

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ТУЛЯКОВА НАТАЛІЯ ОЛЕГІВНА

УДК 621.372; 616.12-073.7; 519.725

**МЕТОДИ НЕЛІНІЙНОЇ СТІЙКОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СКЛАДНИХ ЗАВАД У
БІОМЕДИЧНИХ СИГНАЛАХ**

05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ХАРКІВ-2012

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Наявність у тривалих сигналах біомедичних систем складних завад, до яких зокрема належать нестационарний (міографічний) шум і рухові артефакти, істотно ускладнює автоматичне визначення інформативних параметрів, аналіз форми сигналів, класифікацію образів. Ці завади нестационарні, негаусові, мають широкий, апріорно невідомий спектр частот, що істотно перетинається зі спектром корисного сигналу, невідомі статистичні характеристики, надзвичайну варіабельність амплітудно-часових і спектральних властивостей. Для усунення таких завад методи обробки сигналів недостатньо ефективні та надійні, нереалізовані в реальному часі, занадто трудомісткі або непридатні. Іноді негативний ефект фільтрації може погіршити інформативність сигналу: більшість фільтрів, усуваючи артефакти та шум, вносять інші спотворення, тоді як збереження форми хвиль та їхніх параметрів для біомедичних сигналів (БС) особливо важливе.

Традиційно для усунення завад у біомедичних системах застосовуються лінійні фільтри у зв'язку з достатньо повним математичним обґрунтуванням і застосуванням процедур оптимізації. Тоді, як з природи фізіологічних систем випливає, що більш адекватними для їх опису є нелінійні співвідношення й у загальному випадку залежність спостережуваних сигналів від відтворюваних ними процесів нелінійна. Тому точніше задача фільтрації БС формулюється як задача нелінійної фільтрації – формування оцінок параметрів, що нелінійно залежать від досліджуваного процесу.

Нелінійні стійкі фільтри оптимальні (високоєфективні) для негаусових випадкових процесів, мають високі динамічні властивості – зберігають характерні точки сигналу виду стрибків, піків, зломів, гладких кривих і забезпечують високу ефективність згладжування шуму в їх околі. Методам локально-адаптивної (ЛА) нелінійної фільтрації властиві важливі в практичних умовах переваги: стійкість до апріорної невизначеності сигналу та завад, високі інтегральні показники якості обробки сигналів з різним типом поведінки інформативної компоненти.

Теорію стійкої обробки даних обґрунтовано та розвинуто у роботах Дж. П. Хьюбера, Р. Хогга, українських вчених Е.А. Корнільєва, І.Г. Прокопенко. Вагомий вклад у розвиток адаптивних методів стійкої фільтрації внесли Я. Астола, В.Я. Катковник (Фінляндія), І. Шелесник (США). Питання стійкої фільтрації в умовах апріорної невизначеності висвітлені в працях харківських учених О.О.Зеленського, В.В.Лукіна, якими розвинуто теорію ЛА нелінійної фільтрації.

Втім потребують подальшого дослідження питання ЛА нелінійної стійкої фільтрації в умовах нестационарного шуму адитивного та змішаного адитивного і мультиплікативного типу з невідомою дисперсією, особливо щодо БС, та нелінійної фільтрації артефактів з невідомими властивостями. У цьому зв'язку актуальними є дослідження властивостей нелінійних стійких фільтрів, розробка адаптивних методів, аналіз їх ефективності для усунення складних завад, до яких належать нестационарний широкосмуговий шум та рухові артефакти у БС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася відповідно до плану держбюджетної НДР у Харківському національному університеті радіоелектроніки: "Дослідження теоретичних та технічних принципів діагностики, оцінки та корекції медико-соціального стану людини", ДР № 0110U002532.

Мета й завдання дослідження. *Мета роботи* – вирішення важливої науково-технічної задачі розробки адаптивних методів нелінійної стійкої фільтрації БС, високоефективних у складних умовах впливу нестационарних адитивного й адитивного та мультиплікативного шумів з апріорно невідомою дисперсією та наявністю викидів; розробка методів нелінійної стійкої фільтрації для видалення рухових артефактів з невідомими властивостями.

Відповідно до поставленої мети роботи визначені *завдання дослідження*:

- 1)проаналізувати сучасний рівень, тенденції розвитку та проблеми в галузі адаптивної фільтрації нестационарного шуму та рухових артефактів, присутніх у тривалих БС;
- 2)обґрунтувати динамічні та статистичні властивості нелінійних стійких фільтрів для різних видів елементарних сигналів, характерних для широкого класу одномірних процесів, з метою вибору найкращих типів фільтрів та їх параметрів;
- 3)розробити методи ЛА нелінійної стійкої фільтрації, високоефективні в умовах різного рівня адитивного, адитивного та мультиплікативного шумів та наявності викидів; провести порівняння їх ефективності для комплексної моделі одномірного сигналу та різних умов завод;
- 4)проаналізувати ефективність застосування нелінійних стійких фільтрів для підвищення точності оцінок параметрів різного типу екстремумів (пік, парабола);
- 5)провести експериментальну перевірку розроблених методів ЛА нелінійної фільтрації для сигналу ЕКГ в умовах різного рівня адитивного, адитивного та мультиплікативного шумів;
- 6)проаналізувати застосування гібридних медіанних фільтрів з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ) для видалення високоамплітудних викривлень у сигналах ЕКГ та електроенцефалограми (ЕЕГ);
- 7)розробити метод видалення низькоамплітудних артефактів з невідомими властивостями;
- 8)розробити адаптивний векторний нелінійний фільтр (ВНФ) для видалення низькоамплітудних артефактів і згладжування шуму в БС, пов'язаних з повторюваними подіями;
- 9)провести експериментальну перевірку розробленого методу та адаптивного ВНФ.

Об'єкт дослідження – нестационарні одномірні процеси в біомедичних системах.

Предмет дослідження – методи нелінійної стійкої фільтрації процесів в умовах апріорної невизначеності знань про характер нестационарності сигналу та статистичні властивості завод; властивості КІХ-гібридних та векторних нелінійних фільтрів.

Методи дослідження: теорія нелінійних стійких оцінок, теорія ймовірностей та математична статистика, методи нелінійної стійкої фільтрації, метод Монте-Карло, імітаційне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- 1)набули подальшого розвитку моделі нелінійних стійких фільтрів у частині обґрунтування їх властивостей, які, на відміну від існуючих, є оптимальними залежно від виду сигналу та рівня шуму, що дає можливість для певної сигнально-заводової ситуації вибирати найкращий фільтр;
- 2)набув подальшого розвитку метод локально-адаптивної (ЛА) стійкої фільтрації з “жорстким” перемиканням параметрів у частині використання нелінійних гібридних фільтрів з екстраполюючими КІХ-субапертурами в якості компонентів методу, які, на відміну від

існуючих, мають кращі динамічні та статистичні властивості, що дозволило покращити локальні й інтегральні показники ефективності в умовах нестационарних адитивного й адитивного та мультиплікативного шумів та малої ймовірності викидів і забезпечити високу якість обробки ЕКГ;

3) уперше запропоновано метод видалення низькоамплітудних артефактів у одноканальному сигналі ЕКГ, який ґрунтується на принципі векторної нелінійної фільтрації, що дозволило автоматично в реальному часі усувати артефакти, не враховуючи інформації про їх властивості;

4) набув подальшого розвитку метод векторної нелінійної фільтрації, в якому в частині визначення результуючого вектора застосовується параметр адаптації, що дозволило тільки в разі наявності у вибірці сигналів з артефактами здійснювати усічене усереднення, що дає можливість повністю виключити вплив артефактів на результуючий сигнал, згладити шум і зберегти поодинокі зміни в сигналах, пов'язаних з повторюваними подіями.

Практична значимість отриманих результатів.

1. У результаті комп'ютерного експерименту отримані конкретні значення показників ефективності різних типів нелінійних фільтрів та методів ЛА стійкої фільтрації для комплексної моделі одномірного сигналу, що містить різні види елементарних сигналів, для умов різного рівня гаусова шуму, адитивного та мультиплікативного шуму та наявності викидів.

2. На основі статистичних оцінок якості показано високу ефективність методів ЛА стійкої фільтрації в ковзному вікні та рекомендовано їх використання для обробки одномірних процесів з різним, апріорно невідомим характером поведінки сигналу в широкому діапазоні змін дисперсії адитивного й адитивного та мультиплікативного шумів та при можливій присутності викидів (наявності пріоритету вимог до збереження піків, зломів, стрибків і поліноміальних сигналів). При цьому суттєво (в одиниці, а за наявністю викидів у десятки разів) підвищується точність вимірювання параметрів трикутного та параболічного екстремумів і забезпечується висока якість фільтрації ЕКГ в умовах нестационарних адитивного й адитивного та мультиплікативного шумів.

3. Показано можливість застосування "Зростаючого на місці" КІХ-гібридного медіанного фільтру (ЗМКГМФ) у задачах автоматичної корекції високоамплітудного тренда ЕКГ і видалення рухових артефактів у сигналі ЕЕГ. При цьому даний нелінійний фільтр не використовує знань про спектральні та статистичні властивості артефактів і реалізується в реальному часі.

4. На модельних сигналах показано прогресивність запропонованого методу видалення низькоамплітудних артефактів з невідомими властивостями і рекомендовано для застосування в інтелектуальних біомедичних системах та для аналізу мікропотенціалів ЕКГ.

5. Розроблено адаптивний ВНФ з усіченим усередненням даних для видалення низькоамплітудних артефактів без істотних спотворень інформативної компоненти і згладжування шуму в БС, пов'язаних з повторюваними подіями (цикли ЕКГ, викликані потенціали мозку).

Реалізація. 1. Алгоритми фільтрації та обчислювального експерименту реалізовані у вигляді комп'ютерних програм. 2. Розроблені методи нелінійної стійкої фільтрації

впроваджені в системі холтеровського моніторингу КАРДІОСЕНС Науково-технічного Центру радіоелектронних медичних пристроїв та технологій ХАІ-МЕДІКА (акт впровадження).

Особистий внесок здобувача. Всі результати, наведені в дисертації, отримані здобувачем самостійно. У статтях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: [] – уперше запропоновано метод усунення низькоамплітудних артефактів у сигналі ЕКГ, на імітаційних моделях проаналізовано застосування даного методу; [8] – розроблено методи ЛА стійкої фільтрації на основі гібридних нелінійних фільтрів з екстраполюючими КІХ-субапертурами, отримано статистичні оцінки якості обробки комплексної моделі одномірного сигналу при різних умовах завад, показано застосування на БС; [9] – проаналізовано застосування зваженого КІХ-гібридного медіанного фільтру для усунення артефактів у сигналі ЕЕГ; [10] – удосконалено адаптивний ВНФ з усіченим середнім, проведено експериментальну перевірку розроблених методу усунення низькоамплітудних артефактів і ВНФ; [11] – проаналізовано застосування розроблених методів ЛА стійкої фільтрації для придушення нестационарного шуму в ЕКГ; [12] – обґрунтовано типи і властивості нелінійних стійких фільтрів, програмно реалізовано їх алгоритми та обчислювальний експеримент; [13] – проаналізовано застосування нелінійних стійких фільтрів для обробки БС; [Ошибка: источник перекрестной ссылки не найден] – проаналізовано застосування методу ЛА нелінійної фільтрації з “жорстким” перемиканням параметрів для обробки одномірних сигналів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації доповідалися, обговорювалися й опубліковані в працях таких наукових конференцій: IV Всеукр. міжн. конф. Укробраз'98 (Київ, 19-23 жовтня, 1998); Finnish Signal Processing Symposium "FINSIG'99" (Оулу, Фінляндія, 31 травня, 1999); Nonlinear Signal and Image Processing NSIP'99 (Анталія, Туреччина, 20-23 червня, 1999); Nordic signal processing symposium NORSIG'2000 (Кольмарден, Швеція, 13-15 червня, 2000); II міжн. конф. "Сучасні інформаційні технології в освіті та промисловості" (Миколаїв, 17-21 листопада 2003); I Всеукр. міжн. конф. "Інтелектуальні системи в промисловості та освіті - 2007" (Суми, 7-9 листопада, 2007); II Всеукр. міжн. конф. "Інтелектуальні системи в промисловості та освіті - 2009" (Суми, 3-5 грудня, 2009); 10-я міжн. міждисципл. конф. "Сучасні проблеми гуманізації й гармонізації управління" (Харків, 4-10 листопада, 2010); проблемно-наукова міжгалуз. конф. "Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління" (Бучач-Яремча, 17-20 травня, 2011).

Публікації. Матеріали дисертації представлені в 14 статтях у наукових фахових виданнях України (з них 6 одноосібних), 9 доповідях і тезах науково-технічних конференцій (з них 3 закордоном), 2 свідоцтвах на авторські права на твір (комп'ютерні програми).

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, що включають 20 підрозділів, висновків, списку використаних джерел з 129 найменувань і 8 додатків. Обсяг дисертації становить 166 сторінок основного тексту, у тому числі 34 рисунка, з яких 18 повністю займають площу окремих сторінок, і 4 таблиці, з яких 1 на окремій сторінці, 14 сторінок списку використаних джерел, 117 сторінок додатків. Додатки містять допоміжні матеріали статистичного аналізу випадкового процесу (додаток А), аналіз параметрів локальної адаптації та теоретичні викладки (додаток Д), результати реалізації фільтрів,

статистичні оцінки ефективності у графіках та таблицях (додатки В, Ж), тексти програм (додатки Б, З, К), акт впровадження (додаток Л).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність розробки та застосування у біомедичних системах методів нелінійної стійкої фільтрації для усунення складних завад, до яких відносяться нестационарний шум і рухові артефакти; подана стисла анотація основних результатів дослідження.

