

УДК 17.220.20

С.М. Шевкун¹, О.М. Величко¹, С.Р. Карпенко¹, М.В. Добролюбова²

¹ДП «Укрметртестстандарт», Київ, Україна

²Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБОК ТА ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ДЛЯ ДЕРЖАВНОГО ПЕРВИННОГО ЕТАЛОНА УКРАЇНИ ОДИНИЦІ КУТА ЗСУВУ ФАЗ МІЖ ДВОМА НАПРУГАМИ

Представлені матеріали щодо визначення похибок та оцінки невизначеності на основі зазначених похибок для Державного первинного еталона України одиниці кута зсуву фаз між двома напругами.

Ключові слова: еталон, кут зсуву фаз, оцінка невизначеності, похибки первинних еталонів.

Постановка проблеми

Вимірювання кута зсуву фаз (КЗФ) у широкому діапазоні частот є одним із найважливіших завдань для усіх галузей науки і техніки, що пов'язані із застосуванням вимірювань електричних величин: радіо та телебачення, енергетики, електроніки, транспорту, зв'язку, оборони та наукових досліджень.

Фазові вимірювання широко застосовуються в галузі вимірювання часу і частоти, трансформаторобудуванні, верстатобудуванні та приладобудуванні, при відтворенні розмірів одиниць опору на змінному струмі, ємності та індуктивності, при створенні мостів змінного струму, тощо.

Державний первинний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами (далі – еталон) створено в ДП «Укрметртестстандарт» в період з 1999 по 2011 роки. Підставою для створення еталона є Державна програма розвитку еталонної бази України, затверджена постановою Кабінету Міністрів України.

Основними метрологічними характеристиками еталонів є номінальне значення одиниці, що відтворюється, характеристики похибки та невизначеності.

До теперішнього часу у багатьох галузях науки і техніки для вирішення практичних метрологічних завдань широко застосовувалась теорія похибок.

Проте, сучасна нормативна база України з питань метрологічного забезпечення передбачає вико-

ристання разом з характеристиками похибок оцінку невизначеності.

Тому, маючи за підставу сучасний підхід до аналізу метрологічних характеристик, автори поставили **метою досліджень** визначити не тільки похибки еталону, але і оцінити невизначеності для його апаратної складової.

Основний зміст досліджень

1. Стан розвитку засобів вимірювальної техніки кута зсуву фаз

На підприємствах України експлуатується значна кількість еталонних і робочих засобів вимірювальної техніки кута зсуву фаз, а саме: калібратори фазових зсувів Ф1-4, Ф 5125, цифрові фазометри Ф2-4, вимірювачі різниці фаз ФК2-12, Ф2-34, фазометри Ф5131, 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.

Еталон розроблено для метрологічного забезпечення зазначеного вище парку засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) кута зсуву фаз.

В національних метрологічних інститутах провідних країн світу використовуються первинні еталони, метрологічні характеристики яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Еталони інших країн та їх метрологічні характеристики

| Назва НМІ, країна | Частотний діапазон | Розширена стандартна невизначеність | Артефакт* |
|-------------------|--------------------|-------------------------------------|-----------|
| РТВ, Німеччина | 10 Гц – 1 кГц | 0,001 ° | В |
| NIST, США | 2 Гц – 5 кГц | 0,17 мрад | М |
| | 2 Гц – 5 кГц | 0,17 мрад | В |
| | 5 – 50 кГц | 0,7 мрад | М |
| | 5 – 50 кГц | 0,7 мрад | В |

| Назва НМІ, країна | Частотний діапазон | Розширена стандартна невизначеність | Артефакт* |
|-------------------|--------------------|---|-----------|
| LNE, Франція | 1 – 20 кГц | $5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ рад | М |
| | 20 Гц – 20 кГц | $2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ рад | М |
| | 20 Гц – 1 кГц | $2 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$ рад | М |
| | 1 – 20 кГц | $5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ рад | В |
| | 20 Гц – 20 кГц | $2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ рад | В |
| | 20 Гц – 1 кГц | $2 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$ рад | В |
| СМІ, Чехія | 1 Гц – 100 кГц | $0,01^\circ - 0,15^\circ$ | В |
| | 0,1 – 10 МГц | $0,05^\circ - 0,5^\circ$ | В |
| МІКЕС, Фінляндія | 45 – 60 Гц | 2 мрад | В |
| SCL, Китай | 40 Гц – 1 кГц | $0,02^\circ$ | В |
| | 1 – 6,25 кГц | $0,04^\circ$ | В |
| | 6,25 – 50 кГц | $0,06^\circ$ | В |
| | 50 – 100 кГц | $0,10^\circ$ | В |
| CENAM, Мексика | 60 Гц | $0,001^\circ$ | В |

