

УДК 621.3.014.14: 621.391.822.4

ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗГЛАДЖУВАННЯ СИГНАЛІВ НАПРУГИ НА ПЛАЗМОЕРОЗІЙНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ТА СТРУМУ В НЬОМУ БАГАТОІТЕРАЦІЙНИМИ МЕТОДАМИ ФІЛЬТРАЦІЇ

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@bk.ru, cherkassky_a@ukr.net

Охарактеризовано сигнали напруги на багатоканальному плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому, отримані в результаті розряду на нього конденсатора у загальному випадку. Розглянуто вплив параметрів елементів розрядного кола і початкових умов на них на перехідний процес в плазмоерозійному навантаженні та на коефіцієнт стохастичної амплітудної модуляції розрядного струму і напруги на навантаженні. Наведено критичний аналіз методів фільтрації сигналів. Описано фільтрацію сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому методом їх часткового відновлення за їх неповною модовою декомпозицією. Описано алгоритм нового багатоітераційного методу ковзного середнього із зростаючою шириною вікна фільтрації нестационарних неперіодичних сигналів. Наведено порівняльний аналіз ефективності фільтрації сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому новим методом та методом часткового відновлення сигналу за його неповною модовою декомпозицією. Бібл. 22, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: плазмоерозійне навантаження, розрядний струм, нестационарні неперіодичні сигнали, методи фільтрації сигналів.

Вступ. Одними із найефективніших методів підвищення достовірності результатів вимірювання є їх усереднення і фільтрація від завад та інформації, яка не використовується при подальшому аналізі. Різноманіття видів сигналів [3] і завад [5], які зустрічаються в сучасній техніці, породжує велику кількість методів їхньої фільтрації [5, 9, 17–19]. Розширення видів сигналів та збільшення алгоритмів їхньої обробки, що неодмінно відбувається в результаті розвинення теорії інформації та удосконалення технічних засобів, потребують розвитку існуючих та розроблення нових, ефективних методів фільтрації та обробки сигналів.

Метою даної роботи є розроблення нового ефективного методу згладжування і фільтрації нестационарних сигналів, зокрема напруги на багатоканальному плазмоерозійному навантаженні [15] та струму в ньому.

Ідентифікація сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому за їх формою. Перша мода осцилограми струму в багатоканальному плазмоерозійному навантаженні $i(t)$ [15] та відповідна їй синхронна осцилограма напруги на ньому $u(t)$ показані на рис. 1. Осцилограми характерні для аперіодичного розряду робочого конденсатора C на таке навантаження у послідовному RLC -контурі з постійною структурою [11]. Умови і режими отримання цих осцилограм детально описані в [15].

При аперіодичному розряді, на відміну від коливального, питома вага розмаху високочастотних флуктуацій розрядного струму $i(t)$ та напруги на навантаженні $u(t)$ (коефіцієнт їх амплітудної модуляції [5]), викликаних стохастичними процесами виникнення, розвитку, міграції по поверхні гранул та зникнення як окремих плазмових каналів (період флуктуацій менше 10 мкс), так і одночасно існуючих їхніх груп (тривалість піків і мод основного тренду від 50 мкс до кількох сотень), дуже велика і може складати до 50% для струму і до 30% – для напруги [15].

Коливальний розряд в послідовному лінійному RLC -контурі спостерігається, якщо визначена за класичною формулою його добротність $Q = \sqrt{L/C}/R$ більша, ніж 0,5. Для нелінійних RLC -контурів з постійною структурою поняття добротності має сенс лише для усереднених або миттєвих значень параметрів їх елементів. Якщо активний елемент такого контуру є нелінійним, як у випадку з плазмоерозійним навантаженням, то для визначення усередненого значення його добротності доцільно використовувати середнє протягом всієї тривалості імпульсу T значення активного опору навантаження $\bar{R}_1 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u(t)}{i(t)} dt$ або $\bar{R}_2 = \frac{\int_0^T u(t)i(t) dt}{\int_0^T i^2(t) dt}$ [10].

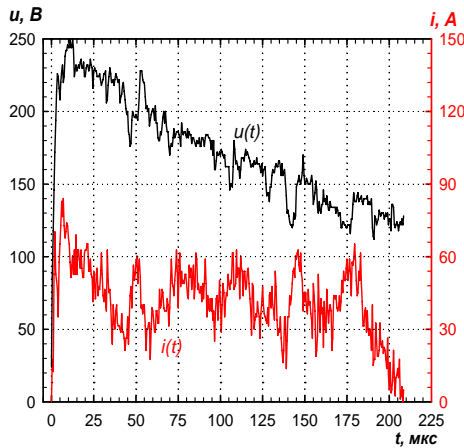


Рис. 1

Оскільки як миттєві, так і середні значення активного опору плазмоерозійного навантаження зменшуються із зростанням прикладеної до нього напруги або його струму [13], то миттєві значення добротності розрядного контуру з нелінійним активним навантаженням, а також її середні значення збільшуються. Часто зустрічається ситуація, коли при амплітудних та близьких до них значеннях імпульсів напруги на навантаженні та струму в ньому миттєві значення добротності розрядного контуру істотно вищі ніж 0,5, а для решти значень напруги чи струму – нижчі. Тому використовувати прийняті в теорії лінійних кіл поняття для опису перехідних процесів в таких колах можна лише з певними умовами. Об'єктивним фізичним критерієм коливального розряду в таких колах може бути лише факт зміни полярності напруги на навантаженні протягом одного періоду розрядних імпульсів. Математичним критерієм необхідних умов коливального розряду в таких колах може бути більше за 0,5 середнє протягом тривалості всього розрядного імпульсу значення добротності контуру. Але ці умови не є достатніми умовами коливального за фізичним критерієм перехідного процесу для будь-яких видів залежності активного опору нелінійного навантаження від струму, який протікає в ньому.

