

УДК 621.317

О. М. ЗАСЛАВСЬКИЙ<sup>a</sup>, В. В. КУХАРЧУК<sup>b</sup>

## ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ МЕТОДОМ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ІНТЕГРУВАННЯ ТА ПОДВІЙНОГО СКАНУВАННЯ МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ СТРУМУ ТА НАПРУГИ

<sup>a</sup>Корпорація «Облік», м. Дніпропетровськ,  
Україна, E-mail: [am-47@mail.ru](mailto:am-47@mail.ru)

<sup>b</sup>Вінницький національний технічний університет  
95, Хмельницьке шосе, м. Вінниця, 21021, Україна

**Анотація.** Модифіковано метод безпосереднього інтегрування добутку результатів вимірювання миттєвих значень струму і напруги в мікропроцесорних лічильниках електричної енергії. Характерною відзнакою пропонованого методу є процедура подвійного сканування вибірок миттєвих значень струму та напруги з періодичною зміною послідовності вимірів на протилежну.

**Аннотация.** Усовершенствовано метод непосредственного интегрирования произведений мгновенных значений тока и напряжения при измерении электрической энергии. Характерной особенностью предложенного метода является процедура двойного сканирования выборок мгновенных значений тока и напряжения с периодическим изменением последовательности замеров на противоположную.

**Abstract.** A new modification of method of direct integration of instantaneous values of current and voltage at measuring of electric energy is developed and explored. Procedure of the double scanning of selections of instantaneous values of current and voltage with the periodic change of sequence of measurements on opposite is the feature of a new method.

**Ключові слова:** Вибірка, струм, напруга, послідовність, похибка, мікропроцесор, електрична енергія, electric energy.

### ВСТУП

Застосуванням мікропроцесорної техніки в електричних вимірюваннях стимулювало розвиток нової технології одержання вимірювальної інформації про спожиту електричну енергію та режими навантаження електричних мереж. Поява на ринку радіоелектронних компонентів дешевих і потужних мікропроцесорів створило умови для застосування у процедурах вимірювання електричної енергії простого та ефективного методу безпосереднього інтегрування результатів множення миттєвих значень струмів та напруг. У зв'язку з цим параметричні методи ШІМ-АІМ, та час-імпульсних квадраторів у засобах вимірювання потужності [1] відійшли у минуле.

Сучасні електронні лічильники електричної енергії та вимірювальні перетворювачі потужності в переважній більшості мають у своєму складі мікроконтролер за допомогою якого опосередковано обчислюються результати по проміжним даним прямих вимірювань струмів та напруг.

Згідно з ідеєю методу безпосереднього інтегрування результатів множення миттєвих значень струму і напруги активна та реактивна енергія кожної фази визначається

$$W = \int_t^{t+\Delta t} u(\omega t) \cdot i(\omega t + \varphi + \psi) dt, \quad (1)$$

де  $\psi = \omega \tau$ ,  $\omega$  - кутова частота коливань струму  $i(t)$  та напруги  $u(t)$ ,  $\tau$  - період часу, через який здійснюються вибірки миттєвих значень струму та напруги.

При синусоїдальному струмі та напрузі

$$W = (UI \cos \omega \tau \cos \varphi - UI \sin \omega \tau \sin \varphi) \Delta t, \quad (2)$$

де  $U, I$  - діючі значення.

З (2) видно, що для одержання точного значення активної енергії необхідно інтервал часу між вибірками  $\tau$  спрямовувати до нуля. Тоді

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \sin \omega t = 0, \quad \lim_{\tau \rightarrow 0} \cos \omega t = 1,$$

$$E_a = (U I \cos \varphi) \Delta t.$$

Для одержання точного значення реактивної енергії необхідно задати інтервал часу між вибірками  $\frac{\pi}{2\omega} + \tau$ . Тоді

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \sin \omega t = 1, \quad \lim_{\tau \rightarrow 0} \cos \omega t = 0,$$

$$E_r = (U I \sin \varphi) \Delta t.$$

Але в реальних мікропроцесорних вимірювальних системах внаслідок різних причин неможливо виконувати строго одночасні вибірки (рис.1), а, тим паче, вибірки з інтервалом часу точно рівним  $\frac{\pi}{2\omega}$ .

