

- Р.Т. Генератори тестових імпульсних послідовностей для дозиметричних пристроїв // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – № 506. – 2004. – С. 187–193. 5. Дудикевич В.Б., Максимович В.М., Смук Р.Т. Імітаційні моделі дозиметричного детектора з мертвим часом непродовжуючого типу // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – № 530. – 2005. – С. 46–52.
6. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К., 1983.

УДК 621.311.13

В.М. Ванько

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНОГО WAVELET-ПЕРЕТВОРЕННЯ

© Ванько В.М., 2006

На основі аналізу особливостей виконання wavelet-перетворення запропоновано реалізацію методики вимірювання повільних збурень і змін напруги за допомогою дискретної трансформації. Розглянуто специфіку обчислення масиву wavelet-коефіцієнтів, з урахуванням параметрів базових функцій. Наведено вирази для визначення необхідних показників якості електроенергії в мережі.

On the basis of the analysis of wavelet-conversion performing peculiarities the realization of slow indignation and voltage change measuring methods with the help of discrete transformation is proposed. The special feature of wavelet-coefficient array calculation taking its start from basic function parameters is considered. The expressions aimed at determining of necessary indices of network electric energy quality.

Вступ. Якість електроенергії (ЕЕ) значною мірою визначає ефективність, продуктивність та надійність функціонування різноманітного дорогого електротехнічного і електронного обладнання. За даними нормативно-технічних документів [1, 2] відповідність ЕЕ встановленим вимогам регламентується групою повільних показників якості. До них належать показники, що характеризують збурення і зміни напруги, у вигляді встановленого відхилення \mathcal{U}_σ середньоквадратичного значення (СКЗ) і розмаху зміни \mathcal{U}_t напруги стосовно номінального значення $U_{ном}$, а також дози флікера $P_{\sigma\phi}$ і частоти повторення змін напруги F_{Ut} . Крім того, варто контролювати показники, які дають змогу оцінити рівень спотворень досліджуваного сигналу завдяки коефіцієнтові

спотворення синусоїдності напруги k_{UCS} та масиву коефіцієнтів гармонічних складових k_{Un} , котрі зумовлені внеском класичних гармонік, інтергармонічних і неканонічних складових [3, 4].

Особливості неперервного wavelet-перетворення. У [4, 5, 6] було запропоновано методику вимірювання повільних збурень і змін напруги, за допомогою якої отримують сумарний сигнал Δf_{US} , що містить інформацію про наведені показники якості ЕЕ.

Опрацюванню за допомогою wavelet-перетворення (ВВП) піддаються досліджувані сигнал напруги $f_U(t)$ та певний зразковий сигнал $f_{US}(t)$, а різниця між отриманими матрицями wavelet-коефіцієнтів $|C_{a,d-\Delta}|$ згідно з [4] відображає сукупну інформацію про повільні збурення і спотворення кривої напруги мережі.

За даними [6, 7] для побудови засобу вимірювання перерахованих показників запропоновано структуру, котра має двоступеневу організацію – вхідну частину збирання і первинного опрацювання інформації на основі однокристального мікроконтролера та перетворювальну і обчислювальну схему на персональному комп'ютері.

Відповідно до [8, 9, 10] найповніші дані про якість ЕЕ забезпечує застосування стосовно названої методики неперервного ВВП. Це дає змогу використовувати стандартні програмні системи, наприклад, про MATLAB, для здійснення ВВП і аналізу матриці $|C_{a,d-\Delta}|$. Проте неперервний ВВП має низку істотних недоліків.

Його практична реалізація потребує складних обчислень, котрі, як правило, можна виконати лише на персональному комп'ютері. Часто отримана wavelet-інформація має надлишковий характер, що вимагає додаткових заходів щодо зменшення її обсягу. Крім того, дослідження точності здійснення неперервного ВВП ускладнюється тим, що у більшості базових wavelet-функцій відсутні аналітичні вирази їхнього дійсного відображення, завдяки чому неможливо прецизійно сформулювати межі зміни масштабу a перетворення контрольованого сигналу.

Застосування дискретного wavelet-перетворення для аналізу якості електроенергії. Як вказано в [8, 9, 10], уникнути цих недоліків допомагає застосування дискретного ВВП. За його допомогою зручно опрацьовувати дискретизовані в часі сигнали з огляду на простоту реалізації перетворення і побудову відповідної структури вимірювального засобу. Використання дискретного ВВП доцільне також, зважаючи на потреби забезпечення необхідного рівня метрологічних характеристик і порівняно невеликих значень часу вимірювання пакета наведених показників якості ЕЕ.

