

УДК 621.391.82

doi: 10.32620/reks.2022.2.17

Н. О. ТУЛЯКОВА¹, О. М. ТРОФИМЧУК²¹ Інститут прикладної фізики НАНУ, Суми, Україна² Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАНУ, Київ, Україна

АДАПТИВНИЙ МІРІАДНИЙ ФІЛЬТР ІЗ ШУМО- ТА СИГНАЛЬНО-ЗАЛЕЖНИМ ЗМІНЕННЯМ ПАРАМЕТРІВ У ЧАСІ

Предметом дослідження в статті є методи локально-адаптивної фільтрації нестационарних сигналів. **Метою** є розробка локально-адаптивного алгоритму придушення нестационарного (з точки зору змінення дисперсії в часі) шуму в сигналах, що характеризуються різною поведінкою інформативної компоненти, при обмежених апріорних відомостях про модель сигналу та дисперсію шуму. **Завдання:** дослідити ефективність запропонованого локально-адаптивного міріадного фільтра на основі чисельних статистичних оцінок якості обробки для комплексної моделі одномірного процесу, що містить різні елементарні сигнали, у широкому діапазоні змінення дисперсії адитивного гаусова шуму та за наявності викидів; дослідити ефективність придушення нестационарного шуму для модельних і реальних сигналів. **Методи:** інтегральні та локальні показники якості фільтрів за критерієм середньоквадратичної похибки отримані за допомогою чисельного моделювання (методом Монте-Карло). Отримані наступні **результати:** запропоновано шумо- та сигнально-адаптивний міріадний фільтр для придушення нестационарного шуму з істотно змінюваною дисперсією в сигналах із різним характером поведінки інформативної компоненти. Статистичні оцінки якості фільтрів, обчислені за допомогою чисельного моделювання, показують більш високу ефективність запропонованого локально-адаптивного міріадного фільтра в умовах різного рівня шуму порівняно з іншими високоефективними локально-адаптивними фільтрами. Продемонстровано практично повне збереження сигналу при дуже низькому рівні шуму, забезпечення мінімальних динамічних помилок, що вносяться під час фільтрації, при невисокому й середньому рівнях шуму та більш ефективно придушення шуму при великих значеннях його дисперсії. Аналіз вихідних сигналів, графіків параметрів локальної адаптації та параметрів, що адаптуються, підтверджує високу ефективність і коректну роботу досліджуваних локально-адаптивних алгоритмів. Показані високі робастні властивості цих нелінійних фільтрів і доцільність застосування для усунення викидів попереднього фільтра Хемпела, у якому медіанну операцію замінено на міріадну. Наведені приклади, що відображають високу якість придушення нестационарного шуму в біомедичному сигналі електроністагмограми. **Висновки:** наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці локально-адаптивного міріадного фільтра з шумо- та сигнально-залежним зміненням параметрів у часі для обробки процесів із нестационарними поведінкою сигналу та дисперсією шуму. Запропонований фільтр не потребує часу для адаптації параметрів та їхнього точного налаштування, апріорних знань про модель сигналу й дисперсію шуму, може застосовуватися в режимі квазі-реального часу. Запропонований алгоритм шумо- та сигнально-адаптивної міріадної фільтрації покращує якість обробки сигналів у складних умовах суттєвої нестационарності (змінності дисперсії) шуму.

Ключові слова: локально-адаптивна міріадна фільтрація; придушення нестационарного шуму; статистичні оцінки ефективності; електроністагмограма.

Вступ

Проблема підвищення відношення сигнал-шум у результаті фільтрації є однією з основних в області цифрової обробки сигналів та зображень і до теперішнього часу не втрачає своєї актуальності. Зазвичай для придушення шуму в сигналах застосовують лінійні фільтри у зв'язку з розвиненим математичним апаратом та аналітичним описанням властивостей [1]. Однак, для проектування лінійних фільтрів, як правило, використовуються припущення, що в практичних умовах можуть не виконуватися. Зокрема, передбачається роздільність спектрів сигналу

та завади в частотній області. Тоді як різкі змінення сигналу, характерні для багатьох інформаційно-вимірювальних процесів, як-от: стрибки, злами та інші точки розриву похідної – переважно є високочастотними компонентами сигналу, тому їх придушення разом із шумом лінійним фільтром низьких частот призводить до значного згладжування сигналу. Теорія лінійної фільтрації насамперед розроблялася для обробки процесів, що описуються неперервними функціями, які апроксимуються рядом Фур'є [1] або сумою косинусних функцій [2]. А ось для обробки стрибків та інших точок розриву похідної функції сигналу успішніше застосовуються алгоритми медіанного типу,

що відносяться до нелінійних стійких (робастних) фільтрів [3, 4].

Нелінійні стійкі фільтри можуть характеризуватися різним ступенем нелінійності властивостей [4-6], що визначається параметром, умовно змінюваним від одиниці, що відповідає найвищій нелінійності, до нуля – лінійному усередненню. Фільтри з високим значенням параметра нелінійності мають високі динамічні властивості: добре зберігають стрибки, злами та інші точки розриву похідної, придушуючи шум у їхньому околі, однак при цьому в області поліноміальних сигналів вносяться нелінійні викривлення і недостатньо придушується шум. Такі нелінійні фільтри мають високу робастність – стійкість до викидів. Нелінійні фільтри з високою лінійністю властивостей (високими статистичними властивостями) ефективніше придушують шум та усувають викиди на лінійних ділянках і в області гладких кривих, однак згладжують стрибки й інші різкі змінення сигналу [4, 7]. У багатьох випадках доцільніше застосовувати фільтр із проміжним ступенем нелінійності (середніми динамічними та статистичними властивостями), щоб досягти компромісу в протиріччі вимог до збереження різких змін сигналу, з одного боку, та забезпечення високої якості обробки поліноміальних сигналів, з іншого [4, 6].

Більшість неадаптивних алгоритмів, як лінійної, так і нелінійної фільтрації, оптимально або достатньо ефективно функціонують для певних моделей сигналу та щільності розподілу ймовірностей (ЩРЙ) завади [4]. Позитивною якістю оптимальних фільтрів є можливість досягти найближчу до істинного значення оцінку сигналу. Проте для багатьох інформаційно-вимірювальних процесів модель поведінки сигналу може бути різною й апріорно невідомою, припущення стаціонарності не виконується: сигнал може як різко, так і плавно змінюватись. Завада також може бути нестационарною, зокрема, дисперсія шуму може істотно змінюватись у часі та бути заздалегідь невідомою. Для фільтрації таких процесів доцільно застосування локально-адаптивних алгоритмів у ковзному вікні даних, прагнучих підходящим чином адаптувати параметри фільтра при обробці локальної (у деякому околі поточного відліку) області сигналу [5, 8, 9]. Такі фільтри використовують обчислюваний для кожного відліку сигналу параметр (параметри) локальної адаптації (ПЛА), що визначає локальну сигнально-завадову ситуацію для відповідної адаптації алгоритму фільтрації. Зокрема, ПЛА може керувати нелінійністю властивостей фільтра залежно від характеру змінення сигналу, варіюючи від нелінійної медіанної оцінки до лінійного усереднення [6, 10]. До таких нелінійних фільтрів можна віднести й адаптивні міриадні фільтри з параметром лінійності,

що змінюється залежно від локальних особливостей сигналу в околі поточного відліку [11-13].

Локально-адаптивними алгоритмами в ковзному вікні даних можна вважати динамічні апроксимуючі фільтри, що залежно від обчислюваного в кожній точці сигналу параметра в процесі обробки регулюють розмір вікна та коефіцієнти апроксимації [14-19]. Динамічні алгоритми забезпечують високу ефективність фільтрації сигналів електрокардіограми (ЕКГ), адаптуючи розмір вікна не тільки до поточних змінень сигналу [14, 15], але й до рівня шуму [16-18]. Однак, апроксимація Савицького-Голея [20], здійснювана за методом найменших квадратів (МНК), що застосовується у вказаних алгоритмах, не достатньо ефективна для обробки стрибків та усунення викидів.

Запропоновані й інші сучасні адаптивні алгоритми обробки сигналів у часовій області [21, 22], що рекурсивно оновлюють вагові коефіцієнти адаптивного фільтра, прагнучи мінімізувати суму квадратів різниць між вхідним сигналом та деяким опорним сигналом (входом адаптивного фільтра), в якості якого застосовується вхідний сигнал, отриманий дещо раніше в часі. Такі фільтри працюють за схемою адаптивного компенсатора завади, подібною до алгоритму Уїдрю [23], але при цьому не потребують опорного сигналу, що корелює із завадою, отримання якого в реальному часі не завжди можливе [24]. Проте, у цих алгоритмах для оптимізації вагових коефіцієнтів застосування МНК успішне лише у випадках, якщо апроксимуюча функція є поліноміальною і не містить точок розриву похідної, а також за відсутністю імпульсних завад (точкових викидів), що істотно спотворюють результати лінійних операцій усереднення даних [3, 4].

Простими й швидкими алгоритмами фільтрації сигналу в реальному часі є лінійні фільтри на основі зваженої агрегації впорядкованого набору даних у ковзному вікні (OWA - ordered weighted aggregation) [25] та каскадні модифікації цих фільтрів [26], що підвищують відношення сигнал-шум. Принцип OWA-фільтрів полягає в знаходженні вихідного сигналу як суми впорядкованого набору відліків вхідного сигналу, помножених на нормований вектор вагових коефіцієнтів (вікно) фільтра. Хоча введенням нелінійних операцій і досягається усунення викидів цими фільтрами [26], їх основною є лінійне сумування, що забезпечує високу ефективність придушення шуму, проте й призводить до згладжування нестационарностей типу стрибків, зламів та інших точок розриву похідної функції сигналу [4, 6].

У адаптивних алгоритмах Калмана [27] модель (закон поведінки) процесу та дисперсія шуму вважаються відомими, що обумовлює високу ефективність застосування цих фільтрів для обробки даних різних

вимірювальних пристроїв, в яких така інформація доступна. Існують і робастні варіанти оптимальних фільтрів Калмана [28, 29]. Проте, у багатьох практичних застосуваннях виникає необхідність фільтрувати процеси, для яких функція сигналу апріорно не відома та не завжди диференційована, що унеможливає використання МНК для мінімізації похибки й ефективну фільтрацію Калмана.

Принцип локально-адаптивної нелінійної фільтрації в ковзному вікні даних, застосований для розробки адаптивних міриадних фільтрів, розглянутих у статті, полягає в здійсненні на основі аналізу ПЛА (порівняння їх з порогами) адаптивного перемикавання: вибору з фіксованих наборів типу та параметрів фільтру, що більш підходять для обробки околу i -го відліку сигналу [8, 9, 30-32]. У [30, 33-35] запропоновані локально-адаптивні міриадні фільтри, що гнучко змінюють параметр лінійності міриади вибірки дискретних значень сигналу в межах ковзного вікна залежно від поточних оцінок масштабу сигналу, а також перемикають різні значення розміру вікна та коефіцієнта, на який помножується параметр лінійності. Ці алгоритми забезпечують високу ефективність фільтрації гаусова й імпульсного шуму в ЕКГ [33]. Показано досягнення високих локальних й інтегральних показників якості фільтрації гаусова шуму й усунення викидів для комплексної моделі одновимірного процесу, що складається з різних елементарних сигналів [34, 35].

Метою цього дослідження є підвищення ефективності запропонованих раніше адаптивних міриадних фільтрів в умовах впливу нестационарного шуму з істотно змінюваною в часі дисперсією шляхом розробки локально-адаптивного міриадного фільтра, що змінює параметри (зокрема, розмір вікна) залежно від локальної поведінки сигналу та від оцінок рівнів шуму. Досліджується ефективність запропонованого шумо- та сигнально-адаптивного міриадного фільтра для комплексної моделі одновимірного процесу в широкому діапазоні змінення дисперсії гаусова шуму та за наявності викидів у порівнянні з іншими високоефективними нелінійними локально-адаптивними фільтрами. Як приклад практичного застосування аналізується обробка біомедичних сигналів електроністаграми (ЕНГ) при впливі нестационарного шуму з різним рівнем дисперсії.

1. Міриадний фільтр із шумо- та сигнально- залежною адаптацією параметрів

Розроблені раніше [33-35] сигнально-адаптивні міриадні фільтри залежно від ПЛА здійснювали перемикавання адаптивних міриадних фільтрів із різними властивостями, що визначалися розміром вікна та ко-

ефіцієнтом, на який помножується параметр лінійності, що обчислюється залежно від локальних оцінок масштабу (крутизни) сигналу. Як ПЛА для визначення характеру поведінки сигналу в околі поточного відліку й відповідного вибору серед заданих варіантів більш підходящого для обробки фільтра запропоновано [35] застосувати параметри Хемпела [36] та Z-параметр [8, 9]. Для адаптації параметра лінійності до локальних змін сигналу обчислюється максимум попарних різниць відліків сигналу в межах ковзного вікна [13].

Адаптивний міриадний фільтр (АМФ) із гнучким зміненням параметру лінійності описується як

$$y_i^{\text{AMF}(N, b)} = \text{myriad}\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N; bK_{ai}\} = \\ = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^N \log [(bK_{ai})^2 + (x_i - \beta)^2], \\ K_{ai} = \max_{k \neq j} |x_k - x_j|, \quad (1)$$

де $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N\}$ – відліки вхідного сигналу в ковзному вікні даних розміром N ;

i – індекс центрального елемента вікна;

K_{ai} – параметр лінійності, що адаптивно обчислюється для кожного i -го положення вікна, $K_{ai} > 0$;

b – коефіцієнт, на який помножується K_{ai} ;

$\hat{\beta}$ – міриадна оцінка місцеположення функції

ЩРЙ вибірки $\{x_i\}_{i=1}^N$.

У випадку імпульсного шуму, що описується симетричною α -стабільною ЩРЙ з більш важкими, ніж гаусові, хвостами, для отримання локальних оцінок масштабу сигналу й відповідної адаптації параметра лінійності K_{ai} ефективніше [33] використання квазірангу [4], що обчислюється як різниця q -ї та p -ї порядкових статистик відсортованої множини $\{X_i^{(1)} < X_i^{(2)} < \dots < X_i^{(N)}\}$ відліків сигналу у вікні розміром N : $Q_i = X_i^{(q)} - X_i^{(p)}$, $q < p$, $p - q \approx N/2$.

Для пошуку мінімуму міриадної функції вартості [11, 37] застосовано чисельний метод Ньютона [38], що за малих значень параметра лінійності K забезпечує майже оптимальну обробку стрибка [39]. За великих значень K властивості міриадного фільтра близькі до усереднення [11, 12, 37, 39, 40]. Варіюванням параметру K адаптивно налаштовуються властивості міриадного фільтра від режиму їхньої високої нелінійності до лінійності.

