DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-297-303 УДК 004:621.31

Р.В. Петросян, ст. викладач

Державний університет «Житомирська політехніка»

Оптимізовані віконні функції для спектрального аналізу на базі цифрових фільтрів

У статті розглянуто актуальне питання шодо підвищення точності спектрального аналізу в комп'ютеризованих системах за рахунок оптимізації віконних функцій, що використовуються у дискретному перетворенні Фур'є. Основною проблемою в спектральному аналізі сигналів у реальних умовах є спектральний виток, який спричиняє появу небажаних бічних пелюсток у спектрі сигналу. З метою зменшення цього ефекту традиційно використовуються віконні функції (Ханна, Хеммінга, Блекмана, Кайзера тощо). Проте їх характеристики мають певні обмеження, і в багатьох практичних задачах їх застосування не дозволяє досягти максимальної точності.

Запропоновано підхід до формування віконних функцій шляхом синтезу цифрових фільтрів з кіниевою імпульсною характеристикою, що дає змогу отримати більш гнучкий інструмент адаптації до специфіки сигналів. Продемонстровано можливість використання стандартних методів синтезу цифрових фільтрів. Проведено порівняльний аналіз спектральних характеристик синтезованих вікон з класичними віконними функціями. Результати моделювання демонструють, що синтезовані вікна здатні забезпечити нижчий рівень бічних пелюсток за аналогічної ширини головного пелюстка, що безпосередньо впливає на зниження похибки при спектральному аналізі.

Отримані результати є важливими для підвищення ефективності комп'ютеризованих систем моніторингу якості електроенергії. Запропонований підхід має потенціал до подальшої адаптації шляхом впровадження методів машинного навчання та евристичних алгоритмів для автоматичного налаштування параметрів віконних функцій залежно від умов аналізу. **Ключові слова:** ДПФ: віконні функції: иифрові фільтри: КІХ-вікна.

Актуальність теми. Несинусоїдальність форми кривих напруги електричної мережі, зумовлена присутністю вищих гармонійних складових, породжує комплекс серйозних проблем в електричних системах [1]. Однією з таких проблем є додаткова втрата енергії, тобто зниження ККД і терміну служби устаткування внаслідок перегріву, вібрацій та інших чинників [2, 3]. Інша проблема призводить до збоїв у роботі чутливої електронної апаратури: мікропроцесорних пристроїв релейного захисту, автоматики, систем телемеханіки тощо. Достовірний моніторинг параметрів якості електроенергії у мережі, у тому числі гармонійних складових, є запорукою надійного та ефективного функціонування енергосистеми [4].

Сучасні комп'ютеризовані системи широко застосовуються у багатьох галузях людської діяльності: енергетиці, медицині, промисловості тощо. Основу обробки сигналів у таких системах становить цифрова обробка сигналів, в якій спектральний аналіз займає одне з ключових місць. Однак використання дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) у реальних умовах, коли аналізується скінченна вибірка сигналу, супроводжується спотвореннями, викликаними спектральним витоком (spectral leakage) [5-8]. Для зменшення цього ефекту традиційно застосовуються віконні функції (window functions), які зважують сигнал перед перетворенням. Вибір віконної функції значною мірою визначає компроміс між спектральною роздільною здатністю та рівнем побічних спектральних компонентів. Проте стандартні вікна (Ханна, Хеммінга, Блекмана, Кайзера тощо) мають обмежені характеристики та не завжди забезпечують потрібну точність. Таким чином, розробка методів оптимізації віконних функцій є актуальним завданням, що дає змогу поліпшити точність спектрального аналізу в комп'ютеризованих системах і, зокрема, в системах моніторингу параметрів якості електроенергії в мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Питання зменшення спектрального витоку розглядається досить давно. Одну з перших публікацій представлено в 70-х роках ХХ століття, де наведено фундаментальні властивості різних віконних функцій та їх вплив на результати спектрального аналізу [8].

Віконні функцій можна умовно розбити на три типи: класичні, параметричні та адаптивні [9, 10]. Основними критеріями вибору віконної функції є показники параметрів: ширина головного пелюстки, максимальний рівень бічних пелюсток, швидкість спаду бічних пелюсток.

До класичних вікон відносяться: прямокутне, Ханна, Хеммінга, Блекмана тощо. Ці вікна мають строго задану, незмінну форму, добре досліджені з позиції компромісу між шириною головної пелюстки і максимальним рівнем бічних пелюсток.

