

## ІНТЕГРАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТРИФАЗНОГО ЦИФРОВОГО ЛІЧИЛЬНИКА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Національний авіаційний університет

vjlarin@gmail.com

fls0101@gmail.com

### Вступ

Розвиток цифрових інформаційно-вимірювальних систем обліку електроенергії, впровадження інтелектуальних лічильників є невід'ємною задачею при реалізації концепції Європейського Союзу «Чиста енергія для всіх європейців» [1]. Інтелектуальні лічильники є фундаментальним компонентом мережі, оскільки дають споживачам можливість бути активними учасниками формування стратегії споживання шляхом реалізації функцій моніторингу та контролю. Протягом останніх років у багатьох європейських країнах відбулося масове розгортання «розумних» лічильників. Вони забезпечують не тільки автоматичне зчитування інформації щодо споживання, але і реалізують зв'язок між споживачем і постачальником електроенергії [2]. Це дозволяє застосовувати принцип цінкових стимулів для коригування енергоспоживання, а також інтегрувати відновлювальні джерела до розумної мережі. Суттєве збільшення ролі інтелектуальних лічильників у функціонування електромереж, в тому числі – у балансуванні, обумовлює актуальність підвищення їхньої точності та покращення метрологічних характеристик.

### Аналіз досліджень та публікацій

Одним з недоліків існуючих цифрових лічильників електроенергії є наявність трьох вимірювальних каналів, кожен з яких призначено для оцінювання споживання енергії навантаженням певної фази.

Кожен з каналів реалізовано на фізичному та програмному рівнях. Зокрема, фізичний рівень представлено зовнішнім електромагнітним вимірювальним трансформатором струму (напруги), за допомогою якого відповідне коло лічильника підключається до мережі, додатковим вимірювальним перетворювачем (електромагнітного типу або на основі ефекту Холла) у складі лічильника, електронною схемою масштабування сигналів та аналого-цифровими перетворювачами [3]. Програмне забезпечення для мікроконтролера реалізує алгоритм обчислення кута між синусоїдними сигналами та діючих значень вимірюваних величин. Також на програмному рівні реалізовано алгоритм обчислення активної та реактивної потужності, що найчастіше базується на класичних залежностях  $P=U \cdot I \cdot \cos\varphi$  та  $Q=U \cdot I \cdot \sin\varphi$ , відповідно. Обсяг спожитої активної та реактивної енергії знаходять шляхом чисельного інтегрування відповідних потужностей за часом [4]. В електронних (статичних) лічильниках виміряна потужність навантаження перетворюється у частоту імпульсів, які впливають на лічильний механізм, що здійснює інтегрування [5].

При оцінюванні невизначеності типу В вимірювання енергії цифровим лічильником необхідно приймати до уваги похибки основних та додаткових вимірювальних трансформаторів струму та напруги, аналого-цифрових перетворювачів, похибку алгоритму обчислення діючих значень вимірюваних величин [6], фазового кута,

похибку округлення обчислень [7]. Також необхідно враховувати якість електроенергії в мережі [8] та старіння елементів лічильника [9]. Для одного вимірювального каналу можна виділити близько 10 джерел невизначеності вимірювання, для трифазного лічильника – близько 30. При цьому похибки визначення діючих значень струму та напруги вносять один з найбільших внесків у сукупну невизначеність вимірювання. Підвищити точність вимірювання електроенергії цифровим лічильником можливо шляхом виключення джерел похибок, зокрема, – на програмному рівні. Відомим є спосіб оцінювання активної потужності, що передбачає використання амплітудних значень напруги та струму [10]. Проте точність такого підходу в разі наявності вищих гармонік є недостатньою. Також відомо алгоритм вимірювання потужності обох напрямків, заснований на виділенні основної гармоніки та дискретизації змінного струму [11].

Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є зниження кількості джерел невизначеності при вимірюванні електричної енергії цифровими лічильниками. Завдяки цьому знизиться рівень нетехнологічних втрат електроенергії, що збільшить рентабельність енергопостачальних організацій.