Для описаних умов проведення експериментів [15] за прогнозами на основі даних [13] коливальний за фізичним критерієм розряд мав би відбуватися при значенні початкової напруги на робочому конденсаторі від 600 В, а амплітудні значення струму при цьому сягали б 6000 А. При високих значеннях амплітуд імпульсів напруги і струму, а особливо при коливальному розряді конденсатора, відносний розмах їх високочастотних флуктуацій (коефіцієнт амплітудної модуляції) в рази нижчий, ніж при аперіодичному розряді (рис. 1) [14]. Крім того, в сигналах, які досліджуються, питома вага електромагнітних завад, викликаних роботою радіоелектронної апаратури, електричних машин та природнім фоном випромінювання, більша при малих значеннях корисних сигналів. Тому осцилограми напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому, отримані саме при аперіодичному розряді робочого конденсатора, найбільше потребують фільтрації та згладжування.

Стохастичні процеси виникнення, еволюції, міграції та згасання плазмових каналів у зануреному в робочу рідину шарі металевих гранул [15], а також залежність еквівалентного електричного опору такого середовища від прикладеної напруги та від струму в ньому [13] призводять до стохастичних змін тривалості та форми розрядних імпульсів напруги та струму в плазмоерозійному навантаженні. Тому, навіть у випадку, коли початкові умови на реактивних елементах розрядного контуру повністю однакові від імпульсу до імпульсу, а частота повторення останніх фіксована, період імпульсів в строгому сенсі його визначення [9] не є постійним. Резюмуючи сказане вище, зазначимо, що у загальному випадку сигнали напруги на багатоканальному плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому, отримані в результаті розряду на нього робочого конденсатора, можна охарактеризувати як неперіодичні імпульсні, нестационарні, недетерміновані, із стохастичною амплітудною модуляцією [3, 5].

Згладжування осцилограм струму і напруги усередненням великої їх кількості. Якщо в подальшому не планується окремо розглядати та аналізувати високочастотні флуктуації відносно основного тренду сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому, то одним з найефективніших методів фільтрації стохастичних складових як корисного сигналу, так і шумів, є усереднення великої кількості сигналів, знятих в квазіоднакових умовах [15]. Це можливо, наприк-

лад, при побудові нелінійних [13] та переважної більшості параметричних [15] моделей опору плазмоерозійних навантажень, в яких не відображаються його стохастичні зміни. Дана операція фактично дозволяє знайти початкові моменти першого порядку випадкових величин [7] (середньоарифметичні значення або математичні сподівання) значень сигналів у кожний момент часу t_j з області їхнього визначення.

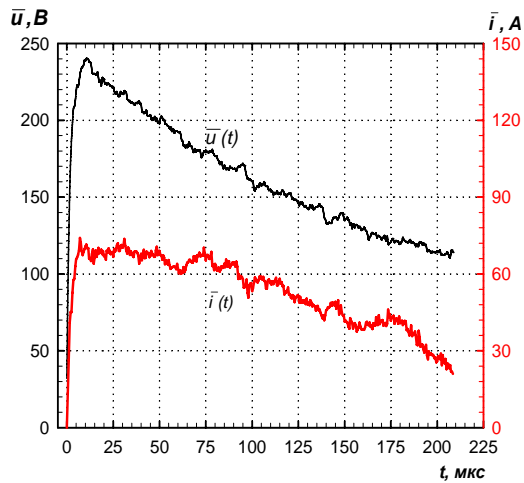


Рис. 2

зійних навантажень. Тому наступною операцією попередньої обробки сигналів є їхня фільтрація. При цьому дуже важливо разом із шумами не відфільтрувати високочастотну інформаційну складову сигналу, що може призвести до спотворення його форми, наприклад, до так званого «завалу фронтів», тобто до істотного зменшення модуля першої похідної сигналу на його початку або наприкінці.

Аналіз ефективності методів фільтрації сигналів. Всі відомі на сьогодні методи фільтрації сигналів можна віднести до однієї з двох груп – на основі точкових перетворень, в яких обробка кожного елемента (відліку у часі) вхідного сигналу $y(t)$ виконується незалежно від його сусідніх елементів, та на основі локальних перетворень, в яких формування кожного елемента обробленого сигналу $\hat{y}(t)$ є результатом функції від певної множини сусідніх елементів вхідного сигналу, при цьому місце розташування елемента обробленого сигналу задається координатами центрального елемента локального околу елементів вхідного сигналу [9].

Розглянемо спочатку першу групу методів. Історично першими методами фільтрації сигналів були методи, що базуються на перетвореннях Фур'є (дискретному, швидкому і безперервному), які набули найбільшого поширення [5, 9]. Вони здійснюють лінійну фільтрацію в частотній області і характеризуються чіткими алгоритмами та помірною трудомісткістю. Ці методи можуть бути застосовані тільки до стаціонарних сигналів. Їхнім недоліком є висока чутливість до локальних стрибків та піків функції, наявність яких істотно знижує ефективність фільтрації даними методами.

Високу ефективність відокремлення корисного сигналу від шумів демонструє оптимальна лінійна фільтрація безперервних сигналів за допомогою фільтра Колмогорова-Вінера. Найбільшу ефективність такі фільтри демонструють у випадку, коли спектри корисного сигналу та шумів не перекриваються, що на практиці зустрічається не часто [5]. Трудомісткість такої фільтрації порівняно невелика, але об'єктами даної фільтрації можуть бути лише безперервні стаціонарні сигнали, які не корелюють із шумами та спектральна щільність яких відома, тобто задані їх статистичні характеристики [5, 9].

Для нестаціонарних сигналів обмеженої тривалості, зокрема модульованих сигналів, застосовується оптимальна лінійна фільтрація за допомогою фільтрів Калмана, яка більш трудомістка, ніж попередня [5, 21]. Для нестаціонарних сигналів, які є одномірними марковськими гаусовськими процесами, розроблена теорія нелінійної фільтрації, яка ще більш трудомістка [5].