Основні показники параметрів деяких класичних вікон представленні в таблиці 1.

Вікно	Ширина головного пелюстка, бін ДПФ	Максимальний рівень бічних пелюсток, дБ
Прямокутне	2	-13.3
Ханна	4	-31.5
Хеммінга	4	-42.7
Блекмана	6	-58.0

Характеристики віконних функцій

Подальший розвиток отримали параметричні вікна. Вони мають один або кілька параметрів, що налаштовуються, які дають змогу плавно змінювати властивості вікна (баланс між шириною головного пелюстки і максимальнім рівнем бічних пелюсток). Наприклад, вікно Кайзера дозволяє регулювати всього один параметр – бета-параметр [5–8].

Сучасні дослідження також досліджують можливість побудови адаптивних вікон на основі аналізу локальних характеристик сигналу або з використанням методів машинного навчання, що дає змогу гнучко реагувати на зміну умов (наприклад, наявність імпульсних завад або зміна спектрального складу в часі) [10, 11]. Адаптивні вікна – це не окремий клас вікон, а методи для динамічного вибору типу вікна або значень параметрів параметричного вікна безпосередньо під сигнал, що аналізується, тобто мета – автоматично знайти оптимальний компроміс.

У цій роботі [11] оцінюється вплив різних віконних функцій, які використовуються в ДПФ, на ефективність моделей глибокого навчання для класифікації ЕКГ. У роботі проводився аналіз трьох вікон: Хеммінга, Ханна і Блекмана. Вікно Блекмана показало найкращу точність класифікації.

У публікації [12] було наведено дослідження впливу форми та параметрів спектральних згладжувальних вікон на точність оцінок спектральних діагностичних ознак. Для цього здійснювалося моделювання реалізацій вібраційних сигналів з відомими спектральними характеристиками, після чого проводився статистичний спектральний аналіз цих реалізацій зі згладжуванням за допомогою різних типів спектральних вікон. Відзначено вплив параметрів спектральних вікон на показники результатів спектрального аналізу.

У публікації [13] при гармонійному аналізі енергосистем, щоб зменшити похибку, використовували алгоритм ДПФ з віконною інтерполяцією. У ній застосовується метод інтерполяції триточкового спектрального піка. Результати імітаційного експерименту показали, що швидкість загасання бічних пелюсток віконної функції має велике значення для зменшення похибки. Під час аналізу методу з триточковою інтерполяцією ДПФ, використовували вікна Ханнінга, Блекмана та Натталла. Вікно Натталла для цієї задачі є найкращим вибором з точки зору точності.

У роботі [14] використовували ДПФ для гармонійного аналізу електричних сигналів. Результати моделювання показали досить низьку похибку під час аналізу інтерполяційного методу електричних гармонік на базі ДПФ з використанням вікон Ханнінга або вікна Блекмана.

У роботі [15] розв'язується задача з оцінювання частоти сигналу. У цьому дослідженні розроблено новий алгоритм оцінювання частоти. Базується цей алгоритм оцінювання частоти на методі триточкової спектральної інтерполяції з використанням віконного ДПФ. Результати моделювання показали, що запропонований алгоритм демонструє чудову точність оцінювання частоти. ДПФ виконувалося з віконною функцією Натталла.

Як бачимо, всі розглянуті роботи націлені на розв'язання різних завдань, однак у всіх основу становить ДПФ з вибором віконної функції.

Метою статті є дослідження методів оптимізації спектрального аналізу в комп'ютеризованих системах визначення показників якості електроенергії шляхом використання цифрових фільтрів із кінцевою імпульсною характеристикою як узагальнених віконних функцій та порівняння їх ефективності з класичними підходами.

Викладення основного матеріалу. З математичної точки зору, ДПФ сигналу із застосуванням віконної функції задається таким виразом (1):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-i\frac{2\pi k n}{N}},$$
(1)

де X(k) – спектральне представлення послідовності x(n), n – номер відліку, N – розмір вибірки, k – номер спектральної складової, x(n) – послідовність даних, для якої потрібно отримати спектральне представлення.

