

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-29>

УДК 621.3.083.9

ВОВНА Олександр

Донецький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4433-7097>

e-mail: Vovna_Alex@ukr.net

СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЦИФРОВИМ ЛІЧИЛЬНИКОМ

Удосконалено спосіб вимірювання електроенергії, що може бути реалізований цифровим лічильником, шляхом одержання діючих значень гармонійних складових напруги, струму, активної та реактивної потужностей з використанням дискретного перетворення Фур'є над сигналами з давачів струму та напруги. Активна та реактивна складові енергії обчислюються за допомогою чисельного інтегрування в часі дискретних відліків потужностей. Такий спосіб, на відміну від відомих, дозволяє врахувати внесок вищих гармонійних складових до загального обсягу енергії, яка споживається навантаженням.

Ключові слова: облік електроенергії, лічильник, вимірювання, точність, струм, напруга.

VOVNA Oleksandr

Donetsk National Technical University

METHOD OF MEASURING ELECTRICITY WITH A DIGITAL METER

The object of research is an electricity digital meter. The subject is the method of measuring active and reactive energy, which is consumed by the load. The goal of the research is to increase the accuracy of electricity measurement in real-time using a digital meter. Electricity meters, which are widely used as part of commercial electricity metering units, are characterized by low measurement accuracy in the presence of semiconductor converters in the power grid. Reduction of measurement error is possible by using an algorithm, which takes into account higher harmonics in the current and voltage. As a result of the study the method of measuring electricity with a digital meter has been improved. The method uses the discrete Fourier transform to estimate amplitudes and frequencies of the current and voltage from the corresponding sensors. As a result, root mean square values of harmonic components of current and voltage, active and reactive powers are obtained. Using numerical integration of the discrete power readings, the active and reactive energies values can be determined. The proposed method is different from the known ones by considering of higher harmonic components to the consumed energy. Thanks to this, the accuracy of electricity metering can be increased. The use of such a method is especially relevant in power supply systems with semiconductor converters. Taking into account higher harmonics allows to reduce fraud when using unaccounted energy at high frequency. The accuracy of power flow accounting also increases, which is relevant for Micro and Smart Grid power grids. The developed method can be used to improve the software of commercial electricity metering units on a digital element base, build new devices, as part of energy meters of various functional purposes. The method also allows to improve the software of microprocessor terminals within the digital substations.

Keywords: electricity accounting, meter, measurement, accuracy, current, voltage.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Енергетична інфраструктура України на протязі останнього року зазнає обстрілів, внаслідок чого багато ліній електропередачі, енергоблоків теплових електростанцій, електричних підстанцій є пошкодженими. Це виявило недоліки класичної структури Об'єднаної енергосистеми: наявність потужних електростанцій, ключових підстанцій, магістральних ліній та розподільних мереж. Пошкодження одної з підстанцій або магістральної лінії призводить до знеструмлення великої кількості споживачів. Можливим шляхом підвищення надійності електропостачання є перебудова енергосистеми відповідно до концепції Smart Grid. Для інтенсифікації впровадження «розумних мереж» в Україні у жовтні 2022 р. Кабінетом Міністрів була прийнята відповідна концепція [1]. При цьому впровадження інтелектуального обліку електроенергії з одночасним зниженням похибок вимірювання визнано одним з основних завдань. На основі даних комерційного обліку здійснюються фінансові розрахунки споживачів з постачальниками електроенергії [2], що визначає вказані дані основою функціонування енергоринку [3]. Ефективне керування споживанням та генерацією, що лежить в основі концепцій Micro Grid та Smart Grid, можливе за наявності достовірної інформації про поточні величини потужності та обмін енергією.

У складі вузлів комерційного обліку електроенергії в Україні експлуатуються цифрові лічильники різних виробників. Більшості з цих вимірювальних приладів притаманні суттєві похибки вимірювання при функціонуванні в мережі з низькою якістю електроенергії, зокрема – за наявності високочастотних складових в кривій струму через функціонування частотних перетворювачів, активних фільтрів, інверторів у складі сонячних електростанцій тощо. Широке поширення силових пристроїв на основі напівпровідників суттєво знижує точність обліку електроенергії, що обумовлює актуальність обґрунтування способу вимірювання, який бере до уваги полігармонійний склад струму та напруги при визначенні загального обсягу електроенергії.

