

УДК 681.325

Р.А. Наконечний

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра “Автоматика і телемеханіка”**ВИМІРЮВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ОСНОВІ
МАЛОХВИЛЬОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ**

© Наконечний Р.А., 2002

Розглянуто метод вимірювання реактивної потужності, який базується на малохвильовому перетворенні сигналів. Наведено результати моделювання вимірювання реактивної потужності з малохвильовим перетворенням сигналів.

The method of reactive power measurement using the wavelet transform have been presented in this article. Process simulation results of reactive power measurement with wavelet transform have been shown.

Вступ. Відомо, що класичні вимірювання потужності виконуються як в часовій, так і, меншою мірою, в частотній областях за допомогою методу прямого перетворення Фур'є. Представлення в часовій області найефективніше і найточніше, коли поєднуються СКЗ напруги або струму і активна потужність, а також їх залежні величини, такі, як реактивна потужність і коефіцієнт потужності. Обґрунтовується це тим, що початковою точкою для всіх цифрових методів є одночасна зміна напруги і струму, які дискретизуються з постійними інтервалами впродовж одного або більше періодів. Подання в частотній області дає змогу визначати спотворення і впливи гармонік, однак вимагає періодичності сигналу, а також втрачає часове тлумачення. Навіть при застосуванні таких переваг, як використання алгоритмів швидкого перетворення Фур'є, це подання вимагає великого обсягу обчислень протягом будь-якого діапазону частот, оскільки його спектральні лінії є рівновіддалені за частотою.

Однією з переваг вимірювання потужності з малохвильовим перетворенням сигналів, пропорційних до напруги і струму, є те, що воно зберігає як часовий, так і спектральний зв'язок, який поєднується з результатом отриманої потужності. Такий підхід забезпечує розподіл потужності і енергії по окремих частотних октавах, який визначається на кожному рівні малохвильового аналізу. Замість розбиття спектра частот на ряд смуг однакової ширини, як при ШПФ, воно дає меншу кількість елементів кодування сигналу, які пов'язані з визначенням СКЗ, потужності та енергії в октавах. Кожний елемент кодування має вдвічі більшу ширину смуги, ніж наступний нижчий елемент. Кожен з піддіапазонів представляє ту частину оригінальної миттєвої потужності, яка потрапляє в цей конкретний час і в цю конкретну частотну смугу [1].

1. Визначення різних типів потужностей. Визначення відповідають існуючим термінам міжнародних стандартів [2]. Так, якщо $u(t)$ і $i(t)$ є періодичними сигналами з періодом T , то активна потужність P визначається як

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i(t)u(t)dt \quad (1)$$

Згідно з міжнародними стандартами реактивна енергія визначається як “вимірювана величина, що визначена за допомогою точного лічильника активної енергії, несучий струм

якої є струмом однофазного кола, а напруга дорівнює по величині напрузі однієї фази, але одночасно зміщена на 90° [2]. З напруги $u(t)$ визначається квадратурна напруга $u(t - 90^\circ)$, зміщена на 90° на кожній частоті усього діапазону частот. Якщо $u(t - 90^\circ)$ і $i(t)$ є періодичними сигналами з періодом T , то реактивна потужність Q визначається так

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T u(t - 90^\circ) i(t) dt \quad (2)$$

Ймовірнісна потужність V однофазного кола є простим добутком СКЗ напруги U і СКЗ струму I . Повна потужність S , потужність спотворень D і фіктивна потужність F виражаються через ймовірнісну, активну і реактивну потужності і визначаються так

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (3)$$

$$D = \sqrt{V^2 - S^2}, \quad (4)$$

$$F = \sqrt{Q^2 + D^2}. \quad (5)$$

2. Обчислення потужності на основі малохвильового перетворення сигналів.

Рівняння як для обчислення СКЗ, так і для обчислення потужності з використанням малохвильового перетворення повинні базуватися на застосуванні дискретного малохвильового перетворення і будуть розширяти форми для застосування цифрових сигналів і обчислення реактивної потужності.

