

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-34>

УДК 004.021

Каменєва Юлія Володимирівна<sup>1</sup>, бакалавр

Федосов Сергій Анатолійович<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., професор

<https://orcid.org/0000-0003-3457-8911>

Новосад Олексій Володимирович<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-9433-7776>

<sup>1</sup>Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна

<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

## ПРОЕКТУВАННЯ ФІЛЬТРІВ У ЦИФРОВІЙ ОБРОБЦІ СИГНАЛІВ

**Каменєва Ю. В., Федосов С. А., Новосад О. В. Проектування фільтрів у цифровій обробці сигналів.**

Представлено комплексний огляд та аналіз сучасних підходів, методів і тенденцій у проектуванні цифрових фільтрів типу FIR і IIR у контексті цифрової обробки сигналів. Значну увагу зосереджено на аналізі методів оптимізації структури фільтрів, особливо з використанням алгоритмів, таких як диференціальна еволюція, яка продемонструвала переваги над традиційними генетичними алгоритмами при налаштуванні параметрів IIR-фільтрів. Для FIR-фільтрів розглянуто класичні методи, зокрема віконне зважування, метод найменших квадратів, алгоритм Паркса-Макклеллана та метод частотної вибірки. Також вивчено реалізацію фільтрів у середовищі Xilinx ISE з використанням мов опису апаратури (VHDL), з особливою увагою до архітектурних рішень, таких як дерево Уоллеса, множники Ведіка та Бута. Розробки оцінювались за такими критеріями, як затримка, частота роботи, площа логіки та енергоспоживання. Стратегічний вибір методологій реалізації та специфікацій проектування є вирішальним для досягнення ефективної схемної реалізації. Досліджено різні стратегії проектування цифрових FIR-фільтрів з використанням дерева Уоллеса і множення Ведіка, що призводить до зменшення затримки та підвищення робочої частоти, але збільшення площі. Навпаки, проектування Бута забезпечує помірну затримку, зменшену кількість часткових добутоків і, як наслідок, високошвидкісні цифрові фільтри зі скінченною імпульсною характеристикою. Виявлено ключові характеристики, переваги, недоліки та сфери застосування різних методів проектування, а також досліджено роль оптимізаційних алгоритмів, апаратних реалізацій і специфічних вимог окремих застосувань (таких як обробка аудіо, зображень, комунікаційні системи та енергетичні системи) у виборі та розробці цифрових фільтрів.

**Ключові слова:** проектування, обробка сигналів, цифровий фільтр, імпульсна характеристика, алгоритми оптимізації.

**Kameneva Yu., Fedosov S., Novosad O. Filter design in digital signal processing.** The paper a comprehensive review and analysis of modern approaches, methods, and trends in the design of digital FIR and IIR filters in the context of digital signal processing is presented. Significant attention is focused on the analysis of methods for optimizing the filter structure, especially using algorithms such as differential evolution, which has demonstrated advantages over traditional genetic algorithms in tuning IIR filter parameters. For FIR filters, classical methods are considered, including window weighting, the least squares method, the Parks-McClellan algorithm, and the frequency sampling method. The implementation of filters in the Xilinx ISE environment using hardware description languages (VHDL) is also studied, with special attention to architectural solutions such as Wallace tree, Vedic and Booth multipliers. The designs were evaluated according to criteria such as delay, operating frequency, logic area, and power consumption. Strategic selection of implementation methodologies and design specifications is crucial to achieving efficient circuit implementation. Different design strategies for digital FIR filters using Wallace tree and Vedic multiplication have been investigated, which result in reduced delay and increased operating frequency, but increased area. In contrast, Booth design provides moderate delay, reduced number of partial products and, as a result, high-speed digital filters with finite impulse response. The key characteristics, advantages, disadvantages, and areas of application of various design methods are identified, and the role of optimization algorithms, hardware implementations, and specific requirements of individual applications (such as audio and image processing, communication systems, and power systems) in the selection and design of digital filters is explored.