Якщо дисперсія шуму істотно змінюється в часі, доцільним є адаптивне, залежно від оцінюваного рівня шуму, перемикавання наборів компонентних фільтрів із збільшенням при зростанні дисперсії шуму розмірів вікон [30-32, 34, 35]. Адаптивний міриадний фільтр із шумо- та сигнально-залежним перемиканням параметрів описується так:

$$y_i = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} y_i^{AMF_{3,1}(N_{3,1},b_{3,1})}, \text{ if } (\hat{n}_i = 1) \wedge \\ \wedge ((r_i^f > th_i^f) \vee (|Z_i^f| < t_{Z1})), \\ y_i^{AMF_{2,1}(N_{2,1},b_{2,1})}, \text{ if } (\hat{n}_i = 1) \wedge \\ \wedge (r_i^f \leq th_i^f) \wedge (|Z_i^f| \leq t_{Z2}), \\ x_i, \text{ if } (\hat{n}_i = 1) \wedge (r_i^f \leq th_i^f) \wedge (|Z_i^f| > t_{Z2}); \end{array} \right. \\ \dots \\ \left\{ \begin{array}{l} y_i^{AMF_{3,j}(N_{3,j},b_{3,j})}, \text{ if } (\hat{n}_i = j) \wedge \\ \wedge ((r_i^f > th_i^f) \vee (|Z_i^f| < t_{Z1})), \\ y_i^{AMF_{2,j}(N_{2,j},b_{2,j})}, \text{ if } (\hat{n}_i = j) \wedge \\ \wedge (r_i^f \leq th_i^f) \wedge (|Z_i^f| \leq t_{Z2}), \\ y_i^{AMF_{1,j}(N_{1,j},b_{1,j})}, \text{ if } (\hat{n}_i = j) \wedge \\ \wedge (r_i^f \leq th_i^f) \wedge (|Z_i^f| > t_{Z2}); \end{array} \right. \\ \dots \\ \left\{ \begin{array}{l} y_i^{AMF_{3,L}(N_{3,L},b_{3,L})}, \text{ if } (\hat{n}_i = L) \wedge \\ \wedge ((r_i^f > th_i^f) \vee (|Z_i^f| < t_{Z1})), \\ y_i^{AMF_{2,L}(N_{2,L},b_{2,L})}, \text{ if } (\hat{n}_i = L) \wedge \\ \wedge (r_i^f \leq th_i^f) \wedge (|Z_i^f| \leq t_{Z2}), \\ y_i^{AMF_{1,L}(N_{1,L},b_{1,L})}, \text{ if } (\hat{n}_i = L) \wedge \\ \wedge (r_i^f \leq th_i^f) \wedge (|Z_i^f| > t_{Z2}); \end{array} \right. \end{cases} \quad (2)$$

де x_i – вхідний сигнал в i -му відліку;

$y_i^{AMF_{k,j}(N_{k,j},b_{k,j})}$, $k=1..3$, $j=1..L$, – вихідний сигнал k -го компонентного АМФ (1) у j -му наборі;

$\{x_i, y_i^{AMF_{2,1}(N_{2,1},b_{2,1})}, y_i^{AMF_{3,1}(N_{3,1},b_{3,1})}\}$ – 1-й набір АМФ, що застосовується при дуже низькому рівні шуму (1-й рівень шуму, $\hat{n}_i=1$);

$\{y_i^{AMF_{1,j}(N_{1,j},b_{1,j})}, y_i^{AMF_{2,j}(N_{2,j},b_{2,j})}, y_i^{AMF_{3,j}(N_{3,j},b_{3,j})}\}$ – вихідні сигнали j -го набору АМФ для j -го рівня шуму ($\hat{n}_i=j$);

$\{y_i^{AMF_{1,L}(N_{1,L},b_{1,L})}, y_i^{AMF_{2,L}(N_{2,L},b_{2,L})}, y_i^{AMF_{3,L}(N_{3,L},b_{3,L})}\}$ – вихідні сигнали L -го набору АМФ для найвищого рівня шуму ($\hat{n}_i=L$);

$N_{1j} < N_{2j} < N_{3j}$, $b_{1j} < b_{2j} < b_{3j}$ – розміри вікон і коефіцієнти для АМФ j -го набору фільтрів, $j=1..L$;

$\hat{n}_i=1..L$ – прапорець для оцінки рівнів шуму;

r_i^f, th_i^f, Z_i^f – згладжені значення ПЛА фільтра

Хемпела [36] та Z -параметра [8, 9], що використовуються для адаптивного перемикавання та обчислюються за формулами: $r_i = |x_i - m_i|$, $th_i = tS_i^{Mad}$, де $m_i = \text{med}\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ – медіанний елемент,

$S_i^{Mad} = 1,4826 \text{ med}\{|x_1 - m_i|, |x_2 - m_i|, \dots, |x_N - m_i|\}$ – абсолютне медіанне відхилення (Mad – median absolute deviation) у ковзному вікні розміром N , 1,4826 – коефіцієнт для гаусової ЦПРІ, t – поріг; $Z_i = \sum_{j=-k}^k (y_{i-j}^f - x_{i-j}) / \sum_{j=-k}^k |y_{i-j}^f - x_{i-j}|$, де y_{i-j}^f і x_{i-j} – відповідні відліки відфільтрованого та вхідного сигналів; k – половина розміру вікна;

t_{Z1}, t_{Z2} – нижній і верхній порогови для порівняння Z -параметра та перемикавання фільтрів;

\wedge, \vee – операції логічного множення (AND) та додавання (OR).

Для приблизної оцінки рівня шуму пропонується просте порівняння з порогами ПЛА r_i^f (чи th_i^f), що здійснюється на ділянці сигналу приблизно постійного рівня, коли виконується умова $(r_i^f > th_i^f) \wedge (|Z_i^f| \leq t_{Z1})$. Прапорець, що умовно визначає різні рівні шуму, для яких доцільне перемикавання наборів фільтрів із збільшеними або зменшеними розмірами вікон [30-32], описуються так:

$$\hat{n}_i = \begin{cases} 1, \text{ if } (r_i^f > th_i^f) \wedge (|Z_i^f| \leq t_{Z1}) \wedge (r_i^f < \eta_1), \\ 2, \text{ if } (r_i^f > th_i^f) \wedge (|Z_i^f| \leq t_{Z1}) \wedge (\eta_1 \leq r_i^f < \eta_2), \\ \dots \\ j, \text{ if } (r_i^f > th_i^f) \wedge (|Z_i^f| \leq t_{Z1}) \wedge (\eta_{j-1} \leq r_i^f < \eta_j), \\ \dots \\ L-1, \text{ if } (r_i^f > th_i^f) \wedge (|Z_i^f| \leq t_{Z1}) \wedge (\eta_{L-1} \leq r_i^f < \eta_L), \\ L, \text{ if } (r_i^f > th_i^f) \wedge (|Z_i^f| \leq t_{Z1}) \wedge (r_i^f \geq \eta_L); \end{cases} \quad (3)$$

де r_i^f, th_i^f, Z_i^f – відфільтровані значення параметрів фільтра Хемпела [36] та Z -параметра [8, 9];

$\eta_1, \dots, \eta_j, \dots, \eta_L$ – пороги, що визначають рівні шуму від 1 – найнижчого до L – найвищого.

Параметри Хемпела сумісно з Z -параметром (умова $(r_i^f > th_i^f) \wedge |Z_i^f| \leq t_{Z1}$) дозволяють визначати ділянки сигналу з приблизно постійною або лінійно змінюваною поведінкою з ціллю застосування для їх обробки компонентних фільтрів із лінійними властивостями, що забезпечує високий ступінь придушення шуму. Значення Z -параметра не перевищують нижній поріг, тобто виконується умова $|Z_i^f| \leq t_{Z1}$, для ділянок із лінійною поведінкою сигналу, а умова

$(r_i^f > th_i^f)$ ідентифікує повільне змінення (пологі ділянки) сигналу. Значення Z -параметра перевищують верхній поріг, тобто $|Z_i^f| > t_{Z2}$, для околу високої динаміки сигналу, що дозволяє застосувати фільтр із нелінійними властивостями, що зберігає різкі змінення сигналу. Проміжні значення Z -параметра, тобто $t_{Z1} \leq |Z_i^f| \leq t_{Z2}$, відповідають “середній” динаміці сигналу, зокрема змінням, що апроксимуються гладкими функціями [7, 8]. Недоліком Z -параметра є перехід через нуль у точці стрибка, тому рекомендується знаходити квазіранг Z -параметра, що реагує на стрибок великими (перевищуючими верхній поріг) значеннями [8], або Z -параметр, що детектує стрибок за алгоритмом із застосуванням порогу [35].

За наявності імпульсних завад пропонується [36] застосувати попередній робастний міріадний фільтр Хемпела, що описується формулою:

$$y_i^{\text{HamHmyr}} = \begin{cases} x_i, & \text{if } |x_i - m_i| \leq tS_i^{\text{Mad}}, \\ \text{myriad}\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N; K\}, & \text{else;} \end{cases} \quad (4)$$

де x_i, m_i – центральний і медіанний елементи вікна $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ розміром N ;

tS_i^{Mad} – абсолютне медіанне відхилення, помножене на поріг t ;

K – параметр лінійності міріадного фільтра.

2. Алгоритм чисельного моделювання

Оцінки ефективності алгоритмів фільтрації отримані чисельним моделюванням (методом Монте-Карло) за таким алгоритмом [4]: 1) формується тестовий сигнал; 2) генеруються завади з заданими характеристиками; 3) застосовується алгоритм фільтрації з вказаними параметрами; 4) обчислюються локальні (для окремих ділянок сигналу) й інтегральні показники ефективності фільтра; 5) фільтрація виконується багаторазово для великої кількості реалізацій тестового сигналу з завадами, оцінки ефективності усереднюються.

Більшість інформаційно-вимірjuвальних процесів є істотно нестационарними: містять як ділянки, що описуються лінійними та поліноміальними функціями, так і різкі змінення вигляду стрибків, зламів та інших точок розриву похідної. У зв'язку з цим, для досліджень вибрана комплексна модель тестового впливу, що містить різні характерні для реальних систем елементарні сигнали. Тестовий сигнал (рис. 1, а) складається з ізопотенційної ділянки (індекси 10-40), стрибка (індекси 40-60), зламів (індекси 90-110, 190-210), ділянок лінійного зростання/спадання (індекси 110-140, 160-190), трикутного піку (індекси

140-160), стику відрізка постійного рівня та параболи (індекси 240-260), параболи (індекси 265-285). Застосовуючи цю модель, можемо оцінити якість фільтра за локальними показниками для певних елементарних сигналів – у такий спосіб описати окремі властивості фільтрів, що дозволяє рекомендувати їхній вибір за пріоритету вимог щодо збереження тих чи інших типів сигналів і придушення шуму в їхньому околі. Оцінюючи якість за інтегральним критерієм, у цілому можемо зробити висновок про ефективність фільтра, у тому числі, якщо апріорні відомості про модель поведінки сигналу обмежені, оскільки тестовий сигнал містить різні характерні для одновимірних процесів типи елементарних сигналів. Як приклад практичного застосування запропонованого адаптивного міріадного фільтра наведемо модель сигналу ЕНГ [41], що відображає біопотенціали очного яблука (рис. 1, б).

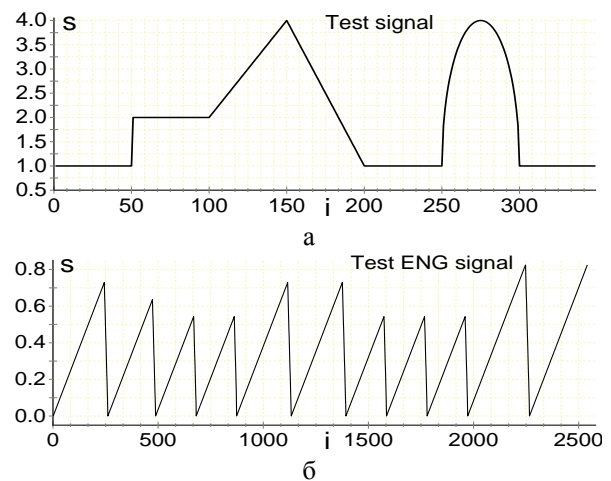


Рис. 1. Тестові сигнали:

- а) комплексна модель одновимірного сигналу;
- б) модель електроністаграми.

Модель одновимірного дискретного процесу представимо таким чином:

$$x_i = \begin{cases} s_i + n_{ai}, & \text{with probability } 1 - P_{sp}, \\ s_i + n_{ai} + n_{spi}, & \text{with probability } P_{sp}; \end{cases} \quad (5)$$

де s_i – істинне значення сигналу в i -му відліку;

n_{ai} – адитивний гаусів шум з нульовим математичним очікуванням і дисперсією σ_a^2 ;

$n_{spi} \gg 3\sigma_a^2$ – амплітуда імпульсних завад, що виникають із ймовірністю P_{sp} .

Для оцінки ефективності фільтрації застосуємо статистично усереднені показники ефективності за критерієм середньоквадратичної похибки (СКП) [4]:

$$\chi_{i_1-i_2} = \sum_{j=1}^{N_R} \left(\sum_{i=i_1}^{i_2} (y_i^f - s_i)^2 / (i_2 - i_1 + 1) \right) / N_R, \quad (6)$$

де y_i^f – вихідний сигнал фільтра в i -му відліку;

s_i – тестовий сигнал без шуму;

i_1, i_2 – індекси відліків, що визначають інтервал оцінки ефективності;

N_R – кількість реалізацій тестового сигналу з випадковим шумом для статистичного усереднення.

Критерій мінімуму СКП, що інтегрально характеризує зменшення дисперсії шуму на виході фільтра й динамічні помилки, що ним вносяться при обробці, широко використовуються для оцінки якості алгоритмів нелінійної стійкої фільтрації [4].

3. Досліджувані локально-адаптивні алгоритми

Досліджувалися такі нелінійні локально-адаптивні фільтри (ЛАФ):

– ЛАФ на основі Z-параметра [8], що перемикає медіанний та α -урізання фільтри; позначимо цей алгоритм як AZ;

– ЛАФ на основі комплексного застосування параметрів Хемпела та Z-параметра, що перемикає АМФ (1) із різними значеннями розміру вікна N і коефіцієнта b [35]; позначимо цей алгоритм як АНЗ;

– шумо- та сигнально-адаптивний міріадний фільтр (2), що залежно від оцінок рівнів шуму (3) перемикає набори АМФ (1) із різними значеннями параметрів N і b та вибирає з визначеного набору фільтр, що більш підходить для обробки локальної ділянки сигналу; позначимо цей ЛАФ як АНЗ_{nd}.

Параметри досліджуваних ЛАФ підбиралися за допомогою чисельного моделювання для тестової моделі одновимірного комплексного сигналу (рис. 1, а), виходячи з цілі отримання мінімальних значень СКП (6) на виході алгоритму фільтрації.

Параметри ЛАФ AZ [8] такі: у якості компонента з високими динамічними властивостями застосовується медіанний фільтр із малим розміром вікна $N_1=5$, а як компонентні фільтри із середніми та високими статистичними властивостями перемикаються α -урізання фільтри [4] з розмірами вікон $N_2=9$, $N_3=13$ і значеннями параметра урізання $[\alpha N_2=2]$, $[\alpha N_3=3]$ відповідно; для обчислення Z-параметра як попередній фільтр застосовується компонент із середніми властивостями, використовується вікно $N_Z=9$ та пороги $t_{Z1}=0,2$ і $t_{Z2}=0,4$; Z-параметр оброблюється медіанним фільтром із розміром вікна $N_{fz}=9$. Цей ЛАФ має високу швидкодію, адже застосовує прості операції сортування, знаходження медіани, α -урізання й усереднення. До переваг ЛАФ AZ відносяться високі динамічні властивості при невисокому рівні шуму [8, 35].

