

УДК 621.3

# Порівняння дискретних спектральних перетворень при використанні у задачі аналізу електроспоживання локального об'єкту

Осокін<sup>f</sup> В. О., ORCID [0000-0002-3188-1184](https://orcid.org/0000-0002-3188-1184)Левченко В. В., ORCID [0000-0001-7748-4670](https://orcid.org/0000-0001-7748-4670)Ямненко<sup>s</sup> Ю. С., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-0796-6420](https://orcid.org/0000-0002-0796-6420)

Національний Технічний Університет України

«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського» ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

Київ, Україна

DOI: [10.20535/2523-4455.мса.210186](https://doi.org/10.20535/2523-4455.мса.210186)

**Анотація**—Розглянуто використання та порівняльний аналіз дискретних спектральних перетворень Фур'є, Хартлі, Віленкіна-Крестенсона та перетворення в орієнтованому базисі при розв'язанні задачі аналізу часової залежності потужності споживання у локальних об'єктах типу MicroGrid. Порівняння спектральних методів здійснювалося за критеріями кількості обчислювальних операцій, простоти та точності розрахунків. Розглянуто амплітудно-частотні та фазо-частотні спектри досліджуваного сигналу для різних спектральних методів.

**Ключові слова** — спектральний аналіз; вейвлет-аналіз; перетворення Фур'є; перетворення Хартлі; перетворення в орієнтованому базисі; перетворення Віленкіна-Крестенсона

## I. ВСТУП

Сучасні локальні електротехнічні об'єкти типу MicroGrid являють собою низьковольтну інтелектуальну розподільчу енергосистему, що містить різноманітні розподілені джерела енергії, накопичувачі енергії, керовані навантаження та інші елементи та передбачає створення на певній обмеженій території окремих енергомережових структур, здатних, зокрема, працювати автономно. Для таких об'єктів одним з актуальних завдань, що виникають під час розробки та експлуатації системи узгодженого керування генераторами та навантаженнями, є прогнозування електроспоживання. Можливість прогнозування забезпечує узгоджене та енергоефективне керування електротехнічними пристроями, зокрема, регулювання робочих режимів альтернативних джерел живлення та навантажень.

Для вирішення цього завдання застосовуються, зокрема, методи спектрального та вейвлет-аналізу часових рядів [1,2].

Застосування спектральних методів для обробки часових залежностей електроспоживання дозволяє вирішувати не тільки завдання прогнозування, але й інші – такі, як класифікація, аналіз часових та частотних характеристик [3]. Але саме прогнозування є важливим для побудови алгоритмів керування сучасними електротехнічними об'єктами зі складною структурою та високим ступенем насичення різноманітними пристроями, режими роботи яких мають бути узгоджені між собою, та з єдиною задачею

керування – мінімізацією споживання електричної енергії, ресурсів або вартісних витрат при виконанні заданої корисної роботи та забезпеченні рівня життєзабезпечення та комфортності користувача. За таких умов можливість спрогнозувати електроспоживання в рамках добового графіку дозволить корегувати керуючі алгоритми для окремих пристроїв, підсистем та об'єкту в цілому.

При розгляданні характеристик електроспоживання локальних об'єктів, насичених великою кількістю різнотипного електротехнічного обладнання, постає задача прогнозування значень енергії споживання. Однак випадковий характер вмикання пристроїв призводить до появи стрибків характеристики, врахування моментів появи та величини яких ускладнює процес прогнозування і навіть може призвести до хибного результату. Тому необхідним попереднім етапом при прогнозуванні є фільтрація характеристики з метою згладжування різких стрибків. Ця задача може бути успішно вирішена на базі застосування вейвлет-перетворення, результатом якого в залежності від рівня розкладання є згладжена в більшому або меншому ступені усереднена характеристика – тренд, яка в подальшому використовується для прогнозування.

В основі дискретного вейвлет-аналізу лежить материнський вейвлет – «ядро», що задає характеристики методу і визначається виглядом і характером базисних функцій. Відповідно розрізняють методи вейвлет-аналізу, що базуються на різних функціях.



Авторами досліджено можливість застосування в якості такого «ядра» різних типів спектральних перетворень. З цією метою проведено порівняння спектральних методів між собою з позицій швидкодії та обсягу обчислювальних операцій.

## II. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ

В загальному випадку будь-яке спектральне перетворення використовується для обробки, зокрема, для дослідження частотних характеристик та властивостей сигналів. В залежності від характеру аналізованого сигналу застосовуються неперервні або дискретні спектральні перетворення. Оскільки дискретні методи аналізу дедалі більше застосовуються на практиці в задачах обробки сигналів, часто попереднім етапом є дискретизація аналогового сигналу.

В подальшому матеріалі статті будемо розглядати дискретні спектральні перетворення, зокрема, дискретне перетворення Фур'є (ДПФ), Хартлі (ДПХ), Віленкіна-Крестенсона (ВКФ) та перетворення в орієнтованому базисі (ОБ) [4, 5].

