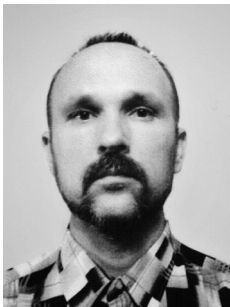




МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ КУТА ЗСУВУ ФАЗ МІЖ ДВОМА НАПРУГАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРЕЦИЗІЙНОГО ВИМІРЮВАЧА ЗМІННОЇ НАПРУГИ

В. В. Ісаєв,

старший науковий співробітник ДП "Укрметртестстандарт", м. Київ



Розглянуто спосіб калібрування компараторів змінного струму за фазовою складовою похибки — кутовою похибкою. Визначено залежність вимірюваного кута зсуву фаз від середньоквадратичних значень двох вхідних напруг із використанням прецизійного вимірювача.

Ключові слова: компаратор, масштабний перетворювач, кут зсуву фаз, невизначеність вимірювань.

The method of calibration of alternating current comparators by the phase component of the error — angular error is considered. The dependence of the measured phase shift angle from the root mean square values of the two input voltages using the precision meter is determined.

Keywords: comparator, scale transducer, phase shift angle, measurement uncertainty.

Постановка проблеми

У повсякденній практиці інженерів прикладної метрології часто виникає завдання визначення кута зсуву фаз між двома близькими за амплітудою та початковою фазою напругами змінного струму з високою точністю.

Під час визначення поправок за кутовою похибкою масштабних перетворювачів напруги змінного струму (МП) на практиці у вимірювальних лабораторіях реалізується метод порівняння за допомогою компаратора середньоквадратичного значення вихідної напруги досліджуваного МП із середньоквадратичним значенням вихідної напруги МП із відомою з прийнятною невизначеністю вимірювань (НВ) фазовою поправкою. Кутова похибка вимірювального трансформатора, призначеного для масштабного перетворення, визначається кутом між вектором первинної напруги й зміщеним на 180° вектором вторинної напруги [1]. Оскільки компаратор під час калібрування МП порівнює два

вхідних сигнали змінної напруги, кожен з яких має унікальне значення кутової похибки, цей прилад визначає кут зсуву фаз між двома векторами напруги змінного струму.

Слід зазначити, що існує необхідність установлення НВ із використанням компаратора під час визначення метрологічних характеристик (МХ) прецизійних МП і забезпечення простежуваності результатів вимірювань (ПРВ) до міжнародної системи одиниць SI.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Публікації, які стосуються використання компараторів під час визначення МХ МП, переконують, що внеском стандартної невизначеності, спричиненої використанням компаратора, у загальну стандартну НВ, як правило, нехтують [2, 3]. Стандартна НВ, спричинена використанням сучасних компараторів, становить для серійно вироблених приладів близько 0,3 % від результату вимірювання (РВ).

За допомогою сучасних, вироблених в Україні, приладів для калібрування вимірювальних трансформаторів можливо виміряти кут зсуву фаз між двома напругами, що не перевищує $10'$, зі стандартною НВ, оціненою відповідно до пункту 4.3.7 Настанови з вираження невизначеності вимірювань (далі — Настанова), на рівні близько $0,06'$ [4, 5].

В Україні розроблений та експлуатується з 2011 р. національний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами, який забезпечує найменше значення невилученої систематичної похибки $0,003''$, або $0,18'$ [6]. Варто відзначити, що рівень НВ, який необхідно забезпечувати під час калібрування компараторів, можливо реалізувати за допомогою викладеного нижче способу, оскільки прецизійний вимірювач (ПВ), що відкалібрований із використанням виробленого фірмою "Fluke" термоелектричного перетворювача 792А, який входить до складу національного еталона одиниці електричної напруги змінного струму (НЕ ОЗН), може забезпечити вимірювання сигналу змінної напруги зі значенням 2 мВ [7, 8] із прийнятною НВ.