У **першому розділі** наведений огляд найбільш ефективних адаптивних методів фільтрації нестационарного шуму та рухових артефактів у БС. Перелічуються недоліки, труднощі й обмеження використання даних методів у практичних умовах, для додання яких доцільно застосування нелінійної стійкої фільтрації.

Серед відомих методів лінійної фільтрації для усунення нестационарного шуму застосовуються адаптивні фільтри, що здатні динамічно змінювати параметри у відповідності із зміною властивостей завади, не потребують знань про форму хвиль, спектральні та статистичні характеристики корисного сигналу та завади, виконання умови їхньої стаціонарності, але повинні виконуватися умови статистичної незалежності сигналу та завади, існування опорного сигналу, сильно корельованого із завадою та некорельованого із сигналом. Окрім цих обмежень перелічено загальні недоліки методів лінійної фільтрації, що відсутні для нелінійних стійких оцінок: це невисокі динамічні властивості в околі різких змін сигналу, неефективність в умовах змішаного адитивного та мультиплікативного шуму, незастосовність при наявності імпульсних завад.

Найбільш ефективними методами боротьби із нестационарним ЕМГ-шумом у БС є адаптивні методи на основі ортогональних перетворень (ОП), зокрема фільтри, що використовують потужний концептуальний інструмент оптимальної оцінки Вінера. Перелічено недосконалості даних адаптивних фільтрів, що долаються методами ЛА нелінійної фільтрації: невиконання допущення стаціонарності сигналу в практичних умовах; неефективність під час непередбачених змін сигнально-завадової ситуації; втрати або спотворення низькоамплітудних параметрів та прояви ефекту Гіббса в околі різких змін сигналу в результаті застосування порогових оцінок; використання процедур оцінки дисперсії, визначення QRS-комплексів, що мають погрешності.

З метою придушення шуму, що описується симетричною б-стабільною щільністю розподілу ймовірностей (ЩРЙ) з "тяжкими" хвостами, зокрема ЕМГ-шуму в БС успішно застосовуються міріадні методи, що належать до нелінійних стійких фільтрів. Проте у міріадних фільтрах для кожного положення ковзного вікна треба відшукувати глобальний мінімум функції втрат, ці фільтри не завжди реалізовані у реальному часі або потребують локальної оцінки масштабу даних.

Визначені проблеми усунення рухових артефактів, присутніх у тривалих БС, методами "сліпого" розділення сигналів, класифікаторами образів. Ці проблеми полягають у надзвичайній варіабельності рухових артефактів, аналогічності параметрів з корисним сигналом, невідомих спектральних і статистичних властивостях. Також усуненню артефактів заважає висока корельованість БС, вплив інших фізіологічних процесів на сигнал, що

ковзному вікні даних розміром N .

МФ ефективно подавляє завади, описувані ЩРЙ з "важкими" хвостами: експоненціальною або засміченою викидами та значеннями з вибірок, що описуються іншими розподілами.

3 класу стійких L -оцінок найчастіше використовується α -урізаний фільтр (АУФ)

$$y^{AY\Phi}(n) = \frac{1}{N - 2 \cdot [\alpha N]} \sum_{j=[\alpha N]+1}^{N-[\alpha N]} X^{(j)}, \quad (3)$$

де $[\alpha N]$ – параметр урізання, що визначає кількість порядкових статистик у межах апертури фільтру, що відкидаються, $\alpha < 0,5$; $X^{(j)}$ - порядкові статистики вибірки елементів $\{x(n - (N - 1)/2), \dots, x(n + (N - 1)/2)\}$ у межах вікна фільтра,

$$X^{(1)} \leq X^{(2)} \leq \dots \leq X^{(j)} \leq \dots \leq X^{(N)}$$

АУФ усуває викиди, завдяки параметру $[\alpha N]$, має високу ефективність згладжування шуму для сигналів, що описуються лінійними та гладкими функціями, високі динамічні властивості при обробці поліноміальних сигналів.

КІХ-гібридні медіанні фільтри (КГМФ) належать до класу медіанних фільтрів з субапертурами, що екстраполюють вихідний сигнал по вибіркам вимірів сигналу, які відповідають моментам часу, що передують і слідують за поточним n -м відліком на виході фільтру. Представником цього класу є екстраполюючий КГМФ (ЕКГМФ) - *Predictor FIR Median Hybrid Filter*, сигнал на виході якого

$$y^{EKGM\Phi}(n) = med \{ \hat{x}_{fw}^1(n), \hat{x}_{fw}^0(n), x(n), \hat{x}_{bw}^0(n), \hat{x}_{bw}^1(n) \}, \quad (4)$$

$$\text{де } \hat{x}_{fw}^0(n) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x(n-i) \quad \hat{x}_{bw}^0(n) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x(n+i) \quad \hat{x}_{fw}^1(n) = \sum_{i=1}^k h(i) x(n-i) \quad \hat{x}_{bw}^1(n) = \sum_{i=1}^k h(i) x(n+i)$$

- вихідні значення КІХ-субапертур 0-го та 1-го порядку, що екстраполюють сигнал $y(n)$ по k попереднім (*forward* - "прогнозування" наперед) та k послідовним (*backward* - "прогнозування" назад) значенням сигналу у вікні фільтру; $h(i) = (4k - 6i + 2)/(k(k - 1))$ - коефіцієнти екстраполяції, $i=1, \dots, k$.

Уведенням екстраполяції 1-го порядку розширюють набір стабільних точок фільтру: за відсутністю завад ЕКГМФ повністю зберігає пік, скісний і різкий перепади.

У нелінійних фільтрах типу зважених КГМФ (ЗКГМФ) застосовується нелінійна операція додавання ваги (кількості дублювань) вихідним значенням КІХ-субапертур. Додавання ваги вихідним сигналам КІХ-субапертур 0-го порядку підвищує ефективність ЗКГМФ в околі стрибка, а заміщення медіанної операції α -урізанням, хоча і призводить до незначного згладжування стрибка, але покращує динамічні властивості в околі поліноміальних кривих. До цих фільтрів зокрема належить α -урізаний КІХ-гібридний фільтр (АКГФ), сигнал на виході якого

$$y^{AKG\Phi}(n) = \frac{1}{N - 2[\alpha N]} \sum_{j=[\alpha N]+1}^{N-[\alpha N]} X^{(j)}, \quad X = \{ \hat{x}_{fw}^1(n), 2 \diamond \hat{x}_{fw}^0(n), x(n), 2 \diamond \hat{x}_{bw}^0(n), \hat{x}_{bw}^1(n) \}, \quad (5)$$

де $X^{(1)} \leq X^{(2)} \leq \dots \leq X^{(j)} \leq \dots \leq X^{(N)}$ - упорядковані елементи множини X у вікні розміром N ;

\diamond - оператор дублювання (повторення) відповідного елемента заданою вагою кількість разів.

Інший тип нелінійних КІХ-гібридних фільтрів використовує операцію зваженого усереднення порядкових статистик вибірки вихідних значень КІХ-субфільтрів. Вихідний сигнал КІХ-гібридного фільтру на основі статистик (КГФОС) описується формулою

$$y^{КГФОС}(n) = \sum_{m=1}^M c_m X^{(m)}, \quad X = \{\hat{x}_{fw}^1(n), \hat{x}_{fv}^0(n), x(n), \hat{x}_{bw}^0(n), \hat{x}_{bw}^1(n)\}, \quad (6)$$

де M – розмір упорядкованої множини X , що містить центральний елемент вікна і вихідні значення екстраполюючих КІХ-субапертур, у даному випадку $M=5$; c_m – вагові коефіцієнти,

$$\sum_{m=1}^M c_m = 1.$$

Оптимальні вагові коефіцієнти залежно від параметру нелінійності p визначаються так:

$$c_m(p) = \frac{c'_m(p)}{\sum_{j=1}^M c'_j(p)},$$

$$c'_m(p) = \begin{cases} \xi = 2p \{(M+1)/2 - |(M+1)/2 - m|\} + 4p + M(1-2p) - 3, & \text{якщо } \xi > 0, \\ 0, & \text{якщо } \xi \leq 0; \end{cases}$$

де $p \in [0; 1]$; за $p=0$ всі вагові коефіцієнти $c_m=1/M$, що відповідає операції усереднення; за $p=1$ $c_{(M+1)/2}=1$, усі інші коефіцієнти $c_m=0$ – маємо нелінійну медіанну оцінку.

Параметр p розширює кількість степенів вільності фільтра. Вибираючи p , змінюють степінь нелінійності властивостей КГФОС, намагаючись досягти прийняттого компромісу протиріччя в забезпеченні збереження точок різких змін сигналу та високої ефективності придушення шуму.

З метою вибору ефективних методів видалення високоамплітудних викривлень, спричинених рухами пацієнта та зміщенням електродів, у БС ЕКГ та ЕЕГ розглядається "Зростаючий на місці" КГМФ (ЗМКГМФ), сигнал на виході якого задається виразом

$$\begin{aligned} y_0(n) &= x(n); \\ y_j &= \text{med} \left\{ \sum_{i=1}^{K_j} h(i)x(n-i), \frac{1}{K_j} \sum_{i=1}^{K_j} x(n-i), y_{j-1}(n), \frac{1}{K_j} \sum_{i=1}^{K_j} x(n+i), \sum_{i=1}^{K_j} h(i)x(n+i) \right\}; \\ y^{ЗМКГМФ}(n) &= y_M(n), \end{aligned} \quad (7)$$

де $j=1, \dots, M$ - рівень фільтрації сигналу; K_j - розмір КІХ-субапертури на j -му рівні, $K_j > K_{j-1}$.

Порівняно з іншими КГМФ, що використовуються для виділення тренду сигналів, завдяки багаторівневій повторній фільтрації в межах одного вікна ЗМКГМФ має покращені динамічні та статистичні властивості в околі та безпосередньо поблизу точки стрибка, зменшує "вагомність" центрального елемента упорядкованої множини значень у вікні фільтру в знаходженні оцінки сигналу й цим збільшує степінь згладжування флуктуацій на пологих відрізках стрибка функції. Використання у виразі (7) КІХ-субапертур 1-го порядку покращує динамічні властивості фільтру.

Більшість БС – сильно корельовано дані, тому їх доцільно розглядати у векторному вигляді. Певні реалізації сигналів, що пов'язані з повторюваними подіями, до яких зокрема

відносяться викликані потенціали мозку, цикли ЕКГ, можна розглядати у часі як вектори та застосувати до них методи векторної нелінійної фільтрації, здатні усувати викиди, подавляти шум та інші види завад. Сигнал як вектор подається так: $\mathbf{x}_i = [x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}]^T$, де x_{ki} - k -а координата, $k = 1, \dots, m$; m - розмірність векторного простору. Принцип векторної нелінійної фільтрації полягає в обчисленні для множини векторів $[\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N]$ у межах ковзного вікна розміром N скалярних величин $[\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_N]$ як сум $\tilde{a}_i = \sum_{q=1}^N \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_q\|$ взаємних відстаней від кожного i -го вектору до всіх інших векторів вибірки. Сумарні відстані упорядковуються за зростанням $[\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_N] \Rightarrow [\tilde{a}_{(1)}, \tilde{a}_{(2)}, \dots, \tilde{a}_{(N)}]$, де $\tilde{a}_{(1)} < \tilde{a}_{(2)} < \dots < \tilde{a}_{(N)}$. У відповідності з відсортованими сумарними відстанями векторам призначаються ранги: $[\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N] \Rightarrow [\mathbf{x}_{(1)}, \mathbf{x}_{(2)}, \dots, \mathbf{x}_{(N)}]$. Над упорядкованим у такий спосіб рядом векторів виконують деяку результуючу операцію $\mathbf{y}_i = \mathbf{F}(\mathbf{x}_i)$, де \mathbf{F} - векторне функціональне перетворення, $\mathbf{y}_i \neq [F(x_{1i}), F(x_{2i}), \dots, F(x_{mi})]$.

Сигнал на виході векторного медіанного фільтру (ВМФ) є найбільш правдоподібною оцінкою центру вибіркового розподілу векторів і визначається вибором вектора, що має найменшу сумарну відстань до інших векторів вибірки в межах ковзного вікна фільтру розміром N :

$$\mathbf{y}^{BM\Phi} = \arg \min_{\mathbf{x}_q \in \mathbf{X}} \sum_i^N \|\mathbf{x}_q - \mathbf{x}_i\| \quad (8)$$

Недоліком ВМФ є те, що під час визначення результуючого вектора з наявної вибірки обирається лише один вектор, або як для ВНФ з усередненим усередненням даних обробляються лише певні порядкові статистики, й це може призвести до втрат корисної інформації, оскільки вектори, що не приймають участь у визначенні вихідного сигналу, не обов'язково містять викиди. Для подолання цього недоліка та додаткового згладжування шуму розроблений сигнально-залежний зважений векторний фільтр (СЗЗВФ), що описується формулою

$$\mathbf{y}^{CZ3B\Phi} = \sum_{i=1}^N c_i \mathbf{x}_i, \quad c_i = (1/\tilde{a}_i^2) / \sum_{j=1}^N 1/\tilde{a}_j^2, \quad (9)$$

де вагові коефіцієнти c_i знаходяться у зворотній залежності від сумарних відстаней \tilde{a}_i , $i = 1, \dots, N$.