Серед вище перерахованих методів ОБ є найбільш цікавим, оскільки дозволяє значно спростити та відповідно прискорити розрахунки. З точки зору аналізу та прогнозування електроспоживання це може стати вирішальним фактором, оскільки підвищена швидкість аналізу процесів дозволить забезпечити прогнозування та керування великою кількістю пристроїв у реальному часі.

Інтервал визначення аналізованого дискретного сигналу у методі ОБ задається у вигляді залежності, де  $N$  – кількість дискретних відліків на розглянутому інтервалі часу,  $m$  – просте,  $n$  – натуральне число. Зазначене спрощення та прискорення розрахунків справедливо для різних комбінацій параметрів  $m$  та  $n$ , але найбільш повно зазначені переваги методи розкриваються при виборі значення  $n$ . Таким чином, бажано оперувати з довжиною дискретного інтервалу визначення аналізованої дискретної функції, кратною трьом:  $n = 3$ . Тоді значення базисних функцій спектрального перетворення ОБ приймають лише цілі

значення, серед яких до 30% - нульові [6, 7, 8]. Це дозволяє оперувати з цілими значеннями, і як наслідок – фактично виключити операції множення і зменшити час обчислень спектрів аналізованих сигналів, а отже – і прискорити подальше прогнозування.

Оскільки для систем MicroGrid зазвичай досліджуються добові графіки електроспоживання, розглянемо дискретний сигнал  $W(nT)$ , де  $T$  – інтервал дискретизації (наприклад, доба),  $n$  – номер дискретного відліку від 0 до 24 (для спрощення та наочності викладення матеріалу розглядатимемо спочатку дискретні значення електроспоживання  $W(n)$ ,  $n=0,1,\dots,24$  з інтервалом в 1 годину). На рис.1 наведено типовий приклад характеристики добового електроспоживання житлового будинку.

У випадку, коли дискретні значення фіксуються погодинно, протягом доби формується 25 значень ( $n=0,1,\dots,24$ ) або 24 значення, якщо для початкової точки  $n=0$  береться останнє значення попереднього добового інтервалу. Так чи інакше, природньо було б піддавати спектральному аналізу дискретний сигнал з нумерацією відліків погодинних значень електроспоживання. Але, оскільки для найбільш доцільного застосування методу ОБ необхідно задати кількість відліків на інтервалі  $N$ , кратну трьом, оберемо найближче придатне значення:  $N = 3^3 = 27$

Для інших спектральних методів, зазначених вище (ДПФ, ДПХ, ВКФ) з точки зору математичних розрахунків довжина дискретного інтервалу може бути довільною. Отже, для забезпечення можливості коректного порівняння різних спектральних методів за однакових умов будемо розглядати їх усі на штучно «подовженому» добовому інтервалі з нумерацією відліків від 0 до 26. [9]

Аналізований дискретний сигнал, що відповідає рис.1, в цьому випадку набуває вигляду послідовності 27 дискретних значень:

$$W(nT) = \{0, 14; 3, 2; 2, 8; 2, 8; 2, 6; 2, 3; 4, 4, 5; 4, 3; 3, 2; 3, 2; 3, 8; 4, 3, 9; 3, 8; 5, 5; 10; 15; 15, 5\}$$

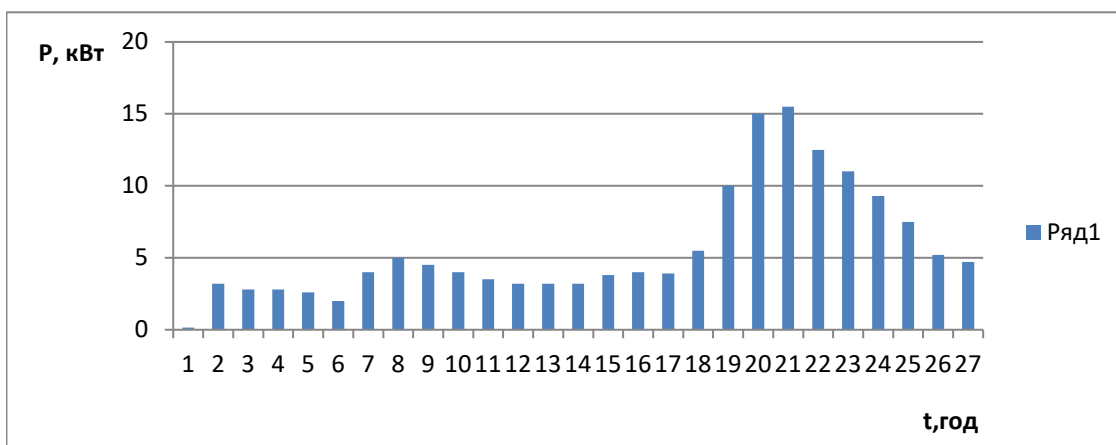


Рис.1. Аналізований дискретний сигнал добового електроспоживання житлового будинку

