

УДК 621.316.1

Світлана Ковтун^{1*}, д-р техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-6596-3460>**Юрій Куц**², д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>**Володимир Малько**¹, <https://orcid.org/0000-0003-2879-7915>**Леонід Щербак**¹, д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-1536-4806>¹Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна;²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський просп., 37, м. Київ, 03056, Україна*Автор-кореспондент: kovtunsi@nas.gov.ua

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ МЕРЕЖ ЗАГАЛЬНОЇ ПРИЗНАЧЕНОСТІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФАЗОВОГО МЕТОДУ

Ключові слова: фазовий метод, перетворення Гільберта, трифазні електромережі, оцінювання частоти, оцінювання фазового зсуву, несиметричність фаз.

В результаті експлуатації нелінійних навантажень спотворюється форма мережевої напруги та виникає несиметрія у трифазних електромережах. Рівень спотворень форми напруги зазвичай визначають за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Його коректне застосування потребує точного знання основної частоти напруги для усунення явища витоку спектра. Для уточнення значення основної частоти за наявності вищих гармонік у фазних напругах застосовують високоточний алгоритм вимірювання ADALINE Zoom FFT [1] із роздільною здатністю по частоті 0,3 Гц, похибкою амплітуди та фази не більше відповідно 2,5 % та 0,6°. Для отримання більшої точності застосовують метод найменших середніх квадратів (LMS) [2] з похибкою по частоті не більше 2 мГц. Невикористаний інформаційний ресурс для підвищення точності визначення частоти основної гармоніки мережевої напруги має фазовий метод, який ґрунтується на опрацюванні фазових характеристик сигналів.

Мета роботи. Розроблення методології уточнення основної частоти напруги трифазної мережі, а також визначення фазового зсуву між фазами, яка ґрунтується на аналізі фазової характеристики напруги кожної фази, отриманої за допомогою дискретного перетворення Гільберта (ДПГ).

Методологія уточнення частоти основної гармоніки та фазового зсуву між фазами.

Процес уточнення частоти та фазового зсуву між фазами виконується для моделі напруги мережі електропостачання загальної призначеності, що наведена нижче:

$$u_{A,B,C}(t) = U_{A,B,C} \cos(2\pi f_1 t + \psi_{A,B,C}) + \sum_{h=2}^H U_{hA,hB,hC} \cos(2\pi h f_1 t + \psi_{hA,hB,hC}) = U_{A,B,C}(t) \cos \Phi_{A,B,C}(t), \quad (1)$$

де U_A , U_B , U_C – відповідно амплітудні значення напруги фаз А, В та С, f_1 – частота 1-ї гармоніки, ψ_A , ψ_B , ψ_C – відповідно початкові фази кожної фази (номінальні значення фазових зсувів між напругами $\psi_A - \psi_B = \psi_B - \psi_C = \psi_C - \psi_A = 2/3\pi$), U_{hA} , U_{hB} , U_{hC} та ψ_{hA} , ψ_{hB} , ψ_{hC} – відповідно значення амплітуд та початкових фаз h-ї гармоніки для фаз А, В, С ($U_{A,B,C} \gg U_{hA,hB,hC}$), $U_{A,B,C}(t)$, $\Phi_{A,B,C}(t)$, – відповідно обвідна та фазовий зсув напруг $u_{A-C}(t)$, T_d – час аналізу напруги ($T_d \gg 1/f_1$), H – кількість гармонік.