### Мета

Мета – підвищення точності вимірювання електроенергії цифровим лічильником трансформаторного ввімкнення шляхом програмної інтеграції вимірювальних каналів. Це дозволить зменшити кількість джерел невизначеності вимірювання та відмовитися від обчислень діючих значень струмів та напруг.

### Основна частина

Зниження кількості джерел невизначеності при вимірюванні енергії цифровим лічильником може бути досягнуто шляхом інтеграції вимірювальних каналів на програмному рівні. Це передбачає розроблення способу оброблення виміряних миттєвих значень струму на напруги, що включає необхідність обчислення діючих значень величин та оперує даними

одночасно за всіма фазами, не розділяючи операції оброблення інформації за трьома каналами. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити кількість операцій над даними та підвищити точність результату вимірювання.

Скористаємося методом просторового вектора [12] для обчислення потужності, що споживається навантаженням. До переваг такого підходу відноситься врахування одним комплексним вектором впливу трьох фаз, що суттєво скорочує кількість обчислень та дозволяє інтегрувати вимірювальні канали на програмному рівні. Просторові вектори струму  $\vec{i}$  та напруги  $\vec{u}$  визначаються за миттєвими значеннями фазних величин наступним чином:

$$\begin{aligned}\vec{i}(t) &= i_{\alpha}(t) + j i_{\beta}(t) = \\ &= \frac{2}{3} [i_a(t) + a \cdot i_b(t) + a^2 \cdot i_c(t)],\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\vec{u}(t) &= u_{\alpha}(t) + j u_{\beta}(t) = \\ &= \frac{2}{3} [u_a(t) + a \cdot u_b(t) + a^2 \cdot u_c(t)],\end{aligned}\quad (2)$$

де  $a = e^{j2\pi/3}$  – оператор повороту.

Повна потужність навантаження може бути обчислена як [13]:

$$S(t) = \vec{u}(t) \cdot \hat{i}(t), \quad (3)$$

де  $\hat{i}(t) = i_{\alpha}(t) - j i_{\beta}(t)$  – спряжений просторовий вектор струму.

Тоді активна  $W_p$  та реактивна  $W_Q$  електроенергія, що споживається навантаженням за часовий інтервал  $(0, t)$ , становить:

$$W_p(t) = \int_0^t \operatorname{Re}[S(t)] dt, \quad (4)$$

$$W_Q(t) = \int_0^t \operatorname{Im}[S(t)] dt. \quad (5)$$

Реалізацію принципу вимірювання електроенергії, що відповідає (1)-(5), ілюструє модель на рис.1.

Модель включає трифазне джерело напругою 0,38 кВ та симетричне активно-індуктивне навантаження (1,1 кВт, 0,1 кВАр). Сигнали з вимірювальних трансформаторів струму ТА1–ТА3 та напруги TV1–TV3 надходять до аналого-цифрових перетворювачів, де квантуються за рівнем

(Q1–Q6) та часом (екстраполятори нульового порядку ZOH1–ZOH6), рис.2, а. За цифровими відліками  $i[nT]$  та  $u[nT]$  вимірюваних величин обчислюються значення просторових векторів відповідно до (1) та (2), на основі чого розраховуються значення активної потужності  $P[nT]$ , рис.2, б.

Інтегрування за дискретними відліками потужності дає змогу обчислити активну енергію, рис.2, в.

До переваг такого підходу слід віднести відсутність необхідності обчислювати діючі значення струмів та напруг, а також об'єднання обчислень для трьох каналів.