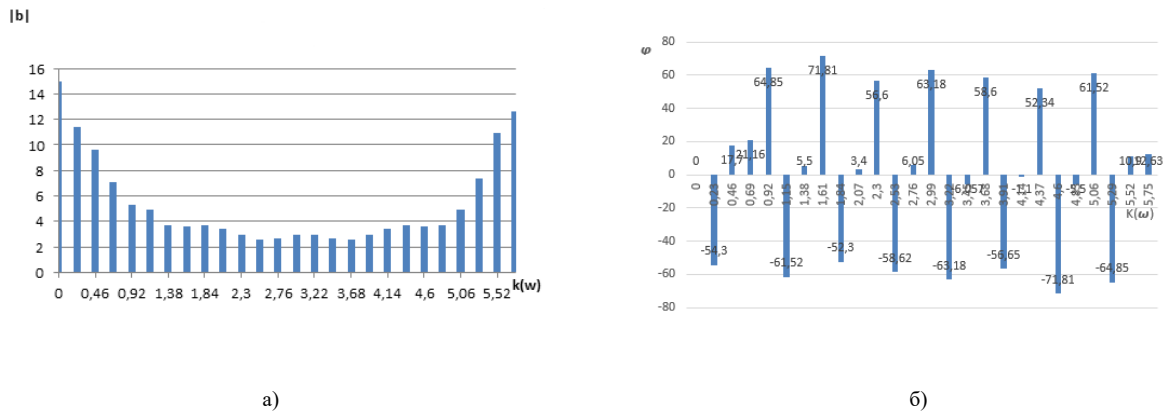


Рис.2. Спектр ДПФ: а – АЧХ, б - ФЧХ

Отже, розглянемо застосування різних методів спектральної обробки для наведеного сигналу  $W(nT)$ .

### III. ДИСКРЕТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

Спектр сигналу  $W(nT)$  обчислюється за формулою прямого ДПФ [6]:

$$WF(k\Omega) = \sum_{(x=0)}^{(N-1)} W(nT) \left( \begin{array}{l} \cos(k\Omega nT) + \\ + j \sin(k\Omega nT) \end{array} \right)$$

де  $\Omega = \frac{2\pi}{(N-1)T}$  – кутова частота першої гармоніки,

k – нумерація дискретних відліків спектру від 0 до 26, j – уявна (комплексна) одиниця.

Отже, в загальному випадку спектр  $WF(k\Omega)$  складається з N комплексних значень, для кожного з якого можна знайти модуль  $|WF(k\Omega)|$  та фазу  $\phi_k$ , а з них для усіх значень k – отримати відповідно амплітудно-частотну та фазо-частотну характеристики (АЧХ та ФЧХ) за формулами [1]:

$$|WF(k\Omega)| = [\text{Re} WF(k\Omega) + \text{Im} WF(k\Omega)]^{(1/2)}$$

$$\phi_k = \arctg \frac{\text{Im}\{W(k\Omega)\}}{\text{Re}\{W(k\Omega)\}}$$

Результати обчислень для всіх 27 значені зведено у таблицю 1:

Результати обчислень у виглядів графіків ФЧХ та АЧХ наведено на рис.2:

Дискретне перетворення Фур'є є найбільш поширеним методом спектрального аналізу, в тому числі у задачах прогнозування, цифрової фільтрації та керування.

ТАБЛИЦЯ 1 РЕЗУЛЬТАТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ДПФ

K	W	W	φ
0	15	15	0
1	11,6-j8,3	14,37	-54,4
2	3,8-j12,03	12,63	17,7
3	-3,6-j9,4	10,09	21,16
4	-6,6-j3,09	7,3	64,85
5	-4,31-j2,34	4,91	-61,52
6	0,35-j3,68	3,7	5,5
7	3,4-j1,13	3,4	71,81
8	2,9-j2,218	2,93	-52,3
9	-j3,34	3,46	3,4
10	-2,4-j1,6	3,74	56,6
11	-2,2+j1,35	3,64	-58,62
12	0,28+j2,7	3,7	-6,05
13	2,64+j1,3	4,91	5,5
14	2,64-j1,33	7,33	71,8
15	0,28-j2,7	10,9	-52,3
16	-2,2-j1,35	12,63	3,4
17	-2,4+j1,6	15	56,6
18	-4,2+j1,8	14,37	-58,62
19	2,9+j2,7	12,35	6,05
20	3,4-j1,13	10,09	63,18
21	0,35-j3,6	7,3	-63,18
22	-4,3-j2,34	4,91	-6,057
23	-6,6+j3,09	3,7	58,6
24	-3,64+j9,4	3,4	6,05
25	3,8+j12,03	2,93	63,18
26	11,6-j8,3	13,6	-63,18

### IV. ОБҀРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ

При застосуванні спектрального перетворення Хартлі спектр аналізованого сигналу обчислюється за формулою [1]:

$$WH(v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} y(x) (\text{cas}(v\Omega nT)),$$

де  $\text{cas}(v\Omega nT) = \cos(v\Omega nT) + \sin(v\Omega nT)$  – базисні функції ДПХ, які приймають виключно дійсні значення, на відміну від ДПФ.

