

УДК 621.317

*Н.І. ПОВОРОЗНЮК*, канд. техн. наук, доц., НТУУ "КПІ", Київ,  
*К.Е. БОБРІВНИК*, асист., НУХТ, Київ

## **ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ (SMART GRID)**

Розглянуті тенденції розвитку енергетичних систем. Проаналізований сучасний етап розвитку систем енергозабезпечення і вказані проблеми і виклики. Обґрунтована необхідність підвищення якості вимірювання параметрів енергосистем. Запропонований алгоритм синхронізованих вимірювань векторів напруги і струму на основі вейвлет-перетворення і проаналізовані похибки вимірювань. Бібліогр.: 15 назв.

**Ключові слова:** інтелектуальні системи електроживлення, вейвлет-перетворення, синхронні вимірювання векторів напруги і струму.

**Постановка проблеми.** Бурхливий розвиток світової економіки призводить до того, що традиційні системи електроживлення вже не відповідають вимогам і викликам сучасності. Виснаження джерел органічних енергоносіїв і забруднення довкілля від їх спалювання стимулює розробку і впровадження відновлювальних джерел енергії, розподілених по великій території. Різко зростає частка споживачів чутливих до якості електроенергії. Це лише частина проблем, яка постала перед сучасною енергетикою.

Для вирішення цих проблем у США і Європейському Союзі була розроблена концепція розвитку енергетики, яка дістала назву Smart Grid [1, 2], що можна трактувати як інтелектуальні енергетичні системи. Цією концепцією передбачається підняти енергетику на якісно вищий рівень, зокрема за рахунок масового впровадження мікропроцесорної техніки з відповідним програмним забезпеченням, істотно підвищити її надійність, ефективність, керованість, захищеність. У 2006 році в Україні була прийнята "Енергетична стратегія України на період до 2030 року", якою передбачено розвиток вітчизняної енергетики відповідно до нових вимог і викликів.

**Аналіз літератури.** Концепція Smart Grid була розроблена у США і Європейському Союзі на урядовому рівні [1 – 3]. У [4] аналізуються перспективи розвитку енергетики на майбутнє. Розвиток енергетики в Україні аналізується в [5]. Однією з найважливіших складових енергетики завтрашнього дня є розвиток новітньої системи вимірювань. Проблеми у цій галузі аналізуються в [6 – 9]. Глобальна система позиціонування GPS дала змогу здійснювати синхронні вимірювання векторів напруги і струму електромережі у будь-яких точках земної поверхні. Уперше синхронні вимірювання векторів напруги і струму

запропонував у 1983 році і здійснив на практиці у 1988 році професор Політехнічного інституту у штаті Вірджинія (США) Еран Фадке (Arun Phadke) [10]. Авторитетна міжнародна організація IEEE розробила для приладів, що виконують такі вимірювання стандарт [11]. В Україні, в Інституті електродинаміки НАНУ була розроблена і впроваджена у практику система синхронних вимірювань "Регіна-Ч" [12], яка не поступається зарубіжним аналогам. Проблеми синхронних вимірювань векторів напруги і струму висвітлено у джерелах [13 – 15].

**Мета статті.** Розв'язати проблему підвищення якості електроенергії.

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку системи електроживлення є однією з найважливіших складових цивілізаційного розвитку людства. Традиційні системи електроживлення, у яких значна частина енергії генерується потужними електростанціями, що працюють на органічних енергосіях (кам'яне вугілля, нафта, природний газ тощо), і передається до кінцевого споживача через магістральну і розподільчу мережу, вже не відповідає сьогодишнім вимогам і викликам. У зв'язку з цим була розроблена нова концепція інноваційного перетворення енергетики Smart Grid, яка включає такі основні положення: модернізація галузі на всіх її рівнях, включаючи генерацію, передачу, розподіл і споживання електроенергії; розвиток "інтернет-подібної" інфраструктури для підтримки не тільки енергетичних, а й інформаційних, економічних, фінансових та інших взаємозв'язків між усіма суб'єктами енергоринку; розробка і впровадження нових технологій, які дають змогу істотно поліпшити існуючі і створити нові функціональні можливості енергосистем; концепція охоплює весь комплекс робіт від пошукових досліджень до впровадження інновацій у практику і провадиться на науковому, технічному, технологічному, інформаційному, правовому рівнях.

