

Гапон Дмитро Анатолійович, доцент, д.т.н., завідувач кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем», +38(095)593-95-77, Dmytro.Hapon@khpri.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8609-9707

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

Дем'яненко Роман Ігорович, Ph.D., старший викладач кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем», +38(067)980-16-32 Roman.Demianenko@khpri.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0902-2607

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

Солодовник Андрій Олександрович, аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем», +38(066)602-25-55, Andrii.Solodovnyk@khpri.edu.ua, ORCID ID: 0009-0006-3196-3530

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

Светелік Олександр Олександрович, аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем», +38(067)539-12-69, Oleksandr.Svetelik@khpri.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7005-6761

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

МЕТОД РЕКОНСТРУКЦІЇ ІМПУЛЬСНИХ ЗБУРЕНЬ НАПРУГИ НА ОСНОВІ КОНКУРУЮЧИХ ГАРМОНІЧНИХ АПРОКСИМАЦІЙ

***Анотація.** У роботі запропоновано метод реконструкції імпульсних збурень напруги в електроенергетичних мережах на основі конкуруючих гармонічних апроксимацій. Підхід ґрунтується на побудові кількох параметричних моделей сигналу у ковзному часовому вікні та виборі найкращої моделі за критерієм мінімальної нев'язки (похибки апроксимації). Для підвищення стійкості оцінювання параметрів застосовано віконні функції з покращеними властивостями пригнічення спектрального витікання, а також процедури уточнення оцінок за ітераційними методами. На відміну від традиційних частотно-часових методів (DFT, вейвлет-перетворень, S-перетворення), запропонована схема забезпечує безпосереднє відтворення часової форми імпульсного збурення та дозволяє кількісно оцінювати його амплітуду, тривалість і момент появи. Наведено структуру алгоритму, описано правила формування набору конкуруючих апроксимацій і критерії їхнього порівняння. Показано, що метод придатний для задач моніторингу якості електроенергії та може бути реалізований у режимі близькому до реального часу за умови обмеженої кількості гармонічних складових і оптимізації обчислень.*

***Ключові слова:** якість електроенергії; імпульсні збурення напруги; гармонічна апроксимація; реконструкція сигналів, електрична мережа.*

Hapon Dmytro, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, +38(095)593-95-77, Dmytro.Hapon@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8609-9707

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

2 Kirpichova St., Kharkiv, Ukraine, 61002

Demianenko Roman, Ph.D., Senior Lecturer, Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, +38(067)980-16-32 Roman.Demianenko@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0902-2607

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

2 Kirpichova St., Kharkiv, Ukraine, 61002

Solodovnik Andriy, postgraduate student of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, +38(066)602-25-55, Andrii.Solodovnyk@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0006-3196-3530

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

2 Kirpichova St., Kharkiv, Ukraine, 61002

Svetelik Oleksandr, postgraduate student of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, +38(067)539-12-69, Oleksandr.Svetelik@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7005-6761

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

2 Kirpichova St., Kharkiv, Ukraine, 61002

METHOD FOR RECONSTRUCTING IMPULSIVE VOLTAGE DISTURBANCES BASED ON COMPETING HARMONIC APPROXIMATIONS

Abstract. *This paper proposes a method for reconstructing impulsive voltage disturbances in electric power networks based on competing harmonic approximations. The approach relies on constructing multiple parametric signal models within a sliding time window and selecting the optimal model according to a minimum residual (approximation error) criterion. To enhance the robustness of parameter estimation, window functions with improved spectral leakage suppression properties are employed, along with iterative procedures for refining the estimates. Unlike traditional time–frequency methods (DFT, wavelet transforms, S-transform), the proposed scheme enables direct reconstruction of the time-domain waveform of an impulsive disturbance and allows quantitative estimation of its amplitude, duration, and time of occurrence. The algorithmic structure is presented, and the rules for forming the set of competing approximations as well as the criteria for their comparison are described. It is shown that the method is suitable for power quality monitoring applications and can be implemented in near real-time, provided that the number of harmonic components is limited and computational optimizations are applied.*

Keywords: *power quality; impulsive voltage disturbances; harmonic approximation; signal reconstruction; electric power network.*

Актуальність теми. Забезпечення якості електричної енергії є критичним завданням для сучасних систем електропостачання, особливо в умовах зростаючої

частки відновлюваних джерел енергії та нелінійних навантажень. Серед широкого спектра електромагнітних завад особливу складність для аналізу становлять короткочасні імпульсні збурення та комутаційні перенапруги. Такі аномалії, тривалість яких може складати від одиниць мілісекунд до десятків мілісекунд (20–30 мс), здатні викликати збої в роботі чутливої мікропроцесорної техніки, хибні спрацювання релейного захисту та прискорене старіння ізоляції обладнання[1–3].

