

УДК 17.220.20

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-3804172017100051>

Величко О. М.¹, директор НВІ Вимірювань електромагнітних величин та оцінки відповідності засобів виміральної техніки,
Шевкун С. М.², начальник науково-дослідного відділу державних еталонів електромагнітних величин, часу і частоти,
Куліш Ю. М.³, молодший науковий співробітник,
Добролюбова М. В.⁴, доцент, к. т. н.

ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ФАЗИ НА ДЕРЖАВНОМУ ПЕРВИННОМУ ЕТАЛОНІ КУТА ЗСУВУ ФАЗ МІЖ ДВОМА НАПРУГАМИ В ОСНОВНОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

En Materials on uncertainty estimation in the phase generators calibration at the State primary standard of phase angle between two voltages unit in the main frequency range are presented. One of the most important tasks for all branches of science and technology is the achievement of high metrological characteristics provided by the transformation of electrical processes and quantities into a phase angle of harmonic signals over main frequency range.

The availability of measuring equipment for the phase angle between two voltages in Ukrainian enterprises, that require traceability to the State primary standard of phase angle between two voltages unit, is analyzed. The State Primary Standard of phase angle between two voltages unit is created on the basis of the obtained data analysis in SE "Ukrmetrteststandart. The composition of the State primary standard and its main metrological characteristics are given. It is shown that the phase generators calibration in the main frequency range is performed ac-

¹ Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів (ДП «Укрметртестстандарт»)»

² Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів (ДП «Укрметртестстандарт»)»

³ Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів (ДП «Укрметртестстандарт»)»

⁴ НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації експериментальних досліджень

according to the provided scheme. Experimental studies of the phase angle between two voltages in the main frequency range of the standard phase, which is part of the State Primary Standard, are carried out. Experimental data calculated from the above equation estimating uncertainty are obtained. The uncertainty budget formed in the uncertainty estimation, for example, the calibration of the standard phase is presented. The obtained numerical values of the characteristics of the standard phase allowed the publication of the CMC-lines in the current order on the website of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), France, and confirm them during the check, and also involve the State Primary Standard in international comparisons.

The resulting traceability and accuracy of measurements make it possible to fully organize the traceability and reliability of measurements of the phase angle in all areas of science and technology in the country with the necessary accuracy.

Ru Предоставлены материалы по оценке неопределенности при калибровке генераторов фазы на Государственном первичном эталоне угла сдвига фаз между двумя напряжениями в основном диапазоне частот.

Вступ

Одним із найважливіших завдань для усіх галузей науки і техніки є досягнення високих метрологічних характеристик, що забезпечуються перетвореннями електричних процесів та величин у фазовий зсув гармонічних сигналів у широкому діапазоні частот.

Висока точність та простежуваність фазових вимірювань вимагаються у галузі вимірювання часу і частоти, синхронізації електронних пристроїв, радіолокації та радіонавігації, авіаційній та космічній техніці, геодезії, машинобудуванні, приладобудуванні, зв'язку, неруйнівному контролі, під час відтворення розмірів одиниць опору на змінному струмі, ємності та індуктивності, під час створення мостів змінного струму тощо [1].

На підприємствах України експлуатується значна кількість засобів вимірювальної техніки кута зсуву фаз, що потребують простежуваності до Державного первинного еталону одиниці кута зсуву фаз між двома напругами, а саме: калібратори фазових зсувів Ф1-4 (від 5 Гц до 10 МГц), Ф 5224 (від 10^{-3} Гц до 2×10^6 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 ГГц до 10^9 Гц), Ф2-34 (від 10^{-3} Гц до 10^7 Гц), фазометри Ф5131 (від 10^{-3} Гц до 2×10^5 Гц), вимірювачі різниці фаз та відношення рівнів ФК2-33 тощо. Більшість засобів вимірювальної техніки, які знаходяться у експлуатації, перебивають діапазон частот від 0,01 Гц до 10 МГц.

Для метрологічного забезпечення повного спектру зазначених завдань у ДП «Укрметртестстандарт» створено Державний первинний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами (далі – Державний еталон) [2].

Для міжнародного визнання результатів калібрування необхідне документальне засвідчення простежуваності вимірювань до міжнародних

еталонів одиниць фізичних величин та розрахунків невизначеності, який охоплює усі фактори, що впливають на точність результату вимірювань [3].

