

DOI: 10.31319/2519-2884.39.2021.10

УДК 629.7.05-049.7

**О.А. Сотник**, студент

**С.В. Марченко**, к.ф.-м.н, доцент, smarsv1979@gmail.com

**О.М. Гулєша**, к.п.н, доцент

**О.М. С'янов**, д.т.н, професор

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ФІЛЬТРУ НА ОСНОВІ РЕКУРСИВНОГО МЕТОДУ НАЙМЕНЬШИХ КВАДРАТІВ

*В роботі представлено результати дослідження моделі адаптивного фільтру (АФ) на основі алгоритму рекурсивного методу найменших квадратів (РМНК). Отримані результати моделювання розробленого фільтру були верифіковані на основі зрівняння з результатами вбудованого АФ, що підтвердило коректність та ефективність запропонованої моделі. На основі запропонованої моделі АФ, розробленої в програмному середовищі Simulink було отримано структуру фільтру, яка може апаратно бути реалізована в базисі програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС).*

**Ключові слова:** адаптивна фільтрація; рекурсивний метод найменших квадратів; моделювання Simulink; РМНК.

*The results of the study of the adaptive recursive least square method (RLS) filter model are presented. The obtained modelling results of the developed adaptive filter (AF) are verified by comparing to the embedded model of RLS filter that confirms the correctness and effectiveness of the developed model. On the basis of the proposed RLS filter model designed in the software application Simulink the structure of the AF on the basic digital blocks has been obtained that further it is possible to be hardware implemented in the field programmable gate arrays.*

**Keywords:** adaptive filtering; recursive least squares method; Simulink modeling; RLS filter.

### Постановка проблеми

У процесі передачі інформації по каналу зв'язку від джерела в передавальному тракті до споживача в приймальному тракті спостерігається збагачення спектру інформаційного сигналу шумами та перешкодами. Одним з найпопулярніших сучасних методів зменшення спотворення сигналу, які є результатом випадкових процесів (шумів, перешкод), є застосування адаптивних фільтрів (АФ).

АФ [1] мають властивість самоналаштування своєї частотної характеристики під впливом завади, таким чином, щоб забезпечувати відсутність цієї завади у інформаційному сигналі, тобто адаптувати реакцію фільтра до зміни характеристик вхідного сигналу. Завдяки цій можливості, адаптивні фільтри використовуються в багатьох додатках, найбільш важливими з яких є: ехопридушення в телефонному зв'язку, обробка радіолокаційних сигналів, системи навігації, вирівнювання каналів зв'язку та обробки сигналів біометрії [1, 2].

У сучасних електронних системах все частіше виникає необхідність реалізації адаптивної фільтрації на апаратному рівні, що пов'язано з розвитком бездротових систем зв'язку та автоматики в режимі реального часу [3, 4]. Дані системи є компактними та потребують використання енергоефективних цифрових радіоелектронних пристроїв, сучасними прикладами яких є мікроконтролери, програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС), процесори цифрової обробки сигналів. Необхідність врахування архітектури цифрових радіоелектронних пристроїв призводить до необхідності створення імітаційної моделі, що дозволяє виявити особливості апаратної реалізації алгоритмів адаптивної фільтрації та уникнути помилок при безпосередній апаратній реалізації.

У даній роботі розглядається АФ на основі рекурсивного методу найменших квадратів, який, як відомо, вимагає великих обчислювальних ресурсів, як результат має невисоку швидко

дію при реалізації програмним шляхом, проте даний недолік можливо усунути застосувавши ПЛІС для апаратної реалізації.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Апаратна реалізація пристроїв ЦОС є тривалою за часом прикладною задачею, тобто якщо помилку в програмному забезпеченні можливо усунути досить легко, то апаратна помилка здебільшого вимагає повторного виготовлення цифрового пристрою [4]. Зменшенню кількості апаратних помилок на етапі створення математичної моделі присвячено роботи [5].

В дослідженнях [6] представлені результати моделювання цифрових фільтрів (ЦФ), велика увага приділяється адаптивним ЦФ із скінченною імпульсною характеристикою (СІХ). У роботі [7] розглядаються питання моделювання структур адаптивних цифрових фільтрів для апаратної реалізації. Проблемам реалізації ЦФ на ПЛІС розглядаються в роботі [7].

Таким чином, моделювання та отримання результатів дослідження прототипів АФ з метою верифікації проєктованих цифрових пристроїв на жорсткій логіці є актуальною науково-практичною задачею.

#### Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є створення та дослідження імітаційної моделі АФ для шумопридушення в звуковому діапазоні хвиль. В роботі досліджується апаратно-орієнтована модель АФ на основі рекурсивного методу найменших квадратів (РМНК) в програмному середовищі Simulink, яка в подальшому буде використана в якості прототипу АФ, який буде апаратно реалізований на основі ПЛІС.

#### Виклад основного матеріалу

*Адаптивний фільтр (АФ) на основі РМНК.* АФ РМНК ґрунтується на добре відомій схемі найменших квадратів (рис. 1).