Результати обчислень для всіх 27 значені зведено у таблицю 2 та представлені на рис. 3:

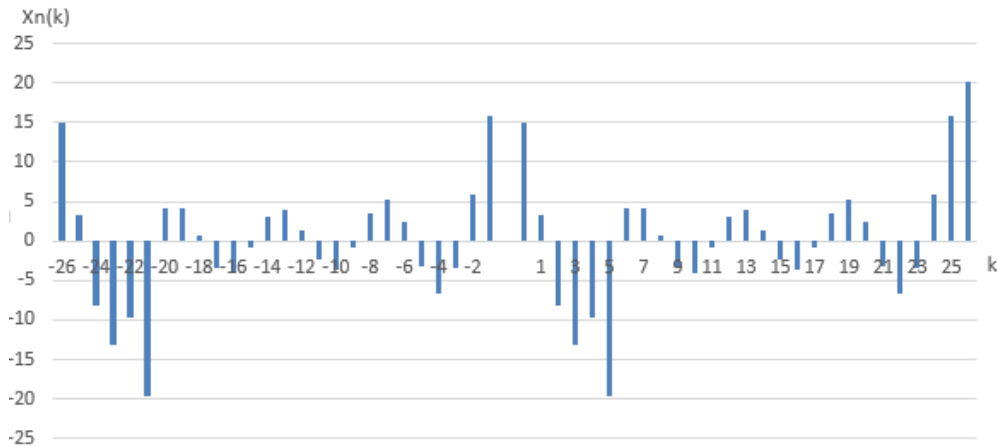


Рис.3. Спектр ДПХ

ТАБЛИЦЯ 2 РЕЗУЛЬТАТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ДПХ

К	W
0	15
1	4,63
2	-7,56
3	-14,72
4	-9,6
5	-19,76
6	4,03
7	4,03
8	0,68
9	-1,36
10	-3,74
11	-4,2
12	-0,68
13	3,84
14	4,76
15	3,28
16	-2,2
17	-2,4
18	0,76
19	3,45
20	5,21
21	2,36
22	-3,65
23	-6,73
24	-3,43
25	5,32
26	15

Зазначимо, що застосування методу ВКФ є обґрунтованим, особливо при великій кількості розрядів у початковій характеристиці, що аналізується, за рахунок суттєвого зменшення кількості різних значень базисних функцій на інтервалі визначення.

#### V. ОБґРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ

При застосуванні методу Віленкіна-Крестенсона [1] відліки спектру в загальному випадку є комплексними, як у ДПФ:

$$WVK(v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} y(x)W(v, x),$$

де  $W(v, x) = e^{\left(-2\pi j \sum_{S=1}^n x^{(s)} v^{(s)}\right)}$  – базисні функції Віленкіна-Крестенсона (ВКФ) [2].

Однак на відміну від ДПФ, цей метод оперує з даними, представленими у  $m$ -ічній системі числення, де  $m$  – просте число. Аргументи  $x$  та  $v$  базисних функцій при цьому визначаються через розрядні компоненти  $x^{(s)}, v^{(s)}$  помножені на відповідні степені основи системи числення  $m$  згідно формулі:

$$x = \sum_{S=1}^n x^{(S)} m^{(S)}, v = \sum_{S=1}^n v^{(S)} m^{n-S}.$$

Перехід до  $m$ -ічної системи числення дозволяє суттєво скоротити кількість різних значень базисних функцій ВКФ на інтервалі визначення  $N$ : якщо для ДПФ ця кількість складала  $N$  (причому у загальному випадку всі компоненти спектру, крім нульової, були комплексними), то для ВКФ вона становить  $m$ . [10]

У матричному вигляді обчислення спектру в базисі ВКФ має вигляд:

$$Y(v) = \frac{1}{27} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j & 1 & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j \\ 1 & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j & 1 & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j \\ 1 & 1 & 1 & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j \\ 1 & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j & -0,5-0,8j & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j \\ 1 & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j \\ 1 & 1 & 1 & -0,5-0,8j & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j \\ 1 & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j & -0,5-0,8j & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j \\ 1 & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j & -0,5-0,8j & -0,5+0,8j & -0,5+0,8j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,148 \\ 1,64 \\ 2,2 \\ 2,5 \\ 3,2 \\ 2,8 \\ 2,9 \\ 2,6 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19-55j \\ 19-11j \\ 19-5j \\ -9-4j \\ 28-25j \\ 19-10j \\ 68-10j \\ -95+91j \\ 19-55j \end{bmatrix}$$

