

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-21>

УДК 621.311

С. П. Денисюк, д-р техн. наук

М. Ф. Сопель, д-р техн. наук

О. В. Сподинський, пров. інженер

Ю. М. Довгодько, пров. інженер

*Інститут електродинаміки Національної академії наук України*

e-mail: a.spodynskyi@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6299-3680

ORCID: 0000-0002-3438-5848

ORCID: 0009-0002-3947-2534

ORCID: 0009-0001-7010-8629

## СИНХРОФАЗОРИ В СУЧАСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ: ВИЗНАЧЕННЯ, ВИМІРЮВАННЯ ТА АРХІТЕКТУРА WAMS

*Анотація.* З розвитком сучасних енергетичних систем постає нагальна потреба в підвищенні точності вимірювання електричних параметрів і керування електромережами. Одним із ключових інструментів цього процесу стали синхрофазори PMU (Phasor Measurement Unit), що забезпечують синхронізовані в реальному часі вимірювання фазових кутів, амплітуд і частот сигналів. У статті розглядаються основні проблеми, пов'язані з неоднозначністю визначення синхрофазора, впливом гармонік, шумів і похибок синхронізації, а також розроблено аналітичний підхід до формалізації вимірювань на основі перетворення Гільберта. Обґрунтовано визначення амплітуди, фази та частоти електричних сигналів у нестационарних умовах, розкрито архітектуру систем широкозонного вимірювання WAMS (Wide Area Measurement Systems), до складу яких входять PMU, концентратори PDC (Phasor Data Concentrator), канали передачі даних і центральні системи керування. Наведено принципи побудови багаторівневих WAMS, включно із Super PDC, що дають змогу агрегувати дані з різних регіонів і забезпечують онлайн-моделювання та моніторинг електромереж у реальному часі. Показано роль GPS-синхронізації у забезпеченні єдиного часу вимірювань, а також наведено приклади практичного застосування WAMS для запобігання аварійним ситуаціям, синхронізації генераторів, адаптивного захисту й виявлення аномалій. Запропонована методика забезпечує високу точність та уніфікацію вимірювань, підвищення ефективності моніторингу й керування енергосистемами, а також адаптацію до викликів, пов'язаних з інтеграцією відновлюваних джерел енергії та переходом до інтелектуальних електричних мереж (Smart Grids).

*Ключові слова:* електроенергетична система, моніторинг, WAMS, PMU, інтелектуальні електричні мережі, синхрофазор, вимірювання, перетворення Гільберта.

*Постановка проблеми.* На сьогодні енергосистеми стають дедалі складнішими через зростання частки розподіленої генерації [7]. Важливість забезпечення стабільності та надійності таких систем потребує впровадження новітніх технологій вимірювання [8]. Синхрофазори, які є ключовим інструментом для вимірювання амплітуди та фазового кута електричних величин у реальному часі, сприяють оптимізації роботи енергетичних мереж і зниженню ризиків виникнення аварійних ситуацій [6]. З розвитком інтелектуальних мереж (Smart Grids) та інтеграцією відновлювальних джерел енергії, як-от сонячна та вітрова енергія, точність даних про стан системи стала критично важливою. Синхрофазори дають можливість здійснювати моніторинг змін фазових кутів, амплітуд і частот сигналів у реальному часі, що є надзвичайно затребуваним для діагностування стану системи. Вони забезпечують можливість ефективного розподілу енергетичних потоків і своєчасного виявлення аномалій у роботі обладнання. Завдяки точним даним синхрофазорів існує можливість запобігати перевантаженням електромережі та забезпечувати її стабільність навіть у випадках значних коливань навантаження.



*Аналіз останніх досліджень.* Історія технології синхрофазорів бере свій початок з кінця ХХ ст., коли було вперше запропоновано концепцію представлення змінного струму за допомогою фазорів [2]. Проте широке використання синхрофазорів стало можливим лише завдяки розвитку сучасних методів цифрової обробки сигналів та створенню стандартів, зокрема такого як [1]. Цей стандарт визначає загальні вимоги до пристроїв векторних вимірювань РМУ, але залишає відкритими питання про єдиний підхід до визначення синхрофазорів, що є викликом для інтеграції автоматизованих систем.

Незважаючи на досягнення в розвитку технологій вимірювання, інтеграція синхрофазорів у реальні енергосистеми стикається із численними викликами, зокрема, через вплив шумів, гармонік та інших завад, які можуть спотворювати результати вимірювань. Для подолання зазначених проблем потрібно не лише вдосконалювати алгоритми обчислень, але й запроваджувати нові підходи до їх стандартизації та верифікації.

