

Оцінювання фазових векторів напруг та струмів електромережі за дискретними відліками миттєвих значень

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.021>

Святослав Василець

Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
s.vasylets@nuwm.edu.ua

Владислав Глушук

Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
hlushchuk.v_vg25@nuwm.edu.ua

Анотація—Запропоновано метод оцінювання дійсних та уявних частин фазових векторів напруг та струмів електромережі за дискретними відліками миттєвих значень. Метод передбачає визначення проєкцій на осі комплексної площини обертових фазних векторів, що обчислюються за дискретизованими значеннями сигналів, які відповідають миттєвим значенням фазних напруг та струмів. Обертові вектори загальмовуються, що спрощує аналіз фазових зсувів між ними. Застосування запропонованого методу дасть змогу підвищити точність виявлення аварійних режимів, надійність захисного відключення, ефективність обліку електроенергії у складі цифрової підстанції.

Keywords—електромережа; фазовий вектор; миттєві значення; дискретні відліки; проєкції

I. АКТУАЛЬНІСТЬ ПИТАННЯ

Відбудова та модернізація вітчизняних електростанцій, підстанцій, об'єктів розосередженої генерації найбільш ефективно можуть бути здійснені на основі стандарту ІЕС 61850. Стандарт передбачає цифровізацію обміну інформацією між всіма елементами об'єкта електроенергетики. Давачі струму, вимикачі та інші електротехнічні пристрої оснащуються цифровим комунікаційним інтерфейсом, що підвищує точність виявлення аварійних режимів, надійність захисного відключення, ефективність обліку електроенергії. Передача в режимі реального часу параметрів синусоїдних сигналів найбільш ефективно може бути здійснена з використанням комплексної величини – фазового вектора (phasor) [1]. Обмін синхронізованими даними між обладнанням енергосистеми в режимі реального часу регулюється стандартом IEEE Std C37.118.2-2024 [2].

Точність обрахування параметрів фазового вектора суттєво залежить від точності аналого-цифрового перетворення сигналів, що надходять від вимірювальних трансформаторів напруги та струму. Також на точність суттєво впливає метод оцінювання амплітуди та фази вектора за дискретними відліками вимірюваних сигналів. Відомо про використання рекурсивного алгоритму

дискретного перетворення Фур'є для обрахування значень фазового вектора [3]. При необхідності виявлення широкосмугових коливань в електромережах параметри фазового вектора оцінюють для кожної гармоніки [4]. Також відомо алгоритм квадратурної демодуляції (quadrature demodulation) оцінювання параметрів фазового вектора [5]. Однак, відомі алгоритми характеризуються складною програмною реалізацією. Розроблення пристрою вимірювання параметрів фазового вектора (Phasor Measurement Unit, PMU) за дискретними відліками миттєвих значень струмів (напруг) є актуальною задачею, оскільки цифрова підстанція включає сотні PMU, від точності роботи яких залежить ефективність захисту та розподілу електроенергії.

Мета – підвищення ефективності оцінювання фазових векторів напруг та струмів електромережі за дискретними відліками миттєвих значень.

II. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження – приєднання трифазної електромережі. Предмет – параметри комплексних амплітуд фазних напруг та струмів. Прийняті припущення: частота основної гармоніки 50 Гц; показники якості напруги не виходять за межі, визначені стандартом ДСТУ EN 50160:2023; пристрій вимірювання комплексної амплітуди приєднується до електромережі за допомогою вимірювальних трансформаторів напруг та струмів електромагнітного типу; вимірювальні трансформатори струму працюють в нормованому діапазоні струмів.

Вторинні вимірювальні перетворювачі напруги (наприклад, трансформаторного типу, ZMPT101B) та струму (на ефекті Холла, ACS712) забезпечують масштабування та зсув у додатну напівплощину вихідних сигналів. Аналого-цифрове перетворення сигналів кожного з шести вимірювальних каналів виконується дельта-сигма АЦП типу MCP3421, що оснащений послідовним I²C інтерфейсом. При частоті дискретизації 240 Гц забезпечується 12-розрядна точність квантування аналогового сигналу. Подальше оброблення дискретних відліків сигналів,

що відповідають миттєвим значенням фазних напруг та струмів, здійснюється мікроконтролером (наприклад, типу АТМega2560). Програмне забезпечення дозволяє одержати проєкції фазових векторів фазних напруг та струмів на осі комплексної площини.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Позначимо дискретизовані значення сигналів $u(nT)$ та $i(nT)$, що відповідають миттєвим значенням фазної напруги та струму, відповідно, приєднання електромережі в моменти часу $t=0, T, 2T, \dots$, де T – період дискретизації сигналу за часом. При частоті напруги електромережі f_0 колова частота становить $\omega_0=2\pi f_0$. Тоді дискретизовані значення можуть бути описані аналітично:

$$u(nT) = U \cdot \sin(\omega_0 nT + \varphi_u); \quad (1)$$

$$i(nT) = I \cdot \sin(\omega_0 nT + \varphi_i). \quad (2)$$

Дискретизованим значенням відповідають обертові фазні вектори:

$$\underline{U}_r(nT) = U \cdot e^{j(\omega_0 nT + \varphi_u)} = U_{xr}(nT) + jU_{yr}(nT); \quad (3)$$

$$\underline{I}_r(nT) = I \cdot e^{j(\omega_0 nT + \varphi_i)} = I_{xr}(nT) + jI_{yr}(nT). \quad (4)$$