Постановка проблеми

Метою статті є оцінка невизначеності під час калібрування генераторів фази на Державному еталоні.

Основний зміст досліджень

Для оцінки невизначеності вимірювання генератора фази проводять вимірювання методом прямих вимірювань за допомогою частини комплексу обладнання, що входить до складу Державного первинного еталона на основному діапазоні частот.

Державний первинний еталон складається з комплексу засобів вимірювальної техніки, що створюють дві групи відтворення, збереження та передачі одиниці кута зсуву фаз в основному діапазоні частот (від 5 Гц до 100 кГц) та розширеному діапазоні частот (від 0,01 Гц до 10 МГц) [4] (рис. 1):

- 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 HM 8131-2 (*Hameg*) (2 од.);
- синтезатор частоти HM 8134-2 (*Hameg*);
- частотомір Agilent 53132A;
- персональний комп'ютер;
- допоміжне устаткування.

Метрологічними характеристиками державного первинного еталона є:

- діапазон значень кута зсуву фаз, у якому відтворюється, зберігається та передається одиниця вимірювань, становить від 0° до 360° ;
- діапазон частот, у якому відтворюється одиниця кута зсуву фаз: основний – від 1 Гц до 200 кГц; розширений – від 0,01 Гц до 10 МГц;
- стандартна невизначеність вимірювання в основному діапазоні:
 $u_A = 0,001^\circ$, $u_B = 0,002^\circ$, $u_C = 0,0022^\circ$;
- розширена невизначеність U відтворення одиниці кута зсуву фаз між двома напругами з коефіцієнтом $k = 2$ та довірчою ймовірністю $p = 0,95$ становить $0,0044^\circ$;

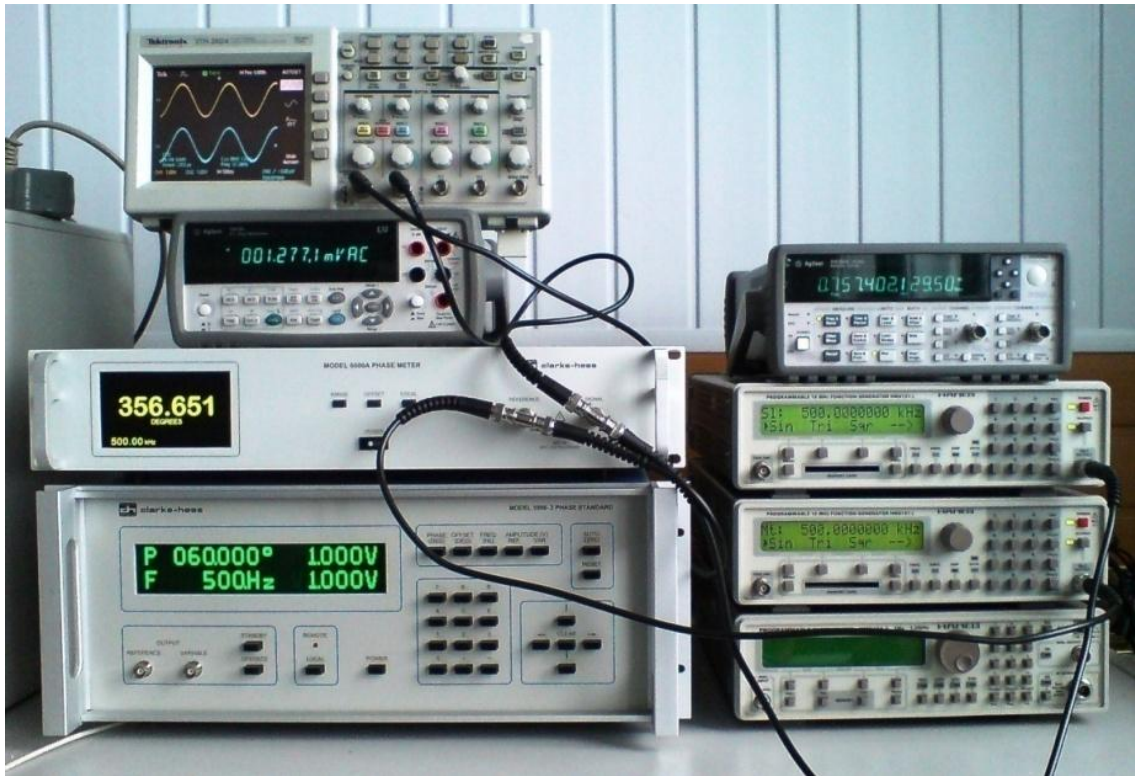


Рис. 1. Державний первинний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами

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

$$u_A = (0,001 - 0,01)^\circ,$$

$$u_B = (0,002 - 0,038)^\circ,$$

$$u_C = (0,0022 - 0,039)^\circ;$$
- розширена невизначеність U відтворення одиниці кута зсуву фаз між двома напругами із коефіцієнтом $k=2$ та довірчою ймовірністю $p=0,95$ становить від $0,0044^\circ$ до $0,078^\circ$;
- нестабільність еталона за рік становить:

$$5 \cdot 10^{-5}^\circ$$
 – в основному діапазоні;

$$\text{від } 5 \cdot 10^{-3}^\circ \text{ до } 7 \cdot 10^{-3}^\circ$$
 у розширеному діапазоні частот від 0,01 Гц до 10 МГц.

Для калібрування генератора фази в основному діапазоні частот використовується схема, зображена на рис. 2.

Вимірювання виконуються за значення напруги 1 В для двох досліджуваних сигналів.

Відповідно до методики калібрування генератора фази [5, 6] між двома напругами маємо:

$$\Delta\varphi_X = \varphi_X - \varphi_S + \Delta\varphi_{dX} + \Delta\varphi_{dS} + \Delta\varphi_V + \Delta\varphi_f + \Delta\varphi_L + \Delta\varphi_{TS} + \Delta\varphi_{Tx} + \Delta\varphi_\gamma, \quad (1)$$

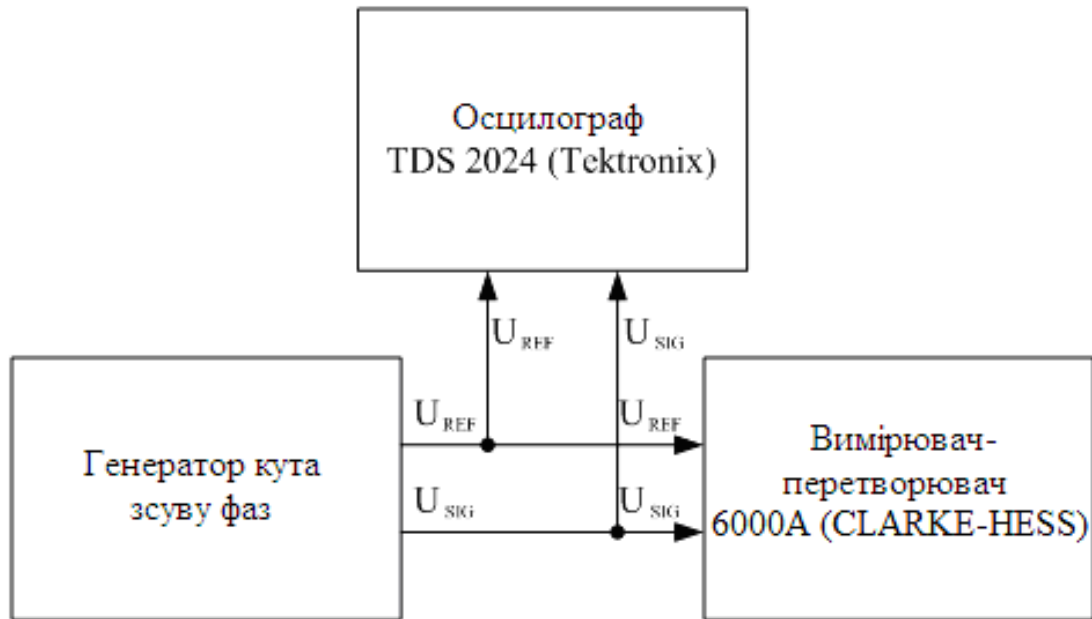


Рис. 2. Схема вимірювань при калібруванні генератора фази

де $\Delta\varphi_X$ – відхилення величини кута зсуву фаз, що відтворюється генератором кута зсуву фаз, від номінального значення;