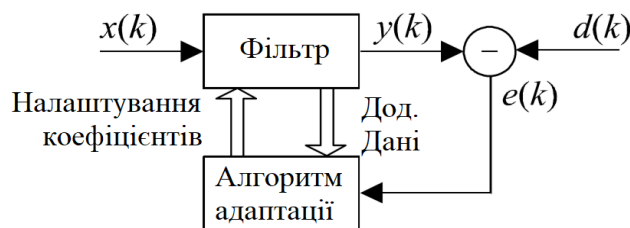


Рис. 1. Ілюстрація основної ідеї методу найменших квадратів

Як і у нерекурсивному фільтрі [6] реакцією АФ на набір вхідних сигналів  $x_k(i), i=1,2,\dots,n$  є вихідний сигнал  $y_k$ , який вимірюється в дискретні моменти часу  $k$ . На відміну від нерекурсивного фільтру відліки дискретної імпульсної характеристики (ДІХ) якої є сталими, в АФ ці відліки будуть змінюватися в процесі адаптації з метою зменшення впливу завад або інших ефектів, які не можна врахувати. Вхідні та вихідні сигнали у АФ пов'язані наступною регресійною моделлю (1).

$$y_k = \sum_{i=0}^{n-1} \omega(i)x_k(i) + e_k, \quad (1)$$

де  $e_k$  — помилки виміру,  $\omega(i)$  представляє частку  $i$ -го входу в первинному сигналі  $y_k$ , а також є своєрідним представленням ДІХ фільтру.

Завдання найменших квадратів формулюється як отримання за даними  $x_k(i)$  та  $y_k$  оцінок величин  $\omega(0)$  по  $\omega(n-1)$ . Оптимальні оцінки (за схемою найменших квадратів) вагових коефіцієнтів фільтра  $\omega(i)$  визначаються виразом (2).

$$W_m = [X_m^T X_m]^{-1} X_m^T Y_m \quad (2)$$

де  $Y_m$ ,  $W_m$ ,  $X_m$  записуються як

$$Y_m = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{m-1} \end{bmatrix} \quad X_m = \begin{bmatrix} X^T(0) \\ X^T(1) \\ X^T(2) \\ \dots \\ X^T(m-1) \end{bmatrix} \quad W_m = \begin{bmatrix} w(0) \\ w(1) \\ w(2) \\ \dots \\ w(n-1) \end{bmatrix}$$

$$x^T(k) = [x_k(0) \quad x_k(1) \quad \dots \quad x_k(n-1)], \quad k = 1, 2, \dots, m.$$

Індекс  $m$  вказує, що кожна з наведених вище матриць обчислюється для всіх інформаційних точок  $m$ , а через  $T$  позначений транспонований вектор. Рівняння (2) визначає оптимальну оцінку  $W_m$  за схемою найменших квадратів, яку можна отримати за допомогою будь-якого зручного методу обернення матриць. Нарешті, вихід фільтра записується як (3).

$$\hat{n}_k = \sum_{i=0}^{n-1} \hat{\omega}(i) x_{k-i}, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Обчислення  $W_m$  по формулі (2) вимагає трудомісткого обчислення зворотної матриці. Очевидно, що описаний метод найменших квадратів не підходить для фільтрації в реальному часі. На практиці при отриманні неперервних даних, коли потрібно покращити оцінку  $W_m$  за допомогою нових даних, переважні рекурсивні методи.

Особливістю алгоритму РМНК є не зменшення середньо-квадратичної похибки, як в МНК, а на мінімізацію норми похибки [10]:

$$J(w) = \sum_{k=0}^{K-1} |e(k)|^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $k$  — вектор-стовбець коефіцієнтів підсилення.

При рекурсивному методі найменших квадратів оцінки  $W_m$  можна оновлювати для кожного нового отриманого набору даних без прямого повторного трудомісткого отримання зворотної матриці. Відповідний РМНК виходить, якщо враховувати дані з експоненційно затухаючими ваговими коефіцієнтами, щоб поступово усунути вплив старих даних на  $W_m$  і дозволити відстежувати характеристики сигналу, що повільно змінюються. Отже, отримуємо (5).

$$W_k = W_{k-1} + G_k e_k, \quad (5)$$

$$P_k = \frac{1}{\gamma} [P_{k-1} - G_k x^T(k) P_{k-1}], \quad (6)$$

де

$$G_k = \frac{P_{k-1} x(k)}{\alpha_k},$$

$$e_k = d_k - x^T(k) W_{k-1}, \quad \alpha_k = \gamma + x^T(k) P_{k-1} x(k).$$

Насправді, введення  $P_k$  дозволяє рекурсивно обчислювати зворотну матрицю  $[X_k^T X_k]^{-1}$ .

Аргумент  $k$  використовується, щоб наголосити на тому, що величини обчислюються в кожен момент отримання вибірки;  $\gamma$  називається коефіцієнтом забування. Якщо  $\gamma = 1$ , тоді наведена схема зведеться до методу найменших квадратів. Значення  $\gamma$  вибирається між 0,98 та 1. При менших значеннях найбільш свіжим даним присвоюються надто великі вагові коефіцієнти, що призводить до сильної флуктуації оцінок. Число попередніх вибірок, що вносять значний внесок у  $W$  в кожний момент вибірки, називається асимптотичною довжиною вибірки :

$$\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k = \frac{1}{1-\gamma}. \quad (7)$$

Цей вираз ефективно визначає пам'ять фільтра, реалізованого з використанням рекурсивної схеми найменших квадратів. При  $\gamma = 1$  фільтр має нескінченну пам'ять.

Основною перевагою РМНК є «швидка» збіжність у порівнянні з методом найменших квадратів (МНК). Проте досягається це за рахунок значно більш високої обчислювальної скла-

дності. При оптимальній організації обчислень для оновлення коефіцієнтів фільтру на кожному такті необхідно  $(2,5N^2+4N)$  пар операцій «множення–додавання» [9].

Імітаційна модель адаптивного фільтру (РМНК) в Simulink. Як було вище зазначено, метою цієї роботи є побудова імітаційної моделі на основі цифрових блоків, яка дозволить створити АФ, що апаратно-орієнтований на ПЛІС (FPGA). В ході верифікації запропонованої імітаційної моделі АФ буде промодельована система шумопридушення. Результати роботи розробленого будуть порівнюватися з вбудованим блоком RLS Filter (РМНК-фільтр) в Simulink [11], що дозволить підтвердити роботоспроможність запропонованої структури розроблюваного фільтру.

