріїв. Результати, отримані нами при фільтрації сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому [7] методами часткового відновлення сигналу за його неповною EMD та БМКСЗШВФ за критеріями (1) і (7) виявилися подібними, але трудомісткість визначення (7) на порядки вища, ніж (1), тому у нашому конкретному випадку критерій мінімуму (1) має безперечні переваги над критерієм максимуму (7).

Наведені в табл. 1 залежності (1)–(5) від числа ітерацій фільтрації БМКСЗШВФ [7] сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні тут і далі позначені індексом  $u$ , а струму в ньому – індексом  $i$ . Як видно з табл. 1, згідно з критерієм першого локального мінімуму (1) при фільтрації сигналу напруги БМКСЗШВФ необхідно виконати дві ітерації, а сигналу струму – три. Залежності від номеру ітерацій величин (2)–(5) у даному конкретному випадку взагалі виявилися монотонними, що

унеможливує застосування критерію першого локального мінімуму для жодної з них. Це є практичним підтвердженням того, що залежності даних величин від номеру ітерацій фільтрації не обов'язково мають локальні мінімуми у загальному випадку і критерій їх першого локального мінімуму не є універсальним і результативним, що свідчить про доцільність розроблення нових критеріїв необхідної і достатньої фільтрації сигналів багатоітераційними методами.

**Таблиця 1**

Номер ітерації $i$	Ширина вікна фільтрації $k$ , відліків	$CMSE_u$ , $B^2$	$MSE_u$ , $B^2$	$PRD_u$ , %	$\delta_u$ , %	$\nu_u$ , %	$\delta_{Su}$ , %	$CMSE_i$ , $A^2$	$MSE_i$ , $A^2$	$PRD_i$ , %	$\delta_i$ , %	$\nu_i$ , %	$\delta_{Si}$ , %
1	3	0,584	0,584	0,475	0,40	0,49	0,0004	0,929	0,929	1,818	0,017	0,019	0,004
2	7	0,506	1,329	0,716	0,62	0,74	-0,0008	0,361	1,532	2,335	0,023	0,024	-0,002
3	15	0,556	2,441	0,971	0,83	1,00	-0,0071	0,229	1,903	2,603	0,025	0,027	-0,018
4	31	0,677	4,122	1,261	1,05	1,30	-0,0224	0,593	3,153	3,351	0,031	0,035	-0,044
5	63	0,264	4,817	1,363	1,13	1,40	-0,0857	0,907	5,254	4,325	0,042	0,045	0,008
6	127	0,355	5,514	1,459	1,23	1,50	-0,3463	1,222	8,324	5,444	0,055	0,057	0,176

**Нові критерії визначення необхідної кількості ітерацій фільтрації сигналів.** При фільтрації сигналів дуже важливо не спотворювати їхні інтегральні характеристики: площу, обмежену лінією модуля сигналу, віссю абсцис та перпендикулярами до неї на границях області його визначення

$S_{y(t)} = \int_0^{\tau} |y(t)| dt$ , а також аналогічну площу  $S_{Ey(t)} = \int_0^{\tau} y^2(t) dt$ , обмежену лінією квадрата сигналу. Для

сигналів струму і напруги на лінійному активному навантаженні 1 Ом перша площа має фізичний зміст суми зарядів, які пройшли через навантаження протягом усіх півхвиль сигналу, а друга – енергії сигналу. Одними з критеріїв максимально допустимої кількості ітерацій фільтрації сигналів, які його не спотворюють, можуть бути гранично допустимі значення відносного відхилення цих площ після  $i$ -ої ітерації фільтрації  $S_{\hat{y}(t)_i}$  від аналогічних площ вхідного сигналу  $S_{y(t)}$

$$\delta_s = 100\% \cdot \left( S_{y(t)} - S_{\hat{y}(t)_i} \right) / S_{y(t)} \quad (8)$$