Більшість БС відтворюють нестационарні процеси з істотно різною поведінкою інформативної компоненти. Тому для досліджень властивостей нелінійних фільтрів вибрана комплексна модель, що містить різні, характерні для реальних систем види елементарних сигналів (рис.1). Виходячи з можливості порівняння ефективності методів лінійної та нелінійної фільтрації модель ЩРЙ шуму вибрана гаусовою. Враховуючи, що шум у БС може мати фізіологічну природу, отже бути нестационарним, описуватися ЩРЙ з "тяжкими" хвостами, мати сигнальнозалежну компоненту, для описання завад використана змішана

модель $n(t_i) = n_a(t_i) + n_\mu(t_i) + n_s(t_i)$, де $n_a(t_i)$ - адитивний шум з нульовим математичним очікуванням (МО) та дисперсією σ_a^2 ; $n_\mu(t_i)$ - мультиплікативний

шум з нульовим МО та дисперсією $\sigma_\mu^2 = k_0(S^2(t_i))$, $k_0 \in [0; 0,1]$; $n_s(t_i)$ - імпульсна завада, що з ймовірністю P_s набуває значень

$$n_s > 3 \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\mu^2}; t_i - i\text{-й вимір послідовності}$$

$x(t_i) = S(t_i) + n(t_i)$ на вході інформаційно-вимірювальної системи.

Для статистичної оцінки ефективності нелінійних стійких фільтрів використано загальноприйняті критерії середньоквадратичної помилки (СКП), середньомодульного відхилення (СМВ) і відношення сигнал-шум (ВСШ), що описуються формулами

$$\chi_{i_1-i_2} = \sum_{i=i_1}^{i_2} (U_i^f - S_i)^2 / (i_2 - i_1 + 1), \quad \chi_{i_1-i_2} = \sum_{i=i_1}^{i_2} |U_i^f - S_i| / (i_2 - i_1 + 1), \quad q = 10 \lg(P_S/P_n),$$

де U_i^f - значення i -го виміру сигналу на виході фільтру; i_1, i_2 - індекси вимірів сигналу, що задають інтервал оцінки ефективності; $S_i = S(t_i)$ - істинне значення сигналу для i -го моменту часу t_i ;

$$P_S = \sum_{i=1}^I (S_i - \bar{S})^2 / I, \quad P_n = \sum_{i=1}^I (U_i^f - S_i)^2 / I - \text{потужності сигналу та шуму, } \bar{S} = \sum_{i=1}^I S_i / I$$

- середнє значення сигналу довжини I .

У зв'язку зі складністю аналітичного описання властивостей нелінійних стійких фільтрів та їх залежності від характеристик завад експериментальні дані отримані методом Монте-Карло: для різних тестових сигналів, широкого діапазону зміни умов завад і великої кількості реалізацій N_R обчислені статистичні оцінки, що характеризують ефективність фільтрів.

У **третьому розділі** в результаті статистичних експериментальних досліджень в умовах різного рівня адитивного, змішаного адитивного та мультиплікативного шумів і наявності імпульсних завад для широкого класу тестових сигналів виконана класифікація нелінійних стійких фільтрів за властивостями, що дозволяє залежно від конкретної сигнально-завадової ситуації вибирати найбільш підходящий для обробки нелінійний фільтр. Аналіз статистичних показників точності оцінок амплітуди екстремумів різного типу, до яких відносяться пік і вершина параболи, показав суттєве підвищення точності в результаті застосування певних типів нелінійних фільтрів. Показано, що властивості різних типів нелінійних фільтрів різняться залежно від виду сигналу та рівня шуму, й це дозволяє, використовуючи сформований банк нелінійних фільтрів, побудувати ЛАФ (1), що, завдяки адаптивному перемиканню вихідних сигналів різних типів нелінійних фільтрів, забезпечать високі інтегральні показники ефективності обробки. При цьому в даних нелінійних ЛАФ достатньо розрізнявати дві ситуації локальної поведінки сигналу: різкі зміни сигналу, що містять точку розриву похідної, та повільні зміни, описувані лінійними та гладкими функціями, відповідно використати лише два-три різні за властивостями компонентні фільтри.

В результаті аналізу властивостей різних типів нелінійних стійких фільтрів показано, що з

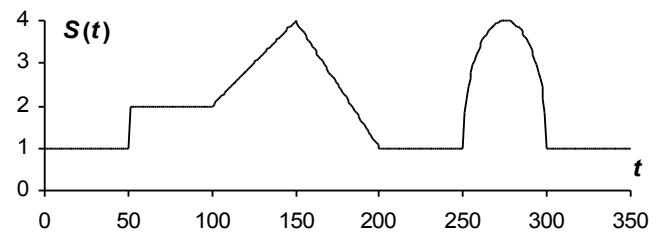


Рис.1. Комплексна модель тестового сигналу.

метою підвищення якості обробки комплексного сигналу (рис.1) в околі піку, стрибка, поліноміальної кривої та високоефективної фільтрації ЕКГ доцільно розробити метод ЛА нелінійної фільтрації на основі ЕКГМФ (4), який має високі динамічні властивості в околі піку та стрибка, та АКГФ (5) з кращими властивостями в околі гладких кривих і меншими ніж у АУФ помилками при обробці піка, або робастного АУФ (3) у разі наявності викидів, та метод ЛА нелінійної фільтрації, що використовує КГФОС (6) із різними значеннями параметру нелінійності, що дозволяє змінювати властивості фільтру залежно від пріоритету вимог до збереження різких змін сигналу, з одного боку, та забезпечення високого степеня придушення шуму, з іншого.

У **четвертому розділі** обґрунтовано вибір параметрів локальної адаптації (ПЛА) в методах ЛА нелінійної фільтрації, проаналізовано ефективність розроблених нелінійних ЛАФ для комплексної моделі одномірного сигналу, з метою підвищення точності оцінок екстремумів різного типу та для обробки ЕКГ при різних умовах адитивних, адитивних і мультиплікативних та імпульсних завад.

З аналізу різних ПЛА, що використовуються в нелінійних ЛАФ, випливає доцільність застосування в умовах апріорної невизначеності локальної поведінки сигналу та дисперсії шуму параметрів, що визначаються за формулами [-Ошибка: источник перекрестной ссылки не найден]

$$Z(n) = \frac{\sum_{k=n-(N-1)/2}^{n+(N-1)/2} (y^f(k) - x(k))}{\sum_{k=n-(N-1)/2}^{n+(N-1)/2} |y^f(k) - x(k)|},$$

$$Z^s(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=n-(N-1)/2}^{n+(N-1)/2} \text{sign}(y^f(k) - x(k))$$

$$Q_Z = Z^{(q)}(n) - Z^{(p)}(n), \quad q > p, \quad q - p \approx N/2, \quad Z = \{Z(n-k), \dots, Z(n+k)\}, \quad k = \overline{1, N/2},$$

де $x(k)$, $y^f(k)$ - відповідно k -й вимір вхідного сигналу та сигналу на виході попереднього фільтру з середніми властивостями та ковзним вікном розміром N , n - центральне положення вікна;

q, p - номери порядкових статистик упорядкованої вибірки в межах вікна розміром N .

МО Z (або Z^s) визначається емпіричною формулою $\langle Z(n) \rangle \approx \beta(n) / (0,8 + 0,1\beta(n) + 0,3\beta(n)^2)$, де $\beta(n) = |\Delta_D / \sigma_n|$ характеризує відношення динамічної помилки Δ_D попереднього фільтру з

середніми властивостями та стандартного відхилення шуму $\sigma_n = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\mu^2}$.

Комплексне застосування ПЛА Z (або Z^s) і Q_Z дозволяє здійснювати адаптацію параметрів нелінійних ЛАФ (1) до ситуацій різких змін сигналу, для яких значення Δ_D великі, та повільних змін, для яких у відношенні $\beta(n)$ превалює флуктуаційна помилка σ_n .

У результаті аналізу властивостей різних типів нелінійних фільтрів розроблені такі ЛАФ: А1' на основі ЕКГМФ (4) та АУФ (3), розмір вікон $N=13$, параметр $[\alpha N]=3$; А1'' на основі ЕКГМФ та АКГФ (5), $N=13$, $[\alpha N]=1$; А1''' на основі КГФОС (6), $N=13$, параметр $p=1$

(\Leftrightarrow ЕКГМФ) і $p=0,4$ та АКГФ, $N=13$, $[\alpha N]=1$. Дані нелінійні гібридні фільтри з екстраполюючими КІХ-субапертурами на відміну від існуючих компонентів методу ЛА стійкої фільтрації з “жорстким” перемиканням параметрів мають кращі динамічні та статистичні властивості при обробці стрибків, трикутних і поліноміальних сигналів. Розроблені нелінійні ЛАФ порівнюються з базовим ЛАФ А1 на основі МФ (2), $N=5$, АУФ, $N=9$ ($[\alpha N]=2$), АУФ, $N=13$ ($[\alpha N]=3$), що мав найкращі інтегральні показники якості фільтрації комплексних сигналів в умовах змішаного адитивного та мультиплікативного шуму та малої ймовірності викидів [Ошибка: источник перекрестной ссылки не найден-Ошибка: источник перекрестной ссылки не найден]. Указані нелінійні ЛАФ описуються виразами

$$y^{A1}(n) = \begin{cases} y^{M\Phi 5}(n), (Z_2^t \leq Z(n) < 1) \vee (Q_Z > Q_Z^t); \\ y^{AY\Phi 9}(n), (Z_1^t \leq Z(n) < Z_2^t); \\ y^{AY\Phi 13}(n), (0 \leq Z(n) < Z_1^t), \end{cases}$$

$$y^{A1'}(n) = \begin{cases} y^{ЕКГМ\Phi 13}(n), (Z_2^t \leq Z(n) < 1) \vee (Q_Z > Q_Z^t); \\ y^{AY\Phi 13}(n), (0 \leq Z(n) < Z_2^t), \end{cases}$$

$$y^{A1''}(n) = \begin{cases} y^{ЕКГМ\Phi 13}(n), (Z_2^t \leq Z(n) < 1) \vee (Q_Z > Q_Z^t); \\ y^{АКГ\Phi 13}(n), (0 \leq Z(n) < Z_2^t), \end{cases}$$

$$y^{A1'''}(n) = \begin{cases} y^{КГ\Phi OC 13(1)}(n), (Z_2^t \leq Z(n) < 1) \vee (Q_Z > Q_Z^t); \\ y^{КГ\Phi OC 13(0\#)}(n), (Z_1^t \leq Z(n) < Z_2^t); \\ y^{АКГ\Phi 13}(n), (0 \leq Z(n) < Z_1^t); \end{cases}$$

де порогові значення $Z_1^t \approx 0,2$, $Z_2^t \approx 0,4$, $Q_Z^t \approx 0,4$.

У разі наявності імпульсних завад використовується їх детектор (відповідні ЛАФ позначені як $A2$, $A2'$, $A2''$, $A2'''$) на основі сумісної обробки Z та Z^S , що в околі викиду поведуться по-різному:

$$\begin{cases} n_s > 0, \text{ якщо } (Z(n) > Z_2^t) \wedge (Z^S(n) < Z_2^t) \vee (Z(n) > Z_2^t) \wedge (Z^S(n) < -Z_2^t); \\ n_s < 0, \text{ якщо } (Z(n) < -Z_2^t) \wedge (Z^S(n) > -Z_2^t) \vee (Z(n) < -Z_2^t) \wedge (Z^S(n) > Z_2^t). \end{cases}$$

Результати оцінки ефективності розроблених нелінійних ЛАФ у порівнянні з базовим ЛАФ для комплексної моделі сигналу (рис.1) за умов впливу різного рівня адитивного, адитивного та мультиплікативного шумів і наявності імпульсних завад (табл.1, табл.2) показали покращення локальних значень СКП в околі піку та злому (на 20-35 %), поліноміальної кривої (на 23-36 %), стрибка (в 1,5-2 рази), інтегральних показників СКП (15-20 %), СМВ (10-15%), ВСШ (0,6-1,8 дБ).

Приклади застосування нелінійних ЛАФ на тестових сигналах наведені на рис.2, рис.3.

Таблиця 1. Оцінки ефективності нелінійних ЛАФ за критеріями ВСШ і СКП для умов різного рівня адитивного, адитивного та мультиплікативного шумів, ppm.