Аналіз останніх публікацій. Традиційні підходи до моніторингу якості електроенергії базуються на дискретному перетворенні Фур'є (DFT). Однак, в умовах нестаціонарних процесів, таких як різкі сплески напруги, DFT страждає від ефекту розтікання спектра та явища Гіббса. Це призводить до того, що енергія імпульсу «розмазується» по спектру гармонік, спотворюючи результати вимірювання основних параметрів режиму і унеможливаючи точне відновлення форми самої завади [2–4].

Для вирішення задачі локалізації імпульсів широко застосовуються методи часо-частотного аналізу, зокрема вейвлет-перетворення та S-перетворення. Хоча ці інструменти є ефективними для детектування факту виникнення події та визначення її часових меж, вони мають обмежену застосовність для задач реконструкції форми сигналу. Складність вибору материнського вейвлета та обчислювальна громіздкість зворотних перетворень часто не дозволяють отримати метрологічно достовірний профіль імпульсу в реальному часі[5, 6].

Іншим напрямом є використання адаптивних стохастичних фільтрів, таких як фільтр Калмана (Kalman Filter) та його модифікації. Ці методи дозволяють відстежувати параметри гармонічної моделі сигналу динамічно. Проте їхня ефективність суттєво залежить від апріорного знання статистичних характеристик шуму та коректного налаштування коваріаційних матриць, що є нетривіальним завданням в умовах реальних мереж зі змінною топологією. Більше того, класичні фільтри мають інерційність і можуть сприймати різкий імпульс як зміну стану

системи, а не як адитивну заваду, що призводить до перехідних похибок оцінювання[7].

Актуальною науковою проблемою залишається розробка методу, який поєднував би точність гармонічного аналізу з робастністю до аномальних викидів. Необхідний підхід, що дозволяє розділити вимірний сигнал на дві складові: фундаментальну квазістаціонарну модель напруги (з урахуванням дрейфу частоти мережі) та сигнал збурення[8].

У цій роботі пропонується новий метод виділення імпульсних збурень, заснований на концепції конкуруючих гармонічних апроксимацій. Ідея полягає у використанні двох паралельних моделей, ідентифікація яких відбувається на зсунутих у часі вікнах спостереження методом зважених найменших квадратів (WLS). Алгоритм автоматично виконує селекцію тієї моделі, яка побудована на ділянці сигналу, вільній від збурень, що дозволяє синтезувати "еталонну" напругу і шляхом її віднімання від вхідного сигналу з високою точністю реконструювати форму імпульсної завади[9 - 11].

Математична модель сигналу та метод оцінювання параметрів.

Розглянемо трифазну систему напруг, спостережувану на дискретному інтервалі часу (вікні) довжиною N відліків. Для кожної фази $\phi \in \{a, b, c\}$ сигнал апроксимується тригонометричним рядом Фур'є зі змінною частотою та адитивною постійною складовою.

Аналітичний вираз для апроксимуючої моделі $\hat{u}_\phi(t)$ у кожному вікні має вигляд:

$$\hat{u}_\phi(t, \Theta_\phi, \omega) = r_{0,\phi} + \sum_{k=1}^K (a_{k,\phi} \cos(k\omega t) + b_{k,\phi} \sin(k\omega t)), \quad (1)$$

де t — локальний час відносно центру вікна аналізу ($t \in [-T_{win}/2, T_{win}/2]$), $r_{0,\phi}$ — постійна складова сигналу фази ϕ , K — порядок моделі (кількість гармонік), ω — основна кутова частота мережі, яка вважається спільною для всіх трьох фаз у межах

вікна спостереження, $a_{k,\phi}, b_{k,\phi}$ — коефіцієнти k -ї гармоніки (косинусна та синусна квадратурні складові).

