

УДК 621.31.72

Ю.М. Туз, М.В. Добролюбова, Ю.В. Артюхова

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

## **ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ЕТАЛОНУ ОДИНИЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ ВІД 0,001 ДО 1000 В ЗМІННОГО СТРУМУ В ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ ВІД 10 Гц ДО 30 МГц**

*Представлено технічні та метрологічні характеристики еталону одиниці електричної напруги від 0,001 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц, розробленого в НДІ АЕД НТУУ «КПІ»; розраховано невизначеності для апаратної складової еталону.*

**Ключові слова:** еталон, метрологічні характеристики, технічні характеристики, похибка, невизначеність.

### **Вступ**

Науково-технічний розвиток кожної держави полягає в постійному удосконаленні систем вимірювання, контролю та випробувань при розробці, виготовленні та застосуванні продукції, що є підставою для забезпечення єдності вимірювань на державному рівні. А підсилення процесу міжнародної інтеграції в економіці, науці та промисловості потребує гармонізації вітчизняної нормативної документації з міжнародними документами та міжнародної єдності у підході до представлення та оцінювання похибок результату вимірювань.

Єдність вимірювань базується на системі державних та первинних еталонів, які забезпечують відтворення певної фізичної величини та передавання розміру її одиниці робочим та/або вихідним еталонам, від яких розмір одиниці цієї величини передається до робочих засобів вимірювальної техніки.

В Україні за умови достатньо високого рівня

розвитку промисловості відсутня необхідна система еталонів електричних величин, що призводить до неможливості реалізації необхідного метрологічного забезпечення електричних вимірювань.

Одним з найбільш розповсюджених сигналів, що несуть корисну інформацію є напруга змінного струму. Забезпечення єдності вимірювань напруги змінного струму неможливо без еталонів.

В Україні на державному рівні не забезпечено єдності вимірювання в високо та низькочастотному діапазонах як малих, так і великих рівнів напруги (рис. 1). Найважливіший діапазон для радіотехнічних пристроїв на частотах 1 МГц – 30 МГц при рівнях напруги до 30 В також не забезпечується державними еталонами України, а здійснюється, до того ж не в повному обсязі, високовартісними звіряннями в Російській Федерації. Крім того, державний еталон України періодично калібрується у Німеччині. Ці факти посприяли створенню еталону одиниці напруги змінного струму в НДІ АЕД НТУУ «КПІ» [1 – 4].

Напруга, В	Частота							
	10 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	30 МГц	1 ГГц
0,001								
0,01								
0,1								
0								
1								
3								
10								
30								
100								
300								
500								
1000								

Рис. 1. Порівняльна діаграма вольтчастотних характеристик еталона, створеного в НДІ АЕД НТУУ "КПІ", та Державних еталонів України

Розроблений еталон одиниці напруги змінного струму є самодостатньою автоматизованою системою, яка не потребує калібровки від інших еталонів напруги змінного струму, і складається з комплексу апаратури, що об'єднана інтерфейсом реального часу: прецизійних джерел постійної та змінної напруги, аналізатора спектру, надчутливих високоточних вимірювачів постійної напруги, пристрою автоматичної реєстрації та оброблення результатів вимірювань, комплексу еталонних перетворювачів напруги термоелектричних (ЕПНТЕ) та ін.

В багатьох Національних Метрологічних Інститутах (НМІ) в основу відтворення одиниці напруги змінного струму покладено процес передачі малої невизначеності одиниці напруги постійного струму на змінний струм, тобто порівняння одиниці напруги змінного струму з відомим значенням напруги постійного струму. Найбільш поширеним в світі є спосіб порівняння теплових ефектів напруг на змінному і постійному струмах, тому що найменшої невизначеності досягають за допомогою термоелектричних перетворювачів напруги (ПНТЕ). За допомогою ПНТЕ проводиться порівняння середньоквадратичних значень напруг (СКЗ) постійного та змінного струмів. СКЗ змінної напруги визначається за значенням постійної напруги, яке передається від джерел, заснованих на фундаментальних фізичних (Джозефсона) або хімічних (Вінстона) закономірностях. Цей спосіб отримав назву термокомпарування і використовується в національних еталонах таких країн, як Сполучені Штати Америки, Німеччина, Росія, Голландія, Англія, Австрія, Швейцарія, Україна та ін.