Значення величини (8) в залежності від кількості ітерацій фільтрації БМКСЗШВФ сигналу напруги на плазмоерозійному навантаженні представлені в табл. 1 з індексом  $u$ , а струму в ньому – з індексом  $i$ . Як видно з аналізу цих даних, навіть після 6-ої ітерації відносна зміна цієї площі не перевищує 0,35% для сигналу напруги і 0,2% для сигналу струму, що свідчить про те, що енергетичні характеристики сигналу при його фільтрації за даних умов практично не змінюються. Тобто обмеження цієї величини навіть значенням 0,1% не є жорстким критерієм, і ці умови виконуються до 5-ої ітерації фільтрації включно. Даний критерій належить до другої групи критеріїв. Користуючися логікою першої групи критеріїв, знайдемо перші локальні мінімуми залежностей від номеру ітерацій фільтрації прирощень величин (2)–(5) і (8) для двох послідовних ітерацій та наведемо їх у табл. 2 з відповідними індексами.

**Таблиця 2**

Номери послідовних ітерацій $i$	$\Delta MSE_u$ , $B^2$	$\Delta PRD_u$ , %	$\Delta \delta_u$ , %	$\Delta \nu_u$ , %	$\Delta \delta_{Su}$ , %	$\Delta MSE_i$ , $A^2$	$\Delta PRD_i$ , %	$\Delta \delta_i$ , %	$\Delta \nu_i$ , %	$\Delta \delta_{Si}$ , %
1 – 2	0,744	0,241	0,215	0,248	-0,001	0,603	0,517	0,521	0,540	-0,005
2 – 3	1,112	0,254	0,211	0,262	-0,006	0,371	0,268	0,246	0,280	-0,016
3 – 4	1,681	0,291	0,216	0,299	-0,015	1,250	0,748	0,625	0,781	-0,026
4 – 5	0,695	0,102	0,088	0,105	-0,063	2,101	0,975	1,068	1,019	0,052
5 – 6	0,697	0,095	0,098	0,098	-0,261	3,070	1,119	1,349	1,170	0,168

З аналізу даних цієї таблиці випливає, що за критерієм першого локального мінімуму залежностей від номеру ітерацій фільтрації прирощень  $\Delta MSE_u$  потрібно виконати 2 ітерації фільтрації,  $\Delta PRD_u - 6$ ,  $\Delta \delta_u - 3$ ,  $\Delta \nu_u - 6$ ,  $\Delta MSE_i - 3$ ,  $\Delta PRD_i - 3$ ,  $\Delta \delta_i - 3$ ,  $\Delta \nu_i - 3$ . Залежності від номеру ітерацій фільтрації модулів  $\Delta \delta_{Su}$  та  $\Delta \delta_{Si}$  взагалі виявилися монотонними, а знак змінювала лише

залежність  $\Delta\delta_{Si}$  від  $i$ . Для сигналу струму критерій першого локального мінімуму залежності від номеру ітерацій фільтрації величин  $CMSE_i$ ,  $\Delta MSE_i$ ,  $\Delta PRD_i$ ,  $\Delta\delta_i$ ,  $\Delta v_i$  дав однаковий результат – 3 ітерації, а для сигналу напруги такої єдності показань не спостерігалось. Середнім арифметичним результатом за даним критерієм для залежностей перших чотирьох величин табл. 2 при фільтрації сигналу напруги є 4 ітерації. Розкид отриманих результатів для сигналу напруги свідчить про те, що даний критерій для жодної з розглянутих величин не є прийнятним.

За об'єктно-орієнтований критерій достатньої кількості ітерацій фільтрації сигналів від високочастотних шумів пропонується обрати їхній гранично допустимий питомий вміст, не більший за максимально допустиму похибку апроксимації або інших наступних операцій з сигналами, чисельно виражений, наприклад, коефіцієнтом нелінійних спотворень (для періодичних сигналів) [1], коефіцієнтом модуляції [2], коефіцієнтом відношення сигналу до шуму – signal noise ratio (SNR) [9] (якщо є можливість його розрахувати) або іншими. В літературі визначення перших двох коефіцієнтів наводиться лише для періодичних стаціонарних сигналів. У випадку неперіодичних нестационарних імпульсних сигналів застосування класичного визначення цих коефіцієнтів неможливе. Тому, виходячи з одного із класичних визначень коефіцієнта однотональної амплітудної модуляції синусоїдного сигналу (відношення різниці сусідніх максимуму і мінімуму до їхньої суми) [2], введемо поняття середнього значення коефіцієнта амплітудної модуляції неперіодичного нестационарного імпульсного сигналу однотональним періодичним сигналом

$$\bar{M} = \frac{100\%}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{\Delta y_{mj}}{\bar{y}_j} \right|, \quad (9)$$