Аналіз досліджень та публікацій

Поширення лічильників електроенергії на цифровій елементній базі, що має місце напротязі двох десятиліть, викликало дослідження показників точності вимірювання та надійності функціонування таких пристроїв [4]. При цьому відомі дослідження стосуються як точності аналого-цифрового перетворення, так і цифрових алгоритмів оброблення результатів перетворення. У 2004 році була прийнята, а у 2014 р. – оновлена, Директива 2014/32/EU [5], що встановлює базові вимоги до вимірювальних пристроїв, зокрема – лічильників електроенергії, в межах Європейського союзу. В Україні національні вимоги до лічильників електроенергії на цифровій елементній базі регулюються стандартом [6]. Виробники лічильників використовують різні алгоритми оброблення вимірювальної інформації для підвищення точності оцінювання енергії в умовах наявності високочастотних компонентів у кривих струму та напруги. Однак, в багатьох випадках за наявності високочастотних складових похибка вимірювання зростає до неприпустимих величин [7]. Відомо методи, що дають змогу оцінювати невизначеність вимірювання апостеріорно. Наприклад, в роботі [8] запропоновано використовувати функцію правдоподібності для оцінювання динамічної складової невизначеності вимірювання. Однак, застосування апостеріорних методів не завжди є можливим з формальної точки зору при фінансових розрахунках між суб'єктами господарювання, оскільки відсутня відповідна законодавча база.

Значення контрольованих параметрів електромережі (в більшості випадків – струму та напруги) можуть бути оцінені декількома відомими способами. Наприклад, в роботі [9] запропонований дискретний алгоритм вимірювання частоти напруги мережі, що базується на лінійному передбаченні вибірок, які відфільтровані за допомогою цифрового фільтру низьких частот із кінцевою імпульсною характеристикою. Недоліком такого способу є складність визначення частот різних складових полігармонійного сигналу. Також відомо спосіб визначення кількості гармонік за період основної частоти, що передбачає усереднення значень напротязі десятисекундного часового інтервалу [10]. Недоліком такого підходу є застосування смугового ІІР-фільтра, що ускладнює реалізацію способу. Крім того, відомо низькочастотний метод вимірювання активної та реактивної потужності, що заснований на оцінюванні середньоквадратичних значень струму та напруги та придатний для реалізації у програмованому логічному контролері з метою технічного обліку електроенергії [11]. Однак, такий спосіб не бере до уваги внесок вищих гармонійних складових.

На сьогодні має місце широке впровадження у розподільних мережах силових напівпровідникових пристроїв: експлуатуються частотні перетворювачі у складі електроприводів, інвертори входять до складу сонячних електростанцій, використовуються активні фільтри, статичні компенсатори реактивної потужності тощо. Це призводить до збільшення гармонійного складу кривих струму та напруги. Така обставина чинить негативний вплив на точності обліку, оскільки підвищується невизначеність вимірювання. Це може призвести до функціонування засобу обліку поза визначеним класом точності. Також відомі випадки шахрайського користування електроенергією, коли для зниження показів лічильника встановлюються імпульсні перетворювачі.

Все це дозволяє обґрунтувати доцільність розроблення способу вимірювання електроенергії цифровим лічильником, особливість якого полягає у врахуванні полігармонійного складу кривих напруги та струму.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є підвищення точності вимірювання електроенергії цифровим лічильником за рахунок врахування вищих гармонійних складових струму та напруги. Це дасть змогу підвищити точність обліку в розподільних та, в перспективі, – «розумних» електромережах.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо випадок полігармонійного характеру кривих струму $i(t)$ та напруги $u(t)$, що наявні у вторинних обмотках відповідних вимірювальних трансформаторів. Припустимо, що спектр утворюється кінцевою кількістю M гармонік. Тоді для представлення миттєвих значень сигналів можуть бути використані ряди [12]:

$$i(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{k=0}^M I_k \exp(jk\omega t + \beta_k), \quad (1)$$

$$u(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{k=0}^M U_k \exp(jk\omega t + \alpha_k), \quad (2)$$

де $\omega = 2\pi f$ – основна частота; $\sqrt{2}I_k$, $\sqrt{2}U_k$ – амплітуди k -х гармонік струму та напруги, відповідно; β_k , α_k – фази k -х гармонік струму та напруги, відповідно.

Вектори, які описують k -і гармоніки струму та напруги, становлять:

$$\bar{I}_k = I_k e^{j\beta_k}; \quad (3)$$

$$\bar{U}_k = U_k e^{j\alpha_k}. \quad (4)$$

Припустимо, що такі сигнали дискретизуються за рівнем та часом за умови виконання теореми відліків ($N = 2M$) на частоті $\omega_s = N2\pi / T$, тоді рівняння (1), (2) у дискретній формі мають вигляд:

$$i[n] = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{k=0}^M I_k e^{jk\omega n + \beta_k}; \quad (5)$$

$$u[n] = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{k=0}^M U_k e^{jk\omega n + \alpha_k}, \quad (6)$$

де $n = 0, \dots, N-1$ – номер відліку.