φ_X – покази кута зсуву фаз калібруючого генератора фази;

φ_S – значення кута зсуву фаз, що виміряний еталонним вимірювачем-перетворювачем кута зсуву фаз 6000A (CLARKE-HESS) (із урахуванням поправки, що вказана у сертифікаті калібрування для даної точки діапазону);

$\Delta\varphi_{dX}$ – поправка, обумовлена дискретністю шкали вимірювача-перетворювача;

$\Delta\varphi_{dS}$ – поправка, обумовлена дискретністю шкали генератора фази, що калібрується;

$\Delta\varphi_V$ – поправка, обумовлена відхиленням напруги у мережі електроживлення;

$\Delta\varphi_f$ – поправка, обумовлена відхиленням частоти досліджуваного сигналу;

$\Delta\varphi_L$ – поправка, обумовлена різницею довжин (та інших характеристик) кабелів, за допомогою яких подається сигнал (методику визначення характеристик кабелів наведено у [7]);

$\Delta\varphi_{TS}$ – поправка, обумовлена температурною залежністю генератора фази, що калібрується;

$\Delta\varphi_{TX}$ – поправка, обумовлена температурною залежністю еталонного вимірювача-перетворювача кута зсуву фаз 6000A (CLARKE-HESS);

Розділ 1. Інформаційні системи

$\Delta\varphi_\gamma$ – поправка, обумовлена дрейфом характеристик еталонного вимірювача-перетворювача кута зсуву фаз 6000A (*CLARKE-HESS*) із моменту останнього калібрування.

Під час розрахунку сумарної стандартної невизначеності враховуються складові типу *A* і *B* у вигляді абсолютних стандартних невизначеностей (відповідно рівняння вимірювання (1)).

Бюджет невизначеності вимірювання під час проведення калібрування генератора фази представлений у загальному вигляді у табл. 1.

Для забезпечення простежуваності Державного первинного еталону одиниці кута зсуву фаз між двома напругами було здійснено калібрування еталонного стандарту фази *CLARKE-HESS* 5500–2 та отримано відповідний сертифікат у Фізико-технічній федеральній службі (*PTB*), м. Брауншвейг, Німеччина, а також підтверджені калібрувальні та вимірювальні можливості під час аудиту *KOOMET* 22 березня 2016 року, які опубліковані у Базі даних ключових звірень (*KCDB*) *VIPM* (рядки № 36, 38 *СМС*-таблиці).

Таблиця 1.

Бюджет невизначеності вимірювання
під час калібрування генератора фази

Величина X_i	Оцінка x_i , град	Стандартна невизначеність $u(x_i)$, град	Закон розподілу	Метод оцінки (<i>A, B</i>)	Коефіцієнт чутливості c_i	Внесок у невизначеність $u_i(y)$, град
φ_X	φ_{xi}	$u(\varphi_{xi})$	нормальний	<i>A</i>	1	$u_A(\varphi_{xi})$
$\Delta\varphi_{dX}$	0	$u(\Delta\varphi_{dX})$	прямокутний	<i>B</i>	1	$u_{B2}(\Delta\varphi_{dX})$
$\Delta\varphi_{dS}$	0	$u(\Delta\varphi_{dS})$	прямокутний	<i>B</i>	1	$u_{B3}(\Delta\varphi_{dS})$
φ_S	φ_s	$u(\varphi_X)$	нормальний	<i>B</i>	1	$u_{B1}(\varphi_X)$
$\Delta\varphi_V$	0	$u(\Delta\varphi_V)$	нормальний	<i>B</i>	1	$u_{B4}(\Delta\varphi_V)$
$\Delta\varphi_f$	0	$u(\Delta\varphi_f)$	прямокутний	<i>B</i>	1	$u_{B5}(\Delta\varphi_f)$
$\Delta\varphi_L$	φ_L	$u(\Delta\varphi_L)$	прямокутний	<i>B</i>	1	$u_{B6}(\Delta\varphi_L)$
$\Delta\varphi_{TS}$	0	$u(\Delta\varphi_{TS})$	прямокутний	<i>B</i>	1	$u_{B7}(\Delta\varphi_{TS})$
$\Delta\varphi_{TX}$	0	$u(\Delta\varphi_{TX})$	прямокутний	<i>B</i>	1	$u_{B8}(\Delta\varphi_{TX})$
$\Delta\varphi_\gamma$	0	$u(\Delta\varphi_\gamma)$	прямокутний	<i>B</i>	1	$u_{B9}(\Delta\varphi_\gamma)$