Однією з основних проблем, пов'язаних із визначенням синхрофазорів, є відсутність однозначної методології для їх розрахунку. У сучасних енергосистемах сигнали мають складну структуру, що охоплює нестационарні компоненти, гармоніки та шум. Традиційні методи, які базуються на припущенні стаціонарності сигналу, часто не враховують реальних умов і призводять до значних похибок. Наприклад, різні алгоритми обчислення фазових кутів можуть давати несумісні результати для того самого сигналу.

Ще одним важливим аспектом є вплив гармонік, що виникають унаслідок наявності нелінійних навантажень у мережі [5]. Гармоніки можуть призводити до значних спотворень результатів вимірювання, що ускладнює аналіз стану системи. Незважаючи на те що сучасні пристрої РМУ мають засоби для фільтрації гармонік, їх ефективність залежить від конкретного алгоритму обробки сигналу.

Також важливим є питання синхронізації даних у часі. Для забезпечення точності синхрофазорів потрібно мати високоточні системи синхронізації, як-от GPS (Global Positioning System). Проте навіть найменші похибки в часовій синхронізації можуть призводити до значних похибок у вимірюваннях фазових кутів. Ця проблема особливо актуальна у великих енергосистемах, де сигнали передаються на великі відстані.

Крім того, стандарт [1], хоча і надає основні вимоги до пристроїв векторних вимірювань, усе ж залишає простір для різних інтерпретацій. Це створює ситуацію, коли пристрої від різних виробників можуть мати різні характеристики точності, що ускладнює їх інтеграцію в єдину систему.

Висока вартість обладнання та необхідність регулярного калібрування також є стримувальними факторами для впровадження синхрофазорів. До того ж процес верифікації вимірювань є складним і потребує використання високоточного тестового обладнання, що значно підвищує витрати.

*Основна частина.* Для подолання зазначених проблем необхідно розробляти нові методи аналізу сигналів, які враховують нестационарність і багатокomпонентність реальних сигналів. Наприклад, використання аналітичних сигналів, що отримуються за допомогою перетворення Гільберта, дає змогу значно знизити похибки й забезпечити однозначність вимірювань.

Основні величини, які вимірюються за допомогою синхрофазорів, включають фазовий кут, амплітуду та частоту сигналу [2]. Визначення цих величин базується на математичному представленні сигналу таким чином:

$$x(t) = X_m(t) \cos(\theta(t)), \quad (1)$$

де  $X_m(t)$  – амплітуда сигналу;  $\theta(t)$  – фазовий кут.

Для точного визначення електричних параметрів використовуються методи аналітичних сигналів. Одним із ключових інструментів є перетворення Гільберта, яке дає змогу отримати уявну складову сигналу:



$$x_h(t) = H\{x(t)\}, \quad (2)$$

де  $H\{x(t)\}$  – оператор перетворення Гільберта.

Сформований із використанням співвідношення (2) аналітичний сигнал можна подати у вигляді:

$$z(t) = x(t) + jx_h(t), \quad (3)$$

де  $z(t)$  – комплексний сигнал, що містить інформацію про амплітуду та фазу.

Амплітуда сигналу визначається за формулою:

$$X_m(t) = \sqrt{x^2(t) + x_h^2(t)}, \quad (4)$$

а фазовий кут – як арктангенс відношення уявної складової до дійсної:

$$\phi(t) = \arctan\left(\frac{x_h(t)}{x(t)}\right). \quad (5)$$

Також важливою величиною є частота, яка обчислюється як похідна фазового кута:

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}. \quad (6)$$

Формули (1)–(6) дають можливість із високою точністю аналізувати сигнал у реальному часі, що є критично важливим для роботи енергосистем. Крім теоретичної основи, вони забезпечують базу для розробки практичних алгоритмів обробки сигналів, які враховують реальні умови, як-от наявність шумів і гармонік.

Отже, визначення величин згідно з (1)–(6), що вимірюються в реальному часі з високою точністю, є основою для побудови ефективних систем моніторингу та керування енергосистемами, а завдяки використанню сучасних математичних підходів, як-от перетворення Гільберта, можна досягти високої точності та надійності вимірювань. Власне синхрофазор визначається на математичному аналізі сигналів і є ефективним для виділення ключових параметрів [2]. Важливою складовою є застосування методів аналітичного сигналу, які передбачають перетворення Гільберта для виділення уявної складової сигналу. Такий підхід забезпечує точне моделювання сигналу навіть у складних умовах.