Використання дискретного перетворення Фур'є дозволяє відобразити дискретні відліки (5), (6) з часової у частотну область: $I[k] \leftrightarrow i[n]$; $U[k] \leftrightarrow u[n]$. У комплексній формі: $A[k] \leftrightarrow u[n] + j \cdot i[n]$. З урахуванням цього гармонійні складові струму та напруги включають спряжені складові \hat{A} і дорівнюють:

$$I[k] = 0.5 j \{ \hat{A}[N-k] - A[k] \}; \quad (7)$$

$$U[k] = 0.5 \{ \hat{A}[N-k] + A[k] \}. \quad (8)$$

Тоді діючі значення гармонійних складових струму, напруги, активної та реактивної потужностей, відповідно, визначаються як:

$$U_k^2 = \frac{2}{N^2} \{ \operatorname{Re}[U[k]]^2 + \operatorname{Im}[U[k]]^2 \}; \quad (9)$$

$$I_k^2 = \frac{2}{N^2} \{ \operatorname{Re}[I[k]]^2 + \operatorname{Im}[I[k]]^2 \}; \quad (10)$$

$$P_k = \frac{2}{N^2} \{ \operatorname{Re}[U(k)] \cdot \operatorname{Re}[I(k)] + \operatorname{Im}[U(k)] \cdot \operatorname{Im}[I(k)] \}; \quad (11)$$

$$Q_k = \frac{2}{N^2} \{ \operatorname{Re}[I(k)] \cdot \operatorname{Im}[U(k)] - \operatorname{Re}[U(k)] \cdot \operatorname{Im}[I(k)] \}. \quad (12)$$

Активна та реактивна потужності, що споживаються навантаженням, відповідають сумі потужностей за кожною з гармонік, а саме:

$$P = \sum_{k=0}^{N-1} P_k; \quad (13)$$

$$Q = \sum_{k=0}^{N-1} Q_k. \quad (14)$$

Шляхом чисельного інтегрування відліків (13) та (14) за часом оцінюється величина активної та реактивної енергії, відповідно, що споживається навантаженням.

Перевагою запропонованого методу, у порівнянні з відомим [11], є врахування внеску вищих гармонійних складових у обсязі спожитої енергії. Це дає змогу підвищити точність обліку у електромережах з напівпровідниковими перетворювачами: перетворювачами частоти для електродвигунів, інверторами у складі технологічних установок, інверторами для фотоелектричних станцій, електромобілями, активними фільтрами, компенсаторами реактивної потужності, які обладнані транзисторними регуляторами. Збільшення загального коефіцієнта гармонік THD, що має місце при роботі вказаних елементів електромережі, спричиняє зниження точності комерційного та технічного обліку. В той же час, впровадження цифрового лічильника електроенергії, програмна частина якого функціонує відповідно до залежностей (5)–(14), дозволяє уточнити результат вимірювання шляхом врахування перетоків потужності на вищих гармоніках. Також результати вимірювань можуть використовуватися під час визначення перетоків потужності між елементами «розумної» електромережі. До обмежень розробленого способу має бути віднесена чутливість до завад та випадкових викидів у вимірювальних колах, що можуть дещо спотворити результат вимірювання. Такі явища можуть бути нейтралізовані за допомогою цифрових фільтрів, які підключаються до виходу аналого-цифрових перетворювачів у складі вимірювальних каналів. Розроблений метод може бути впроваджений у програмному забезпеченні цифрових лічильників, які

застосовуються для комерційного обліку електроенергії. Також він буде корисним під час побудови нових пристроїв, у складі енергометрів. Крім того, спосіб можна реалізувати у складі програмного забезпечення мікропроцесорних терміналів цифрових електропідстанцій.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Таким чином, запропоновано спосіб вимірювання електроенергії цифровим лічильником, особливість якого полягає у врахуванні вищих гармонійних складових. Реалізація методу цифровим лічильником електроенергії дозволить зменшити невизначеність обліку в «розумних» електромережах. В ході подальших досліджень доцільно обґрунтувати параметри цифрового фільтра у складі вимірювальних каналів для зниження впливу випадкових збурень на процес вимірювання.