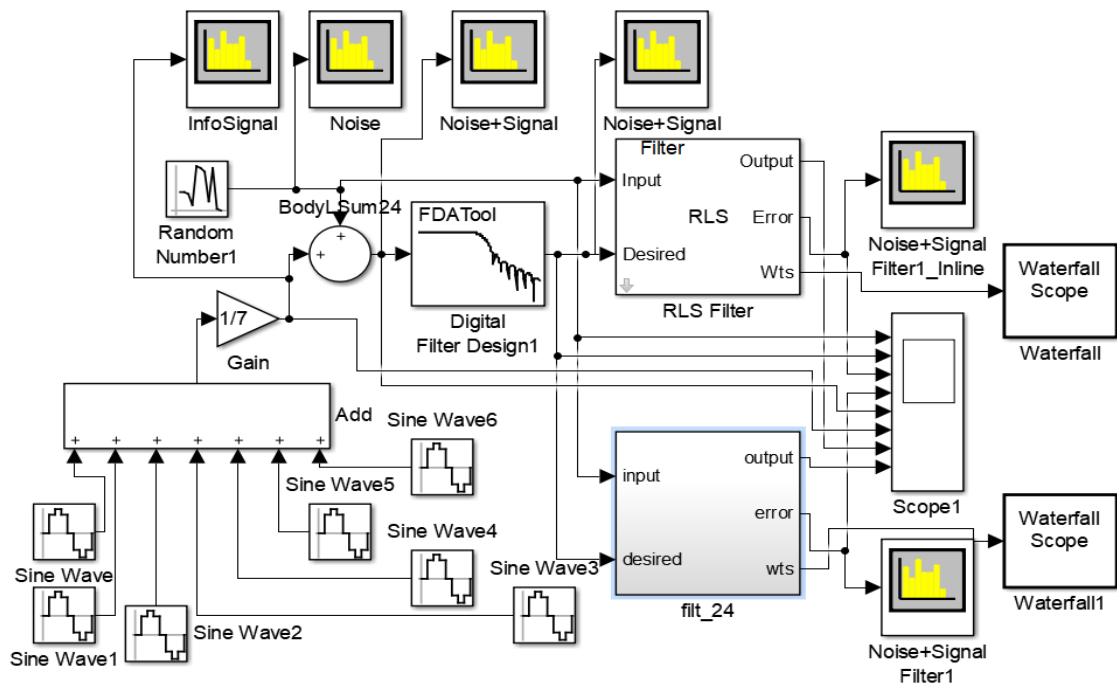


Рис. 2. Загальна схема тестування системи шумопридушення на основі РМНК

Для очищення спотвореного шумом сигналу використовуються два блоки (рис. 2): RLS Filter — вбудований блок адаптивного фільтру та його запропонований аналог filt24.

Згідно формул [2—8] була створена імітаційна модель РМНК-фільтру (блок filt24 на рис. 2) на вхід (input), якого подається псевдовипадковий сигнал з формувачу Random Number, що імітує заваду, спектр якої співпадає з інформаційним сигналом.

В процесі моделювання аналіз сигналів у часовій області виконувався за допомогою блоку Scope1 (рис.2), який дозволяє переглядати наступні сигнали: Input(Noise), Desired(Info+Noise), Error(inline block), Error, Desired(Not Filter), info signal, output (inline block), output. Для перегляду сигналів у частотній області використовуються відповідні аналізатори спектру (InfoSignal, Noise, Noise+Signal, Noise+Signal Filter, Noise+Signal Filter1\_Inline, Noise+Signal Filter1), а для аналізу зміни відліків ДІХ використовуються блоки Waterfall1 (для створеного блоку фільтру) та Waterfall (для вбудованого блоку фільтру).

Інформаційний сигнал являє собою суміш сімох гармонійних сигналів (Sine Wave, ..., Sine Wave 6), які складаються із сигналом шуму в блоці BodyLSum24 та через цифровий фільтр Digital Filter Design1, що імітує канал зв'язку, подається на вхід бажаного сигналу.

Запропонований блок АФ (рис. 3) складається з формувача сигналу адаптації коефіцієнтів (adapt), формувача сигналу похибки (d\_y) та блоку фільтру 24-порядку (adapt4x6).

Ядром АФ на основі РМНК є блок адаптації коефіцієнтів ДІХ (рис. 4), який було побудовано згідно виразів (5, 7). Складність створеної моделі полягає в реалізації операції матричного обчислення цифровими апаратними засобами, що вимагає ретельної інтерпретації математичних виразів, які не мають прямої форми реалізації на рівні жорсткої логіки, а саме, транспонування векторів, добуток матриць та інше.

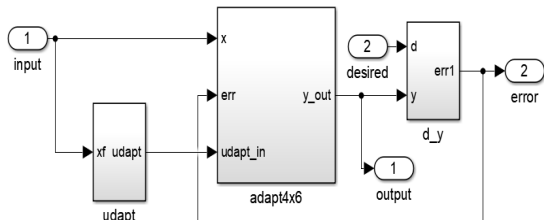


Рис. 3. Модель розробленого РМНК-фільтру 24-го порядку

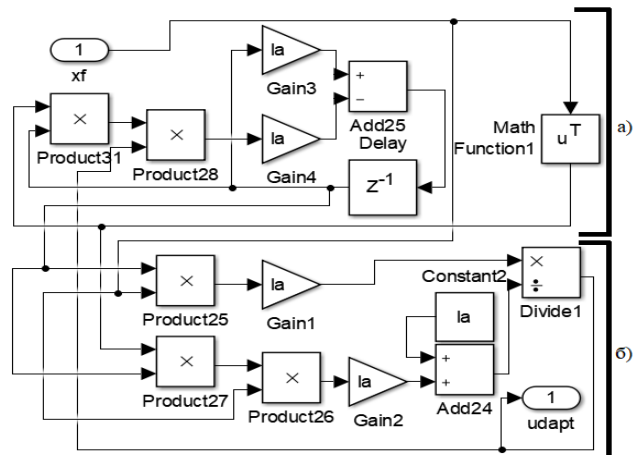


Рис. 4. Блок adapt: а) — обчислення (7); б) — обчислення (5)