Викладена в [9, 10] ідея розкладу досліджуваного дискретного сигналу $\{f_U(k)\}$ напруги на низькочастотну (згладжену) і високочастотну (деталізовану) складові покладена в основу дискретного ВВП. Для здійснення перетворення формують родину базових wavelet-функцій – масштабувальної $\varphi_{mn}(t)$ та деталізуючої $\psi_{mn}(t)$:

$$\varphi_{mn}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \cdot \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) = 2^{-\frac{m}{2}} \cdot \varphi(2^{-j} \cdot t - n_{\sigma}) \quad (1)$$

$$\psi_{mn}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = 2^{-\frac{m}{2}} \cdot \psi(2^{-j} \cdot t - n_{\sigma}) \quad (2)$$

де j – рівень розкладу ВВП, $a = a_0^m$; $b = n_{\sigma} \cdot a \cdot b_0$ – параметри масштабу та зміщення цих wavelet-

функцій, що визначаються здебільшого цілими числами m, n_b , а $a_0 = 2$ і $b_0 = 1$.

Необхідно відзначити, що найчастіше у вигляді $\varphi_{mn}(t)$ і $\psi_{mn}(t)$ застосовують ортонормальні базиси функцій, що сприяє зрозумілішому трактуванню суті коефіцієнтів ВВП, а тому і ефективнішому аналізу збурень і змін $\{f_U(k)\}$.

За даними праць [9, 10] кожній базовій функції ставлять у відповідність фільтри розкладу: низькочастотний з n ваговими коефіцієнтами $\{g_n\}$ і високочастотний з $\{h_n\}$.

З їхньою допомогою реалізують нормування і переміщення в часі базових функцій на кожному $(j+1)$ -му рівні, використовуючи виведені з (1) і (2) вирази

$$\varphi_{j+1,x} = \sum_n g_n \cdot \varphi_{j,n+2x}, \quad (3)$$

$$\psi_{j+1,x} = \sum_n h_n \cdot \varphi_{j,n+2x}, \quad (4)$$

причому x – параметр інтервалу контролю на кожному рівні перетворення досліджуваної функції $\{f_U(k)\}$.

Внаслідок $(j+1)$ -го рівня ВВП отримуємо масиви коефіцієнтів апроксимації

$$a_{j+1,x} = (f_U(k), \varphi_{j+1,x}) = \sum_n \overline{g_n} \cdot a_{j,n+2x} \quad (5)$$

та деталізуючих коефіцієнтів

$$d_{j+1,x} = (f_U(k), \psi_{j+1,x}) = \sum_n \overline{h_n} \cdot a_{j,n+2x}, \quad (6)$$

що досягається завдяки наявній інформації з попереднього j -го перетворення – $\{a_{j,n}\}$, а на початку алгоритму – на основі значень $\{f_U(k)\}$ [4, 9, 10].

Застосувавши дискретний ВВП для досліджуваного $f_U(t)$ та зразкового $f_{US}(t)$ сигналів, маємо згідно з [4] результуючу матрицю wavelet-коефіцієнтів $|DA_{\Delta f \Sigma}|$.

За даними [10] для кожного m рівень аналізованих функцій напруг в момент часу t_0 описується значеннями коефіцієнтів ВВП, які стосуються інтервалу носія $[n_{m1}, n_{m2}]$ базової функції $\psi_{mn}(t)$ відповідно до нерівності

$$(n_{m1} + n_m) \cdot 2^m \leq t_0 \leq (n_{m2} + n_m) \cdot 2^m, \quad (7)$$

де n_m – поточне значення параметра b перетворення.

Одночасно складова контрольованого сигналу з круговою частотою ω_s впливає на коефіцієнти ВВП рівня, заданого значенням m , для котрого визначено смугу частот

$$\frac{\omega_{\min}}{2^m} \leq \omega_s \leq \frac{\omega_{\max}}{2^m}, \quad (8)$$

з урахуванням інтервалу кругових частот $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$, де зосереджена енергія wavelet-функції $\psi(t)$.

Отже, аналогічно як і для неперервного ВВП, після дискретного перетворення досліджуваних

функцій отримують матриці коефіцієнтів, які в сукупності відображають їхню поведінку у вигляді зміни спектрального складу сигналу протягом часу спостереження.