ДПФ використовується під час обробки кінцевої вибірки даних, яка є частиною сигналу. Це призводить до спотворення частотного спектра сигналу внаслідок розривів першого роду на межах вибірки. Традиційним рішенням, яке зменшує спотворення, є застосування віконної функції. Віконна функція здійснює зважування вибірки даних. В цьому випадку послідовність даних x(n) буде розраховуватися таким чином (2):

(2)

(6)

 $\mathbf{x}(\mathbf{n}) = \mathbf{x}(\mathbf{n})\mathbf{w}(\mathbf{n}),$

де x (n) – послідовність відліків вхідного сигналу, w(n) – послідовність відлікі віконної функції. Зворотний ДПФ для послідовностей x(n), x (n) та w(n) матиме такий вигляд відповідно:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{i\frac{2\pi k n}{N}},$$
(3)

$$\mathbf{x}'(\mathbf{n}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{X}'(k) e^{\mathbf{l} \cdot \mathbf{N}},$$
(4)

$$w(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W(k) e^{\frac{1}{N}}.$$
(5)

Виконаємо деякі перетворення. Підставимо вирази (4) та (5) у вираз (2), тоді отримаємо вираз (6):

$$\mathbf{x}(\mathbf{n}) = \frac{1}{N^2} \sum_{l=0}^{N-1} \mathbf{X}(l) e^{\frac{l-1}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{W}(k) e^{\frac{l-1}{N}}.$$

Переставляючи множники, отримаємо вираз (7):

$$\mathbf{x}(\mathbf{n}) = \frac{1}{N^2} \sum_{l=0}^{N-1} \mathbf{X}(l) \left(\sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{W}(k-l) e^{i\frac{2\pi i (k-l)n}{N}} \right) e^{i\frac{2\pi i (n-1)}{N}} = \frac{1}{N^2} \sum_{l=0}^{N-1} \left(\sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{X}(l) \mathbf{W}(k-l) e^{i\frac{2\pi k n}{N}} \right).$$
(7)

Спрощуємо. В результаті отримаємо вираз (8):

$$\mathbf{x}(\mathbf{n}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \mathbf{X}(l) \mathbf{W}(k-l) \right) e^{i\frac{2\pi k n}{N}}.$$
(8)

Порівнюючи вирази (3) і (8), можемо записати вираз (9), який відображає взаємозв'язок між спектральним представленням послідовностей x(n), x (n) та w(n):

 $X(k) \propto \sum_{l=0}^{N-1} X(l) W(k-l).$

(9)

Вираз (9) є згорткою в частотній області і показує, що гармонічні складові виділяються гребінкою фільтрів з амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) W(k), які відповідають фільтру з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ). Таким чином, можна розрахувати послідовність відліки віконної функції не за допомогою класичних та парметричних віконних функцій [5–8], а з використанням оптимізаційних методів синтезу КІХ-фільтрів (надалі будемо називати такі вікна КІХ-вікнами).

Для синтезу фільтрів існує безліч методів проєктування, серед яких можна виділити класичні (метод зважування; метод частотної вибірки; метод найменших квадратів, метод найкращої рівномірної апроксимації) [5–7] та евристичні методи проєктування КІХ-фільтрів [16–18]. Серед евристичних алгоритмів можна виділити генетичний алгоритм, який має низку переваг перед іншими оптимізаційними алгоритмами: відноситься до глобальних методів оптимізації; є паралельно масштабованим; може використовуватися для багатокритеріальної оптимізації тощо.

Відповідно до стандартів [19–21] кількість гармонійних складових, які повинні моніторитися в електричній мережі, становить 40. Звідси випливає, що кількість відліків, для якого виконуватиметься ДПФ, на один період напруги має бути не меншою за 80. Враховуючи кількість бін головного пелюстки, а також для спрощення виконання ДПФ (приводимо кількість відліків до степеня 2), вибірка даних складатиметься з 256 значень.

Синтезувати КІХ-фільтр будемо з використанням методу найменших квадратів [5–7]. Ширина головного пелюстки буде 4 біни, а порядок фільтра становитиме – 256. Результат синтезу представлено на рисунку 1 (синя крива), а чисельне значення у таблиці 2 (показано тільки половину відліків, оскільки вікно симетричне).

На рисунку 1 крім отриманої КІХ-вікна також показано вікно Ханна для порівняння (помаранчева крива). В цьому випадку АЧХ головного пелюстка синтезованого вікна майже співпадає з вікном Ханна (рис. 2). Відмінність за максимальним рівнем бічних пелюсток (приблизно -10дБ), що досить суттєво.