Наведений підхід також враховує вплив гармонік та інших завад, що може бути компенсоване за допомогою відповідної фільтрації та корекції амплітудно-частотних характеристик. Наприклад, для сигналів, що містять низькочастотні гармоніки, застосовуються спеціальні цифрові фільтри, які мінімізують внесок небажаних компонентів.

Для реальних систем важливим є забезпечення коректної синхронізації вимірювань із глобальним часом [4]. Це досягається через використання систем синхронізації, як-от GPS, які забезпечують точність до наносекунд. Така синхронізація гарантує, що всі вимірювання відповідатимуть єдиній шкалі часу, що є критичним для аналізу розподілених систем.

Особливу увагу слід приділяти випадкам, коли сигнал містить високочастотні завади. У таких випадках можуть бути корисними методи спектрального згладжування або адаптивної фільтрації. Проведені тестові результати показують, що такі методи дають можливість зменшити похибки вимірювань на 20–30 %.

Застосування синхрофазорів в енергосистемах дає змогу проводити моніторинг частоти, амплітуди та фази сигналу з високою точністю [2]. Однак коректне визначення синхрофазора потребує попередньої фільтрації сигналів для видалення гармонік і шумів. Сучасні алгоритми, засновані на методах цифрової обробки сигналів, сприяють адаптації до реальних умов [2].

Іншим важливим аспектом є корекція амплітудно-частотних характеристик, які впливають на точність вимірювань. Використання адаптивних фільтрів і методів компенсації помилок

є необхідним для отримання надійних даних. До того ж аналіз вузькосмугових сигналів дає можливість оптимізувати процес обробки шляхом зменшення спектральних викривлень.

Під час визначення синхрофазора важливо також враховувати вплив перехідних процесів в енергосистемі. У разі виникнення аварійних ситуацій чи швидких змін навантаження система може генерувати сигнали, що значно відхиляються від номінальних параметрів. У таких випадках використання методів фазової синхронізації дає змогу забезпечити стабільність вимірювань.

Додатковий аналіз дає можливість ідентифікувати найбільш критичні елементи системи, які можуть спричинити похибки. Наприклад, для визначення впливу гармонік на результати вимірювань можна застосувати методи частотного розкладання, за якими можна оцінити внесок кожної гармоніки окремо.

Одним із важливих напрямів практичної реалізації синхрофазорних технологій є створення систем широкозонного вимірювання – WAMS (рис. 1). Їх ефективність забезпечується завдяки синхронізованим вимірюванням, що збираються в режимі реального часу з різних географічних точок енергосистеми.

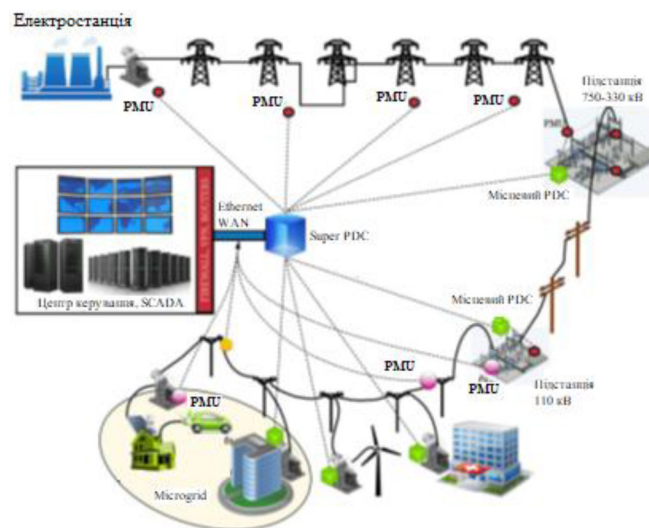


Рис. 1. Схема типової реалізації WAMS

Основними компонентами WAMS є [2]:

- PMU (Phasor Measurement Unit) – пристрої для синхронного вимірювання змінних струмів і напруги. Вони встановлюються у ключових вузлах мережі й центрах навантаження. PMU забезпечують вимірювання фазорів – комплексних величин, що містять амплітуду та фазовий кут сигналу. Для синхронізації використовується глобальна система позиціонування GPS, що дає можливість об'єднати всі вимірювання у єдиний часовий простір;

- PDC (Phasor Data Concentrator) – концентратори даних, що збирають інформацію з декількох PMU і передають її до центру керування. У багаторівневих WAMS існують локальні PDC, які передають дані до Super PDC, що агрегує інформацію з кількох регіонів. Це дає змогу кожному сегменту енергосистеми мати повну картину стану мережі, навіть за її межами;

- комунікаційна інфраструктура та програмне забезпечення – відповідають за передачу, обробку й архівацію даних. У центрі керування ці дані використовуються для моделювання в реальному часі, оцінки стану системи, візуалізації, раннього попередження, стабілізації та адаптивного захисту.