де  $\bar{y}_j$  – значення тренду середніх значень сигналу;  $\Delta y_{mj}$  – максимальні за модулем відхилення сигналу від значень його тренду протягом напівперіоду модулюючого сигналу;  $n$  – ціла кількість напівперіодів модулюючого сигналу на області визначення вхідного сигналу.

Але у загальному випадку, який найчастіше зустрічається на практиці, модулюючий сигнал не може бути описаний математично як однотональний, багатотональний чи хоча б періодичний. Він є випадковим, тобто недетермінованим. У цьому випадку для того щоб знайти за (9) середній на області визначення сигналу коефіцієнт його амплітудної модуляції, потрібно знайти середню суму максимальних за модулем відносних відхилень сигналу від тренду його середніх значень  $\left| \Delta y_{mj} / \bar{y}_j \right|$  на кожній з ділянок між точками перетину кривих сигналу і його тренду. Тобто при застосуванні (9) для даного випадку кількість напівперіодів модулюючого сигналу  $n$  потрібно замінити на кількість ділянок між точками перетину кривих сигналу і його тренду  $m$ .

Зауважимо, що для знаходження  $\Delta y_{mj}$  на кожній з  $m$  ділянок сигналу в будь-якому разі необхідно знайти всі значення відхилень сигналу від тренду його середніх значень  $\Delta y_j$  протягом всієї ділянки, а потім ще знайти максимальне серед них. З метою спрощення процедури обчислення даної величини можна знаходити середнє значення модулів відхилень абсолютно всіх значень сигналу від тренду його середніх значень на всій області його визначення, а не тільки максимальних на кожній з  $m$  ділянок. При цьому відпадає необхідність розрахунку точок перетину кривих сигналу і його тренду, визначення максимальних значень модулів їхніх відхилень на кожній з  $m$  ділянок, і (9) трансформується у

$$\bar{\bar{M}} = \frac{100\%}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{\Delta y_j}{\bar{y}_j} \right|. \quad (10)$$

Строго кажучи, розрахована за (10) величина  $\bar{\bar{M}}$  не є середнім коефіцієнтом амплітудної модуляції. Вона є середнім відносним відхиленням сигналу від тренду його середніх значень і скоріше подібна величині (3) для випадку, коли як еталонний сигнал використовується тренд середніх значень вхідного сигналу, який наближається до повністю очищеного від шумів сигналу. В табл. 3 наведені залежності від номеру ітерацій БМКСЗШВФ величин (9), (10), середньої  $\bar{\tau}_n$  та максимальної  $\tau_{n \max}$  тривалості ділянок  $n$ , на яких відхилення сигналу від тренду його середніх значень не

змінює знак. З метою коректного порівняння останніх двох величин з шириною вікна фільтрації в табл. 3 їхньою розмірністю є кількість відліків сигналу.

**Таблиця 3**

Но- мер іте- ра- ції $i$	Шири- на вікна фільт- рації $k$ , відліків	Сигнал напруги при постійному тренді				Сигнал струму при постійному тренді			
		Середній коефіцієнт модуляції $\bar{M}_u$ , %	Середнє відхилення від тренду $\bar{M}_u$ , %	Макс. тривалість ділянки $\tau_{n \max u}$ , відліків	Середня тривалість ділянки $\bar{\tau}_{nu}$ , відліків	Середній коефіцієнт модуляції $\bar{M}_i$ , %	Середнє відхилення від тренду $\bar{M}_i$ , %	Макс. тривалість ділянки $\tau_{n \max i}$ , відліків	Середня тривалість ділянки $\bar{\tau}_{ni}$ , відліків
0	–	1,560	1,423	27	4	17,465	18,621	91	6
1	3	1,609	1,265	39	9	15,233	16,907	115	11
2	7	1,480	1,079	67	15	15,685	15,913	140	28
3	15	1,194	0,842	74	27	22,897	15,351	162	69
4	31	0,908	0,621	250	53	20,103	14,438	242	87
5	63	0,836	0,508	350	115	24,647	12,775	285	139
6	127	1,060	0,530	756	173	25,702	10,860	300	173

