

шумів у різних матеріалах і підвищення чутливості радіоелектронної апаратури в діапазоні низьких частот.

1. Колодій З.О. Нестационарність низькочастотних флуктуацій в провідниках з різним характером електропровідності // Вимірвальна техніка та метрологія. 2000. №56. С.34-37. 2. Бочков Г.Н., Кузовлев Ю.Е. Новое в исследовании $1/f$ -шума. // Успехи физических наук. 1983. Т.141. Вып.1. С.151-176. 3. Коган Ш.М. Низкочастотный токовый шум со спектром типа $1/f$ в твердых телах. // Успехи физических наук. 1985. Т.145. Вып.2. С.285-326. 4. Дьяконова Н.В., Левинштайн М.Е., Contreras S., Клар W., Веаumont В., Gibart P. Низкочастотный шум в n -GaN. // Физика и техника

полупроводников. 1998. Т.32. №3. С.285-289. 5. Dutta P., Horn P.M.- Rev/ Mod. Phys., 1981, v. 53, p.497. 6. Eberhard J. W., Horn P.M.-Phys. Rev. Ser. C, 1972, v. 18, p. 6681. 7. Ткаченко М.М., Строїтелева Н.І., Грушка Г.Г., Грушка З.М. Спектри струмового шуму фотопровідника $Hg_3In_2Te_6$. // Український фізичний журнал. 1999. Т.44. Вып.6. С.748-751. 8. Битюцкая Л.А., Селезнев Г.Д. Тепловой фликкер-шум в диссипативных процессах кристаллических веществ. // Физика твердого тела. 1999. Т.41. Вып.9. С.1679-1682. 9. Колодій З.О. Електричні флуктуації – різні сторони одного процесу // Вісник НУ “Львівська політехніка”. 2001. №428. С.226-227.

УДК 681.325

ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ЇХ МАЛОХВИЛЬОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

© Ростислав Наконечний, 2002

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра “Автоматика і телемеханіка”,
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Розглядаються основні принципи та алгоритми вимірювання енергетичних параметрів сигналів, які базуються на їх малохвильовому перетворенні. Наводяться результати моделювання процесу вимірювання активної потужності з малохвильовим перетворенням сигналів.

Рассматриваются основные принципы и алгоритмы измерения энергетических параметров сигналов, которые базируются на их маловолновом преобразовании. Приведены результаты моделирования процесса измерения активной мощности с маловолновым преобразованием сигналов.

The basic strategy and algorithms of measurement of signals energy parameters using the wavelet transform have been presented in this article. Process simulation results of active power measurement from wavelet transform have been shown.

Вступ. До найважливіших енергетичних параметрів сигналів насамперед належать середньоквадратичні значення напруги та струму, повна, активна і реактивна потужності та енергія сигналу. Оцінка вказаних характеристик є однією з найважливіших при аналізі якості силових енергетичних систем, систем зв'язку, комунікацій та ехолокації. Широке практичне застосування нелінійної силовой електроніки, яке пов'язане з використанням високочутливого обладнання, що контролюється за допомогою комп'ютерної техніки, ставить на перший план проблему якості отриманої потужності на розподільній мережі. У такому разі якість потужності аналізується при ustalених значеннях, де визначаються спотворення гармонік або незбалансованість напруг і при перехідних значеннях, які ви-

никають внаслідок аварій і наявності режимів перемикання. Однак ефективність такої оцінки в багатьох випадках істотно залежить від вибору області представлення сигналів, а, значить, їх математичної моделі. Досі переважно для розв'язання таких задач використовувався спектральний аналіз Фур'є або метод симетричних складових, однак порівняно недавно в таких випадках все більше застосовується малохвильовий аналіз.

Виконання досліджень у цьому напрямку дає можливість підвищення ефективності використання малохвильового перетворення для вимірювання енергетичних параметрів сигналів як для перехідних, так і для ustalених режимів.

Відомо, що малохвильове перетворення досліджується також як потужний інструмент при обробці

сигналів зв'язку в таких областях, як компресія даних, шумопридушення, відтворення з високою роздільною здатністю зображень і високою якістю мови, а також нанесення цифрових підписів [1]. Вказані елементи обробки сигналів також можуть бути успішно використані в області силових систем для ідентифікації різних категорій впливів силових систем.

Під час аналізу малоохвильового перетворення цей сигнал розкладається на його складові – малоохвильові підсмуги або рівні. Кожний з цих рівнів представляє ту частину оригінального сигналу, яка потрапила в цей особливий час і в ту особливу частотну смугу. Отримані окремі смуги намагаються робити однакової ширини щодо логарифма їх частот на відміну від однакових ширин частот спектральних смуг перетворення Фур'є. Загалом використовується двійковий розклад, підсмуги відокремлюються від сусідніх підсмуг за допомогою частотних октав. Такий розкладений сигнал характеризується особливою властивістю часо-частотної локалізації, яка є однією з основних переваг, що забезпечується при малоохвильовому аналізі. Отриманий результат розкладу сигналу потім може бути проаналізований як в часовій, так і в частотній областях.

1. Подання сигналів у малоохвильовій області.