Відмінність національних еталонів різних країн полягає в обґрунтуванні похибок відтворення СКЗ змінної напруги.

Найсуттєвіші джерела похибок в еталонах термокомпараторного типу наступні:

- похибка переходу від напруги постійного струму до напруги змінного струму, зумовлена фундаментальними термоелектричними явищами Томсона і Пельтьє, від яких створюється додаткове тепло, крім тепла Джоуля, яке визначається квадратом

СКЗ напруги згідно формули (1)

$$U_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{1}{nT} \int_0^{nT} U^2(t) dt}, \quad (1)$$

де  $T$  – період сигналу;  $n$  – кількість періодів;  $U(t)$  – залежність напруги від часу;

- частотна похибка, зумовлена наявністю реактивних складових опорів, як в самих перетворювачах так і в додаткових резисторах, з'єднувальних елементах, перемикачах і т.п.;

- похибка, зумовлена різночасовим порівнянням;

- похибка відтворення постійної напруги, яка використовується в якості одиниці СКЗ, що передається;

- сукупна похибка інших складових комплекту апаратури, за допомогою яких реалізується передача одиниці від постійної напруги до змінної.

### Постановка завдання

До теперішнього часу у багатьох галузях України для вирішення практичних метрологічних завдань широко застосовується теорія похибок. Проте, починаючи з 70-х років, в міжнародному співтоваристві метрологів поступово накопичувалося незадоволення прийнятими уявленнями про вираження якості вимірювань, їх невідповідність сучасним вимогам, що призвело до розробки та обнародування робочою групою Міжнародної організації із стандартизації (ІСО), що складається з експертів МБМВ, ІСО, Міжнародній організації по законодавчій метрології (МОЗМ) і Міжнародній електротехнічній комісії (МЕК) "Керівництва з вираження невизначеності у вимірюваннях" (Gum:1993), такого, що містить єдині в міжнародній практиці правила вираження невизначеностей [5]. Переклад Керівництва російською мовою був здійснений "ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева", м. С.-Петербург [6]. Українська нормативна база теж адаптується під міжнародні стандарти [7, 8]. Але сфера застосування розробленого в НДІ АЕД НТУУ "КПІ" еталону одиниці напруги змінного струму не вимагає представлення невизначеності серед його метрологічних характеристик. Тому, маючи за підставу сучасний підхід до аналізу метрологічних характеристик, автори поставили за мету розрахувати не тільки похибки еталону, але й невизначеності для його апаратурної складової.

### Практичні результати

Розроблений еталон одиниці напруги змінного струму за тактико-технічним завданням (ТТЗ) повинен мати наступні технічні характеристики:

1. Діапазон значень електричної напруги змінного струму, в якому відтворюється одиниця напруги:

- від 0,001 В до 30 В в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц;

- понад 30 В до 100 В в діапазоні частот від 10 Гц до 1 МГц;