Відповідно до (8) дані матриці описують розподіл енергії сигналу на рівнях $j = 0, 1, 2, \dots, J$ (J – останній рівень ВВП) за певними частотними смугами. Значення J вибирають з можливого спектрального діапазону $f_U(t)$. За даними [1, 3, 5, 6] повільні збурення і зміни напруги мережі варто розподілити на два частотні інтервали аналізу.

Перший з них характеризує повільні зміни спектра $f_U(t)$ через наявність високочастотних інтергармонік та класичних (цілочислово пропорційних до промислової) і неканонічних гармонік, що

включає діапазон кругових частот ω_s від $10^2 \cdot \pi$ до $10^4 \pi \frac{\text{рад.}}{\text{с.}}$.

Згідно з [4] до другого інтервалу треба зарахувати повільні відхилення СКЗ напруги, котрі трактуються як умовно періодичні складові $f_U(t)$ із зміною кругових частот в діапазоні $\omega_s = 2\pi \cdot (0.25 \dots 25) \frac{\text{рад.}}{\text{с.}}$.

Зважаючи на достатньо великий сукупний інтервал ω_s досліджуваної $f_U(t)$, доцільно використовувати запропоновану в [4–6] методику вимірювання повільних збурень і змін напруги мережі так.

На першому етапі можна вибрати частотний діапазон аналізу $f_U(t)$ в межах $\omega_s = 2\pi \cdot (0.25 \dots 500) \frac{\text{рад.}}{\text{с.}}$. Достатньо забезпечити $J = 11$. За даними [4], використовуючи (6),

знаходимо значення енергії на кожному J -му рівні ВВП протягом сумарного часу $t_{B\Sigma}$ вимірювання

$$E_{j\Sigma} = \sum_{n_B} E_{dj} = \sum_{n_B} \sum_p d_{jp}^2, \quad (9)$$

де $n_B = 1, 2, \dots, (n_B)_{\max}$ – кількість інтервалів вимірювання, кожен з яких дорівнює одному чи

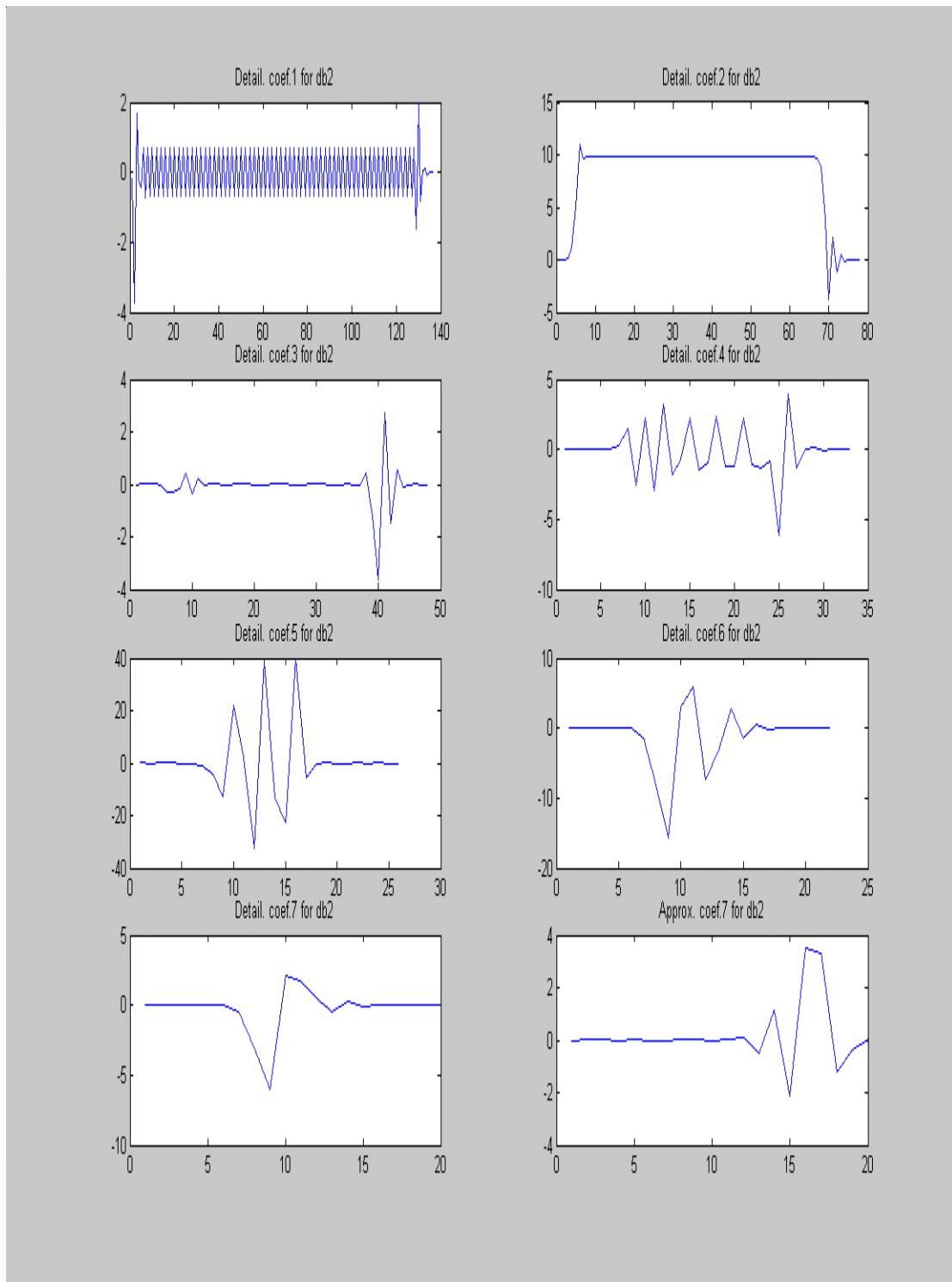
декільком періодам повторення $f_U(t)$, $(n_B)_{\max} = \frac{t_{B\Sigma}}{t_B}$, t_B – тривалість одного з цих інтервалів