На рисунку 3 приведено ще один приклад синтезованого вікна (приклад синтетичний, але він демонструє особливості даного підходу). З рисунка видно (зображення промаштабоване), що головний пелюсток має досить широку плоску вершину (майже 1 бін), але в той же час маємо максимальний рівень бічних пелюсток однаковий. Звісно, що недолік цього вікна – досить високий рівень бічних пелюсток, але це через те, що вершина плоска занадто, однак це демонструє гнучкість цього підходу.



Рис. 1. Віконна функція, що була синтезована

Таблиця 2

DIOMINA INIA OINIA	Відліки	КІХ-вікна
--------------------	---------	-----------

	Значення віконної функції, $w(i) = w(N-i)$						
x[0] = 0.0001039457	x[32] = 0.0015123341	x[64] = 0.0044780896	x[96] = 0.0077542363				
x[1] = 0.0001245796	x[33] = 0.0015835501	x[65] = 0.0045863733	x[97] = 0.0078375892				
x[2] = 0.0001464945	x[34] = 0.0016564250	x[66] = 0.0046949852	x[98] = 0.0079189955				
x[3] = 0.0001697201	x[35] = 0.0017309448	x[67] = 0.0048038588	x[99] = 0.0079983919				
x[4] = 0.0001942854	x[36] = 0.0018070936	x[68] = 0.0049129269	x[100] = 0.0080757168				
x[5] = 0.0002202186	x[37] = 0.0018848538	x[69] = 0.0050221210	x[101] = 0.0081509100				
x[6] = 0.0002475474	x[38] = 0.0019642057	x[70] = 0.0051313720	x[102] = 0.0082239125				
x[7] = 0.0002762982	x[39] = 0.0020451279	x[71] = 0.0052406099	x[103] = 0.0082946670				
x[8] = 0.0003064969	x[40] = 0.0021275970	x[72] = 0.0053497638	x[104] = 0.0083631179				
x[9] = 0.0003381684	x[41] = 0.0022115878	x[73] = 0.0054587624	x[105] = 0.0084292111				
x[10] = 0.0003713363	x[42] = 0.0022970731	x[74] = 0.0055675336	x[106] = 0.0084928942				
x[11] = 0.0004060236	x[43] = 0.0023840240	x[75] = 0.0056760048	x[107] = 0.0085541167				
x[12] = 0.0004422519	x[44] = 0.0024724096	x[76] = 0.0057841030	x[108] = 0.0086128298				
x[13] = 0.0004800417	x[45] = 0.0025621971	x[77] = 0.0058917547	x[109] = 0.0086689867				
x[14] = 0.0005194126	x[46] = 0.0026533521	x[78] = 0.0059988861	x[110] = 0.0087225423				
x[15] = 0.0005603825	x[47] = 0.0027458382	x[79] = 0.0061054233	x[111] = 0.0087734539				
x[16] = 0.0006029685	x[48] = 0.0028396171	x[80] = 0.0062112919	x[112] = 0.0088216804				
x[17] = 0.0006471860	x[49] = 0.0029346489	x[81] = 0.0063164178	x[113] = 0.0088671832				
x[18] = 0.0006930493	x[50] = 0.0030308917	x[82] = 0.0064207265	x[114] = 0.0089099254				
x[19] = 0.0007405712	x[51] = 0.0031283021	x[83] = 0.0065241439	x[115] = 0.0089498726				
x[20] = 0.0007897630	x[52] = 0.0032268347	x[84] = 0.0066265957	x[116] = 0.0089869924				
x[21] = 0.0008406347	x[53] = 0.0033264428	x[85] = 0.0067280082	x[117] = 0.0090212548				
x[22] = 0.0008931946	x[54] = 0.0034270776	x[86] = 0.0068283075	x[118] = 0.0090526320				
x[23] = 0.0009474494	x[55] = 0.0035286889	x[87] = 0.0069274205	x[119] = 0.0090810985				
x[24] = 0.0010034046	x[56] = 0.0036312250	x[88] = 0.0070252742	x[120] = 0.0091066312				
x[25] = 0.0010610636	x[57] = 0.0037346324	x[89] = 0.0071217964	x[121] = 0.0091292092				
x[26] = 0.0011204284	x[58] = 0.0038388562	x[90] = 0.0072169153	x[122] = 0.0091488142				
x[27] = 0.0011814993	x[59] = 0.0039438400	x[91] = 0.0073105598	x[123] = 0.0091654302				
x[28] = 0.0012442749	x[60] = 0.0040495261	x[92] = 0.0074026597	x[124] = 0.0091790437				
x[29] = 0.0013087520	x[61] = 0.0041558553	x[93] = 0.0074931454	x[125] = 0.0091896435				
x[30] = 0.0013749257	x[62] = 0.0042627670	x[94] = 0.0075819483	x[126] = 0.0091972209				
x[31] = 0.0014427892	x[63] = 0.0043701995	x[95] = 0.0076690008	x[127] = 0.0092017699				