Для аналізу і фільтрації неперіодичних та нестаціонарних сигналів застосовується група методів, заснована на вейвлет-аналізі [1, 8, 9, 20]. На відміну від перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення дозволяє досліджувати зміну у часі як амплітуди, так і частоти сигналів, що важливо при дослідженні нестаціонарних сигналів. В такому аналізі частота і час розглядаються як незалежні змінні, і з'являється можливість аналізувати властивості сигналів одночасно у частотному та часовому просторах [1, 8]. До недоліків вейвлет-аналізу слід віднести велику складність і трудомісткість, а та-

Усереднення за вибіркою з 20 пар синхронних осцилограм напруги $\bar{u}(t)$ і струму $\bar{i}(t)$ плазмоерозійного навантаження, які зняти в квазіоднакових [15] умовах з осцилограми рис. 1, показані на рис. 2. Як видно з порівняння рис. 1 і рис. 2, усереднення навіть по вибірці малої потужності дозволяє в разі зменшити розмах стохастичних високочастотних флуктуацій сигналів, викликаних шумами, а також утворенням, розвитком, міграцією і зникненням як поодиноких каналів електропровідності в шарі гранул, так і одночасно існуючих їхніх груп. Однак навіть усереднені осцилограми рис. 2 містять помітні флуктуації, які утруднюють аналіз основного тренду сигналів та призводять до збільшення параметрів нев'язки [13] при їхній апроксимації аналітичними функціями в процесі побудови моделей електричного опору плазмоерозійних навантажень.

кож необхідність побудови унікальної базисної вейвлет-функції для кожного виду сигналу, що робить метод не адаптивним, а фільтр не універсальним [1, 8].

Частину із вказаних вище труднощів дозволяють перебороти методи з групи так званих методів емпіричних модових декомпозицій – empirical mode decompositions (EMD) [4, 17–19]. Найбільш поширеним серед них є метод на основі перетворення Гільберта-Хуанга [17]. Він базується на розкладенні вхідного сигналу на емпіричні моди (аналог гармонік в перетворенні Фур'є), виходячи з його форми без задання спеціальної базисної функції. Згідно з спеціальними критеріями одна або декілька найбільш високочастотних мод вилучаються з відфільтрованого сигналу, який є неповною модовою композицією вхідного сигналу. Даний метод може бути застосований для широкого загалу сигналів, в тому числі нестационарних неперіодичних недетермінованих із стохастичним характером флуктуацій. Крім широкого загалу сигналів, які можуть бути відфільтровані за допомогою даного методу, його перевагою є відносно простий алгоритм. Суттєвими недоліками методу є недостатня теоретична розробленість, відсутність універсальних критеріїв визначення кількості мод, які треба вилучити при відновленні сигналу, що вимагає евристичних підходів при їхньому визначенні, а також значна трудомісткість [4, 17, 18].

В одному із різновидів цього методу використовується так звана модифікована емпірична модова декомпозиція, де кожна або декілька із отриманих мод додатково фільтрується, і відфільтровані моди не виключаються із загальної композиції, а невідфільтровані можуть бути вилучені в залежності від задач фільтрації [17, 18]. Це дозволяє підвищити якість відфільтровування сигналу як від високочастотних, так і від низькочастотних шумів, значно зменшивши при цьому імовірність помилкового відфільтровування високочастотної складової корисного сигналу. Натомість трудомісткість модифікованого методу значно зростає.

Розглянемо другу групу методів фільтрації. Одним із методів цієї групи є метод ковзної медіани [1, 12]. Сутність його полягає у наступному. На першому кроці значення сигналу $y(t)$ в середині вікна фільтрації, тобто інтервалу часу $[t_j - \nu, t_j + \nu]$ з центром в точці t_j , сортуються в порядку зростання або спаду. Після такого сортування значення, яке знаходиться в центрі інтервалу і відповідає точці t_j , поступає на вихід фільтру. Це значення є статистичною медіаною значень даного інтервалу за кількістю $2\nu + 1$ відліків, тобто половина значень сигналу з даного інтервалу менші цього значення, а половина – більші, що і обумовило назву методу. Якщо у середині вікна фільтрації знаходиться парна кількість відліків, то в модифікованому методі ковзної медіани в якості медіани даного інтервалу вибирається середнє арифметичне двох центральних відліків. На другому кроці вікно фільтрації зсувається на один відлік $[t_{j+1} - \nu, t_{j+1} + \nu]$, і описана на першому кроці процедура повторюється [9]. Операції повторюються, поки не буде пройдено весь діапазон відліків з області визначення сигналу $t \in [0, \tau]$.

Якщо відлік t_j віддалений від початку або кінця діапазону на кількість відліків меншу, ніж ν , то обчислення медіани у вікні фільтрації, яке вміщує 2ν відліків, неможливо. Щоб не зменшувати область визначення відфільтрованого сигналу, для таких випадків в [16, 22] запропоновано обчислювати медіану за трьома відліками. Згідно з даною процедурою для початкового значення відфільтрованого сигналу $\hat{y}(t_0)$ медіана вираховується за трьома значеннями вхідного сигналу: $y(t_0)$, $y(t_1)$ та $(3y(t_1) - 2y(t_2))$. Для відліків в кінці області визначення сигналу використовується аналогічна процедура симетрично відносно її центру.

Метод ковзної медіани відноситься до нелінійних, тому оброблені за його допомогою сигнали не можуть бути повернуті до попереднього вигляду зворотними перетвореннями, а статистичні параметри сигналу змінюються [9]. Метод може бути застосований до широкого класу сигналів, в тому числі і до недетермінованих, імпульсних, неперіодичних, нестационарних та інших. Його перевагами є стійкість до піків та викидів вхідного сигналу, висока ефективність відфільтровування імпульсних шумів, тривалістю менше половини вікна фільтрації, які не корелюють або майже не корелюють з корисним сигналом, мале спотворення сходинко- та пілкоподібних сигналів за умови малого розміру вікна фільтрації і здатність зберігати різкі границі об'єктів фільтрації. Метод характеризується простим алгоритмом і малими об'ємами обчислень. Серед недоліків методу – менша порівняно з лінійними методами ефективність відфільтровування гаусових шумів, а також «сплощення» вершин

трикутників і піків у відфільтрованому сигналі та звуження області визначення сигналу при застосуванні класичного алгоритму, особливо в разі широкого вікна або здійснення процедури фільтрації більше одного разу.