Тип фільтру	q , дБ	χ_t	χ_{10-40}	χ_{40-60}	χ_{90-110}	$\chi_{110-140}$	$\chi_{140-160}$	$\chi_{240-260}$	$\chi_{265-285}$
			—	┌	┐	／	∧	└	∩

1) низький рівень шуму: $\sigma_a^2=0,001$; $N_R=200$;									
Вихідний	30,7	1010	1080	1020	1000	1010	970	1020	1010
A1	36,0	280	130	360	270	150	580	630	380
A1'	34,5	340	130	350	260	150	500	1130	400
A1''	36,6	300	120	350	220	160	480	1010	280
A1'''	35,6	300	130	330	240	180	430	960	310
2) середній рівень шуму: $\sigma_a^2=0,01$; $N_R=200$;									
Вихідний	20,7	10140	10820	10180	9990	10150	9660	10200	10130
A1	27,8	2390	1270	6820	1710	1470	2770	5320	1970
A1'	26,9	2140	990	4400	1480	1160	3130	5600	2230
A1''	29,6	2100	970	4160	1320	1360	2680	5730	1620
A1'''	27,9	2000	1090	3450	1440	1400	2260	5240	1970
3) високий рівень шуму: $\sigma_a^2=0,03$; $N_R=200$;									
Вихідний	15,9	30410	32470	30550	29970	30440	28970	30590	30400
A1	23,5	6840	3810	21380	4400	4210	6400	16370	4920
A1'	23,3	6330	2950	20340	3550	3200	6250	17030	4560
A1''	24,2	6080	2900	17610	3340	3520	5310	17980	3890
A1'''	23,3	5810	3100	16000	3700	3620	5210	14200	4250
4) адитивний та мультиплікативний шум: $\sigma_a^2=0,01$, $k_0=0,001$, $\sigma_\mu^2=k_0(S(t))^2$; $N_R=200$.									
Вихідний	18,3	15130	11530	12280	14480	19220	23170	14290	26410
A1	25,6	3440	1470	8830	2210	2540	5070	8040	3950
A1'	26,0	3130	1110	6700	2030	1960	5450	7970	3970
A1''	26,9	3130	1120	4920	1800	2220	4170	10250	3090
A1'''	25,9	3000	1070	4450	1800	2440	4340	8590	3730

Таблиця 2. Оцінки ефективності нелінійних ЛАФ за критерієм СМВ для умов різного рівня адитивного, адитивного та мультиплікативного шумів та імпульсних завад

Фільтр	χ_t	χ_{10-40}	χ_{40-60}	χ_{90-110}	$\chi_{110-140}$	$\chi_{140-160}$	$\chi_{240-260}$	$\chi_{265-285}$
1) $\sigma_a^2=0,003$, $P_s=0,02$, $n_s=1,0$; $N_R=500$;								
Вихідний	1,0725	0,0654	0,0641	0,0623	0,0629	0,0630	0,0639	0,0640
A2	0,3184	0,0167	0,0280	0,0211	0,0171	0,0299	0,0390	0,0267
A2'	0,2966	0,0168	0,0283	0,0211	0,0172	0,0292	0,0395	0,0270
A2'' _{свр}	0,2979	0,0163	0,0276	0,0205	0,0184	0,0292	0,0408	0,0264
A2''' _{свр}	0,2824	0,0159	0,0297	0,0217	0,0186	0,0385	0,0418	0,0288
2) $\sigma_a^2=0,01$, $k_0=0,001$, $\sigma_\mu^2=k_0(S(t))^2$; $P_s=0,02$, $n_s=1,0$; $N_R=500$.								
Вихідний	1,1517	0,1019	0,1078	0,1133	0,1278	0,1415	0,1112	0,1434
A2	0,4280	0,0309	0,0580	0,0380	0,0423	0,0609	0,0713	0,0576
A2'	0,4061	0,0272	0,0567	0,0368	0,0383	0,0686	0,0726	0,0659
A2'' _{свр}	0,4119	0,0275	0,0621	0,0396	0,0397	0,0696	0,0734	0,0658
A2''' _{свр}	0,3895	0,0284	0,0610	0,0395	0,0428	0,0686	0,0725	0,0660

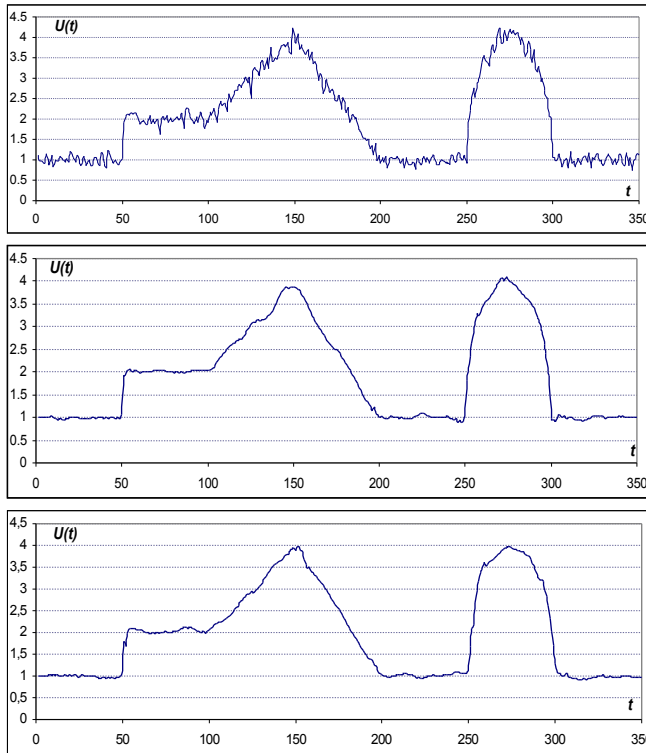


Рис.2. Застосування нелінійних ЛАФ $A1''$, $A1'''$ на тестовому сигналі з адитивним і мультиплікативним шумом.

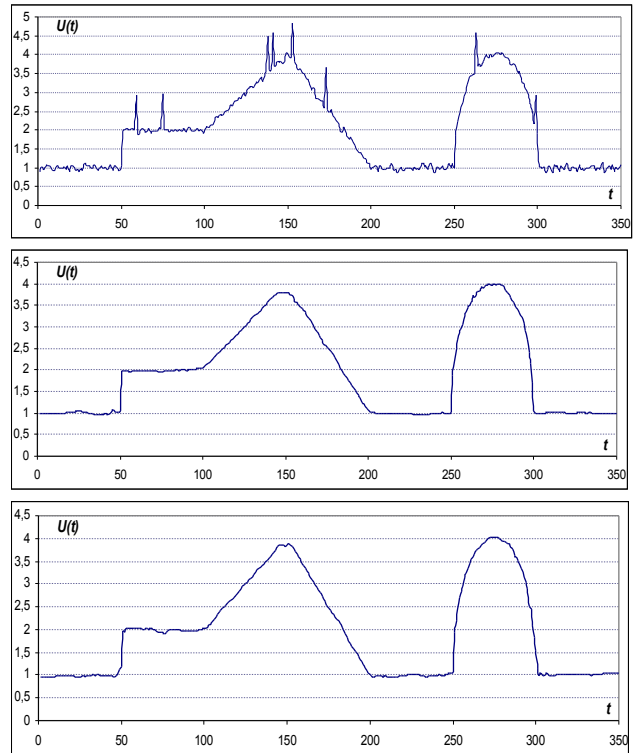


Рис.3. Застосування нелінійних ЛАФ $A2''$, $A2'$ на тестовому сигналі з адитивним шумом та імпульсними завадами.

На основі обробки модельних сигналів і статистичних оцінок якості запропоновано практичні рекомендації щодо застосування розроблених нелінійних ЛАФ: 1) $A1$, $A2$ мають високі динамічні властивості в умовах низького рівня шуму, високу робастність; 2) $A1'$, $A2'$ забезпечують високий ступінь згладжування шуму й усунення викидів на пологих і лінійно змінюваних відрізках сигналу, високі динамічні властивості в околі стрибка та піку; 3) $A1''$, $A2''$, $A1'''$, $A2'''$ забезпечують достатній компроміс суперечливих вимог до динамічних властивостей в околі різких змін сигналу вигляду стрибка, піку, злому, з одного боку, та поліноміальних кривих, з іншого, та досягнення високого ступеня згладжування адитивного, адитивного та мультиплікативного шумів; 4) за наявності викидів слід застосовувати алгоритм їх попереднього виявлення на основі сумісного аналізу ПЛА Z та Z^S , для обчислення яких слід використати нелінійний фільтр з середніми властивостями та високим ступенем усунення викидів (АУФ, $N=9$, $[\alpha N]=2$).

Типовим класом характерних точок, для яких актуальна задача підвищення точності оцінок параметрів, є екстремуми. Проаналізовано застосування нелінійних стійких фільтрів для підвищення точності оцінок координат екстремумів різного типу в умовах різного рівня шуму та наявності імпульсних завад. Координати екстремумів визначалися прямим методом

знаходження точки максимуму: $t_{i0} = \max_{t_i} \{U(t_i)\}_{i=1}^N$, якщо $(U(t_{i0}) > U(t_{i0-1})) \& (U(t_{i0}) > U(t_{i0+1}))$,

де $\{U(t_i)\}$ - послідовність вимірів сигналу у вікні розміром N , t_i - дискретні моменти часу; та

методом перетину: $t_{i\max} = (t_k + t_j)/2$, якщо

$(U(t_{j-1}) \leq \hat{Y}_{\max} y_0 < U(t_j)) \& (U(t_{k-1}) \leq \hat{Y}_{\max} y_0 < U(t_k))$, $k > j$, $y_0 \in [0; 1[$, де \hat{Y}_{\max} - наперед оцінюване значення функції в точці екстремуму. Проаналізовано (табл.3) статистичні показники МО та дисперсії оцінок координат піку й екстремуму параболи

$$M(\tau_{peak/parab}) = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{N_R} \hat{\tau}_{peak/parab}$$

$$\sigma_{\tau_{peak/parab}}^2 = \frac{1}{N_R - 1} \sum_{i=1}^{N_R} (\hat{\tau}_{peak/parab} - M(\tau_{peak/parab}))^2$$

та зведеної помилки

$$\delta_{\hat{\tau}_{peak/parab}} = (\tau_{peak/parab}^{test} - M(\tau_{peak/parab}))^2 + \sigma_{\tau_{peak/parab}}^2$$

де $\hat{\tau}_{peak/parab}$ - оцінка координати піку (*peak*) або вершини параболи (*parab*); $\tau_{peak/parab}^{test}$ - положення екстремуму на часовій осі; N_R - кількість реалізацій в операції статистичного усереднювання.

З результатів аналізу статистичних показників точності оцінок екстремумів випливають такі висновки: 1) застосування розроблених нелінійних ЛАФ призводить до суттєвого (в одиниці - десятки разів) підвищення точності оцінок піків і гладких екстремумів у широкому діапазоні зміни дисперсії шуму; 2) наявність викидів майже не впливає на точність оцінок екстремумів у разі застосування нелінійної стійкої фільтрації; 3) при пріоритеті вимог до збереження піків рекомендуються ЛАФ А1'' -А2'' , А1''' -А2''' ; 4) метод перетину істотно підвищує точність: дисперсії оцінок на порядок менші в порівнянні з прямим методом; 5) у цілому вигравання у точності при застосуванні методу перетину та нелінійної стійкої фільтрації складає один-два порядки причому воно найбільше у складних умовах високого рівня шуму та наявності викидів.

Таблиця 3. Статистичні показники точності оцінок координат трикутного і параболічного екстремумів по обробленому ЛАФ сигналу для умов різного рівня шуму та наявності викидів

Метод	прямий метод						Метод перетину					
	трикутний			параболічний			трикутний			параболічний		
Фільтр	$M(\tau_{peak})$	$\sigma_{\tau_{peak}}^2$	δ_{peak}	$M(\tau_{parab})$	$\sigma_{\tau_{parab}}^2$	δ_{parab}	$M(\tau_{peak})$	$\sigma_{\tau_{peak}}^2$	δ_{peak}	$M(\tau_{parab})$	$\sigma_{\tau_{parab}}^2$	δ_{parab}
1) низький рівень шуму: $\sigma_a^2 = 0.003$; $\tau_{peak}^{test} = 150$; $\tau_{parab}^{test} = 275$; $N = 200$.												
Вихідний	149,93	0,739	0,75	274,81	6,474	6,51	148,08	0,634	4,31	274,95	0,210	0,21
A1	149,54	0,620	0,83	275,04	3,445	3,45	147,90	0,168	4,58	275,00	0,081	0,08
A1'	149,73	0,739	0,8	275,21	5,788	5,83	147,91	0,164	4,52	274,99	0,105	0,11
A1''	149,84	1,048	1,08	274,99	5,035	5,04	147,93	0,149	4,45	275,03	0,070	0,07
A1'''	149,70	0,560	0,65	275,09	3,698	3,71	147,91	0,139	4,51	275,02	0,134	0,13

Продовження табл.3

Фільтр	$M(\tau_{peak})$	$\sigma_{\tau_{peak}}^2$	δ_{peak}	$M(\tau_{parab})$	$\sigma_{\tau_{parab}}^2$	δ_{parab}	$M(\tau_{peak})$	$\sigma_{\tau_{peak}}^2$	δ_{peak}	$M(\tau_{parab})$	$\sigma_{\tau_{parab}}^2$	δ_{parab}
2) високий рівень шуму: $\sigma_a^2 = 0.03$; $\tau_{peak}^{test} = 150$; $\tau_{parab}^{test} = 275$; $N = 200$.												
Вихідний	149,61	5,458	5,61	274,77	14,567	14,62	148,67	3,001	4,77	275,19	2,569	2,61
A1	149,03	2,805	3,74	274,95	8,693	8,70	147,81	0,969	5,78	275,00	0,379	0,38

A1'	149,14	4,047	4,80	275,49	10,736	10,98	147,93	1,006	5,30	274,99	0,361	0,36
A1''	149,17	2,798	3,50	275,20	6,960	7,00	147,89	0,877	5,32	275,00	0,325	0,33
A1'''	149,25	3,535	4,11	275,32	9,598	9,70	147,84	0,914	5,57	274,97	0,382	0,38
3) адитивні й імпульсні завади: $\sigma_a^2=0.01$; $P=0.03$; $n=0.5$; $\tau_{peak}^{test}=150$; $\tau_{parab}^{test}=275$; $N=200$.												
Вихідний	148,90	14,476	15,69	275,19	29,879	29,92	148,14	4,298	7,76	275,00	1,251	1,25
A2	149,23	1,855	2,45	274,87	5,744	5,76	147,95	0,426	4,65	275,01	0,184	0,18
A2'	149,29	2,880	3,38	274,99	7,165	7,17	147,97	0,437	4,58	275,00	0,191	0,20
A2''	149,47	2,743	3,03	274,92	8,793	8,80	147,86	0,508	5,07	274,98	0,226	0,23
A2'''	149,39	2,813	3,18	274,84	8,799	8,82	147,86	0,487	5,09	274,99	0,201	0,20

Аналіз ефективності розроблених методів ЛА стійкої фільтрації на основі нелінійних фільтрів: ЕКГМФ ($N=9$), АУФ ($N=9$, $[\alpha N]=2$), АУФ ($N=13$, $[\alpha N]=3$) - ЛАФ А' ; ЕКГМФ ($N=9$), АКГФ ($N=13$, $[\alpha N]=1$) - ЛАФ А'' ; КГФОС ($N=9$ ($p=1$)), КГФОС ($N=13$ ($p=0,4$)) і АКГФ ($N=13$, $[\alpha N]=1$) - ЛАФ А''' у широкому діапазоні змін дисперсії адитивного гаусова шуму й адитивного і мультиплікативного шуму показав високі інтегральні показники якості фільтрації ЕКГ за критеріями СКП і ВСШ. Для тестової моделі ЕКГ (розрізнення сигналу $4,88 \mu B/\delta$) при частоті дискретизації $400 \Gamma\text{ц}$ у діапазоні низького-високого рівня гаусова шуму (вхідне ВСШ $18 \div 7 \text{ дБ}$) запропоновані нелінійні ЛАФ збільшують ВСШ на $8,5 \div 10,3 \text{ дБ}$ і зменшують СКП у $5,5 \div 9$ разів (табл.4, рис.4-5). За наявності мультиплікативної компоненти шуму ВСШ збільшується на $9 \div 11 \text{ дБ}$, СКП зменшується в $5 \div 8$ разів. При цьому рекомендується для ЛАФ А, А', А''' використати в якості ПЛА тільки параметр Z і виконати його обробку МФ (2), $N=5$. Найкращу якість забезпечують ЛАФ А'', А'''.