Постановка завдання

Метою статті є визначення функціональної залежності вимірюваного кута зсуву фаз між двома вхідними сигналами змінної напруги від середньоквадратичного значення (СКЗ) кожного із цих сигналів та встановлення зв'язку НВ під час калібрування компаратора з НЕ ОЗН.

Виклад основного матеріалу

Сучасний компаратор вітчизняного виробництва призначений для калібрування МП, вимірювальних трансформаторів. Під час калібрування МП на один вхід компаратора потрапляє сигнал вихідної напруги змінного струму U_x МП, що калібрується, а на другий — сигнал U_e еталонного МП.

На рис. 1 проілюстровано дві комбінації вхідних сигналів компаратора: *a* — МП, що калібрується, має вихідний сигнал, який випереджає за фазою еталонний вихідний сигнал та перевищує його за амплітудою; *б* — еталонний МП має вихідний сигнал, який випереджає за фазою вихідний сигнал МП, що калібрується, та перевищує його за амплітудою. Оскільки під час калібрування МП визначаються дві складові MX (амплітудна й кутова), для їх визначення необхідно мати інформацію про різницю вихідних сигналів двох МП у векторному вигляді. Кутова похибка досліджуваного МП відносно еталонного МП являє собою проекцію вектора різниці вихідних сигналів зазначених МП (за умови рівності напруги на входах цих МП) на уявну вісь комплексної системи координат. Різницю вихідних сигналів

напруги еталонного й досліджуваного МП, що виникає на клеммах компаратора, також проілюстровано на рис. 1.

Сучасний компаратор побудований таким чином, що має у своїй конструкції вимірювальний ланцюг, в якому відбувається виділення вектора напруги, що являє собою результат векторного віднімання вихідного сигналу еталонного МП від вихідного сигналу досліджуваного МП. Через подільник напруги у вимірювальний тракт компаратора потрапляє сигнал різниці напруг U_{Δ} . Як результат перетворення на виході вектор-вимірювального АЦП формуються коди, пропорційні ортогональним складовим сигналу різниці напруг, які заносяться до пам'яті мікроконтролера. Також у пам'ять потрапляють коди, пропорційні ортогональним складовим вихідного сигналу еталонного МП [5].

На рис. 2 зображено трикутники, які утворюються внаслідок векторного віднімання вихідного сигналу еталонного МП від вихідного сигналу МП, що калібрується (варіант *a*), і відповідають зображеним на рис. 1 варіантам без дотримання масштабу (варіант *б*). При цьому напрямок осі дійсної векторної складової збігається з напрямком вектора еталонного сигналу, а кут її нахилу обрано довільно, оскільки еталонний сигнал має деяке систематичне фазове відхилення від національного еталона одиниці коефіцієнта масштабного перетворення електричної напруги.

Розглянувши рис. 2 та пам'ятаючи про теорему Піфагора, можна отримати такі співвідношення для елементів фігур:

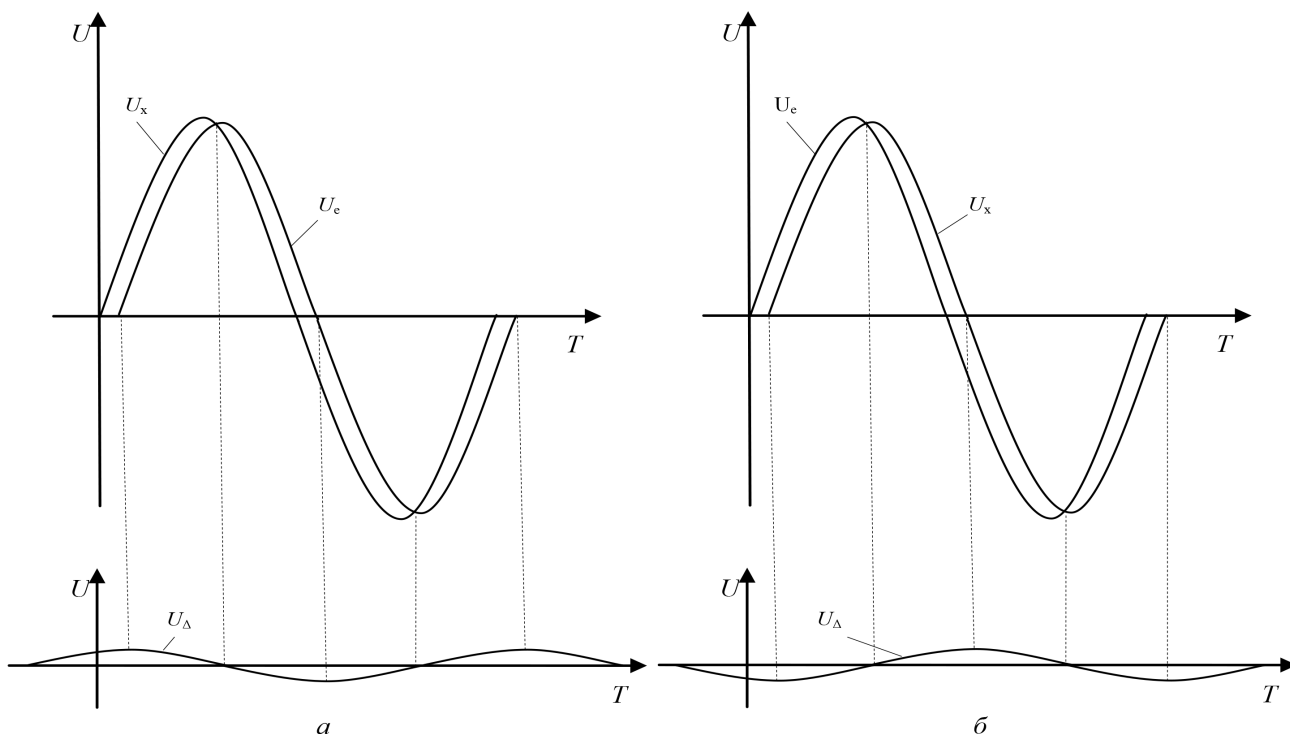


Рис. 1. Комбінація вхідних сигналів компаратора

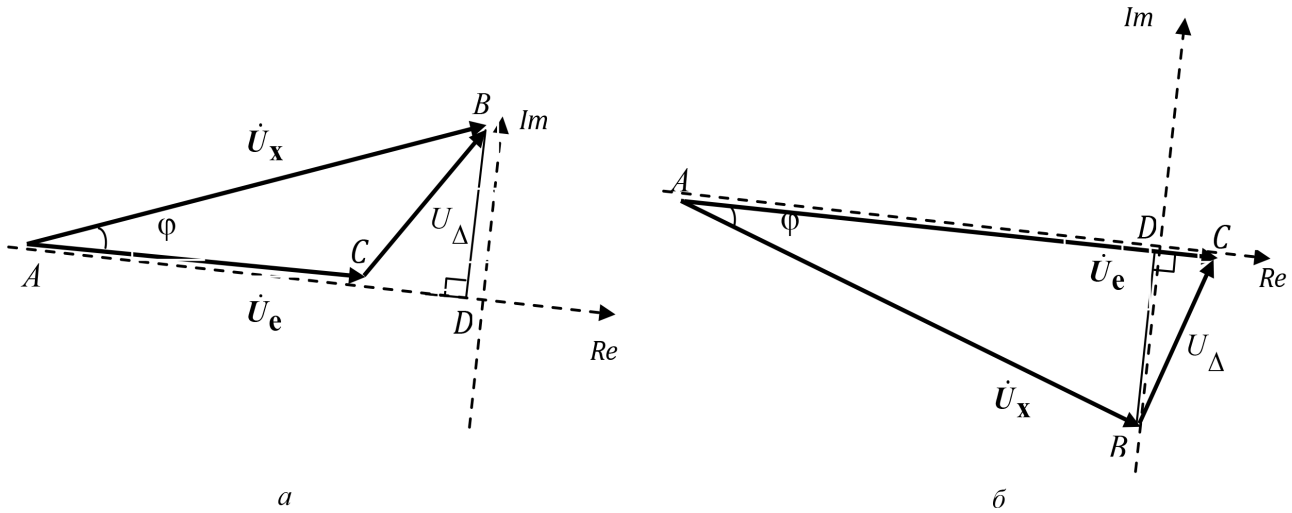


Рис. 2. Векторне віднімання вхідних сигналів компаратора

$$\dot{U}_\Delta = \dot{U}_x - \dot{U}_e; \quad (1)$$

$$|\dot{U}_\Delta| = BD^2 + CD^2; \quad (2)$$

$$|\dot{U}_x| = BD^2 + AD^2; \quad (3)$$

$$\cos \varphi = AD/AB. \quad (4)$$

ного МП; різниці першого та другого періодичних сигналів. Значення кута зсуву фаз визначається за формулою, яка отримується під час аналізу трикутників на рис. 2 та виразів (1) – (4):

$$\varphi = \arccos \left(\frac{U_e}{2 \cdot U_x} + \frac{U_x}{2 \cdot U_e} - \frac{U_\Delta^2}{2 \cdot U_x \cdot U_e} \right), \quad (5)$$

Завдання визначення функціональної залежності вимірюваного кута зсуву фаз між двома вхідними сигналами змінної напруги від СКЗ цих сигналів вирішується запропонованим способом із використанням ПВ (або двох ПВ), що вимірює три СКЗ напруги змінного струму: вихідного сигналу МП, що калібрується; вихідного сигналу еталон-

ного МП; різниці першого та другого періодичних сигналів. Значення кута зсуву фаз визначається за формулою, яка отримується під час аналізу трикутників на рис. 2 та виразів (1) – (4):

де U_e – СКЗ вихідного сигналу еталонного МП; U_x – СКЗ вихідного сигналу МП, що калібрується; U_Δ – СКЗ різниці напруг вхідних сигналів компаратора. Завдання встановлення зв'язку НВ під час калібрування компаратора з НЕ ОЗН вирішується за допомогою електричної схеми, наведеної на рис. 3.