**Вимірювання енергетичних параметрів.** Одним з пріоритетних напрямків технологічного розвитку у руслі концепції Smart Grid є розробка і впровадження інтелектуальної системи вимірювання (AMI — Advanced Metering Infrastructure). Однією з важливих складових таких систем є застосування інтелектуальних датчиків, які крім функції вимірювання виконують статистичну обробку результатів вимірювання, вибирають в автоматичному режимі діапазон вимірювання та інші параметри вимірювального пристрою, підтримують інтерфейсні функції. Інтелектуальні датчики зв'язані між собою комунікаційною мережею. Це дає змогу не тільки передавати вимірювальну інформацію (наприклад, про спожиту електроенергію) від споживача до диспетчера, а й у

зворотному напрямі (наприклад, інформувати споживача про тарифи на електроенергію у даний момент часу).

**Вимірювання векторів струму і напруги за допомогою вейвлет-перетворення.** Серед енергетичних параметрів, які вимірюються за допомогою інтелектуальної системи вимірювання, важливе значення має вимірювання векторів напруги і струму у найважливіших точках електричної мережі. Відомо, що синусоїдну напругу (струм) електричної мережі

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad (1)$$

можна представити вектором (англ. *Phasor*), що має довжину (модуль)  $U = U_m / \sqrt{2}$ , рівний діючому значенню, і кут  $\psi_u$ , рівний початковій фазі. Вектори напруги і струму використовувалися дотепер лише для теоретичного аналізу електричних кіл, а на практиці обмежувалися вимірюванням діючих значень.

Ситуація змінилася із розробкою і введенням в експлуатацію глобальної системи позиціонування GPS (*Global Position System*), яка складається з 24 штучних супутників, розміщених на 6 геостаціонарних орбітах. Система генерує з високою точністю синхроімпульси з інтервалом 1 мікросекунда, які прив'язані до Всесвітнього координованого часу UTS (англ. *Coordinated Universal Time*). Синхроімпульси можна сприймати по радіоканалу у будь-якій точці земної поверхні. За допомогою таких синхроімпульсів можна виміряти початкові фази струмів і напруг, тобто кути векторів струму і напруги у всіх найважливіших точках електромережі у єдиній системі координат. Виміряні фазові співвідношення між напругами і струмами електромережі дають цінну інформацію про її стан. Крім того, синхронізовані вимірювання векторів напруги (струму) (англ. *Synchrophasor*) згідно з концепцією Smart Grid використовуються для виявлення несправностей в електромережі, її діагностуванні, релейному захисті, для керування об'єктами електромережі на всіх рівнях ієрархії.

Синхронізовані вимірювання векторів напруги і струму у різних точках електромережі здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв PMU (англ. *Phasor Measurement Unit*). PMU складається з таких частин: вхідний антиелайзінговий фільтр, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), мікропроцесор (сигнальний процесор), модем, приймач синхроімпульсів від системи GPS, генератор імпульсів з фазовим автоналаштуванням частоти.

Напруга (струм) у певній точці електромережі поступає через вимірювальний трансформатор напруги (струму) на вхідний фільтр, який призначений для усунення ефекту накладання спектрів при дискретизації сигналу. Вихідний сигнал фільтру подається на аналого-цифровий перетворювач, у якому здійснюється дискретизація сигналів з певною частотою і перетворення в цифровий еквівалент. Частота дискретизації задається генератором імпульсів, синхронізованого імпульсами системи GPS. Стабільність частоти підтримується петлею зворотного зв'язку з фазовим автоналаштуванням. Дискретні значення сигналу у формі двійкових чисел поступають на мікропроцесор, або сигнальний процесор, де здійснюється їх обробка.

Вектори напруги (струму), тобто і діюче значення (модуль вектора), і початкова фаза (кут) визначаються за дискретними значеннями вхідного сигналу зазвичай за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ)

$$\underline{U}(k) = U_a(k) + jU_r(k) = U_a(k)\exp[j\psi(k)] = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n)\exp\left(-j\frac{2\pi}{N}nk\right), \quad (2)$$

де  $U_a(k) = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n)\cos\left(\frac{2\pi}{N}nk\right)$  – дійсна складова вектора напруги;

$U_r(k) = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n)\sin\left(\frac{2\pi}{N}nk\right)$  – уявна складова вектора напруги;

$U(k) = \sqrt{U_a^2 + U_r^2}$  – модуль вектора напруги, тобто діюче значення синусоїдного сигналу;  $\psi(k) = \arctg U_r/U_a$  – кут вектора напруги, тобто початкова фаза синусоїдного сигналу.