Вектор невідомих лінійних параметрів для кожної фази позначимо як $\Theta_\phi = [r_{0,\phi}, a_{1,\phi}, b_{1,\phi}, \dots, a_{K,\phi}, b_{K,\phi}]^T$.

Задача оцінювання параметрів формулюється як мінімізація зваженої суми квадратів нев'язок (Weighted Least Squares — WLS) між вимірними дискретними значеннями $u_\phi[n]$ та моделлю. Цільовий функціонал J будується сукупно для трьох фаз, що дозволяє підвищити стійкість оцінки частоти в умовах несиметрії або спотворень в окремих фазах:

$$J(\Theta_a, \Theta_b, \Theta_c, \omega) = \sum_{\phi \in \{a,b,c\}} \sum_{n=0}^{N-1} w[n] \cdot (u_\phi[n] - \hat{u}_\phi(t_n, \Theta_\phi, \omega))^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $w[n]$ - вагова віконна функція. У роботі використано вікно Блекмана-Гарріса, яке характеризується низьким рівнем бічних пелюсток, що дозволяє ефективно пригнічувати ефект розтікання спектра, спричинений асинхронністю дискретизації відносно періоду мережі[4].

Оскільки частота ω входить у модель нелінійно, пряме аналітичне рішення задачі мінімізації J неможливе. Застосовано ітеративний підхід, що розділяє задачу на два кроки: оцінювання лінійних параметрів (Θ) та уточнення нелінійного параметра (ω).

На кожній ітерації виконуються наступні дії:

Крок 1: Оцінювання амплітудних коефіцієнтів.

При фіксованому значенні частоти $\omega^{(i)}$ задача зводиться до лінійної регресії. Вектори параметрів Θ_ϕ знаходяться шляхом розв'язання системи нормальних рівнянь або, для підвищення обчислювальної ефективності, методом по координатного спуску, реалізованим у запропонованому алгоритмі.

Крок 2: Уточнення частоти (метод Ньютона).

Оновлення частоти виконується методом Ньютона–Рафсона, використовуючи аналітичні вирази першої та другої похідних функціоналу нев'язки по частоті:

$$\omega^{(i+1)} = \omega^{(i)} - \frac{\frac{\partial J}{\partial \omega} \Big|_{\omega^{(i)}}}{\frac{\partial^2 J}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega^{(i)}}}. \quad (3)$$

Похідні розраховуються як сума внесків від усіх трьох фаз:

$$\frac{\partial J}{\partial \omega} = -2 \sum_{\phi} \sum_n w[n] \cdot e_{\phi}[n] \cdot \frac{\partial \hat{u}_{\phi}}{\partial \omega}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 J}{\partial \omega^2} \approx 2 \sum_{\phi} \sum_n w[n] \cdot \left(\left(\frac{\partial \hat{u}_{\phi}}{\partial \omega} \right)^2 + e_{\phi}[n] \cdot \frac{\partial^2 \hat{u}_{\phi}}{\partial \omega^2} \right), \quad (5)$$

де $e_{\phi}[n] = u_{\phi}[n] - \hat{u}_{\phi}[n]$ — поточна помилка апроксимації.

Аналітичні вирази похідних моделі мають вигляд:

$$\frac{\partial \hat{u}_{\phi}}{\partial \omega} = \sum_{k=1}^K kt \left(-a_{k,\phi} \sin(k\omega t) + b_{k,\phi} \cos(k\omega t) \right). \quad (6)$$

Процес повторюється до виконання умов збіжності по приросту частоти $|\Delta\omega| < \varepsilon_{\omega}$ та відносній зміні коефіцієнтів $|\Delta\Theta| < \varepsilon_{\Theta}$, або до досягнення ліміту ітерацій.

Для виділення короткочасних аномалій на фоні синусоїдального сигналу пропонується алгоритм, що базується на принципі конкуруючих моделей. Ключова гіпотеза методу полягає в тому, що імпульсна завада, маючи скінченну тривалість τ_{imp} , не може одночасно спотворювати оцінку гармонічних параметрів у двох часових вікнах, які рознесені у часі на величину, більшу за τ_{imp} .