Проекції таких обертових векторів можуть бути обраховані за дискретизованими значеннями сигналів:

$$U_{xr}(nT) = \frac{u(nT) - u(nT - T)}{\omega_0 T}; \quad (5)$$

$$U_{yr}(nT) = u(nT); \quad (6)$$

$$I_{xr}(nT) = \frac{i(nT) - i(nT - T)}{\omega_0 T}; \quad (7)$$

$$I_{yr}(nT) = i(nT). \quad (8)$$

Аналізувати стан електромережі за обертовими векторами нерационально. Оскільки всі вектори обертаються з однаковою частотою, то практичний інтерес представляють тільки фазові зсуви між векторами. Фазові співвідношення доцільно оцінювати, аналізуючи нерухомі вектори. Для цього останні слід домножити на $e^{-j\omega_0 nT}$. Зокрема, для вектора напруги отримаємо:

$$\underline{U}_f = U_{xf} + jU_{yf} = U \cdot e^{j(\omega_0 nT + \varphi_u)} \cdot e^{-j\omega_0 nT} = U \cdot e^{j\varphi_u}. \quad (9)$$

Проекції нерухомого вектора напруги визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \underline{U}_f &= \underline{U}_r(nT) \cdot e^{-j\omega_0 nT} = \\ &= [U_{xr}(nT) + jU_{yr}(nT)] \times \\ &\times [\cos(\omega_0 nT) - j\sin(\omega_0 nT)]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$U_{xf} = U_{xr}(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT) + U_{yr}(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT); \quad (11)$$

$$U_{yf} = U_{yr}(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT) - U_{xr}(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT). \quad (12)$$

Проекції нерухомого вектора струму дорівнюють:

$$\begin{aligned} \underline{I}_f &= I_{xf} + jI_{yf} = I \cdot e^{j\varphi_i} = \underline{I}_r(nT) \cdot e^{-j\omega_0 nT} = \\ &= [I_{xr}(nT) + jI_{yr}(nT)] \times \\ &\times [\cos(\omega_0 nT) - j\sin(\omega_0 nT)]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$I_{xf} = I_{xr}(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT) + I_{yr}(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT); \quad (14)$$

$$I_{yf} = I_{yr}(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT) - I_{xr}(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT). \quad (15)$$

Залежності (5)–(8), (11), (12), (14), (15) дозволяють обчислювати проєкції фазових векторів напруг та струмів електромережі за дискретними відліками миттєвих значень. Залежності легко алгоритмізуються і можуть бути реалізовані програмно. До обмежень одержаних результатів слід віднести ігнорування вищих гармонік напруг та струмів, що вносить невизначеність у результати вимірювань.

IV. ВИСНОВКИ ТА НАПРЯМОК ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті встановлена можливість обрахування проєкцій на комплексні осі нерухомого фазового вектора за дискретними відліками миттєвих значень струмів та напруг електромережі. Це дозволяє програмно обробляти значення, які видаються АЦП у складі вимірювального перетворювача режимних параметрів електромережі. В ході подальших досліджень доцільно розробити технічне рішення для аналізу стану електромережі на основі фазових векторів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Pazderin, A., Zicmane, I., Senyuk, M., Gubin, P., Polyakov, I., Mukhlynin, N., Safaraliev, M., & Kamalov, F. (2023). Directions of Application of Phasor Measurement Units for Control and Monitoring of Modern Power Systems: A State-of-the-Art Review. *Energies*, 16(17), 6203. <https://doi.org/10.3390/en16176203>
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2024). IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems in IEEE Std C37.118.2-2024 (Revision of IEEE Std C37.118.2-2011). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2024.10794635>
- [3] Deepa, B., Hampannavar, S. & Mansani, S. (2024). Phasor estimation using micro-phasor measurement unit (μPMU) in distribution network for situational awareness. *Journal of Electrical Systems and Inf Technol*, 11(52). <https://doi.org/10.1186/s43067-024-00179-5>
- [4] Ma, N., Xie, X., Dong, W., & Li, H. (2025). Wideband Dynamic Monitoring and Control System for Power Systems with High Penetration of Renewable Energy and Power Electronics. *Sustainability*, 17(18), 8334. <https://doi.org/10.3390/su17188334>
- [5] Thilakarathne, C., Meegahapola, L., Fernando, N. (2020). Real-time voltage stability assessment using phasor measurement units: Influence of synchrophasor estimation algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119, 105933. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105933>