*В – вимірювач кута зсуву фаз, М – міра кута зсуву фаз

2. Державний первинний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами

2.1 Опис еталона

Еталон складається з комплексу засобів вимірювальної техніки [1]:

- вимірювач-перетворювач кута зсуву фаз 6000А (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 53132А.

Зовнішній вигляд еталона представлено на рис. 1.

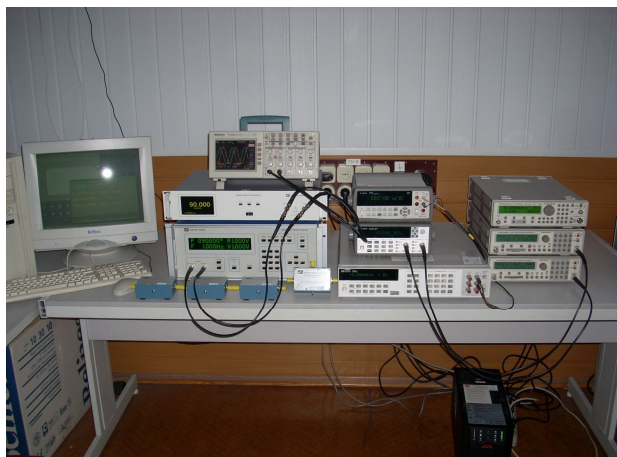


Рис. 1. Державний первинний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами

Принцип дії еталона полягає у наступному.

Для відтворення одиниці КЗФ необхідно два прецизійні синусоїдальні сигнали $U_1(t)$ і $U_2(t)$ з заданою амплітудою напруг:

$$\begin{cases} U_1(t) = U_{m1} \sin(\omega t + \psi_{u1}) \\ U_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \psi_{u2}) \end{cases}, \quad (1)$$

де U_{m1}, U_{m2} – амплітуди коливань; ψ_{u1}, ψ_{u2} – початкові фази; ω – кутова частота.

Кут зсуву фаз між двома напругами $U_1(t)$ і $U_2(t)$ обчислюється за формулою (2):

$$\varphi = \psi_{u1} - \psi_{u2} = \frac{\Delta t}{T} 2\pi(\text{rad}) = \frac{\Delta t}{T} 360^\circ, \quad (2)$$

де T – період коливання; Δt – часовий інтервал.

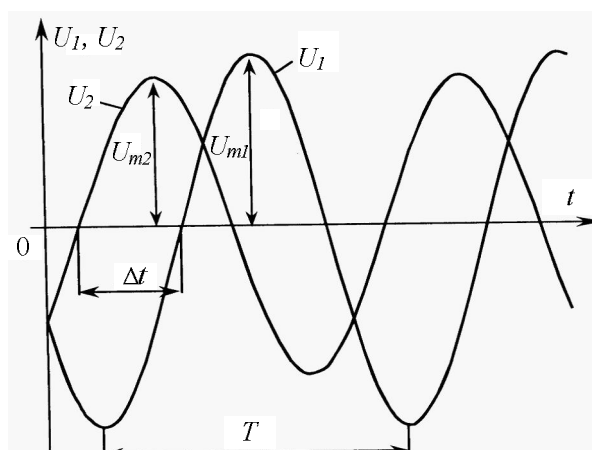


Рис. 2. Визначення кута зсуву фаз між двома напругами

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, становить від 0,01 Гц до 10 МГц.

2.2 Визначення метрологічних характеристик

Обробку результатів вимірювань здійснено у відповідності до чинних нормативних документів [2, 3], якими передбачено визначення метрологічних характеристик первинних еталонів.

Складові похибки еталону характеризуються:

- невилученою систематичною похибкою (НСП);
- випадковою похибкою;
- нестабільністю;
- похибкою передавання розміру одиниці фізичної величини від еталону до робочих еталонів.