У малоохвильовій області аналіз переважно здійснюється на основі окремих сигналів. Однак у разі вимірювання потужності малоохвильове перетворення напруги і струму виводиться з послідовності вибірок напруги u і струму i , що збігаються в часі і які використовують спільний ортонормальний малоохвильовий базис, який застосований до кожного циклу системи. Оскільки окремі підсмуги напруги і струму реєструються як в часі, так і в частоті, кожний діючий сумісно $u-i$ добуток підсмуги являє собою вклад цієї смуги в загальний сумарний елемент середньої потужності або циклу енергії. Підсумовування цих відзначених підсмуг потужностей потім подаються у вигляді загальної середньої потужності для цієї пари $u-i$ елементів. Потужність буде звичайно вимірюватися в усталеному режимі, в той час як розподіл частотної енергії буде аналізуватися в перехідних режимах.

Аналогічно квадрати точок окремих підсмуг напруги і струму являють собою піднесені до квадрата внески цих окремих підсмуг до сумарного СКЗ напруги і струму. Це пояснюється тим, що вклади підсмуг є ортогональними, середнє значення піднесених до квадрата вкладів кожної підсмуги може бути додане

для формування середнього значення квадрата сумарної напруги і струму. Корінь квадратний від цієї суми буде давати сумарне значення СКЗ, у той час як корінь квадратний від квадрата середнього значення кожної підсмуги буде давати відповідний вклад цієї підсмуги до цього сумарного значення СКЗ.

У трифазних силових системах вклади потужності або енергії кожної фази можуть підсумовуватися на кожному рівні підсмуги, у такий спосіб визначається вклад частот у межах цих підсмуг до сумарної трифазної потужності або енергії.

Для точного аналізу цих силових систем вимагається добре розділення частот між розкладеними частинами оригіналу. Розробляючи малоохвильове перетворення, доцільно використовувати вирівнювання характеристик високочастотних і низькочастотних пар фільтрів, які безпосередньо впливають на точність кінцевого розкладу підсмуг частоти. Якісного частотного розділення на різних малоохвильових рівнях досягають, використовуючи фільтри з нескінченним імпульсним відгуком (НІВ) або ІІР-фільтри, оскільки їх амплітудні характеристики набагато кращі, ніж відповідні характеристики типових цифрових фільтрів із скінченним імпульсним відгуком (СІВ) або FIR-фільтри еквівалентної складності. Одночасно багатозафазна структура на основі НІВ має простішу конструкцію банку малоохвильових фільтрів [3].

Добеші в своїй класичній праці [4] розробила базис для малоохвильового перетворення і показала його походження, яке базується на основі змінної роздільної здатності. Вона довела, що ортонормальний малоохвильовий базис формується саме з властивостей змінної роздільної здатності.

Аналіз сигналів на основі змінної роздільної здатності забезпечує натуральну основу для розуміння малоохвильового базису і структури малоохвильового перетворення. При багатороздільному аналізі простору $L^2(R)$ існують зростаючі послідовності закритих підпросторів (V_j) простору $L^2(R)$ [1]. Багатороздільний аналіз дає змогу зберігати детальну інформацію в додатковому просторі W_j підпростору V_j , так, що

$$V_{j-1} = V_j \oplus W_j, \quad V_{j-1} \subset V_j,$$

де W_j є, отже, ортогональним доповненням V_j в V_{j-1} , а \oplus означає ортогональну суму двох підпросторів. На рис. 1 схематично наведений простір ортогонального вектора для різних рівнів j .

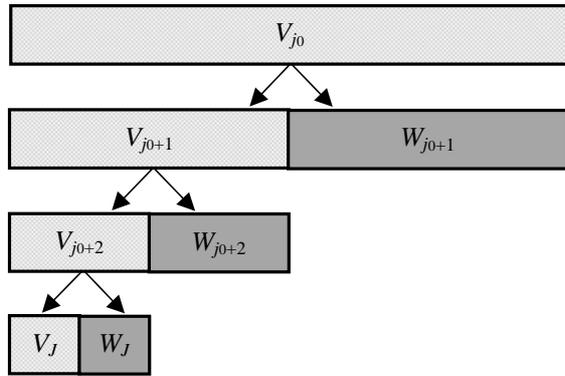


Рис. 1. Схематичне представлення функціональних просторів

Ортонормальні масштабні функції $\{\phi_{j,k}; j, k \in Z\}$ містяться в V_j , а ортонормальний малохвильовий базис $\{\psi_{j,k}; j, k \in Z\}$ знаходиться в W_j . Масштабований і зміщений малохвильовий базис $\psi_{j,k}$ отримується як

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k) = \sum_n g_{n-2k} \phi_{j+1,n}(x), \quad (1)$$

де

$$g_{n-2k} = \langle \psi_{j,k}, \phi_{j+1,n} \rangle \text{ і } \sum_{n \in Z} |g_{n-2k}|^2 = 1. \quad (2)$$

Ефективний ієрархічний алгоритм для обчислення малохвильових коефіцієнтів цієї функції $f(x)$ наводиться в [2]. Малохвильовий коефіцієнт на j -му рівні і k -му часі обчислюється

$$d_{j,k} = \langle f, \psi_{j,k} \rangle = \sum_n \overline{g_{n-2k}} \langle f, \phi_{j+1,n} \rangle = \sum_n \overline{g_{n-2k}} c_{j+1,n}. \quad (3)$$

