

TECHNICAL SCIENCES

Проблема визначення точності компарування амплітудних значень сили змінного струму

В. В. Ісаєв

ДП «Укрметртестстандарт»
Corresponding author. E-mail: black-w@bigmir.net

Paper received 22.01.17; Accepted for publication 29.01.17.

Анотація. У статті розглянуто проблему калібрування компараторів змінного струму за амплітудною складовою похибки – струмовою похибкою. Такі компаратори застосовуються інженерами з метрології для визначення метрологічних характеристик масштабних перетворювачів. Використання компараторів повинно гарантовано забезпечувати коректність й простежуваність результатів вимірювань до системи SI. Поданий у статті метод дозволяє задовольнити зазначені вимоги. Метод калібрування за струмовою похибкою, котрий викладений у даній статті, базується на визначенні різниці між показами компаратора й еквівалентним значенням.

Ключові слова: компаратор, відносна різниця струмів, невизначеність вимірювань, простежуваність результатів вимірювань

Вступ. У повсякденній практиці інженерів прикладної метрології часто виникає завдання визначення відносної різниці двох близьких за амплітудою та початковою фазою сил змінного струму із високою точністю.

Під час визначення поправок за амплітудою (модулем) масштабних перетворювачів сили змінного струму (далі – МП) на практиці у вимірювальних лабораторіях реалізується метод порівняння за допомогою компаратора середньоквадратичного значення сили вихідного струму досліджуваного МП із середньоквадратичним значенням сили вихідного струму МП з відомою з прийнятною невизначеністю вимірювань (далі – НВ) струмовою похибкою.

Слід зазначити, що існує практична можливість використання компаратора безпосередньо у якості еталона під час визначення метрологічних характеристик (далі – МХ) прецизійних засобів гальванічної розв'язки у широкому діапазоні сили змінного струму, зокрема, в галузі метрологічного забезпечення лічильників електричної енергії, і, в такому випадку, виникає нагальна необхідність забезпечення простежуваності результатів вимірювань (далі – ПРВ) до міжнародної системи одиниць SI.

До цього слід додати, що широко розповсюджені на теренах країн СНД компаратори, котрі вироблені у другій половині минулого століття та до теперішнього часу знаходяться в експлуатації, часто-густо не мають достатньої кількості розрядів, щоб забезпечити необхідну бажану НВ [7].

Стислий огляд публікацій за темою. Публікації, які стосуються використання компараторів під час визначення МХ трансформаторів струму, переконують, що внеском стандартної невизначеності, спричиненої використанням компаратора, у загальну стандартну НВ, як правило, нехтують [3]. Це не дивно, враховуючи точність вимірювання, якої досягають сучасні компаратори, і котра становить для серійно вироблених приладів близько 0,5 % від результату вимірювання (далі – РВ), який становить, наприклад 0,1 %. Проте, в разі, коли РВ становить 0,001 %, внесок у загальну стандартну НВ, спричинений використанням такого компаратора, становитиме вже близько

20 % [5]. Досліджуваний метод є комбінацією відомих та реалізованих методів електричних вимірювань [2; 6].

Метою статті є пропозиція методу визначення МХ компаратора та оцінювання НВ під час його калібрування, а також забезпечення ПРВ до міжнародної системи одиниць SI в разі використання цього компаратора у якості еталону, а не засобу порівняння.

Матеріали та методи. Сучасний компаратор вітчизняного виробництва побудований таким чином, що має у своїй конструкції вимірювальний ланцюг, в якому відбувається виділення вектору сили струму, що являє собою результат векторного віднімання сили струму еталонного МП від сили струму досліджуваного МП. У цій вимірювальній схемі відбувається перетворення зазначеної сили струму, а також вихідної сили струму еталонного МП у напругу під час протікання через певний електричний опір. В подальшому вимірювальна інформація перетворюється на цифрові коди за допомогою аналого-цифрового перетворювача [5], проводиться обчислення відношення модуля вектору різниці сил струму до модуля вектору вихідної сили струму еталонного МП.

Для калібрування компаратору, враховуючи вимоги щодо точності за специфікацією та особливості національної еталонної бази України, доцільно використовувати еталонні засоби вимірювальної техніки, що мають ПРВ до національних еталонів одиниці змінної напруги, опору, а також часу та частоти.

Запропонований метод дозволяє визначати відхилення показів компаратора від еквівалентного значення під час вимірювання відносної різниці модулів сили струму еталонного та досліджуваного МП (далі – відносної різниці струмів) – калібрувати за струмовою похибкою – за використання вимірювальної схеми, представленій на рисунку 1.