Література

1. Концепція впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України № 908-р від 14 жовтня 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text>
2. Zhou S. The effect of smart meter penetration on dynamic electricity pricing: Evidence from the United States. The Electricity Journal. 2021. 34 (3), 106919. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106919>
3. Кодекс комерційного обліку електричної енергії: затв. постановою НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 311 (у ред. постанови від 01.12.2021 р. № 2451). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text>
4. Electrical energy metering: some challenges of the european directive on measuring instruments (MID) / Bernieri A. et. al. Measurement. 2013. 46 (2013). P. 3347–3354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.025>
5. The Measuring Instruments Directive 2014/32/EU: The European Parliament and The Council, 26 February 2014. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0032>
6. ДСТУ EN IEC 62053-21:2022 Засоби вимірювання електричної енергії змінного струму. Спеціальні вимоги. Частина 21. Лічильники активної енергії статичні (класів точності 0,5, 1 і 2) (EN IEC 62053-21:2021, IDT; IEC 62053-21:2020, IDT).
7. Kołek K., Piątek K. Rapid algorithm prototyping and implementation for power quality measurement. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2015. 19. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13634-015-0192-3>
8. Wang X., Wang J., Yuan R., Jiang Z. Dynamic error testing method of electricity meters by a pseudo random distorted test signal. Applied Energy. 2019. 249 (2019). P. 67–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.054>
9. Krajewski M., Sienkowski S., Miczulski W. A simple and fast algorithm for measuring power system frequency. Measurement. 2022. 201 (2022) 111673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111673>
10. Chen K., Huang L., Liu Z. A frequency measurement algorithm for power quality monitoring terminal. Journal of Physics: Conference Series, Volume 1626, 2020 4th International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering 21-22 June 2020, Beijing, China. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1626/1/012071>
11. Gębarowski T., Jaraczewski M., Mielnik R. The low-frequency measuring method of voltage, current, power and signal processing application for compact PLC. Technical transactions, electrical engineering. 2016. 2-E/2016. P.121–134. DOI: <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.16.252.6051>
12. Wu R.-C., Chen H.-M., Huang C.-C., Chiang C.-T. Realization of interpolated fft algorithm on dsp for accurate harmonic analysis. Proceedings of the 4th IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, AsiaPES 2008. 102-107. URL: <http://surl.li/ldumr>

References

1. Concept of implementation of "smart grids" in Ukraine until 2035: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 908-p, Oct. 14, 2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text>
2. Zhou S. The effect of smart meter penetration on dynamic electricity pricing: Evidence from the United States. The Electricity Journal. 2021. 34 (3), 106919. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106919>
3. Code of commercial accounting of electric energy: approved by resolution of The National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities, Mar. 14, 2018 p. № 311 (as amended on Dec. 01, 2021. № 2451). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text>
4. Electrical energy metering: some challenges of the european directive on measuring instruments (MID) / Bernieri A. et. al. Measurement. 2013. 46 (2013). P. 3347–3354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.025>
5. The Measuring Instruments Directive 2014/32/EU: The European Parliament and The Council, 26 February 2014. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0032>
6. DSTU EN IEC 62053-21:2022 Means of measuring alternating current electrical energy. Special requirements. Part 21. Static active energy meters (accuracy classes 0.5, 1 and 2) (EN IEC 62053-21:2021, IDT; IEC 62053-21:2020, IDT).
7. Kołek K., Piątek K. Rapid algorithm prototyping and implementation for power quality measurement. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2015. 19. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13634-015-0192-3>
8. Wang X., Wang J., Yuan R., Jiang Z. Dynamic error testing method of electricity meters by a pseudo random distorted test signal. Applied Energy. 2019. 249 (2019). P. 67–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.054>

9. Krajewski M., Sienkowski S., Miczulski W. A simple and fast algorithm for measuring power system frequency. *Measurement*. 2022. 201 (2022) 111673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111673>
10. Chen K., Huang L., Liu Z. A frequency measurement algorithm for power quality monitoring terminal. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1626, 2020 4th International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering 21-22 June 2020, Beijing, China. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1626/1/012071>
11. Gebarowski T., Jaraczewski M., Mielnik R. The low-frequency measuring method of voltage, current, power and signal processing application for compact PLC. *Technical transactions, electrical engineering*. 2016. 2-E/2016. P.121–134. DOI: <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.16.252.6051>
12. Wu R.-C., Chen H.-M., Huang C.-C., Chiang C.-T. Realization of interpolated fft algorithm on dsp for accurate harmonic analysis. *Proceedings of the 4th IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, AsiaPES 2008*. 102-107. URL: <http://surl.li/ldumr>