Отже, коефіцієнт $d_{j,k}$ отримується згорткою послідовності $(c_{j+1,k})_{k \in Z}$ і $(\overline{g_{-k}})_{k \in Z}$ з подальшим прохідженням з коефіцієнтом 2, а коефіцієнт масштабної функції на j -му рівні в k -й час одержується

$$c_{j,k} = \langle f, \phi_{j,k} \rangle = \sum_n \overline{h_{n-2k}} \langle f, \phi_{j+1,n} \rangle = \sum_n \overline{h_{n-2k}} c_{j+1,n}, \quad (4)$$

де

$$h_{n-2k} = \langle \phi_{j,k}, \phi_{j+1,n} \rangle \text{ і } \sum_{n \in Z} |h_{n-2k}|^2 = 1.$$

Процедура обчислення виконується так. З масштабного коефіцієнта $c_{2,k}$ обчислюється $d_{1,k}$ за допомогою виразу (3), а $c_{1,k}$ на основі (4). Потім вирази (3) і (4) використовуються рекурсивно для обчислення $d_{0,k}$ і $c_{0,k}$ з $c_{1,k}$ і т.д. Отже, результатами малохвильового перетворення є масштабний

коефіцієнт $c_{0,k}$ і малохвильові коефіцієнти $d_{0,k}$, $d_{1,k}$ і т.д. Такий підхід представляє частину розкладу малохвильового перетворення, тобто пірамідального алгоритму, який детальніше описаний в [2].

Якщо необхідно визначити ζ_U як оператор проектування на векторний простір U , то проєкція довільної функції $f \in L^2(R)$ на простори V_j і W_j може бути записана як

$$\zeta_{V_j} f(x) = \sum_k \langle f, \phi_{j,k} \rangle \phi_{j,k}(x) = \sum_k c_{j,k} \phi_{j,k}(x) = f_j(x)$$

і для додаткового простору

$$\zeta_{W_j} f(x) = \sum_k \langle f, \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k}(x) = \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(x) = g_j(x),$$

$$\text{де } c_{j,k} = \langle f, \phi_{j,k} \rangle, \text{ а } d_{j,k} = \langle f, \psi_{j,k} \rangle.$$

Отже, будь-яка функція $f(x)$ ($f \in V_j$) може бути описана як лінійна комбінація грубої форми на рівні $J > j$ і додаткової детальнішої форми представлення інформації із збільшеною роздільною здатністю ($J \geq j > j_0$). В результаті отримується

$$f(x) = \sum_k c_{J,k} \phi_{J,k}(x) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(x)$$

Істотною перевагою малохвильового перетворення є те, що у разі використання ортогональних базових малохвильових функцій норма енергії функції пов'язана з нормою її коефіцієнтів

$$\|f\|_{L^2} = \sqrt{\sum_k (c_{j,k})^2} = \sqrt{\sum_{j=j_0}^J \sum_k (d_{j,k})^2 + \sum_k (c_{j,k})^2} \text{ для всіх } f \in V_j.$$

Крім того, при апаратурній реалізації ортогональне малохвильове перетворення дає можливість використовувати однакові аналізуючі та синтезуючі фільтри.

2. Обчислення енергетичних параметрів сигналів у малохвильовій області. Вимірювання потужності передбачає вимірювання $I_{с.к.з}$, $U_{с.к.з}$ і активної потужності P . Ці параметри визначаються так:

$$I_{с.к.з} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad U_{с.к.з} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \text{ і } P = \frac{1}{T} \int_0^T i(t)u(t) dt \quad (5)$$

де $i(t)$ і $u(t)$ – миттєві значення струму і напруги вхідного сигналу, T – період першої гармоніки вхідного сигналу.

У дискретній формі ці параметри визначаються

$$I = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} i^2(t_k)}, \quad U = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} u^2(t_k)}, \quad i$$

$$P = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} u(t_k) i(t_k), \quad (6)$$

де n – кількість вибірок за період першої гармоніки вхідного сигналу.

Розглянемо малохвильові перетворення сигналів, пропорційних до струму $i(t)$ і напруги $u(t)$. Сигнали, які беруть участь в обчисленні потужності, можуть бути подані у малохвильовій області. Якщо $i(t)$ і $u(t)$ представляють квадратно-інтегровану густину функцій, вони можуть бути записані так:

$$i(t) = \sum_k c_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad (7)$$

де

$$c_{j_0,k} = \langle i(t), \phi_{j_0,k} \rangle, \quad \text{а} \quad d_{j,k} = \langle i(t), \psi_{j,k} \rangle. \quad (8)$$

$$u(t) = \sum_k c'_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d'_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad (9)$$

де

$$c'_{j_0,k} = \langle u(t), \phi_{j_0,k} \rangle, \quad \text{а} \quad d'_{j,k} = \langle u(t), \psi_{j,k} \rangle. \quad (10)$$

Масштабний рівень j_0 є найменшою смугою оригінального сигналу і містить основні частотні компоненти систем. Малохвильові рівні j містять сигнали послідовних вищих октав частотних смуг.