Аналогові сигнали $u(t)$, $i(t)$ і $u(t - 90^\circ)$ є періодичними сигналами з періодом T , а $i(n)$, $u(n)$ і $u_k(n)$ є цифровими сигналами $u(t)$, $i(t)$ і $u(t - 90^\circ)$ відповідно, з $n = 0, 1, \dots, 2^N - 1$ для періоду T . Квадратурна напруга $u(t - 90^\circ)$ відстає від сигналу напруги $u(t)$ на 90° для кожної частоти усього діапазону.

СКЗ напруги та струму відносно пов'язаних з ними масштабу і малохвильових рівнів можуть бути представлені

$$I_{\text{с.к.з.}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \cong \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} i^2(n)} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} c_{j_0,k}^2 + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k}^2} = \sqrt{I_{j_0}^2 + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} I_j^2} \quad (6)$$

$$U_{\text{с.к.з.}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \cong \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} u^2(n)} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} c'_{j_0,k}{}^2 + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^j-1} d'_{j,k}{}^2} = \sqrt{U_{j_0}^2 + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} U_j^2}. \quad (7)$$

де $c_{j_0,k}$ і $c'_{j_0,k}$ – масштабні коефіцієнти $i(n)$ і $u(n)$ відповідно на масштабному рівні j_0 і часі k , $d_{j,k}$ і $d'_{j,k}$ – малохвильові коефіцієнти $i(n)$ і $u(n)$ відповідно на малохвильовому рівні j і часі k .

Активна і реактивна потужності відносно пов'язаних з ними масштабу і мало-хвильових рівнів визначаються так

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \cong \frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} u(n)i(n) = \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} c_{j_0,k} c'_{j_0,k} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k} d'_{j,k} = P_{j_0} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} P_j. \quad (8)$$

і

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T u(t-90^\circ)i(t)dt \cong \frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} u_k(n)i(n) = \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} c_{j_0,k} c''_{j_0,k} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k} d''_{j,k} =$$

$$= Q_{j_0} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} Q_j, \quad (9)$$

де $c''_{j_0,k}$ і $d''_{j,k}$ – масштабні і малохвильові коефіцієнти $u_k(n)$ відповідно на рівнях j_0 і j та часі k .

3. Цифрові фазоповертачі. Для вимірювання реактивної потужності використовуються ланки 90° фазоповертання, на виходах яких формуються квадратурні напруги u_k і синфазні струми i . Порівняно з аналоговими ланками цифрові ланки фазоповертання звичайно забезпечують більшу точність, оскільки їх цифрові коефіцієнти не змінюються від температури або дрейфу. Відомі три різні методи побудови цифрових ланок 90° фазоповертання. Перший – метод рівних пульсацій; другий – максимально-плоский; і третій – метод найменших вагових квадратів. Перші два методи базуються на розробці аналогового всепропускного фільтра. Ланки аналогового всепропускного фільтра перетворюються в ланки цифрового фільтра методом білінійного перетворення. Такі цифрові всепропускні ланки є стабільними і визначають порядок фільтра за спеціальними умовами. На противагу цьому метод найменших вагових квадратів використовується для безпосередньої розробки цифрових ланок фазоповертання без білінійного перетворення. Зважаються декілька спеціальних частотних точок і фазові результати ланок в цих точках є дуже точними. Недоліком методу найменших квадратів є те, що результати зсуву фази в них є інколи нестабільними. Тому попередні два методи є вживанішими і зручними для розробки ланок фазоповертачів.

Коли частотна смуга є вузькою, результати максимально-плоского методу є набагато точніші, ніж результати, що відповідають методу рівних пульсацій. Однак у міру розширення частотного діапазону результати максимально плоского методу з однаковою фазовою похибкою погіршуються на початку і в кінці частотного діапазону. Метод рівних пульсацій має рівні пульсації фазової похибки близько 90° , але коливання похибки є однакові, незалежно, чи цей частотний діапазон є широкий, чи вузький. Тому, якщо потужність вимірюється в широкому діапазоні частот, то метод рівних пульсацій є ефективнішим, ніж максимально-плоский метод. Крім того, для методу рівних пульсацій загальний порядок все-частотного фільтра є набагато нижчим, ніж у максимально-плоскому методі.