Використовується наступна топологія вікон аналізу. Нехай необхідно відновити «чисте» значення напруги в момент часу t_n . Для цього формуються дві незалежні моделі апроксимації на вікнах довжиною M відліків, що «зустрічаються» у точці t_n :

Ретроспективна модель (Left Window / Model A): Будується на інтервалі $[t_n - M + 1, \dots, t_n]$. У цій моделі точка t_n є останньою точкою вікна (правий край).

Перспективна модель (Right Window / Model B): Будується на інтервалі $[t_n, \dots, t_n + M - 1]$. У цій моделі точка t_n є першою точкою вікна (лівий край).

Таким чином, для кожного відліку сигналу ми маємо дві альтернативні оцінки $\hat{u}^A(t_n)$ та $\hat{u}^B(t_n)$, отримані за ідентичним алгоритмом, але на різних масивах даних.

Для забезпечення стабільності оцінки частоти ω , яка є спільною для обох локальних моделей, використовується додаткове опорне вікно збільшеної довжини (або комбінація вікон), що охоплює обидва інтервали. Це дозволяє зафіксувати частоту мережі й уникнути її хибних флуктуацій під час проходження імпульсу.

Оскільки базис Фур'є є гладким, наявність різкого імпульсу всередині вікна аналізу призводить до різкого зростання середньоквадратичної похибки апроксимації (нев'язки) на всьому інтервалі цього вікна.

Для обох моделей ($j \in \{A, B\}$) на кожному кроці розраховується інтегральний показник якості апроксимації D_j (deviation), що являє собою зважену суму квадратів помилок по трьох фазах:

$$D_j(t_n) = \sum_{\phi \in \{a, b, c\}} \left(\frac{\sum_k w[k] \cdot (u_\phi[k] - \hat{u}_{\phi, j}[k])^2}{\sum_k w[k]} \right). \quad (7)$$

Логіка селекції базується на мінімізації цього показника. Якщо у момент t_n імпульс знаходиться, наприклад, у "минулому" (всередині вікна A), то значення D_A буде аномально високим, тоді як вікно B, що охоплює "майбутнє", міститиме чистий сигнал (або меншу частину енергії імпульсу), і D_B буде малим.

Результуюче відновлене значення напруги $\hat{u}_{out}(t_n)$ визначається за правилом:

$$\hat{u}_{out}(t_n) = \begin{cases} \hat{u}^B(t_n), & \text{if } D_A(t_n) > D_B(t_n) \\ \hat{u}^A(t_n), & \text{else} \end{cases}. \quad (8)$$

Такий підхід забезпечує автоматичне "перемикання" на ту модель, яка побудована на неспотвореній ділянці синусоїди.

Далі виконується реконструкція імпульсу. Після синтезу результуючого сигналу $\hat{u}_{out}(t)$, який являє собою ідеальну полігармонічну модель основної мережі (включаючи гармонічні спотворення, що є стаціонарними, але виключаючи перехідні процеси), сигнал імпульсної завади $u_{imp}(t)$ знаходиться шляхом простого віднімання:

$$u_{imp}(t) = u_{meas}(t) - \hat{u}_{out}(t). \quad (9)$$

Отриманий сигнал $u_{imp}(t)$ містить інформацію про форму, амплітуду та енергію імпульсу, очищену від впливу основної частоти мережі та її гармонік.

Апробація запропонованого методу конкуруючих апроксимацій була проведена на реальних сигналах трифазної мережі, що містять комутаційні перехідні процеси. Частота дискретизації сигналів становила $F_s = 8000$ Гц.

На вхід алгоритму подавалася трифазна група напруг та струмів, зафіксована під час перехідного процесу (рис. 1).