Розглянемо елементи вимірювальної схеми для визначення відносної різниці струмів. Для калібрування компаратора необхідне стабільне джерело сили змінного струму, що має два канали вихідного струму. З першого виходу витікає струм I_d , сила якого становить відсотки та долі відсотків від сили струму I_e , що

витікає з другого виходу цього джерела. Елементи вимірювальної схеми з'єднані таким чином, що струм, який витікає з першого виходу створює падіння напруги $V1$ на еталонному магазині опорів $R1$, а також на резисторі $R3$, котрий є невід'ємною складовою конструкції досліджуваного компаратора. Сила цього струму сприймається компаратором як різниця між вектором сили струму еталонного МП та вектором сили струму досліджуваного МП, оскільки резистор $R3$ використовується для отримання інформації

про величину різниці між двома вхідними силами струму [5]. Струм, який витікає з другого виходу джерела струму створює падіння напруги $V2$ на еталонній котушці опору $R4$, а також на резисторі $R2$, котрий використовується у конструкції досліджуваного компаратора для отримання інформації про величину вхідної сили струму від еталонного МП. Двоканальний осцилограф необхідний для визначення кута β між векторами сил струму, що протікають через еталонні опори $R1$ та $R4$.

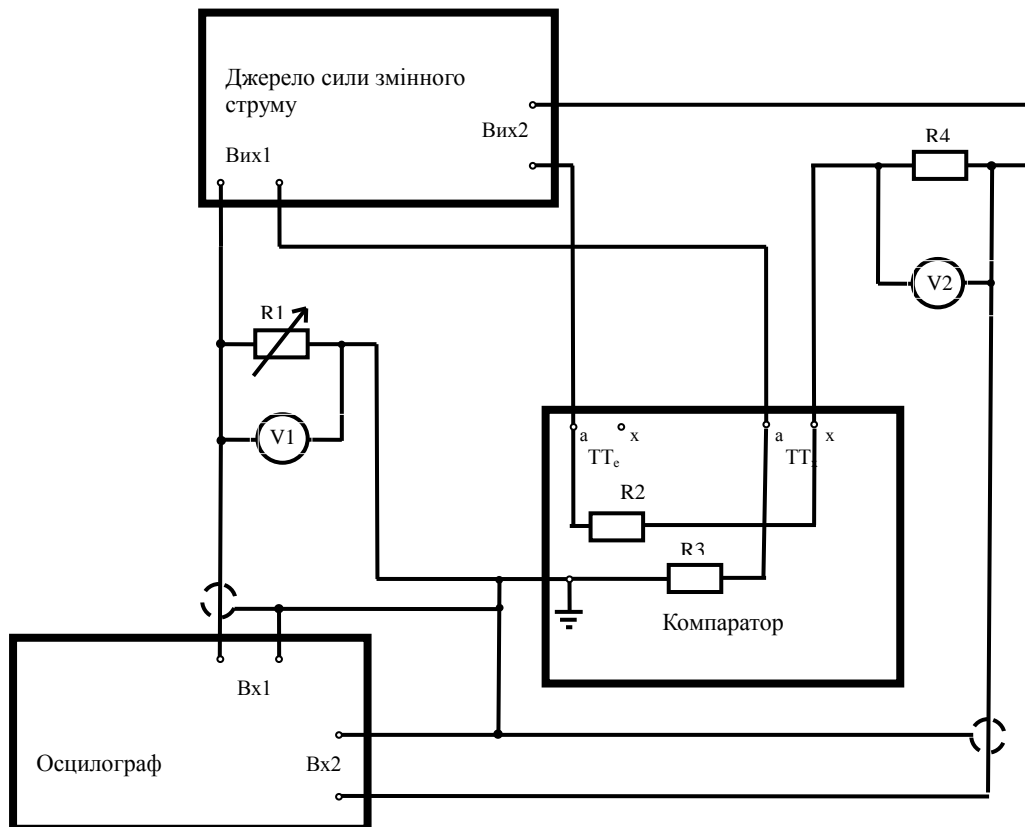


Рисунок 1. Електрична схема для калібрування компаратора за струмовою похибкою

Під час калібрування компаратора встановлюється НВ РВ, а саме результатів визначення Δf – відхилення показів компаратора f від еквівалентного (опорного) значення f_e під час вимірювання відносної різниці струмів. При використанні схеми, зображеної на рисунку 1 для калібрування компаратора пропонується враховувати наступні джерела НВ: коливання (розсіювання) показів компаратора, еталонних вольтметрів, їхні одиниці молодшого розряду показів (дискретність), НВ еталонних магазину опорів, котушки опору та вольтметрів за свідцтвом про калібрування чи специфікацією, нестабільність вихідних сигналів джерела сил змінного струму, електромагнітні завади, що унеможливають точне визначення кута зсуву фаз, розподілення сили вимірюваного струму між вхідним опором еталонного вольтметра $V1$ та еталонним опором $R1$, температурна залежність МХ елементів вимірювальної схеми.