Отже, малохвильове перетворення і цифрові ланки фазоповертання використовуються для запропонованого вимірювання реактивної потужності. Малохвильове перетворення

квадратурної напруги $u_k(n)$ і синфазного струму $i_c(n)$ отримується з послідовності вибірок $u_k(n)$ і $i_c(n)$, що збігаються в часі. Використовується однаковий ортонормальний малохвильовий базис, який застосовується до кожного циклу досліджуваної системи. Оскільки окремі піддіапазони для $u_k(n)$ і $i_c(n)$ реєструються як за часом, так і за частотою, кожен їх об'єднаний добуток $u_k(n) \times i_c(n)$ підсмуги являє собою внесок цієї смуги до сумарного значення реактивної потужності або циклу реактивної енергії. Підсумовування цих потужностей підсмуг зі знаками дає сумарну реактивну потужність для цієї пари $u_k(n)$ і $i_c(n)$ елементів.

4. Моделювання вимірювання реактивної потужності з малохвильовим перетворенням сигналів. Отриманий вище вираз (9) лежить в основі розробки структурної схеми комп'ютерного моделювання запропонованого процесу вимірювання реактивної потужності. Спрощена структурна схема моделювання наведена на рис. 1. До складу схеми комп'ютерної моделі вимірювання реактивної потужності на основі малохвильового перетворення сигналів входять: пристрої генерування вхідних сигналів напруги та струму (зокрема задання їх вищих гармонічних складових), генератори шуму ГШ 1, ГШ 2, пристрої дискретизації вхідних сигналів, пропорційних до миттєвих значень напруги $u(n)$ та струму $i(n)$, цифровий фазовертач ФП, пристрої малохвильового перетворення сигналів напруги ПМП 1 та струму ПМП 2, пристрої пороговування ПП 1, ПП 2, вимірювач реактивної потужності на основі малохвильового перетворення сигналів ВРП (МП), вимірювачі реактивної потужності за класичним алгоритмом ВРП 1 і ВРП 2, пристрої порівняння. За результатами останніх оцінюється похибка вимірювань.