Компоненти моделі (1) після аналого-цифрового перетворення представляються у цифровій формі $u_A[j]$, $u_B[j]$, $u_C[j]$, $j = \overline{1, J}$, $J = [T_d/T_s]^+$, де J – обсяг вибірки, T_d – період дискретизації, $[\cdot]^+$ – операція виділення цілої частини числа. Для отримання уточненої частоти та дискретних фазових характеристик цих дискретних сигналів до них застосовується ДПГ, отримуються відповідні гільберт-образи сигналів

$\tilde{u}_A[j], \tilde{u}_B[j], \tilde{u}_C[j], j = \overline{1, J}$ та комплекснозначні аналітичні послідовності [4]:

$$\dot{z}_{A,B,C}[j] = u_{A,B,C}[j] + i\tilde{u}_{A,B,C}[j] = U_{A,B,C}[j] \cos \Phi_{A,B,C}[j] \quad j = \overline{1, J}, J = [T_c/T_d]^+, \quad i = \sqrt{-1}. \quad (2)$$

Дискретна фазова характеристики (ДФХ) для кожної фази визначається для послідовностей (2) як:

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_{A,B,C}[j] = \arctg \frac{\tilde{u}_{A,B,C}[j]}{u_{A,B,C}[j]} + \frac{\pi}{2} \left\{ 2 - \text{sign}(\tilde{u}_{A,B,C}[j]) \cdot (1 + \text{sign}(u_{A,B,C}[j])) \right\} + \\ + \mathbf{L}(\tilde{u}_{A,B,C}[j], u_{A,B,C}[j]), j = \overline{1, J}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\text{sign}()$ – знакова функція, $\mathbf{L}()$ – оператор розгортання ДФХ за межами інтервалу $[0, 2\pi)$.

Значення уточненої частоти розраховується для сигналу фази u_A по найменш схильній до спотворень частині розрахованої дискретної фазової характеристики згідно з наступним виразом:

$$\hat{f}_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\hat{\Phi}_{A_2}[j_2] - \hat{\Phi}_{A_1}[j_1]}{(j_2 - j_1)T_d}, \quad j_1, j_2 \in [2, J], \quad (4)$$

де $\hat{f}_1$ – уточнене значення основної частоти, $\hat{\Phi}_{A_{1,2}}$ – значення оцінки ДФХ.

В модельному експерименті точність визначення частоти фазовим методом оцінювалась за допомогою абсолютної похибки – різниці між заданою основною частотою та її оцінкою (4)

$$\delta_f = f_1 - \hat{f}_1. \quad (5)$$

Миттєві значення фазових зсувів між фазними напругами $u_{A,B,C}[j]$ визначались як різниця між послідовностями розгорнутих фазових характеристик з їх наступним усередненням на колі:

$$\Phi_{BA}[j] = \hat{\Phi}_B[j] - \hat{\Phi}_A[j]; \Phi_{CB}[j] = \hat{\Phi}_C[j] - \hat{\Phi}_B[j]; \Phi_{AC}[j] = \hat{\Phi}_A[j] - \hat{\Phi}_C[j], \quad (6)$$

$$\varphi_{BA,CB,AC} = \arctg \frac{S_{BA,CB,AC}[j]}{C_{BA,CB,AC}[j]} + \frac{\pi}{2} \left\{ 2 - \text{sign}(S_{BA,CB,AC}[j]) \cdot (1 + \text{sign}(C_{BA,CB,AC}[j])) \right\}, \quad (7)$$

$$S_{BA,CB,AC}[j] = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sin(\Phi_{BA,CB,AC}[j]); C_{BA,CB,AC}[j] = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \cos(\Phi_{BA,CB,AC}[j]). \quad (8)$$

Результати модельних експериментів

Моделювання процесу уточнення основної частоти та визначення фазового зсуву між фазними напругами проводилось згідно з розробленою методикою для наступних вхідних даних: $U_A = U_B = U_C = 230$ В, $f_1 = 50,12$ Гц, $\psi_A = \psi_{hA} = 0$, $\psi_B = \psi_{hB} = 120^\circ$, $\psi_C = \psi_{hC} = 120^\circ$, $T_a = 0,16$ с, частота дискретизації $f_d = 12,80$ кГц, $J = 2048$ відліків, $H = 5$, порядок гармонік – 2, 3, 5, 7, 12 з відносними амплітудами $U_2^* = 5\%$, $U_3^* = 4,5\%$, $U_5^* = 3\%$, $U_7^* = 1,5\%$, $U_{12}^* = 1\%$ від амплітуди основної гармоніки.