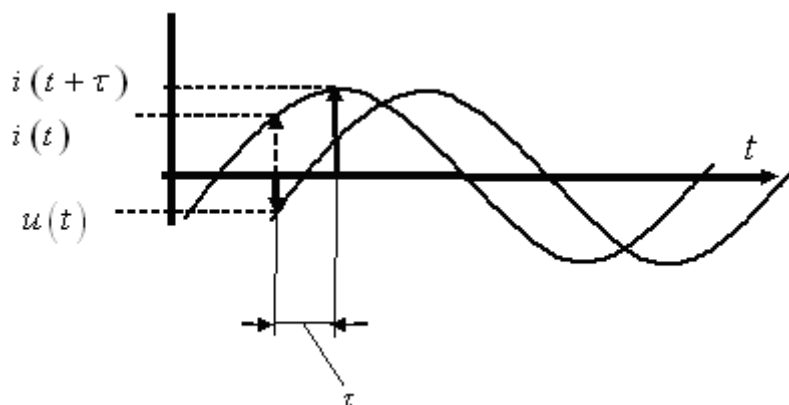


Рис. 1. Ілюстрація впливу неодночасності вимірів миттєвих значень

На часовій діаграмі (рис.1) струмів та напруг реальні виміри здійснюються в моменти, вказані суцільними стрілками, а пунктирною стрілкою вказано момент бажаного виміру струму.

Тому метою даної роботи є компенсація похибки, зумовленої коливаннями інтервалів часу між вибірками струмів та напруг.

### АНАЛІЗ ВІДНОСНОЇ ПОХИБКИ, ЗУМОВЛЕНОЇ ВІДХИЛЕННЯМИ ВІД ІДЕАЛЬНИХ ІНТЕРВАЛІВ ЧАСУ МІЖ ВИБІРКАМИ СТРУМІВ І НАПРУГ

Похибка вимірювання активної енергії оцінюють за формулою

$$\delta_{\tau a} = \frac{E_a - W}{E_a} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де  $W$  - вимірюване значення енергії (з урахуванням лише похибки неодночасності),  $E$  - її дійсне значення.

Підставивши в (3) значення  $W$  із (2), та врахувавши те, що  $\tau \neq 0$ , отримуємо залежність  $\delta_{\tau}$  від впливних величин. При синусоїдальних струмах та напругах (без нелінійних спотворень у вимірювальних колах) маємо

$$\delta_{\tau a} = (1 - \cos \omega \tau + \operatorname{tg} \varphi \sin \varphi) \cdot 100 \% . \quad (4)$$

У різних мікропроцесорних вимірювальних системах інтервал часу між двома вибірками миттєвих значень (включаючи витрати часу на аналого-цифрове перетворення) може приймати значення від 10 до 200 мкс.

При найгірших згідно [2] умовах вимірювань ( $\varphi = 60$  ел. град.) похибка  $\delta_{\tau}$  оцінена за (4) може набувати значень від  $\pm 0,54\%$  до  $\pm 10,9\%$ , що не припустимо при комерційному обліку електричної енергії лічильниками з класом точності 0,2 S та 0,5S. Очевидно, що ця складова похибки потребує компенсації. Але проста параметрична (за допомогою конденсаторів та резисторів) корекція фази сигналу, що поступає на вхід аналого-цифрового перетворювача не забезпечує необхідної похибки вимірювань. За сучасними вимогами [2] цифрові лічильники електроенергії повинні забезпечувати нормовану похибку при відхиленні частоти в контрольованій електричній мережі від номінального значення на  $\pm 5\%$ . При параметричній корекції кут  $\omega \tau$  компенсується додатковим зсувом фази вхідного сигналу, що досягається за допомогою корегувального кола з постійною часу  $T$

$$\delta_{\tau a} = \left( 1 - \cos \left( \omega \tau - \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega T} \right) + \operatorname{tg} \varphi \sin \left( \omega \tau - \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega T} \right) \right) \cdot 100 \% . \quad (5)$$

Ця постійна часу повинна задовольняти такій умові

$$\omega \tau - \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega T} = 0$$

при номінальній частоті  $\omega_0$  електричної мережі.