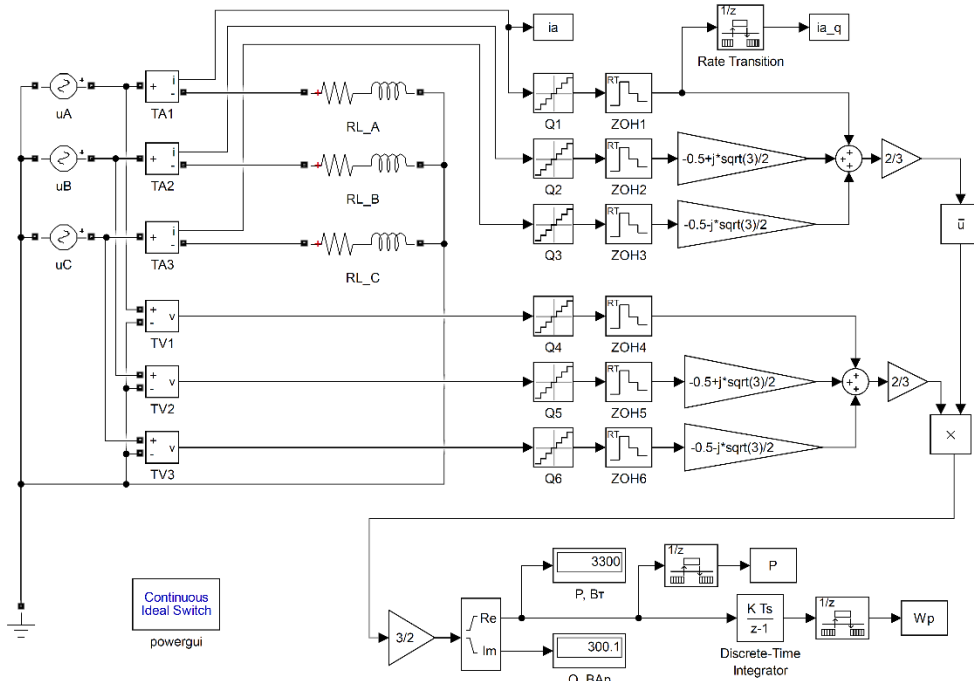


Рис. 1. Структурна схема комп'ютерної моделі цифрового лічильника електроенергії з інтегрованими вимірювальними каналами

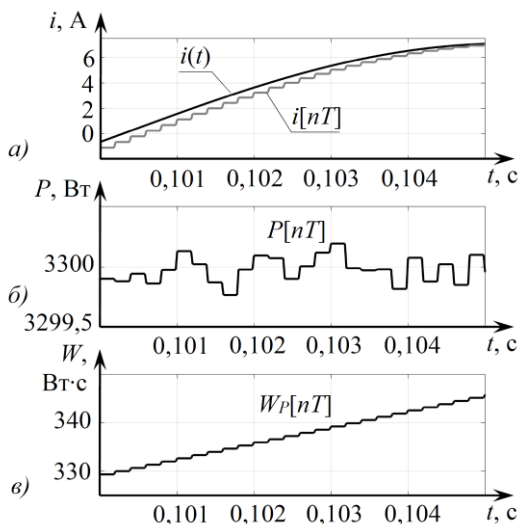


Рис. 2. Графіки функціонування цифрового лічильника з інтегрованими вимірювальними каналами: а – миттєві значення  $i(t)$  та цифрові відліки  $i[nT]$  струму першої фази; б – цифрові значення активної потужності; в – виміряні значення активної енергії

## Висновок

Запропоновано спосіб вимірювання електроенергії цифровим лічильником, який передбачає інтеграцію вимірювальних каналів шляхом реалізації метода просторового вектора. Очікується, що застосування такого способу дозволить підвищити точність вимірювання за рахунок зменшення кількості джерел невизначеності.

## Література

1. Clean energy for all Europeans. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019. – 24 p. URL: <http://surl.li/gkkr>.

2. Vitiello S., Andreadou N., Ardelean M., Fulli G. Smart Metering Roll-Out in Europe: Where Do We Stand? Cost Benefit Analyses in the Clean Energy Package and

Research Trends in the Green Deal. Energies. – 2022. – Vol. 15(7).

3. Despa D., Kurniawan A., Komarudin M., Mardiana, Nama G.F. Smart monitoring of electrical quantities based on single board computer BCM2835. 2015 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang, Indonesia, 2015. – P. 315-320.

4. Li G., Jiang Zh., Yu X., Cen Zh., Yan J. Study on electronic energy meter failure power calculation based on metering automation systems. 2018 7th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE 2018). – 2019. – Vol. 260. – 4 p.

5. Wang T., Wang J., Xhi X., Zhang R. Metering error quantification under voltage and current waveform distortion. The 2017 2nd International Seminar on Advances in Materials Science and Engineering, 28-30 July 2017, Singapore. – 2017. – Vol. 231. – 8 p.