В результаті проведення модельного експерименту було отримано дискретні фазові характеристики для кожної фази $u_{A,B,C}$. Обчислення уточненої основної частоти фази u_A проводилось для середньої частини ДФХ (для відліків $j_2 = 1332$, $j_1 = 307$) з відповідними значеннями ДФХ:

$$\hat{\Phi}_{A_2}[j_2] = 31,24494 \text{ rad}, \quad \hat{\Phi}_{A_1}[j_1] = 6,02742 \text{ rad}.$$

Результат обчислення оцінки частоти основної гармоніки – $\hat{f}_1 = 50,11854$ Гц. Абсолютна похибка визначення уточненої частоти згідно з (5) становить $\delta_f = 50,12 - 50,11854 = 1,46$ мГц.

Обчислення фазових зсувів між фазами φ_{BA} , φ_{CB} , φ_{AC} проводилось за отриманими різницями ДФХ між відповідними фазами (6) з наступним усередненням на колі (7). Результат їх обчислення становить:

$$\varphi_{BA} = 119,91553^\circ, \quad \varphi_{CB} = 120,13723^\circ, \quad \varphi_{AC} = 119,94722^\circ.$$

Відносна похибка визначення фазових зсувів між фазами була в межах інтервалу $\pm 0,11443\%$.

Висновки. Розроблена методологія уточнення основної частоти напруги трифазної мережі, а також визначення фазового зсуву між фазами, яка ґрунтується на аналізі дискретної фазової характеристики напруги кожної фази, отриманої за допомогою ДПГ. Запропонований метод дає змогу проводити контроль показників якості електроенергії в динаміці, а також забезпечує можливість уточнення частоти та визначення фазового зсуву між фазами з абсолютною похибкою по частоті не більше 1,46 мГц та відносною похибкою по фазі в межах $\pm 0,11\%$ за умов наявності вищих гармонік. Подальші дослідження будуть спрямовані на аналіз несиметрії напруг трифазної електромережі загальної призначеності.

Посилання

1. Wang W., Pan S., Peng J., Shen J., Zhang M., Gao W., Xia C. Z-ADALINE based high-precision wide-frequency signal measurement algorithm for Power Electronic Power Grid. *E3S Web of Conferences*. 2020. 185. P. 1041—1049. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018501041>
2. Moreira M. G., Vale-Cardoso A. S., Martins C. H., Leles M. C. Enhanced LMS for Online Frequency Estimation under Wide Spectrum Disturbances. *2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. 2019. P. 530—534. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2019.8936287>
3. Babak V., Zaporozhets A., Kulyk M., Kuts Y., Scherbak L. Application of discrete Hilbert transform to estimate the characteristics of cyclic signals: Information provision. *Systems, Decision and Control in Energy IV*. 2023. P. 93—115. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_5

CONTROL OF ELECTRICITY QUALITY PARAMETERS OF GENERAL-PURPOSE ELECTRICAL GRIDS USING THE PHASE METHOD

Svitlana Kovtun^{1*}, Dr. Sci. (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6596-3460>

Yurii Kuts², Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>

Volodymyr Malko¹, <https://orcid.org/0000-0003-2879-7915>

Leonid Scherbak¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1536-4806>

¹General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St. Kyiv, 03150, Ukraine;

²National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37, Beresteyskyi Prosp., Kyiv, 03056, Ukraine

*Corresponding author: kovtunsi@nas.gov.ua

Abstract. *The article proposes a method for refining the fundamental frequency of a three-phase grid in dynamics to determine the phase shift between phases, based on the analysis of the phase characteristic of the voltage of each phase obtained through a discrete Hilbert transform. The proposed method makes it possible to determine the fundamental frequency with an absolute error of no more than 1.46 mHz, and the phase shift between phases with a relative error of no more than $\pm 0.11443\%$.*

Keywords: phase method, Hilbert transformation, three-phase electrical networks, frequency estimation, phase shift estimation, phase asymmetry.