Досліджуваний алгоритм адаптивної фільтрації представляє собою рекурсивну систему, тобто систему зі зворотнім зв'язком, яка, як відомо, за певних обставин може призвести до самозбудження системи. Враховуючи дану особливість РМНК, визначимо порядок виконання аналітичних виразів, який дозволить отримати стійку роботу АФ.

На початковому кроці виконується ініціалізація коефіцієнтів ДІХ фільтру  $W_i(k=0) = 0$  та зворотної кореляційної матриці  $P(k=0) = \delta^{-1}IM$  ( $k$  — номер ітерації,  $\delta$  — початкова ініціалізація кореляційної матриці,  $IM$  — одинична матриця), що виконується в моделі за рахунок ініціалізації регістрів. На наступному етапі обчислюється вектор підсилення  $G(k+1) = P(k)x(k+1) / (\gamma + x^T(k+1)P(k)x(k+1))$ , що реалізується в моделі блоками на рис. 4, б, тобто складається з помножувачів чисел (Product25, Product27, Product26), помножувачів на константу (маштабуючих підсилювачів) (Gain 1, Gain 2), блоку константи (Constant 2), суматора (Add24) та блоку ділення (Divide1). Визначення сигналу помилки  $e(k+1) = d(k+1) - w^T(k)x(k+1)$  виконується блоком d\_y (рис. 3), що дозволяє провести оновлення коефіцієнтів ДІХ:  $w(k+1) = w(k) + G(k+1)e(k+1)$ . І на останньому етапі (рис. 4, а) обчислюється зворотня кореляційна матрицю  $P(k+1) = \lambda^{-1}P(k) - \lambda^{-1}G(k+1)x^T(k+1)P(k)$ ,  $1P(k)$  — одинична зворотна кореляційна матриця,  $1G(k+1)$  — одинична матриця підсилення,  $x^T(k+1)$  — транспонований вектор відліків вхідного сигналу.

Блок adapt4x6 реалізує КІХ фільтр 24-го порядку з блоком оновлення коефіцієнтів (8) та операцією транспонування, що впливає з формул (5, 7). Даний блок складається з: входів ( $x$ ,  $err$ ) та виходу ( $y\_out$ ); двох блоків невикористовуваних виводів (Terminator, Terminator1); шести блоків КІХ фільтрів 4-го порядку (adapt0, adapt1, ..., adapt5) з каскадним включенням для спрощення масштабування адаптивного фільтру. За допомогою блоків Vector Concatenate формується вектор коефіцієнтів  $wts$ , аналог виходу вбудованого блоку  $Wts$ .

Структура блоків АФ 4-го порядку (рис. 5) представлена на рис. 6 і складається з наступних елементарних цифрових блоків: входів ( $x$ ,  $add\_in$ ,  $update\_in$ ) та виходів ( $x\_out$ ,  $add\_out$ ,  $update\_out$ ); фільтру 4-го порядку з КІХ (рис. 6, а), блоків оновлення коефіцієнтів КІХ фільтру (рис. 6, б), лінії затримки (рис. 6, в).

*Результаті імітаційного моделювання АФ за РМНК.* Як було зазначено вище, процес адаптації за РМНК прагне мінімізувати дисперсію сигналу помилки. Джерело сигналу помилки в запропонованій моделі реалізується блоком білого гаусового шуму (WGN) з нульовим середнім значенням і одиничною дисперсією. Такий вигляд сигналу помилки є широкосмуговим, що дозволяє визначити характеристики невідомої системи у всьому діапазоні частот від нуля до половини частоти дискретизації.