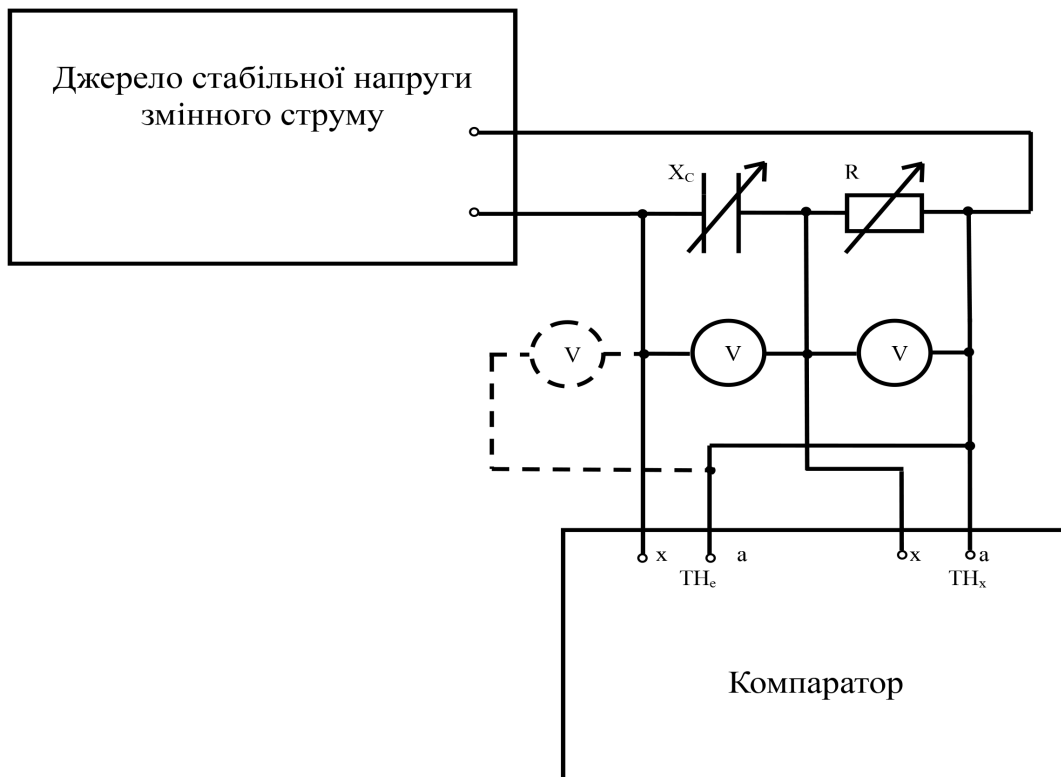


Рис. 3. Електрична схема калібрування компаратора за допомогою прецизійного вимірювача

Вимірюваний сигнал	Середнє значення, В	Експериментальне стандартне відхилення середнього значення, В	Розширена невизначеність за свідцтвом про калібрування ПВ, В	Результат визначення кута зсуву фаз, мінути	Розширена невизначеність, мінути
На клеммах "а" й "х" входу "ТН _е "	100,0158	$3,4 \cdot 10^{-05}$	0,003	0,0697	0,0028
На клеммах "а" й "х" входу "ТН _х "	100,0151	$5,1 \cdot 10^{-05}$	0,003		
Між двома клеммами "х"	0,002165	$2,0 \cdot 10^{-05}$	$1 \cdot 10^{-06}$		

У поданій схемі джерело напруги змінного струму забезпечує стабільний вихідний сигнал, який безпосередньо потрапляє на клемами, призначені для вихідної напруги еталонного МП, тоді як на клемами, призначені для МП, що калібрується, потрапляє напруга, зміщена за фазою за допомогою змінних опору та ємності. ПВ (наприклад, цифровий мультиметр Agilent 3458A) по чергово вимірює СКЗ напруги необхідну кількість разів: на клеммах "а" й "х" входу "ТН_е", на клеммах "а" й "х" входу "ТН_х", а також між двома клеммами "х".

Оцінювання НВ за отриманими РВ виконується відповідно до Настанови [4]. Відповідно до пункту 4.1 цієї Настанови, у випадку вимірювання кута зсуву фаз за формулою (5), ця величина не є безпосередньо вимірюваною, адже її значення залежить від трьох вимірюваних СКЗ напруги.

Відповідно до пункту 5.1.2 Настанови загальну стандартну НВ кута зсуву фаз слід визначати через оцінені стандартні невизначеності вхідних величин U_e, U_x, U_Δ .

Виконуючи операції диференціювання функціональної залежності кута зсуву фаз (5), отримуємо такі вирази для коефіцієнтів чутливості за i-ю вхідною величиною:

$$\frac{\partial \phi}{\partial U_e} = - \frac{\left[\frac{1}{2 \cdot U_x} - \frac{U_x}{2 \cdot U_e^2} + \frac{U_\Delta^2}{2 \cdot U_e^2 \cdot U_x} \right]}{\sqrt{1 - \left[\frac{U_e}{2 \cdot U_x} + \frac{U_x}{2 \cdot U_e} - \frac{U_\Delta^2}{2 \cdot U_e \cdot U_x} \right]^2}}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial U_x} = - \frac{\left[\frac{1}{2 \cdot U_e} - \frac{U_e}{2 \cdot U_x^2} + \frac{U_\Delta^2}{2 \cdot U_x^2 \cdot U_e} \right]}{\sqrt{1 - \left[\frac{U_e}{2 \cdot U_x} + \frac{U_x}{2 \cdot U_e} - \frac{U_\Delta^2}{2 \cdot U_e \cdot U_x} \right]^2}}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial U_\Delta} = \frac{\left[\frac{U_\Delta}{U_x \cdot U_e} \right]}{\sqrt{1 - \left[\frac{U_e}{2 \cdot U_x} + \frac{U_x}{2 \cdot U_e} - \frac{U_\Delta^2}{2 \cdot U_e \cdot U_x} \right]^2}}. \quad (8)$$