Таблиця 4. Оцінки ефективності локально-адаптивної нелінійної фільтрації ЕКГ (частота дискретизації $400 \Gamma\text{ц}$) для умов різного рівня адитивного, адитивного та мультиплікативного шумів, ppm.

Фільтр	СКП	ВСШ	СКП	ВСШ	СКП	ВСШ	СКП	ВСШ	СКП	ВСШ
1) $\sigma_a^2=0,0002$; $N_R=200$;		2) $\sigma_a^2=0,0004$;		3) $\sigma_a^2=0,0006$;		4) $\sigma_a^2=0,0008$;		5) $\sigma_a^2=0,001$;		
Вихідний	200	18,5	400	15,5	600	13,7	800	12,5	1010	11,5
A(MED)	40	26,0	70	23,4	90	21,8	120	20,7	140	19,9
A' (MED)	40	25,2	70	22,8	100	21,8	120	20,6	150	19,6
A'' (Z)	40	26,2	70	24,1	90	22,6	110	21,9	130	20,8
A'''	40	26,7	70	24,7	90	23,2	110	22,4	130	21,6
6) $\sigma_a^2=0,0013$;			7) $\sigma_a^2=0,0016$;		8) $\sigma_a^2=0,002$;		9) $\sigma_a^2=0,0026$;		10) $\sigma_a^2=0,003$;	
Вихідний	1300	10,4	1600	9,5	2000	8,5	2640	7,4	3000	6,7
A(MED)	180	18,9	220	18,0	270	17,0	340	15,8	380	15,2
A' (MED)	180	18,6	220	17,7	270	16,7	340	15,6	390	15,1
A'' (Z)	160	19,6	190	18,8	240	17,7	300	16,7	340	15,9
A'''	160	20,6	190	19,7	230	18,8	290	17,7	330	17,1

Продовження

Фільтр	СКП	ВСШ	СКП	ВСШ	СКП	ВСШ	СКП	ВСШ	СКП	ВСШ
11) $\sigma_a^2=0,0003, k_0=0,0006, N_R=200;$			12) $\sigma_a^2=0,0006, k_0=0,001;$		13) $\sigma_a^2=0,0008, k_0=0,003;$		14) $\sigma_a^2=0,001, k_0=0,006;$		15) $\sigma_a^2=0,002, k_0=0,008.$	
Вихідний	310	16,1	620	13,1	850	11,8	1090	10,8	2090	7,8
A(MED)	60	24,2	100	21,7	130	20,7	170	19,7	290	17,1
A' (MED)	60	23,8	100	21,9	140	21,1	170	19,9	300	17,1
A'' (Z)	60	24,1	100	21,6	130	20,2	160	19,2	280	16,7
A'''	60	24,8	100	23,1	120	22,0	150	20,8	260	18,8

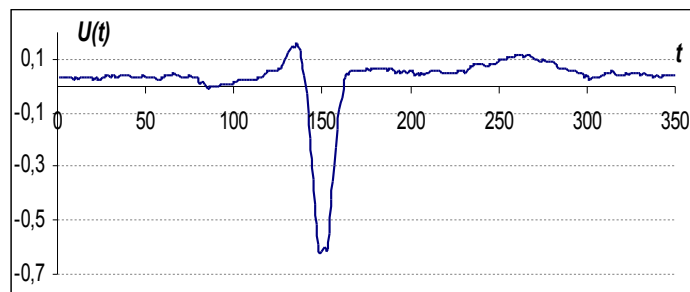
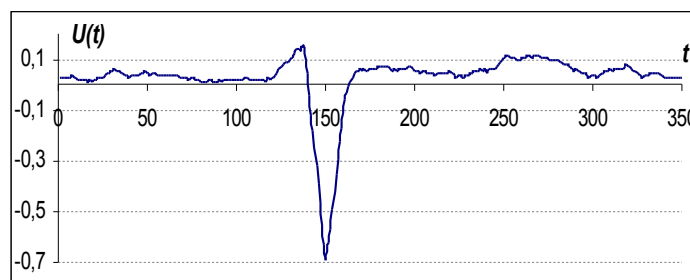
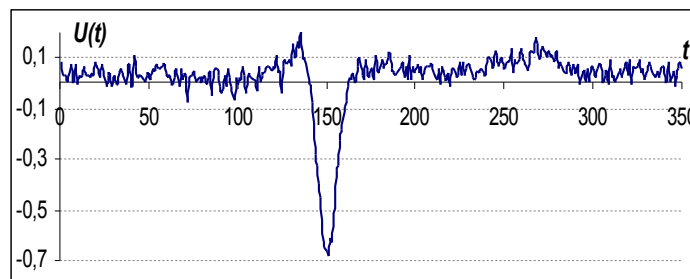
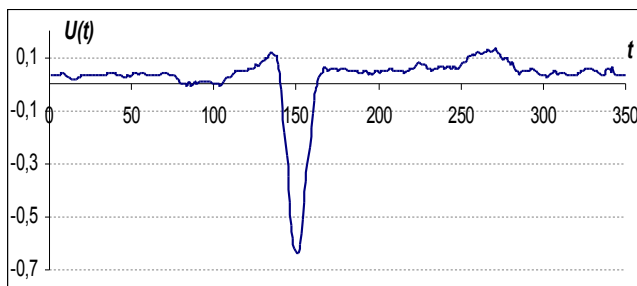
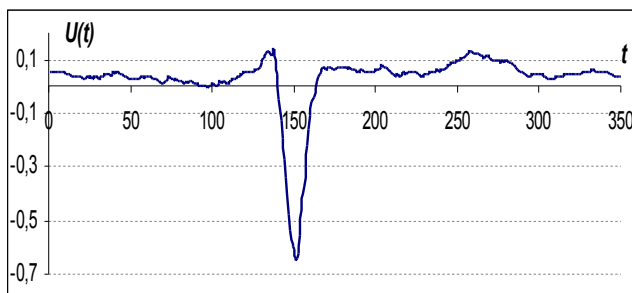
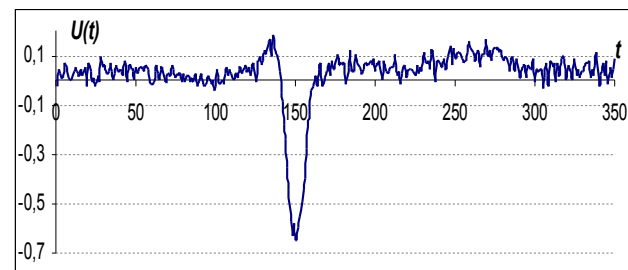


Рис.4. Застосування нелінійних ЛАФ A'' , A''' на сигналі ЕКГ з адитивним шумом.

Рис.5. Застосування нелінійних ЛАФ A' , A'' , A''' на сигналі ЕКГ з адитивним і мультиплікативним шумом.

Для ЕКГ при частоті дискретизації 200 Гц переваги методів ЛА нелінійної фільтрації суттєві. Серед неадаптивних фільтрів ефективний лише КГФОС (6) завдяки високій якості обробки піку та параболи, при цьому найкращим є вибір проміжних значень параметра нелінійності $p=0,4$ та розміру апертури $N=9$. У разі застосування розроблених нелінійних ЛАФ рекомендується використати ПЛА Z і Q_Z . Для ЛАФ A'' , A''' у діапазоні низького-високого рівня адитивного шуму (вхідне ВСШ $18 \div 6 \text{ дБ}$) вихідне ВСШ збільшується на $5,3 \div 8,8 \text{ дБ}$, а СКП зменшується в $3,3 \div 6$ разів (табл.5, рис.6-7). В умовах впливу мультиплікативної компоненти шуму ефективність нелінійних ЛАФ за критерієм ВСШ зростає до $5,7 \div 8,6 \text{ дБ}$. При низькому рівні шуму як попередній фільтр для обчислення ПЛА Z у ЛАФ A''' рекомендується використати АКГФ ($N=9(1)$), а при зростанні дисперсії шуму збільшити

Рис.7. Застосування ЛАФ A' , A'' на тестовому сигналі ЕКГ з адитивним і мультиплікативним шумом.

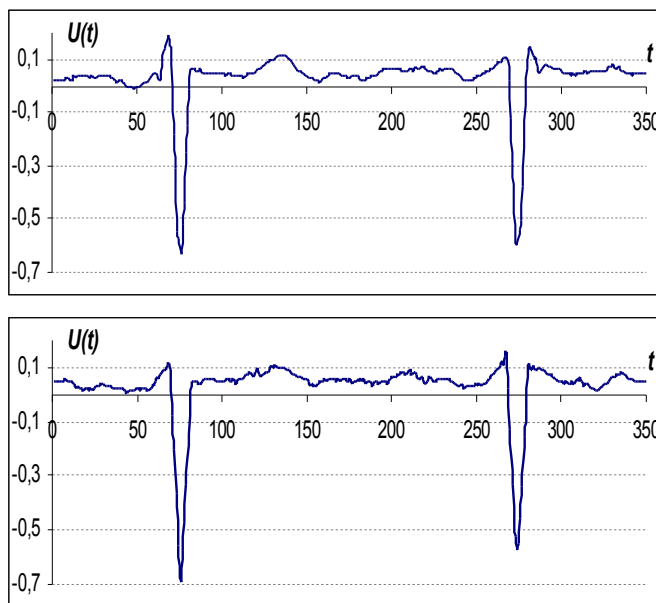


Рис.6. Застосування нелінійних ЛАФ A'' , A''' на тестовому сигналі ЕКГ з адитивним шумом.

Таким чином, розроблені методи ЛА нелінійної стійкої фільтрації ЕКГ мають важливі для практичних умов переваги: 1) високі інтегральні показники ефективності в широкому діапазоні зміни дисперсії шуму, причому в складних умовах наявності мультиплікативної компоненти шуму ефективність нелінійних ЛАФ зростає; 2) стійке функціонування в умовах нестационарності й апріорної невизначеності сигналу та статистичних властивостей завад; 3) долання недоліків порогових оцінок адаптивних фільтрів на основі ОП; ці недоліки полягають у суперечності між вибором порогів для усунення шумових компонент, з одного

боку, та збереження параметрів низькоамплітудного сигналу, з іншого, у наявності ефекту Гіббса (дзвону) в околі різких змін сигналу; 4) не потребують оцінки дисперсії, визначення QRS-комплексів, час на навчання (адаптацію параметрів фільтру), мають невеликий розмір ковзного вікна і високу швидкодію.

Приклади ЛА нелінійної фільтрації сигналу ЕКГ високого розрізнення з ЕМГ- шумом та сигналу, знятого одноканальним електрокардіографічним приладом, показані на рис.8-9.

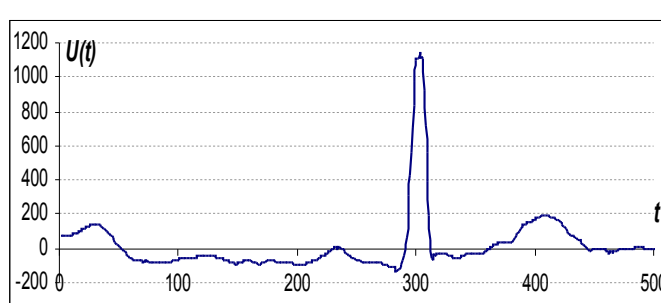
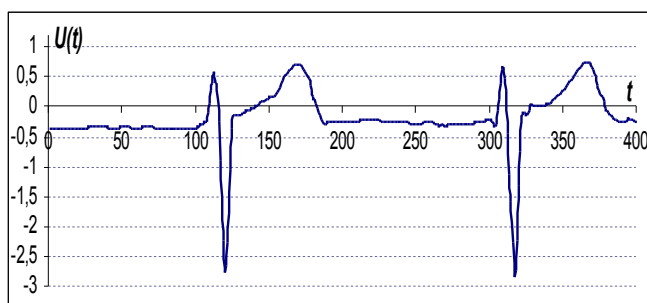
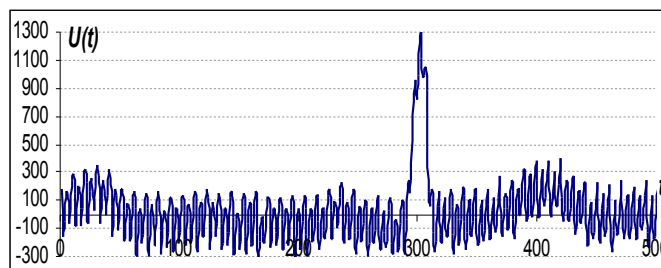
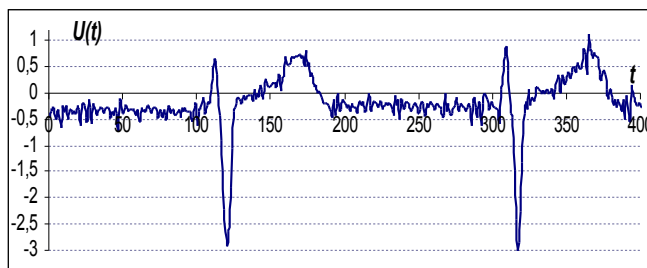


Рис.8. Нелінійна ЛА фільтрація ЕКГ (4,88 $\mu\text{В/б}$, частота дискретизації 200 Гц) з ЕМГ-шумом.