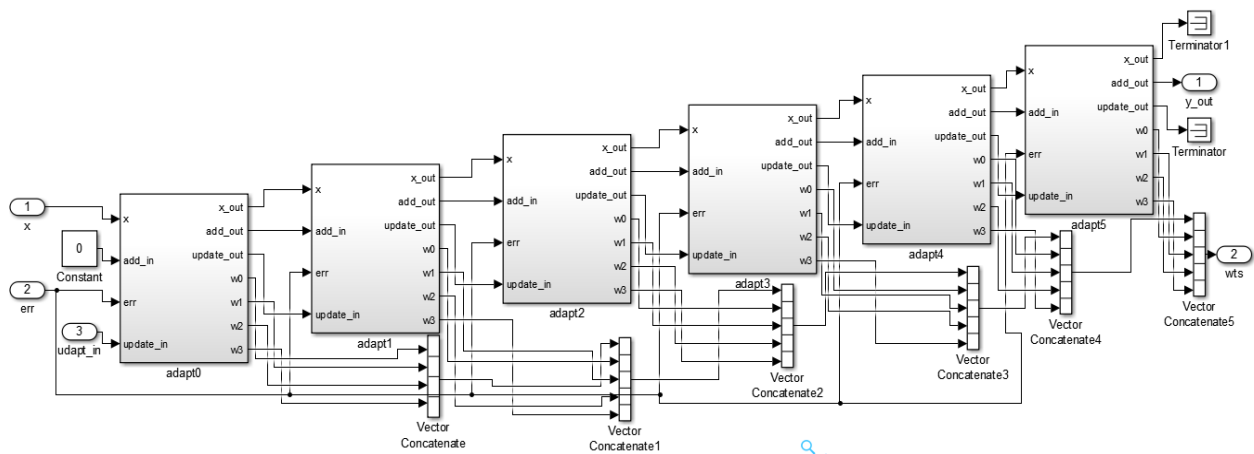


Рис. 5. Блок adapt4x6

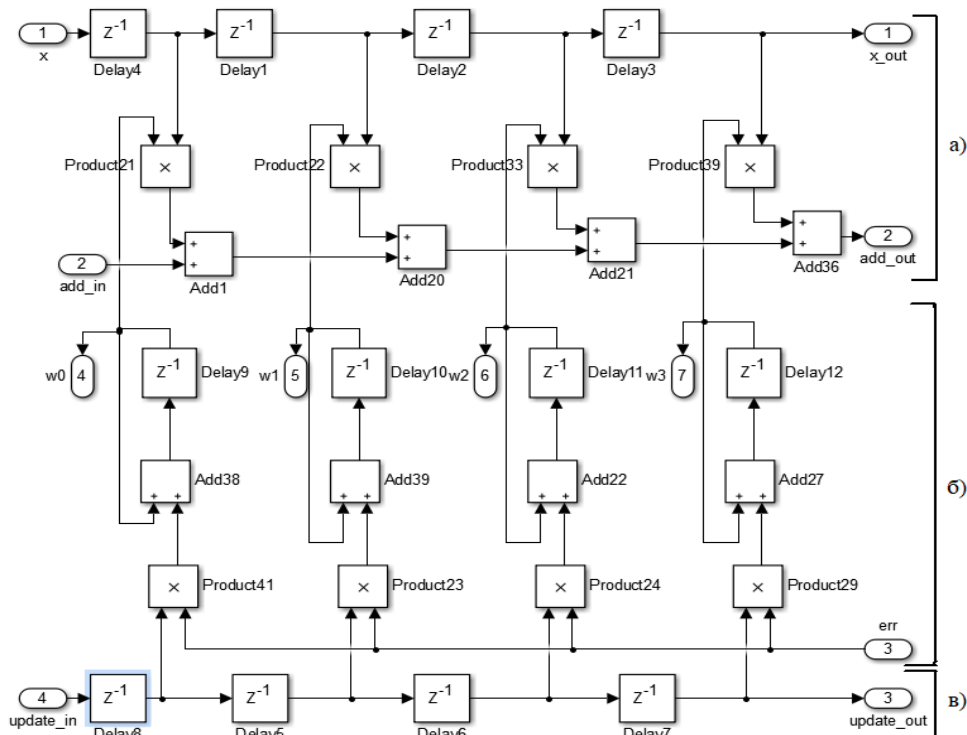


Рис. 6. Характеристики блоку фільтру 4-го порядку

Для тестування роботи фільтру було синтезовано багатотональний інформаційний сигнал з частотою дискретизації 48 кГц (рис. 7). Вхідний сигнал є спотворений шумом зазначеної специфікації (рис. 8), а вихідним сигналом є помилка, яке, в свою чергу, і є відфільтрованим інформаційним сигналом. Розроблений АФ дозволив в процесі моделювання отримати чіткий інформаційний сигнал із суміші корисного сигналу та шуму. Моделювання відновлення сигналу здійснюється з наступними параметрами:  $N=24$ ,  $\lambda=1$ ,  $\delta^{-1}=1$  для запропонованого АФ.

З метою кількісної оцінки роботи блоків АФ було виміряні нелінійні спотворення на виході фільтрів. Рівень спотворень вимірювався вбудованим блоком THD в режимі однотонального сигналу, а саме на частоті 1кГц. Зрівняння числових результатів вимірів показав, що для вбудованого блоку АФ RLS рівень THD дорівнює 7,103 %, що в більше ніж в півтора рази більше ніж у запропонованого блоку АФ -4,323 %, таким чином, була підтверджена ефективність розробленого блоку АФ.