Але при відхиленні промислової частоти від номінального значення з'являється незкомпенсована складова похибки, яку можна оцінити, зробивши припущення, що для малих кутів

$$\omega \tau \cong \sin \omega \tau, \quad \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega T} \cong \frac{1}{\omega T}, \quad \cos \omega \tau \cong 1.$$

Врахувавши дані припущенням перетворимо (5) до виду

$$\delta_{\tau a} = \left( (\omega_0 + \Delta \omega) \tau - \frac{1}{(\omega_0 + \Delta \omega) T} \right) \operatorname{tg} \varphi \cdot 100 \% , \quad (6)$$

де  $\Delta \omega$  - відхилення частоти від номінального значення.

Додаткова відносна похибка, спричинена малими відхиленням частоти від номінального значення оцінюється так

$$\delta_{\tau}^{\Delta} = \left( \Delta \omega \tau - \frac{\Delta \omega}{\omega_0 + \Delta \omega} \right) \operatorname{tg} \varphi \cdot 100 \% . \quad (7)$$

З (7) видно, що додаткова відносна похибка наближено у відсотках при  $\varphi \geq 45^\circ$  дорівнює відносному відхиленню частоти. Тобто, при відхиленні частоти на 5%, додаткова відносна похибка теж дорівнює 5% і більше, що не припустимо.

Таким чином, параметрична компенсація похибки вимірювання активної енергії, пов'язаної з неодноразовністю миттєвих вимірів, не досягає мети при відхиленнях частоти електричної мережі від номінального значення. Аналогічні викладки відносно похибки вимірювання реактивної енергії приводять до того ж самого результату. Відносна похибка вимірювання реактивної енергії, що зумовлена відхиленням інтервалу часу між вибірками від значення  $\frac{\pi}{2\omega}$  оцінюється

$$\delta_{\tau r} = (1 - \cos \omega \tau - \operatorname{ctg} \varphi \sin \omega \tau) \cdot 100 \% . \quad (8)$$

Серед непараметричних способів компенсації цих похибок привертає увагу спосіб описаний в акцептованій заявці Японії [3]. За цим способом сигнал напруги розглядають як синусоїду, інтегрують і

визначають максимум. Значення напруги, відповідне моменту виміру сигналу струму, обчислюють шляхом інтерполяції за синусоїдальною кривою, отриманою при інтегруванні. Основним недоліком цього способу є нечутливість до нелінійних спотворень напруги у вимірюваних колах. Крім того, складна обчислювальна процедура пошуку максимального значення напруги зменшує кількість вимірів миттєвих значень струму та напруги в одиницю часу, що приводить до збільшення похибки дискретизації.

### ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ ТА РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗА МЕТОДОМ ПОДВІЙНОГО СКАНУВАННЯ

Особливістю пропонованого методу є те, що за допомогою єдиної обчислювальної процедури одержуються значення як активної так і реактивної енергії з автоматичною компенсацією похибок, зумовлених відхиленнями від ідеальних інтервалів часу між вибірками струмів та напруг.

Відмінністю методу є те, що період вимірювань складається із двох сканів [4]. У першому скані вимірювання здійснюються в одній послідовності (першою, наприклад, вимірюється напруга, а за нею струм тієї ж фази). У другому – послідовність вимірів змінюється на протилежну (див. рис.2).