Рис.9. Нелінійна ЛА фільтрація ЕКГ (частота дискретизації 400 Гц).

У п'ятому розділі проаналізовано застосування нелінійних фільтрів класу КГМФ і розроблено метод, що ґрунтується на принципі векторної нелінійної фільтрації, для усунення рухових артефактів у БС. Проаналізовано застосування ЗМКГМФ для виділення високоамплітудного тренду ЕКГ і рухових артефактів у ЕЕГ. Запропоновано метод автоматичного видалення низькоамплітудних артефактів з невідомими властивостями в одноканальному сигналі ЕКГ, який використовує векторну нелінійну фільтрацію в ковзному вікні. Розроблено адаптивний векторний фільтр з усіченим середнім (АВФУС), що за рахунок застосування рангового статистичного критерію визначає та видаляє вектори (сигнали) з артефактами, що дозволило запобігти значних спотворень результуючої кривої. На імітаційних моделях ЕКГ з артефактом, гаусовим шумом і поодинокую морфологічною зміною проведено порівняння АВФУС з іншими ВНФ.

Проаналізовано застосування ЗМКГМФ (7) для видалення високоамплітудних викривлень на моделі сумарного сигналу ЕКГ і тестового впливу вигляду різкого та скісного перепадів, що імітує "сходиноподібний" руховий артефакт, та ефективність придушення даним нелінійним фільтром різного рівня шуму в околі перепадів (показано, що СКП зменшується в $4,5 \div 7,4$ разів). ЗМКГМФ не потребує знань про спектральні та статистичні властивості артефактів, має просту реалізацію, функціонує в реальному часі. Приклади обробки сигналів ЕКГ та ЕЕГ наведені на рис.10- 11.

згладжування шуму в БС, пов'язаних з повторюваними подіями, розроблено АВФУС, що в якості параметра адаптації застосовує статистичний критерій перевірки сумнівних варіант малих вибірок даних. У даному ВНФ використовується ковзне подвійне зовнішнє та внутрішнє вікно, що містить вибірку векторів - послідовних ЕКГ-циклів. У вікні меншого розміру знаходиться медіанний вектор \mathbf{x}_{med} (8), для векторів зовнішнього вікна розміром N обчислюються відстані $d_i = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{med}\|$, що характеризують положення i -го вектора відносно центру розподілу. Чим більше d_i , тим далі від центру розподілу знаходиться i -й вектор, тим більш вірогідна наявність у ньому викиду. У відповідності з упорядкуванням відстаней $d(\mathbf{x}_{(1)}) \leq d(\mathbf{x}_{(2)}) \dots \leq d(\mathbf{x}_{(N)})$ векторам у межах вікна призначаються ранги: $[\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N] \Rightarrow [\mathbf{x}_{(1)}, \mathbf{x}_{(2)}, \dots, \mathbf{x}_{(N)}]$. За параметр адаптації, що визначає границю i_{set} кластеризації векторів на множину векторів $[\mathbf{x}_{(1)}, \mathbf{x}_{(2)}, \dots, \mathbf{x}_{(i_{set})}]$, що підлягають обробці для визначення результуючого сигналу, та вектори з артефактами $[\mathbf{x}_{(i_{set}+1)}, \mathbf{x}_{(i_{set}+2)}, \dots, \mathbf{x}_{(N)}]$, які необхідно вилучити, запропоновано застосувати статистичний критерій перевірки сумнівних варіант малих вибірок. Згідно з цим критерієм перший кластер містить вектори \mathbf{x}_i , для відповідних скалярних величин d_i , $i = 1, \dots, i_{set}$, яких виконується умова перевірки найбільшої варіанти $d_{(i_{set})}$ на приналежність вибірці:

$$t_2 = \frac{d_{(i_{set})} - d_{(i_{set}-1)}}{d_{(i_{set})} - d_{(2)}} \leq t_{st}$$

де $d_{(1)} \leq d_{(2)} \leq \dots \leq d_{(i_{set})}$; t_{st} - критична точка, що знаходиться за довідниковою таблицею для прийнятого рівня значимості α (довірчої ймовірності $P=0,95; 0,99; 0,999$) та розміру вибірки N .

Другий кластер містить вектори, що мають найбільші ранги, для відстаней d_i , $i = i_{set} + 1, \dots, N$, яких не виконується зазначена умова. Вектори даного кластеру (за відсутністю викидів ця множина порожня) вилучаються з вибірки, що дозволяє запобігти значних спотворень результуючої кривої.

Таким чином вихідний сигнал АВФУС задається виразом

$$\mathbf{y}^{ABFUC} = \frac{1}{i_{set}} \sum_{i=1}^{i_{set}} \mathbf{x}_{(i)} \quad (10)$$

Проаналізовано застосування запропонованого методу видалення низькоамплітудних артефактів у сигналі ЕКГ і використання ВМФ (8), СЗЗВФ (9) та АВФУС (10) на моделях ЕКГ з прямокутним імпульсом, що імітує артефакт, з гаусовим шумом і з поодиноким зміню сигналу (рис.13-15). Показано, що вказані ВНФ видаляють артефакт без істотних спотворень сигналу (рис.13); ВМФ не згладжує шум, а СЗЗВФ та АВФУС завдяки лінійній операції усереднення ефективно подавляють випадковий шум (рис.14); недоліком ВМФ є те, що ним видаляються низькоамплітудні зміни сигналу, кількість яких у межах вікна розміром N не перевищує $N/2$, тоді як СЗЗВФ та АВФУС зберігають у вихідному сигналу структуру таких змін (рис.15).

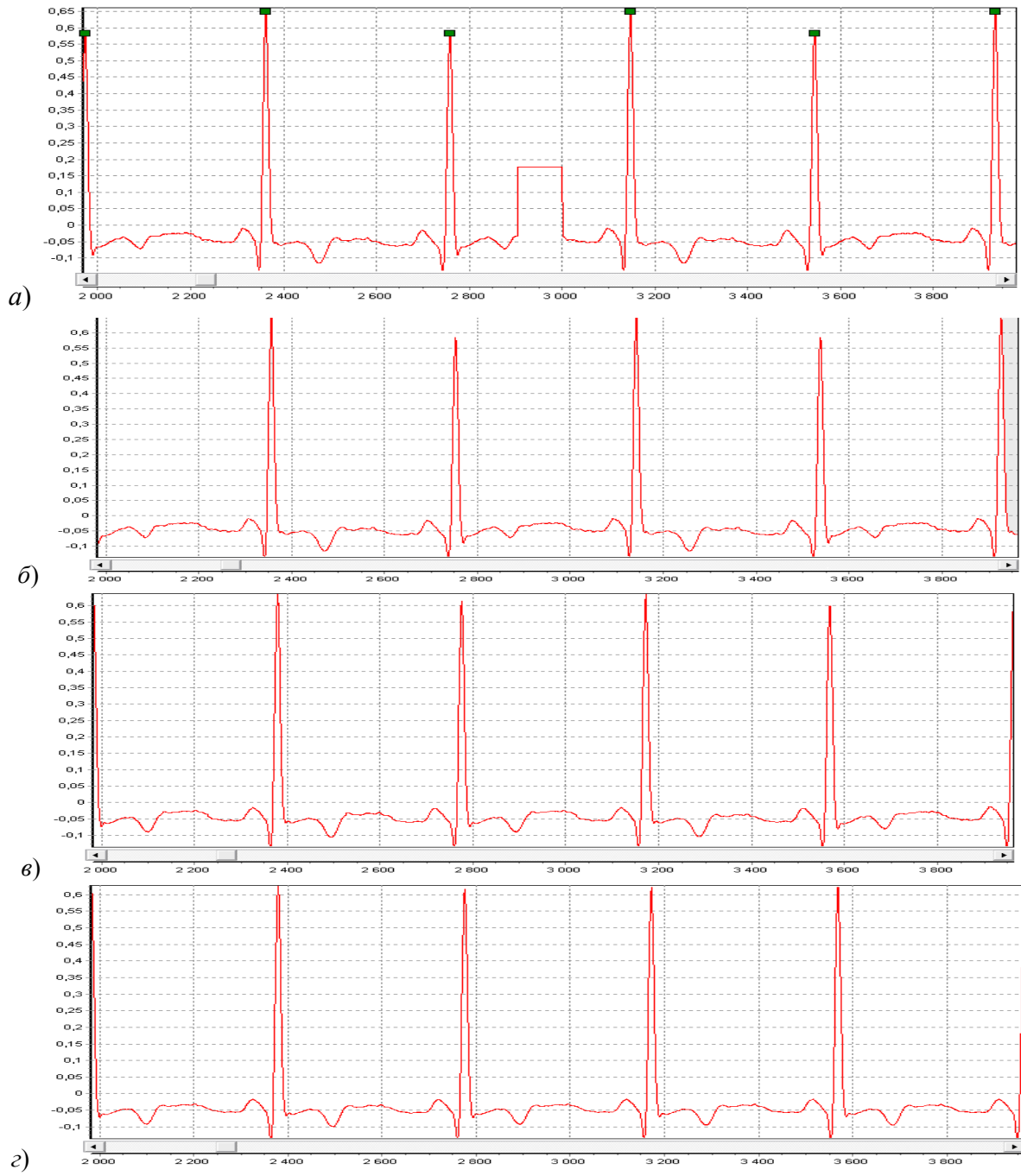


Рис.13. Застосування методу видалення низькоамплітудних артефактів на імітаційній моделі ЕКГ з артефактом: а) вхідний сигнал; б) сигнал на виході ВМФ ($N=7$); в) сигнал на виході СЗЗВФ ($N=7$); г) сигнал на виході АВФУС ($N=7$).



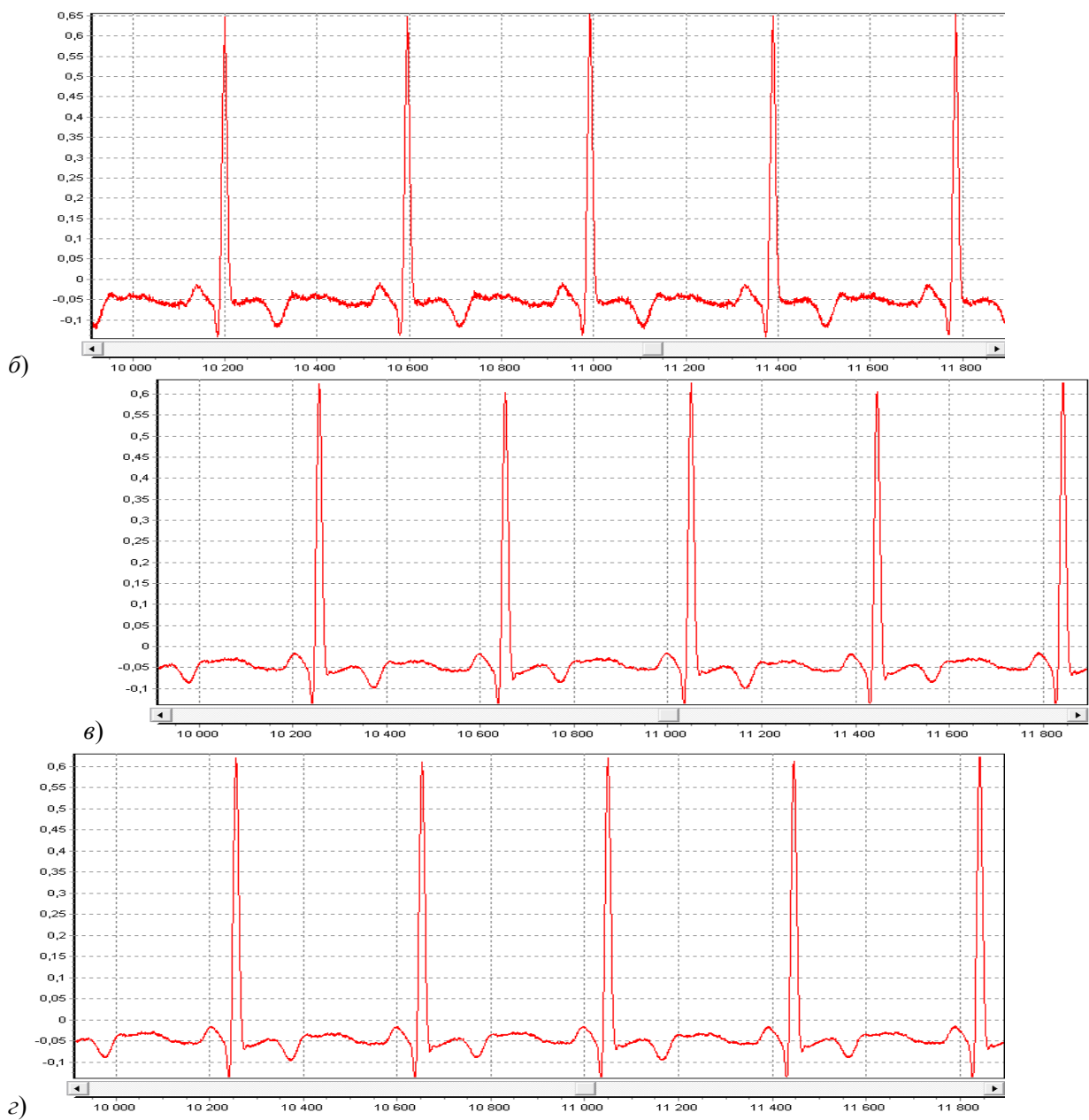
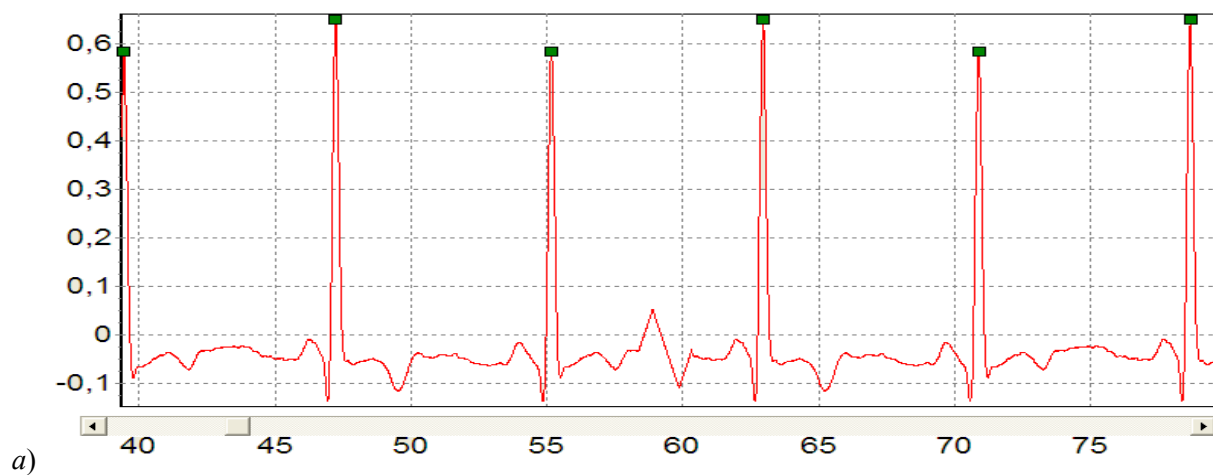