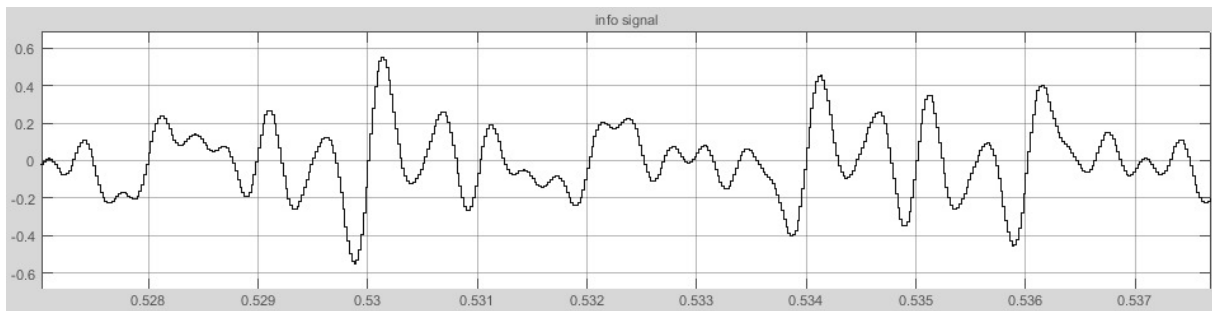


Рисунок 7 – Вхідний інформаційний сигнал

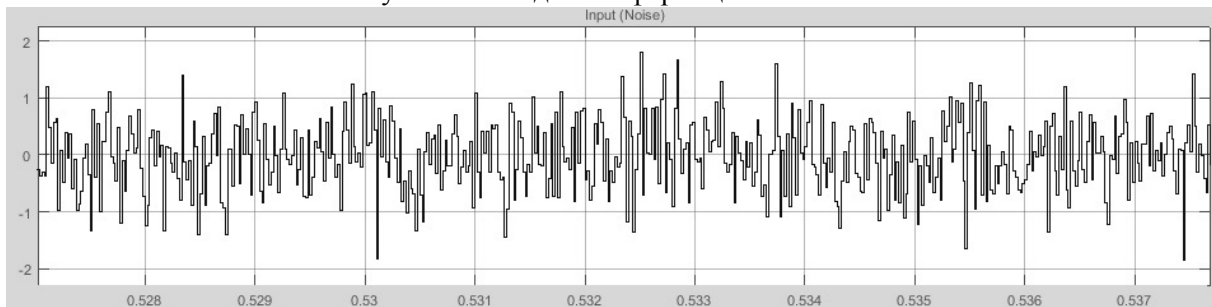


Рисунок 8 – Вхідний шумовий сигнал

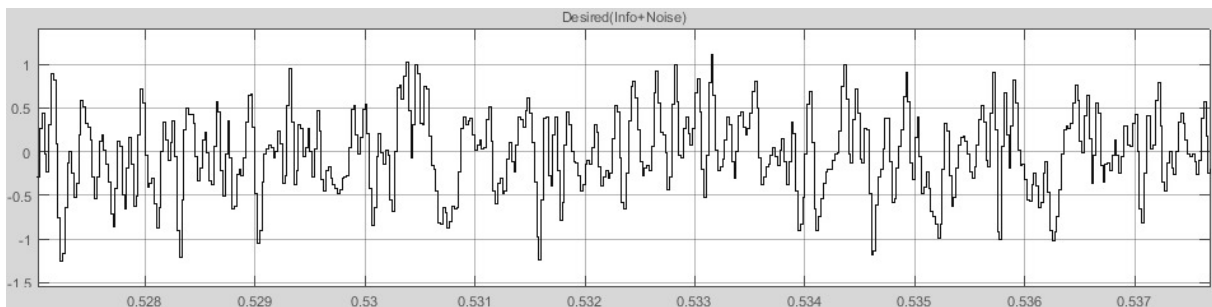


Рисунок 9 – Суміш корисного сигналу та шуму

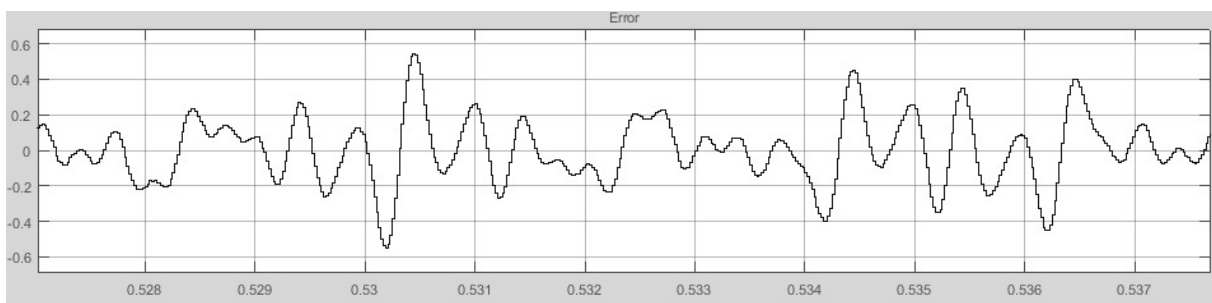


Рисунок 10 – Вихідний відфільтрований сигнал запропонованого блоку АФ

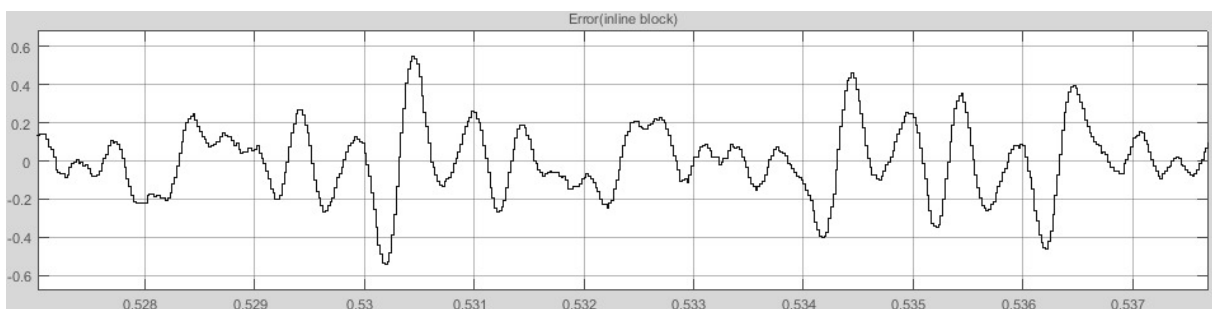


Рисунок 11 – Вихідний відфільтрований сигнал вбудованого АФ



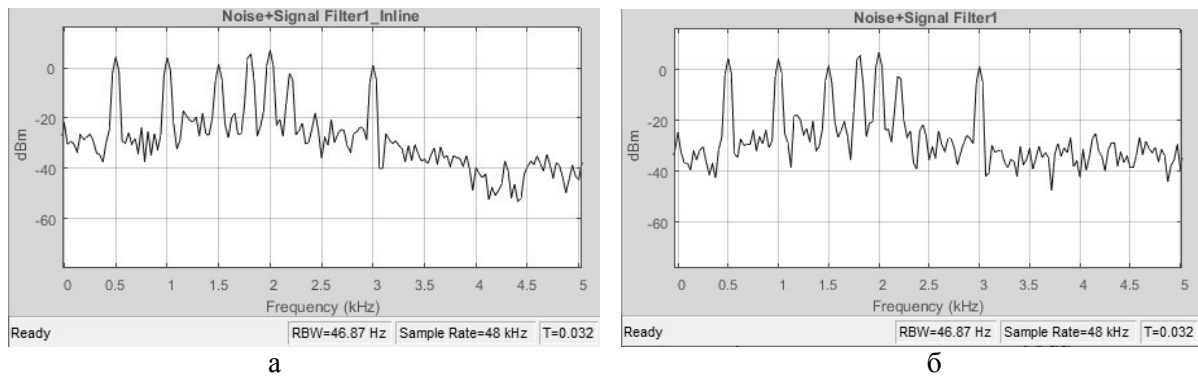


Рис. 12. Амплітудні спектр сигналу похибки: а— вбудований блок, б— запропонований блок