**Keywords:** design, signal processing, digital filter, impulse response, optimization algorithms.

**Постановка наукової проблеми.** Класифікація фільтрів базується на різних критеріях і включає різні типи: цифрові фільтри зі скінченною імпульсною характеристикою (англ. *Finite Impulse Response filter* – FIR-фільтри) і з нескінченною імпульсною характеристикою (англ. *Infinite Impulse Response filter* – IIR-фільтри). Сигнали, особливо ті, що утворюються від різних промислових датчиків, значною мірою залежать від збереження лінійної фазової характеристики. При визначенні найбільш оптимального типу цифрового фільтра для конкретного сигналу, аналіз повинен керуватися цією важливою характеристикою. Тому, коли лінійні фазові характеристики є важливими, FIR-фільтри є кращими завдяки їх вищому порядку та більшій складності. Якщо ж важлива лише частотна характеристика, більш практичним вибором є IIR-цифрові фільтри, оскільки вони мають нижчі порядки, а це призводить до меншої складності та легшої реалізації.

**Аналіз досліджень.** У роботі [1] зосереджено основну увагу на аналізі методів оптимізації структури фільтрів, особливо з використанням алгоритмів диференціальна еволюція, яка продемонструвала переваги над традиційними генетичними алгоритмами при налаштуванні

параметрів ІІР-фільтрів. Огляд підтвердив, що ефективність проектування цифрових фільтрів значною мірою залежить від вибору методології, оптимізаційних стратегій та архітектурних рішень. FIR-фільтри з лінійною фазовою характеристикою, зокрема у поєднанні з ведичним множителем або деревом Уоллеса, демонструють вищу продуктивність порівняно з традиційними методами, особливо в додатках із високими вимогами до фазової лінійності.

Комплексний огляд та аналіз сучасних підходів, методів і тенденцій у проектуванні цифрових фільтрів у контексті цифрової обробки сигналів представлено в [2], де досліджено роль алгоритмів оптимізації, апаратних реалізацій на FPGA та ASIC, а також специфічних вимог окремих застосувань у виборі та розробці цифрових фільтрів.

**Мета.** Метою роботи є здійснення комплексного огляду і критичного аналізу сучасних підходів і методів у проектуванні цифрових фільтрів зі скінченною та нескінченною імпульсними характеристиками, у контексті цифрової обробки сигналів. Виявити ключові характеристики, переваги, недоліки та сфери застосування різних методів проектування, а також дослідити роль оптимізаційних алгоритмів, апаратних реалізацій і специфічних вимог окремих застосувань (таких як обробка аудіо, зображень, комунікаційні системи та енергетичні системи) у виборі та розробці цифрових фільтрів.

**Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.**

Основні і важливі характеристики FIR-фільтрів включають лінійну фазову характеристику, можливість обробки фільтрів вищого порядку (більш складні схеми) і стабільність. Основні ж характеристики ІІР-фільтрів включають фільтри нижчого порядку (що призводить до менш складних схем), нелінійну фазову характеристику та потенційну можливість нестабільності отриманого цифрового фільтра.

FIR-фільтр є класом цифрових фільтрів, що застосовуються в обробці сигналів. «Скінченна імпульсна характеристика» означає, що реакція виходу фільтра на вхід має скінченну тривалість – після подачі вхідного сигналу, вихід FIR-фільтра досягне нуля за скінченну кількість відліків. Загальна формула або рівняння FIR-фільтра виглядає наступним чином:

$$y[n] = \sum_{k=0}^M h[k] \cdot x[n-k], \quad (1)$$

де  $y[n]$  – вихідний сигнал у дискретний момент часу  $n$ ,  $x[n]$  – вхідний сигнал у момент часу  $n$ ,  $h[k]$  – коефіцієнти фільтра,  $M$  – порядок фільтра, що представляє кількість відводів або коефіцієнтів.

Фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою (ІІР) – це цифровий фільтр, що використовується для обробки сигналів. «Нескінченна імпульсна характеристика» відображає те, що реакція виходу фільтра на вхід може нескінченно тягнутися. Загальна рівняння ІІР-фільтра задається як:

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b[k] \cdot x[n-k] - \sum_{k=0}^M a[k] \cdot y[n-k], \quad (2)$$

де  $y[n]$  – вихідний сигнал у дискретний момент часу  $n$ ,  $x[n]$  – вхідний сигнал у момент часу  $n$ ,  $b[k]$  – коефіцієнти прямої зв'язку (чисельник),  $a[k]$  – коефіцієнти зворотного зв'язку (знаменник),  $N$  – порядок чисельника,  $M$  – порядок знаменника.