Швидкість обробки сигналів у WAMS зазвичай значно перевищує ту, що доступна в традиційних SCADA-системах. Це дає можливість у режимі on-line виявляти відхилення в роботі



мережі й оперативно реагувати для запобігання аварій, що визначає перспективи застосування WAMS у сферах, де традиційні SCADA-системи не спроможні надати об'єктивний результат.

Особливо цінною функцією є синхронізація генераторів. PMU дають можливість порівнювати фази та частоти навіть віддалених генераторів. Якщо два генератори працюють паралельно, то вони можуть бути безпечно синхронізовані лише за умови нульової різниці фаз, інакше можливі збої або аварійне відключення. GPS-приймачі у складі PMU гарантують точне узгодження фазових характеристик усієї системи.

Таким чином, WAMS із синхронізованими вимірюваннями дає змогу вийти на новий рівень управління енергосистемами, забезпечуючи стабільність, прогнозованість і адаптивність навіть у критичних ситуаціях.

Синхрофазори широко застосовуються для таких задач [2]:

– **моніторинг стабільності енергосистем.** Синхрофазори дають змогу в реальному часі відстежувати зміни частоти та напруги в різних вузлах мережі. Це сприяє своєчасному виявленню порушень стабільності системи та прийняттю необхідних заходів для їх усунення;

– **виявлення аномалій у роботі генераторів і трансформаторів.** Використання даних синхрофазорів допомагає виявляти приховані дефекти в обладнанні. Наприклад, відхилення у фазі чи амплітуді можуть вказувати на несправності обмоток або зниження ефективності охолодження;

– **оптимізація розподілу навантаження між вузлами мережі.** Завдяки точним даним про фазу й амплітуду синхрофазори дають можливість оптимально перерозподіляти потоки енергії, мінімізуючи втрати та запобігаючи перевантаженням окремих ділянок мережі;

– **оцінка динамічної поведінки енергосистем під час перехідних процесів.** У випадку аварій чи великих змін у навантаженні синхрофазори надають інформацію про швидкість і характер цих змін. Це допомагає краще зрозуміти динаміку системи й удосконалити моделі її поведінки.

Крім того, синхрофазори можуть використовуватися для навчання моделей машинного навчання, завдяки цьому можна передбачати можливі аварійні ситуації. Наприклад, аналіз даних PMU допомагає ідентифікувати приховані закономірності, які передують збоєм у системі.

Системи, оснащені синхрофазорами, здатні автоматично адаптувати роботу до змін навантаження та забезпечувати високий рівень надійності постачання електроенергії. Це особливо актуально в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії, як-от сонячна та вітрова енергія, які характеризуються значною варіабельністю.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на:

- розробку адаптивних алгоритмів, що враховуватимуть специфіку конкретних енергосистем;
- створення автоматизованих систем підтримки прийняття рішень на основі даних PMU, машинного навчання та предиктивної аналітики;
- удосконалення методів обробки вузькосмугових та імпульсних сигналів, характерних для аварійних режимів;
- інтеграцію систем WAMS у середовища з відновлюваними джерелами енергії для забезпечення їх стабільності та прогнозованості.

#### *Висновки*

1. У статті розглянуто сучасний підхід до визначення синхрофазорів, заснований на аналітичному представленні сигналів і використанні перетворення Гільберта. Запропонована методика довела свою ефективність як у теоретичному, так і в практичному аспекті, оскільки враховує реальні умови роботи енергосистем – гармонічні спотворення, шум, нестационарність сигналів і похибки синхронізації. Такий підхід дає змогу підвищити достовірність вимірю-



вань, уніфікувати процес обчислення фазорів і створити основу для побудови масштабованих систем моніторингу та керування.

2. Ключовою інновацією дослідження є розгляд архітектури систем широкозонного вимірювання WAMS як комплексної інфраструктури для збору, агрегації та аналізу даних у режимі реального часу. Використання багаторівневої структури з локальними та центральними PDC, Super PDC і GPS-синхронізацією забезпечує єдиний часовий простір вимірювань і дає можливість здійснювати як оперативний контроль, так і ретроспективний аналіз та прогнозування можливих відхилень у роботі енергосистеми.