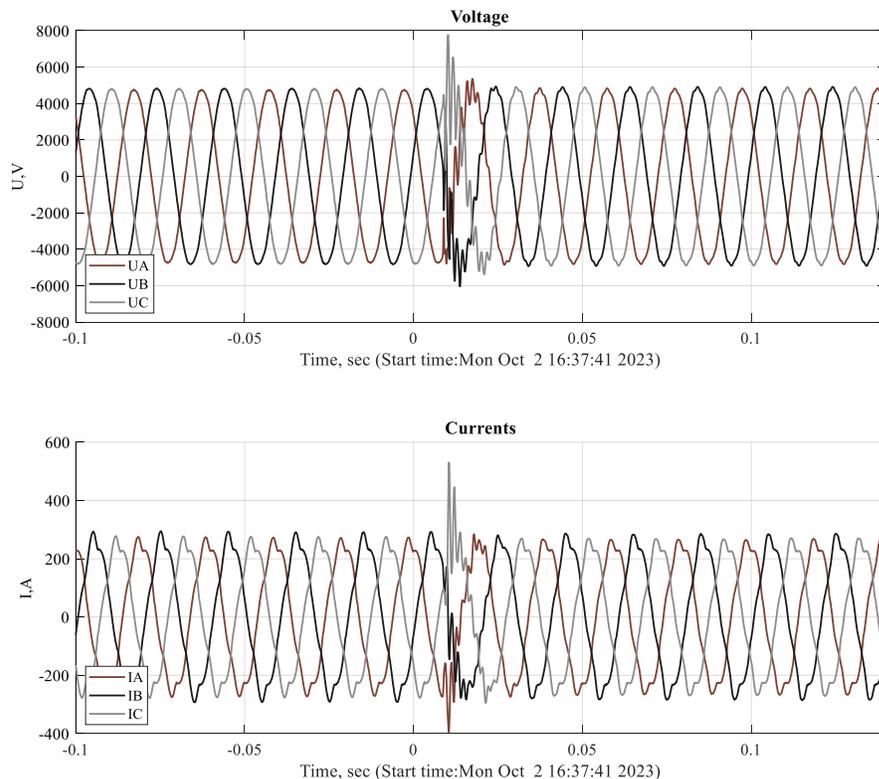


Рисунок 1 – Осцилограми трифазної напруги та струму під час перехідного процесу.

Як видно з осцилограм, у момент часу $t \approx 0.01$ с відбувається різке збурення, що супроводжується високочастотними коливаннями в усіх трьох фазах. Амплітуда напруги в момент комутації сягає пікових значень, що перевищують номінальну амплітуду (близько 5000 В), а форма кривої струму також зазнає значних спотворень.

Завданням алгоритму було виділити чисту гармонічну складову основної частоти та, віднявши її від вхідного сигналу, реконструювати профіль імпульсної завади.

Детальний аналіз роботи методу для фази А представлено на рис. 2 (верхній графік). Показано вихідний сигнал (Original), який містить виражену осцилюючу заваду в інтервалі часу 0.07...0.08 с.

Чорна суцільна лінія (Approximated C) демонструє результат роботи запропонованого алгоритму конкуруючих апроксимацій. Видно, що реконструйована крива є ідеальною синусоїдою, яка повністю ігнорує збурення. Це підтверджує, що алгоритм коректно вибрав часове вікно, вільне від артефактів (вікно "з майбутнього" або "з минулого" відносно точки збурення), і використав його параметри для відновлення сигналу в точці аналізу.

Для порівняння, сіра пунктирна лінія (Approximated S) показує результат роботи класичного методу з одним фіксованим ковзним вікном. Помітно, що в моменти часу, коли вікно частково захоплює початок або кінець імпульсу, апроксимація «зривається», намагаючись підлаштуватися під середнє значення спотвореної ділянки.

Нижній графік на рис. 2 ілюструє різницевий сигнал (Delta), який представляє собою виділену імпульсну заваду.

Можна побачити, що класичний підхід (Single approximation, сірий пунктир): Демонструє значні «фантомні» сплески помилки в моменти $t \approx 0.03$ с та $t \approx 0.05$ с, а

також спотворення форми основного імпульсу. Це пояснюється тим, що навіть незначні флуктуації або шум потрапляють у вікно усереднення та впливають на оцінку параметрів гармонік (ефект Гіббса).