FIR-фільтри є найбільш бажаними при обробці аудіо, оскільки вони мають лінійні фазові характеристики. ІІР-фільтри можуть бути кращими в комунікаційних системах, де критично важливі ефективність та обробка в реальному часі, а також у системах керування. Залежно від вимог, може підійти будь-який тип фільтра.

Проектування FIR-фільтра вимагає визначення коефіцієнтів фільтра для досягнення бажаної частотної характеристики. Існує багато методів проектування FIR-фільтрів.

**Методи проектування FIR-фільтрів**

| Метод частотної вибірки  | Методи оптимізації  | Метод найменших квадратів   |
|--|---|---|
| визначає необхідну частотну характеристику на певних рівнях частоти; потім використовують обернене перетворення Фур'є необхідної частотної характеристики для визначення коефіцієнтів фільтра. | такі як алгоритм Паркса-Макклеллана (алгоритм обміну Ремеза). Метою цього методу є зменшення похибки між реальною та бажаною частотними характеристиками. | тут мінімізуються похибки в сумі квадратів між реальною та необхідною частотними характеристиками |

Класичні методи проектування ПР-фільтрів включають проектування Баттерворта, Чебишева та еліптичні (Кауера), кожен з яких пропонує різні компроміси щодо характеристик частотної реакції фільтра (рис. 1). Цифрові інструменти проектування та програмне забезпечення часто використовують алгоритми оптимізації для знаходження коефіцієнтів, які відповідають заданим критеріям проектування.

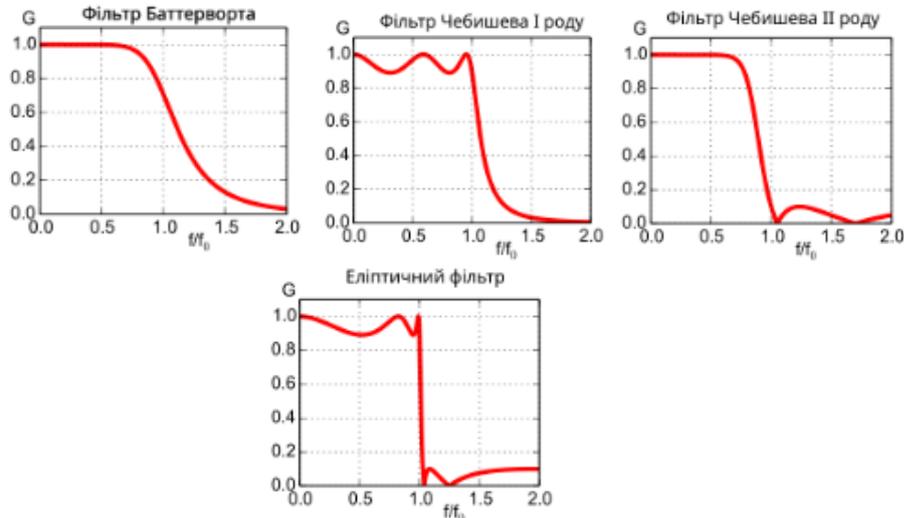


Рис. 1. Залежності коефіцієнта передачі за амплітудою ( $G$ ) фільтра від нормованої частоти ( $f/f_0$ )

Вибір між ПР і FIR фільтрами залежить від конкретних вимог даного застосування. Обидва типи фільтрів мають свої переваги та недоліки, і перевага одного над іншим залежить від таких факторів, як характеристики фільтра, складність реалізації та обмеження застосування. Ось порівняння переваг кожного типу: ефективна реалізація – ПР-фільтри забезпечують ефективні частотні характеристики з меншою кількістю коефіцієнтів порівняно з FIR-фільтрами. Це часто призводить до більш обчислювально ефективної реалізації. Завдяки структурі зі зворотним зв'язком, ПР-фільтри можуть мати більш компактний дизайн, особливо в застосуваннях, де для FIR-фільтра знадобилася б велика кількість відводів (коефіцієнтів). ПР-фільтри чудово підходять для обробки сигналів у застосуваннях реального часу, де затримка є критичною, і можуть бути легше спроектовані для імітації перехідних характеристик аналогових фільтрів.