Параметри міріадного ЛАФ АНЗ [35] такі: у якості компонентних фільтрів застосовуються АМФ (1) із параметрами $N_1=5$, $b_1=0,7$; $N_2=11$, $b_2=1$; $N_3=17$, $b_3=1$; для обчислення медіани й абсолютного медіанного відхилення та відповідних параметрів Хемпела

r_i, th_i використовується вікно розміром $N=17$ і поріг $t=0,6$; для обчислення Z-параметра в якості попереднього фільтра застосовується АМФ із параметрами $N_3=17$, $b_3=1$, вікно $N_Z=15$, пороги $t_{Z1}=0,2$ і $t_{Z2}=0,4$.

Параметри Хемпела r_i, th_i згладжуються простим фільтром, що усереднює, з розмірами вікна $N_{fz}=21$, $N_{fth}=15$ відповідно. Z-параметр (що детектує стрибок) згладжується АМФ із параметрами $N_{zi}=13$, $b_{zi}=1$. Цей міріадний ЛАФ [35] має покращенні властивості в околі стрибка та на ділянках постійного рівня в порівнянні з алгоритмом AZ [8] і на лінійно змінюваних ділянках у порівнянні з міріадним ЛАФ [34], що використовує тільки ПЛА Хемпела.

У запропонованому шумо- та сигнально-адаптивному алгоритмі АНЗ_{nd} (2) залежно від оцінок рівнів шуму (3) перемикаються шість наборів АМФ (1) із параметрами: $\{N_{11}=0; N_{21}=7, b_{21}=1; N_{31}=11, b_{31}=1\}$, $\{N_{12}=3, b_{12}=0,7; N_{22}=9, b_{22}=1; N_{32}=13, b_{32}=1\}$, $\{N_{13}=5, b_{13}=0,5; N_{23}=11, b_{23}=0,5; N_{33}=15, b_{33}=1\}$, $\{N_{14}=5, b_{14}=0,7; N_{24}=11, b_{24}=0,7; N_{34}=17, b_{34}=1\}$, $\{N_{15}=7, b_{15}=0,5; N_{25}=11, b_{25}=1; N_{35}=17, b_{35}=1\}$, $\{N_{16}=7, b_{16}=0,7; N_{26}=13, b_{26}=0,5; N_{36}=17, b_{36}=1\}$. Для обчислення ПЛА r_i, th_i, Z_i та їхньої фільтрації застосовуються ті самі параметри, що й для описаного вище міріадного ЛАФ АНЗ. Динамічно змінюваний параметр лінійності K_{ai} (1) згладжується за допомогою АМФ. Як зазначалося вище, у кожному наборі фільтрів, що відрізняються розмірами вікна, перший компонент має високі динамічні, третій компонент – високі статистичні, а другий – проміжні властивості. Для розрізнення рівнів шуму (3) підібрані пороги: $\eta_1=0,01$; $\eta_2=0,03$; $\eta_3=0,04$; $\eta_4=0,15$; $\eta_5=0,2$.

У випадках наявності імпульсних завад пропонується застосувати попередню обробку сигналу робастним міріадним фільтром Хемпела (4) з малим розміром вікна $N_{pr}=3$, порогом $t=0,6$ і параметром лінійності $K_{myr}=0,3$. Позначимо ЛАФ AZ, АНЗ, АНЗ_{nd} із попередньою фільтрацією відповідно як AZ_{pr}, АНЗ_{pr}, АНЗ_{ndpr} і будемо порівнювати їх з ЛАФ AZ із детектором імпульсних завад на основі сумісного аналізу Z-параметра та його знакової функції [8] (позначимо цей алгоритм як AZ_{sp}).

За допомогою чисельного моделювання з використанням модельного сигналу ЕНГ (рис. 1, б) для розроблених міріадних ЛАФ АНЗ, АНЗ_{nd} підібрані такі параметри: для обчислення параметрів Хемпела r_i, th_i використовується вікно розміром $N=19$ і поріг $t=0,6$; параметри r_i, th_i згладжуються фільтром, що усереднює, з розмірами вікон $N_{fz}=21$, $N_{fth}=17$ відповідно; для обчислення Z-параметра як попередній фільтр застосовується АМФ із параметрами $N_{31}=21$, $b_{31}=1$, вікно $N_Z=17$, пороги $t_{Z1}=0,2$ і $t_{Z2}=0,4$; Z-параметр згладжується АМФ із параметрами $N_{zi}=13$,

$b_{7z_i}=1$. Для міріадного ЛАФ АНЗ адаптивно перемикаються компоненти одного набору фільтрів, що складається з АМФ із параметрами $N_1=5, b_1=0,7; N_2=11, b_2=1; N_3=21, b_3=1$. Для шумо- та сигнально-залежного міріадного ЛАФ АНЗ_{nd} залежно від оцінок рівнів шуму перемикаються набори АМФ (1) із такими параметрами: $\{N_{11}=0; N_{21}=7, b_{21}=1; N_{31}=15, b_{31}=1\}, \{N_{12}=3, b_{12}=1; N_{22}=9, b_{22}=1; N_{32}=17, b_{32}=1\}, \{N_{13}=5, b_{13}=0,5; N_{23}=9, b_{23}=1; N_{33}=19, b_{33}=1\}, \{N_{14}=5, b_{14}=0,7; N_{24}=11, b_{24}=1; N_{34}=21, b_{34}=1\}, \{N_{15}=7, b_{15}=0,7; N_{25}=11, b_{25}=1; N_{35}=23, b_{35}=1\}, \{N_{16}=9, b_{16}=0,7; N_{26}=13, b_{26}=1; N_{36}=23, b_{36}=1\}, \{N_{17}=11, b_{17}=0,7; N_{27}=13, b_{27}=1; N_{37}=25, b_{37}=1\}, \{N_{18}=13, b_{18}=0,7; N_{28}=15, b_{28}=1; N_{38}=27, b_{38}=1\}$. Для шумо-залежного перемикавання наборів фільтрів (3) підбрані пороги: $\eta_1=0,003; \eta_2=0,01; \eta_3=0,02; \eta_4=0,04; \eta_5=0,06; \eta_6=0,1; \eta_7=0,2$. Адаптивний параметр лінійності K_{ai} в АМФ не згладжується. Для обробки сигналів ЕНГ, масштаб яких зменшений у десять разів, пороги також зменшуються в десять разів.

4. Аналіз результатів дослідження

4.1. Результати чисельного моделювання

Ефективність досліджуваних нелінійних ЛАФ аналізується за допомогою чисельного моделювання для комплексної моделі одновимірного процесу (рис. 1, а) на основі статистичних оцінок якості за критерієм мінімуму СКП (6), наведених у Таблиці 1, де значення СКП вказані в ppm (ppm – parts per million – аббревіатура, що означає мільйонну частку якоїсь відносної величини, $1 \text{ ppm}=1 \times 10^{-6}$). Моделювалися умови впливу адитивного гаусова шуму з різною дисперсією σ_a^2 та наявності імпульсних завод з імовірністю P_{sp} та амплітудою p_{sp} (5). Для отримання стійких оцінок ефективності статистичне усереднення проводилося для великої кількості реалізацій N_R тестового сигналу з заводою.

Як бачимо (табл. 1, ситуація 1), за умов практичної відсутності шуму (дуже низького його рівня, сумірного з точністю представлення дискретного сигналу як послідовності дійсних чисел із п'ятьма знаками після коми) запропонований шумо- та сигнально-адаптивний ЛАФ АНЗ_{nd} (2) ефективний за інтегральним критерієм і для локальних ділянок із лінійною поведінкою сигналу (відліки 10-40, 110-140, 160-190) на різницю від ЛАФ АЗ та АНЗ, інтегральні значення СКП яких перевищують оцінки СКП за вхідним сигналом внаслідок спотворень (динамічних помилок), що вносяться при обробці. Динамічні помилки наявні для алгоритмів АЗ та АНЗ в області піку (відліки 140-160), тоді як АНЗ_{nd} його практично повністю зберігає (табл. 1, ситуації 1 - 2). ЛАФ АЗ ефективний для всіх ділянок, окрім піку (відліки 140-160)

та параболи (відліки 265-285). ЛАФ АНЗ вносить динамічні помилки на ділянках зламів (відліки 90-110, 190-210), піку (відліки 140-160), параболи (відліки 265-285), стику постійного сигналу й параболи (відліки 240-260). Усі розглянуті ЛАФ добре зберігають стрибок (відліки 40-60).

Для умов низького рівня шуму (табл. 1, ситуації 2 - 3) найкращі інтегральні показники ефективності забезпечує ЛАФ АЗ. Близьку до нього ефективність має ЛАФ АНЗ_{nd}. ЛАФ АЗ характеризується високими динамічними властивостями, про що свідчать найменші локальні показники СКП в околі зламів (відліки 90-110, 190-210) і точки стику ізопотенційного відрізка й параболи (відліки 240-260) при низькому рівні шуму (табл. 1, ситуація 2). Міріадний ЛАФ АНЗ краще придушує шум, забезпечуючи найменші СКП на ізопотенційній (відліки 10-40) і лінійно змінюваних (відліки 110-140, 160-190) ділянках, в околі стрибка (відліки 40-60) та параболи (відліки 265-285). У випадку зростання дисперсії шуму (табл. 1, ситуація 3) ЛАФ АНЗ має перевагу за всіма локальними показниками СКП, крім стику постійного сигналу й параболи (відліки 240-260).

У діапазоні змінення дисперсії шуму від невисокого до середнього рівня (табл. 1, ситуації 4 - 6) найменші інтегральні показники СКП забезпечує ЛАФ АНЗ, що в більшому ступені придушує шум у порівнянні з ЛАФ АЗ. ЛАФ АНЗ_{nd} має інтегральні та локальні показники, близькі до найкращого для цих умов алгоритму АНЗ. При середньому рівні шуму (табл. 1, ситуації 5 - 6) ЛАФ АНЗ та АНЗ_{nd} превалюють за всіма локальними показниками ефективності, крім ділянки параболи (відліки 265-285), де ЛАФ АЗ має менші значення СКП (табл. 1, ситуації 5 - 7). Якщо за низького рівня шуму (табл. 1, ситуації 1 - 3) для ЛАФ АНЗ давалися взнаки динамічні помилки обробки стику постійного сигналу й параболи (відліки 240-260), то при зростанні дисперсії шуму (табл. 1, ситуації 5 - 8) в області цієї особливої точки ЛАФ АНЗ забезпечує найменші значення СКП. Результати чисельного моделювання (табл. 1) підтверджують кращі статистичні властивості міріадного ЛАФ АНЗ на відрізьку постійного рівня (відліки 10-40) і в області стрибка (відліки 40-60) [35]. При збільшенні рівня шуму перевага ЛАФ АНЗ, а також близького до нього за ефективністю ЛАФ АНЗ_{nd} над алгоритмом АЗ зростає. За інтегральними показниками СКП у широкому діапазоні змінення дисперсії шуму (табл. 1, ситуації 4 - 7) перевага міріадних ЛАФ над АЗ наступна: для ЛАФ АНЗ $(\chi_t^{AZ} - \chi_t^{АНЗ}) / \chi_t^{AZ}$ = 16 - 33,7%, для ЛАФ АНЗ_{nd} $(\chi_t^{AZ} - \chi_t^{АНЗ_{nd}}) / \chi_t^{AZ}$ = 11 - 34,3%.

Таблиця 1

Статистичні оцінки ефективності фільтрації за критерієм середньоквадратичної похибки, ppm ($\times 10^{-6}$)

Фільтр	χ_t	χ_{10-40} 	χ_{40-60} 	χ_{90-110} 	$\chi_{110-140}$ 	$\chi_{140-160}$ 	$\chi_{160-190}$ 	$\chi_{190-210}$ 	$\chi_{240-260}$ 	$\chi_{265-285}$
1) $\sigma_a^2=0,00001; N_R=200;$										
None	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
AZ	15	1	3	4	2	199	2	4	6	11
AHZ	147	1	5	19	1	204	1	39	1083	18
AHZ _{nd}	5	1	8	9	3	10	3	9	9	10
2) $\sigma_a^2=0,0001; N_R=200;$										
None	100	100	102	100	101	100	99	100	99	103
AZ	44	12	31	37	15	255	15	41	65	83
AHZ	160	6	21	43	10	228	11	63	1109	39
AHZ _{nd}	47	9	72	88	22	104	24	88	93	101
3) $\sigma_a^2=0,001; N_R=200;$										
None	1002	997	1023	1000	1011	998	991	1000	993	1029
AZ	262	117	312	254	140	588	148	280	627	344
AHZ	285	59	182	222	81	466	88	258	1369	245
AHZ _{nd}	268	77	275	332	110	568	116	391	753	424
4) $\sigma_a^2=0,003; N_R=200;$										
None	3005	2992	3069	3000	3032	2995	2973	3001	2980	3086
AZ	657	349	927	619	407	1039	416	680	1653	710
AHZ	551	177	579	502	221	918	241	598	1971	696
AHZ _{nd}	583	186	584	543	242	1012	264	668	2003	749
5) $\sigma_a^2=0,006; N_R=200;$										
None	6009	5984	6139	5999	6064	5991	5945	6002	5960	6172
AZ	1233	699	1987	1066	802	1747	824	1197	3078	1180
AHZ	944	354	1188	931	426	1514	465	979	2909	1407
AHZ _{nd}	950	357	1196	931	433	1536	474	996	2905	1412
6) $\sigma_a^2=0,01; N_R=200;$										
None	10015	9974	10231	9999	10107	9984	9909	10003	9934	10286
AZ	2163	1164	5663	1640	1343	2593	1342	1816	5324	1772
AHZ	1461	591	2060	1347	688	2235	751	1462	4190	2380
AHZ _{nd}	1468	601	2032	1351	693	2272	765	1482	4190	2380
7) $\sigma_a^2=0,03; N_R=200;$										
None	30046	29922	30693	29997	30321	29953	29726	30010	29802	30859
AZ	6264	3452	19713	4017	3828	5963	3877	4441	15416	4565
AHZ	4153	1777	9579	3258	1952	6470	2154	3545	10493	5857
AHZ _{nd}	4117	1800	9348	3260	1947	6362	2154	3539	10506	5598
8) $\sigma_a^2=0,06; N_R=200;$										
None	60092	59844	61387	59994	60641	59905	59452	60020	59605	61718
AZ	11012	6896	30108	7704	7259	10126	7587	7937	25751	8493
AHZ	8147	3561	28423	5197	3710	10411	4230	6281	18993	8618
AHZ _{nd}	8044	3608	28214	5163	3700	10170	4173	6281	19159	7943
9) $\sigma_a^2=0,03; P_{sp}=0,03; n_{sp}=1,0; N_R=500.$										
None	59676	61397	57464	58335	61487	61297	57943	57833	61517	59835
AZ	8622	5363	24901	6353	6094	7198	5788	6880	19910	5774
AZ _{sp}	7976	5287	20653	5417	5577	7424	5569	6028	18000	5787
AZ _{pr}	7632	5940	15733	6448	6794	6939	5693	6876	15244	5753
AHZ	6963	3195	26549	5615	3702	7318	3919	6816	15382	5519
AHZ _{pr}	5505	2623	12887	4573	3879	6781	3565	5185	13812	6713
AHZ _{nd}	6954	3185	26316	5537	3550	7047	3604	6773	16151	5017
AHZ _{ndp}	5549	2814	12645	4619	3925	6827	3644	5216	13841	6726

При високому рівні шуму (табл. 1, ситуації 7 - 8) за інтегральними показниками ефективності виграє ЛАФ АНЗ_{nd}, оскільки ним для більшого рівня шуму автоматично перемикаються набори фільтрів із більшими розмірами вікон, що призводить до підвищення ступеня придушення шуму. ЛАФ АНЗ_{nd} переважає за ефективністю над АНЗ в області стрибка (відліки 40-60) у діапазоні середнього - високого рівнів шуму (табл. 1, ситуації 6 - 8), на ділянках лінійного змінення сигналу (відліки 110-140, 160-190), зламів (відліки 90-110, 190-210), параболи (відліки 265-285) при високому рівні шуму (табл. 1, ситуація 8). При високому рівні шуму (табл. 1, ситуація 8) за інтегральними показниками СКП у порівнянні з АЗ покращення для АНЗ та АНЗ_{nd} складає 26 - 27 %.