вимірювання, котрий містить $p = \frac{N_\Sigma}{n_B \cdot 2^j}$ – кількість wavelet-коефіцієнтів на J -му рівні ВВП,

N_Σ – сумарна кількість точок дискретизації для $\{f_U(k)\}$ за $t_{B\Sigma}$. Завдяки обчисленим значенням

$E_{j\Sigma}$ можна робити висновок про спектральний склад досліджуваної $f_U(t)$, причому відповідно до

(8) отримані дані стосуються певної частотної смуги з шириною, різною для кожного J -го рівня дискретного ВВП.



*Графіки wavelet-коефіцієнтів дискретного ВВП
для прикладу спотвореного сигналу напруги мережі*

На рисунку показано приклад дискретного ВВП спотвореного сигналу напруги мережі, що складається з суми двох синусоїдних сигналів з однаковими амплітудами $U_{m1} = U_{m2} = 7B$;

круговими частотами $\omega_1 = 100 \cdot \pi \frac{\text{рад.}}{c.}$ і $\omega_2 = 8 \cdot \pi \frac{\text{рад.}}{c.}$. Графіки wavelet-коефіцієнтів розраховано для семи рівнів перетворення із застосуванням базових функцій Добеші $\varphi_{mn}(t)$ і $\psi_{mn}(t)$ – db10.

Необхідно враховувати те, що коли частота ω_s складової $f_U(t)$ потрапляє в проміжок між значеннями центральних частот сусідніх рівнів ВВП, то енергія цієї складової розподіляється між ними.

Якщо відзначається істотне спотворення $f_U(t)$, спричинене вищими від промислової частоти гармоніками, то на перших рівнях ВВП з'являться великі значення енергії $E_{j\Sigma}$. У такому разі доцільно додатково здійснити другий етап дискретного перетворення $f_U(t)$, вибираючи частотний інтервал аналізу з наведеними вище значеннями ω_s . Надалі, як і попередньо, за виразом (9) обчислюють значення $E_{j\Sigma}$ для вибраних на другому етапі рівнів ВВП.

