

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЦИФРОВИМ ЛІЧИЛЬНИКОМ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПІДКЛЮЧЕННЯ

Національний авіаційний університет

vjlarin@gmail.com
fils0101@gmail.com

Вступ

Впровадження технологій *Smart Grid* та *Micro Grid* в електричні мережі та системи вимагає удосконалення засобів обліку електроенергії [1]. Лічильники, призначені для роботи в інтелектуальних системах, мають задовольняти наступним вимогам: точність не нижче класу 0,5 S; можливість передачі вимірювальної інформації в реальному часі; розрахунок вартості електроенергії на основі динамічної ціни, яка надходить до лічильника; можливість відключення споживача в години пікового навантаження на електромережу. Крім того, суттєве збільшення використання напівпровідникових силових перетворювачів у складі електроприводів споживачів, фотоелектричних та вітрових електростанцій вимагає підвищення точності обліку електроенергії при полігармонійному складі напруг та струмів.

Принцип вимірювання, який покладено в основу роботи більшості цифрових лічильників електроенергії, передбачає обчислення середньоквадратичних значень струмів та напруг за миттєвими значеннями. На основі таких значень обчислюються складові повної потужності, інтегруючи які за часом, одержують оцінки спожитої енергії. Найбільшу невизначеність у результат вимірювання вносить алгоритм обчислення середньоквадратичних значень за миттєвими відліками, що, в загальному випадку, передбачає виконання

чисельного інтегрування. Результат вимірювання оцінюється на основі потрійного чисельного інтегрування. Зниження невизначеності вимірювання енергії може бути досягнуто шляхом уникнення обчислення середньоквадратичних величин для змінних напруг та струмів. Для цього може бути застосований векторний метод, який передбачає оперування обертовими комплексними векторами. Відомо про широке використання такого методу при побудові цифрових релейних захистів для оцінювання імпедансу мережі. Векторний метод пропонується застосовувати для вимірювання споживання енергії цифровим лічильником трансформаторного підключення.

Необхідність удосконалення засобів вимірювальної техніки, що використовуються для обліку електроенергії у складі інтелектуальних систем електропостачання, визначають актуальність напрямку досліджень.

Аналіз досліджень та публікацій

Відповідно до Міжнародного протоколу вимірювання та верифікації (*The International Performance Measurement and Verification Protocol, IPMVP*) [2], при вимірюванні електроенергії та верифікації вимірювальної інформації слід брати до уваги три джерела невизначеностей: невизначеність вимірювання, невизначеність вибірових даних та модельна

невизначеність. Джерелом першої з перелічених невизначеностей є польові пристрої – лічильники електроенергії, що встановлені безпосередньо у споживача і на основі вимірювання струмів та напруг обчислюють споживання електричної енергії. Відомо, що «розумні» лічильники електроенергії, тобто пристрої з розвиненими мережевими інтерфейсами, об'єднують у передову вимірювальну інфраструктуру (*Advanced Metering Infrastructure, AMI*) [3]. Для обміну даними в такій розподіленій інформаційно-вимірювальній системі можуть використовуватися як провідні, так і безпроводні інтерфейси [4]. Це дозволяє здійснювати аналіз великих об'ємів даних, який супроводжується виникненням невизначеностей через оброблення вибірок з різними статистичними характеристиками. При цьому можуть застосовуватися методи роботи з *Big Data* [5], що дозволяє агрегувати дані для передбачення енергоспоживання певних споживачів та територій, визначення технологічних та нетехнологічних втрат, ідентифікація профілів навантаження споживачів у складі *Smart Grid*. При цьому, за даними Світового Банку, в розвинених країнах, де реалізуються концепції «розумного» обліку електроенергії, мешкає близько 12 % світового населення, яке споживає більше 66 % загальної генерації електроенергії [6]. Іншим способом побудови інформаційно-вимірювальних систем для обліку електроенергії є використання можливостей інтернету речей [7]. Модельна невизначеність супроводжує аналіз вимірювальної інформації, коли емпіричні дані описують певними регресійними або стохастичними моделями.

Невизначеність вимірювання електроенергії кількісно оцінюється відповідно до методів, що регулюються Настановою з оцінювання невизначеності вимірювань (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM*) [8]. *GUM* розрізняє невизначеність вимірювань типу А, що розрахована статистичними методами на основі результатів вимірювань, та невизначеність типу В, що оцінена на основі попередньої інформації про засоби

вимірювальної техніки та джерела невизначеностей. Для передбачення невизначеності можуть використовуватися нейронні мережі [9]. Для вираження невизначеності використовується довірчий інтервал (розширена невизначеність).