Проектування цифрових фільтрів є ключовим етапом у цифровій обробці сигналів. Особлива увага в сучасних дослідженнях приділяється FIR-фільтрам, зокрема двовимірним фільтрам (2D FIR), які активно застосовуються в різних галузях. Наприклад, у 2017 році 2D FIR-фільтри використовувалися для обробки геофізичних даних з метою виявлення підземних ядерних випробувань [3], а також у медицині – для покращення зображень, отриманих під час діагностики.

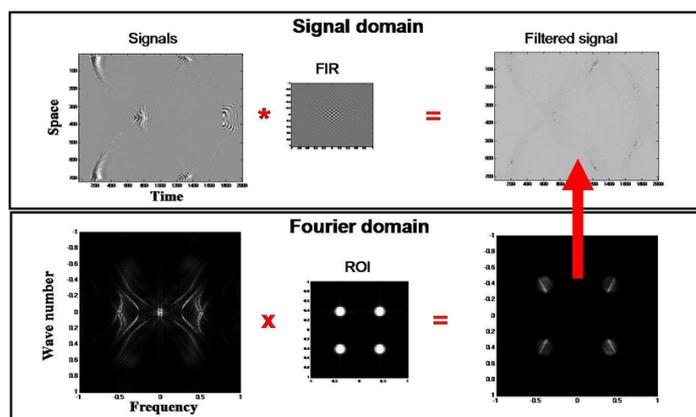


Рис. 2. Сигнальна область і область Фур'є

Досліджуючи зростаючі з часом очікування людей щодо швидкого та точного надання інформації, що охоплює тексти, зображення, аудіо та відео, у [4] використовувалися фільтри, що працюють з 1D, 2D і 3D вхідними даними. Було розроблено передові та інтелектуальні методи для побудови систем цифрової обробки сигналів (англ. *Digital Signal Processing – DSP*). Дослідження показує помітний зсув акценту з 1D-фільтрів на 2D-фільтри, причому 53,4 % публікацій зосереджені на фільтрах з 2D-вхідними даними порівняно з 44,6 % на фільтрах з 1D-вхідними даними.

Комплексний огляд наукових статей виявляє переважну увагу до FIR-фільтрів. Дослідження також вивчає методи проектування, такі як оптимізація роєм частинок, заснована на природному інтелекті рою. Серед 88 досліджених статей 47 стосуються проектування 2D цифрових фільтрів, а 41 пов'язані з дослідженням 1D-фільтрів.

У документі [5] представлено цифровий FIR-фільтр, що складається з суматорів, помножувачів та елементів затримки. Існують різні методології реалізації цифрових FIR-фільтрів з використанням програмованих користувачем вентиляльних матриць (англ. *Field Programmable Gate Array – FPGA*) або спеціалізованих інтегральних схем (англ. *Application Specific Integrated Circuit – ASIC*). У центрі уваги – різноманітні підходи до проектування FIR-фільтра з використанням інструменту Xilinx ISE. У той час як IIR-фільтри через обмеження замкнутої форми обмежуються проектами низьких, смугових і високих частот, FIR-фільтри не мають рівнянь проектування в замкнутій формі, що робить їх проектування більш контрольованим, ніж їхні IIR-аналоги. Крім того, підкреслюється поширене використання підходу проектування мікропрограмних FIR-фільтрів у існуючій літературі.

Порівняння оглядових статей, свідчить про те, що розробка цифрових FIR-фільтрів на основі дерева Уоллеса та множника Ведік демонструє меншу затримку та підвищену робочу частоту [6]. Однак це досягається за рахунок збільшення площі. Алгоритм Бута має помірну затримку, але зменшує кількість часткових добутоків, що забезпечує проектування високошвидкісних цифрових FIR-фільтрів. Підхід на основі розподіленої арифметики (DA) має обмеження щодо затримки [7]. Там же пояснюється проектування фільтрів зі скінченною імпульсною характеристикою на мові опису апаратури VHSIC (VHDL).