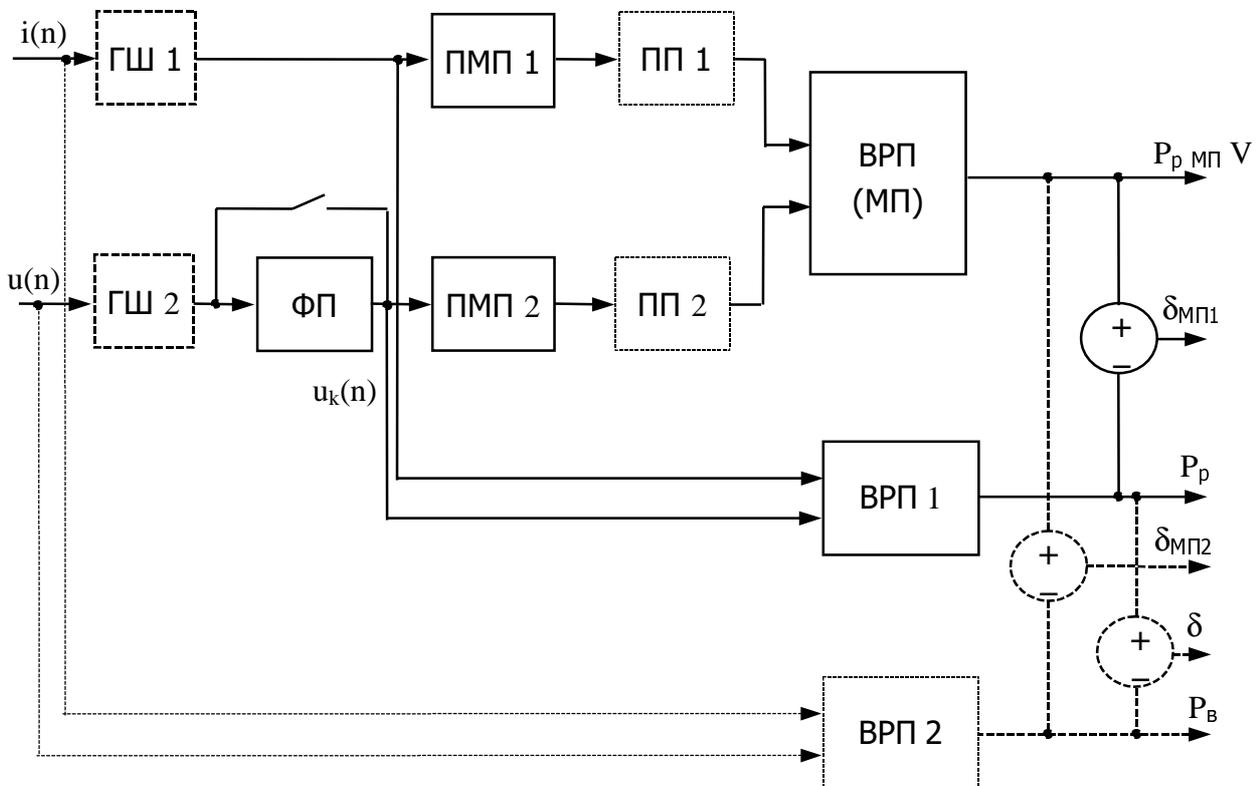


Рис. 1. Спрощена структурна схема комп'ютерного моделювання вимірювання реактивної потужності

Сигнали $u(n)$ і $i(n)$ дискретизуються в 2^N точках протягом основного циклу вимірювання. Вибірки $i_c(n)$ є синфазними до вихідного струму $i(n)$. Вибірки $u_k(n)$, які знімаються з фазовертача, є квадратурними до вихідної напруги $u(n)$. Сигнал $i_c(n)$ випереджає $u_k(n)$ на 90° на кожній частоті у всьому частотному діапазоні. Виходами блоків малохвильового перетворення є малохвильові коефіцієнти $d(u_k)_{j,k}$ і $d(i_c)_{j,k}$ і масштабні коефіцієнти $c(u_k)_{j,k}$ і $c(i_c)_{j,k}$ в часі k . Малохвильові рівні змінюються в межах від 2 до $N-1$, а масштабний рівень дорівнює 2^* . $Q_{N-1} - Q_2$ представляють їх реактивну потужність відносно відповідних малохвильових рівнів, які змінюються від $N-1$ до 2, Q_2 – реактивну потужність на масштабному рівні 2^* . Як вже зазначалося раніше, в багатьох випадках останній масштабний рівень часто зараховують до малохвильових рівнів.

Необхідно відзначити, що на основі наведеної структури легко реалізувати вимірювальну систему з проміжним малохвильовим перетворенням сигналів для вимірювання усього спектра енергетичних параметрів, а саме СКЗ напруги та струму, ймовірнісної, повної, активної, реактивної потужностей та потужності спотворень.

Оскільки реактивна потужність є одним з найвживаніших енергетичних параметрів, то на її прикладі розглядалося моделювання, для реалізації якого використовувався прикладний пакет MathLAB 6.0.

Моделювання процесу вимірювання періодичних сигналів. Розглядається вплив вищих гармонічних складових, які містяться у вхідних сигналах напруги та струму, на результат вимірювання реактивної потужності. Дослідження виконувалися при зміні рівня вхідних сигналів у межах 0 – 10 В 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 для сьомої M від 0,05 до 0,5

$$\begin{aligned} u(t) &= U_d \left(\sqrt{2} \sin(2\pi 50t) + K \sqrt{2} \sin(2\pi 250t + 120^\circ) + M \sqrt{2} \sin(2\pi 350t) \right), \\ i(t) &= I_d \left(\sqrt{2} \sin(2\pi 50t + 30^\circ) + K \sqrt{2} \sin(2\pi 250t) + M \sqrt{2} \sin(2\pi 350t) \right). \end{aligned}$$