При знаходженні цих величин (табл. 3) тренди середніх значень сигналів напруги і струму знаходилися тільки один раз – для вхідних сигналів. Методика знаходження трендів полягала у наступному. На першому етапі вхідні сигнали розбивалися на інтервали монотонності їх усереднених значень, на другому – для кожного з цих інтервалів засобами MS Excel знаходили лінії трендів та функції, які їх описували. На третьому етапі відбувалася стиковка трендів на границях цих інтервалів.

Як впливає з аналізу даних табл. 3, значення середнього коефіцієнту модуляції сигналу напруги  $\bar{M}_u$  (за виключенням шостої ітерації) монотонно зменшуються із збільшенням кількості ітерацій фільтрації  $i$ , що відповідає зменшенню складової високочастотних шумів у сигналах із збільшенням кількості ітерацій їх фільтрації (рис. 1, рис. 2). Проте для сигналу струму ця залежність виявилася немонотонною, незважаючи на те, що, виходячи з порівняння графіків вхідного (рис. 1) і відфільтрованого сигналів (рис. 2), складова високочастотних шумів в останньому істотно зменшилася. Це може бути пояснено випадковим характером розташування на області визначення реального сигналу його максимальних відхилень від тренду середніх значень, а також недосконалістю методики їх знаходження.

Натомість, значення середнього відхилення від тренду сигналу напруги  $\bar{M}_u$  (крім шостої ітерації) та сигналу струму  $\bar{M}_i$  монотонно зменшуються із зростанням кількості ітерацій (табл. 3). Як видно з порівняння наведених в табл. 3 значень величин (9) і (10),  $\bar{M}$  більший за  $\bar{M}$  у 1,1...2,5 рази в залежності від форми модулюючого сигналу. Виходячи з цього, у подальшому можна розраховувати тільки значення  $\bar{M}$ , що значно простіше, ніж  $\bar{M}$ , які будуть не більші, ніж  $2,5\bar{M}$ .

Однією з причин немонотонності зменшення величин  $\bar{M}$  та  $\bar{M}$  із зростанням кількості ітерацій фільтрації може бути зміна тренду середніх значень сигналів у процесі їхньої фільтрації. Для виключення цієї помилки методику знаходження  $\bar{M}$  і  $\bar{M}$  було вдосконалено: тренди середніх значень сигналів знаходили після кожної ітерації їх фільтрації. Отримані таким чином дані наведено в табл. 4. Як видно з порівняння даних табл. 3 і табл. 4, навіть вдосконалена методика знаходження  $\bar{M}$ , яка стала значно більш трудомісткою, не забезпечила монотонність його залежності від номеру ітерацій фільтрації сигналу струму. При цьому значення  $\bar{M}_u$  майже не змінилися. Тому як об'єктно-орієнтований критерій достатньої кількості ітерацій фільтрації пропонується порівняння величини  $2,5\bar{M}$ , знайденої за спрощеною методикою на кожній ітерації фільтрації сигналу, з граничним значенням, яке корелює з максимально допустимим значенням похибки апроксимації відфільтрованого сигналу.

Крім того, у разі існування локального мінімуму залежності  $\bar{M}(i)$  він також може слугувати критерієм необхідної кількості ітерацій фільтрації. Для контролю спотворень енергетичних характе-

ристик сигналів в процесі їхньої фільтрації разом з цим критерієм доцільно використовувати критерій гранично допустимих значень відносного відхилення площ під сигналом або його квадратом після  $i$ -ої ітерації від аналогічних площ вхідного сигналу  $\delta_s$  (8). Також зауважимо, що новим методом фільтрації сигналів від високочастотних шумів може бути побудова трендів його усереднених значень на кожному інтервалі їх монотонності.