Багато в чому точність обліку електроенергії визначається метрологічними характеристиками лічильників. Побудова «розумних» лічильників на основі засобів мікропроцесорної техніки визначає їх головну роль у формуванні невизначеності вимірювань [10]. Суттєво збільшувати похибку обліку можуть зовнішні збурення, які спотворюються спеціальним чином для шахрайства, або випадково впливають на лічильник. Зокрема, зовнішні сильні магнітні поля можуть вносити похибку до 12 % у результати вимірювань, або унеможливити облік [11]. Вплив такого джерела невизначеності вимірювань може бути нівельований екрануванням [12]. Суттєвий вплив на невизначеність вимірювання електроенергії також чинять вимірювальні трансформатори струму, за допомогою яких струмові кола лічильника підключаються до мережі. Відхилення коефіцієнта трансформації від номінального оцінюється струмовою похибкою, а відхилення фази вихідного струму від вхідного – кутною похибкою, для експериментального визначення яких існують стандартні методики [13].

Реалізація цифрових інформаційно-вимірювальних систем обліку електроенергії переносить задачу реалізації принципу вимірювання електроенергії на програмний рівень. Це визначає доцільність розроблення методу вимірювання електроенергії цифровим лічильником трансформаторного підключення.

Мета

Метою дослідження є підвищення точності обліку електроенергії цифровим лічильником трансформаторного підключення за рахунок удосконалення методу вимірювання. Це дасть змогу підвищити точність розрахунків за спожиту електроенергію, знизить нетехнологічні втрати в розподільних електромережах.

Основна частина

Трифазні лічильники електроенергії включають три ідентичні вимірювальні канали, кожен з яких вимірює енергію, що споживається відповідною фазою навантаження. Під час розроблення методу вимірювання передбачається аналізувати вимірювальний канал однієї фази. Облік активної та реактивної енергії здійснюється на основі миттєвих значень струмів та напруг. Припустимо, що вимірювання напруги електромережі, миттєві значення якої позначимо $u(t)$, здійснюється за допомогою вимірювального трансформатора напруги TV . Миттєві значення струму $i(t)$, які визначаються величиною навантаження Z_L , вимірюються з використанням датчика струму TA (рис. 1). В якості останнього може виступати вимірювальний трансформатор струму, навантажений стандартним резистором 1 Ом.

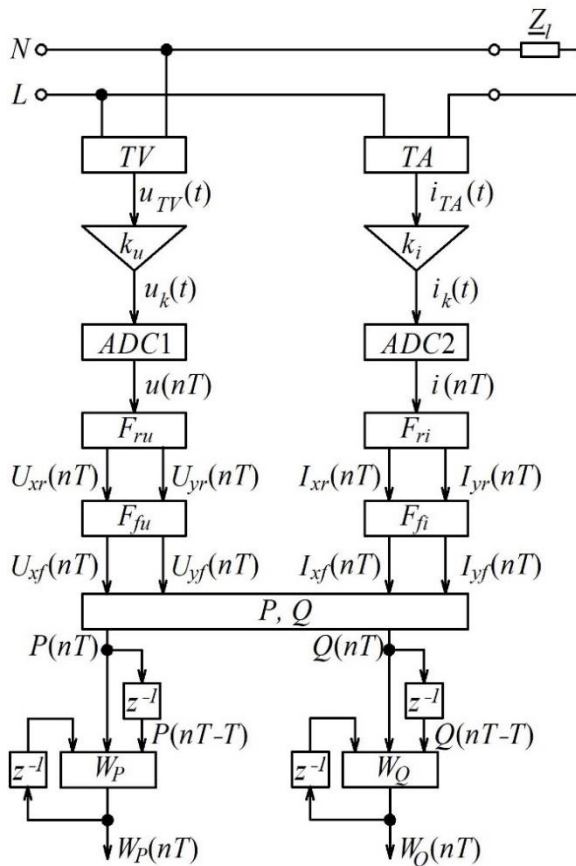


Рис. 1. Запропонована структурна схема вимірювання активної та реактивної енергії цифровим лічильником

Вихідний сигнал $u_{TV}(t)$ за напругою вимірювального трансформатора напруги подається до блоку k_U лінійного масштабування, що призначений для приведення у відповідність вимірювального сигналу до вимог аналого-цифрового перетворювача $ADC1$. На виході такого перетворювача видаються дискретизовані значення $u(nT)$, що відповідають миттєвим значенням напруги електромережі в моменти часу $t = 0, T, 2T, 3T, \dots$, причому T – період дискретизації сигналу за часом.

Сигнал $i_{TA}(t)$ на виході датчика струму (сигнал за напругою) аналогічним чином масштабується блоком k_i . Нормований сигнал подається до $ADC2$. Останній видає дискретизовані значення $i(nT)$.