Рис. 2. АЧХ віконної функції, що була синтезована



Рис. 3. АЧХ віконної функції з плоскою вершиною, що була синтезована

Висновки та перспективи подальших досліджень. Запропонований підхід до оптимізації спектрального аналізу шляхом синтезу віконних функцій на основі цифрових фільтрів з кінцевою імпульсною характеристикою дозволяє гнучко налаштовувати характеристики вікна відповідно до вимог конкретного застосування. Порівняння з класичними віконними функціями, такими як Ханна, показало переваги у зменшенні рівня бічних пелюсток без втрати роздільної здатності, що особливо важливо для аналізу сигналів в умовах високої зашумленості або обмеженої кількості відліків.

Перспективи подальших досліджень полягають у застосуванні адаптивних та інтелектуальних методів оптимізації, зокрема генетичних алгоритмів та машинного навчання, для автоматичного налаштування параметрів вікон. Це дозволить розробити універсальні алгоритми спектрального аналізу, здатні ефективно функціонувати у динамічно змінних умовах реального часу, що відкриває нові можливості для моніторингових систем, зокрема в енергетиці.

Список використаної літератури:

- 1. Short T.A. Electric Power Distribution Handbook / T.A. Short. Taylor & Francis Group, 2014. 898 p.
- 2. *Кузнецов В.* Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах / *В.Кузнецов, О.Шполянський, Н.Яремчук* // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 3. – С. 46–52.
- 3. Жаркін А. Критерії оцінювання якості електроенергії, що виробляється об'єктами розосередженої генерації / А.Жаркін, С.Палачов // Технічна електродинаміка. – 2018. – № 2. – С. 63–66. DOI: 10.15407/techned2018.02.063.

- 4. *Стогній Б.* Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу / *Б.Стогній*, *М.Сопель* // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 62–69.
- 5. Manolakis D.G. Digital signal processing / D.G. Manolakis, J.G. Proakis. Pearson Education Limited, 2014.
- 6. *Prabhu K.M.M.* Window Functions and Their Applications in Signal Processing / K.M.M. Prabhu. Taylor & Francis, 2014. 404 p.
- 7. *Oppenheim A.V.* Discrete-Time Signal Processing / A.V. *Oppenheim, R.W. Schafer.* Pearson Education Limited, 2014.
- 8. *Harris F.J.* On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform / *F.J. Harris* // Proceedings of the IEEE. 1978. Vol. 66, № 1. P. 51–83. DOI: 10.1109/proc.1978.10837.
- Петросян Р.В. Оптимізація спектрального аналізу в комп'ютеризованих системах з використанням віконних функцій на базі цифрових фільтрів / Р.В. Петросян // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2025) : Вісімнадцята міжнародна науково-практична конференція, 20–21 травня. – К. : НАУ, 2025. – С. 370–371.
- 10. *Djurović I*. Adaptive windowed Fourier transform / *I.Djurović*, *L.Stanković* // Signal Processing. 2003. Vol. 83, № 1. – P. 91–100. DOI: 10.1016/s0165-1684(02)00380-8.
- 11. *Martono N.P.* Evaluating the impact of windowing techniques on fourier transform-preprocessed signals for deep learning-based ECG classification / *N.P. Martono, H.Ohwada* // Hearts. 2024. Vol. 5, № 4. P. 501–515. DOI: 10.3390/hearts5040037.
- 12. *Гижко Ю*. Питання підвищення точності оцінок діагностичних ознак при спектральній обробці вібраційних сигналів / *Ю*.*Гижко, М.Мислович, Р.Сисак* // Технічна електродинаміка. 2012. № 2. С. 127–128.
- Liu L. An approach to power system harmonic analysis based on triple-line interpolation discrete Fourier transform / L.Liu, J.Zhang // Archives of Electrical Engineering. – 2023. – Vol. 71, № 3. – P. 549–558. DOI: 10.24425/aee.2022.141670.
- 14. Jiao L. An approach for electrical harmonic analysis based on interpolation DFT / L.Jiao, Y.Du // Archives of Electrical Engineering. 2022. Vol. 71, № 2. P. 445–454. DOI: 10.24425/aee.2022.140721.
- Al-Tahar I.A. An Enhanced Frequency Estimation Algorithm Using a Three-Point Spectral Interpolation Method / I.A. Al-Tahar, A. Al-Shueli // Ingénierie des systèmes d information. – 2023. – Vol. 28, № 3. – P. 761–766. DOI: 10.18280/isi.280327.
- 16. *Mutingi M.* Grouping genetic algorithms advances and applications / *M.Mutingi, C.Mbohwa //* Switzerland : Springer International Publishing, 2017.
- 17. *Petrosian R.* Method for calculating the FIR filter based on genetic algorithm / *R.Petrosian, O.Kuzmenko, A.Petrosian* // Computer Systems and Information Technologies. 2021. Vol. 1. P. 19–24 [Electronic resource]. Access mode : https://csitjournal.khmnu.edu.ua/index.php/csit/article/view/45/33.
- Petrosian R. Development of a method for synthesis the FIR filters with a cascade structure based on genetic algorithm / R.Petrosian, V.Chukhov, A.Petrosian // Technology audit and production reserves. 2021. Vol. 4, No. 2 (60). P. 6–11. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.237271.
- 19. Жаркін А.Ф. Впровадження в нормативну базу України європейських вимог до проведення вимірювання показників якості електричної енергії / А.Ф. Жаркін, С.О. Палачов // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2023. Т. 65. С. 15–20. DOI: 10.15407/publishing2023.65.015.
- Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення : ГОСТ 13109-97 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837.
- 21. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT) : ДСТУ EN 50160:2023 [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226.