**Таблиця 4**

Но- мер іте- рації $i$	Шири- на вікна фільт- рації $k$ , відліків	Сигнал напруги при адаптивному тренді				Сигнал струму при адаптивному тренді			
		Середній коефіцієнт модуляції $\bar{M}_u, \%$	Середнє відхилення від тренду $\bar{M}_u, \%$	Макс. тривалість ділянки $\tau_{n \max u}$ , відліків	Середня тривалість ділянки $\bar{\tau}_{nu}$ , відліків	Середній коефіцієнт модуляції $\bar{M}_i, \%$	Середнє відхилення від тренду $\bar{M}_i, \%$	Макс. тривалість ділянки $\tau_{n \max i}$ , відліків	Середня тривалість ділянки $\bar{\tau}_{ni}$ , відліків
0	–	1,560	1,423	28	5	17,465	18,621	91	6
1	3	1,568	1,271	118	8	13,782	14,658	118	11
2	7	1,504	1,088	67	16	15,148	13,643	144	27
3	15	1,196	0,858	75	27	17,846	12,805	160	60
4	31	0,915	0,642	251	53	16,235	11,784	240	82
5	63	0,836	0,528	346	115	14,523	10,422	287	107
6	127	0,870	0,544	1303	175	13,516	8,650	297	127

Як видно з табл. 3 і табл. 4, середня тривалість ділянки, на якій відхилення сигналу від тренду його середніх значень не змінює знак  $\bar{\tau}_n$  як для сигналів напруги, так і для сигналів струму, завжди більша або дорівнює ширині вікна фільтрації  $k$  на відповідній ітерації фільтрації. Тому, якщо відомий середній на області визначення сигналу напівперіод шумів у ньому, то ще одним об'єктно-орієнтованим критерієм необхідної кількості ітерацій фільтрації сигналів БМКСЗШВФ може бути ширина вікна фільтрації  $k$ , що змінюється з номером ітерації згідно з алгоритмом  $k_i = 2k_{i-1} + 1$  [7], яка задовольняє умові  $k \geq \bar{\tau}_n$ . Якщо є можливість визначити максимальну тривалість ділянки, на якій відхилення сигналу від тренду його середніх значень не змінює знак  $\tau_{n \max}$ , тобто максимальний напівперіод шумів на області визначення сигналу, то критерієм достатньої кількості ітерацій БМКСЗШВФ може бути ширина вікна фільтрації, більша або рівна йому:  $k \geq \bar{\tau}_{n \max}$ .

**Висновки.** 1. Серед розповсюджених на сьогодні критеріїв визначення необхідної кількості ітерацій фільтрації багатоітераційними методами неперіодичних нестационарних сигналів найбільш ефективним для напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому є перший локальний мінімум залежності від номеру ітерацій послідовної середньоквадратичної похибки чинної та попередньої ітерацій фільтрації, а об'єктно-орієнтовані критерії достатньої кількості ітерацій фільтрації таких сигналів в літературі взагалі не висвітлені.

2. Серед нових об'єктно-орієнтованих критеріїв достатньої кількості ітерацій фільтрації найбільш ефективними виявилися гранично допустиме значення середнього відносного відхилення сигналу від тренду його середніх значень, яке корелює з максимально допустимим значенням похибки апроксимації відфільтрованого сигналу, та ширина вікна фільтрації, більша за середній на області визначення сигналу напівперіод шуму.

3. З метою уникнення спотворення енергетичних характеристик сигналів при їх глибокій фільтрації разом з цими критеріями доцільно використовувати запропонований об'єктно-орієнтований критерій гранично допустимих значень відносного відхилення площ під сигналом або його квадратом після  $i$ -ої ітерації фільтрації від аналогічних площ вхідного сигналу.