Для аналітичного опису дискретизованих значень напруг та струмів використовуються вирази:

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

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

де $\omega_0 = 2\pi f_0$ – колова частота напруги (струму) мережі, рад/с; $f_0 = 50$ Гц – частота напруги мережі.

Дискретизовані значення вимірних величин описуються обертовими векторами наступним чином:

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

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

Проекції обертових векторів за вимірними миттєвими значеннями та їх першими похідними обчислюються як:

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

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

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

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

Обертові вектори можна зупинити, якщо помножити на $e^{-j\omega_0 nT}$. В результаті отримуємо нерухомі комплексні вектори, які не є функціями часу $t = 0, T, 2T, 3T, \dots$. Наприклад, для вектора напруги маємо:

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

Проекції обертових векторів визначаються зі співвідношення:

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

З урахуванням останнього виразу, проекції нерухомого (загальмованого) вектора напруги дорівнюють:

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

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

Для вектора струму аналогічно одержуємо:

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

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

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

Комплекс повної потужності навантаження визначається як добуток загальмованого вектора напруги на спряжений вектор струму:

$$\tilde{S} = \underline{U}_f \cdot \hat{\underline{I}}_f = P + jQ. \quad (16)$$

Переходячи в останньому виразі до ортогональної проекцій, маємо:

$$\tilde{S} = (U_{xf} + jU_{yf}) \cdot (I_{xf} + jI_{yf}). \quad (17)$$

Дійсна та уявна частини повної потужності дорівнюють активній та реактивній потужності, відповідно. Дискретні відліки вказаних потужностей за відліками ортогональних проекцій напруг та струмів виражаються як:

$$\begin{aligned} P(nT) &= \text{Re}[\underline{U}_f \cdot \hat{\underline{I}}_f] = \\ &= U_{xf}(nT) \cdot I_{xf}(nT) + \\ &+ U_{yf}(nT) \cdot I_{yf}(nT), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} Q(nT) &= \text{Im}[\underline{U}_f \cdot \hat{\underline{I}}_f] = \\ &= U_{yf}(nT) \cdot I_{xf}(nT) - \\ &- U_{xf}(nT) \cdot I_{yf}(nT). \end{aligned} \quad (19)$$

Активна та реактивна енергія відповідають означеним інтегралам від відповідних потужностей за певний період часу. За дискретними відліками потужностей відліки енергії можуть бути визначені за методом трапецій:

$$W_P(nT) = W_P(nT - T) + \frac{T}{2} [P(nT - T) + P(nT)], \quad (20)$$

$$W_Q(nT) = W_Q(nT - T) + \frac{T}{2} [Q(nT - T) + Q(nT)]. \quad (21)$$

Запропонований метод вимірювання електроенергії цифровим лічильником трансформаторного підключення може бути реалізований на програмному рівні мікропроцесора. До переваг такого методу слід віднести завадозахищеність та нечутливість до коливань амплітуди мережевої напруги. Також метод може бути реалізовано з використанням хмарних технологій, що дозволяє суттєво здешевити улаштування мікропроцесорних лічильників електроенергії, що розміщуються у споживача. До обмежень запропонованого способу відноситься зниження точності вимірювань в разі наявності вищих гармонік у струмі навантаження. Застосування запропонованого методу дозволить знизити невизначеність вимірювання електроенергії та підвищити точність фінансових розрахунків між учасниками енергоринку.

Висновки

Таким чином, підвищення точності вимірювання електроенергії цифровим лічильником може бути досягнуто реалізацією методу вимірювання, що передбачає оцінювання напруг та струмів дискретними відліками загальмованих векторів, які обчислюються відповідно до дискретних відліків миттєвих значень вимірюваних величин. Такий підхід відрізняється від відомих відсутністю необхідності обчислення середньоквадратичних значень напруг та струмів протягом періоду. Це дозволяє зменшити кількість операцій чисельного інтегрування, що знижує невизначеність вимірювання.

Література

1. Bimenyimana S., Asemota G.N. Traditional Vs Smart Electricity Metering Systems: A Brief Overview. Journal of Marketing and Consumer Research. – 2018. – Vol. 46. – P. 1-7.

2. International Performance Measurement And Verification Protocol. U.S. Dep. of

Energy. – 2002. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31505.pdf>.

3. Clustering Algorithm-Based Network Planning for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid / Gallardo J.L. et. al. IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 48992-49006.

4. Rawat N., Rana S., Yadav B., Yadav N. A review paper on automatic energy meter reading system. 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, 2016. – P. 3254-3257.

5. Guerrero-Prado J.S., Alfonso-Morales W., Caicedo-Bravo E. A Data Analytics/Big Data Framework for Advanced Metering Infrastructure Data. Sensors (Basel, Switzerland). – 2021. – Vol. 21.