Для складання математичного виразу, що пов'язує

опосередковано вимірювану величину f_e з вимірюваними вхідними величинами $V1$, $V2$, та інтервалом часу t між відповідними точками синусоїдальних сигналів $V1$, $V2$, необхідно згадати закон Ома та виразити кут β через t . Враховуючи зазначене, отримаємо:

$$I_{\Delta} = \frac{V1}{R1} \tag{1}$$

$$I_e = \frac{V2}{R4} \tag{2}$$

$$\beta = 100 \cdot \pi \cdot t \tag{3}$$

У загальному вигляді рівняння зв'язку між вхідними та вихідними величинами має вигляд (4). Підставляючи (1) - (3) у (4) та враховуючи поправки еталонних вольтметрів, опорів і розгалуження сили струму I_{Δ} , отримаємо рівняння зв'язку (5).

$$\Delta f = f - f_e = 100 + f - \sqrt{\frac{I_{\Delta}^2 \cdot \sin^2(\beta) + [I_e + I_{\Delta} \cdot \cos(\beta)]^2}{0,0001 \cdot I_e^2}} \tag{4}$$

$$\Delta f = 100 + f - \sqrt{K_{V1}^2 \cdot \frac{(V1 - \Delta_{V1} + \Delta_{V1}^T)^2}{(R1 - \Delta_{R1})^2} \cdot \sin^2(100 \cdot \pi \cdot t) + \left[\frac{V2 - \Delta_{V2} + \Delta_{V2}^T}{R4 - \Delta_{R4}} + K_{V1} \cdot \frac{V1 - \Delta_{V1} + \Delta_{V1}^T}{R1 - \Delta_{R1}} \cdot \cos(100 \cdot \pi \cdot t) \right]^2} \cdot 0,0001 \cdot \frac{V2 - \Delta_{V2} + \Delta_{V2}^T}{R4 - \Delta_{R4}} \quad (5)$$

У формулі (5) прийняті наступні позначення:
 K_{V1} – множник, що враховує розгалуження струму I_{Δ} ;
 Δ_{V1}, Δ_{V2} – відхилення показів еталонних вольтметрів $V1$ та $V2$ від відповідних значень національного еталону напруги змінного струму;
 $\Delta_{V1}^T, \Delta_{V2}^T$ – поправки до показів еталонних вольтметрів $V1$ та $V2$, що характеризують температурну залежність;

Δ_{R1}, Δ_{R2} – відхилення значень еталонних опорів $R1$ та $R4$ від відповідних значень національного еталону опору.

Результати та їх обговорення. Спираючись на отриману формулу (5) для оцінювання НВ складено бюджет невизначеності, котрий включає стандартні невизначеності за типом А та за типом В. Бюджет невизначеності представлений у таблиці 1.

Таблиця 1.

Вхідна величина		Стандартна невизначеність вхідної величини		Розподіл
Позначення	Оцінка	Позначення	Оцінка	
F	Середнє арифметичне \bar{f}	$S_{\bar{f}}$ (за типом А)	Середнє квадратичне відхилення середнього значення	Нормальний
		$f_{\text{омр}}$ (за типом В)	За специфікацією компаратору	Рівномірний
K_{V1}	За специфікацією еталонного вольтметра	$u_{(K_{V1})}$ (за типом В)	За специфікацією еталонного вольтметра	Рівномірний
$V1$	Середнє арифметичне $\bar{V1}$	$S_{\bar{V1}}$ (за типом А)	Середнє квадратичне відхилення середнього значення	Нормальний
		$V1_{\text{омр}}$ (за типом В)	За специфікацією еталонного вольтметра	Рівномірний
Δ_{V1}	За свідоцтвом про калібрування	$u_{(\Delta_{V1})}$ (за типом В)	За свідоцтвом про калібрування	Нормальний
Δ_{R1}	За свідоцтвом про калібрування	$u_{(R1)}$ (за типом В)	За свідоцтвом про калібрування	Нормальний
$R1$	За специфікацією магазину опору			
T	Середнє арифметичне \bar{t}	$u_{(t)}$ (за типом А)	За протоколом	Рівномірний
$V2$	Середнє арифметичне $\bar{V2}$	$S_{\bar{V2}}$ (за типом А)	Середнє квадратичне відхилення середнього значення	Нормальний
		$V2_{\text{омр}}$ (за типом В)	За специфікацією еталонного вольтметра	Рівномірний
Δ_{V2}	За свідоцтвом про калібрування	$u_{(\Delta_{V2})}$ (за типом В)	За свідоцтвом про калібрування	Нормальний
Δ_{V2}^T	За специфікацією еталонного вольтметра	$u_{(\Delta_{V2}^T)}$ (за типом В)	За специфікацією еталонного вольтметра	Рівномірний
Δ_{R4}	За свідоцтвом про калібрування	$u_{(R4)}$ (за типом В)	За свідоцтвом про калібрування	Нормальний
$R4$	За специфікацією котушки опору			
Δ_{V1}^T	За специфікацією еталонного вольтметра	$u_{(\Delta_{V1}^T)}$ (за типом В)	За специфікацією еталонного вольтметра	Рівномірний

Висновки. Метод визначення модуля вектора сили змінного струму, що являє собою різницю двох близьких за величиною векторів сили змінного струму, опис якого викладено вище, надає можливість забезпечити ПРВ за використання компаратора змінного струму в якості еталону чи пристрою порівняння під

час калібрування МП до національних еталонів одиниці змінної напруги, опору, а також часу та частоти.