У [8] представлено порівняння характеристик IIR- і FIR- фільтрів і роз'яснено відповідні переваги. FIR-фільтри розробляються для досягнення лінійної фази та можуть точно її підтримувати, що є значною перевагою над IIR-фільтрами. IIR-фільтри зазвичай вимагають значно менших обчислень, ніж еквівалентний FIR-фільтр, особливо при роботі з вузькими смугами переходу. FIR-фільтри покладаються на лінійні фазові характеристики, тоді як IIR-фільтри підходять для застосувань, які не потребують лінійності. Висока обчислювальна ефективність та менші затримки, пов'язані з IIR-фільтрами, сприяють їхній популярності як альтернативи. Далі [9] порівнюється ефективність алгоритму диференціальної еволюції (DE) порівняно з генетичним алгоритмом (GA) при використанні для проектування цифрових IIR-фільтрів. Алгоритм DE визначається як новий евристичний підхід, що пропонує такі переваги, як здатність ідентифікувати справжній глобальний мінімум у мультимодальному просторі пошуку, швидка збіжність і використання мінімальної кількості параметрів керування.

У статті [10] класифіковано численні методи проектування IIR-фільтрів на три типи: проектування з використанням аналогового прототипного фільтра, проектування з використанням цифрового частотного перетворення та проектування за допомогою комп'ютерного проектування (CAD). Також розглядаються труднощі, пов'язані з підсумовуванням кількох секцій передавальної функції у цифрових IIR-фільтрах з фіксованою комою, що пояснюються нелінійним характером процесу підсумовування. Підкреслюється важливість відповідності специфікаціям частотної характеристики при проектуванні IIR-фільтрів та представлено різні підходи до її досягнення, що охоплюють проектування аналогових прототипних фільтрів, перетворення цифрової частоти та CAD.

Вплив квантування на частотну характеристику шляхом систематичного зменшення кількості бітів у кожному коефіцієнті, що призводить до зменшення площі та збільшення швидкості досліджується у [11]. Проектування реалізовано з використанням інструментів автоматизованого проектування (CAD) із застосуванням методу проектування на поведінковому рівні. У роботі представлено нову методологію проектування для оптимізації цифрових FIR-фільтрів, що охоплює ключові аспекти ефективної апаратної реалізації, включаючи методологію проектування, вибір структури та алгоритми, спрямовані на зменшення арифметичної складності.

Підкреслено важливість цифрової FIR-фільтрації в різних застосуваннях, таких як обробка сигналів військових радарів, обробка гідролокаційних сигналів, наведення ракет, навігація та захищений зв'язок [12]. Наголошується, що цифрові фільтри забезпечують характеристики продуктивності, яких складно досягти за допомогою аналогових фільтрів, і їх можна зручно налаштовувати за допомогою програмного керування. Обговорюється використання DSP-систем, Simulink, MATLAB та інструменту Xilinx System Generator для проектування та реалізації FIR-фільтрів.

У [13] розглянуто використання систем оптимізації, включаючи генетичні алгоритми та штучні нейронні мережі, у проектуванні цифрових фільтрів. Підкреслено переваги використання методів оптимізації в проектуванні цифрових фільтрів, такі як відповідність конкретним специфікаціям та покращення якості сигналу. Наголошено на важливості методів оптимізації в проектуванні фільтрів зі скінченною імпульсною характеристикою через простоту проектування та стабільність. Обговорюється використання методів нейронних мереж для проектування лінійних фаз FIR-фільтрів, які мають кращі характеристики порівняно зі звичайними методами проектування. Розглядаються електронні фільтри, цифрові фільтри та аналогові фільтри, які класифікуються як фільтри обробки сигналів. Фільтри зі скінченною імпульсною характеристикою вирізняються простотою проектування, стабільністю та лінійними фазовими характеристиками, що робить їх привабливими для різних застосувань. Реалізація фільтрів зі скінченною імпульсною характеристикою здійснюється з відомою кількістю відводів затримки та коефіцієнтами обчислень, і вони не мають шляхів зворотного зв'язку, що забезпечує стабільність.