Масштабна функція $\phi_{j_0,k}$ і базова малохвильова функція $\psi_{j,k}$ представляють ортонормальний базис і мають такі властивості

$$\langle \phi_{j_0,k}, \phi_{j_0,k} \rangle = 1, \quad \langle \phi_{j_0,k}, \psi_{j,k} \rangle = 0, \quad \text{де} \quad j \geq j_0.$$

$$\langle \psi_{j,k}, \psi_{j,k} \rangle = 1, \quad \langle \psi_{j,k}, \psi_{i,k} \rangle = 0 \quad \text{де} \quad j \neq i. \quad (11)$$

Середньоквадратичні значення струму і напруги в системі з врахуванням (7) можуть бути описані на основі малохвильових властивостей (11):

$$\int i^2(t) dt = \int \left[\sum_k c_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \right]^2 dt =$$

$$\int \left[\sum_k c_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) \right]^2 dt + \int \left[\sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \right]^2 dt =$$

$$= \sum_k c_{j_0,k}^2 \int \phi_{j_0,k}(t)^2 dt + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k}^2 \int \psi_{j,k}(t)^2 dt =$$

$$= \sum_k c_{j_0,k}^2 + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k}^2. \quad (12)$$

Коли $i(t)$ є періодичним сигналом з періодом T , то

$$I_{c.k.z} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_k c_{j_0,k}^2 + \frac{1}{T} \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k}^2} =$$

$$= \sqrt{I_{j_0}^2 + \sum_{j \geq j_0} I_j^2}, \quad (13)$$

де перший член I_{j_0} є СКЗ найнижчої частотної підсмуги j_0 , а $\{I_j\}$ є рядом СКЗ значень кожної частотної підсмуги або малохвильового рівня j , який є вищий або дорівнює масштабному рівню j_0 .

У разі обчислення потужності, якщо малохвильові коефіцієнти $i(t)$ і $u(t)$ масштабуються однаковою функцією ϕ і однаковим малохвильовим базисом ψ , то енергія $W(i(t), u(t))$ описується за допомогою масштабних і малохвильових коефіцієнтів (7) і (9) і малохвильових властивостей, що базуються на (11):

$$W(i(t), u(t)) = \int i(t) u(t) dt =$$

$$= \int \left[\sum_k c_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \right] \cdot$$

$$\left[\sum_k c'_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d'_{j,k} \psi_{j,k}(t) \right] dt =$$

$$= \int \sum_k c_{j_0,k} c'_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t)^2 dx +$$

$$+ \int \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} d'_{j,k} \psi_{j,k}(t)^2 dt = \sum_k c_{j_0,k} c'_{j_0,k} \int \phi_{j_0,k}(t)^2 dx +$$

$$+ \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} d'_{j,k} \int \psi_{j,k}(t)^2 dt =$$

$$= \sum_k c_{j_0,k} c'_{j_0,k} + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} d'_{j,k}. \quad (14)$$

Якщо $i(t)$ і $u(t)$ є періодичними сигналами з періодом T , тоді активна потужність визначається як [5]

$$P = \frac{1}{T} \int i(t)u(t)dt = \frac{1}{T} \sum_k c_{j_0,k} c'_{j_0,k} + \frac{1}{T} \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} d'_{j,k} = P_{j_0} + \sum_{j \geq j_0} P_j, \quad (15)$$

де P_{j_0} – потужність найнижчої частотної підсмуги j_0 , а $\{P_j\}$ – множина потужностей кожної частотної підсмуги або малохвильового рівня j , який вищий або дорівнює масштабному рівню j_0 . На основі отриманого виразу (15) можна зробити висновок, що активна потужність періодичного сигналу залежить від значення масштабних коефіцієнтів найнижчої частотної підсмуги та малохвильових коефіцієнтів усіх підсмуг. В багатьох випадках масштабні коефіцієнти найнижчих підсмуг також зараховують до малохвильових коефіцієнтів. Цей вираз є представленням активної потужності сигналу в малохвильовій області. Як вже зазначалося раніше, значення отриманої активної потужності сигналу, згідно з теоремою Парсеваля, буде дорівнювати значенню активної потужності сигналу в часовій та частотній областях. Основною особливістю цього представлення є те, що воно має енергетичний зміст і, отже, дає можливість як легко фільтрувати завади, які мають, переважно, рівень енергії набагато нижчий, ніж корисного сигналу, так і оцінювати значення активної потужності безпосередньо в цій області. Згадане фільтрування сигналів напруги та струму може здійснюватися порогуванням або квантуванням малохвильових коефіцієнтів з наступним їх ентропійним кодуванням. Крім того, виконання таких операцій дає можливість усувати надлишковість інформації і може ефективно використовуватися для компресії сигналів, що розглядаються.

Отже, алгоритми вимірювання потужності, що базуються на малохвильовому перетворенні, представляють розподіл потужності і СКЗ щодо окремих підсмуг, які зберігають властивості часо-частотної локалізації малохвильового перетворення.

3. Моделювання процесу вимірювання активної потужності з малохвильовим перетворенням сигналів

Оскільки активна потужність є одним з найживаніших енергетичних параметрів, то на її прикладі розглядався процес моделювання, для реалізації якого використовувався прикладний пакет MATLAB 6.0.