Джерелами НСП при відтворенні еталонів є:

- Θ_{phm} – НСП вимірювача-перетворювача КЗФ CLARKE-HESS 6000A;
- Θ_{phs} – НСП стандарту фази CLARKE-HESS 5500-2;
- Θ₁ – НСП, що вноситься нерівністю довжин кабелів, якими подається сигнал;
- Θ_T – НСП, що вноситься нерівністю довжин плечей розгалужувача;
- Θ_f – НСП, що вноситься похибкою частоти досліджуваного сигналу;
- Θ_i – НСП, що вноситься залежністю одиниці КЗФ, що відтворюється, від температури навколишнього середовища.

НСП відтворення одиниці КЗФ обчислюється за формулою

$$\Theta = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^n \Theta_i^2}, \quad (3)$$

де Θ_i – границя складової НСП еталону, яка характеризується НСП засобів вимірювальної техніки, що входять до складу еталону; k – коефіцієнт залежності НСП від обраної довірчої імовірності при їх рівномірному розподілі (при довірчій імовірності 0,99 k = 1,4).

Для кожного значення КЗФ визначається абсолютна похибка Δφ_i за формулою

$$\Delta\phi_i = \phi_{phmi} - \phi_{phsi}, \quad (4)$$

де φ_{phmi} – значення КЗФ за показами вимірювача, в градусах; φ_{phsi} – значення КЗФ за показами стандарту фази, в градусах.

Середній квадратичний відхил (СКВ) S результату прямих вимірювань при 20 незалежних спостереженнях при відтворенні одиниці КЗФ розраховується за формулами

$$S = \frac{S_i}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

де S_i – середній квадратичний відхил

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta\phi_i^2}{n-1}}, \quad (6)$$

де n – число спостережень, n = 20.

Нестабільність еталону ν слід характеризувати як зміну розміру одиниці КЗФ, що відтворюється еталоні, за певний проміжок часу, який указується. В даному випадку дослідження еталону відбувалося протягом 9 місяців (з січня по вересень 2011 року).

Тому для визначення нестабільності ν за 1 рік використовується коефіцієнт 12/9.

$$\nu = \frac{12}{9} \sum_{i=1}^m (\phi_{i\beta} - \phi_{i\alpha}); \quad (7)$$

$$\phi_{i\alpha} = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^n \phi_{i\alpha}; \quad (8)$$

$$\phi_{i\beta} = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^n \phi_{i\beta}, \quad (9)$$

де ν – нестабільність еталону за 1 рік; φ_β – середнє значення КЗФ в кінці дослідження за n = 20 незалежних спостережень; φ_α – середнє значення КЗФ на початку дослідження за n = 20 незалежних спостережень; φ_{iβ} – результат вимірювання значення КЗФ в кінці дослідження; φ_{iα} – результат вимірювання значення КЗФ на початку дослідження.

Похибка передачі розміру одиниці складається з суми випадкових і невилучених систематичних похибок методу і засобів вимірювань, що застосовуються для передачі розміру одиниці. Оцінку суми НСП і випадкових похибок вказують у вигляді СКВ S_{εΣ}, яке було розраховано за формулою:

$$S_{\epsilon\Sigma} = \sqrt{S_{\epsilon}^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \Theta_{\epsilon i}^2}, \quad (10)$$

де S_ε – СКВ випадкової похибки методу і засобів передачі розміру одиниці.

2.2.1 Визначення метрологічних характеристик еталону на частоті 1 кГц

В діапазоні від 0° до 360° з дискретністю 30° було проведено по 20 незалежних вимірювань при кожному значенні КЗФ.

Експериментальним шляхом визначалося НСП вимірювача-перетворювача КЗФ Θ_{phm} та НСП, що вноситься нерівністю довжин кабелів, якими подавався сигнал Θ₁. Для цього на два входи вимірювача-перетворювача КЗФ було подано сигнали з кутом

зсуву фаз 0° та 360° (одночасно один і той же сигнал). Схему підключення зображено на рис. 3.