За наявності імпульсних завад (табл. 1, ситуація 9) найменші інтегральні показники СКП забезпечують АНЗ та АНЗ_{nd}. Попередній міриадний фільтр Хемпела (4) помітно покращує робастність алгоритмів: при його застосуванні інтегральні значення СКП для ЛАФ АНЗ_{pr} та АНЗ_{ndpr} приблизно на 21 - 20% менші, ніж для відповідних ЛАФ АНЗ та АНЗ_{nd}. Усунення викидів міриадним фільтром Хемпела (4) ефективніше, ніж застосування детектору імпульсних завад на основі сумісного аналізу Z-параметрів [8]: порівняємо СКП для АЗ_{pr} та АЗ_{sp}. Для умов середнього рівня шуму й наявності викидів (табл. 1, ситуація 9) перевага за інтегральними значеннями СКП для ЛАФ АНЗ_{pr} та АНЗ_{ndpr} над робастним ЛАФ АЗ_{sp} складає 31 і 30,4% відповідно.

З наведеного вище аналізу чисельних оцінок ефективності випливають такі висновки. При дуже низькому рівні шуму (табл. 1, ситуації 1 - 2) локальні значення СКП для запропонованого алгоритму АНЗ_{nd} не перевищують СКП для вхідного сигналу стосовно всіх точок різкого змінення сигналу: стрибка, зламів, стику постійного сигналу й параболи, трикутного та параболічного екстремумів, що говорить про незастосування фільтрації для їхньої обробки. Отже, в зазначених умовах АНЗ_{nd} правильно перемикається на перший набір фільтрів (2). При зростанні дисперсії шуму (табл. 1, ситуації 3 - 6) АНЗ_{nd} перемикає набори фільтрів із збільшеними розмірами вікон і забезпечує ефективність, близьку до найкращої серед досліджуваних ЛАФ. При високій дисперсії шуму (табл. 1, ситуації 7 - 8) АНЗ_{nd} вибирає набір фільтрів із більшими вікнами, у такий спосіб його ефективність стає вищою. Отже, запропонований шумо- та сигнально-адаптивний нелінійний ЛАФ АНЗ_{nd} можна рекомендувати до застосування у випадках, коли дисперсія шуму істотно змінюється в часі від практичної відсутності шуму до середнього та високого його рівнів.

4.2. Аналіз вихідних сигналів нелінійних локально-адаптивних фільтрів

Застосування досліджуваних нелінійних ЛАФ для комплексної моделі одновимірного сигналу (рис. 1, а) при впливі адитивного гаусова шуму з різною дисперсією (рис. 2 - 3) та при наявності викидів (рис. 4) демонструє високу якість обробки.

При дуже низькому рівні шуму (рис. 2, а) спотворення, що вносяться нелінійними ЛАФ АЗ (рис. 2, б), АНЗ (рис. 2, в) та АНЗ_{nd} (рис. 2, г), візуально не помітні. Графіки ПЛА (рис. 2, д) показують, що більші (перевищуючі верхній поріг $t_{z2}=0,4$) значення параметра $|Z_i^f|$ відповідають стрибку, зламам, поліноміальному екстремуму, стику постійного сигналу та параболи, а умова $(r_i^f > th_i^f)$ виконується на ділянках сигналу постійного рівня. Така поведінка ПЛА дозволяє правильно перемикати для обробки околив різких змінень сигналу фільтр із високими динамічними властивостями: ЛАФ АЗ застосовує медіанний фільтр із малим розміром вікна $N=5$, ЛАФ АНЗ – АМФ (1) із розміром вікна $N=5$ та коефіцієнтом $b=0,7$, а ЛАФ АНЗ_{nd} фільтрацію не застосовує. На лінійних ділянках сигналу помітно згладжування флуктуацій. Правильне перемикання компонентних фільтрів підтверджується графіками параметрів, що адаптуються (рис. 2, е): в алгоритмі АМФ гнучко змінюваний параметр лінійності K_{ai}^f та значення коефіцієнту b , що перемикаються, переводять міриадний фільтр у нелінійний режим (малі значення K_{ai}^f і b) в області різких змінень сигналу та в режим лінійних властивостей (більші значення K_{ai}^f і b) на лінійних ділянках сигналу. Зміни розміру вікна N аналогічні коефіцієнту b : малі вікна відповідають стрибку, зламам, екстремумам – відповідно зменшуються динамічні помилки, а більші вікна відповідають лінійним ділянкам сигналу, що підвищує ступінь придушення шуму.

При середньому рівні шуму бачимо високу якість придушення шуму та водночас збереження точок розриву похідної в тестовому сигналі (рис. 3, а) досліджуваними нелінійними ЛАФ. Стає помітним краще згладжування флуктуацій міриадними ЛАФ АНЗ (рис. 3, в) та АНЗ_{nd} (рис. 3, г) у порівнянні з ЛАФ АЗ (рис. 3, б). Незважаючи на вплив шуму, ПЛА (рис. 3, д) здебільшого правильно реагують на локальні змінення сигналу: більші (перевищуючі верхній поріг $t_{z2}=0,4$) значення параметра $|Z_i^f|$ відповідають стрибку та стику відрізка постійного рі-

вня та параболі, малі значення (менші нижнього порогу $t_{z1}=0,2$) відповідають ізопотенційним і лінійно змінюваним ділянкам, а середні ($t_{z1} \leq |Z_i^f| \leq t_{z2}$) – зламам і вершині параболі; умова ($r_i^f > th_i^f$) “ідентифікує” пологі ділянки сигналу. Відповідне перемикавання компонентних фільтрів, здійснюване на основі аналізу ПЛА $|Z_i^f|$, r_i^f і th_i^f , здебільшого правильне. Поведінка параметрів, що адаптуються (рис. 3, е), аналогічна ситуації низького рівня шуму (рис. 2, е), однак значення параметра лінійності K_{ai}^f збільшуються – як наслідок, ступінь лінійності властивостей мірядного фільтра (та ефективність придушення шуму) зростає. Значення коефіцієнта b , що адаптивно перемикаються, задають режим нелінійності властивостям мірядного фільтра при обробці стрибка,

околу стиків постійного сигналу та висхідної й низхідної гілок параболі; переліченим особливим точкам також відповідає малий розмір вікна фільтра. Високу лінійність властивостей, що задається параметром лінійності $K = bK_{ai}^f$, адаптивний мірядний фільтр має на плоских і лінійно змінюваних ділянках сигналу та в області вершини параболі, котрим відповідають і більші розміри вікон; компонентний фільтр із проміжними властивостями та середнім розміром вікна застосовується в області зламів і піку.

У складних умовах наявності імпульсних завад і зростання дисперсії шуму (рис. 4, а) нелінійні ЛАФ AZ_{sp} , AHZ_{pr} , AHZ_{ndpr} демонструють високі робастні властивості та вискоефективне придушення шуму. Як бачимо, завдяки кращим статистичним властивостям якість вихідних сигналів для мірядних ЛАФ AHZ_{pr} (рис. 4, в) та AHZ_{ndpr} (рис. 4, г) вища, ніж для ЛАФ AZ_{sp} (рис. 4, б).

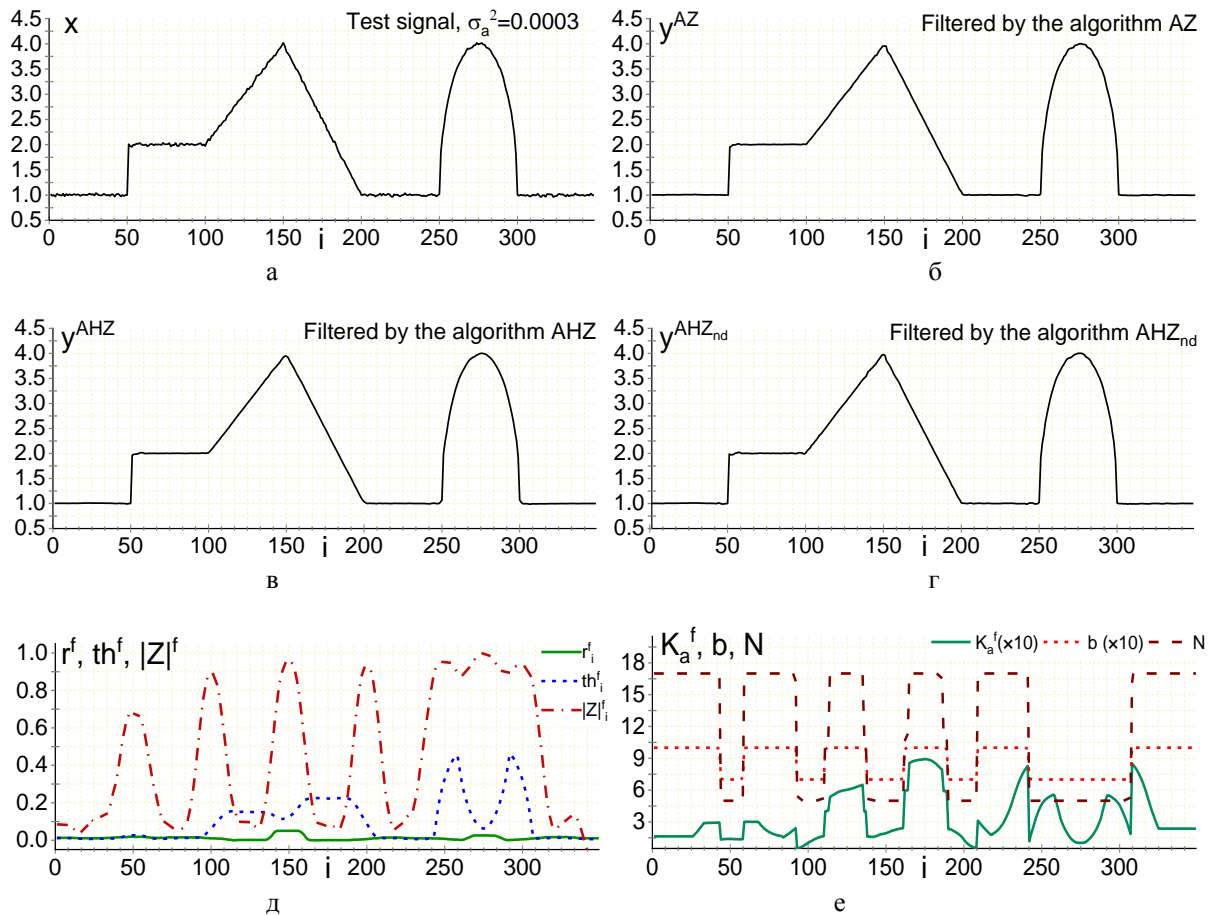


Рис. 2. Застосування нелінійної локально-адаптивної фільтрації для комплексної моделі одновимірного сигналу при низькому рівні шуму: а) тестовий сигнал з адитивним гаусовим шумом (дисперсія $\sigma_a^2=0,0003$);

б) сигнал на виході алгоритму AZ; в) сигнал на виході мірядного алгоритму AHZ; г) сигнал на виході шумо- та сигнально-адаптивного мірядного алгоритму AHZ_{nd} ; д) параметри локальної адаптації r_i^f , th_i^f , $|Z_i^f|$ для перемикавання компонентних фільтрів; е) параметри, що адаптуються: згладжений параметр лінійності K_a^f , коефіцієнт b , розмір вікна N (для наочності K_a^f і b помножуються на 10)

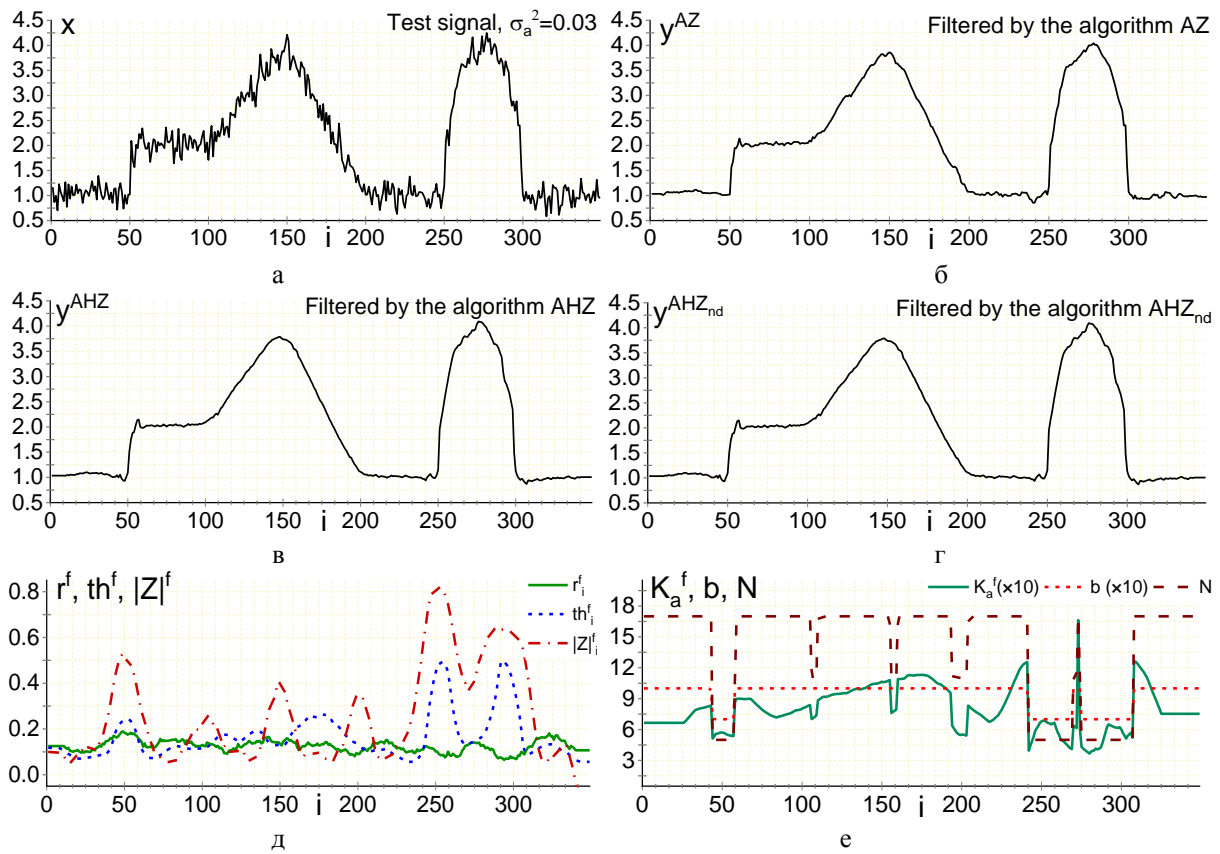


Рис. 3. Застосування нелінійної локально-адаптивної фільтрації для комплексної моделі одновимірного сигналу при середньому рівні шуму: а) тестовий сигнал з адитивним гаусовим шумом ($\sigma_a^2=0,03$); б) сигнал на виході алгоритму AZ; в) сигнал на виході міріадного алгоритму AHZ; г) сигнал на виході шумо- та сигнально-адаптивного міріадного алгоритму AHZ_{nd}; д) параметри локальної адаптації r_i^f , th_i^f , Z_i^f ; е) параметри, що адаптуються: згладжений параметр лінійності K_a^f , коефіцієнт b , розмір вікна N (K_a^f і b помножені на 10)