Розглянуто техніку проектування фільтра [14], що використовується при вимірюванні енергоспоживання, згадуючи шість різних методів проектування фільтрів. Дослідники використовували пряму форму реалізації I для IIR- і FIR-фільтрів через її зручність використання. Як модель шуму в дослідженні використовувався гаусів шум за допомогою міри розсіювання. Дослідники порівнювали невідфільтровані та відфільтровані результати для оцінки продуктивності фільтра.

Застосовуються різноманітні методи стохастичного пошуку, включаючи генетичний алгоритм (GA), оптимізацію роєм частинок (PSO) і диференціальну еволюцію (DE), з метою проектування цифрових фільтрів. Цитується дослідження [15], в якому викладено розробку оптимального цифрового FIR-фільтра з використанням алгоритму оптимізації на основі обчислювального інтелекту. Розглядається створення низькочастотних фільтрів з використанням варіантів PSO. Крім того, висвітлюється ефективно та точно проектування FIR-фільтра з лінійною фазою, досягнуте за допомогою алгоритму гармонійного пошуку на основі протилежностей. Додатково обговорюється застосування диференціальної еволюції з оптимізацією роєм частинок (DEPSO) у сфері проектування цифрових фільтрів. Представлено порівняльний аналіз амплітудно-частотної характеристики в опублікованих результатах, зокрема порівнюються результати низькочастотних фільтрів, отримані за допомогою SIMBO-GA, DEPSO та GLPSO DVN.

**Висновки та перспективи подальшого дослідження.** Огляд оцінює ефективність різних підходів до проектування FIR- та IIR-фільтрів, підкреслюючи використання інспірованих природою алгоритмів оптимізації у сфері проектування цифрових фільтрів. Дослідження показує, що FIR-фільтри з лінійною фазовою характеристикою перевершують традиційні методи. Стратегічний вибір методологій реалізації та специфікацій проектування є вирішальним для досягнення ефективної схемної реалізації. Досліджено різні стратегії проектування цифрових FIR-фільтрів з використанням дерева Уоллеса та множення Ведіка, що призводить до зменшення затримки та підвищення робочої частоти, але збільшення площі. Навпаки, проектування Бута забезпечує помірну затримку, зменшену кількість часткових добутків і, як наслідок, високошвидкісні цифрові фільтри зі скінченною імпульсною характеристикою.

Крім того, ретельно досліджено методи проектування, реалізацію та оцінку продуктивності FIR-фільтрів спеціально для авіаційних застосувань. Додатково, розглянуто аналіз та проектування FIR-фільтрів з використанням модифікації множника з попереднім перенесенням (CLA).

#### Список бібліографічного опису

1. Камєнева Ю. В., Федосов С. А. Огляд та аналіз проектування цифрових фільтрів у цифровій обробці сигналів. *Глобальні тенденції в науці та освіті* : матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф., 2–4 черв. 2025 р., Київ, Україна. Київ : НПП «Sci-conf.com.ua», 2025. С. 420–425. <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-trends-in-science-and-education-2-4-06-2025-kiyiv-ukrayina-arhiv/>