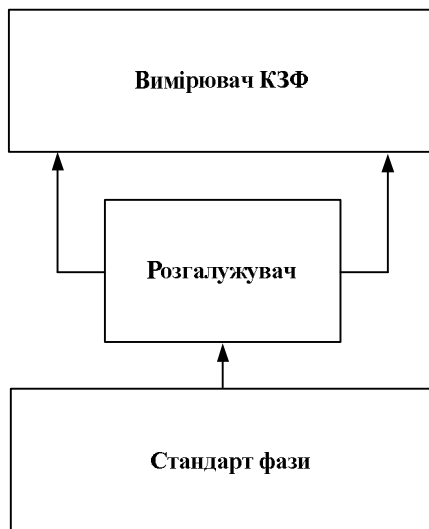


Рис. 3. Схема для визначення НСП еталона

При цьому для визначення НСП, що вносяться нерівністю довжин кабелів Θ_1 та нерівністю довжин плечей розгалужувача Θ_T було використано метод перестановок [4].

Для визначення НСП стандарту фази Θ_{phs} було підключено вимірювач-перетворювач КЗФ до стандарту фази.

Значення НСП стандарту фази Θ_{phs} визначається за формулою:

$$\Theta_{\text{phs}} = \varphi_5 - \varphi_4 + \Theta_{\text{phm}} + \Theta_1, \quad (11)$$

де φ_4 – покази індикатора вимірювача-перетворювача КЗФ; φ_5 – покази стандарту фази.

Значення НСП еталона на частоті 1 кГц було визначено за формулою (3).

Значення НСП еталона на частоті 1 кГц, не перевищило $0,003^\circ$.

Значення СКВ еталона на частоті 1 кГц не перевищувало $0,001^\circ$.

Нестабільність еталона за 1 рік на частоті 1 кГц становить $\nu = 6,5 \cdot 10^{-3}^\circ$.

Похибка передачі розміру одиниці КЗФ $S_{\text{e}\Sigma}$ на частоті 1 кГц становить $0,001^\circ$.

2.2.2 Визначення метрологічних характеристик відтворення одиниці КЗФ у розширеному діапазоні частот (від 0,01 Гц до 10 МГц)

Забезпечено синхронізацію генераторів за допомогою синтезатора частоти з вихідним опорним сигналом 10 МГц (рис. 4).

Проведено 20 незалежних вимірювань при заданих значеннях кута зсуву фаз та частоти. Для кожного значення КЗФ абсолютну похибку вимірювання КЗФ $\Delta\varphi_i$, в градусах, визначено за формулою (4).

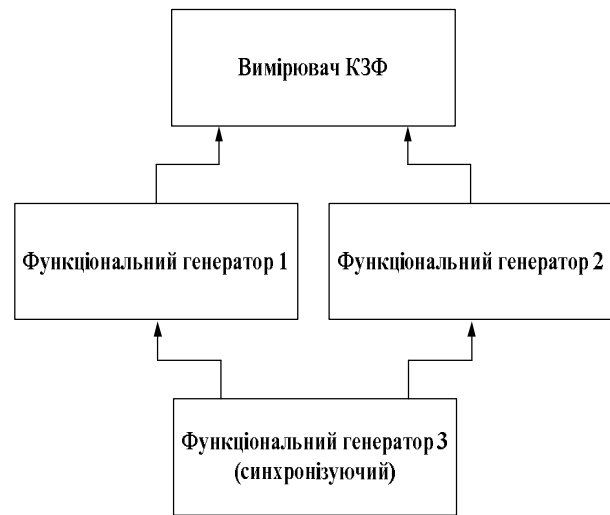


Рис. 4. Схема для визначення НСП відтворення одиниці КЗФ генераторами

Проведено вимірювання КЗФ в діапазоні вимірювань від 0° до 360° та в діапазоні частот від 0,01 Гц до 10 МГц.

Для визначення НСП еталона у розширеному діапазоні частот (від 0,01 Гц до 10 МГц) здійснено підключення складових частин еталону у відповідності до схем, наведених на рис. 3 та 4.

Проведено визначення НСП еталона, значення якої склали від $0,003^\circ$ до $0,03^\circ$ [4].

Значення СКВ еталона, яке визначається за формулою (2), не перевищило $0,01^\circ$.

Нестабільність еталона за 1 рік становить від $(4,7 \cdot 10^{-3})^\circ$ до $(6,5 \cdot 10^{-3})^\circ$.

Похибка передачі розміру одиниці КЗФ $S_{\text{e}\Sigma}$ в діапазоні частот від 0,01 Гц до 10 МГц становить від $0,001^\circ$ до $0,01^\circ$.