Наступним методом, який використовує локальні перетворення [9], є метод ковзного середнього [2]. Класичний варіант даного методу належить до лінійних, тому його ефективність при відфільтровуванні гаусових шумів вище, ніж у метода ковзної медіани. Сутність його полягає у наступному. На першому кроці так само, як і в попередньому методі, на осі абсцис ряду даних задається ширина вікна фільтрації $[t_j - \nu, t_j + \nu]$. На другому кроці визначається середнє арифметичне значень функції $y(t)$, аргументи яких знаходяться в середині вікна фільтрації. Це значення присвоюється відфільтрованому сигналу в момент часу t_j , тобто $\hat{y}(t_j) = \text{average}[y(t_j - \nu), \dots, y(t_j + \nu)]$. На третьому кроці вікно фільтрації зсувається на один відлік, тобто його центр переміщується в точку t_{j+1} , і процедури першого і другого кроків повторюються, доки весь діапазон області визначення сигналу не буде пройдено [2].

Як і попередній, даний метод може бути застосований до широкого класу сигналів, в тому числі і до недетермінованих, імпульсних, неперіодичних, нестационарних та інших. Серед переваг методу слід визначити більшу ефективність відфільтровування гаусових шумів, ніж у попереднього методу і нелінійних методів фільтрації взагалі, відсутність «сплощення» трикутних вершин та піків імпульсу, стійкість до піків та викидів вхідного сигналу порівняно з перетвореннями Фур'є. Також, як і попередній, даний метод характеризується простим алгоритмом і малими об'ємами обчислень. Серед недоліків методу слід відзначити так званий «завал» фронтів відфільтрованого сигналу та звуження області визначення сигналу при застосуванні класичного алгоритму, особливо в разі широкого вікна фільтрації або здійснення процедури фільтрації більше одного разу.

Існують модифікації методу ковзного середнього, відомі як методи лінійно зваженого ковзного середнього та експоненціально зваженого ковзного середнього [2]. В методі лінійно зваженого ковзного середнього кожному члену вхідної функції ставиться у відповідність ваговий коефіцієнт. Вагові коефіцієнти утворюють арифметичну прогресію, тобто останні члени вхідної функції вважаються більш значущими, ніж перші. В методі експоненціально зваженого ковзного середнього вагові коефіцієнти членів вхідної функції зменшуються експоненціально і ніколи не дорівнюють нулю. Ці різновиди методу можуть бути корисними при обробці деяких видів сигналів.

Як впливає з проведеного аналізу, для фільтрації недетермінованих, імпульсних, неперіодичних та нестационарних сигналів існує не так багато методів, які до того ж мають недоліки, що за певних умов можуть бути критичними. Найбільш ефективним із класичних методів для фільтрації неперіодичних багатомодальних сигналів із стохастичною високочастотною амплітудною модуляцією є метод часткового відновлення сигналів за їх EMD [18, 19] на основі перетворення Гільберта-Хуанга [17].

Фільтрація усереднених осцилограм напруги і струму методом часткового відновлення за їх EMD. На першому етапі методу вхідний сигнал $y(t)$ представляється множиною внутрішніх модових функцій – intrinsic mode functions (IMF) $c_i(t)$, до яких висувається ряд вимог [17–19], та

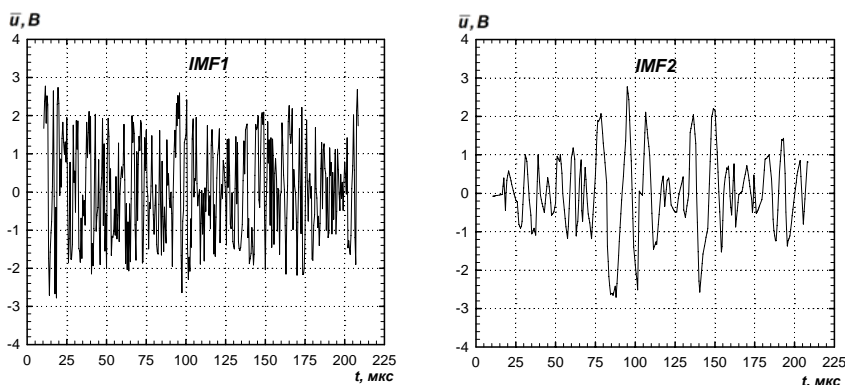


Рис. 3, а, б

залишку $r_n(t)$, з якого уже неможливо виділити IMF:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t).$$

Зупинення операції виділення IMF із залишку $r_n(t)$ може бути з двох причин: по-перше, після виділення попередніх мод $r_n(t)$ може бути монотонною функцією з одним екстремумом, або в окремих випадках взагалі без екстремумів. По-друге, за своїми значеннями або потужністю

він може бути несуттєвим порівняно з вхідним сигналом [4, 17]. Знайдені нами за описаною в [17, 19] методикою перша і друга IMF для сигналу $\bar{u}(t)$ та перша, друга і третя IMF для сигналу $\bar{i}(t)$ (рис. 2) показані на рис. 3, а, б і рис. 4, а, б, в відповідно.

Усереднені синхронні осцилограми імпульсів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому (рис. 2), які потрібно відфільтрувати, складаються із двох характерних ділянок: круто зростаючого переднього та плавно спадаючого заднього фронтів. Кількість відліків на передньому фронті як напруги на плазмоерозійному навантаженні, так і струму в ньому, мала для ефективного виділення IMF (всього лише близько 20), що спричинено його малою тривалістю.

Крім того, оскільки передні фронти як напруги, та і струму на рис. 2 дуже круті, то відношення значень сигналу до шуму [6] на цій ділянці дуже високе. Враховуючи сказане вище, фільтрацію класичним методом часткового відновлення сигналу за його неповною EMD будемо виконувати тільки для задніх фронтів усереднених сигналів напруги і струму рис. 2.