За даними [1, 4, 7] для визначення більшості з наведених вище повільних показників якості ЕЕ використовують СКЗ-функції $f_U(t)$. Завдяки застосуванню цієї методики вимірювання повільних збурень і змін напруги отримують матрицю wavelet-коефіцієнтів $|DA_{\Delta\Sigma}|$, що складається відповідно до (5) і (6) з набору деталізуючих $\Delta d_{j,n+2x}$ всіх рівнів перетворення та рядка апроксимаційних $\Delta a_{J,n+2x}$ коефіцієнтів останнього J -го рівня [4, 6]. Отже, подаючи за допомогою останніх часову функцію сумарних збурень і завад у вигляді

$$\Delta f_{U\Sigma}(t) = \sum_n \Delta a_{J,n+2x} \cdot g_n^c + \sum_n \sum_{j \geq j_0} \Delta d_{j,n+2x} \cdot h_n^c \quad (10)$$

де g_n^c, h_n^c – синтезуючі фільтри відновлення кривої з наведених коефіцієнтів ВВП, j_0 – число першого рівня перетворення, відобразимо СКЗ цієї функції, використовуючи властивості родини базових wavelet-функцій

$$(\Delta f_{U\Sigma})_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N_B} \cdot \left[\sum_n (\Delta a_{J,n+2x})^2 + \sum_n \sum_{j \geq j_0} (\Delta d_{j,n+2x})^2 \right]} \quad (11)$$

причому N_B – кількість точок дискретизації за час t_B .

На основі цього варто визначити величини \mathcal{U}_v і \mathcal{U}_t , враховуючи [1, 7] та (11), у вигляді

$$\mathcal{U}_t \in \mathcal{U}_B = \left[\frac{(\Delta f_{U\Sigma})_{ef}}{U_{ном}} - 1 \right] \quad (12)$$

де $U_{ном}$ – номінальне значення СКЗ напруги контрольованої мережі. Реалізуючи останній вираз для кожного t_B , отримаємо дані стосовно \mathcal{U}_t з сукупності інформації про \mathcal{U}_v .

Спотворення досліджуваної $f_U(t)$ оцінюються за допомогою показників k_{UCS} та k_{Un} , котрі визначаються за виразами

$$k_{UCS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_B} \cdot \left[\sum_n (\Delta a_{J,n+2x})^2 + \sum_n \sum_{j \geq j_0} (\Delta d_{j,n+2x})^2 + \sum_n \sum_{j_s} (\Delta d_{j,n+2x})^2 \right]}}{(\Delta f_{U\Sigma})_{ef}} \quad (13)$$

$$(k_{Un})_m = \frac{\left[\sqrt{\frac{1}{N_B} \cdot \sum_n (\Delta d_{j,n+2x})^2} \right]_j}{(\Delta f_{U\Sigma})_{ef}}, \quad (14)$$

де J_n і J_s – нижній і верхній рівні ВВП, що розташовані поруч з рівнем J_n , який стосується промислової частоти. Варто зауважити, що при обчисленні k_{UcS} за (13) виникає певна методична похибка через неврахування інформації, яка знаходиться в J_n і може містити енергію відповідної частини спектра $f_U(t)$. Проте за даними [3] ймовірність появи таких спотворень напруги мережі є достатньо низькою. Крім того, при забезпеченні вимірювань цих показників якості ЕЕ на рівні, не вищому за $\pm 0.5\%$, цією похибкою можна знехтувати.

Погіршення якості ЕЕ через надповільні коливання напруги, які описуються дозою флікера $P_{\phi\phi}$ і частотою повторення змін напруги F_{Ut} , можна визначити, використовуючи вирази (9) і (11), у вигляді СКЗ напруги на останніх рівнях ВВП.

З погляду надійності для великої кількості силового електротехнічного устаткування важливу роль відіграють швидкості зміни СКЗ $S_{U,ck}$ та інтервальних значень напруги S_{Ur} . Після здійснення дискретного ВВП ці величини можна знайти за такими виразами

$$S_{U,ck} = \frac{(\Delta f_{U\Sigma})_{ef,l+1} - (\Delta f_{U\Sigma})_{ef,l}}{\Delta t_{an}}, \quad (15)$$

$$S_{Ur} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_r} \cdot \sum_{j \geq j_0} \sum_s \Delta d_{j,n+2x}^2}}{\Delta t_{dr}}, \quad (16)$$

де Δt_{an} і Δt_{dr} – інтервали часу, за які визначають ці величини, N_r – кількість точок дискретизації $f_U(t)$, що містяться в цих інтервалах, l – поточне СКЗ досліджуваної напруги, s – кількість використаних коефіцієнтів ВВП на J -му рівні, котре є різним для кожного рівня.

Наведені вирази для вимірювання повільних показників якості ЕЕ слугували основою для побудови структури спеціалізованого аналізатора, котра детально описана в [6, 7].