Моделювання процесу вимірювання періодичних сигналів. В цьому випадку розглядається вплив вищих гармонічних складових, які містяться у вхідних сигналах напруги та струму, на результат вимірювання активної потужності. Дослідження здійснювалося при зміні рівня активної потужності у межах 0 – 100 Вт на частоті вхідних сигналів 50 Гц та різних процентних вмістах вищих гармонічних складових.

Імітовані вхідні сигнали $u(t)$ і $i(t)$ мали першу, п'яту і сьому гармоніки, причому їх рівень змінювався для п'ятої K від 0,3 до 1, а сьомої M від 0,05 до 0,5

$$u(t) = U_d \left(\sqrt{2} \sin(2\pi 50t) + K \sqrt{2} \sin(2\pi 250t + 120^\circ) + M \sqrt{2} \sin(2\pi 350t) \right),$$

$$i(t) = I_d \left(\sqrt{2} \sin(2\pi 50t + 30^\circ) + K \sqrt{2} \sin(2\pi 250t) + M \sqrt{2} \sin(2\pi 350t) \right).$$

Вибір саме п'ятої та сьомої гармонік зумовлений наявністю цих гармонік у більшості реальних навантажень енергетичних систем, в яких вимірюється активна потужність.

Отриманий вище вираз (15) лежить в основі розробки структурної схеми комп'ютерного моделювання запропонованого процесу вимірювання активної потужності. Спрощена структурна схема моделювання, яка наведена на рис. 2, складається з трьох основних частин. Перша частина містить схему моделювання процесу вимірювання активної потужності синусоїдальних та періодичних вхідних сигналів, які піддаються попередньому дискретному малохвильовому перетворенню. Друга частина структурної схеми складається із схеми комп'ютерного моделювання (згідно з виразом (6)) процесу вимірювання активної потужності згаданих синусоїдальних і періодичних сигналів класичним способом. Результати вимірювання такої схеми вважаються зірцевими і використовуються для порівняння. Третя частина

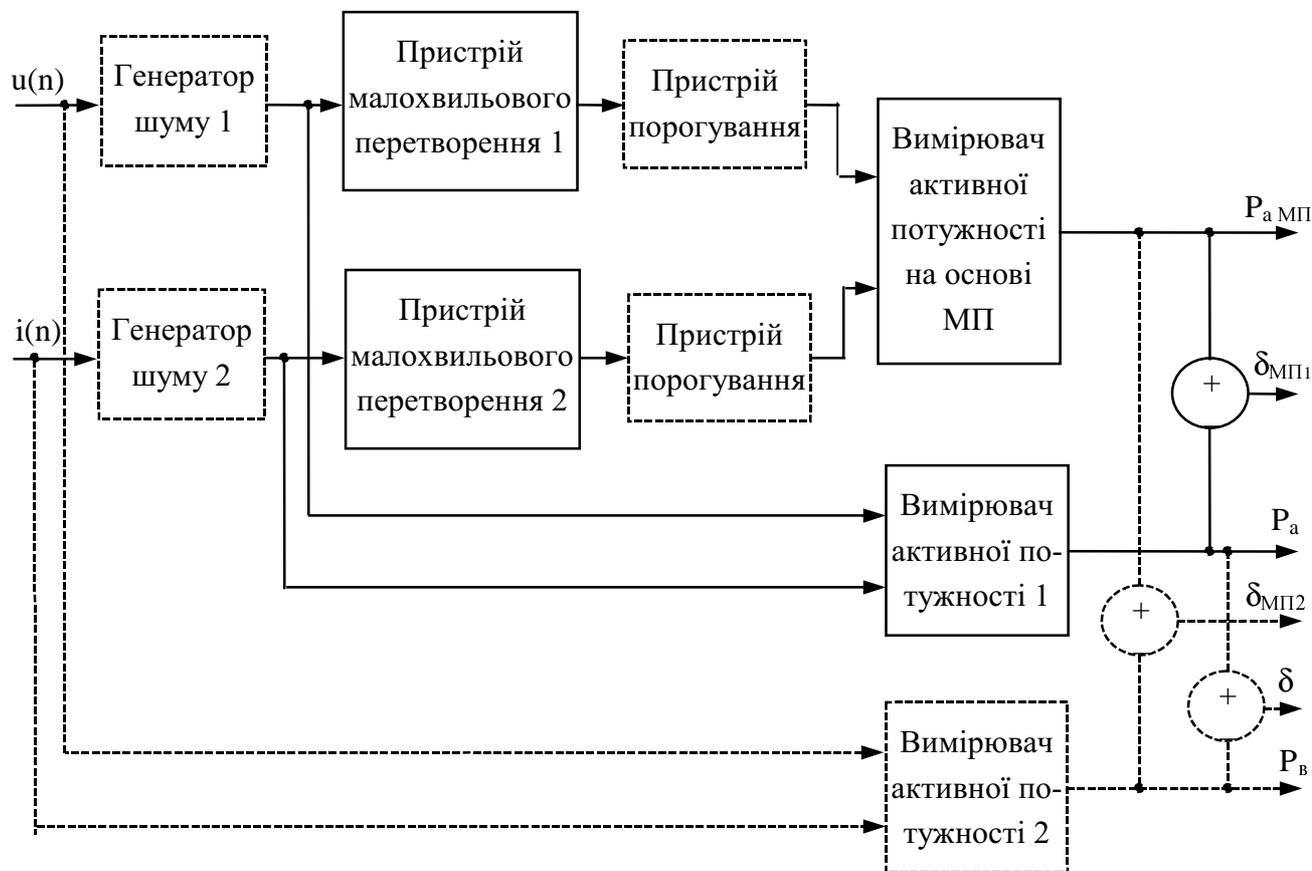


Рис. 2. Спрощена структурна схема комп'ютерного моделювання процесу вимірювання активної потужності