Рис.14. Застосування методу видалення низькоамплітудних артефактів на імітаційній моделі ЕКГ з гаусовим шумом: а) вхідний сигнал; б) сигнал на виході ВМФ ($N=7$); в) сигнал на виході СЗЗВФ ($N=7$); г) сигнал на виході АВФУС ($N=7$).



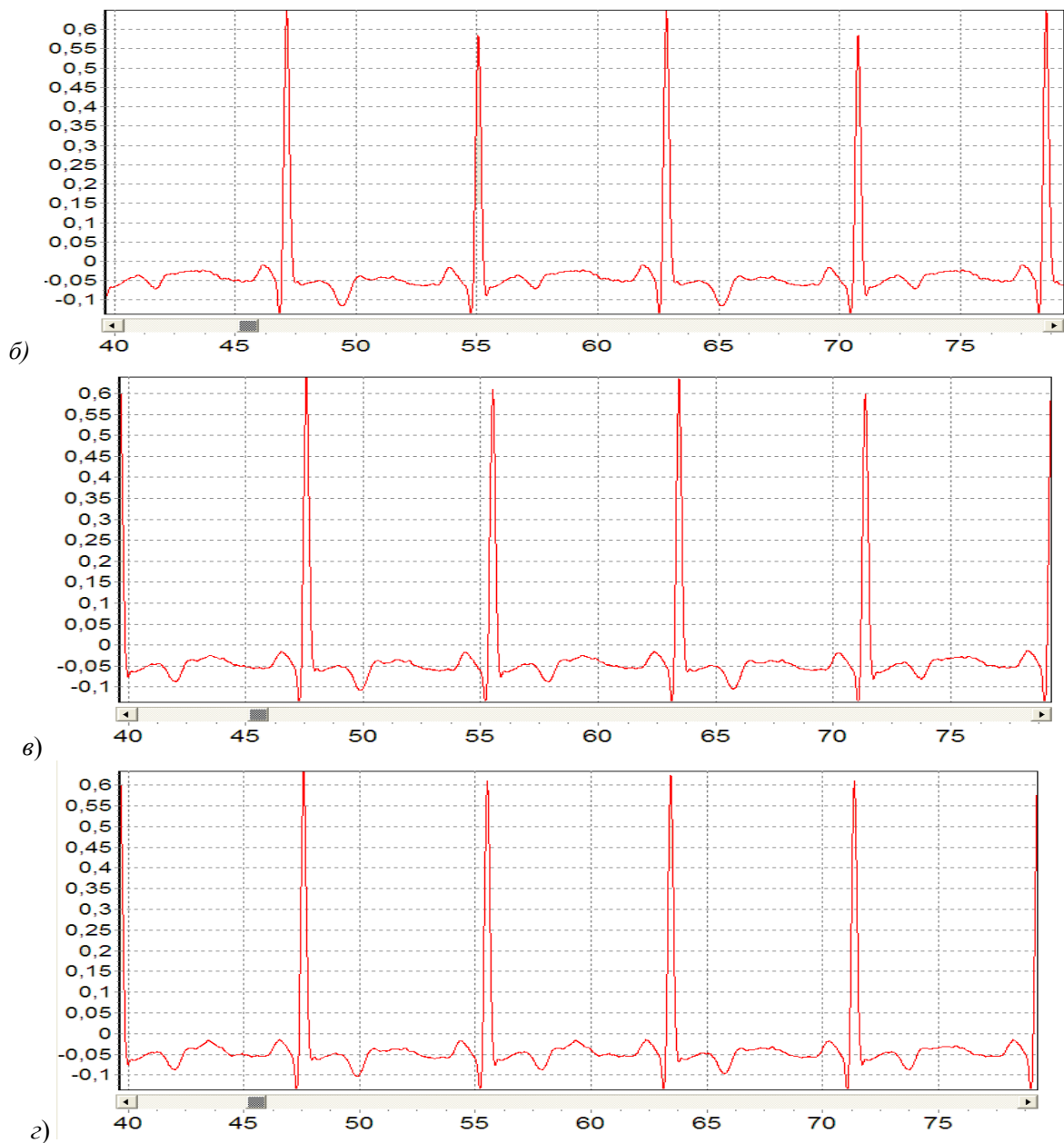


Рис.15. Застосування методу видалення низькоамплітудних артефактів на імітаційній моделі ЕКГ з поодинокую зміною: а) вхідний сигнал; б) сигнал на виході ВМФ ($N=7$); в) сигнал на виході СЗЗВФ ($N=7$); г) сигнал на виході АВФУС ($N=7$).

На модельних прикладах показані такі переваги розробленого АВФУС: 1) видаляються низькоамплітудні артефакти з невідомими властивостями; 2) долаються недоліки ВМФ: під час визначення результуючого сигналу враховується інформативність всіх векторів, що належать вибірці, згладжується шум; 3) долаються недоліки СЗЗВФ: виключається вплив артефакту на вихідний сигнал, краще зберігаються поодинокі зміни сигналу; 4) непараметричність статистичного критерію – придатний для негаусових ЩРЙ; 5) висока швидкодія.

З огляду на виявлені переваги запропонованого методу видалення низькоамплітудних артефактів з невідомими властивостями в одноканальному сигналі ЕКГ і застосування розробленого АВФУС (10) у даному методі рекомендується використати його для усунення артефактів і випадкового шуму при аналізі мікропотенціалів ЕКГ і в якості фільтруючої ланки

інтелектуальних біомедичних систем.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено важливу й актуальну для біомедичних систем тривалої реєстрації сигналів науково-технічну задачу розробки високоефективних адаптивних методів нелінійної фільтрації нестационарних адитивного й адитивного та мультиплікативного шумів з невідомою дисперсією, стійких до апріорної невизначеності сигнально-завадової ситуації та впливу імпульсних завад; розробки методів нелінійної фільтрації рухових артефактів різної інтенсивності з невідомими властивостями. В дисертації отримано такі основні результати та висновки.

1. Проаналізовано сучасний стан в галузі адаптивних методів згладжування нестационарного шуму та видалення рухових артефактів у БС. Виявлено тенденції розвитку й основні невирішені проблеми, для розв'язання яких потрібне вдосконалення методів нелінійної стійкої фільтрації.

2. Обґрунтовано динамічні та статистичні властивості різних типів нелінійних фільтрів для широкого діапазону зміни дисперсії адитивного та змішаного (адитивного та мультиплікативного) шумів і наявності викидів. Проведено класифікацію фільтрів за властивостями та сформульовано практичні рекомендації щодо вибору найкращих фільтрів залежно від виду сигналу та рівня завад.

3. Розроблено методи ЛА нелінійної фільтрації, які, що підтверджено обробкою статистичних оцінок ефективності, мають покращенні інтегральні (для комплексної моделі одномірного сигналу, що містить набір елементарних сигналів) і локальні (в околі піка, злому, стрибка, поліноміальної кривої) властивості та забезпечують достатню якість фільтрації за умов нестационарності й апріорної невизначеності сигналу та завад. Порівняно з методом ЛА нелінійної фільтрації, що мав найкращі інтегральні показники обробки сигналів з різним типом поведінки інформативної компоненти в умовах змішаного (адитивного та мультиплікативного) шуму і малої ($P < 0,03$) ймовірності викидів, покращення ефективності становить: за критерієм СКП в околі піку та злому – на 20- 35%, стрибка в 1,5- 2 рази, гладкого екстремуму – на 23- 36%, за інтегральними показниками СКП на 15- 20%, ВСШ – на 0,6- 1,8 дБ.

4. На основі застосування розроблених методів ЛА нелінійної фільтрації при обробці модельних сигналів за умов різного рівня шуму та наявності викидів показано суттєве (в одиниці, а за наявністю викидів у десятки разів) підвищення точності оцінок параметрів екстремумів різного типу (пік, парабола).

5. Показано, що при застосуванні розроблених методів ЛА нелінійної фільтрації в широкому діапазоні змін дисперсії адитивного й адитивного та мультиплікативного шумів досягаються високі інтегральні показники якості обробки сигналів ЕКГ за критеріями СКП і ВСШ. Для ЕКГ при частоті дискретизації 400 Гц та дії адитивного гаусова шуму (діапазон вхідного ВСШ $18 \div 7$ дБ) вихідне ВСШ збільшилося на $8,5 \div 10,3$ дБ, СКП зменшилися в $5,5 \div 9$ разів, а при дії мультиплікативної компоненти шуму покращення таке: ВСШ на $9 \div 11$ дБ, СКП у $5 \div 8$ разів. Для ЕКГ при частоті дискретизації 200 Гц ЛА

методи мають суттєві переваги: в діапазоні низького-високого рівня адитивного гаусова шуму ВСШ збільшилося на $5,3 \div 8,8$ дБ, а СКП зменшилося в $3,5 \div 6$ разів, за наявності мультиплікативної компоненти шуму ВСШ зросло до $5,7 \div 8,6$ дБ.

6. Проаналізовано застосування ЗМКГМФ для видалення високоамплітудних викривлень сигналу, спричинених рухами пацієнта. На імітаційних моделях і реальних сигналах і на основі чисельних оцінок показано ефективне застосування ЗМКГМФ у задачах автоматичної корекції нелінійного (стрибоподібного) тренду ЕКГ і видалення рухових артефактів, зокрема кліпання очима в ЕЕГ. При цьому даний нелінійний фільтр не використовує апріорної інформації про статистичні та спектральні властивості артефактів, функціонує в реальному часі.

7. Запропоновано метод усунення низькоамплітудних артефактів в одноканальному сигналі ЕКГ, що використовує векторну нелінійну фільтрацію в ковзному вікні даних.

8. Розроблено адаптивний ВНФ з усередним середнім (АВФУС), в якому як параметр адаптації використовується статистичний критерій перевірки сумнівних варіант малих вибірок даних.

9. На імітаційних моделях показано, що запропонований метод автоматично в реальному часі усуває низькоамплітудні артефакти з невідомими властивостями, а використання розробленого АВФУС дозволяє із наявної вибірки сигналів видаляти тільки реалізації з артефактами, згладжувати шум, зберігати поодинокі зміни структури сигналу для подальшого розпізнавання та класифікації біомедичними діагностичними системами.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тулякова, Н.О. Применение нелинейной фильтрации для повышения точности оценки амплитуды пикообразных экстремумов [Текст] / Н.О. Тулякова // Авіаційно-космічна техніка та технологія: зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є. Жуковського "ХАІ". – Вип.21. – Х., 2000. – С.157-160.
2. Тулякова, Н.О. Применение КИХ-гибридных нелинейных фильтров в локально-адаптивных алгоритмах на основе Z-параметров [Текст] / Н.О. Тулякова // Вісник Сумського державного університету. – 2002. – № 1 (34) – С.41-50.
3. Тулякова, Н.О. Анализ эффективности локально-адаптивных алгоритмов нелинейной фильтрации одномерных информационных сигналов [Текст] / Н.О. Тулякова // Вісник Сумського державного університету. – 2002. – № 12 (45) – С.34-41.
4. Тулякова, Н.О. Исследование эффективности локально-адаптивных алгоритмов нелинейной фильтрации для обработки электрокардиограмм [Текст] / Н.О. Тулякова // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – № 11 (57) – С.134-144.
5. Тулякова, Н.О. Применение нелинейной фильтрации для повышения точности измерения координат экстремумов [Текст] / Н.О. Тулякова // Радіоелектронні і комп'ютерні системи: зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є. Жуковського "ХАІ". – № 2(21). – Х., 2007. – С.82-89.
6. Тулякова, Н.О. Применение "Растущего на месте" КИХ-гибридного медианного фильтра для удаления нелинейного тренда ЭКГ [Текст] / Н.О. Тулякова // Радіоелектронні і комп'ютерні системи: зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є. Жуковського "ХАІ". – № 3. –

Х., 2009.–С.73-77.