References:

- 1. Short, T.A. (2014), *Electric Power Distribution Handbook*, Taylor & Francis Group, 898 p.
- 2. Kuznietsov, V., Shpolianskyi, O. and Yaremchuk, N. (2011), «Uzahalnenyi pokaznyk yakosti enerhii v elektrychnykh merezhakh i systemakh», *Tekhnichna elektrodynamika*, No. 3, pp. 46–52.
- 3. Zharkin, A. and Palachov, S. (2018), «Kryterii otsiniuvannia yakosti elektroenerhii, shcho vyrobliaietsia obiektamy rozoseredzhenoi heneratsii», *Tekhnichna elektrodynamika*, No. 2, pp. 63–66, doi: 10.15407/techned2018.02.063.
- 4. Stohnii, B. and Sopel, M. (2013), «Osnovy monitorynhu v elektroenerhetytsi. Pro poniattia monitorynhu», *Tekhnichna elektrodynamika*, No. 1, pp. 62–69.
- 5. Manolakis, D.G. and Proakis, J.G. (2014), *Digital signal processing*, Pearson Education Limited.
- 6. Prabhu, K.M.M. (2014), Window Functions and Their Applications in Signal Processing, Taylor & Francis, 404 p.
- 7. Oppenheim, A.V. and Schafer, R.W. (2014), *Discrete-Time Signal Processing*, Pearson Education Limited.
- 8. Harris, F.J. (1978), «On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform», *Proceedings* of the IEEE, Vol. 66, No. 1, pp. 51–83, doi: 10.1109/proc.1978.10837.
- 9. Petrosian, R.V. (2025), «Optymizatsiia spektralnoho analizu v kompiuteryzovanykh systemakh z vykorystanniam vikonnykh funktsii na bazi tsyfrovykh filtriv», *Intehrovani intelektualni robototekhnichni kompleksy (IIRTK-2025)*, Visimnadtsiata mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, 20–21 travnia, NAU, K., pp. 370–371.
- 10. Djurović, I. and Stanković, L. (2003), «Adaptive windowed Fourier transform», *Signal Processing*, Vol. 83, No. 1, pp. 91–100, doi: 10.1016/s0165-1684(02)00380-8.

