

# Прикладні аспекти: електричні вимірювання

УДК 17.220.20

О.М. Величко<sup>1</sup>, С.М. Шевкун<sup>1</sup>, М.В. Добролюбова<sup>2</sup>, Ю.М. Ізбаш<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ДП «Укрметртестстандарт», Київ

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «КПІ», Київ

## ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ФАЗОМЕТРІВ НА ДЕРЖАВНОМУ ЕТАЛОНІ КУТА ЗСУВУ ФАЗ МІЖ ДВОМА НАПРУГАМИ В ОСНОВНОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

*Представлені матеріали щодо оцінки невизначеності при калібруванні фазометрів на Державному еталоні кута зсуву фаз між двома напругами в основному діапазоні частот.*

**Ключові слова:** еталон, кут зсуву фаз, оцінка невизначеності.

### Постановка проблеми

Одним із найважливіших завдань для усіх галузей науки і техніки, що пов'язані із застосуванням вимірювань електричних величин, є вимірювання кута зсуву фаз між двома напругами у широкому діапазоні частот.

Висока точність та простежуваність фазових вимірювань потребується в галузі вимірювання часу і частоти, радіолокації, синхронізації електронних пристроїв, верстатобудуванні, приладобудуванні та трансформаторобудуванні, при відтворенні розмірів одиниць опору на змінному струмі, ємності та індуктивності, при створенні мостів змінного струму тощо.

На підприємствах України експлуатується значна кількість еталонних і робочих засобів вимірювальної техніки кута зсуву фаз, а саме: калібратори фазових зсувів Ф1-4 (від 5 Гц до 10 МГц), Ф 5224 (від  $10^{-3}$  Гц до  $2 \times 10^6$  Гц), Ф 5125 (від 20 Гц до  $10^3$  Гц), цифрові фазометри Ф2-4 (від 20 Гц до  $10^7$  Гц), вимірювачі різниці фаз ФК2-12 (від 0,1 Гц до  $10^9$  Гц), Ф2-34 (від  $10^{-3}$  Гц до  $10^7$  Гц), фазометри Ф5131 (від  $10^{-3}$  Гц до  $2 \times 10^5$  Гц), вимірювачі різниці фаз та відношення рівнів ФК2-33, вимірювачі коефіцієнта потужності (фазометри) Д5000, Д5043, Ц302-М1 тощо. Більшість засобів вимірювальної техніки, які знаходяться в експлуатації, перекривають діапазон частот від 0,01 до 10 МГц.

Для метрологічного забезпечення повного спектру зазначених завдань в ДП «Укрметртестстандарт» створено Державний первинний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами [1].

Для міжнародного визнання результатів калібрування необхідне документальне засвідчення про-

стежуваності вимірювань до міжнародних еталонів одиниць фізичних величин та розрахунок невизначеності, який охоплює усі фактори, що впливають на точність результату вимірювань [2].

Метою статті є оцінка невизначеності при калібруванні фазометрів на Державному еталоні кута зсуву фаз між двома напругами.

### Основний зміст досліджень

Державний первинний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами складається з комплексу засобів вимірювальної техніки (рис. 1):



Рис. 1. Державний первинний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами

- вимірювач-перетворювач кута зсуву фаз 6000A (CLARKE-HESS);
- стандарт фази 5500-2 (CLARKE-HESS);
- калібрувальні мости 5002 (CLARKE-HESS) (4 од.);
- осцилограф універсальний цифровий TDS 2024 (Tektronix);

- функціональні генератори НМ 8131-2 (Nameg) (2 од.);
- синтезатор частоти НМ 8134-2 (Nameg);
- частотомір Agilent 53132A;
- персональний комп'ютер;
- допоміжне устаткування.

Метрологічними характеристики державного еталона є:

□ діапазон значень кута зсуву фаз, у якому відтворюється, зберігається та передається одиниця вимірювань, становить від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ .

□ діапазон частот, у якому відтворюється одиниця кута зсуву фаз: основний – від 1 Гц до 200 кГц; розширений – від 0,01 Гц до 10 МГц.

□ невизначеність вимірювання в основному діапазоні:

$$\begin{aligned} u_A &= 0,001^\circ, \\ u_B &= 0,002^\circ, \\ u_C &= 0,0022^\circ; \end{aligned}$$

розширена невизначеність  $U$  відтворення одиниці кута зсуву фаз між двома напругами з коефіцієнтом  $k = 2$  та довірчою ймовірністю  $p = 0,95$  становить  $0,0044^\circ$ .