Синхронні вимірювання векторів напруги (струму) за допомогою дискретного перетворення Фур'є супроводжуються похибками. Частота мережі внаслідок змінного навантаження та інших об'єктивних чинників відхиляється від свого номінального значення, що призводить до частотної похибки вимірювання. Шуми, наводки, вищі гармоніки та інтергармоніки проникаючи через головну і бокові пелюстки частотної характеристики, також призводять до похибки вимірювання. Для зменшення цієї похибки необхідно збільшувати інтервал аналізу, а це приведе до збільшення динамічної похибки, обумовленої нестационарністю аналізованого сигналу.

Для зменшення похибок вимірювання, особливо динамічної похибки, доцільно застосовувати для визначення синхронізованих

векторів дискретне вейвлет-перетворення сигналу  $u(n)$ , яке описується співвідношенням

$$W(k, m) = \sum_{n=0}^{N-1} u(n) \cdot \psi_{k,m}(n), \quad (2)$$

де  $\psi_{k,m}(n) = a_0^{-k/2} \psi((n - mb_0)/a_0^k)$  – вейвлет-функція;  $\psi(n)$  – материнська функція;  $a_0, b_0$  – сталі масштабування і зсуву;  $n, k, m$  – цілі числа.

Напруги і струми мережі внаслідок дії об'єктивних чинників є нестационарними, тому у якості материнської функції доцільно вибрати функцію Морлі (*Morlet*), роздільні здатності якої по частоті  $\Delta\Omega$  і по часу  $\Delta t$  близькі до границі, визначеної принципом Гейзенберга. Дискретизована материнська функція Морлі визначається формулою

$$\psi(n) = \frac{1}{C_g} \exp\left(\frac{-n^2}{2N_\sigma^2}\right) \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{N_0} n\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{N_0} n\right) \right], \quad (3)$$

де  $N_\sigma$  – середня тривалість функції;  $N_0$  – період коливань;  $C_g = 2 \sum_{n=0}^{3N_g-1} \exp\left[-n^2/(2N_\sigma^2)\right]$  – стала нормування.

Якщо масштабний коефіцієнт вибрати рівним  $a_0^k = a_c = T_c/(T_s N_0)$ , де  $T_c$  – період коливання напруги у мережі ( $T_c = 20$  мс),  $T_s$  – період дискретизації цієї напруги, то модуль і початкову фазу синхронізованого вектора можна визначити за формулами

$$\begin{aligned} U(m) &= \sqrt{\operatorname{Re}^2[W(a_c, m)] + \operatorname{Im}^2[W(a_c, m)]}, \\ \psi_u(m) &= \arctg(\operatorname{Im}[W(a_c, m)]/\operatorname{Re}[W(a_c, m)]), \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\operatorname{Re}$ ,  $\operatorname{Im}$  – дійсна і уявна частини вейвлет-перетворення сигналу.

**Висновки.** Запропонований алгоритм визначення синхронізованих векторів напруг і струмів електромережі за допомогою вейвлет-перетворення, що дасть змогу підвищити точність вимірювань.

**Список літератури:** 1. Grid 2030: A National Vision for Electricity's Second 100 Years. – Office of Electric Transmission and Distribution United State Department of Energy, July 2003. – 45 p. 2. European Smart Grids Technology Platform: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. – European Commission, 2006. – 44 p. 3. Strategic Deployment Document for Europe Electricity Networks of the Future European Technology