2. Камєнєва Ю., Новосад О., Федосов С. Проектування цифрових фільтрів у обробці сигналів. *Проблеми комп'ютерних наук, програмного моделювання та безпеки цифрових систем* : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф., 9–11 черв. 2025 р., Луцьк–Світязь, Україна. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2025. С. 102–103. <https://apcssm.vnu.edu.ua/index.php/conf/article/view/256>
3. Кумарі Д., Деванган К. Огляд проектування цифрових FIR-фільтрів. *Міжнародний журнал передових досліджень в менеджменті, технологіях та інженерних науках*. 2018. Т. 8, № 3. С. 438–442. <https://ijamtes.org/gallery/66%20conf-etc.pdf>
4. Кумар С., Сінгх Р. Комплексний огляд та аналіз проектування цифрових фільтрів. *Міжнародний журнал передових досліджень в інженерії та технологіях*. 2021. Т. 12, № 1. С. 1131–1149. [https://iaeme.com/Home/article\\_id/10.34218/IJARET.12.1.2021.103](https://iaeme.com/Home/article_id/10.34218/IJARET.12.1.2021.103)
5. Даміні Ку., Дандаде К., Індуркар П. Р. Огляд проектування цифрових FIR-фільтрів. *Міжнародний дослідницький журнал інженерії та технологій*. 2017. Т. 4, № 2. С. 358–362. <https://www.irjet.net/archives/V4/i2/IRJET-V4I271.pdf>
6. АльДжуффі А. А., Бадаві А. С., БенСалех М. С., Обейд А. М., Касім С. М. Реалізація масштабованих мікропрограмованих архітектур FIR-фільтрів на FPGA з використанням дерева Уоллеса та ведичних помножувачів. *Третя міжнародна конференція з технологічних досягнень в електротехніці, електроніці та комп'ютерній інженерії*, 29 квіт. – 1 трав. 2015 р., Бейрут. IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/TAEECE.2015.7113619>
7. Прасанна С., Рані С. Ефективна за площею та швидкістю реалізація симетричного FIR-цифрового фільтра за допомогою підходу зі скороченим паралельним декомпозиованим LUT-цифровим аналізатором. *Схеми та системи*. 2016. Т. 7, № 8. С. 1379–1391. <http://dx.doi.org/10.4236/cs.2016.78121>
8. Сінгх Л., Прія К. Розробка FIR-фільтрів та IIR-фільтрів. *Міжнародний журнал комп'ютерних наук і технологій*. 2013. Т. 4, № 1. С. 108–109. <http://www.ijcst.com/vol41/1/kanupriya2.pdf>
9. Карабога Н. Розробка цифрового IIR-фільтра з використанням алгоритму диференціальної еволюції. *EURASIP Журнал досягнень в обробці сигналів*. 2005. Т. 2005. 856824. <https://doi.org/10.1155/ASP.2005.1269>
10. Кумар А., Чавла П. Проектування та синтез архітектури цифрових фільтрів з фіксованою комою на основі IIR-зсуву для використання активної фільтрації. *Міжнародний журнал інженерних та технічних досліджень*. 2015. Т. 3, № 6. С. 33–35. [https://www.erpublishing.org/published\\_paper/IJETR032420.pdf](https://www.erpublishing.org/published_paper/IJETR032420.pdf)
11. Захур С., Насім С. Розробка та реалізація ефективного цифрового фільтра FIR. *Когент інженерія*. 2017. Т. 4, № 1. 1323373 <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1323373>
12. Ашвіні Р., Венкатаратнам Понну. Розробка цифрового FIR-фільтра для радіолокаційних застосувань. *Міжнародний журнал інноваційних досліджень у науці, техніці та технологіях*. 2017. Т. 6, № 9. С. 19319–19324. [https://www.ijirset.com/upload/2017/september/102\\_36\\_Design.pdf](https://www.ijirset.com/upload/2017/september/102_36_Design.pdf)
13. Кумар В., Пурвар В. Розробка FIR-фільтрів з використанням змішаних алгоритмів: Огляд. *Міжнародний журнал інженерних та технічних досліджень*. 2017. Т. 7, № 7. С. 42–46. <https://media.neliti.com/media/publications/264971-fir-filter-design-using-mixed-algorithms-000a6fa2.pdf>
14. Їлдірім Ф., Кахведжі С. Розробка цифрового фільтра для вимірювання реактивної потужності. *Турецький журнал електроенергетики та енергетичних систем*. 2023. Т. 3, № 2. С. 69–75. <https://doi.org/10.5152/tepes.2023.23013>
15. Сінгх П., Дхалівал Б. С. Розробка цифрового FIR-фільтра з використанням гібридної методики SIMBO-GA. *Міжнародний журнал гібридних інформаційних технологій*. 2015. Т. 8, № 11. С. 91–100. <http://dx.doi.org/10.14257/ijhit.2015.8.11.07>