□ невизначеність вимірювання в розширеному діапазоні частот від 0,01 Гц до 10 МГц:

$$\begin{aligned} u_A &= (0,001- 0,01)^\circ, \\ u_B &= (0,002- 0,038)^\circ, \\ u_C &= (0,0022- 0,039)^\circ, \end{aligned}$$

розширена невизначеність  $U$  відтворення одиниці кута зсуву фаз між двома напругами з коефіцієнтом  $k = 2$  та довірчою ймовірністю  $p = 0,95$  становить від  $0,0044^\circ$  до  $0,078^\circ$ .

□ нестабільність еталона за рік становить:

$$\begin{aligned} &5 \cdot 10^{-3}^\circ - \text{в основному діапазоні;} \\ &\text{від } 5 \cdot 10^{-3}^\circ \text{ до } 7 \cdot 10^{-3}^\circ \text{ в розширеному діапазоні частот від 0,01 Гц до 10 МГц.} \end{aligned}$$

Для калібрування фазометрів в основному діапазоні використовується схема, зображена на рис. 2.

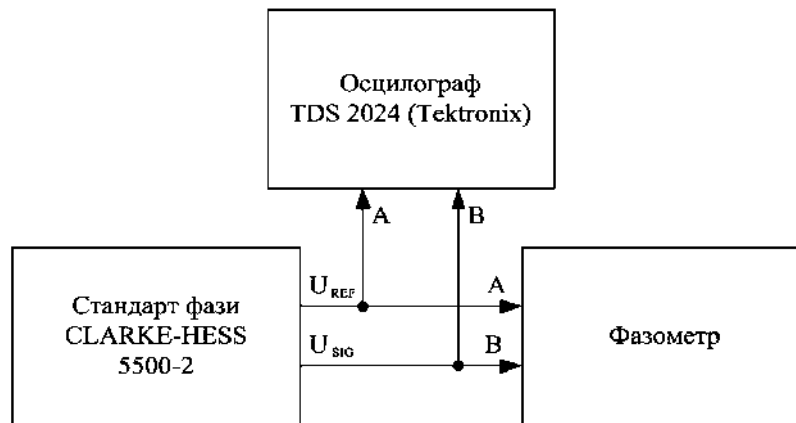


Рис. 2. Схема вимірювань при калібруванні фазометра

Виходячи зі схеми калібрування модель вимірювання (відхилення вимірюваної величини від номінального значення) в абсолютній формі має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_X &= \varphi_{X_i} - \varphi_S + \delta\varphi_{dX} + \delta\varphi_{tS} + \delta\varphi_V + \delta\varphi_f - \\ &\quad - \delta\varphi_1 - \delta\varphi_{TX} - \delta\varphi_{TS} - \delta\varphi_\gamma, \end{aligned}$$

де  $\Delta\varphi_X$  – відхилення вимірюваної величини від номінального значення;

$\varphi_{X_i}$  – показ кута зсуву фаз фазометра, що калібрується;

$\varphi_S$  – значення кута зсуву фази, що відтворюється еталонним стандартом фази CLARKE–HESS 5500–2 (з врахуванням поправки, яка вказана у сертифікаті калібрування для даної точки діапазону);

$\delta\varphi_{dX}$  – поправка, що обумовлена дискретністю шкали фазометра, який калібрується;

$\delta\varphi_{tS}$  – поправка, що обумовлена короткочасовою стабільністю еталонного стандарту фази;

$\delta\varphi_V$  – поправка, що обумовлена відхиленням напруги в мережі;

$\delta\varphi_f$  – поправка, що обумовлена відхиленням частоти сигналу еталонного стандарту фази;

$\delta\varphi_1$  – поправка, що обумовлена різницею довжин (та інших характеристик) кабелів, якими подається сигнал (методику визначення характеристик кабелів наведено в [3]);

$\delta\varphi_{TX}$  – поправка, що обумовлена температурною залежністю фазометра, який калібрується;

$\delta\varphi_{TS}$  – поправка, що обумовлена температурною залежністю еталонного стандарту фази;

$\delta\varphi_\gamma$  – поправка, що обумовлена дрейфом характеристик еталонного стандарту фази з моменту останнього калібрування.