Висновки. Застосування нового способу опрацювання інформації на основі wavelet-перетворення дало змогу реалізувати єдиний підхід до аналізу якості ЕЕ. Використовуючи отримані масиви коефіцієнтів перетворення, можна визначити велику групу показників якості ЕЕ, котрі сприяють ефективному дослідженню функціонального стану електричних мереж загального призначення.

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. ГОСТ 27487-87. Электрооборудование производственных машин. Общие технические требования и методы испытаний.
3. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М., 2000.
4. Ванько В.М. Метод оцінки збурень напруги в електричних мережах // Вісник НУ "Львівська політехніка". – 2005. – №544. – С. 19–25.
5. Столярчук П.Г., Гудим В.І., Ванько В.М. Вдосконалення методу оцінки координат режимів електроенергетичної системи / Наукові праці Донецького НТУ. Серія "Електротехніка і енергетика". – Донецьк, 2004. – Вип.79. –С. 189–191.
6. Столярчук П.Г., Гудим В.І., Ванько В.М.

Застосування вейвлет-перетворення для аналізу електромагнітних процесів в системах електропостачання / Вісник Приазовського ДТУ. "Енергетика" – Маріуполь, 2005. – Вип. 15. – Част.2. – С. 92–95. 7. Włodzimierz WAŃKO, Petro STOLARCZUK "Badania wahań powolnych napięcia sieci elektrycznej bazujące się na nowoczesnych metodach matematycznych opracowania sygnałów" // XL International symposium on electrical machines «SME 2004», Hajnywka, Poland, Conference Proceedings, 15-18 June 2004. – P. 234–236. 8. Наконечний А.Й. Теорія малохвильового перетворення та її застосування. – Л., 2001. 9. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М., 2005. 10. Białasiewicz J.T. Falki i aproksymacje. – Warszawa, 2004.

УДК 621.317.73

М.О. Гаврилюк, В.В. Хома*

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра автоматики та телемеханіки,

*Політехніка Опольська, інститут автоматики і інформатики

АКТИВНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ "ІМІТАНС–НАПРУГА", ІНВАРІАНТНІ ДО ВПЛИВУ КОМУТАЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ПІД'ЄДНУВАЛЬНИХ ПРОВОДІВ

© Гаврилюк М.О., Хома В.В., 2006

Розглядається використання операційних підсилювачів для зменшення впливу паразитних параметрів комутаційних елементів та під'єднувальних проводів у перетворювачах "імітанс–напруга". Описано два варіанти побудови перетворювачів імітансу багатополосних об'єктів – із п'яти- та шестизатискною схемою підключення. Наведено також схему перетворювача імітансу для автоматичних багатодіапазонних приладів.

The employment of operational amplifiers for decrease parasitic impedance of switching units and connector cable in immitance to voltage converters are considered. Two versions of multipoint object immitance converters design are description. The immitance converter circuit for an automatic multirange devices is also presentation.

1. Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і мета статті. В останні десятиліття в електровимірювальній техніці сформувався новий напрямок – прикладне вимірювання імітансу. В цих застосуваннях різні фізичні величини, часто неелектричної природи, досліджують за допомогою непрямих сукупних вимірювань, що ставить низку додаткових вимог до засобів вимірювання імітансу.

Об'єкти, імітанс яких підлягає вимірюванню, підключаються до приладу за допомогою з'єднувальних екранованих проводів вхідного кабелю, а в автоматичних багатодіапазонних приладах чи вимірювачах багатополосних об'єктів додатково використовують ще й комутаційні пристрої. Паразитні параметри згаданих елементів такі, як опір проводів та ємність "екран–провід" вхідного кабелю, залишкові опори контактів замкненого електронного ключа чи скінченне їхнє значення у розімкненому стані, негативно позначаються на метрологічних властивостях вимірювальних перетворювачів імітансу у напругу. Застосування операційних підсилювачів (ОП) у поєднанні із багатопровідними багатозатискними схемами підключення контрольованого об'єкта до вимірювального приладу дає змогу зменшити вплив згаданих паразитних факторів на результати вимірювання [1, 2]. Застосування операційних підсилювачів у перетворювачах "імітанс–напруга" має ще один позитивний аспект – забезпечує вищу чутливість та дає змогу створити на об'єкті контролю (ОК) режим заданого струму при вимірюванні імпедансу чи режим заданої напруги при вимірюванні адмітансу.