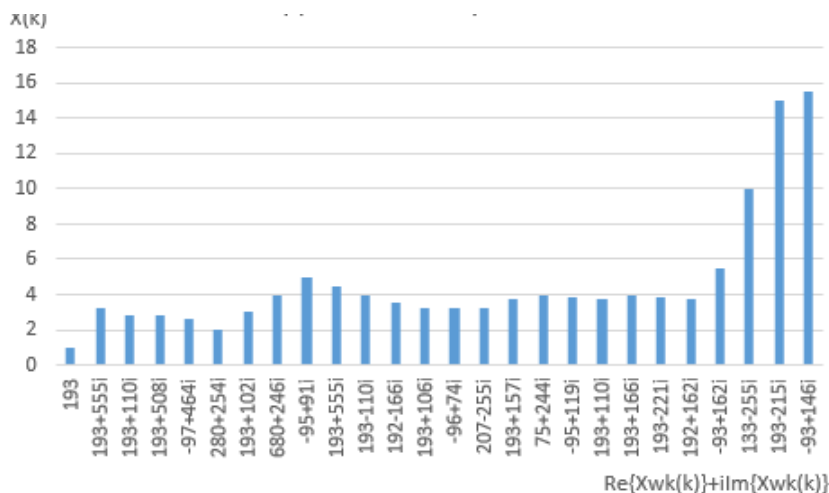


Рис.4. Спектр в базисі функцій Віленкіна-Крестенсона

Результати обчислень для всіх 27 значені зведено у таблицю 3 та графічно представлено на рис. 4.

VI. ПЕРЕТВОРЕННЯ У ОРІЄНТОВАНОМУ БАЗИСІ

При використанні відносно нового методу спектрального аналізу – дискретного ОБ-перетворення – спектр визначається формулою:

$$Y(v) = \sum_{x=0}^{N-1} y(x) \cdot \varphi_d(v, x)$$

де

$$\varphi_d(v, x) = \cos\left(\frac{2\pi}{3} \sum_{s=1}^2 v^{(s)} x^{(s)}\right) + A \sin\left(\frac{2\pi}{3} \sum_{s=1}^2 v^{(s)} x^{(s)}\right)$$

– базисні функції, які приймають виключно дійсні значення на інтервалі N (на відміну від ДПФ та ВКФ), кількість цих різних значень становить m.

Від усіх розглянутих та інших відомих методів дискретного спектрального аналізу ОБ-перетворення відрізняється можливістю зміни кута нахилу вісі перетворення [5, 11, 12]. Ця зміна відображена у вигляді коефіцієнту у виразі для базисної функції  $\varphi_d(v, x)$ .

При виборі параметру m іншим, ніж m=3, змінюється також цей коефіцієнт, в загальному випадку він становить  $A = tg \frac{2\pi i}{m}, i = 0, 1, \dots, m-1$ .

ТАБЛИЦЯ 3 РЕЗУЛЬТАТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВКФ

K	W
0	19-55j
1	19-11j
2	19-5j
3	-9-4j
4	28-25j
5	19-10j
6	68-10j
7	-95+91j
8	19-55j
9	68+2j
10	19+10j
11	19+55j
12	19+11j
13	20-25j
14	193-207j
15	-193+106j
16	-96 74j
17	207-255j
18	193+157j
19	-96+54j
20	207-255j
21	193+157j
22	75+24j
23	-93+16j
24	-25-13j
25	19+21j
26	-93+146j



Отже, навіть при одному і тому самому значенні  $m$  можливі різні значення коефіцієнту  $A$ , а отже – і різні методи. Тому мова йде не про один, а про сімейство методів ОБ-перетворень. В розглянутому випадку при  $m=3$  можливо два значення коефіцієнту:

$$A = tg \frac{2\pi}{3} \text{ та } A = tg \frac{4\pi}{3}.$$

Таким чином, для одного і того самого інтервалу  $N$  можливо реалізувати два типи ОБ-перетворення.

Від ДПХ ОБ-перетворення відрізняється тим, що воно є несиметричним, тобто для прямого перетворення (переходу від функції-оригіналу до спектру) і зворотного використовуються різні набори базисних функцій. Ці набори позначаються відповідними індексами –  $d$  (direct) для прямого перетворення та  $r$  (reverse) – для зворотного. Функції зворотного перетворення  $\varphi_r(v, x)$  визначаються виразом:

$$\varphi_r(v, x) = \cos\left(\frac{2\pi}{3} \sum_{s=1}^2 v^{(s)} x^{(s)}\right) + \frac{1}{A} \sin\left(\frac{2\pi}{3} \sum_{s=1}^2 v^{(s)} x^{(s)}\right).$$

Розглянемо процес обчислення для конкретних значень розглянутого прикладу.

$$Y(v)' = \{1, 25; 6, 067; -6, 67; 4, 8; -6, 18; -6, 26; -2, 4; -6, 26; -6, 42; 4, 81; 3, 13; -6, 2; 3, 17; -6, 36; -6, 26; 6, 36; 3, 13; -2, 4; -6, 2; -66, 35; -6, 26; 6, 36; -6, 35; -6, 26\}$$

Результати обчислень для всіх 27 значень зведено у таблицю 4 та представлено на рис. 5.