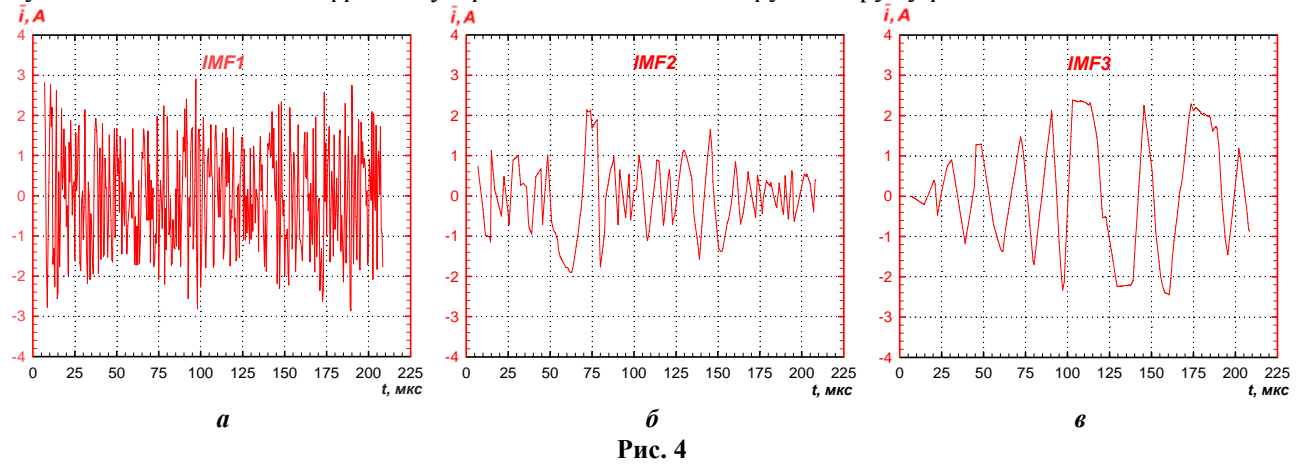


Рис. 4

На другому етапі методу висувається припущення, що частина IMF сигналу вміщує тільки його шумову складову. У переважній більшості випадків ними є перші m найбільш високочастотних мод, тоді як решта $n-m$ більш низькочастотних мод відтворюють лише корисну складову сигналу без шумів [4, 18, 19]. Таким чином, відфільтрований сигнал $\hat{y}(t)$ складається із залишку $r_n(t)$ та обме-

женої кількості $n-m$ низькочастотних IMF: $\hat{y}(t) = \sum_{i=m+1}^n c_i(t) + r_n(t)$. При цьому ключовим моментом є визначення номеру IMF, починаючи з якого моди вміщують лише корисну складову сигналу. Для його визначення в [19] запропоновано критерій мінімуму послідовної середньоквадратичної похибки – consecutive mean square error (CMSE) внутрішньої модової функції, яка для кожної моди розраховується за формулою

$$CMSE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [IMF(t_j)]^2, \quad (1)$$

де N – загальна кількість відліків сигналу.

Фізичний зміст виразу (1) – середня потужність моди сигналу напруги або струму у випадку, якщо опір навантаження складає 1 Ом [6, 9]. Після розрахунку CMSE (1) для кожної IMF будується її залежність від номеру модової функції. При цьому першою вважається найбільш високочастотна IMF. Перший локальний мінімум цієї залежності є критерієм, який визначає номер IMF, після якого моди вміщують лише корисну складову сигналу. Тобто відновлення сигналу починається з наступної за цим номером IMF. Для кожної з отриманих (рис. 3 і рис. 4) IMF за формулою (1) були знайдені значення їх CMSE, які наведені в табл. 1.

Як впливає з аналізу цих даних, згідно з критерієм мінімуму CMSE, відновлення обох відфільтрованих від шумів сигналів за їх неповними EMD, повинно відбуватися, починаючи з третьої IMF. Тобто, перші дві IMF, згідно з цим критерієм, вміщують лише шуми і повинні бути відкинуті. Відновлені без першої і

Таблиця 1		
i_{IMF}	$CMSE_i \bar{u}(t), B^2$	$CMSE_i \bar{i}(t), A^2$
1	1,766498	1,73844
2	0,936899	0,596573
3	відсутнє	1,68534

другої IMF усереднені сигнали напруги $\bar{u}(t)_{EMD}$ на плазмоерозійному навантаженні і струму в ньому $\bar{i}(t)_{EMD}$ показані на рис. 5 суцільними лініями.

Як видно з порівняння графіків рис. 2 і рис. 5, даний метод фільтрації дозволяє в разі зменшити розмахи високочастотних флуктуацій напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому, роблячи сигнали майже «гладкими» і при цьому не спотворюючи форми їх основних трендів. Він дозволяє досягати високих результатів навіть при обробці таких складних сигналів як імпульси напруги на багатоканальному плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому.

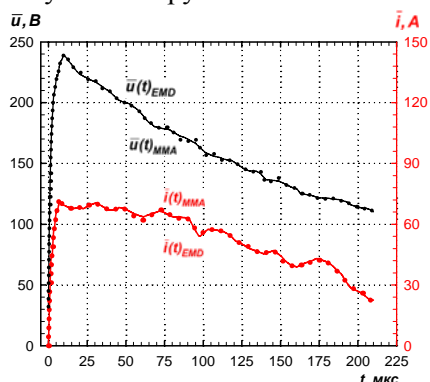


Рис. 5

На другому кроці значення відфільтрованого сигналу на границях інтервалів монотонності були зафіксовані. Ці дії унеможливили зсув у часі реперних точок вхідного сигналу та зменшення значень відфільтрованого сигналу в них, як це відбувалося в класичному методі ковзного середнього і призводило до «завалу» фронтів, особливо за умов великої ширини вікна фільтрації або числа ітерацій фільтрування. Описана вище процедура має аналогію з завданням геометричним методом базисної функції, яка використовується при вейвлет-перетворенні [8, 9, 20].