6. Shujiang G, et al. Analysis and suggestions on measurement error of electric energy meter. Advances in Engineering Research. – 2018. – Vol 152. – P. 388-390.

7. Yang M., et. al. Research of the instrument and scheme on measuring the interaction among electric energy. Metrology of multi-user electric energy. Measurement: Sensors. – 2021. – Vol. 18.

8. Cetina R.Q., Roscoe A.J., Wright P.S. A review of electrical metering accuracy

standards in the context of dynamic power quality conditions of the grid. 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Heraklion, Greece. – 2017. – P. 1-5.

9. Zhang Z., et. al. Research on estimating method for the smart electric energy meter's error based on parameter degradation model. 2018 3rd Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE 2018) 22-24 March 2018, Kitakyushu, Japan. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 366.

10. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Енергоефективність систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії: монографія. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків, 2018. – 272 с.

11. Li Z., et. al. A bidirectional electric energy metering algorithm based on the fundamental component extraction and alternating current sampling. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conf., Xi'an, China. – 2018. – P. 1272-1279.

12. Bellan D., Superti-Furga G. Space-vector state-equation analysis of three-phase transients. Journal of Electrical Systems. – 2018. – Vol. 14(1). – P. 188-198.

13. Aller J.M., Bueno A., Paga T. Power system analysis using space-vector transformation. IEEE Transactions on Power Systems. – 2002. – Vol. 17(4). – P. 957-965.

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

## **ІНТЕГРАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТРИФАЗНОГО ЦИФРОВОГО ЛІЧИЛЬНИКА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Об'єктом дослідження є процес вимірювання електроенергії цифровим трифазним лічильником. Мета – підвищення точності вимірювання електроенергії цифровим лічильником трансформаторного ввімкнення шляхом програмної інтеграції вимірювальних каналів. Запропоновано застосувати метод просторового вектора для вимірювання електроенергії. Пропонується вимірювати миттєві значення струмів та напруг трифазної електромережі за допомогою електромагнітних вимірювальних трансформаторів струму, виконувати аналого-цифрове перетворення для одержання цифрових відліків сигналів, обчислювати комплексні значення просторових векторів, знаходити повну потужність як добуток вектора напруги на спряжений вектор струму. Дійсна частина повної потужності відповідає активній потужності, уявна – реактивній. Шляхом інтегрування за часом обчислюються відповідні значення енергій. Перевагами

такого підходу є відсутність необхідності обчислювати діючі значення струмів та напруг, що є одним з основних джерел невизначеності вимірювання. Також підвищення точності досягається за рахунок програмного об'єднання обчислень за трьома вимірювальними каналами. Застосування запропонованого підходу дає змогу знизити невизначеність вимірювання електроенергії, що підвищує точність розрахунків за спожиту електроенергію.

**Ключові слова:** невизначеність вимірювання, лічильник електроенергії, вимірювальний канал, трансформатор струму, точність, інформаційно-вимірювальна система, характеристика.

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

## **INTEGRATION OF MEASURING CHANNELS OF THREE-PHASE DIGITAL ELECTRICITY METER**

*The object of this research is the process of electricity measurement with a digital three-phase electric energy meter. The goal is to increase the accuracy of electricity measurement with an electric energy meter connected with a current transformer by software integration of measurement channels. The proposed method involves using the space vector method for electricity measurement. It is proposed to measure the instantaneous values of currents and voltages of a three-phase electrical network using electromagnetic measuring current transformers, performing analog-to-digital conversion to obtain digital readings of signals, to calculate complex values of space vectors, to find the total power as a product of the voltage vector by the conjugate current vector. The real part of the total power corresponds to the active power, the imaginary part to the reactive power. By integrating power over time, the corresponding energy values are calculated. The advantages of this approach are the absence of the need to calculate the root mean square values of currents and voltages, which is one of the main sources of measurement uncertainty. Also, the increase in accuracy is achieved due to the software combination of calculations for three measuring channels. The application of the proposed approach makes it possible to reduce the uncertainty of electricity measurement, which increases the accuracy of calculations for consumed electricity.*

**Keywords:** measurement uncertainty, electricity meter, measuring channel, current transformer, accuracy, information and measurement system, characteristic.