Platform, European Commission, April 2010. – 54 p. **4.** *Moslehi K.* Smart Grid – A Reliability Perspective / *K. Moslehi, R. Kumar* // Paper 10SG0068, IEEE PES Conference on “Innovative Smart Grid Technologies” January 19-20, 2010, Washington, DC. **5.** *Стогній Б.С.* Особливості ОЕС України та науково-технічні проблеми забезпечення її розвитку / *Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, В.Я. Жуйков, А.Г. Баталов* // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – Ч. 1. – К.: 2010. – С. 25. **6.** *Karnouskos S.* An Advanced Metering Infrastructure for Future Energy Networks / *S. Karnouskos, O. Terzidis, P. Karnouskos* // NTMS 2007 Conference, 2-4 May, 2007, Paris, France. – P. 237-243. **7.** Advanced Metering Infrastructure // NETL Modern Grid Strategy Powering our 21st-Century Economy [Електронний ресурс] Режим доступу: [www.netl.doe.gov/moderngrid](http://www.netl.doe.gov/moderngrid). **8.** Tram/Meter Data Management System - What, Why, When, and How / *Tram, Hahn and Chris Ash.* // Energy Central Network (August 29, 2005) [Електронний ресурс] Режим доступу: [http://topics.energycentral.com/centers/datamanage/view/detail.cfm?ai\\_d=1061](http://topics.energycentral.com/centers/datamanage/view/detail.cfm?ai_d=1061). **9.** Smart meters-Overview/Maxim Smart Grid Solutions [Електронний ресурс] Режим доступу: [www.maximic.com/smartgrid](http://www.maximic.com/smartgrid). **10.** *Phadke A.G.* A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local Frequency, and Rate of Change of Frequency / *A.G. Phadke, J.S. Thorp, M.G. Adamiak* // Trans. of IEEE on PAS. – 1983. – Vol. PAS-102. – №. 5. – P. 1025-1038. **11.** IEEE C37.118-2005, IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems / Institute of Electrical and Electronics Engineers, Jan. 2006. **12.** *Стогній Б.С.* Система глобального моніторинга, синхронізація і реєстрація системних параметрів ОЕС України – основа нового качества автоматизированного и оперативного управления / *Б.С. Стогній, К.В. Уцяповський, А.Н. Мольков та інші* // Энергетика та електрифікація. – 2006. – № 4. – С. 8-11. **13.** *Ren J.* Real Time Power System Frequency and Phasor Estimation Scheme Using Recursive Wavelet Transform / *J. Ren, M. Kezunovic* // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – Vol. 26. – № 3. – P. 1392-1402. **14.** *Chen Z.* Review of PMU-based Online Applications for Dynamic Simulation, Fault Detection, and Cascading Failure Prevention / *Z. Chen, F. Li, L. Fan, P. Zhang* // Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on ELECTRIC POWER SYSTEMS, HIGH VOLTAGES, ELECTRIC MACHINES (POWER '08) Venice, Italy, November 21-23, 2008. – P. 212-217. **15.** Fast Tracking the Fundamental component in Synchrophasors applications using the Recursive Corrected Phase Wavelet Transform / *C.D.P. Crovato, V. Souza, G.S. Wojchowski, A.A. Susin* // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10) Granada (Spain), 23th to 25th March, 2010 – P. 127-132.

*Статтю представив д.т.н., проф. НТУУ "КПІ" Сільвестров А.М.*

УДК 621.317

**Измерение параметров и обработка информации в интеллектуальной системе электроснабжения (Smart Grid) / Поворознюк Н.И., Бобривык Е.Е.** // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968). – С. 162 – 168.

Рассмотрены тенденции развития энергетических систем. Проанализирован современный этап развития систем электроснабжения и указаны проблемы и вызовы. Обоснована необходимость повышения качества измерений параметров энергосистем. Предложен алгоритм синхронных измерений векторов напряжения и тока на основе вейвлет-преобразований и проанализированы погрешности измерений. Библиогр: 15 назв.

**Ключевые слова:** интеллектуальные системы электроснабжения, вейвлет-преобразования, синхронные измерения векторов напряжения и тока.

UDC 621.317

**Parameters measuring and information processing in the intellectual power system (Smart Grid) / Povorozniuk N.I., Bobrivnyk K.E.** // Herald of the National Technical University

"KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 162 – 168.

A monitoring quality power system quality is considered. The contemporary stage of development of energy systems and indicated the problems and challenges are analysed. The necessity of monitoring power system is grounded. The structure of the system for monitoring power quality and signal analysis algorithms based on wavelet transform and classification distortion based on support vector method are proposed. Refs.: 15 titles.

**Keywords:** advanced metering infrastructure, wavelet transform, synchrophasor measurement.

*Надійшла до редакції 10.07.2012*