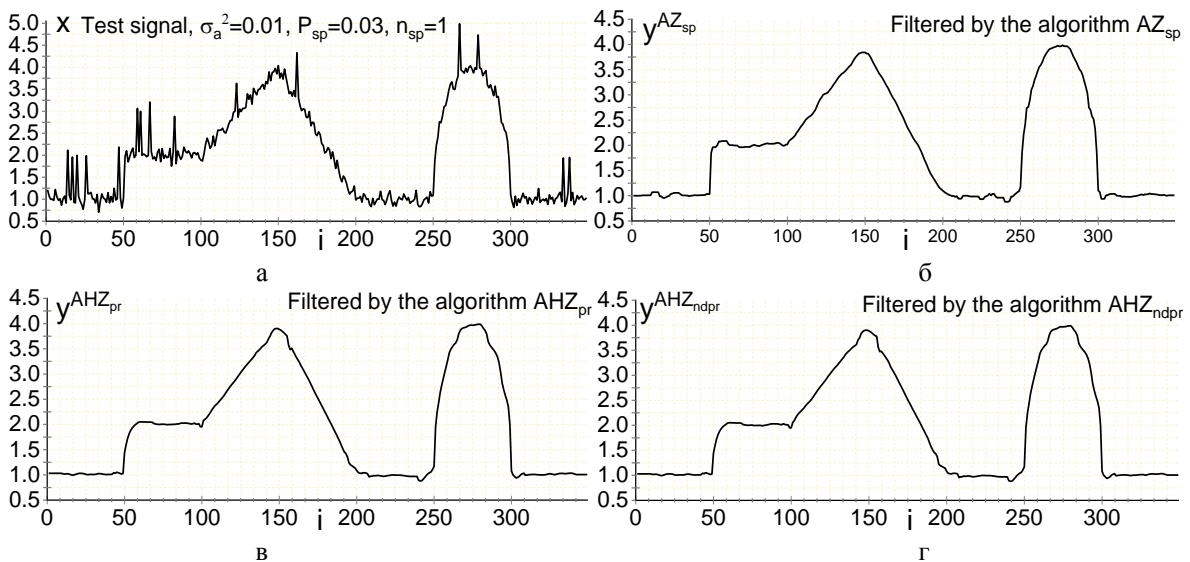


Рис. 4. Застосування нелінійної локально-адаптивної фільтрації для комплексної моделі одновимірного сигналу в складних умовах впливу шуму з високим рівнем дисперсії та імпульсних завад: а) тестовий сигнал з адитивним гаусовим шумом (дисперсія $\sigma_a^2=0,06$) та імпульсними завадами (ймовірність викидів $P_{sp}=0,03$, їхня амплітуда $n_{sp}=1$); б) сигнал на виході алгоритму AZ_{sp}; в) сигнал на виході міріадного алгоритму AHZ_{pr}; г) сигнал на виході шумо- та сигнально-адаптивного міріадного алгоритму AHZ_{ndpr}

Застосування розглянутих нелінійних ЛАФ та модифікації запропонованого шумо- та сигнально-адаптивного алгоритму, що полягає в застосуванні повторної фільтрації залежно від попередніх оцінок рівнів шуму [31, 32], для модельного сигналу ЕНГ (рис. 1, б), забрудненого нестационарним шумом, підтверджує високу ефективність обробки (рис. 5 - 6). До модельного сигналу доданий гаусів шум із змінним рівнем дисперсії (рис. 5, а). Ділянки тестового сигналу, задані вказаними нижче індексами, відповідають таким значенням відношення сигнал-шум: 30 дБ – індекси 1-100; 25 дБ – індекси 101-300 і 2301-2500; 20 дБ – індекси 301-500 і 2101-2300; 15 дБ – індекси 501-700 і 1901-2100; 10 дБ – індекси 701-900 і 1701-1900; 5 дБ – індекси 901-1100 і 1501-1700; 0 дБ – індекси 1101-1500.

Як бачимо (рис. 5, б - д), різкі змінення сигналу добре збережені, ступінь придушення шуму високий. Помітно краще придушення шуму міриадними ЛАФ АНЗ (рис. 5, в), АНЗ_{nd} (рис. 5, г) і ЛАФ з вибірковою застосування повторної фільтрації (якщо $\hat{n}_i > 2$), позначеним як АНЗ'_{nd}, (рис. 5, д) у порівнянні з ЛАФ АЗ (рис. 5, б). ЛАФ АНЗ_{nd} так само зберігає різкі змінення сигналу, як й однопрохідний фільтр АНЗ_{nd}, однак краще придушує шум при зростанні його дисперсії. ПЛІА (рис. 5, е) здебільшого правильно визначають локальні сигнально-завадові ситуації, коли доцільне перемикавання різних компонентних фільтрів: модуль Z-параметра реагує великими (близькими до

одиниці) значеннями на стрибки, а малими (близькими до нуля) – на лінійну поведінку сигналу, а умова ($r_i^f \leq th_i^f$) (2) відповідає стрибкам; тільки на ділянці з дуже високим рівнем шуму зазначена умова не виконується, що призводить до кращого придушення шуму внаслідок застосування фільтра з лінійними властивостями та великим розміром вікна, на цій ділянці в околі стрибка Z-параметр має проміжне значення, що призводить до застосування фільтра із середніми властивостями. Різні рівні шуму за допомогою прапорця (3) визначаються в основному правильно, спостерігаються незначні помилки в перемиканні наборів фільтрів між ближніми рівнями, а при середньому й високому рівнях шуму застосовується повторна фільтрація (рис. 5, е). Параметри, що адаптуються: параметр лінійності K_{ai} , його коефіцієнт b , розмір вікна N змінюються відповідно до локальної поведінки сигналу та рівня шуму (рис. 5, е - ж): малі значення b і N відповідають стрибкам, а великі – лінійним ділянкам сигналу. Параметр K_{ai} збільшується зі зростанням рівня шуму, що підвищує лінійність властивостей міриадного фільтра та відповідну ефективність придушення шуму. З графіків зазначених параметрів також випливає, що шумо- та сигнально-адаптивний ЛАФ АНЗ_{nd} гнучкіше змінює розмір вікна N і коефіцієнт b у порівнянні з ЛАФ АНЗ: для АНЗ_{nd} (рис. 5, з) значення N і b при низькому рівні шуму менші, а при високому більші, ніж для АНЗ (рис. 5, ж).

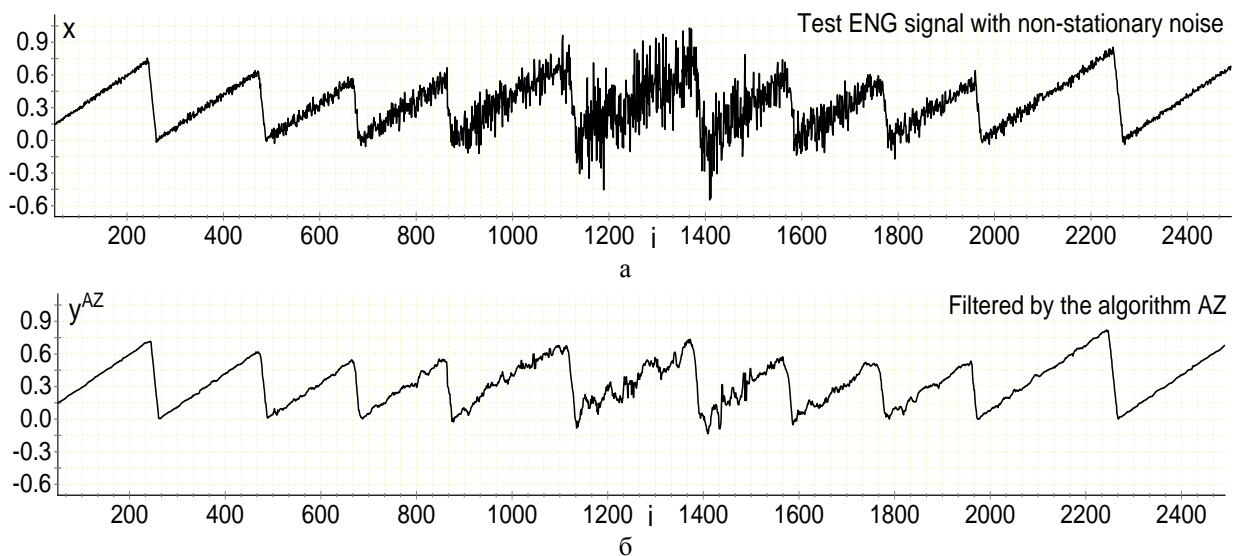


Рис. 5. Локально-адаптивна нелінійна фільтрація модельного сигналу електроністагмограми з нестационарним шумом: а) тестовий сигнал; б) сигнал на виході алгоритму АЗ; в) сигнал на виході алгоритму АНЗ; г) сигнал на виході алгоритму АНЗ_{nd}; д) сигнал на виході алгоритму АНЗ'_{nd}; е) параметри локальної адаптації r^f , th^f , Z^f та оцінки рівнів шуму (для наочності помножені на 0,1); ж) параметри, що адаптуються: параметр лінійності K_{ai} , коефіцієнт b (помножені на 10), розмір вікна N для алгоритму АНЗ; з) параметри, що адаптуються: параметр лінійності K_{ai} , коефіцієнт b (помножені на 10), розмір вікна N для алгоритму АНЗ_{nd}

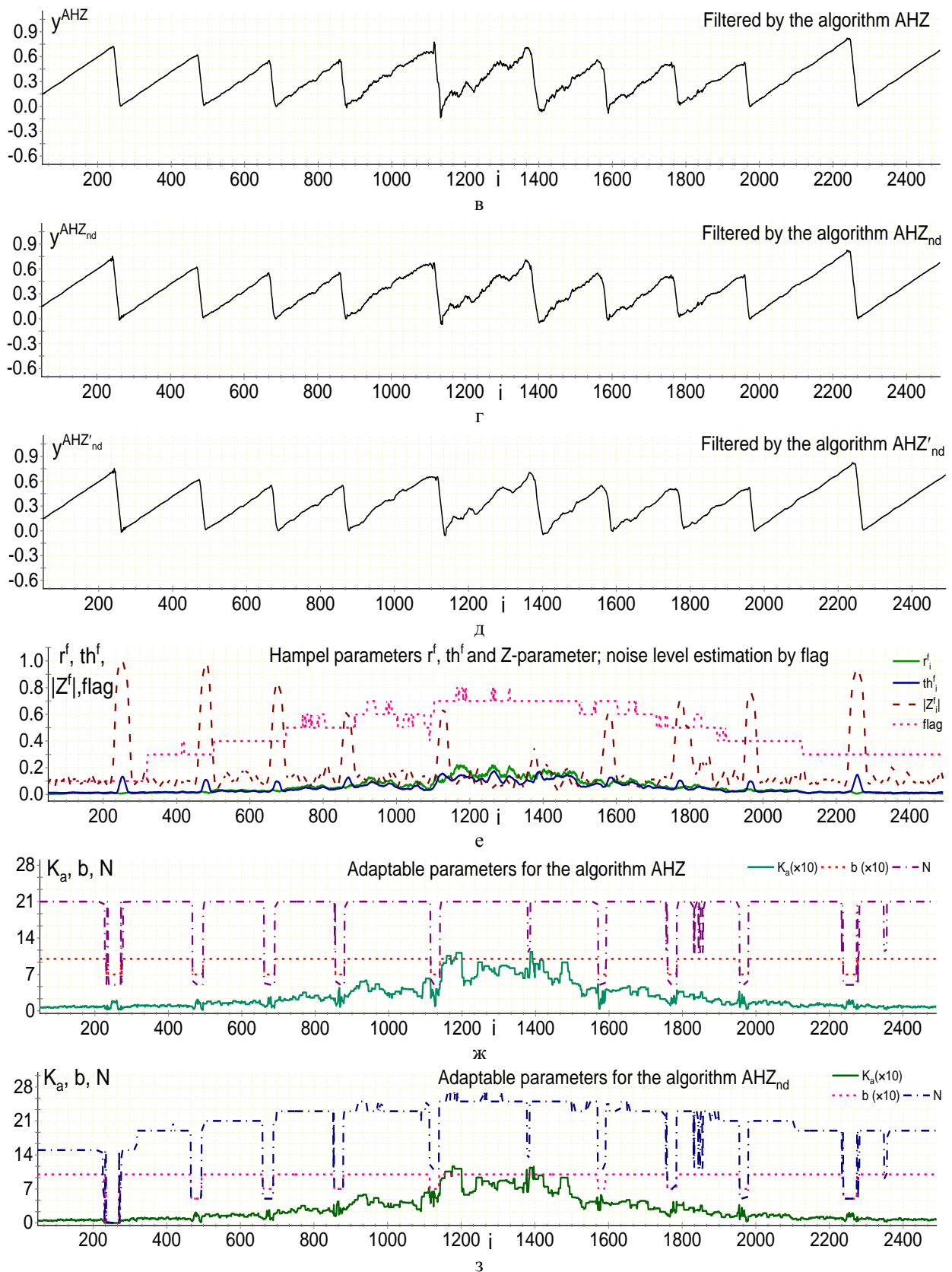


Рис. 5. (продовження)

З графіків залишкового шуму, що обчислюється як $n_{\text{resi}} = s_i - y_i^f$, де s_i – чистий сигнал, y_i^f – сигнал

на виході фільтра, впливає очевидно покращення якості придушення нестационарного шуму (рис. 6, а) запропонованими мірядними алгоритмами AHZ,

АНЗ_{nd}, АНЗ'_{nd} у порівнянні з ЛАФ AZ (рис. 6, б - д). На сильно зашумленій ділянці сигналу АНЗ_{nd} та АНЗ'_{nd} (рис. 6, г, д) ефективніше придушують шум,

ніж АНЗ (рис. 6, в). Внаслідок вибіркового застосування повторної фільтрації алгоритм АНЗ'_{nd} найбільш ефективний.