структури складається з пристроїв візуального спостереження за часовою зміною сигналів в окремих частинах схеми, а також на її входах і виходах. У цій частині схеми одночасно знаходяться пристрої цифрової реєстрації реальних результатів запропонованої схеми перетворення активної потужності (зокрема, на різних рівнях та на сумарному) та вірцевих результатів схеми класичного вимірювання активної потужності. Крім того, в склад третьої частини схеми входить пристрій порівняння отриманих результатів, на основі яких виконуються обчислення похибки перетворення.

У склад схеми комп'ютерної моделі вимірювання активної потужності на основі малохвильового перетворення сигналів входять: пристрої генерування вхідних сигналів напруги та струму (в тому числі задання

їх вищих гармонічних складових), пристрої дискретизації вхідних сигналів, пропорційних до миттєвих значень напруги та струму, блоки малохвильового перетворення сигналів напруги та струму, пристрої перемноження та підсумовування коефіцієнтів на відповідних рівнях та пристрій остаточного підсумовування малохвильових коефіцієнтів.

Для малохвильового розкладу сигналів використовується пірамідальний алгоритм, який може бути реалізований на малохвильовому фільтровому банку. Ортогональні низькочастотні і високочастотні фільтри банку можуть бути побудовані на фільтрах із скінченним імпульсним відгуком СІВ або нескінченним імпульсним відгуком НІВ. Основною перевагою останніх є добра частотна вибірковість і висока

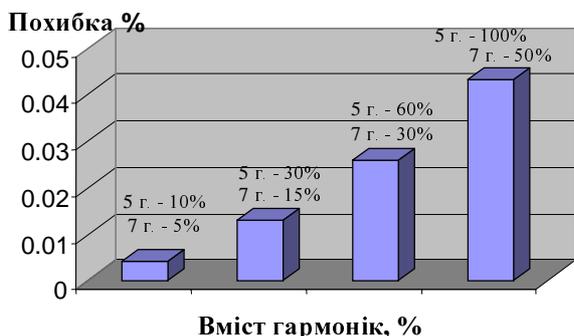


Рис. 3. Залежність похибки вимірювання від процентного вмісту гармонік у максимальних вхідних сигналах

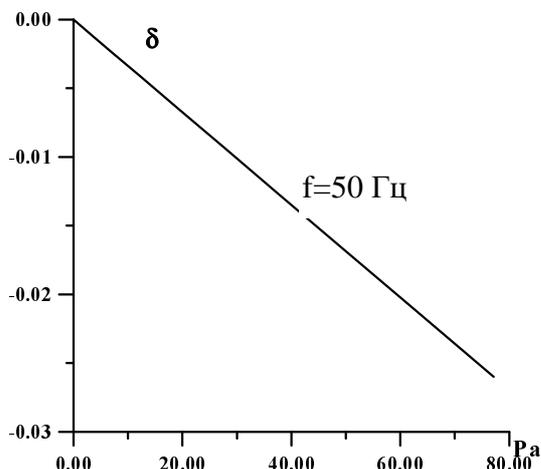


Рис. 4. Залежність похибки вимірювання від зміни активної потужності вхідних періодичних сигналів (5 гармоніка – 60%, 7 гармоніка – 30%)

ефективність обчислення, які є дуже важливими при використанні у системах вимірювання активної потужності реального часу. Розкладені на сім частотних піддіапазонів сигнали напруги та струму, які представлені у вигляді малохвильових коефіцієнтів, перемножуються і підсумовуються на відповідних рівнях упродовж періоду першої гармоніки n . Остаточне підсумовування усіх коефіцієнтів відбувається в кінцевому суматорі. Для усунення залежності результату вимірювання активної потужності від зміни частоти вхідних сигналів у цій схемі отриманий результат перетворення ділять на число n .

Результати досліджень процесу вимірювання активної потужності періодичних сигналів на основі малохвильового перетворення наведені на рис. 3 і рис. 4.

Дослідження показують, що точність вимірювання активної потужності запропонованим способом відрізняється від прийнятого взірцевого на соті частки відсотка у всьому динамічному діапазоні зміни вхідних сигналів. Зміна рівня вищих гармонічних складових у вхідних сигналах мало впливає на точність вимірювання, навіть коли його значення сягає 100% для п'ятої та 50% для сьомої гармонік.