ТАБЛИЦЯ 4 РЕЗУЛЬТАТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОБ

K	W
0	-1,25
1	-6,06
2	6,67
3	4,8
4	-6,18
5	-6,26
6	-2,4
7	-6,2
8	-6,6
9	-3,5
10	-6,26
11	6,36
12	-6,26
13	6,36
14	3,13
15	-2,4
16	-6,2
17	-6,6
18	3,5
19	-6,25
20	6,36
21	-6,35
22	-6,26
23	-6,73
24	3,43
25	-5,32
26	4

$$v = x = 0:$$

$$\varphi_d(0, 0) = \cos(0) - \sqrt{3} \sin(0) = 1$$

$$v = x = 1:$$

$$\begin{aligned} \varphi_d(1, 1) &= \cos\left(\frac{2\pi}{3}(1 \cdot 1 + 0 \cdot 0)\right) - \sqrt{3} \sin\left(\frac{2\pi}{3}(1 \cdot 1 + 0 \cdot 0)\right) = \\ &= -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}\sqrt{3}}{2} = -2 \end{aligned}$$

$$v = 2, x = 0:$$

$$\begin{aligned} \varphi_d(1, 2) &= \cos\left(\frac{2\pi}{3}(1 \cdot 2 + 0 \cdot 0)\right) - \sqrt{3} \sin\left(\frac{2\pi}{3}(1 \cdot 2 + 0 \cdot 0)\right) = \\ &= -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}\sqrt{3}}{2} = 1 \end{aligned}$$

$$v = x = 2:$$

$$\begin{aligned} \varphi_d(2, 2) &= \cos\left(\frac{2\pi}{3}(2 \cdot 2 + 0 \cdot 0)\right) - \sqrt{3} \sin\left(\frac{2\pi}{3}(2 \cdot 2 + 0 \cdot 0)\right) = \\ &= -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}\sqrt{3}}{2} = -2 \end{aligned}$$

Результат обчислень для інтервалу  $N = m^3 = 3^3 = 27$  має вигляд:

Порівняння розглянутих методів проводилося виходячи зі значень необхідного обсягу пам'яті для зберігання та функціонування програми обчислення спектрів [1], а також часу виконання математичних операцій при обчисленні спектрів функції добового електроспоживання. Результати порівняння для різних значень  $N$  (для всіх розглянутих методів) та  $m$  (для перетворень ОБ та ВКФ) дозволяють стверджувати, що перетворення ОБ є найбільш ефективним з точки зору спрощення та прискорення розрахунків. Ця перевага стає ще більш наочною при значному збільшенні кількості дискретних значень аналізованого сигналу (часової залежності електроспоживання). Це пояснюється тим, що при збільшенні  $N$  кількість різних значень базисних функцій для перетворень Фур'є та Хартлі зростає пропорційно, в той час як для ВКФ та ОБ ця кількість лишається незмінною і дорівнює  $m$  ( $m$  комплексних значень для ВКФ та  $m$  дійсних значень для ОБ).

Зважаючи на те, що аналіз добового електроспоживання доцільно проводити з інтервалом дискретизації значно меншим, ніж 1 година, як було розглянуто у статті для спрощення та наочності розрахунків, перевага цього методу перед іншими стає беззаперечною, що виводить метод дискретного спектрального перетворення в орієнтованому базисі на провідні позиції в задачах аналізу, прогнозування та керування.