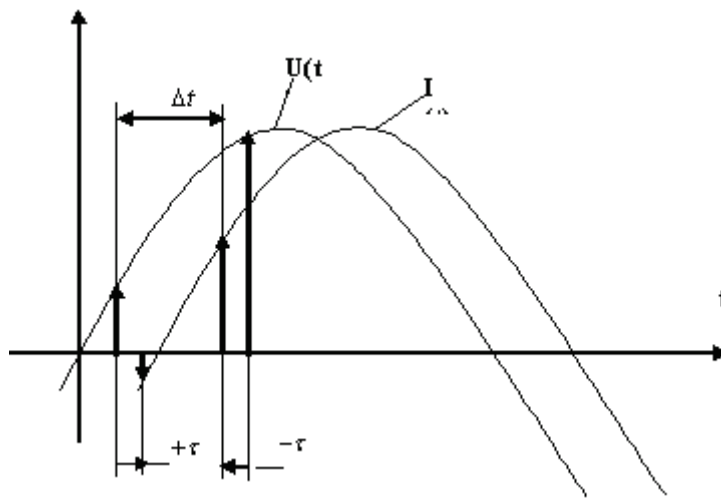


Рис. 2. Ілюстрація послідовності вимірювань миттєвих значень струмів та напруг при подвійному скануванні

Тривалість кожного скану на рис.2 позначено  $\Delta t$ . Тоді активна і реактивна енергія на інтервалі часу тривалістю  $2\Delta t$  визначаються

$$W_a = \frac{\Delta t}{2} \sum_{n=1}^{\tau} u(\omega t_n) \cdot i(\omega t_n + \omega \tau) \tau + \frac{\Delta t}{2} \sum_{m=1}^{\tau} u(\omega t_m) \cdot i(\omega t_m - \omega \tau) \tau, \quad (9)$$

$$W_r = \frac{\Delta t}{2} \sum_{n=1}^{\tau} u(\omega t_i) \cdot i\left(\omega t_i + \omega \tau + \frac{\pi}{2}\right) \tau - \frac{\Delta t}{2} \sum_{m=1}^{\tau} u(\omega t_j) \cdot i\left(\omega t_j - \omega \tau - \frac{\pi}{2}\right) \tau, \quad (10)$$

де  $n=1, \frac{\Delta t}{\tau}$  - номери вимірів у першому скані,  $m=1, \frac{\Delta t}{\tau}$  - номери вимірів у другому скані.

При синусоїдальних струмах та напругах (9) і (10) приводяться до такого виду

$$W_a = \frac{1}{2}(E_a \cos \omega \tau + E_r \sin \omega \tau) + (E_a \cos(-\omega \tau) + E_r \sin(-\omega \tau)) = E_a \Delta t \cos \omega \tau, \quad (11)$$

$$W_r = \frac{1}{2} \left( E_a \cos \left( \frac{\pi}{2} + \omega \tau \right) + E_a \sin \left( \frac{\pi}{2} + \omega \tau \right) \right) - \frac{1}{2} \left( E_r \cos \left( -\frac{\pi}{2} - \omega \tau \right) + E_r \sin \left( -\frac{\pi}{2} - \omega \tau \right) \right) = E_r \sin \left( \frac{\pi}{2} + \omega \tau \right). \quad (12)$$

Звідси одержуємо залежності для оцінювання відносної методичної похибки безпосереднього інтегрування та подвійного сканування миттєвих значень струмів і напруг

$$\delta_{\tau a} = \delta_{\tau r} = \delta_{\tau} = (1 - \cos \omega \tau) \cdot 100\%. \quad (13)$$

Оцінена за (13) похибка для значень  $\tau$  від 10 мкс до 200 мкс змінюється від 0.0005% до 0,2% із знаком плюс. Врахувавши те, що частота коливань напруги в розподільчій мережі змінюється не більше, ніж на  $\pm 5\%$  від номінального значення, ця складова похибки може бути додатково скомпенсована множенням  $W_a$  та  $W_r$  на коригувальний коефіцієнт

$$k = \frac{1}{\cos \varpi \tau}, \quad (14)$$

де  $\varpi = 314$  рад/с.

З врахуванням значення цієї поправки одержуємо таку залежність

$$\delta_{\tau} \leq \left( 1 - \frac{\cos(\varpi + \xi)\tau}{\cos \varpi \tau} \right) \cdot 100\% = (1 - \cos \xi \tau - \operatorname{tg} \varpi \tau \sin \xi \tau) \cdot 100\%, \quad (15)$$

де  $\xi = 15.7$  рад/с – п'ять відсотків від нормованої кутової частоти.