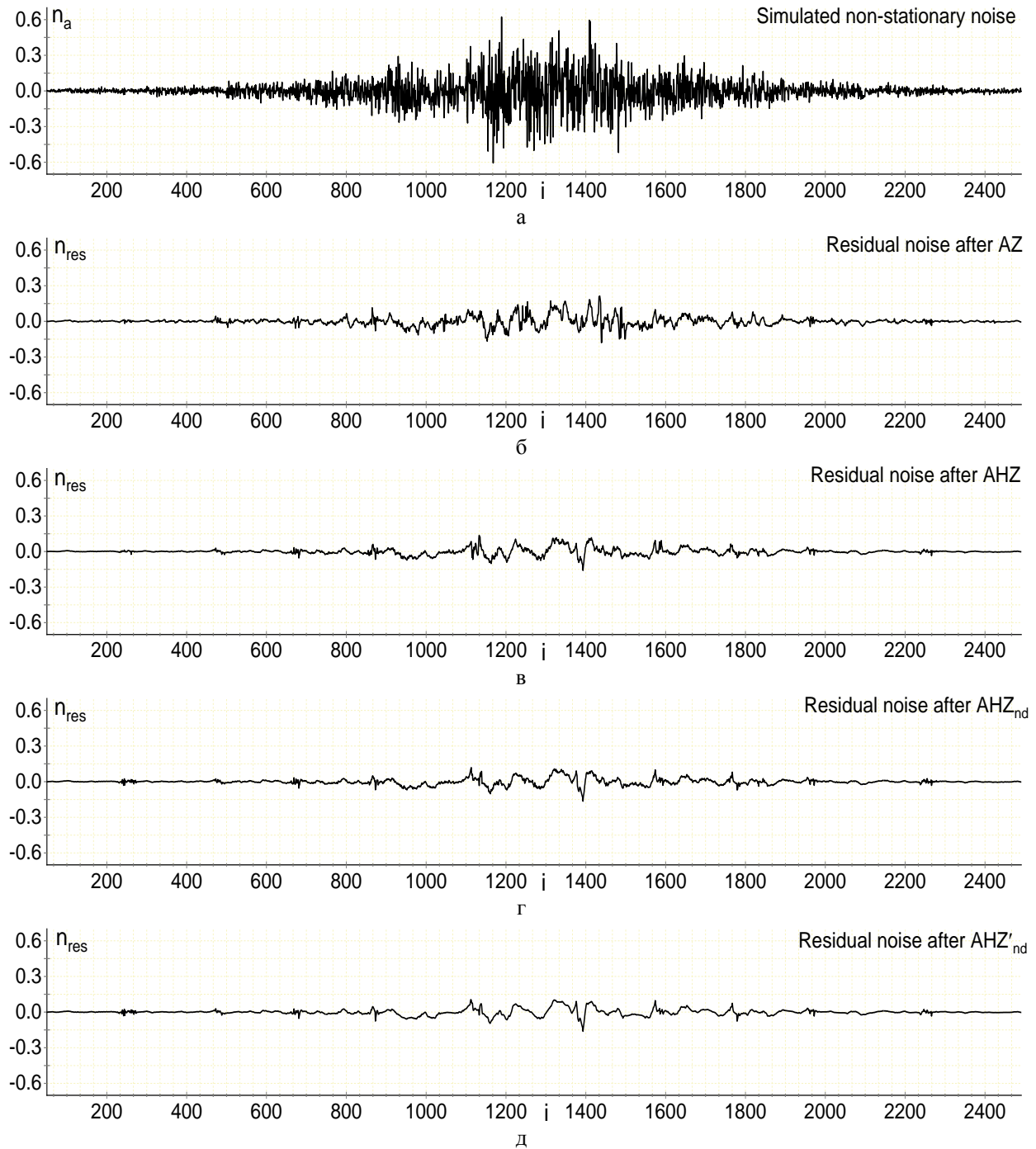


Рис. 6. Придушення нестационарного шуму досліджуваними нелінійними локально-адаптивними фільтрами: а) шум із різним рівнем дисперсії; б) залишковий шум на виході ЛАФ AZ; в) залишковий шум на виході ЛАФ АНЗ; г) залишковий шум на виході ЛАФ АНЗ_{nd}; д) залишковий шум на виході ЛАФ АНЗ'_{nd}

Обробка сигналів ЕНГ правого та лівого ока [42] (рис. 7 - 8, а) демонструє високу якість розглянутих нелінійних ЛАФ. Міриадні ЛАФ АНЗ (рис. 7 - 8, в), АНЗ_{nd} (рис. 7 - 8, г), АНЗ'_{nd} (рис. 7 - 8, д) ефективніше згладжують високочастотні флуктуації порівняно з

ЛАФ AZ (рис. 7 - 8, б). Як бачимо, в результаті застосування запропонованих алгоритмів локально-адаптивної міриадної фільтрації амплітудно-часові параметри та околиці різких змінень сигналу, зокрема стрибки, обумовлені саккадичними рухами очей, добре

збережені (візуально викривлення не помітні). Шум придушено в достатньо високому ступені, в більшій мірі мірядними ЛАФ АНЗ, АНЗ_{nd}, АНЗ'_{nd}. Помітна

більш висока ефективність шумо- та сигнально-адаптивного ЛАФ АНЗ'_{nd} із вибірковим залежно від оцінок рівнів шуму застосуванням повторної фільтрації.

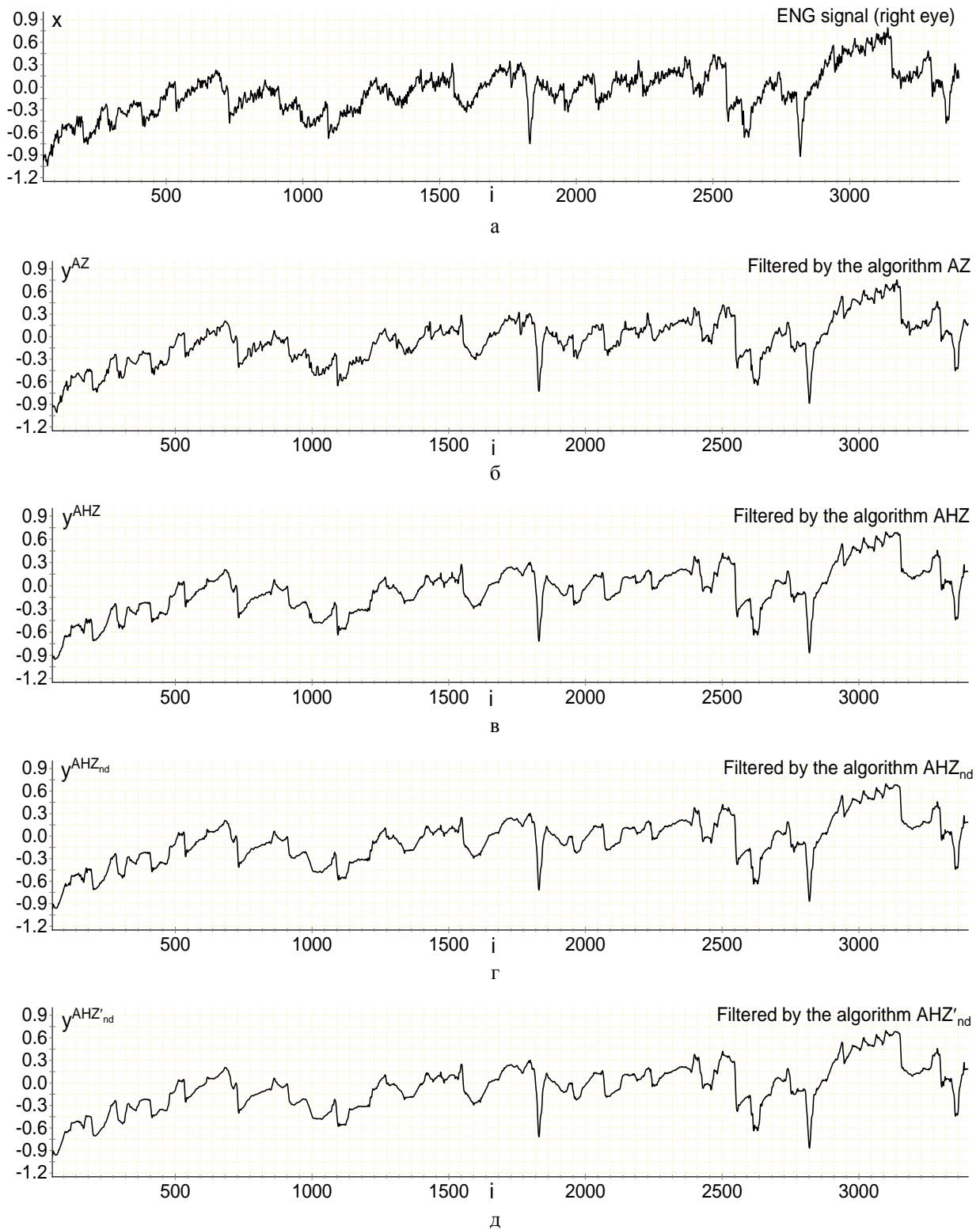


Рис. 7. Нелінійна локально-адаптивна фільтрація сигналу електроністагмограми (ЕНГ): а) вхідний сигнал ЕНГ правого ока; б) сигнал на виході алгоритму AZ; в) сигнал на виході мірядного алгоритму ANZ; г) сигнал на виході шумо- та сигнально-залежного мірядного алгоритму ANZ_{nd}; д) сигнал на виході шумо- та сигнально-залежного алгоритму ANZ'_{nd} з вибірковим застосуванням повторної фільтрації

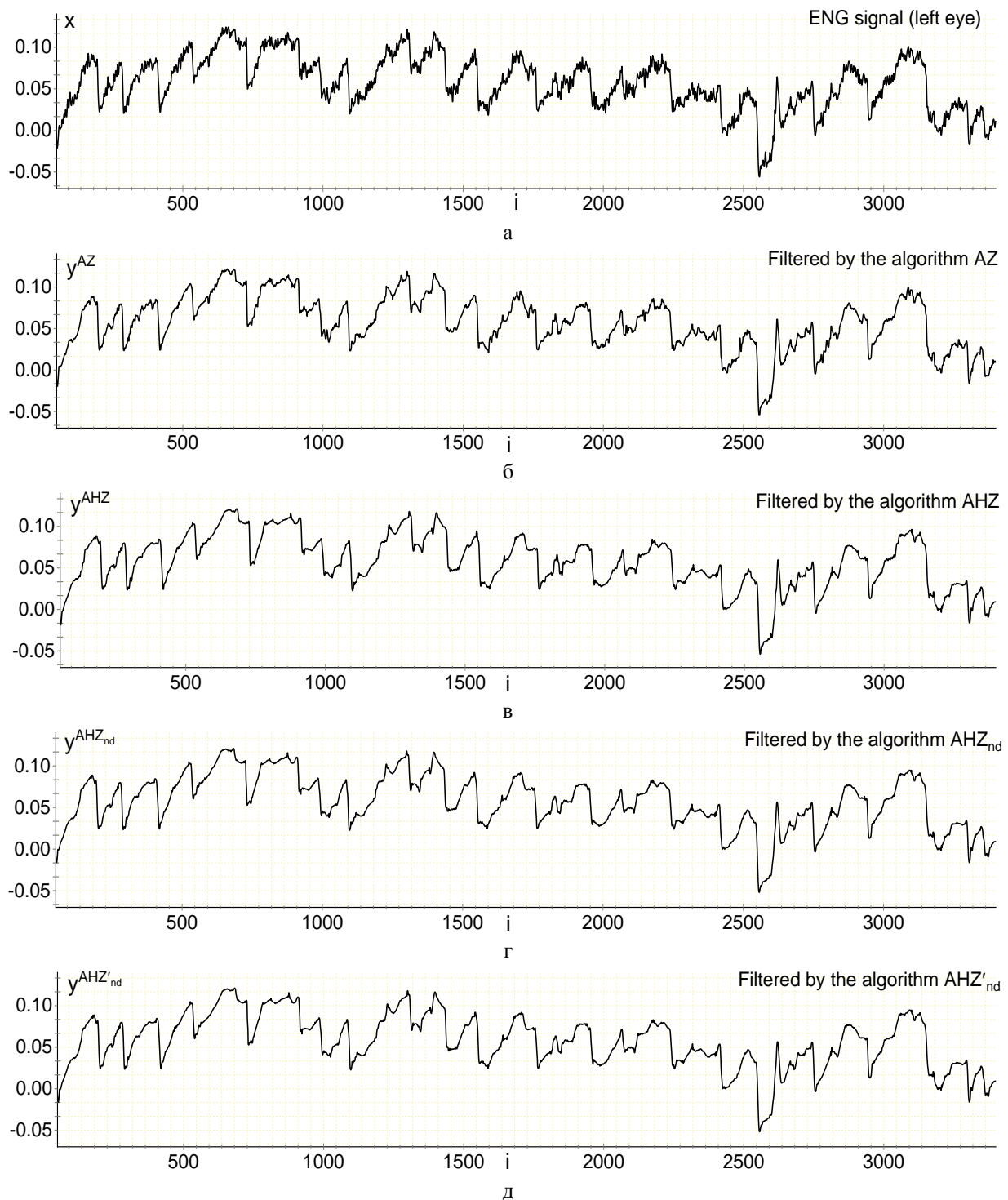


Рис. 8. Нелінійна локально-адаптивна фільтрація сигналу електроністагмограми (ЕНГ): а) вхідний сигнал ЕНГ лівого ока; б) сигнал на виході алгоритму AZ; в) сигнал на виході алгоритму AHZ; г) сигнал на виході алгоритму AHZ_{nd}; д) сигнал на виході алгоритму AHZ'_{nd}

Висновки

Запропоновано локально-адаптивний мірядний фільтр із шумо- та сигнально-залежним зміненням параметрів у часі для придушення нестационарного (з точки зору істотної варіації дисперсії) шуму. У цьому алгоритмі пропонується використовувати попередню

оцінку рівня шуму за допомогою прапорця, що умовно визначає декілька рівнів шуму, для яких доцільно змінювати (збільшувати в разі зростання дисперсії шуму) розміри вікон компонентних фільтрів, що адаптивно перемикаються залежно від локальних особливостей сигналу. У результаті оцінок рівнів шуму

алгоритмом автоматично перемикаються набори фільтрів, що різняться розмірами вікон, а залежно від ПЛА, що визначають характер поведінки сигналу в локальній області, з вибраного набору застосовується компонентний фільтр, що більш підходить для обробки. Така ідея шумо- та сигнально-залежної локально-адаптивної фільтрації дозволяє досягти збереження сигналу за відсутності або при дуже низькому рівні шуму внаслідок незастосування фільтрації, мінімальних динамічних помилок при низькому та середньому рівнях шуму в результаті застосування фільтрів із малими та середніми розмірами вікон, а також покращити придушення шуму при його високому рівні завдяки збільшенню розмірів вікон фільтрів.

У якості ПЛА запропоновано сумісно застосовувати параметри Хемпела [36] та Z-параметр [8], що дозволяє розрізняти околиці різких змінень сигналу (стрибки, злами, екстремуми), ділянки із “середньою” динамікою сигналу (гладкі криві, злами) та ділянки лінійно змінюваного та постійного сигналу. У першій ситуації застосовується фільтр із високим ступенем нелінійності, що забезпечує збереження різких змінень сигналу, в другій – фільтр із середніми динамічними та статистичними властивостями, а в третій – з високими лінійними (згладжуючими) властивостями. Так досягаються високі інтегральні показники ефективності при обробці сигналів із різною поведінкою інформативної компоненти та змінною дисперсією шуму. ПЛА пропонується використовувати й для приблизної оцінки рівнів шуму, що майже не ускладнює алгоритм.

У розробленому алгоритмі нелінійної локально-адаптивної фільтрації як компонентні фільтри пропонується перемикати адаптивні міріадні фільтри з різними розмірами вікон і значеннями коефіцієнта, на який помножується параметр лінійності, що обчислюється залежно від локальних оцінок крутизни сигналу. Малі значення коефіцієнта та, як наслідок, параметра лінійності й малий розмір вікна задають високу нелінійність властивостям міріадного фільтра, що дозволяє добре зберігати різкі змінення сигналу та зменшити динамічні помилки, що вносяться при обробці. Більші значення коефіцієнта та параметра лінійності переводять міріадний фільтр у режим лінійності властивостей, коли ним забезпечується висока ефективність згладжування флуктуацій на лінійних ділянках сигналу; водночас вибір більшого розміру вікна додатково підвищує ступінь придушення шуму. Проміжні значення коефіцієнта й розміру вікна забезпечують середні динамічні та статистичні властивості (проміжну ступінь нелінійності) для міріадного фільтра – тоді він стає ефективнішим в області гладких кривих, зламів, екстремумів при незначній зашумленості сигналу.