6. Carstens H., Xia X., Yadavalli S. Measurement uncertainty in energy monitoring: Present state of the art. Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – Part 3. – P. 2791-2805.

7. Rawte M., Sharma S., Lalwani P. Smart prepaid energy meter based on internet of things. International Journal of Computer Applications. – 2017. – Vol. 171. – No. 2. – P. 24-26.

8. International Standard Organization, Guide 98-3 (2008) Uncertainty of measurement part 3: Guide to the expression of

uncertainty in measurement. URL: <https://www.iso.org/standard/50461.html>.

9. Kou Z., Fang Y., Bleszinski L. A Bifurcation deep neural network for electricity meter error prediction under actual conditions. European Journal of Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 21. – No. 6. – P. 509-514.

10. IOT based smart energy meter using ESP 32 / Pimple M. et al. Proceedings of the 3rd International Conference on Communication & Information Processing (ICCIP) 2021, September 5, 2021. – 6 p.

11. Research and Analysis on Measurement Error of Three-phase Electricity Meter with Magnetic Field Interference / Zhu M. et al. 2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS). – 2022. – P. 123-128.

12. Protection of Digital Power Meters Under the Influence of Strong Magnetic Fields / Diahovchenko I.M. et al. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering. – 2019. – P. 314-320.

13. Predl F., Freiburg M., Anghuber M. Diagnostic measurements on instrument transformers – Part I. A classification and overview of diagnostic measurements. Transformers magazine. – 2018. – Vol. 3. – Iss. 4. – P. 100-106.

Ларін В.Ю., Філоненко С.Ф., Стахова А.П.

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЦИФРОВИМ ЛІЧИЛЬНИКОМ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПІДКЛЮЧЕННЯ

Об'єктом дослідження є процес вимірювання електроенергії цифровим лічильником. Метою дослідження є підвищення точності обліку електроенергії цифровим лічильником трансформаторного підключення за рахунок удосконалення методу вимірювання. В результаті досліджень удосконалено метод вимірювання електроенергії цифровим лічильником трансформаторного підключення. Метод передбачає вимірювання миттєвих значень напруги та струму мережі вимірювальними трансформаторами, масштабування одержаних сигналів, багаторазове аналого-цифрове перетворення через фіксований інтервал дискретизації, обчислення дискретизованих значень ортогональних проекцій обертових векторів, гальмування векторів. На основі дискретизованих значень проекцій нерухомих векторів напруги та струму обчислюються складові повної потужності. Чисельне інтегрування за часом дає змогу одержати оцінки спожитої активної та реактивної енергії. Метод відрізняється від відомих відсутністю необхідності обчислення середньоквадратичних значень напруг та струмів протягом періоду. За рахунок цього зменшується кількість операцій чисельного інтегрування, що знижує

невизначеність вимірювання та підвищує точність. До переваг такого методу слід віднести завадозахищеність та нечутливість до коливань мережевої напруги. Застосування запропонованого методу дозволить знизити невизначеність вимірювань та підвищити точність фінансових розрахунків за електроенергію.

Ключові слова: лічильник електроенергії, метрологічна характеристика, вимірвальна інформація, трансформатор струму, точність, облік електроенергії, напруга, струм, невизначеність вимірювання.

Larin V.Yu., Filonenko S.F., Stakhova A.P.

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF ELECTRICAL ENERGY MEASUREMENT WITH A DIGITAL METER OF TRANSFORMER CONNECTION

The object of research is the process of measuring electricity with a digital meter. The purpose of the study is to improve the accuracy of electricity metering with a digital transformer connection meter by improving the measurement method. As a result of research, the method of measuring electricity with a digital transformer connection meter has been improved. The method involves measuring the instantaneous values of voltage and current of the grid by measuring transformers, scaling of the received signals, multiple analog-to-digital conversion through a fixed sampling interval, calculation of discretized values of orthogonal projections of rotating vectors, vector braking. On the basis of the discretized values of the projections of the braked voltage and current vectors, the components of the total power are calculated. Numerical integration over time makes it possible to obtain estimates of consumed active and reactive energy. The method differs from the known ones in that there is no need to calculate the root mean square values of voltages and currents over the period. Due to this, the number of numerical integration operations is reduced, which decreases measurement uncertainty and increases accuracy. The advantages of this method include immunity and insensitivity to fluctuations in the grid voltage. The application of the method will reduce measurement uncertainty and increase the accuracy of financial calculations for electricity.

Key words: electricity meter, metrological characteristics, measurement information, current transformer, accuracy, electricity accounting, voltage, current, measurement uncertainty.