Для відображення поведінки коефіцієнтів ДІХ в процесі адаптації використовується стандартний аналізатор часових процесів Waterfall (вікно водоспаду), що формується на основі векторів з коефіцієнтами ДІХ АФ. Інформація відображається у тривимірному вигляді у вікні водоспаду, вісь  $x$  представляє амплітуду, вісь  $y$  - номер відліку ДІХ, а вісь  $z$  представляє час. Відповідно до рис. 15 та рис. 16, ДІХ створеного блоку АФ на основі елементарних блоків з графічною точністю повторює ДІХ вбудованого адаптивного фільтру. В результаті можливо стверджувати, що запропонований адаптивний фільтр працює аналогічно вбудованому блоку Simulink.

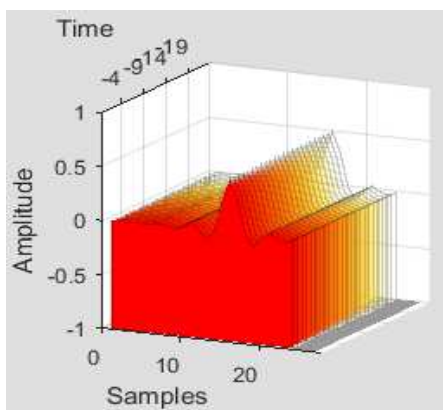


Рис. 15. Коефіцієнти вбудованого блоку

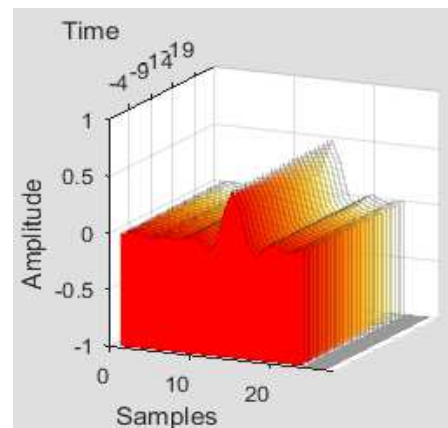


Рис. 16. Коефіцієнти запропонованого блоку

В ході моделювання спостерігається особливість, яка полягає в тому, що як вбудований так і запропонований блок РМНК-фільтру виконує ефективну адаптивну фільтрацію починаючи з 20-го порядку. З метою спрощення складання структури АФ з КІХ було виконано розбиття на ланки четвертого порядку (рис. 6). Результати моделювання (в частотній та часовій області) показали, що якісний процес фільтрації починаючи з 24 порядку зі збільшенням порядку АФ не дає покращення роботи фільтру, що дозволяє стверджувати, що було отримано відносно нескладну, але ефективну структуру фільтру для реалізації на апаратному рівні.

### Висновки

В роботі запропоновано та досліджено імітаційну модель АФ на основі алгоритму РМНК, яка може бути застосована для реалізації даного фільтру на апаратному рівні.

В ході дослідження визначено необхідний порядок АФ, який необхідний для якісної фільтрації полігармонічного сигналу в звуковому діапазоні від псевдовипадкового сигналу (гаусового шуму), що дозволяє визначитися з необхідними апаратними ресурсами та їх кількістю при подальшій реалізації на ПЛІС.



Результати дослідження як в часовій (рис.10 і рис.11) так і в частотній області (рис.12 і рис.13) довели коректність ефективність створеної апаратно-орієнтованої математичної моделі. Кількісний аналіз розглянутих моделей показав ефективність запропонованої моделі, що підтверджується кращим рівнем нелінійних спотворень розробленої моделі, який дорівнює 4,323 %, що в півтора рази менше ніж у вбудованого блоку 7,103 %.

Таким чином, отримана структура запропонованого АФ може бути використана для подальшої апаратної реалізації на ПЛІС.