Отримані за допомогою чисельного моделювання статистичні оцінки якості фільтрів підтверджують більш високу ефективність запропонованого шумо- та сигнально-адаптивного міріадного фільтра для комплексного одновимірного сигналу, що містить різні типи елементарних сигналів, при низькому та високому рівнях шуму порівняно з іншими високоефективними нелінійними ЛАФ [8, 35]. Розроблений фільтр практично не вносить спотворень у вхідний сигнал при дуже низькому рівні шуму внаслідок незастосування фільтрації або використання малих вікон в околиці стрибка, зламів, трикутного та параболічного екстремумів, стику сигналу постійного рівня та параболі. Ефективність цього алгоритму близька до найкращих показників серед розглянутих ЛАФ для умов низького та середнього рівнів шуму та найкраща при високій дисперсії шуму. Показано, що, крім високих динамічних і статистичних властивостей, досліджені ЛАФ забезпечують і високу робастність – здатність усувати викиди без внесення в їхньому околиці значних спотворень сигналу. При невеликій до нуля імовірності імпульсних завад доцільне застосування попереднього фільтра Хемпела, в якому медіанну операцію запропоновано [35] замінити на міріадну. Висока ефективність і переважно коректне функціонування ЛАФ підтверджуються як чисельними оцінками якості в широкому діапазоні змінення дисперсії шуму, так й аналізом сигналів, графіків ПЛА та параметрів, що адаптуються до локальних змін сигналу та дисперсії шуму.

Продемонстрована висока якість придушення нестационарного шуму зі змінною дисперсією для моделі біомедичного сигналу ЕНГ і переваги застосування адаптивного міріадного фільтра з шумо- та сигнально-залежним зміненням параметрів. Показано, що селективне застосування повторної фільтрації [31, 32], коли рівень шуму оцінюється як середній - високий, підвищує ефективність придушення шуму й практично не вносить додаткових помилок у результаті обробки. Наведені приклади, що ілюструють високоефективне застосування запропонованих міріадних ЛАФ для обробки сигналів ЕНГ.

Позитивною якістю розглянутих локально-адаптивних алгоритмів є їхня висока ефективність у практичних умовах обмеженої апріорної інформації про модель поведінки сигналу та дисперсію шуму. Ці ЛАФ не потребують часу для адаптації параметрів та їхнього точного налаштування, мають невисоку обчислювальну складність і дозволяють здійснювати обробку сигналу в режимі квазі-реального часу з незначною затримкою отримання поточного відліку вихідного сигналу відносно вхідного. Локально-адаптивна нелінійна фільтрація забезпечує прийнятний компроміс суперечливих вимог до високоефектив-

ного придушення шуму, мінімальних динамічних помилок, усунення викидів і високої швидкодії. Запропонований шумо- та сигнально-адаптивний міріадний фільтр має кращу якість за умов істотної нестационарності шуму. Вибіркове застосування повторної фільтрації залежно від оцінок рівнів шуму підвищує ефективність зазначеного алгоритму.

Подальші напрями досліджень полягають у застосуванні розроблених локально-адаптивних міріадних фільтрів для обробки біомедичних сигналів рухів очей; в отриманні оцінок ефективності та в порівнянні з іншими адаптивними фільтрами. Також можливе високоефективне застосування запропонованих алгоритмів фільтрації для обробки зображень.

Внесок авторів: основна ідея, розробка методів адаптивної нелінійної фільтрації та програмування їхніх алгоритмів, моделювання та дослідження – **Н. О. Тулякова**; постановка завдання, редагування – **О. М. Трофимчук**. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Oppenheim, A. V. *Discrete-time Signal Processing*. Englewood Cliffs [Text] / A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer. – NJ : Prentice Hall, 1989.
2. Rao, A. *Discrete Cosine Transform* [Text] / A. Rao, P. Yip. – Academic Press, 1990.
3. Быстрые алгоритмы цифровой обработки изображений [Текст] : пер. с англ. / Т. С. Хуанг, Дж. О. Эклунд, Г. Дж. Нуссбаумер и др. – М. : Радио и связь, 1984. – 224 с.
4. Astola, J. *Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering* [Text] / J. Astola, P. Kuosmanen. – USA : CRC Press LLC, 1997. – 276 p.
5. Bernstein, R. *Adaptive nonlinear filters for simultaneous removal of different kinds of noise in images* [Text] / R. Bernstein // *IEEE Transactions On Circuits and Systems*. – 1987. – Vol. 34, No. 11. – P. 1275 – 1291. DOI: 10.1109/TCS.1987.1086066.
6. Bovic, A. *A generalization of median filtering using linear combinations of order statistics* [Text] / A. Bovic, T. Huang, D. Munson // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 1983. – Vol. 31, No. 6. – P. 1342–1350. DOI: 10.1109/TASSP.1983.1164247.
7. Лукин, В. В. *Анализ свойств алгоритмов нелинейной фильтрации одномерных информационных сигналов* [Текст] / В. В. Лукин, Н. О. Тулякова, М. О. Дорожук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 1999. – Вып. 12. – С. 109 – 113.
8. Лукин, В. В. *Анализ поведения показателей локальной активности для нелинейных адаптивных фильтров* [Текст] / В. В. Лукин // *Радиофизика и электроника*. – 1998. – Вып. 3, № 2. – С. 80 – 89.
9. Local activity indicators for hard-switching adaptive filtering of images with mixed noise [Text] / V. P. Melnik, V. V. Lukin, A. A. Zelensky, J. T. Astola, P. Kuosmanen // *Optical Engineering*. – 2001. – Vol. 40, No. 8. – P. 1441-1455. DOI: 10.1117/1.1385815.
10. Zervakis, M. E. *Linear and nonlinear image restoration under the presence of mixed noise* [Text] / M. E. Zervakis, A. N. Venetsanopoulos // *IEEE Transactions On Circuits and Systems*. – 1991. – Vol. 38, No. 3. – P. 258 – 272. DOI: 10.1109/31.101319.
11. Kalluri, S. *Adaptive weighted myriad filter algorithms for robust signal processing in α -stable noise environments* [Text] / S. Kalluri, G. R. Arce // *Proc. of the IEEE Transactions on Signal Processing*. – 1998. – Vol. 46, No. 2. – P. 322–334. DOI: 10.1109/78.655418.
12. Pander, T. *An application of weighted myriad filter to suppression an impulsive type of noise in biomedical signals* [Text] / T. Pander // *TASK Quarterly*. – 2004. – Vol. 2, No. 8. – P. 199-216.
13. Pander, T. *Impulsive noise filtering in biomedical signals with application of new myriad filter* [Text] / T. Pander // *BIOSIGNAL' 2010: Proc. of the Int. Conf.* – 2010. – Vol. 20. – P. 94-101.
14. Christov, I. I. *Filtering of electromyogram artifacts from the electrocardiogram* [Text] / I. I. Christov, I. K. Daskalov // *Medical Engineering & Physics*. – 1999. – Vol. 21. – P. 731 – 736. DOI: 10.1016/S1350-4533(99)00098-3.
15. *Noise processing in exercise ECG stress test for the analysis and the clinical characterization of QRS and T wave alternans* [Text] / G. Bortolan, I. Christov, I. Simova, I. Dotsinsky // *Biomedical Signal Processing and Control*. – 2015. – Vol. 18. – P. 378 – 385. DOI: 10.1016/j.bspc.2015.02.003.
16. *Pseudo-real-time low-pass filter in ECG, self-adjustable to the frequency spectra of the waves* [Text] / I. Christov, T. Neycheva, R. Schmid, T. Stoyanov, R. Abächerli // *Medical & Biological Engineering & Computing*. – 2017. – Vol. 55. – P. 1579-1588. DOI: 10.1007/s11517-017-1625-y.
17. Christov, I. *Fine tuning of the dynamic low-pass filter for electromyographic noise suppression in electrocardiograms* [Text] / I. Christov, T. Neycheva, R. Schmid // *Computing in Cardiology*. – 2017. – Vol. 44. – P. 1-4. DOI: 10.22489/CinC.2017.088-007.
18. Christov, I. *Separation of electrocardiographic from electromyographic signals using dynamic filtration* [Text] / I. Christov, R. Raikova, S. Angelova // *Medical Engineering and Physics*. – 2018. – V. 57. – P. 1-10. DOI: 10.1016/j.medengphy.2018.04.007.
19. *Separation of the electromyographic from the electrocardiographic signals and vice versa. A topical review of the Dynamic procedure* [Text] / I. Christov, A. Gotchev, G. Bortolan, T. Neycheva, R. Raikova, R. Schmid // *Int. J. Bioautomation*. – 2020. – Vol. 24, No. 3. – P. 289-317. DOI: 10.7546/ijba.2020.24.3.000744.
20. Savitzky, A. *Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures* [Text] / A. Savitzky, M. Golay // *Analytical Chemistry*. – 1964. – Vol. 36. – P. 1627-1639. DOI: 10.1021/ac60214a047.
21. Diniz, P. S. *Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation* [Text] / P. S. Diniz. – New York, USA : Springer, 2008. – Chapter 5.

22. Adaptive estimation and reduction of noises affecting a self-mixing interferometric laser sensor [Text] / Z. A. Khan, U. Zabit, O. D. Bernal, T. Hussain // *IEEE Sensors Journal*. – 2020. – Vol. 20, No. 17. – P. 9806-9815. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2992848.

23. Adaptive noise canceling: Principles and applications [Text] / B. Widrow, Jr. J. R. Glover, J. M. McCool, J. Kaunitz, C. S. Williams, R. H. Hearn, J. R. Zeidler, Jr. E. Dong, R. C. Goodling // *Proc. IEEE*. – 1975. – Vol. 63, No. 12. – P. 1692-1716.

24. Clarkson, P. M. *Optimal and Adaptive Signal Processing* [Text] / P. M. Clarkson. – New York, USA : Routledge, 2017. – Chapter 5.

25. Yager, R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking [Text] / R. R. Yager // *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*. – 1988. – Vol. 8, No. 1. – P. 183 – 190. DOI: 10.1109/21.87068.

26. Pander, T. EEG signal improvement with cascaded filter based on OWA operator [Text] / T. Pander // *Signal, Image and Video Processing*. – 2019. – Vol. 13. – P. 1165–1171. DOI: 10.1007/s11760-019-01458-9.

27. Anderson, B. D. *Optimal Filtering* [Text] / B. D. Anderson, J. B. Moore. – Prentice Hall : Englewood Cliffs, NJ, USA, 1979. – Chapters 2–4.

28. Chang, G. Robust Kalman filtering based on Mahalanobis distance as outlier judging criterion [Text] / G. Chang // *Journal of Geodesy*. – 2014. – Vol. 88. – P. 391–401. DOI: 10.1007/s00190-013-0690-8.

29. Lee, K. Robust outlier-adaptive filtering for vision-aided inertial navigation [Text] / K. Lee, E. N. Johnson // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, No. 7. – Article No. 2036. DOI: 10.3390/s20072036.

30. Тулякова, Н. О. Адаптивный метод с шумо-и сигнально-зависимым переключением фильтров для подавления нестационарного шума в сигнале электрокардиограммы в реальном времени [Текст] / Н. О. Тулякова, А. Н. Трофимчук, А. Е. Стрижак // *Радиотехника* – 2018. – Вып. 194. – С. 79-96.

31. Тулякова, Н. О. Локально-адаптивная фильтрация нестационарного шума в длительных электрокардиографических сигналах [Текст] / Н. О. Тулякова, А. Н. Трофимчук // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2020. – № 4 (96). – С. 16-33. DOI: 10.32620/reks.2020.4.02.

32. Tulyakova, N. Real-time filtering adaptive algorithms for non-stationary noise in electrocardiograms [Text] / N. Tulyakova, O. Trofymchuk // *Biomedical Signal Processing and Control*. – 2022. – Vol. 72, Part A. 103308. DOI: 10.1016/j.bspc.2021.103308.

33. Tulyakova, N. Adaptive algorithms for elimination of electromyographic noise in the electrocardiogram signal [Text] / N. Tulyakova, A. Trofymchuk, A. Strizhak // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2018. – Vol. 77, No. 6. – P. 549-561. DOI: 10.1615/Telecom-RadEng.v77.i6.70.

34. Locally-adaptive myriad filtration of one-dimensional complex signal [Text] / N. Tulyakova, T. Neycheva, O. Trofymchuk, O. Strizhak // *Int. J. Bioautomation*. – 2018. – Vol. 22, No. 3. – P. 273-294.

35. Тулякова, Н. О. Модифицированные локально-адаптивные мириадные фильтры [Текст] / Н. О. Тулякова, А. Н. Трофимчук, А. Е. Стрижак // *Радиотехника*. – 2019. – Вып. 196. – С. 77-88.

36. The class of generalized Hampel filters [Text] / R. K. Pearson, Y. Neuwo, J. Astola, M. Gabbouj // *EUSIPCO'2015: Proc. of the 23rd European Signal Processing Conference*. – Nice (France). – 2015. – P. 2501-2505. DOI: 10.1109/EUSIPCO.2015.7362835.

37. Gonzalez, J. G. Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environments [Text] / J. G. Gonzalez, G. R. Arce // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2001. – Vol. 49, No. 2. – P. 438-441. DOI: 10.1109/78.902126.

38. Абрамов, С. К. Алгоритм реализации мириадной фильтрации [Текст] / С. К. Абрамов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2000. – Вып. 21. – С. 143–147.

39. Тулякова, Н. О. Алгоритмы мириадной фильтрации [Текст] / Н. О. Тулякова, А. Н. Трофимчук, А. Е. Стрижак // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2014. – № 4 (68). – С. 76-83.

40. Pander, T. The class of M-filters in the application of ECG signal processing [Text] / T. Pander // *Bio-cybernetics and Biomedical Engineering*. – 2006. – Vol. 26, No. 4. – P. 3-13.

41. Augustyniak, P. Improve the quality of diagnostic parameters of an electronystagmogram using signal filtration in the time-frequency domain and adaptatively adjusted characteristics [Text] / P. Augustyniak, R. Tadeusiewicz // *TFTS-96: Proc. of Third Int. Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*. – 1996. – P. 381-384.

42. An automatic saccadic eye movement detection in an optokinetic nystagmus signal [Text] / T. Pander, R. Czabański, T. Przybyła, D. Pojda-Wilczek // *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*. – 2014. – Vol. 59, No. 6. – P. 529-543. DOI: 10.1515/bmt-2013-0137.

References

1. Oppenheim, A. V., Schaffer R. W. *Discrete time Signal Processing*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall Publ., 1989.

2. Rao, A., Yip P. *Discrete Cosine Transform*. Academic Press Publ., 1990.

3. Huang, T. S., Eklund, J.-O., Nussbaumer, G. J. *Быстрые алгоритмы цифровой обработки изображений* [Fast algorithms in digital image processing]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 224 p.

4. Astola, J. *Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering*. USA, CRC Press LLC Publ., 1997. 276 p.

5. Bernstein, R. Adaptive nonlinear filters for simultaneous removal of different kinds of noise in images. *IEEE Transactions On Circuits and Systems*, 1987, vol. 34, no. 11, pp. 1275-1291. DOI: 10.1109/TCS.1987.1086066.