Величина X_i	Оцінка x_i , град	Стандартна невизначеність $u(x_i)$, град	Закон розподілу	Метод оцінки (A, B)	Коефіцієнт чутливості c_i	Внесок у невизначеність $u_i(y)$, град
$\Delta\varphi_X$	$\Delta\varphi_X$					$u_c(\Delta\varphi_X)$

Приклад розрахунку бюджету невизначеності під час калібрування стандарту фази 5500-2 CLARKE-HESS на еталонному фазометрі 6000A CLARKE-HESS наведено у табл. 2 [8].

Таблиця 2.

Бюджет невизначеності під час калібрування стандарту фази 5500-2 CLARKE-HESS

Quantity X_i	Estimate x_i , in degrees	Standard uncertainty $u(x_i)$, in degrees	Probability distribution	Method of evaluation (A, B)	Sensitivity coefficient c_i	Uncertainty contribution $c_i \cdot u(x_i)$, in degrees
φ_{X_i}	120,000	1,58E-03	normal	A	1	1,58E-03
φ_S	119,9989	1,37E-02	normal	B	1	1,37E-02
$\Delta\varphi_{dX}$	0	2,89E-04	rectang.	B	1	2,89E-04
$\Delta\varphi_{dS}$	0	5,00E-04	rectang.	B	1	5,00E-04
$\Delta\varphi_V$	0	8,50E-06	normal	B	1	8,50E-06
$\Delta\varphi_f$	0	5,00E-04	rectang.	B	1	5,00E-04
$\Delta\varphi_L$	0	5,00E-04	rectang.	B	1	5,00E-04
$\Delta\varphi_{TS}$	0	1,50E-06	rectang.	B	1	1,50E-06
$\Delta\varphi_{TX}$	0	1,50E-06	rectang.	B	1	1,50E-06
$\Delta\varphi_\gamma$	0,0002	5,00E-04	rectang.	B	1	5,00E-04
$\Delta\varphi_X$	0,00090000					
		Combined standard uncertainty				1,38E-02
		Effective degrees of freedom			n_{eff}	>200, $k = 2$
		Expanded uncertainty ($p \approx 95\%$)				2,76E-02

Висновки

За результатами проведених досліджень виконано оцінку невизначеності при калібруванні генераторів фази на Державному первинному ета-

лоні кута зсуву фаз між двома напругами. Отримані числові значення характеристик еталонного стандарту фази дозволили опублікувати СМС-рядки чинним порядком на сайті Міжнародного бюро мір і вагів (BIPM, Франція) та підтвердити їх під час аудиту, а також залучати еталон до міжнародних звірень.

Отримані простежуваність та точність вимірювань дозволяють у повній мірі організувати простежуваність і достовірність вимірювань кута зсуву фаз в усіх галузях науки і техніки у державі із необхідною точністю.

Список використаної літератури

1. Куц Ю. В. Статистична фазометрія / Ю. В. Куц, Л. М. Щербак. – Тернопіль: Тернопільський держ. техн. ун-т., 2009. – 384 с.
2. МА 081/11.303-2011 Метрологія. Держаний первинний еталон одиниць кута зсуву фаз між двома напругами. Методика атестації.
3. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Національний стандарт України. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.
4. Паспорт на еталон.
5. МКУ 121-11/09-2015 Інструкція. Метрологія. Генератори кута зсуву фаз. Методика калібрування.
6. Шевкун С. М. 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. – 2012. - № 1 (99). – С. 139 – 143.
7. ДСТУ Н РМГ 43-2001 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» (Рекомендації з міждержавної стандартизації. ДСВ. Застосування «Керівництва з вираження невизначеності вимірювань»).
8. Величко О. М. Оцінка невизначеності при калібруванні фазометрів на державному еталоні кута зсуву фаз між двома напругами в основному діапазоні частот // О. М. Величко, С. М. Шевкун, М. В. Добролюбова, Ю. М. Избаш / Системи обробки інформації. – 2015. - № 2 (127). – С. 86-88.