Для забезпечення простежуваності Державного первинного еталону одиниці кута зсуву фаз між двома напругами в червні 2013 року було здійснено калібрування еталонного стандарту фази CLARKE–HESS 5500–2 та отримано відповідний сертифікат в Фізико-технічній федеральній службі (РТВ), м. Брауншвейг, Німеччина.

Приклад розрахунку бюджету невизначеності при калібруванні фазометру наведено в табл. 1 [4].

Таблиця 1

## Бюджет невизначеності

Quantity $X_i$	Estimate $x_i$ in degrees	Standard uncertainty $u_r(x_i)$ , in degrees	Probability distribution	Method of evaluation (A, B)	Sensitivity coefficient $c_i$	Uncertainty contribution $c_i \cdot u_r(x_i)$ , in degrees
$\varphi_{X_i}$	120,0013	1,61E-04	normal	A	1	1,61E-04
$\varphi_S$	120,001	2,50E-03	normal	B	1	2,50E-03
$\delta\varphi_{dX}$	0	5,00E-04	rectang.	B	2	1,00E-03
$\delta\varphi_{tS}$	0	5,00E-03	rectang.	B	1	5,00E-03
$\delta\varphi_V$	0	8,50E-06	rectang.	B	1	8,50E-06
$\delta\varphi_f$	0	5,00E-04	rectang.	B	1	5,00E-04
$\delta\varphi_I$	0	5,00E-04	rectang.	B	2	1,00E-03
$\delta\varphi_{TX}$	0	1,50E-06	rectang.	B	1	1,50E-06
$\delta\varphi_{TS}$	0	1,50E-06	rectang.	B	1	1,50E-06
$\delta\varphi_\gamma$	0,0001	5,00E-04	rectang.	B	1	5,00E-04
$\Delta\varphi_X$	0,0002					
Combined standard uncertainty						5,8117E-03
Effective degrees of freedom					$n_{\text{eff}}$	>200, $k=2$
Expanded uncertainty ( $p \approx 95\%$ )						1,16234E-02

**Висновки**

За результатами проведених досліджень проведено оцінку невизначеності при калібруванні фазометрів на Державному еталоні кута зсуву фаз між двома напругами. Отримані числові значення, що дозволяють оформити смс-рядки для реєстрації чинним порядком на сайті Міжнародного бюро мір і вагів (BIPM), Франція, а також залучати еталон до міжнародних звірень.

Отримані простежуваність та точність вимірювань дозволяють в повній мірі організувати метрологічне забезпечення вимірювань кута зсуву фаз в усіх галузях науки і техніки в державі.

**Список літератури**

1. МА 081/11.303-2011 Метрологія. Державний первинний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами. Методика атестації.

2. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Національний стандарт України. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.

3. Визначення похибок та оцінка невизначеності для Державного первинного еталона України одиниці кута зсуву фаз між двома напругами / С.М. Шевкун, О.М. Величко, С.Р. Карпенко, М.В. Добролюбова // Системи обробки інформації. – X. : ХВПС, 2012. – № 1 (99). – С. 139 – 143.

4. ДСТУ Н РМГ 43-2001 Рекомендації по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» (Рекомендации з міждержавної стандартизації. ДСВ. Застосування «Керівництва з вираження невизначеності вимірювань»).

Надійшла до редколегії 25.12.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

**ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ФАЗОМЕТРОВ НА ГОСУДАРСТВЕННОМ ЭТАЛОНЕ УГЛА СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ ДВУМЯ НАПРЯЖЕНИЯМИ В ОСНОВНОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

О.Н. Величко, С.Н. Шевкун, М.В. Добролюбова, Ю.Н. Избаш

Представлены материалы по оценке неопределенности при калибровке фазометров на Государственном эталоне угла сдвига фаз между двумя напряжениями в основном диапазоне частот.

**Ключевые слова:** эталон, угол сдвига фаз, оценка неопределенности.

**THE UNCERTAINTY ESTIMATE IN THE CALIBRATION OF PHASE METERS WITH USING THE STATE PHASE ANGLE BETWEEN TWO VOLTAGE STANDARD**

O.M. Velychko, S.M. Shevkun, M.V. Dobroliubova, Yu.M. Izbash

Materials for the uncertainty estimate in the calibration of phase meters with using the State primary phase angle between two voltage standard are presented.

**Keywords:** standard, phase angle, the uncertainty estimate.