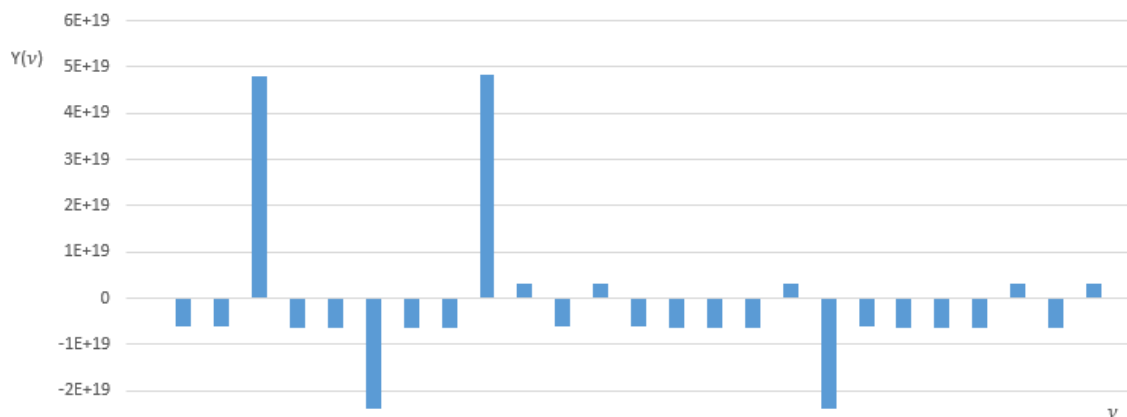


Рис.4. Спектр в базисі функцій Віленкіна-Крестенсона

### ВИСНОВКИ

На основі проведених розрахунків та порівняння різних типів дискретних спектральних методів можна стверджувати наступне:

- Базисні функції дискретного перетворення Хартлі приймають  $N$  виключно дійсних значень, на відміну від ДПФ з  $N$  комплексними значеннями;
- При застосуванні методу Віленкіна-Крестенсона відліки спектру в загальному випадку є комплексними; на відміну від ДПФ, цей метод оперує з даними, представленими у  $m$ -ічній системі числення, де  $m$  – просте число;
- Перехід до  $m$ -ічної системи числення дозволяє суттєво скоротити кількість різних значень базисних функцій ВКФ на інтервалі визначення;
- Перетворення в орієнтованому базисі є найбільш доцільним серед розглянутих методів, оскільки при певному виборі параметрів дозволяє значно спростити та відповідно прискорити розрахунок за рахунок малої кількості різних значень базисних функцій на одному і тому самому інтервалі визначення  $N$ ; до того ж значення є дійсними та простими;
- Отже, для задачі аналізу та прогнозування часової залежності електроспоживання MicroGrid найбільш перспективним є застосування саме дискретного спектрального перетворення в орієнтованому базисі.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Zhuikov, V. Y.; Tereshchenko, T. A.; Peterheria, J. S., Diskretnyye spektral'nyye preobrazovaniya na konechnykh intervalakh: uchebnoye posobiye [Discrete spectral transformations at finite intervals: a training manual], Kiev: NTUU "KPI", 2010, pp. 3-7.
- [2] V. Y. Zhuikov, T. A. Tereshchenko, and J. S. Peterheria, Simmetrichnoye preobrazovaniye na konechnykh intervalakh: uchebnoye posobiye [Symmetric Transformation at Finite Intervals: A Tutorial]. Kiev: NTUU "KPI," 2000.
- [3] B. W. Dickinson and K. Steiglitz, "Eigenvectors and Functions of the Discrete Fourier Transform," *IEEE Trans. Acoust.*, vol. 30, no. 1, pp. 25–31, 1982, DOI: [10.1109/TASSP.1982.1163843](https://doi.org/10.1109/TASSP.1982.1163843).
- [4] H. Zhang, T. R. Blackburn, B. T. Phung, and D. Sen, "A novel wavelet transform technique for on-line partial discharge measurements part 1: WT de-noising algorithm," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 1, pp. 3–14, 2007, DOI: [10.1109/TDEL.2007.302864](https://doi.org/10.1109/TDEL.2007.302864).
- [5] W. L. Hsue and W. C. Chang, "Real discrete fractional Fourier, Hartley, generalized Fourier and generalized Hartley transforms with many parameters," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 62, no. 10, pp. 2594–2605, 2015, DOI: [10.1109/TCSI.2015.2468996](https://doi.org/10.1109/TCSI.2015.2468996).
- [6] A. M. Trakhtman and B. A. Trakhtman, *Osnovy teorii diskretnykh signalov na konechnykh intervalakh [Fundamentals of the theory of discrete signals at finite intervals]*. Moscow: Soviet Radio, 1975.
- [7] O. V. Nadtochii, "Analiz matematichnoyi modeli pereklyadky porshnya v zazori tsylindro-porshnevoyi hrupy [Analiz matematichnoyi modeli pereklyadky porshnya v zazori tsylindro-porshnevoyi hrupy]," *NAU*, vol. 4, pp. 122–125, 1998.
- [8] N. V. Koshkina, "Spektral'ni metody komp'yuternoyi stenoahrafiyi ta metody stehoanalizu z navchannyam i klasyfikatsiyeyu [Spektral'ni metody komp'yuternoyi stenoahrafiyi ta metody stehoanalizu z navchannyam i klasyfikatsiyeyu]," V.M.Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, 2016, URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16156>.
- [9] T. A. Tereshchenko, T. A. Khyzhniak, L. G. Laikova, and A. S. Parkhomenko, "Issledovaniye avtokorrelatsionnykh funktsiy v elektricheskikh tsepyakh s ispol'zovaniyem preobrazovaniya v oriyentirovannom bazise [Issledovaniye avtokorrelatsionnykh funktsiy v elektricheskikh tsepyakh s ispol'zovaniyem preobrazovaniya v oriyentirovannom]," *Techn. Electrodyn.*, no. 4, pp. 29–31, 2016, URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/135831>.
- [10] T. Tereshchenko, J. Yamnenko, and Y. Khokhlov, "Processing of biometric information based on matched filters," in 2016 IEEE International Scientific Conference "Radio Electronics and Info Communications", UkrMiCo 2016 - Conference Proceedings, 2016, DOI: [10.1109/UkrMiCo.2016.7739600](https://doi.org/10.1109/UkrMiCo.2016.7739600).
- [11] T. Tereshchenko, J. Yamnenko, D. Larin, and L. Klepach, "Express diagnostics of cardiovascular system by spectral methods," in 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2017 - Proceedings, 2017, pp. 445–447, DOI: [10.1109/CADSM.2017.7916172](https://doi.org/10.1109/CADSM.2017.7916172).
- [12] J. Yamnenko, T. Tereshchenko, Y. Khokhlov, O. Bondarenko, and A. Polishuk, "Data transmission with code division based