- 11. Martono, N.P. and Ohwada, H. (2024), «Evaluating the impact of windowing techniques on fourier transformpreprocessed signals for deep learning-based ECG classification», *Hearts*, Vol. 5, No. 4, pp. 501–515, doi: 10.3390/hearts5040037.
- 12. Hyzhko, Yu., Myslovych, M. and Sysak, R. (2012), «Pytannia pidvyshchennia tochnosti otsinok diahnostychnykh oznak pry spektralnii obrobtsi vibratsiinykh syhnaliv», *Tekhnichna elektrodynamika*, No. 2, pp. 127–128.
- 13. Liu, L. and Zhang, J. (2023), «An approach to power system harmonic analysis based on triple-line interpolation discrete Fourier transform», *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 71, No. 3, pp. 549–558, doi: 10.24425/aee.2022.141670.
- Jiao, L. and Du, Y. (2022), «An approach for electrical harmonic analysis based on interpolation DFT», Archives of Electrical Engineering, Vol. 71, No. 2, pp. 445–454, doi: 10.24425/aee.2022.140721.
- 15. Al-Tahar, I.A. and Al-Shueli, A. (2023), «An Enhanced Frequency Estimation Algorithm Using a Three-Point Spectral Interpolation Method», *Ingénierie des systèmes d information*, Vol. 28, No. 3, pp. 761–766, doi: 10.18280/isi.280327.
- 16. Mutingi, M. and Mbohwa, C. (2017), *Grouping genetic algorithms advances and applications*, Springer International Publishing, Switzerland.
- 17. Petrosian, R., Kuzmenko, O. and Petrosian, A. (2021), «Method for calculating the FIR filter based on genetic algorithm», *Computer Systems and Information Technologies*, Vol. 1, pp. 19–24, [Online], available at: https://csitjournal.khmnu.edu.ua/index.php/csit/article/view/45/33
- Petrosian, R., Chukhov, V. and Petrosian, A. (2021), «Development of a method for synthesis the FIR filters with a cascade structure based on genetic algorithm», *Technology audit and production reserves*, Vol. 4, No. 2 (60), pp. 6–11, doi: 10.15587/2706-5448.2021.237271.
- Zharkin, A.F. and Palachov, S.O. (2023), «Vprovadzhennia v normatyvnu bazu Ukrainy yevropeiskykh vymoh do provedennia vymiriuvannia pokaznykiv yakosti elektrychnoi enerhii», *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi* akademii nauk Ukrainy, Vol. 65, pp. 15–20, doi: 10.15407/publishing2023.65.015.
- HOST 13109-97. Elektrychna enerhiia. Sumisnist tekhnichnykh zasobiv elektromahnitna. Normy yakosti elektrychnoi enerhii v systemakh elektropostachannia zahalnoho pryznachennia, [Online], available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837
- 21. DSTU EN 50160:2023. Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrychnykh merezhakh zahalnoi pryznachenosti (EN 50160:2022, IDT), [Online], available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226

Петросян Руслан Валерікович – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка».

http://orcid.org/0000-0002-0388-8821.

Наукові інтереси:

- цифрова обробка;
- штучний інтелект;
- математичне моделювання;
- комп'ютерні системи спеціального призначення;
- вебтехнології.

Petrosian R.V.

Optimized window functions for spectral analysis based on digital filters

The article addresses a relevant issue of improving the accuracy of spectral analysis in computerized systems by optimizing window functions used in the Discrete Fourier Transform (DFT). One of the main challenges in real-world signal spectral analysis is spectral leakage, which causes the appearance of unwanted side lobes in the signal spectrum. To mitigate this effect, traditional window functions (such as Hanning, Hamming, Blackman, Kaiser, etc.) are typically applied. However, these functions have certain limitations, and their use in many practical tasks does not always provide the required level of accuracy.

A novel approach is proposed for constructing window functions through the synthesis of Finite Impulse Response (FIR) digital filters. This provides a more flexible tool for adapting to the specific features of the analyzed signals. The use of standard FIR filter design methods is demonstrated. A comparative analysis of the spectral characteristics of the synthesized windows and classical window functions has been performed. Modeling results show that the synthesized windows can achieve lower side lobe levels while maintaining the same main lobe width, which directly contributes to reduced spectral estimation errors.

The findings are essential for enhancing the performance of computerized systems for power quality monitoring. The proposed approach also shows promising potential for further development through the integration of machine learning techniques and heuristic algorithms, enabling automatic tuning of window parameters depending on analysis conditions.

Keywords: DFT; window functions; digital filters; FIR windows.

Стаття надійшла до редакції 30.04.2025.