6. Bovic, A., Huang, T., Munson, D. A generalization of median filtering using linear combinations of order statistics. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1983, vol. 31, no. 6, pp. 1342-1349. DOI: 10.1109/TASSP.1983.1164247.
7. Lukin, V. V., Tulyakova, N. O., Doroshchuk, M. O. Analiz svoistv algoritmov nelineinoi fil'tratsii odnomernykh informatsionnykh signalov [Property analysis of algorithms of nonlinear filtering of onedimensional information signals]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 1999, no. 12, pp. 109-113.
8. Lukin, V. V. Analiz povedeniya pokazatelei lokal'noi aktivnosti dlya nelineinykh adaptivnykh fil'trov [Analysis of local activity indicator behaviour for nonlinear adaptive filters]. *Radiofizika i elektronika – Radio physics and electronics*, 1998, vol. 3, no. 2, pp. 80-89.
9. Melnik, V. P., Lukin, V. V., Zelensky, A. A., Astola, J. T., Kuosmanen, P. Local activity indicators for hard-switching adaptive filtering of images with mixed noise. *Optical Engineering*, 2001, vol. 40, no. 8, pp. 1441-1455. DOI: 10.1117/1.1385815.
10. Zervakis, M. E., Venetsanopoulos, A. N. Linear and nonlinear image restoration under the presence of mixed noise. *IEEE Transactions On Circuits and Systems*, 1991, vol. 38, no. 3, pp. 258-272. DOI: 10.1109/31.101319.
11. Kalluri, S., Arce, G. R. Adaptive weighted myriad filter algorithms for robust signal processing in α -stable noise environments. *Proc. of the IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, vol. 46, no. 2, pp. 322-334. DOI: 10.1109/78.655418.
12. Pander, T. An application of weighted myriad filter to suppression an impulsive type of noise in biomedical signals. *TASK Quarterly*, 2004, vol. 2, no. 8, pp. 199-216.
13. Pander, T. Impulsive noise filtering in biomedical signals with application of new myriad filter. *BIOSIGNAL' 2010: Proc. of the Int. Conf.*, 2010, vol. 20, pp. 94-101.
14. Christov, I. I., Daskalov, I. K. Filtering of electromyogram artifacts from the electrocardiogram. *Medical Engineering & Physics*, 1999, vol. 21, pp. 731-736. DOI: 10.1016/S1350-4533(99)00098-3.
15. Bortolan, G., Christov, I., Simova, I., Dotsinsky, I. Noise processing in exercise ECG stress test for the analysis and the clinical characterization of QRS and T wave alternans. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2015, vol. 18, pp. 378-385. DOI: 10.1016/j.bspc.2015.02.003.
16. Christov, I., Neycheva, T., Schmid, R., Stoyanov, T., Abächerli, R. Pseudo-real-time low-pass filter in ECG, self-adjustable to the frequency spectra of the waves. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2017, vol. 55, pp. 1579-1588. DOI: 10.1007/s11517-017-1625-y.
17. Christov, I., Neycheva, T., Schmid, R. Fine tuning of the dynamic low-pass filter for electromyographic noise suppression in electrocardiograms. *Computing in Cardiology*, 2017, vol. 44, pp. 1-4. DOI: 10.22489/CinC.2017.088-007.
18. Christov, I., Raikova, R., Angelova, S. Separation of electrocardiographic from electromyographic signals using dynamic filtration. *Medical Engineering and Physics*, 2018, vol. 57, pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.medengphy.2018.04.007.
19. Christov, I., Gotchev, A., Bortolan, G., Neycheva, T., Raikova, R., Schmid, R. Separation of the electromyographic from the electrocardiographic signals and vice versa. A topical review of the Dynamic procedure. *Int. J. Bioautomation*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 289-317. DOI: 10.7546/ijba.2020.24.3.000744.
20. Savitzky, A., Golay, M. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedure. *Analytical Chemistry*, 1964, vol. 36, pp. 1627-1639. DOI: 10.1021/ac60214a047.
21. Diniz, P. S. *Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation*. New York, USA: Springer, 2008, ch. 5.
22. Khan, Z. A., Zabit, U., Bernal, O. D., Hussain, T. Adaptive estimation and reduction of noises affecting a self-mixing interferometric laser sensor. *IEEE Sensors Journal*, 2020, vol. 20, no. 17, pp. 9806-9815. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2992848.
23. Widrow, B., Glover, Jr. J. R., McCool, J. M., Kaunitz, J., Williams, C. S., Hearn, R. H., Zeidler, J. R., Dong, Jr. E., Goodling, R. C. Adaptive noise canceling: Principles and applications. *Proc. IEEE*, 1975, vol. 63, no. 12, pp. 1692-1716.
24. Clarkson, P. M. *Optimal and Adaptive Signal Processing*. New York, USA, Routledge, 2017, ch. 5.
25. Yager, R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, 1988, vol. 8, no. 1, pp.183-190. DOI: 10.1109/21.87068.
26. Pander, T. EEG signal improvement with cascaded filter based on OWA operator. *Signal, Image and Video Processing*, 2019, vol. 13, pp. 1165-1171. DOI: 10.1007/s11760-019-01458-9.
27. Anderson, B. D., Moore, J. B. *Optimal Filtering*. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1979, chapters 2 - 4.
28. Chang, G. Robust Kalman filtering based on Mahalanobis distance as outlier judging criterion. *Journal of Geodesy*, 2014, vol. 88, pp. 391-401. DOI: 10.1007/s00190-013-0690-8.
29. Lee, K., Johnson, E. N. Robust outlier-adaptive filtering for vision-aided inertial navigation. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 7, article no. 2036. DOI: 10.3390/s20072036.
30. Tulyakova, N. O., Trofimchuk, A. N., Strizhak, A. E. Adaptivnyi metod s shumom i signal'no-zavisimym pereklyucheniem fil'trov dlya podavleniya nestatsionarnogo shuma v signale elektrokardiogrammy v real'nom vremeni [Adaptive method with noise- and signal-dependent switching of filters for suppression of non-stationary noise in an electrocardiogram signal in real time]. *Radiotekhnika – Radio engineering*, 2018, no. 194, pp. 79-96.

31. Tulyakova, N. O., Trofimchuk, A. N. Lokal'no-adaptivnaya fil'tratsiya nestatsionarnogo shuma v dlitel'nykh elektrokardiograficheskikh signalakh [Locally adaptive filtering of non-stationary noise in long-term electrocardiographic signals]. *Radioelektronika i komp'yuternye sistemy – Radioelectronic and computer systems*, 2020, no. 4 (96), pp. 16-33. DOI: 10.32620/reks.2020.4.02.
32. Tulyakova, N., Trofymchuk, O. Real-time filtering adaptive algorithms for non-stationary noise in electrocardiograms. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022, vol. 72, part A. 103308. DOI: 10.1016/j.bspc.2021.103308.
33. Tulyakova, N., Trofimchuk, A., Strizhak, A. Adaptive algorithms for elimination of electromyographic noise in the electrocardiogram signal. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2018, vol. 77, no. 6, pp. 549-561. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i6.70.
34. Tulyakova, N., Neycheva, T., Trofymchuk, O., Strizhak, O. Locally-adaptive myriad filtration of one-dimensional complex signal. *Int. J. Bioautomation*, 2018, vol. 22, no. 3, pp. 273-294.
35. Tulyakova, N. O., Trofimchuk, A. N., Strizhak, A. E. Modifitsirovannye lokal'no-adaptivnye myriadnye fil'try [Modified locally-adaptive myriad filters]. *Radioelektronika – Radio engineering*, 2019, no. 196, pp. 77-88. DOI: 10.30837/rt.2019.1.196.10.
36. Pearson, R. K., Neuvo, Y., Astola, J., Gabbouj, M. The class of generalized Hampel filters. *EUSIPCO'2015: Proc. of the 23rd European Signal Processing Conference*, Nice (France), 2015, pp. 2501-2505. DOI: 10.1109/EUSIPCO.2015.7362835.
37. Gonzalez, J. G., Arce, G. R. Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environment. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, vol. 49, no. 2, pp. 438-441. DOI: 10.1109/78.902126.
38. Abramov, S. K. Algoritm realizatsii miriadnoi fil'tratsii [Myriad filtering realization algorithm]. *Aviatsionnokokosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technique and technology*, 2000, vol. 21, pp. 143-147.
39. Tulyakova, N. O., Trofimchuk, A. N., Strizhak, A. E. Algoritmy miriadnoy fil'tratsii [Algorithms of myriad filtering]. *Radioelektronika i komp'yuternye sistemy – Radioelectronic and computer systems*, 2014, no. 4 (68), pp. 76-83.
40. Pander, T. The class of M-filters in the application of ECG signal processing. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 2006, vol. 26, no. 4, pp. 3-13.
41. Augustyniak, P., Tadeusiewicz, R. Improve the quality of diagnostic parameters of an electronystagmogram using signal filtration in the time-frequency domain and adaptatively adjusted characteristics. *TFTS-96: Proc. of Third Int. Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, 1996, pp. 381-384.
42. Pander, T., Czabański, R., Przybyła, T., Pojda-Wilczek, D. An automatic saccadic eye movement detection in an optokinetic nystagmus signal. *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 2014, vol. 59, no. 6, pp. 529-543. doi:10.1515/bmt-2013-0137.

Надійшла до редакції 10.02.2022, розглянута на редколегії 15.04.2022

АДАПТИВНЫЙ МИРИАДНЫЙ ФИЛЬТР С ШУМО- И СИГНАЛЬНО-ЗАВИСИМЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ВО ВРЕМЕНИ

Н. О. Тулякова, А. Н. Трофимчук

Предметом исследования в статье являются методы локально-адаптивной фильтрации нестационарных сигналов. **Целью** является разработка локально-адаптивного алгоритма подавления нестационарного (с точки зрения изменения дисперсии во времени) шума в сигналах, характеризующихся различным поведением информативной компоненты, при ограниченных априорных сведениях о модели сигнала и дисперсии шума. **Задачи:** исследовать эффективность предлагаемого локально-адаптивного myriadного фильтра на основе численных статистических оценок качества обработки для комплексной модели одномерного процесса, включающей различные элементарные сигналы, в широком диапазоне изменения дисперсии аддитивного гауссова шума и при наличии выбросов; исследовать эффективность подавления нестационарного шума для модельных и реальных сигналов. **Методы:** интегральные и локальные показатели качества фильтров по критерию среднеквадратической ошибки получены с помощью численного моделирования (методом Монте-Карло). Получены следующие **результаты:** предложен шумо- и сигнально-адаптивный myriadный фильтр для подавления нестационарного шума с существенно изменяемой дисперсией в сигналах с различным характером поведения информативной компоненты. Статистические оценки качества фильтров, вычисленные с помощью численного моделирования, показывают более высокую эффективность предложенного локально-адаптивного myriadного фильтра в условиях различного уровня шума в сравнении с другими высокоэффективными локально-адаптивными фильтрами. Продемонстрировано практическое полное сохранение сигнала при очень низком уровне шума, обеспечение минимальных динамических ошибок, вносимых при фильтрации, при невысоком и среднем уровнях шума и более эффективное подавление шума при больших значениях его дисперсии. Анализ выходных сигналов, графиков параметров локальной адаптации и адаптируемых параметров подтверждает высокую эффективность и корректную работу исследованных локально-адаптивных алгоритмов. Показаны высокие робастные свойства данных нелинейных фильтров и целесообразность применения для

устранения выбросов предварительного фильтра Хемпела, в котором медианную операцию заменено на мириадную. Приведены примеры, отображающие высокое качество подавления нестационарного шума в биомедицинском сигнале электронистагмограммы. **Выводы:** научная новизна полученных результатов заключается в разработке локально-адаптивного мириадного фильтра с шумо- и сигнально-зависимым изменением параметров во времени для обработки процессов с нестационарными поведением сигнала и дисперсией шума. Данный фильтр не требует времени для адаптации параметров и их точной настройки, априорных знаний о модели сигнала и дисперсии шума, может применяться в режиме квази-реального времени. Предложенный алгоритм шумо- и сигнально-адаптивной мириадной фильтрации улучшает качество обработки сигналов в сложных условиях существенной нестационарности (изменяемости дисперсии) шума.

Ключевые слова: локально-адаптивная мириадная фильтрация; подавление нестационарного шума; статистические оценки эффективности; электронистагмограмма.

ADAPTIVE MYRIAD FILTER WITH TIME-VARYING NOISE- AND SIGNAL-DEPENDENT PARAMETERS

Nataliya Tulyakova, Oleksandr Trofymchuk

The research **subject** of this article is the methods of locally adaptive filtering of non-stationary signals. The **goal** is to develop a locally-adaptive algorithm for non-stationary noise (from the viewpoint of its time-varying variance) suppression in signals characterized by a different behavior of the informative component, with restricted a priori information about the signal model and noise variance. The **tasks** are to investigate the effectiveness of the proposed local-adaptive myriad filter using numerical statistical estimates of processing quality for a complex model of one-dimensional process that contains different elementary signals in various additive Gaussian noise variance variations; to investigate the effectiveness of non-stationary noise suppression for model and real signals. The **methods** are integral and local indicators of filter quality according to the criteria of the mean square error have been obtained using numerical simulation (via Monte Carlo analysis). The following **results** have been obtained: a noise- and signal-adapting myriad filter for the suppressing of non-stationary noise with significantly varying variance in signals with different behaviors of the informative component is proposed. Statistical estimates of the filter quality, evaluated by numerical simulation, show a higher efficiency of the proposed local-adaptive myriad filter in conditions of different noise levels compared to the other highly efficient locally-adaptive filters. Practically, total preservation of a signal at very low noise levels, minimal dynamical errors caused by filtering at low and middle noise levels, and more effective noise suppression at high values of noise variance are demonstrated. The analysis of output signals and plots of parameters for local adaptation and adaptable parameters confirm the high efficiency and correct operation of the investigated locally-adaptive algorithms. The high robust properties of these nonlinear filters are shown, as well as the expedience of using to spike the elimination of the previous robust Hampel filter in which the median operation is replaced by a myriad one. Examples displaying the high quality of non-stationary noise suppression in a biomedical signal of electronystagmogram are presented. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is the development of locally-adaptive myriad filters with time-varying noise- and signal-dependent parameters for de-noising processes with non-stationary signal behavior and noise variance. This filter does not require time for parameter adaptation and their exact adjustment, a priori knowledge of the signal model and noise variance, and can be applied in a quasi-real-time mode. The proposed algorithm of noise- and signal-adapting myriad filtering algorithm improves the quality of signal processing in difficult conditions of significant noise non-stationarity (variance variation).

Keywords: locally adaptive myriad filtering; non-stationary noise suppression; statistical estimates of efficiency; electronystagmogram.

Тулякова Наталія Олегівна – канд. техн. наук, наук. співроб. відділу ядерно-фізичних досліджень, Інститут прикладної фізики НАНУ, Суми, Україна.

Трофимчук Олександр Миколайович – д-р техн. наук, проф., член-кор. НАНУ, директор інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАНУ, Київ, Україна.

Nataliya Tulyakova – Candidate of Technical Science, research assistant of the Department of nuclear and physical research, Institute of Applied Physics, NAS of Ukraine, Sumy, Ukraine,
e-mail: natashatu@ukr.net, nataliyatulyakova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9158-8967,
Scopus Author ID: 19934331400.

Oleksandr Trofymchuk – Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences (NAS) of Ukraine Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: trofymchuk@nas.gov.ua, ORCID: 0000-0003-3358-6274, Scopus Author ID: 5611031030.