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.
2. Гороновский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
3. Давыдов А.В. Сигналы и системы. Лекции и практикум на ПК. Введение в теорию сигналов и систем – Режим доступу: <http://geoin.org/signals/index.html>. – Дата доступу: 06.02.2017.

4. Загретдинов А.Р., Бусаров А.В., Бусаров В.В. Сравнение методов останова операций отсеивания при эмпирической модовой декомпозиции сигналов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3. – Режим доступа: [www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3238](http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3238). – Дата доступа: 06.02.2017.
5. Матвеев Ю.Н., Симончик К.К., Тропченко А.Ю., Хитров М.В. Цифровая обработка сигналов. – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 166 с.
6. Ціделко В.Д., Яремчук Н.А. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання. – К.: Політехніка, 2002. – 176 с.
7. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Порівняння ефективності згладжування сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому багатоітераційними методами фільтрації // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 4. – С. 3–13.
8. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-Ch., Tung C.C., Liu H.H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. Soc. London A, Math. Phys. Sci. – 1998. – Vol. 454. – Issue 1971. – Pp. 903–995.
9. Kabir M.A., Shahnaz C. Denoising of ECG signals based on noise reduction algorithms in EMD and wavelet domains // Biomedical Signal Processing and Control. – 2012. – No 7. – Pp. 481–489.
10. Karthikeyan P., Murugappan M., Yaacob S. ECG signal denoising using wavelet thresholding techniques in human stress assessment // International Journal on Electrical Engineering and Informatics. – 2012. – Vol. 4. – No 2. – Pp. 306–319.
11. Komaty A., Boudraa A.O., Augier B., Daré-Emzivat D. EMD-Based Filtering Using Similarity Measure Between Probability Density Functions of IMFs // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2014. – Vol. 63. – No 1. – Pp. 27–34.
12. Sadooghi M.S., Khadem S.E. A new performance evaluation scheme for jet engine vibration signal denoising // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 76–77. – Pp. 201–212.
13. Yang G., Liu Y., Wang Y., Zhu Z. EMD interval thresholding denoising based on similarity measure to select relevant modes // Signal Processing. – 2015. – Vol. 109. – Pp. 95–109.

УДК 621.3.014.14: 621.391.822.4

#### **КРИТЕРИИ НЕОБХОДИМОГО И ДОСТАТОЧНОГО КОЛИЧЕСТВА ИТЕРАЦИЙ ФИЛЬТРАЦИИ НЕПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ МНОГОИТЕРАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ**

**Н.А. Шидловская**, чл.-корр. НАН Украины, **С.Н. Захарченко**, докт. техн. наук, **А.П. Черкасский**  
**Институт электродинамики НАН Украины,**  
**пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.**  
**E-mail: [shydlovska@ied.org.ua](mailto:shydlovska@ied.org.ua), [snzakhar@ukr.net](mailto:snzakhar@ukr.net), [cherkassky\\_a@ukr.net](mailto:cherkassky_a@ukr.net)**

*Произведен анализ эффективности известных процедурно-ориентированных критериев определения необходимого количества итераций фильтрации нестационарных непериодических сигналов многоитерационным методом скользящего среднего с возрастающей шириной окна фильтрации на примере импульсов напряжения на плазмоэрозийной нагрузке и тока в ней. Рассмотрены две основные группы критериев, которые основаны на сравнении сигнала на текущей итерации его фильтрации либо с сигналом на предыдущей итерации, либо с эталонным сигналом, а также критерий, который определенной мерой имеет свойства критериев обеих этих групп. Показано низкую результативность и неуниверсальность известных критериев. Предложены новые объектно-ориентированные критерии необходимого и достаточного количества итераций фильтрации нестационарных непериодических сигналов, адаптивные к требованиям дальнейшей обработки сигналов, и приведен анализ их эффективности. Библ. 13, рис. 2, табл. 4.*

**Ключевые слова:** нестационарные непериодические сигналы, многоитерационные методы фильтрации сигналов, критерии необходимого и достаточного количества итераций.