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

Отриманий вище вираз (9) лежить в основі розробки структурної схеми комп'ютерного моделювання запропонованого процесу вимірювання реактивної потужності. Спрощена структурна схема моделювання складається з трьох основних частин. Перша частина містить схему моделювання вимірювання реактивної потужності синусоїдальних та періодичних вхідних сигналів, які піддаються попередньому дискретному малохвильовому перетворенню. Друга частина структурної схеми складається з схеми комп'ютерного моделювання (згідно з виразом (2)) вимірювання реактивної потужності згаданих синусоїдальних і періодичних сигналів класичним способом. Результати вимірювання такої схеми вважаються взірцевими і використовуються для порівняння. Третя частина 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 реактивної потужності та взірцевих результатів схеми класичного вимірювання реактивної

потужності. Крім того, до складу третьої частини схеми входить пристрій порівняння отриманих результатів, на основі яких обчислюються похибки перетворення.

Результати досліджень вимірювання реактивної потужності періодичних сигналів з використанням малохвильового перетворення вхідних сигналів наведені на рис. 2 і рис. 3.

Отримані результати підтверджують прогнозовані сподівання, що реактивну потужність періодичних сигналів у малохвильовій області можна вимірювати з високою точністю. Причому рівень похибки вимірювання дещо зменшується при збільшенні процентного вмісту гармонік. Це пояснюється тим, що збільшення процентного вмісту гармонік приводить до збільшення рівня реактивної потужності.

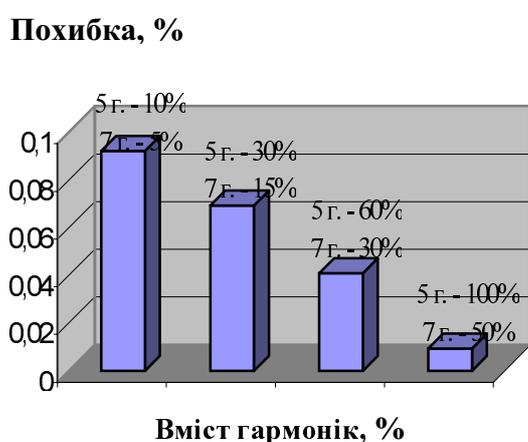


Рис. 2. Залежність похибки вимірювання від процентного вмісту гармонік у максимальних вхідних сигналах

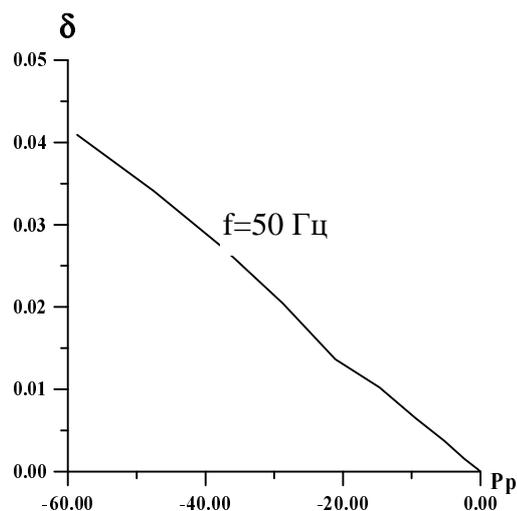


Рис. 3. Залежність похибки вимірювання від зміни реактивної потужності вхідних періодичних сигналів (5 гармоніка – 60%, 7 гармоніка – 30%)

Моделювання процесу вимірювання синусоїдальних та періодичних сигналів з накладанням завад. У цьому випадку досліджувався вплив на результат вимірювання реактивної потужності завад, які накладалися на вхідні сигнали напруги та струму у вигляді білого шуму з гауссівським розподілом та шуму з рівномірним розподілом. Вимірювання моделювалось у всьому динамічному діапазоні зміни вхідних сигналів на частоті 50 Гц. На генеровані вхідні сигнали $u(t)$ і $i(t)$ одночасно накладалися однакові та різні типи шумів, рівень яких змінювався від 15% до 50% від рівня максимальної амплітуди сигналу.