Перспектива уточнення НВ під час калібрування компараторів обумовлена подальшим удосконаленням еталонної бази України [1], а також потребами економіки та технічним розвитком держави.

ЛІТЕРАТУРА

1. O. Velychko – Ukrmetrteststandard, Kyiv, Ukraine – Complex of National Electrical Standards of Ukrainian National Metrological Institute “Ukrmetrteststandard” //СРЕМ 2006. – Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Digest. – Torino, Italy. – 2006, 9-14 July. – P. 182-183.
2. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс). – Под ред. Е.Г. Шрамкова. – Москва: «Высшая школа». – 1972. – 520 с.
3. МКУ 059-29/08-2011 Метрология. Трансформаторы тока. Методика калибровки. – Киев: ГП «Укрметрестстандарт». – 2011. – 23 с.
4. Вторинний еталон одиниці коефіцієнта масштабного

- перетворення сили змінного струму. Керівництво з експлуатації. – Київ: ДП «Укрметртестстандарт». – 2007. – 12 с.
5. АМАК.411439.001 РЭ. Компаратор СА507. Руководство по эксплуатации. Часть 1. – Киев: ООО «ОЛТЕСТ». – 86 с.
6. АМАК.411439.001 РЭ. Компаратор СА507. Руководство по эксплуатации. Часть 2. Методика поверки. – Киев: ООО «ОЛТЕСТ». – 60 с.
7. 3.489.010 ТО. Устройство поверки измерительных трансформаторов К535. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 81 с.

REFERENCES

1. O. Velychko – Ukrmetrteststandard, Kyiv, Ukraine – Complex of National Electrical Standards of Ukrainian National Metrological Institute “Ukrmetrteststandard” //СРЕМ 2006. – Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Digest – Torino, Italy, 2006, 9-14 July. – P. 182-183.
2. Electrical measurements. Means and methods of measurement (general course). – Ed. E.G. Shramkova. – Moscow: "High school". – 1972. – 520 p.
3. МКУ 059-29/08-2011 Metrology. Current transformers. Methods of calibration. – Kiev: SE "Ukrmetrteststandard". – 2011. – 23 p.
4. Secondary standard of AC current's scale factor unit. Manual. – Kiev: SE "Ukrmetrteststandard". – 2007. – 12 p.
5. АМАК.411439.001 РЭ. Компаратор СА507. Manual. Part 1. – Kiev: "OLTEST" LLC. – 86 p.
6. АМАК.411439.001 РЭ. Компаратор СА507. Manual. Part 2: Methods of verification. – Kiev: "OLTEST" LLC. – 60 p.
7. 3.489.010 ТО. Device K535 for instrument transformers' calibration. Technical description and user manual. – 81 p.

The problem of defining comparison accuracy of AC current amplitude values

V. V. Isaiev

Abstract. The metrology engineers' daily tasks of determining the percentage difference between two similar in amplitude and initial phase AC currents with high accuracy are outlined in the article. The insurance of correctness and traceability of the measurement by the use of comparators during operations of calibration is discussed. The necessity of such measurements for providing the traceability of results to the SI units is also underlined. The opportunity to meet the mentioned requirements with help of the described method is determined too. The calibration method concerning the percentage AC current error as the difference between comparator's reading and equivalent value has been considered.

Keywords: *comparator, relative current difference, uncertainty of measurement, traceability of measurement results.*

Проблема определения точности компарирования амплитудных значений силы переменного тока

В. В. Исаев

Аннотация. В статье рассмотрена проблема калибровки компараторов переменного тока по амплитудной составляющей погрешности – токовой погрешности. Такие компараторы применяются инженерами по метрологии для определения метрологических характеристик масштабных преобразователей. Использование компараторов должно гарантировано обеспечивать корректность и прослеживаемость результатов измерений к системе СИ. Представленный в статье метод позволяет удовлетворить указанные требования. Метод калибровки по токовой погрешности, который изложен в данной статье, базируется на определении разности между показаниями компаратора и эквивалентным значением.

Ключевые слова: *компаратор, относительная разность токов, неопределенность измерений, прослеживаемость результатов измерений.*