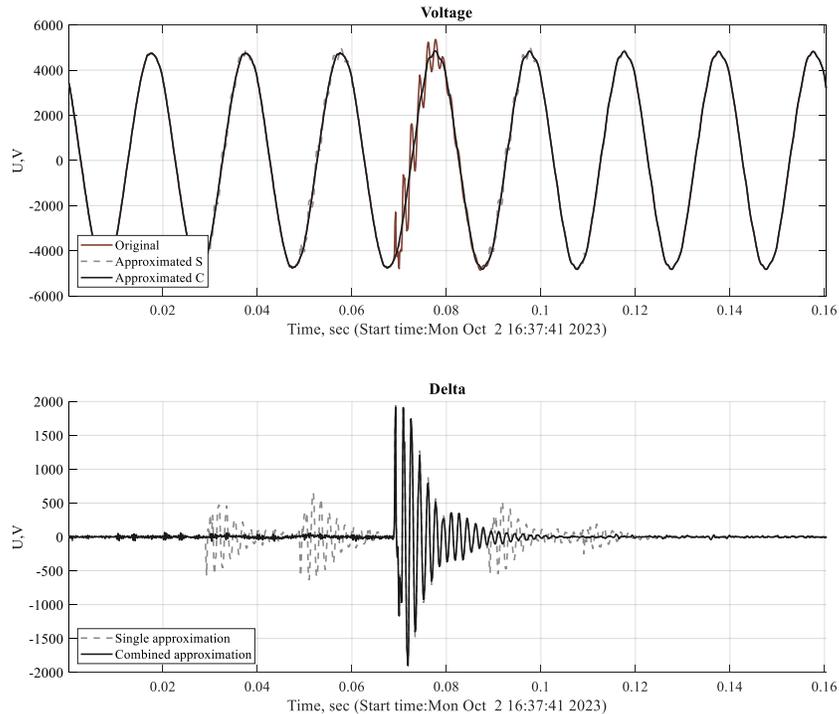


Рисунок 2 – Результат виділення імпульсу. Порівняння оригінального сигналу, класичної апроксимації (S) та запропонованої конкуруючої апроксимації (C). Сигнал помилки (Delta) — виділений імпульс.

У той же час запропонований метод (Combined approximation, чорна лінія): Демонструє нульову похибку на стаціонарних ділянках синусоїди. У момент виникнення завади ($t \approx 0.07$ с) метод чітко виділяє високочастотний осцилюючий імпульс амплітудою близько 2000 В.

Важливо зазначити, що запропонований метод дозволив отримати чіткі межі початку та кінця перехідного процесу без ефекту «розмивання» у часі, який притаманний методам з фіксованим вікном. Отриманий профіль імпульсу (чорна

крива Delta) є математично точним відтворенням фізичного збурення, очищеним від впливу основної гармоніки мережі.

Результати моделювання підтверджують, що метод конкуруючих апроксимацій забезпечує значно вищу селективність при виділенні імпульсних завад порівняно з класичними методами ковзного вікна. Алгоритм дозволяє повністю усунути вплив імпульсу на оцінку параметрів основної гармоніки, що робить його перспективним для використання в сучасних аналізаторах якості електроенергії.

Отримані результати демонструють, що запропонований метод конкуруючих апроксимацій ефективно вирішує класичну проблему компромісу між часовою та частотною роздільною здатністю. У традиційних методах (STFT, ковзне середнє) попадання імпульсу у вікно аналізу неминуче призводить до зміщення оцінок амплітуд і фаз («змазування»). Натомість, логіка перемикавання між «ретроспективною» та «перспективною» моделями дозволяє алгоритму працювати як нелінійний фільтр, що динамічно змінює свою структуру. Фактично, метод реалізує стратегію "уникнення завади", завжди спираючись на достовірну історію сигналу або на його достовірне майбутнє.

Це дає суттєву перевагу над вейвлет-перетворенням у задачах метрології: замість отримання набору вейвлет-коефіцієнтів, які складно інтерпретувати у термінах енергетики, ми отримуємо відновлену форму кривої у фізичних величинах, що дозволяє безпосередньо розраховувати енергію імпульсу.

Важливим аспектом практичного застосування методу є його обчислювальна вартість. На відміну від методів на базі нейронних мереж або складних стохастичних фільтрів, запропонований алгоритм є детермінованим.