### Список використаної літератури

1. Джиган В. Адаптивные фильтры современные средства моделирования и примеры реализации / В.Джиган // *ЭЛЕКТРОНИКА*: НТБ. 2012. №7. С.106–125. – Режим доступу: [www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)
2. Design of Adaptive Filter for Biosignal Noise Cancellation Using Brent Kung Adder / [S.Gomathi, S.Sasikala, K.Meenakshi та ін.] // *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. July 2020. №8(7). С.3111–3115. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/38872020>
3. Rahul A. Acoustic Noise Cancellation by NLMS and RLS Algorithms of Adaptive Filter / A.Rahul, V.Ramesh // *International Journal of Science and Research (IJSR)*. May 2015. №4(5). С.198–202. – Режим доступу: [https://www.ijsr.net/get\\_abstract.php?paper\\_id=SUB153929](https://www.ijsr.net/get_abstract.php?paper_id=SUB153929)
4. Luis M. Simulation of an RLS Adaptive Equalizer using Simulink [Електронний ресурс] /M.Luis, C.Henrique. – Режим доступу: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.915&rep=rep1&type=pdf>. Дата звернення: 01 Жовтня 2020 р.
5. Optimization of Rls Adaptive Filter Architecture Using Gate Level Modification for Clamor Cancellation / P.KaviyaPriya, V.Kaviyasree, S.Mahalakshmi, M.Mohanapriya // *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. February 2019. №8(3S). С.339–343. – Режим доступу: <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v8i3S/C10690283S19.pdf>
6. Kavitha V. Efficient Implementation of Adaptive Filter Architecture Using Gate Level Modification for ECG Denoising / V.Kavitha, P.Kaviya, T.Sugapriya // *Proceedings of 2018 the 8th International Workshop on Computer Science and Engineering (WCSE 2018)*. 2018. №8. С.171–177. – Режим доступу: [http://www.wcse.org/WCSE\\_2018/W031.pdf](http://www.wcse.org/WCSE_2018/W031.pdf)
7. Deepak P. Real time active noise cancellation using adaptive filters following RLS and LMS algorithm / P.Deepak, .Ankit, R.P.Sunder // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016. №3(2). С.1657–1661. – Режим доступу: <https://www.irjet.net/archives/V3/i2/IRJET-V3I2295.pdf>
8. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход / Э.Айфичер, Б.Джервис. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
9. Сергиенко А. Цифровая обработка сигналов /А.Сергиенко. СПб.: БХВ-Петербург, 2011.768 с.
10. Haykin S. Adaptive filter theory / S.Haykin. Boston: Pearson, 2014. 907 с.
11. RLS Filter [Електронний ресурс] // <https://www.mathworks.com>. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/dsp/ref/rlsfilter.html>. Дата звернення: 1 Жовтня 2020 р.

### **SIMULATION OF AN ADAPTIVE FILTER BASED ON THE RECURSIVE LEAST SQUARES METHOD**

**Sotnik O., Marchenko S., Hulesha O., Syanov O.**

#### **Abstract**

Modern electronics systems are high-speed, compact and require the use of energy-efficient digital electronics devices (DED's) such as microcontrollers, programmable logic integrated circuits (FPGA's), digital signal processors.

Application of the DED's is a hardware implementation of high - performance digital signal processing (DSP) algorithms based on the target architecture of the electronic device. In order to accelerate of the design process in the direct hardware implementation of DSP algorithms, simulation models are created to enable optimizing the design process at the stage of a creation of the programming part for FPGA.

The paper presents the results of a study of the adaptive filter (AF) model based on the recursive least squares method (RLS). According to the analysis of time and frequency parameters of the AF model has been conducted during simulation it was found that the qualitative filtering process starting from the 24th order and further increasing the AF order does not significantly improve signal filtering, but only increases the required hardware resources. In process of the verification of the proposed simulation model, the AF-based noise reduction system has been modeled and the THD level of 7.103 % was obtained for the built-in AF unit, which is more than one and a half times higher than the proposed AF unit 4.323 %, which confirmed the efficiency of the developed AF unit.

Thus, during the study, the optimal order of AF has been determined, which will allow more efficient use of FPGA resources during the hardware implementation of AF. In accordance with the results of the study, the correctness and efficiency of the created hardware-oriented simulation model has been proved, as well as the hardware-oriented structure of the adaptive RLS filter for future implementation on FPGA has been shown.

### References

- [1] Dzhigan, V. (2012). Adaptivnye filtry sovremennye sredstva modelirovaniya i primery realizatsii. ELEKTRONIKA: NTB, 7, 106–125. Retrieved from [www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)
- [2] Gomathi, S., Meenakshi, K., & Meenakshi, K. (July 2020). Design of Adaptive Filter for Biosignal Noise Cancellation Using Brent Kung Adder. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(7), 3111–3115. Retrieved from <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/38872020>
- [3] Rahul, A., & Ramesh, V. (May 2015). Acoustic Noise Cancellation by NLMS and RLS Algorithms of Adaptive Filter. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(5), 198-202. Retrieved from [https://www.ijsr.net/get\\_abstract.php?paper\\_id=SUB153929](https://www.ijsr.net/get_abstract.php?paper_id=SUB153929)
- [4] Luis, M. Simulation of an RLS Adaptive Equalizer using Simulink. Web. October 01, 2020 Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.915&rep=rep1&type=pdf>
- [5] KaviyaPriya, P., Kaviyasree, V., Mahalakshmi, S., & Mohanapriya, M. (2019). Optimization of Rls Adaptive Filter Architecture Using Gate Level Modification for Clamor Cancellation. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 8(3S), 339–343. Retrieved from <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v8i3S/C10690283S19.pdf>
- [6] Kavitha, V., Kaviya, P., & Sugapriyaa, T. (2019). Efficient Implementation of Adaptive Filter Architecture Using Gate Level Modification for ECG Denoising. *Proceedings of 2018 the 8th International Workshop on Computer Science and Engineering (WCSE 2018)*, 8, 171–177. Retrieved from [http://www.wcse.org/WCSE\\_2018/W031.pdf](http://www.wcse.org/WCSE_2018/W031.pdf)
- [7] Deepak, P., Ankit, ., & Sunder, . (2016). Real time active noise cancellation using adaptive filters following RLS and LMS algorithm. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(2), 1657–1661. Retrieved from <https://www.irjet.net/archives/V3/i2/IRJET-V3I2295.pdf>
- [8] Aificher, E., & Dzhervis, B. (2004). *Tsifrovaya obrabotka signalov. Prakticheskii podkhod*. Moskva: Vilyams.
- [9] Sergienko, A. (2011). *Tsifrovaya obrabotka signalov*. Sankt-Peterburg: BKhV-Peterburg
- [10] Haykin, S. (2014). *Adaptive filter theory*. Boston: Pearson
- [11] RLS Filter. <https://www.mathworks.com>. Web. October 1, 2020 Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/dsp/ref/rlsfilter.html>