Максимальне значення похибки, що оцінено за (15), не перевищує  $0.5 \cdot 10^{-3} \%$ . В реальних умовах за наявності нелінійних спотворень у розподільчій мережі, де вимірюється електрична енергія, при оцінюванні похибки неодноразовості вимірів, необхідно враховувати також спектральний склад кривих струмів та напруг. При цьому (11) з урахуванням поправки (14) приймає вигляд

$$W_a = E_{a1} \frac{\cos \omega \tau}{\cos \varpi \tau} + \sum_{k=2}^{\infty} E_{ak} \frac{\cos k \omega \tau}{\cos \varpi \tau}, \quad (16)$$

де  $k = \overline{2, \infty}$  - номери гармонік.

Дійсна енергія є сумою гармонічних складових

$$E_a = E_{a1} + \sum_{k=1}^{\infty} E_{ak}. \quad (17)$$

Тому похибка  $\delta_{\tau}$  з врахуванням (17) визначається так

$$\delta_{\tau} = \frac{\left( 1 - \frac{\cos \omega \tau}{\cos \varpi \tau} \right) + \frac{1}{E_{a1}} \sum_{k=1}^{\infty} \left( 1 - \frac{\cos k \omega \tau}{\cos \varpi \tau} \right)}{1 + \frac{1}{E_{a1}} \sum_{k=1}^{\infty} E_{ak}} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Згідно до міжнародного стандарту IEC 62053 похибка засобу вимірювання електричної енергії нормується при такому гармонійному складі вимірюваних величин:

- загальний коефіцієнт потужності: 1;
- рівень 5-тої гармоніки напруги:  $U_5 = 0.1 U_1$ ;
- рівень 5-тої гармоніки струму:  $I_5 = 0.4 I_1$ ;
- гармонічний коефіцієнт потужності: 1;
- перша та п'ята гармоніки напруги синфазні.

Результуюча енергія на заданому інтервалі часу для 5-тої гармоніки складає  $E_{a5} = 0.04 E_{a1}$ .

Виходячи з цих вимог, за (18) оцінено максимальне значення похибки  $\delta_\tau$  ( $\tau = 200$  мкс) за умов нормованих нелінійних спотворень струму та напруги. Це значення складає 0,187%, що з врахуванням інших складових похибки є задовільним для лічильників класу точності 0,5S.

Для досягнення класу точності 0,2S необхідно зменшувати неодноразовість вимірів  $\tau$ .

### ВИСНОВКИ

Пропонований метод безпосереднього інтегрування та подвійного сканування вибірок миттєвих значень струму та напруги з періодичною зміною послідовності вимірів на протилежну та засіб, що його реалізує, забезпечують нормоване значення похибки за дуже простим алгоритмом вимірювання активної та реактивної енергії з автоматичною компенсацією похибок, зумовлених відхиленнями моментів часу вибірок від ідеальних.

Ефективність розробленого методу підтверджена результатами Державних випробувань електронного лічильника «Облік», занесеного за результатами цих випробувань до Державного реєстру засобів виміральної техніки.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Применение время-импульсных квадраторов в измерителях мощности / В.У. Кизилов, И.И. Смилянский // Сб. тр. семинара «Локальные системы автоматики и вычислительной техники»: Вып. 1. – Х., 1976. – С. 107-121.
2. ГОСТ 30206 – 94 (МЭК 687 - 92). Статические счётчики Ватт-часов активной энергии переменного тока (классы точности 0,2S, 0,5S), Киев, 2001.
3. Акцептованная заявка Японии № 5075269, МКИ G01R21/133, опубл. 20.10.93.
4. Патент Р.Ф. на изобретение № 2143701 G01R21/133, опубл. 27.12.1999.

Надійшла до редакції 20.03.2008р.

**ЗАСЛАВСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ** – головний конструктор, корпорація «Облік», м. Дніпропетровськ, Україна, тел. (0562)-32-05-51, E-mail: [am-47@mail.ru](mailto:am-47@mail.ru).

**КУХАРЧУК ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ** – д.т.н., професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, Україна,тел. (0432)-59-84-44, E-mail: [Bkuch@ukr.net](mailto:Bkuch@ukr.net).