На третьому кроці для кожного з визначених на першому кроці чинного алгоритму інтервалів монотонності основного тренду вхідного сигналу був застосований метод ковзного середнього з мінімально можливою шириною вікна фільтрації, яка дорівнювала трьом відлікам сигналу. Якщо глибина фільтрації на першій ітерації виявилася недостатньою, то виконувалися наступні ітерації, поки відфільтрований сигнал не задовольняв певним критеріям фільтрації. На наступних ітераціях ширина вікна фільтрації k_i збільшувалася за рекурентною формулою

$$k_i = 2k_{i-1} + 1, \quad (2)$$

де i – номер ітерації операції фільтрації сигналу.

Як впливає з (2), ширина вікна фільтрації на кожній наступній ітерації приблизно подвоювалася порівняно з попередньою, але кількість відліків в середині вікна завжди була непарною, що потрібно для підвищення ефективності методу ковзного середнього. Збільшення ширини вікна фільтрації на кожній наступній ітерації діє аналогічно вилученню наступних, менш високочастотних IMF в методі фільтрації сигналів частковим їх відновленням з EMD, або вилученню наступних з кінця гармонік, отриманих за допомогою перетворення Фур'є [9]. Кратне збільшення ширини вікна фільтрації аналогічне кратному збільшенню періоду гармонічних складових вхідного сигналу, отриманих за допомогою дискретного перетворення Фур'є [9].

В залежності від співвідношення сигналу до шуму [6] та інших критеріїв припинення фільтрації число її ітерацій на кожному інтервалі монотонності основного тренду вибиралося індивідуально, тобто адаптивно до сигналу. В запропонованому методі втрачені при збільшенні ширини вікна фільтрації відліки поблизу границь інтервалів фільтрації відновлювалися за їхніми значеннями на попередніх ітераціях фільтрації. Це дозволило зберегти область визначення сигналу, що має особливо велике значення при коректній фільтрації сигналів з крутими фронтами.

Критерієм визначення кількості ітерацій, як і в попередньому методі, був перший локальний мінімум залежності CMSE від порядкового номеру ітерації. Оскільки в даному методі IMF не виділялися, то вираз (1) був застосований у своєму загальному вигляді [19]

$$CMSE_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\hat{y}(t_j)_i - \hat{y}(t_j)_{i-1} \right]^2, \quad (3)$$

де $\hat{y}(t_j)_i$ – значення відфільтрованого сигналу після i -ої ітерації фільтрації; $\hat{y}(t_j)_{i-1}$ – значення відфільтрованого сигналу після $(i-1)$ -ої (попередньої) ітерації фільтрації.

Залежність (3) від порядкового номеру ітерацій i фільтрації новим методом для усереднених сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні $\bar{u}(t)$ і струму в ньому $\bar{i}(t)$ представлена дискретно в табл. 2.

Таблиця 2

i	k_i відліків	$CMSE_i \bar{u}(t),$ B^2	$ \bar{\delta} _{\bar{u}(t)EMD},$ %	$CMSE_i \bar{i}(t),$ A^2	$ \bar{\delta} _{\bar{i}(t)EMD},$ %
1	3	0,5844	0,7625	0,9286	1,8177
2	7	0,5060	0,5273	0,3607	1,2457
3	15	0,5556	0,2972	0,2290	0,9099
4	31	0,6767	0,4248	0,5926	1,6505
5	63	0,2637	0,5983	0,9070	3,1196
6	127	0,3548	0,7325	1,2217	4,6813

фільтрації сигналів напруги і струму новим методом, тоді як попереднім можливі були тільки 2 і 3 ітерації відповідно.

Критерій першого локального мінімуму залежності $CMSE_i$ (2) фактично давав максимальну можливу або близьку до неї кількість ітерацій фільтрації для методу часткового відновлення сигналу за його неповною EMD, однак його аналог (3) для нового методу таких властивостей не виявив. Очевидно, що кількість операцій фільтрації новим методом доцільно визначати не тільки за критерієм локального мінімуму залежності $CMSE_i$ (3), а і виходячи з потреб конкретної задачі фільтрації. Так, найменшу глибину фільтрації доцільно застосовувати для сигналів, які є основою побудови стохастичних і параметрично-стохастичних моделей, середню – для параметричних, а найбільшу – для нелінійних.

Крапками на рис. 5 показані відфільтровані багатоітераційним методом ковзною середнього із зростаючою шириною вікна фільтрації усереднені сигнали рис. 2 напруги $\bar{u}(t)_{MMA}$ та струму $\bar{i}(t)_{MMA}$. При цьому згідно з даними табл. 2, за критерієм мінімуму (3) було використано 2 ітерації для сигналу напруги і 3 – для сигналу струму. Як видно з графіків рис. 5, результати, отримані обома методами, практично співпадають. При цьому об'єм обчислень при використанні нового методу і його трудомісткість на порядки менші, ніж попереднього.

Для кожної ітерації нового методу в табл. 2 представлені середні значення модулів відносних відхилень сигналів, відфільтрованих новим методом від сигналів, відфільтрованих двома ітераціями методу часткового відновлення сигналу за його неповною EMD для напруги

$$|\bar{\delta}|_{\bar{u}(t)EMD} = \frac{100\%}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \left| \frac{\bar{u}(t_j)_{MMA} - \bar{u}(t_j)_{EMD}}{\bar{u}(t_j)_{EMD}} \right| \text{ і для струму } |\bar{\delta}|_{\bar{i}(t)EMD} = \frac{100\%}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \left| \frac{\bar{i}(t_j)_{MMA} - \bar{i}(t_j)_{EMD}}{\bar{i}(t_j)_{EMD}} \right|.$$

Як видно з динаміки залежності цих величин від номеру ітерації фільтрації новим методом, найкращі співпадіння сигналів напруги і струму, відфільтрованих двома ітераціями попереднього методу, з сигналами, відфільтрованими новим методом, спостерігаються для його третьої ітерації і становлять менше 0,3% для сигналу напруги і менше 1% – для струму.