7. Тулякова, Н.О. Применение векторной нелинейной фильтрации для устранения артефактов ЭКГ [Текст] / Н.О. Тулякова, А.Г. Алфимов // Радиотехника: Всеукр. межведом. науч.-техн. сб. – Вып. 143. – Х., 2005. – С.53- 57.
8. Бых, А.И. Методы локально-адаптивной устойчивой фильтрации с линейными субапертурами с конечной импульсной характеристикой [Текст] / А.И. Бых, Н.О. Тулякова // Радіоелектронні і комп'ютерні системи: зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є. Жуковського "ХАІ". – № 2 (54). – Х., 2012. – С.25- 34.
9. Колодяжный, В.М. Применение взвешенного гибридного медианного фильтра с линейными субапертурами с конечной импульсной характеристикой для удаления артефактов в энцефалограммах [Текст] / В.М. Колодяжный, Н.О. Тулякова // Радіоелектронні і комп'ютерні системи: зб.наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є.Жуковського "ХАІ". – № 3. – Х., 2010. – С. 87-91.
10. Колодяжный, В.М. Устранение низкоамплитудных двигательных артефактов в электрокардиограмме [Текст] / В.М. Колодяжный, Н.О. Тулякова // Комп'ютерна математика: зб. наук. праць ІК ім. В.М. Глушкова. – № 1. – К., 2011. – С.140-149.
11. Колодяжный, В.М. Методы локально-адаптивной нелинейной фильтрации сигнала электрокардиограммы [Текст] / В.М. Колодяжный, Н.О. Тулякова // Радиотехника: Всеукр. межведом. науч.-техн. сб. – Вып.164. – Х., 2011. – С.108- 119.
12. Лукин, В.В. Анализ свойств алгоритмов нелинейной фильтрации одномерных информационных сигналов [Текст] / В.В. Лукин, Н.О. Тулякова, М.О. Дорошук // Авіаційно-космічна техніка та технологія: зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є.Жуковського "ХАІ". – Вып.12. – Х., 1999. – С.109- 113.
13. Лукин, В.В. Анализ эффективности нелинейных алгоритмов фильтрации медицинских сигналов [Текст] / В.В. Лукин, В.Б. Шаронов, Н.О. Тулякова // Авіаційно-космічна техніка та технологія: зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є. Жуковського "ХАІ". – Вип.14. – Х., 1999. – С.123- 131.
14. Лукин, В.В. Нелинейные адаптивные фильтры для обработки одномерных процессов [Текст] / В.В. Лукин, А.А. Зеленский, Н.О. Тулякова // зб. наук. пр. Донецького держ. техн. ун-ту. – Вип.3. – Донецьк, 1999. – С. 235- 242.
15. Adaptive method for 1-D signal processing based on nonlinear filter bank and Z-parameter [Text] / V.V. Lukin, A.A. Zelensky, N.O. Tulyakova, V.P. Melnik // NSIP'99: Proc. of the IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing , June 20-23, 1999. – Antalya (Turkey), 1999. –Vol. I. – P. 287-291.
16. Locally-adaptive processing of 1-D signals using Z-parameters and filter banks [Text] / V.V. Lukin, A.A. Zelensky, N.O. Tulyakova, V.P.Melnik, S.Peltonen, P.Kuosmanen // NORSIG'2000: Proc. of the Nordic Signal Processing Symposium, June 13-15, 2000.– Kolmarden (Sweden), 2000.– P.195-197.
17. Nonlinear adaptive filters for 1-D signal processing [Text] / V.V. Lukin, A.A. Zelensky, N.O. Tulyakova, S.K. Abramov // УкрОБРАЗ'98: тези доп. IV Всеукр. міжнарод. конф. 19-23 жовтня, 1998 р. – К., 1998. – С.39-40.
18. Dynamic Characteristics of Some Nonlinear 1-D Filters [Text] / S.K. Abramov, N.O. Tulyakova,

- V.V. Lukin., V.P. Melnik // FINSIG'99: Proc. of the 1999 Finnish Signal Processing Symposium, May 31, 1999. – Oulu (Finland), 1999. – P.184-188.
19. Алфимов, А.Г. Применение векторной нелинейной фильтрации для обработки электрокардиограммы в реальном времени [Текст] / А.Г. Алфимов, Д.М. Усик, Н.О. Тулякова // Сучасні інформаційні технології в освіті та промисловості: матеріали II міжн. конф., 17-21 листопада 2003 р. – Миколаїв (Україна), 2003. – С.4-6.
 20. Тулякова, Н.О. Применение нелинейной фильтрации для выделения тренда ЭКГ [Текст] / Н.О. Тулякова, К.С. Будко // Інтелектуальні системи в промисловості та освіті – 2007: тези доп. I міжн. н.-техн. конф., 7-9 листопада 2007 р. – Суми (Україна), 2007. – С.48-50.
 21. Тулякова, Н.О. Оперативные алгоритмы векторной нелинейной фильтрации для удаления низкоамплитудных артефактов ЭКГ [Текст] / Н.О. Тулякова, О.Г. Руденко // Інтелектуальні системи в промисловості та освіті – 2009: тези доп. II міжн. н.-техн. конф., 3-5 грудня 2009 р. – Суми (Україна), 2009. – С.115-117.
 22. Колодяжный, В.М. Адаптивный векторный нелинейный фильтр для устранения двигательных артефактов в электрокардиограмме [Текст] / В.М. Колодяжный, Н.О. Тулякова // Сучасні проблеми гуманізації та гармонізації управління: матер.10-ї міжн. конф., 4-10 листопада 2010 р. – Харків (Україна), 2010. – С.284-286.
 23. Колодяжный, В.М. Фільтрація складних завад у біомедичних сигналах [Текст] / В.М. Колодяжный, Н.О. Тулякова // Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління: матер. міжн. проблемно-наукової міжгалуз. конф., 17-20 травня, 2011 р. – Бучач- Яремча (Україна), 2011 – С. 91-95.
 24. Свідоцтво № 38670 про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма “Автоматичне видалення низькоамплітудних артефактів з невідомими властивостями в ЕКГ-сигналі” [Текст] / Н.О. Тулякова –№ 38830; заявл. 31.03.2011; опубл. 21.06.2011.
 25. Свідоцтво № 39462 про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма “КІХ-гібридні медіанні фільтри для виділення високоамплітудних викривлень, спричинених рухами, у біомедичних сигналах” [Текст] / Н.О.Тулякова– № 39707; заявл. 26.05.2011; опубл. 02.08.2011.

АНОТАЦІЯ

Тулякова Н.О. Методи нелінійної стійкої фільтрації складних завад у біомедичних сигналах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2011.

Дисертація присвячена розробці методів нелінійної стійкої фільтрації складних завад змішаного адитивного, мультиплікативного й імпульсного виду в умовах нестационарності й апріорної невизначеності сигнально-завадової ситуації та рухових артефактів з невідомими властивостями, присутніх у біомедичних сигналах.

Досліджені динамічні й статистичні властивості різних типів нелінійних фільтрів в умовах

широкого діапазону змін дисперсії шуму та наявності імпульсних завад, для різних видів елементарних сигналів і комплексної моделі одномірного сигналу. Розроблені методи локально-адаптивної нелінійної фільтрації одномірних сигналів із заздальгідь невідомим та істотно різним характером сигналу в умовах нестационарних завад і наявності викидів. На основі обробки модельних сигналів та статистичних експериментальних даних показано покращення локальних та інтегральних показників якості фільтрації, суттєве підвищення точності оцінок параметрів екстремумів, забезпечення високої ефективності фільтрації ЕКГ сигналу в умовах різного рівня гаусових адитивних та змішаних (адитивних і мультиплікативних) завад.

Запропоновано застосування "Зростаючого на місці" КІХ-гібридного медіанного фільтру для видалення високоамплітудних викривлень базової лінії ЕКГ та рухових артефактів, зокрема кліпання очей, в електроенцефалограмі. Методами імітаційного моделювання та статистичної оцінки ефективності показано, що даний нелінійний фільтр усуває зазначені завади у реальному часі, не використовуючи знань про статистичні та спектральні властивості артефактів.

Запропоновано новий метод автоматичного видалення низькоамплітудних артефактів з невідомими властивостями в сигналі ЕКГ, який використовує векторну нелінійну фільтрацію. Розроблено адаптивний векторний нелінійний фільтр з усередненням даних, який на основі статистичного критерію видаляє тільки реалізації досліджуваного процесу з артефактами, згладжує шум, зберігаючи поодинокі зміни структури сигналу.

Ключові слова: обробка біомедичних сигналів, електрокардіограма, електроенцефалограма, нестационарний шум, рухові артефакти, нелінійна стійка фільтрація, векторна нелінійна фільтрація, локально-адаптивні методи, виділення тренду, усунення артефактів.

АННОТАЦІЯ

Тулякова Н.О. Методы нелинейной устойчивой фильтрации сложных помех в биомедицинских системах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.17 – биологические и медицинские приборы и системы. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2011.

Диссертация посвящена разработке методов нелинейной устойчивой фильтрации сложных помех смешанного аддитивного, мультипликативного и импульсного вида в условиях нестационарности и априорной неопределенности сигнально-помеховой ситуации и двигательных артефактов с неизвестными свойствами, присутствующих в биомедицинских сигналах.

Исследованы динамические и статистические свойства различных типов нелинейных фильтров в условиях широкого диапазона изменения дисперсии аддитивного и мультипликативного шума и наличия импульсных помех, для различных видов элементарных сигналов и комплексной модели одномерного сигнала. Разработаны методы локально-адаптивной нелинейной устойчивой фильтрации одномерных сигналов с заранее неизвестным

и существенно различающимся характером сигнала в условиях нестационарных аддитивных и мультипликативных помех с априорно неизвестной дисперсией и наличия выбросов. На основании результатов обработки модельных сигналов и статистических экспериментальных данных показано улучшение локальных и интегральных показателей качества фильтрации по критериям среднеквадратической ошибки (СКО) и среднемодульного отклонения; существенное (в единицы-десятки раз) повышение точности оценок параметров экстремумов в условиях нестационарного шума и наличия выбросов; обеспечение высоких интегральных показателей эффективности фильтрации ЭКГ сигнала по критериям СКО и отношения сигнал-шум при воздействии различного уровня гауссовых аддитивных и смешанных аддитивных и мультипликативных помех.

Предложено применение "Растущего на месте" КИХ-гибридного медианного фильтра (РМКГМФ) для устранения высокоамплитудных искажений базовой линии ЭКГ и двигательных артефактов, в частности моргания глаз, в электроэнцефалограмме. Методами имитационного моделирования, статистической оценки эффективности и в результате апробации фильтра на реальных сигналах показано, что РМКГМФ устраняет указанные помехи в реальном времени, не используя знаний о статистических и спектральных свойствах артефактов.

Предложен новый метод автоматического устранения низкоамплитудных артефактов с неизвестными свойствами в одноканальном сигнале ЭКГ, использующий векторную нелинейную фильтрацию. Разработан адаптивный векторный нелинейный фильтр с усеченным усреднением данных в скользящем окне, который в результате применения статистического критерия проверки сомнительных вариантов устраняет только реализации исследуемого процесса с артефактами, подавляет шум, сохраняя одиночные изменения структуры сигнала.

Ключевые слова: обработка биомедицинских сигналов, электрокардиограмма, электроэнцефалограмма, нестационарный шум, двигательные артефакты, нелинейная устойчивая фильтрация, векторная нелинейная фильтрация, локально-адаптивные методы, выделение тренда, устранение артефактов.

SUMMARY

Tulyakova N.O. Methods for nonlinear robust filtering of mixed noise in biomedical systems. – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.11.17 – Biological and Medical Devices and Systems. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2011.

The thesis deals with methods' design for nonlinear robust filtering of complex noise being a mixture of additive, multiplicative and impulsive components in non-stationary conditions and a priori ambiguity of signal/noise situations and presence of artifacts with unknown properties in biomedical signals.

Dynamic and statistical properties of different types of nonlinear filters in conditions of wide range of noise variance changing and impulsive noise presence for different types of elementary fragments and complex 1D signal model are studied. Locally adaptive methods of nonlinear filtering of 1D signals with a priori unknown and considerably different behavior for non-stationary and

impulsive noise are developed. Based on processing simulated signals and statistical experimental data it is demonstrated improvement of local and integral criteria of filtering efficiency, sufficient improvement of accuracy of parameter estimation for peaky and smooth extrema, high efficiency of ECG signal processing in conditions of different level of Gaussian additive and mixed (additive and multiplicative) noise.

It is proposed to use "In-place growing" FIR-hybrid median filter for removal of high amplitude distortions of ECG baseline and motion artifacts as eye blinking in electroencephalograms. Numerical simulations and statistical estimation of efficiency show that the proposed nonlinear filter is able to remove the mentioned artifacts in real time without knowledge on statistical and spectral properties of artifacts.

It is proposed a new method for automatic rejection of low amplitude artifacts with unknown properties in ECG signals that exploits vector nonlinear filtering. Adaptive vector nonlinear filter with trimmed data averaging is developed that uses statistical criterion for removing artifacts and noise suppression with preservation of signal structure.

Keywords: biomedical signals processing, electrocardiogram, electroencephalogram, non-stationary noise, motion artifacts, nonlinear robust filtering, vector nonlinear filtering, locally adaptive methods, trend retrieving, artifact removing.