Моделювання процесу вимірювання синусоїдальних та періодичних сигналів з накладанням завад. У

цьому випадку досліджувався вплив на результат вимірювання активної потужності завад, які накладалися на вхідні сигнали напруги та струму і представляли білий шум з гауссівським розподілом та шум з рівномірним розподілом. Процес вимірювання моделювався при зміні рівня активної потужності в межах 0 – 100 Вт на частоті вхідних сигналів 50 Гц. На імітовані вхідні сигнали $u(t)$ і $i(t)$ безпосередньо одночасно накладалися різні типи шумів, рівень яких змінювався від 15% до 50% від рівня максимальної амплітуди сигналу.

Комп'ютерне моделювання запропонованого процесу вимірювання активної потужності також базується на використанні виразу (15). Для цього випадку на наведеній вище структурній схемі моделювання (рис. 2) додаткові елементи схеми позначені пунктиром. До них входять генератори шумів, пристрої порогоування, схема вимірювання активної потужності, на яку не подаються зашумлені вхідні сигнали та два пристрої порівняння. За допомогою генераторів шумів, сигнали яких накладаються на інформативні сигнали, змінюється рівень і вид шумів. Рівень шумів оцінюється щодо рівня інформативних сигналів.

В однотипних пристроях порогоування виконується жорстке порогоування отриманих малохвильових

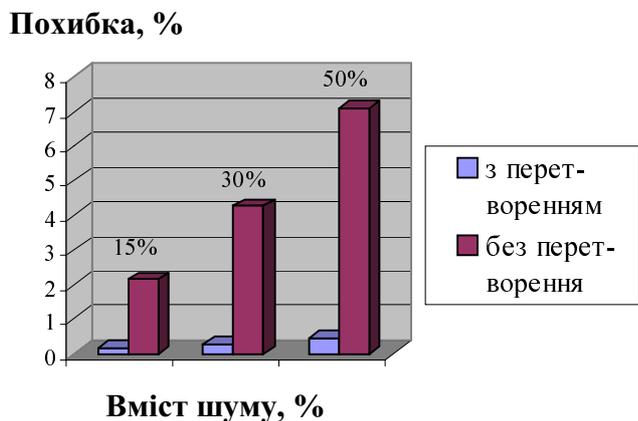


Рис. 5. Залежність похибки вимірювання активної потужності від процентного вмісту корельованого шуму з гауссівським розподілом у максимальних вхідних періодичних сигналах і 93% -му порозуванні

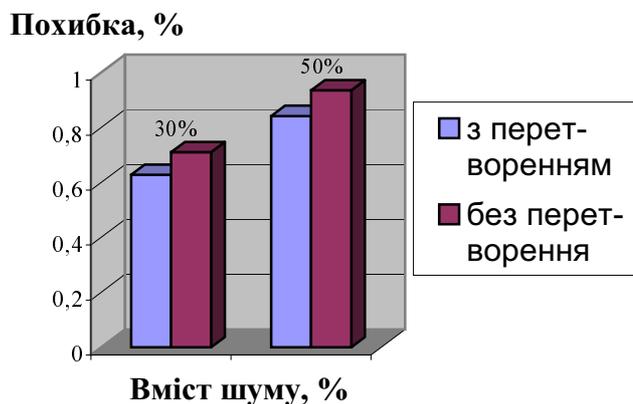


Рис. 6. Залежність похибки вимірювання активної потужності від процентного вмісту некорельованого шуму з різним гауссівським розподілом у вхідних періодичних сигналах і 93% -му порозуванні

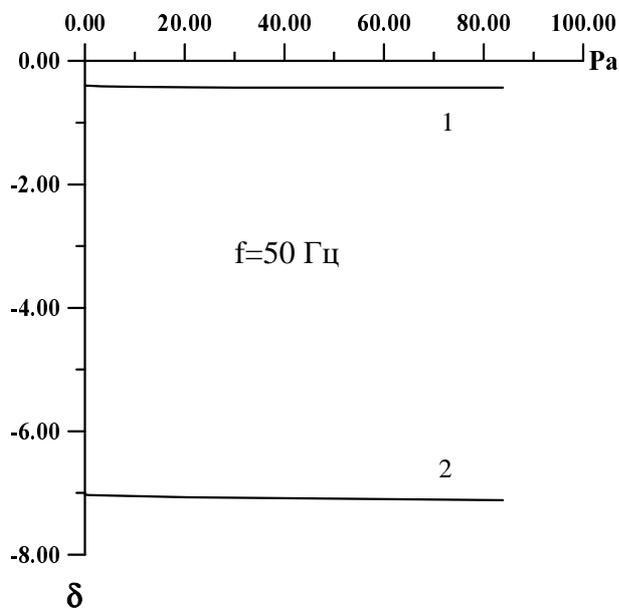


Рис.7. Залежність похибки вимірювання від зміни активної потужності вхідних періодичних сигналів (5 гармоніка – 30%, 7 гармоніка – 15%) при накладанні на них 50% шуму з гауссівським розподілом від максимальної амплітуди сигналу (1 – при малошвиловому перетворенні і наявності 7 % інформативного сигналу; 2 – без перетворення)