Оскільки отримані у такий спосіб кількості ітерацій фільтрації відрізняються від значень, отриманих за критерієм першого локального мінімуму залежності $CMSE_i$ (3) від номеру ітерації фільтрації, то цей критерій не є універсальним. При подальшому збільшенні числа ітерацій фільтрації величини $|\bar{\delta}|_{\bar{u}(t)EMD}$ і $|\bar{\delta}|_{\bar{i}(t)EMD}$ збільшуються, оскільки амплітуда високочастотних флуктуацій сигналів, відфільтрованих новим методом стає меншою, ніж сигналів, відфільтрованих попереднім методом. Тобто новий метод дозволяє здійснити більш глибоку і якісну фільтрацію, ніж метод часткового відновлення сигналу за його неповною EMD, хоча для цього потрібна більша кількість ітерацій. Але оскільки трудомісткість ітерацій нового методу на порядки менша, ніж методу часткового відновлення сигналу за його неповною EMD, то загальна трудомісткість фільтрації сигналів новим методом менша.

Висновки.

1. У загальному випадку сигнали напруги на багатоканальному плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому, отримані в результаті розряду на нього робочого конденсатора, є імпульсними неперіодичними, нестационарними, недетермінованими, із стохастичною амплітудною модуляцією.

2. Фільтрація усереднених сигналів напруги та струму багатоканального плазмоерозійного навантаження методом часткового їх відновлення за неповною модовою декомпозицією дозволяє в рази зменшити амплітуди їх високочастотних флуктуацій відносно ліній основного тренду.

3. Розроблений багатоітераційний метод ковзного середнього із зростаючою шириною вікна фільтрації дозволяє отримати результати, що майже не відрізняються від результатів, отриманих методом часткового відновлення сигналів за їх неповною модовою декомпозицією при майже тій же самій кількості ітерацій. При цьому трудомісткість нового методу на порядки менша. Новий метод, на відміну зазначеного, дозволяє здійснювати в рази більшу кількість ітерацій, забезпечуючи більш глибоку і якісну фільтрацію.

4. Відомі критерії зупинення ітерацій фільтрації, які застосовуються для методів часткового відновлення сигналів за їх неповною модовою декомпозицією, не є універсальними для нового методу. Глибину фільтрації сигналів новим методом доцільно вибирати, виходячи з потреб конкретної задачі. Найменшу глибину фільтрації доцільно застосовувати для сигналів, які є основою побудови стохастичних і параметрично-стохастичних моделей, середню – для параметричних, а найбільшу – для нелінійних. Розробка універсального критерію припинення ітерацій фільтрації сигналів новим методом є актуальною задачею та предметом окремих досліджень.

1. Бодина Н.Н., Калмычков А.С., Кривенцов В.Э. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации медицинских изображений // Вісник НТУ "ХПІ". – 2012 – № 38. – С. 14–25.
2. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.
3. Давыдов А.В. Сигналы и системы. Лекции и практикум на ПК. Введение в теорию сигналов и систем – Режим доступа: <http://www.geoin.org/signals/index.html> . Дата доступа: 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: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3238> . – Дата доступа: 06.02.2017.
5. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. Теория электрической связи. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.
6. Иванов М.Т., Сергиенко А.Б., Ушаков В.Н. Радиотехнические цепи и сигналы. – СПб.: Питер. – 2014. – 336 с.
7. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
8. Максимчук И.В., Гергель Л.Г., Осадчий О.В. Сравнительный анализ Фурье и вейвлет преобразования для анализа сигнала фотоплетизмограммы // Современные научные исследования и инновации. – 2013. – № 6. – Режим доступа: <http://www.web.snauka.ru/issues/2013/06/25060> . – Дата доступа: 06.02.2017.
9. Матвеев Ю.Н., Симончик К.К., Тропченко А.Ю., Хитров М.В. Цифровая обработка сигналов. – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 166 с.
10. Муратов В.А. Полупроводниковые преобразователи для питания технологических аппаратов электроэрозионного диспергирования: / Дис... канд. техн. наук: 05.09.12. – К., 1986. – 279 с.
11. Физические основы электротехники. – М.-Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1950. – 556 с.
12. Хуанг Т.С., Эклунд Дж.-О., Г.Дж. Нуссбаумер Г.Дж., Зохар Ш., Юстуссон Б.И., Тянь Ш.-Г. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
13. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Нелинейно-параметрическая модель электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред для широкого диапазона изменений приложенного напряжения // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 3–17.
14. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Параметрична модель опору плазмоерозійного навантаження, адекватна в широкому діапазоні змін прикладеної напруги // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 3. – С. 3–12.
15. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Фізичні передумови побудови математичних моделей електричного опору плазмоерозійних навантажень // Техн. електродинаміка. – 2017. – № 2. – С. 5–12.
16. Hoaglin D.C., Mosteller F., Tukey J.W. Understanding Robust and Exploratory Data Analysis. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 472 p.

17. 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.
18. 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.
19. Li L., Chai X., Zheng Sh., Zhu W. A De-Noising Method for Track State Detection Signal Based on EMD // Journal of Signal and Information Processing. – 2014. – No 5. – Pp.104–111.
20. Meyer Y. Wavelets and operators. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992. – 223 p.
21. Robert G.B., Patrick Y.C. Hwang Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. – New York: John Wiley & Sons, 2012. – 400 p.
22. Tukey J.W. The Future of Data Analysis // The Annals of Mathematical Statistics. – 1962. – No 1. – Vol. 33. – Pp. 1–67.