3. Практична реалізація запропонованого підходу доводить його здатність мінімізувати похибки вимірювань, підвищити стабільність енергомереж навіть за умов коливань навантаження або аварійних режимів. Завдяки точному моніторингу амплітуд, частот і фаз сигналів система синхрофазорів надає операторам змогу своєчасно виявляти порушення й запобігати аваріям, підвищуючи надійність та ефективність управління.

4. Інтеграція синхрофазорів у сучасні енергетичні системи, що охоплюють відновлювані джерела енергії, мікромережі та цифрові підстанції, відкриває нові можливості для розвитку концепції Smart Grid. Це створює адаптивну, взаємопов'язану та стійку енергетичну інфраструктуру, здатну реагувати на сучасні виклики енергетичної безпеки та сталого розвитку.

5. Загалом поєднання теоретичних засад і прикладних рішень у межах WAMS та технологій синхрофазорів формує потужну науково-технічну базу для розвитку цифрової енергетики. Запропонована методика забезпечує високу точність і надійність вимірювань, сприяє підвищенню ефективності моніторингу, керування та прогнозування стану енергомереж, а також відкриває нові перспективи для інтеграції інтелектуальних систем управління в енергетиці майбутнього.

#### *Список використаних джерел*

1. IEEE C37.118.1-2018. Synchronphasor Measurements for Power Systems. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/60255-118-1/5724>
2. Phadke A. G., Thorp J. S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. New York, USA. 2008. 245 p.
3. Lyons R. Understanding Digital Signal Processing. Boston, USA. 2011. 858 p.
4. Gabor D. Theory of Communication. IEE, 1946. Vol. 93 (2). P. 429–457. URL: <https://jcsphysics.net/lit/gabor1946.pdf>.
5. Stankovic A.M. Frequency Estimation in Power Systems: Theory and Application.
6. Anderson P. Analysis of Faulted Power Systems. IEEE Press, 1995. 536 p.
7. Білінов І. В., Денисюк С. П., Лежнюк П. Д., Ущиповський К. В., Слободян Р. О., Козачук О. І., Мірошник В. О., Сподинський О. В. Цифрова трансформація електроенергетики України. Реалізація в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення : монографія. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2024. 362 с.
8. Белоха Г. С., Денисюк С. П., Дерев'яно Д. Г., Жуйков В. Я., Сопель М. Ф., Сподинський О. В. SMART-моніторинг ефективності функціонування локальних електроенергетичних систем : монографія. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2025. 280 с.

*Стаття надійшла до редакції 14.10.2025*

*Стаття прийнята 05.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*





**S. Denysiuk, M. Sopel, O. Spodynskyi, Yu. Dovgodko**  
**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine**

**SYNCHROPHASORS IN MODERN POWER SYSTEMS:  
DEFINITION, MEASUREMENT, AND WAMS ARCHITECTURE**

*Summary*

With the advancement of modern power systems, there is an urgent need to improve the accuracy of electrical parameter measurements and power grid control. One of the key tools in this process is the synchrophasor PMU (Phasor Measurement Unit), which enables real-time synchronized measurements of phase angles, amplitudes, and signal frequencies. This paper examines major challenges associated with the ambiguous definition of synchrophasors, the influence of harmonics, noise, and synchronization errors, and proposes an analytical approach based on the Hilbert transform for accurate signal formalization. Particular attention is given to the mathematical substantiation of amplitude, phase, and frequency determination under non-stationary conditions. In addition, the paper details the architecture of Wide Area Measurement Systems (WAMS), which consist of PMUs, Phasor Data Concentrators (PDCs), communication networks, and centralized control systems. It outlines the principles of building multilevel WAMS, including Super PDCs, which aggregate data from multiple regions and enable real-time grid modeling and monitoring. The role of GPS synchronization in providing unified measurement timestamps is discussed, along with practical examples of WAMS applications such as preventing emergencies, generator synchronization, adaptive protection, and anomaly detection. The proposed methodology ensures high accuracy and consistency in measurements, enhances power system monitoring and control efficiency, and supports adaptation to challenges associated with renewable energy integration and the transition to Smart Grids.

**Keywords:** power system, monitoring, WAMS, PMU, smart grids, synchrophasor, measurement, Hilbert transform.