Моделювання вимірювання реактивної потужності також базується на використанні виразу (9). Для цього випадку на наведеній вище структурній схемі моделювання (рис. 1) вводяться додаткові елементи схеми, які позначені пунктиром. До них входять генератори шумів, пристрій порогоування, схема вимірювання реактивної потужності, на яку не подаються зашумлені вхідні сигнали, та два пристрої порівняння. Шуми, що накладаються на інформативні сигнали, змінюються за видом і рівнем, який оцінюється відносно рівня інформативних сигналів.

В однотипних пристроях порогоування виконується жорстке порогоування отриманих малохвильових коефіцієнтів напруги та струму. Рівень порогоування залежить від споживача і визначається рівнем зашумленості сигналу та рівнем його допустимих спотворень.

Похибка, %

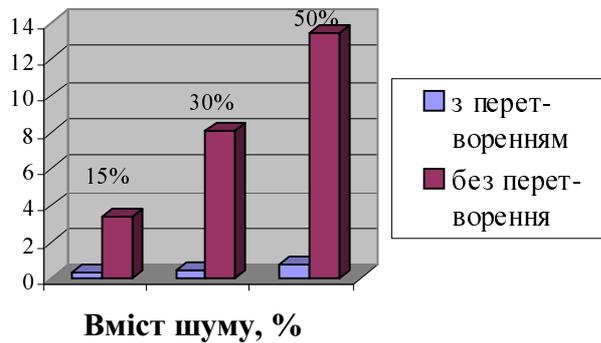


Рис. 4. Залежність похибки вимірювання реактивної потужності від процентного вмісту корельованого шуму з гауссівським розподілом у вхідних періодичних сигналах і 93%-му порогованні

Похибка, %

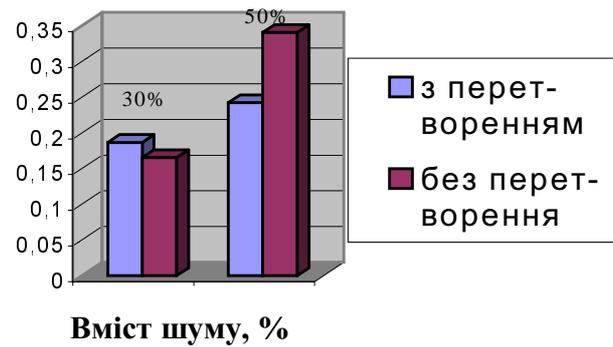


Рис. 5. Залежність похибки вимірювання реактивної потужності від процентного вмісту некорельованого шуму з різним гауссівським розподілом у вхідних періодичних сигналах і 93%-му порогованні

δ

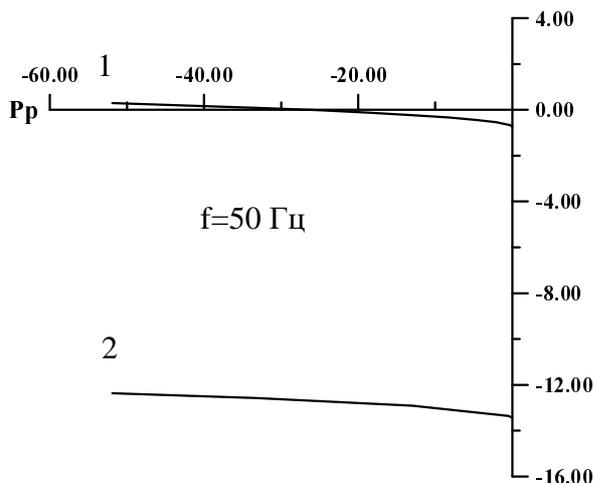


Рис. 6. Залежність похибки вимірювання від зміни реактивної потужності вхідних періодичних сигналів (5 гармоніка – 30%, 7 гармоніка – 15%) при накладанні на них 50% шуму з гауссівським розподілом від максимальної амплітуди сигналу (1 – при малошумовому перетворенні і наявності 7% інформативного сигналу; 2 – без перетворення)