#### References

1. Kameneva Yu. V., Fedosov S. A. Ohlyad ta analiz proektuvannya tsyfrovyykh fil'triv u tsyfrovoy obrobtsi syhnaliv. *Global Trends in Science and Education* : Proc. V Inter. Sci. Pract. Conf., June 2–4, 2025, Kyiv, Ukraine. Kyiv : SPC «Sci-conf.com.ua», 2025. P. 420–425. <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-trends-in-science-and-education-2-4-06-2025-kiyiv-ukrayina-arhiv/>
2. Kameneva Yu., Novosad O., Fedosov S. Digital filters design in signal processing. *Problems of Computer Science, Software Modeling and Security of Digital Systems* : Proc. II Inter. Sci. Pract. Conf., June 09–11, 2025, Lutsk–Svityaz', Ukraine. Lutsk : Lesya Ukrainka Volyn Nat. Univ., 2025. P. 102–103. <https://apcssm.vnu.edu.ua/index.php/conf/article/view/256>
3. Kumari D., Dewangan K. Review on digital FIR filter design. *International Journal of Advanced in Management, Technology and Engineering Sciences*. 2018. Vol. 8, № 3. P. 438–442. <https://ijamtes.org/gallery/66%20conf-etc.pdf>
4. Kumar S., Singh R. A comprehensive review and analysis on digital filter design. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. 2021. Vol. 12, № 1. P. 1131–1149. [https://iaeme.com/Home/article\\_id/10.34218/IJARET.12.1.2021.103](https://iaeme.com/Home/article_id/10.34218/IJARET.12.1.2021.103)
5. Damini Ku., Dandade C., Indurkar P. R. Review on design of digital FIR filters. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4, № 2. P. 358–362. <https://www.irjet.net/archives/V4/i2/IRJET-V4I271.pdf>
6. AlJuffri A. A., Badawi A. S., BenSaleh M. S., Obeid A. M., Qasim S. M. FPGA implementation of scalable microprogrammed FIR filter architectures using Wallace tree and Vedic multipliers. *Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAEECE)*, 29 April – 01 May 2015, Beirut. IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/TAEECE.2015.7113619>
7. Prasanna S., Rani S. Area and speed efficient implementation of symmetric FIR digital filter through reduced parallel LUT decomposed DA approach. *Circuits and Systems*. 2016. Vol. 7, № 8. P. 1379–1391. <http://dx.doi.org/10.4236/cs.2016.78121>
8. Singh L., Priya K. FIR filter design and IIR filter design. *International Journal of Computer Science and Technology*. 2013. Vol. 4, № 1. P. 108–109. <http://www.ijcst.com/vol41/1/kanupriya2.pdf>

9. Karaboga N. Digital IIR filter design using differential evolution algorithm. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2005. Vol. 2005. 856824. <https://doi.org/10.1155/ASP.2005.1269>
10. Kumar A., Chawla P. Design and synthesis of fixed-point IIR digital filters architecture for using active filtering. *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2015. Vol. 3, № 6. P. 33–35. [https://www.erpublication.org/published\\_paper/IJETR032420.pdf](https://www.erpublication.org/published_paper/IJETR032420.pdf)
11. Zahoor S., Naseem S. Design and implementation of an efficient FIR digital filter. *Cogent Engineering*. 2017. Vol. 4, № 1. 1323373. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1323373>
12. Ashwini R., Venkataratnam P. Design of digital FIR filter for RADAR applications. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2017. Vol. 6, № 9. P. 19319–19324. [https://www.ijirset.com/upload/2017/september/102\\_36\\_Design.pdf](https://www.ijirset.com/upload/2017/september/102_36_Design.pdf)
13. Kumar V., Purwar V. FIR filter design using mixed algorithms: A survey. *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2017. Vol. 7, № 7. P. 42–46. <https://media.neliti.com/media/publications/264971-fir-filter-design-using-mixed-algorithms-000a6fa2.pdf>
14. Yıldırım F., Kahveci S. A digital filter design for reactive power measurement. *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2023. Vol. 3, № 2. P. 69–75. <https://doi.org/10.5152/tepes.2023.23013>
15. Singh P., Dhaliwal B. S. Design of digital FIR filter using hybrid SIMBO-GA technique. *International Journal of Hybrid Information Technology*. 2015. Vol. 8, № 11. P. 91–100. <http://dx.doi.org/10.14257/ijhit.2015.8.11.07>