Загальна стандартна невизначеність міститиме стандартні невизначеності за типом В, як отримані під час калібрування ПВ значення невизначенос-

ті, що зазначається у свідцтві про калібрування. Стандартні невизначеності за типом А слід оцінювати, як експериментальні стандартні відхилення середніх значень вхідних величин U_e, U_x, U_Δ . Внесок у загальну стандартну невизначеність кожної вхідної величини слід визначати з урахуванням коефіцієнтів чутливості, розрахованих за формулами (6) — (8). Зокрема, найменших значень НВ за допомогою ПВ можна досягти за попереднього визначення його систематичних помилок відносно НЕ ОЗН. Таким чином, з'являється ПРВ кута зсуву фаз під час калібрування компаратора (й, надалі, отриманих за його допомогою РВ) до одиниці напруги змінного струму.

Пропонований спосіб визначення кута зсуву фаз пояснюється таким прикладом.

Під час калібрування компаратора було зафіксовано результати 15-ти спостережень СКЗ напруги на клеммах "а" й "х" входу "ТН_е", на клеммах "а" й "х" входу "ТН_х" та різниці напруги між першим та другим сигналами. У таблиці наведено результати, при цьому значення кута зсуву фаз було отримано за формулою (5), а значення розширеної НВ цього кута визначено відповідно до пункту 6 Настанови [4]. Розширену невизначеність ПВ отримано зі свідцтва про калібрування цифрового мультиметра Agilent 3458A.

Висновки

Вирішено завдання метрологічного забезпечення вимірювання малих значень кута зсуву фаз між двома сигналами періодичної напруги, зокрема, калібрування лабораторіями засобів вимірювальної техніки — компараторів змінної напруги, з високою точністю внаслідок мінімізації впливу систематичного відхилення РВ СКЗ напруги за допомогою ПВ від значення, що зберігає та відтворює НЕ ОЗН. Мінімізації НВ під час визначення МХ МП можна досягти шляхом калібрування компаратора вихідних сигналів МП за допомогою ПВ, який має ПРВ до НЕ ОЗН.

Спосіб визначення кута зсуву фаз між двома близькими за амплітудою й початковою фазою сигналами напруги змінного струму, опис якого викладено вище, надає можливість забезпечити ПРВ під час калібрування МП до НЕ ОЗН.

Перспективу уточнення НВ під час калібрування компараторів обумовлено подальшим удосконаленням еталонної бази України [9], а також потребами економіки та технічним розвитком держави.

Список літератури

1. ДСТУ 2976–95. Трансформатори струму та напруги. Терміни та визначення. Київ, 42 с.
2. Вторинний еталон одиниці коефіцієнта масштабного перетворення сили змінного струму. Керівництво з експлуатації. Київ: ДП “Укрметртестстандарт”, 2007. 12 с.
3. МКУ 059–29/08–2011. Метрологія. Трансформатори тока. Методика калібрівки. Киев: ГП “Укрметртестстандарт”, 2011. 23 с.
4. JCGM 100:2008 // GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement [Електронний ресурс]. URL: http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf — Назва з екрана.
5. АМАК.411439.001 РЭ. Компаратор СА507. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Киев: ООО “ОЛТЕСТ”. 86 с.
6. Національні еталони України [Електронний ресурс]. URL: <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=55&L=0> — Назва з екрана.
7. Державний еталон одиниці електричної напруги від 0,1 до 1000 В змінного струму у діапазоні частот від 10 Гц до 1 МГц (ДЕТУ 08–07–02). Керівництво з експлуатації. Київ: УкрЦСМ, 2001. 35 с.
8. 792A. AC/DC Transfer Standard. Instruction Manual. Everett: Fluke Corporation. 2003–2006. 192 с.
9. Velychko O. Ukrmetrteststandard, Kyiv, Ukraine — Complex of National Electrical Standards of Ukrainian National Metrological Institute “Ukrmetrteststandard” //CPEM 2006. Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Digest — Torino, Italy, 2006, 9–14 July. P. 182–183.