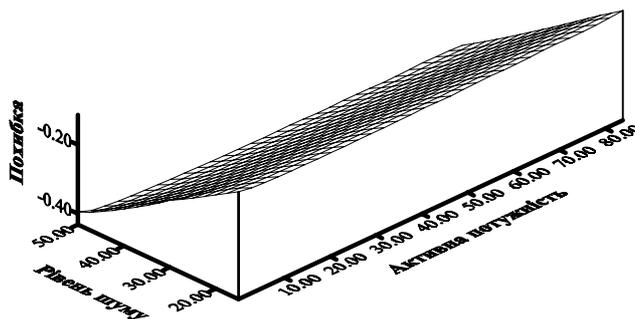


Рис.8. Залежність приведеної похибки від зміни активної потужності та рівня вхідного шуму з гауссівським розподілом, який накладається на вхідний періодичний сигнал при використанні малошвилового перетворення

коефіцієнтів напруги і струму. Рівень порогоування залежить від споживача і визначається рівнем зашумленості сигналу та рівнем його допустимих спотворень.

Додаткова схема вимірювання активної потужності аналогічна до схеми моделювання, яка функціонує за класичним способом. Однак якщо на входи останньої тепер подаються зашумлені сигнали, то на входи додаткової схеми подаються ті самі вхідні сигнали, але без завад. Додаткова схема призначена для оцінки ефективності запропонованої схеми вимірювання активної потужності.

Результати досліджень процесу вимірювання активної потужності синусоїдальних та періодичних сигналів з накладанням завад наведені на рис. 5 – 8.

Результати досліджень показують, що запропонована схема вимірювання активної потужності має набагато вищу завадостійкість порівняно з традиційною схемою, особливо якщо завади є корельованими. Результати вимірювань практично не залежать від типу завад в усьому динамічному діапазоні зміни вхідних періодичних сигналів, а залежать лише від рівня порогоування малошумових коефіцієнтів. Оскільки при таких вимірюваннях використовується порогоування, тобто пропускається лише частина інформативного сигналу (у нашому випадку 7%), то кількість обчислень істотно зменшується, а значить, збільшується швидкість вимірювання.

Висновки

1. Оскільки представлення в малошумовій області має енергетичний характер, то енергетичні характеристики сигналів можуть оцінюватися в ній безпосередньо за оцінкою малошумових коефіцієнтів без використання зворотного перетворення.

2. У разі вимірювання активної потужності малошумове перетворення напруги і струму визначається за послідовності вибірок сигналів напруги та струму, які збігаються в часі і використовують спільний ортонормальний малошумовий базис, який застосований до кожного циклу системи. Окремі підсмуги напруги і струму реєструються як в часі, так і в частоті і кожний

діючий сумісно добуток напруги і струму підсмуги являє собою вклад цієї смуги в загальний сумарний елемент середньої потужності або циклу енергії, а остаточне підсумовування потужностей підсмуг подається у вигляді загальної середньої потужності. Потужність звичайно вимірюється в усталеному режимі, в той час як розподіл частотної енергії аналізується в перехідних режимах.

3. Замість розбиття спектра на ряд смуг з однаковою шириною частот, як при ШПФ, малошумове перетворення дає меншу кількість елементів кодування сигналу, які пов'язані з СКЗ, потужністю і енергією в октавах. Величина кожного елемента кодування має вдвічі більшу ширину смуги, ніж наступний нижчий елемент. Отже, виграш в обсязі обчислень, а значить, більша швидкість, ніж при застосуванні ШПФ.

4. Активна потужність періодичного сигналу в малошумовій області залежить від значень масштабних коефіцієнтів найнижчої частотної підсмуги розкладу та малошумових коефіцієнтів усіх підсмуг.

5. Точність вимірювання активної потужності періодичних сигналів запропонованим способом може сягати сотих часток процента у всьому динамічному діапазоні зміни вхідних сигналів. Зміна рівня вищих гармонічних складових у вхідних сигналах мало впливає на точність вимірювання.

6. Вимірювання активної потужності на основі малошумового перетворення має набагато вищу завадостійкість порівняно з традиційним методом вимірювання, особливо якщо завади є корельованими. Результати вимірювань практично не залежать від типу завад в усьому динамічному діапазоні зміни вхідних сигналів, а залежать лише від рівня порогоування малошумових коефіцієнтів.

7. Точність вимірювання активної потужності запропонованим способом відрізняється від прийнятого взірцевого на соті частки процента у всьому динамічному діапазоні зміни вхідних сигналів. Зміна рівня вищих гармонічних складових у вхідних сигналах мало впливає на точність вимірювання, навіть коли його значення сягає 100% для п'ятої та 50% для сьомої гармонік.

1. Наконечний А.Й. Теорія малохвильового перетворення та її застосування. – Львів, 2001. 2. Наконечний А.Й., Наконечний Р.А. Пірамідальний алгоритм як основа дискретного малохвильового (wavelet) перетворення сигналів // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Вимірювальна техніка та метрологія”. 1998. вип.53. С.26 – 32 .3. Vetterli M. and Kovacevic J., *Wavelets and Subband Coding*. Englewood

Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1995. 4. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, PA: SIAM, 1992. 5. Dudykevych V, Nakonechny R. *Energy Characteristics Measurement Using the Wavelet Transform* // Праці міжнародної конференції “International Conference on Modeling and Simulation, MS’2001-Lviv ” – 188-189p.