on transform in rotating coordinates,” in 58th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2017 - Proceedings, 2017, vol. 2017-November, pp. 1–6, DOI: [10.1109/RTUCON.2017.8124839](https://doi.org/10.1109/RTUCON.2017.8124839).

Надійшла до редакції 19 серпня 2020 року

UDC 621.3

## Use of Spectral Transforms for Analysis of Power Consumption of Local Object

V. O. Osokin<sup>f</sup>, ORCID [0000-0002-3188-1184](https://orcid.org/0000-0002-3188-1184)

V. V. Levchenko, ORCID [0000-0001-7748-4670](https://orcid.org/0000-0001-7748-4670)

Yu. S. Yamnenko<sup>g</sup>, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-0796-6420](https://orcid.org/0000-0002-0796-6420)

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—The paper is devoted to the use and comparative analysis of discrete spectral transforms of Fourier, Hartley, Wilenkin-Crestenson and transform at the oriented basis (OB). These methods are considered for analysis of discrete time dependence of electrical energy consumption in local objects like MicroGrid. The prediction of electrical power consumption in such object is quite actual task. One of the ways to solve it is use of spectral and wavelet analysis methods. The non-stationary character of power consumption time dependence curve needs to fulfill preliminary stage of smoothing. This is why wavelet analysis could be effectively used here – as a result of its use we obtain smoothed and compressed version of initial signal (so called “trend”). And the core of wavelet is defined by the type of basic function. These could be, in particular, basic functions of spectral transforms. This is why it was decided to compare different spectral methods – Fourier, Hartley, Wilenkin-Crestenson, and spectral transform at oriented basis.

Comparison of spectral methods was carried out according to the following criteria: number of computational operations, simplicity and accuracy of calculations. The amplitude-frequency and phase-frequency spectra of the investigated signal for different spectral methods are considered. The process of finding the spectrum for the above methods was considered for the interval from 0 to 26. The interval was chosen based on demands of the transform at oriented basis where it's necessary to provide the lengths of initial discrete function dividable to 3 ( $N=33=27$ ). For the rest methods the interval could be changes accordingly. Thus it gives more objective assessment of the use of spectral methods for the analysis of power consumption of a local object. During the analysis of different spectral methods it was taken into account that Fourier and Wilenkin-Crestenson transforms operate with complex values of the spectra, while Hartley and OB-transforms deal with the real numbers. At the same time, Wilenkin-Crestenson and OB-transforms operate with the number presented in m-ary counting system. It should be noted that the transition to the m-ary system makes it possible to significantly simplify the calculation process at the interval of determination for the Wilenkin-Crestenson method. The Hartley transform differs from the Fourier transform because it operates only with real values, that leads to significant decreasing of the values of basic function and therefore simplifies and accelerates the calculation of the spectrum. It was shown that, in contrast to the Fourier transform, the transform at the oriented basis is asymmetrical, that is, for direct conversion, the angle of inclination of the transformation axis is possible. Comparisons of the considered methods were made on the basis of the values of the required amount of memory for the operation and storage of the program for the calculation of the spectra, as well as the time of performing mathematical operations for the calculation of the spectra of the daily power consumption function. In this way, the transform at the oriented basis is most effective for simplifying and speeding up the calculations. Given that the analysis of fractional power consumption is advisable to perform at a sampling interval of less than one hour, the advantage of this method becomes indisputable, thus showing that the method at the oriented basis is the most appropriate among the considered ones, because with a certain set of parameters allows to accelerate significantly spectrum for analyzing the power consumption signal.

**Keywords** — spectral analysis; spectral analysis; Fourier transform; Hartley transform; oriented basis transform; Wilenkin-Crestenson transform.