## CRITERIA FOR THE NECESSARY AND SUFFICIENT NUMBER OF ITERATIONS OF FILTERING NON-PERIODIC NON-STATIONARY SIGNALS BY MULTI-ITERATIVE METHODS

N.A. Shydlovska, S.M. Zakharchenko, O.P. Cherkaskyi  
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.  
E-mail: shydlovska@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net, cherkassky\_a@ukr.net

*An analysis of efficiency of procedure-oriented criteria for determining the required number of filtration iterations of non-stationary non-periodic signals by the multi-iterative method of the moving average with an increasing width of the filtering window on an instance of pulses of voltage on the plasma-erosive load and of current in it had fulfilled. Two main groups of criteria are considered which are based on a comparison of the signal at the current iteration of its filtering either with the signal at the previous iteration or with a reference signal. Also criterion which has properties of criteria of both these groups is considered. The low effectiveness and nonuniversality of the known criteria is shown. New objectively-oriented criteria for the necessary and sufficient number of iterations of filtering non-stationary non-periodic signals, adaptive to the requirements for further signal processing, are proposed and an analysis of their effectiveness had fulfilled. References 13, figures 2, tables 4.*

**Key words:** non-stationary non-periodic signals, multi-iterative methods of signals filtering of, criteria necessary and sufficient number of iterations.

1. Baskakov S.I. Radio engineering circuits and signals. – Moskva: Vysshaya shkola, 1988. – 448 p. (Rus)
2. Goronovsky I.S. Radio engineering circuits and signals. – Moskva: Radio i svyaz, 1986. – 512 p. (Rus)
3. Davydov A.V. Signals and Systems. Lectures and practical work on the PC. Introduction to Signals and Systems Theory. – Available at: <http://geoin.org/signals/index.html>. (Accessed 06.02.2017). (Rus)
4. Zagretidinov A.R., Busarov A.V., Busarov V.V. Comparison of methods for stopping sifting in the empirical mode decomposition of signals // Inzhenernyi vestnik Dona. – 2015. – No 3. – Available at: [www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3238](http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3238). (Accessed 06.02.2017). (Rus)
5. Matveyev Yu.N., Simonchik K.K., Tropchenko A.Yu., Khitrov M.V. Digital processing of signals. – Sankt-Petersburg: S-PbNIU ITMO, 2013. – 166 p. (Rus)
6. Tsidelko V.D., Yaremchuk N.A. Measurement uncertainty. Data processing and presenting the measurement result. – Kyiv: Politekhnik, 2002. – 176 p. (Ukr)
7. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Comparison of the smoothing efficiency of signals of voltage on the plasma-erosive load and its current by multi-iterative filtration methods // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2017. – No 4. – Pp. 3–13. (Ukr)
8. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-Ch., Tung C.C., Liu H.H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. Soc. London A, Math. Phys. Sci. – 1998. – Vol. 454. – Issue 1971. – Pp. 903–995.
9. Kabir M.A., Shahnaz C. Denoising of ECG signals based on noise reduction algorithms in EMD and wavelet domains // Biomedical Signal Processing and Control. – 2012. – No 7. – Pp. 481–489.
10. Karthikeyan P., Murugappan M., Yaacob S. ECG signal denoising using wavelet thresholding techniques in human stress assessment // International Journal on Electrical Engineering and Informatics. – 2012. – Vol. 4. – No 2. – Pp. 306–319.
11. Komaty A., Boudraa A.O., Augier B., Daré-Emzivat D. EMD-Based Filtering Using Similarity Measure Between Probability Density Functions of IMFs // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2014. – Vol. 63. – No 1. – Pp. 27–34.
12. Sadooghi M.S., Khadem S.E. A new performance evaluation scheme for jet engine vibration signal denoising // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 76–77. – Pp. 201–212.
13. Yang G., Liu Y., Wang Y., Zhu Z. EMD interval thresholding denoising based on similarity measure to select relevant modes // Signal Processing. – 2015. – Vol. 109. – Pp. 95–109.

Надійшла 23.05.2017  
Остаточний варіант 03.07.2017