2.2.3 Оцінка невизначеності

Характеристики невизначеності розраховувалися на підставі отриманих значень похибок еталона СКВ (S) і НСП (Θ) [5]:

- стандартна невизначеність типу А:

$$u_A = S; \quad (12)$$

- стандартна невизначеність типу В:

$$u_B = \frac{\Theta}{K\sqrt{3}}; \quad (13)$$

- сумарна стандартна невизначеність:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}; \quad (14)$$

- розширена невизначеність:

$$U_{0,95} = 2u_c. \quad (15)$$

При обробці результатів вимірювань використовується метод приведення до прямих вимірювань, що дозволяє не враховувати при розрахунках кореляцію, що виникає через використання загальної міри.

Невизначеність вимірювання на частоті 1 кГц: за типом А $u_A = 0,001^\circ$, за типом В $u_B = 0,002^\circ$, сумарна стандартна невизначеність $u_c = 0,0022^\circ$;

Розширена невизначеність U відтворення одиниці КЗФ між двома напругами з коефіцієнтом $k = 2$ та довірчою ймовірністю $P = 0,95$ становить $0,0044^\circ$.

Невизначеність вимірювання в діапазоні частот від 0,01 Гц до 10 МГц: за типом А u_A становить від $0,001^\circ$ до $0,01^\circ$, за типом В u_B становить від $0,002^\circ$ до $0,038^\circ$, сумарна стандартна невизначеність u_c становить від $0,0022^\circ$ до $0,039^\circ$.

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 $0,078^\circ$.

Висновки

За результатами проведених досліджень отримано метрологічні характеристики Державного первинного еталона кута зсуву фаз між двома напругами у вигляді характеристик похибок та оцінок невизначеностей.

Еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами затверджено як Державний первинний еталон наказом Держспоживстандарту України від 17.10.2011 р. № 359.

Еталон зареєстровано в Реєстрі державних, первинних та вторинних еталонів за реєстраційним номером ДЕТУ 09-07-11.

Розроблений Державний первинний еталон дозволяє вимірювати кут зсуву фаз між двома напру-

гами з найвищою в Україні точністю, а також забезпечує передачу одиниці КЗФ до робочих еталонів з необхідною точністю.

Список літератури

1. Інформаційний звіт за темою 09.01.11.06. Створення Державного первинного еталона одиниці кута зсуву фаз між двома напругами / О.А.-Б. Ахмадов, С.М. Шевкун, В.М. Гачок, С.Р. Карпенко, В.С. Писчиков. – К.: ДП «Укрметрестандарт», 2011. – 72 с.
2. ГОСТ 8.381-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения погрешностей.
3. ДСТУ 3231:2007 Метрологія. Еталони одиниць вимірювань державні, первинні та вторинні. Основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування.
4. МА 081/11.303-2011 Метрологія. Державний первинний еталон одиниці кута зсуву фаз між двома напругами. Методика атестації.
5. ДСТУ Н РМГ 43-2001 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» (Рекомендации з міждержавної стандартизації. ДСВ. Застосування «Керівництва з вираження невизначеності вимірювань»).

Надійшла до редколегії 13.01.2012

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА УКРАИНЫ ЕДИНИЦЫ УГЛА СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ ДВУМЯ НАПРЯЖЕНИЯМИ

С.Н. Шевкун, О.Н. Величко, С.Р. Карпенко, М.В. Добролюбова

Представлены материалы по определению погрешностей и оценке неопределенности на основе указанных погрешностей для Государственного первичного эталона Украины угла сдвига фаз между двумя напряжениями.

Ключевые слова: эталон, угол сдвига фаз, оценка неопределенности, погрешности первичных эталонов.

THE DETERMINATION OF THE ERRORS AND THE UNCERTAINTY ESTIMATE FOR THE STATE PRIMARY STANDARD OF UKRAINE OF PHASE ANGLE UNIT BETWEEN TWO VOLTAGES

S.N. Shevkun, O.N. Velychko, S.R. Karpenko, M.V. Dobroliubova

The materials for the definition of errors and the uncertainty estimate for the State primary standard of Ukraine of phase angle unit between two voltages are presented.

Keywords: standard, phase angle, the uncertainty estimate, errors of primary standards.