УДК 621.3.014.14: 621.391.822.4

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СГЛАЖИВАНИЯ СИГНАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПЛАЗМОЭРОЗИОННОЙ НАГРУЗКЕ И ТОКА В НЕЙ МНОГОИТЕРАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ ФИЛЬТРАЦИИ

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, snzakhar@bk.ru, cherkassky_a@ukr.net

Охарактеризованы сигналы напряжения на многоканальной плазмозероэрозивной нагрузке и тока в ней, полученные в результате разряда на нее конденсатора в общем случае. Рассмотрено влияние параметров элементов разрядной цепи и начальных условий на них на переходный процесс в плазмозероэрозивной нагрузке и на коэффициент стохастической амплитудной модуляции разрядного тока и напряжения на нагрузке. Приведен критический анализ методов фильтрации сигналов. Описана фильтрация сигналов напряжения на плазмозероэрозивной нагрузке и тока в ней методом их частичного восстановления по их неполной модовой декомпозиции. Описан алгоритм нового многоитерационного метода скользящего среднего с возрастающей шириной окна фильтрации нестационарных непериодических сигналов. Приведен сравнительный анализ эффективности фильтрации сигналов напряжения на плазмозероэрозивной нагрузке и тока в ней новым методом и методом частичного восстановления сигнала по его неполной модовой декомпозиции.
 Библ. 22, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: плазмозероэрозивная нагрузка, разрядный ток, нестационарные непериодические сигналы, методы фильтрации сигналов.

COMPARISON OF THE SMOOTHING EFFICIENCY OF SIGNALS OF VOLTAGE ON THE PLASMA-EROSIVE LOAD AND ITS CURRENT BY MULTI-ITERATIVE FILTRATION 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@bk.ru, cherkassky_a@ukr.net

Characterized signals of voltage on the multichannel plasma-erosive load and its current, as a result of capacitor discharge on it in general. The influence of parameters of elements of the discharge circuit and the initial conditions for them in the transition process in plasma-erosive load and a factor of stochastic amplitude modulation of the discharge current and voltage at the load are considered. A critical analysis of the signal filtering methods is given. Described filtering of signals voltage on plasma-erosive load and its current by method of their partially recovery by their incomplete mode decomposition. The algorithm of new multi-iterative method of moving average with increasing width of the filtering window of non-stationary non-periodic signals is described. The comparative analysis of efficiency of filtration of signals of voltage on plasma-erosive load and its current by a new method and a method of their partially recovery by their incomplete mode decomposition is given. References 22, figures 5, tables 2.

Key words: plasma-erosive load, discharge current, non-stationary non-periodic signals, methods of signal filtering.

1. *Bodina N.N., Kalmychkov A.S., Kriventsov V.E.* Comparative analysis of filtering algorithms of medical images // *Vesnyk Natsionalnoho Tekhnicheskoho Universytetu "Kharkivskiy Politekhnichnyi Instytut"*. – 2012. – No 38. – Pp. 14–25. (Rus)
2. *Greshilov A.A., Stakun V.A., Stakun A.A.* Mathematical methods of construction of prognoses. – Moskva: Radio i Sviaz, 1997. – 112 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://www.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 // *Inzhenerniy vestnik Dona*. – 2015. – No 3. – Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3238>. (Accessed 06.02.2017). (Rus)
5. *Zyuko A.G., Klovskiy D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V.* The theory of electric communication. – Moskva: Radio i Sviaz, 1999. – 432 p. (Rus)
6. *Ivanov M.T., Sergiyenko A.B., Ushakov V.N.* Radio engineering circuits and signals. –S-Pb.: Piter, 2014. – 336 p. (Rus)
7. *Kramer G.* Mathematical methods of statistics. – Moskva: Mir, 1975. – 648 p. (Rus)
8. *Maksimchuk I.V., Gergel' L.G., Osadchiy O.V.* The Comparative Analysis Fourier and Wavelets Transformations for the Signal Analysis of Photoplethysmogram // *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*. – 2013. – No 6. – Available at: <http://www.web.snauka.ru/issues/2013/06/25060>. (Accessed 06.02.2017). (Rus)
9. *Matveyev Yu.N., Simonchik K.K., Tropchenko A.Yu., Khitrov M.V.* Digital processing of signals. – S-Pb: S-PbNIU ITMO, 2013. – 166 p. (Rus)
10. *Muratov V.A.* Semiconductor converters for a supply of technological devices electroerosive dispersion / *Diss. ... cand. tech. sci.: 05.09.12.* – Kiev, 1986. – 279 p. (Rus)
11. *Physical Foundations of Electrical Engineering / Pod red. Polivanova K.M.* – Moskva-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo, 1950. – 556 p. (Rus)
12. *Huang T.S., Eklund Dzh.-O., Nussbaumer G.Dzh., Zokhar Sh., Iustusson B.I., Tian Sh.-G.* Fast Algorithms in Digital Image Processing. Transforms and Median Filters. – Moskva: Radio i Sviaz, 1984. – 224 p. (Rus)
13. *Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkassky A.P.* Non-linear-parametrical Model of Electrical Resistance of Conductive Granulated Media for a Wide Range of Applied Voltage // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2014. – No 6. – Pp. 3–17. (Rus)
14. *Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskiy O.P.* Parametric Model of Resistance of Plasma-erosive Load, Adequate in the Wide Range of Change of Applied Voltage // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2017. – No 3. – Pp. 3–12. (Ukr)
15. *Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskiy O.P.* Physical Prerequisites of Construction of Mathematical Models of Electric Resistance of Plasma-erosive Loads // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2017. – No 2. – Pp. 5–12. (Ukr)
16. *Hoaglin D.C., Mosteller F., Tukey J.W.* Understanding Robust and Exploratory Data Analysis. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 472 p.
17. *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.
18. *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.
19. *Li L., Chai X., Zheng Sh., Zhu W.* A De-Noising Method for Track State Detection Signal Based on EMD // *Journal of Signal and Information Processing*. – 2014. – No 5. – Pp. 104–111.
20. *Meyer Y.* Wavelets and operators. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992. – 223 p.
21. *Robert G.B., Patrick Y.C. Hwang* Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. – New York: John Wiley & Sons, 2012. – 400 p.
22. *Tukey J.W.* The Future of Data Analysis // *The Annals of Mathematical Statistics*. – 1962. – Vol. 33. – No 1. – Pp. 1–67.

Надійшла 07.04.2017