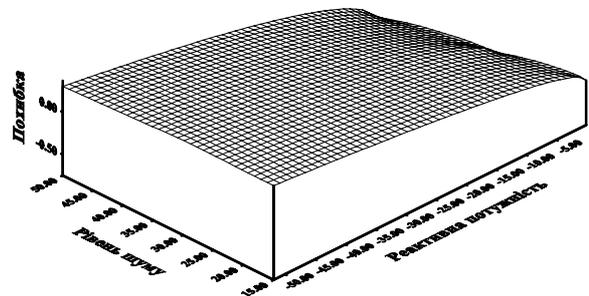


Рис. 7. Залежність зведеної похибки від зміни реактивної потужності та рівня вхідного шуму з гауссівським розподілом, який накладається на вхідний періодичний сигнал при використанні малошумового перетворення

Додаткова схема вимірювання реактивної 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 запро-

понованої схеми вимірювання реактивної потужності. Результати досліджень вимірювання реактивної потужності синусоїдальних та періодичних сигналів з накладанням завад наведено на рис. 4 – 7.

Отримані результати досліджень показують, що запропонована схема вимірювання реактивної потужності має набагато вищу завадостійкість порівняно з традиційною схемою, особливо коли завади є корельованими. Результати вимірювань мало залежать від типу завад в усьому динамічному діапазоні зміни вхідних періодичних сигналів, але ще залежать від рівня порогування малохвильових коефіцієнтів. Оскільки при порогуванні передається лише частина інформативного сигналу, то кількість обчислень істотно зменшується, а, отже, збільшується швидкодія вимірювання та можливість використання компресії сигналів.

Висновки

1. Проведені дослідження демонструють можливість ефективного використання малохвильового перетворення для вимірювання реактивної потужності при одночасному застосуванні якісних широкосмугових квадратурних фазозсуваючих ланок.

2. В запропонованому методі вимірювання реактивної потужності на кожному малохвильовому рівні підтримуються як часова, так і спектральна залежності, пов'язані з окремими потужностями, отриманими з властивості малохвильового перетворення.

3. У разі одночасного вимірювання активної і реактивної енергії при використанні малохвильового перетворення сигналів вважається можливим стежити за потоками активної і реактивної енергії через навантаження системи на кожному малохвильовому рівні.

4. Реактивний фазосуваючий фільтр і двоелементні фільтри, які пов'язані з одночасними малохвильовими перетвореннями напруги і струму, вимагають синхронізації дискретних даних. Однак якщо вибірки напруги і струму отримуються асинхронно на достатньо малому вибіркового інтервалі, то одночасна інтерполяція в синхронізмі з вимірною системою дає змогу обчислювати алгоритми активного і реактивного малохвильового перетворення з незначними відхиленнями за точністю.

5. На основі розглянутої структури вимірювання реактивної потужності з незначними апаратними затратами можна легко реалізувати систему з проміжним малохвильовим перетворенням сигналів для вимірювання усього спектра енергетичних параметрів, а саме СКЗ напруги та струму, ймовірнісної, повної, активної, реактивної потужностей та потужності спотворень.

6. Результати досліджень показують, що реактивну потужність періодичних сигналів у малохвильовій області можна вимірювати з високою точністю; рівень похибки вимірювання зменшується при збільшенні процентного вмісту гармонік.

7. Запропонована схема вимірювання реактивної потужності має набагато вищу завадостійкість порівняно з традиційною схемою, особливо якщо завади є корельованими. Результати вимірювань мало залежать від типу завад в усьому динамічному діапазоні зміни вхідних періодичних сигналів, однак залежать від рівня порогування малохвильових коефіцієнтів. Оскільки при порогуванні передається лише частина інформативного сигналу, то кількість обчислень істотно зменшується, а отже, збільшується швидкодія вимірювання та можливість використання компресії сигналів.

1. Наконечний А.Й. *Теорія малохвильового перетворення та її застосування*. – Львів, 2001. 2. Filipski P.S., Baghzouz Y. and Cox M.D. Discussion of power definitions contained in the IEEE dictionary, *IEEE Trans. Power Delivery*, V. 9, P. 1237-1244.