Основне навантаження припадає на розрахунок двох паралельних процедур WLS. Враховуючи, що розмірність матриць визначається кількістю гармонік K (у нашому випадку $K \approx 10 \dots 40$), такі операції можуть бути ефективно реалізовані на сучасних мікроконтролерах з підтримкою FPU та DSP-інструкцій (наприклад, серії STM32F4/G4/H7), які широко використовуються в пристроях релейного захисту.

Фіксована кількість ітерацій (у дослідженні використовувалось 6 ітерацій для збіжності частоти) гарантує передбачуваний час виконання, що є критичним для систем жорсткого реального часу.

Попри високу ефективність, метод має низку обмежень, які необхідно враховувати при проектуванні систем моніторингу:

Тривалість імпульсу: Метод коректно працює лише за умови, що тривалість завади τ_{imp} менша за довжину вікна аналізу T_{win} . Якщо $\tau_{imp} \geq T_{win}$, виникає ситуація, коли обидва вікна (і ліве, і праве) частково або повністю перекриваються збуренням, що призводить до зростання помилки реконструкції в обох моделях. Для досліджуваних параметрів ($F_s = 8$ кГц, $M = 320$) максимальна тривалість імпульсу, що гарантовано виділяється, становить близько 40 мс.

Затримка обробки (Latency): Оскільки для формування «перспективної» моделі необхідно мати вибірку даних «наперед», метод вносить затримку у видачу результату, рівну довжині вікна M . У нашому випадку це 40 мс (два періоди мережі). Така затримка є неприйнятною для швидкодіючого захисту від коротких замикань, проте є цілком допустимою для задач моніторингу якості електроенергії, аналізу подій та роботи автоматики, що не вимагає миттєвої реакції (наприклад, АЧР або регулювання напруги)[1,2].

«Мертва зона» між подіями: Після проходження імпульсу алгоритму потрібен час $T_{rec} \approx T_{win}$, щоб оновити буфери даних чистим сигналом. Якщо слідом за першим імпульсом одразу слідує другий (з інтервалом менше M), точність реконструкції другого імпульсу може знизитися.

Висновки.

У роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу виділення та реконструкції форми короткочасних імпульсних збурень напруги в електричних мережах. На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

Розроблено метод конкуруючих гармонічних апроксимацій, який, на відміну від класичних методів лінійної фільтрації, використовує механізм динамічної селекції часового вікна. Це дозволяє розділити задачу оцінювання параметрів режиму та задачу виділення завади, забезпечуючи нульову фазову та амплітудну похибку відновлення основної гармоніки на стаціонарних ділянках.

Запропоновано алгоритм ітеративного оцінювання, що поєднує метод зважених найменших квадратів (WLS) із процедурою Ньютона–Рафсона для уточнення частоти мережі. Це забезпечує інваріантність методу до дрейфу частоти в межах стандартних відхилень ($\pm 0,5$ Гц і більше), що критично важливо для коректного віднімання фундаментальної складової.

Експериментально підтверджено ефективність методу для виділення імпульсів тривалістю до 20–30 мс (при довжині вікна аналізу 40 мс). Показано, що метод дозволяє реконструювати профіль імпульсу без спотворень, характерних для методів з фіксованим вікном (ефект Гіббса, згладжування піків) [3, 4].

Практична цінність: Запропонований алгоритм має детерміновану обчислювальну складність і придатний для імплементації у вбудовані системи на базі сучасних мікроконтролерів (наприклад, STM32) для задач релейного захисту, реєстраторів аварійних подій та аналізаторів якості електроенергії.

Перспективою подальших досліджень є адаптація методу для роботи в умовах насичення трансформаторів струму та розробка критеріїв для класифікації типів виділених імпульсів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.
2. IEEE Std 1159-2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York: IEEE, 2019.
3. Caicedo J., Agudelo-Martínez D., Rivas-Trujillo E, Meyer, J. A systematic review of real-time detection and classification of power quality disturbances (PQDs). Protection and Control of Modern Power Systems, 2023. Vol. 8. P. 3. DOI: 10.1186/s41601-023-00277-y

4. Li Z., Chen X., Zhang Y., Wang H., Liu Y. A Minimum Side-Lobe Optimization Window Function and Its Application in Harmonic Detection of an Electricity Grid. *Energies*, 2019. Vol. 12. № 13. P. 2619. DOI: 10.3390/en12132619.
5. Qiu W., Tang J., Xu Y., Zhang X., Chen Q. Power quality disturbances recognition using modified S-transform. *Electric Power Systems Research*, 2019. Vol. 174. P. 105876. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.105876. URL:
6. Tang Q., Zhang H., Wu Y., Li K., Zhang Y. Classification of complex power quality disturbances using optimized S-transform and kernel SVM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020. Vol. 67, № 11. P. 9715–9723. DOI: 10.1109/TIE.2019.2952823.
7. de Apráiz M., Diego R. I., Barros J. An Extended Kalman Filter Approach for Accurate Instantaneous Dynamic Phasor Estimation. *Energies*, 2018. Vol. 11, № 11. P. 2918. DOI: 10.3390/en11112918.
8. Xu S., Liu H., Bi T., Martin K. E. An improved Taylor weighted least squares method for estimating synchrophasor. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020. Vol. 120. P. 105987. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.105987.
9. Xi Y., Tang X., Li Z., Wang Y., Liu J. Harmonic estimation in power systems using an optimised adaptive Kalman filter based on PSO-GA. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019. Vol. 13, № 17. P. 3968–3979. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6148.
10. Ray P. K., Pohan P. S., Panda G. Real time harmonics estimation of distorted power system signal using variable leaky LMS. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016. Vol. 75. P. 91–98. DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.08.017.
11. Beltran-Carbajal F., Tapia-Olvera R., Valderrabano-Gonzalez A., Yanez-Badillo H. An asymptotic and algebraic estimation method of harmonics. *Electric Power Systems Research*, 2022. Vol. 206. P. 107771. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107771.

REFERENCES:

1. IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.
2. IEEE Std. 1159-2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York: IEEE, 2019.
3. Caicedo J., Agudelo-Martínez D., Rivas-Trujillo E, Meyer, J. A systematic review of real-time detection and classification of power quality disturbances (PQDs). *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023. Vol. 8. P. 3. DOI: 10.1186/s41601-023-00277-y
4. Li Z., Chen X., Zhang Y., Wang H., Liu Y. A Minimum Side-Lobe Optimization Window Function and Its Application in Harmonic Detection of an Electricity Grid. *Energies*, 2019. Vol. 12. № 13. P. 2619. DOI: 10.3390/en12132619.
5. Qiu W., Tang J., Xu Y., Zhang X., Chen Q. Power quality disturbances recognition using modified S-transform. *Electric Power Systems Research*, 2019. Vol. 174. P. 105876. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.105876. URL:
6. Tang Q., Zhang H., Wu Y., Li K., Zhang Y. Classification of complex power quality disturbances using optimized S-transform and kernel SVM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020. Vol. 67, № 11. P. 9715–9723. DOI: 10.1109/TIE.2019.2952823.
7. de Apráiz M., Diego R. I., Barros J. An Extended Kalman Filter Approach for Accurate Instantaneous Dynamic Phasor Estimation. *Energies*, 2018. Vol. 11, № 11. P. 2918. DOI: 10.3390/en11112918.
8. Xu S., Liu H., Bi T., Martin K. E. An improved Taylor weighted least squares method for estimating synchrophasor. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020. Vol. 120. P. 105987. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.105987.

9. Xi Y., Tang X., Li Z., Wang Y., Liu J. Harmonic estimation in power systems using an optimised adaptive Kalman filter based on PSO-GA. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019. Vol. 13, № 17. P. 3968–3979. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6148.
10. Ray P. K., Pohan P. S., Panda G. Real time harmonics estimation of distorted power system signal using variable leaky LMS. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016. Vol. 75. P. 91–98. DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.08.017.
11. Beltran-Carbajal F., Tapia-Olvera R., Valderrabano-Gonzalez A., Yanez-Badillo H. An asymptotic and algebraic estimation method of harmonics. *Electric Power Systems Research*, 2022. Vol. 206. P. 107771. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107771.

Стаття надійшла до редакції: 18.10.2025; рецензування: 22.10.2025; прийнята до публікації 05.11.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису. The article was submitted on 18.10.2025; revised on 22.10.2025; and accepted for publication on 05.11.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.