- понад 100 В до 1000 В в діапазоні частот від 10 Гц до 100 кГц.
2. Еталон забезпечує відтворення одиниці напруги з середнім квадратичним відхиленням результатів вимірювань від  $5 \times 10^{-5}$  до  $1 \times 10^{-3}$ .
3. Невилучена систематична відносна похибка еталону знаходиться в діапазоні від  $1 \times 10^{-5}$  до  $3 \times 10^{-3}$ .
4. Нестабільність еталону за міжатестаційний період знаходиться в діапазоні від  $1 \times 10^{-5}$  до  $3 \times 10^{-3}$  в залежності від діапазону вимірювань та частоти.
5. Похибка передачі розміру одиниці вольтів знаходиться в діапазоні від  $5 \times 10^{-5}$  до  $5 \times 10^{-3}$  в залежності від діапазону напруги та частоти.
6. Час встановлення робочого режиму не більше 2 годин.
7. Час безперервної роботи еталону не більше 8 годин (без урахування часу прогрівання з наступною перервою не менше 2 годин).
- На етапі приймальних випробувань проводилась перевірка відповідності параметрів та характеристик вимогам ТТЗ. Нижче наведено результати оцінювання деяких показників:
1. Середнє квадратичне відхилення результату вимірювань. Сумарне середнє квадратичне

відхилення похибки еталону складається з середнього квадратичного відхилення апаратної складової еталону, середнього квадратичного відхилення переходу зі змінної напруги на постійну і середнього квадратичного відхилення похибки вимірювача постійної напруги НР 3458А. Сумарне середнє квадратичне відхилення похибки еталону, розраховане згідно ГОСТ 8.381-80 [9] за формулою:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}, \quad (2)$$

де  $S_1$  – СКВ ЕПНТЕ та ПНТЭ-12/2, обчислене за даними атестації на державному еталоні та метрологічних досліджень згідно методики метрологічної атестації без звірення з державним еталоном;  $S_2$  – СКВ мультиметра НР3458А за даними метрологічної атестації на державному еталоні;  $S_3$  – СКВ апаратної складової еталону за даними метрологічних досліджень згідно методики метрологічної атестації без звірення з державним еталоном.

Стандартна невизначеність  $u_A$ , обчислена за типом А, розраховується за РМГ 43-2001 [6, 10, 11] та відповідає середньому квадратичному відхиленню апаратної складової еталону  $S_3$ .

Результати розрахунків наведені в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Стандартна невизначеність апаратної складової еталону  $u_A$ , обчислена за типом А

Частота, Гц	Значення напруги, В							
	0,5	1	2	2	4	8	16	32
10	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06
1000	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06
10000	2,71E-06	2,71E-06	2,71E-06	2,71E-06	2,71E-06	2,71E-06	2,71E-06	2,7E-06
100000	6,2E-06	6,2E-06	6,2E-06	6,2E-06	6,2E-06	6,2E-06	6,2E-06	6,2E-06
1000000	7,97E-06	7,97E-06	7,97E-06	7,97E-06	7,97E-06	7,97E-06	7,97E-06	8E-06
10000000	8,4E-06	8,4E-06	8,4E-06	8,4E-06	8,4E-06	8,4E-06	8,4E-06	8,4E-06
30000000	7,16E-06	7,16E-06	7,16E-06	7,16E-06	7,16E-06	7,16E-06	7,16E-06	7,2E-06

Таблиця 2

Стандартна невизначеність апаратної складової еталону  $u_A$ , обчислена за типом А

Частота, Гц	Значення напруги, В				
	50	100	300	500	1000
10	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06
1000	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06
10000	2,7E-06	2,71E-06	2,71E-06	2,7E-06	2,7E-06
100000	6,2E-06	6,2E-06	6,2E-06	6,2E-06	6,2E-06
1000000	8E-06	7,97E-06	*	*	*
10000000	*	*	*	*	*
30000000	*	*	*	*	*

2. Невилучена систематична похибка. Сумарна невилучена систематична похибка складається з невилученої систематичної похибки апаратної складової еталону, невилученої систематичної похибки

переходу зі змінної напруги на постійну і невилученої систематичної похибки вимірювача постійної напруги НР 3458А і розрахована згідно з ГОСТ 8.381-80 [9]. Стандартна невизначеність апаратної

складової еталону  $u_B$ , обчислена за типом В, розрахована за РМГ 43-2001 [6, 10, 11]. Стандартна невизначеність апаратної складової еталону  $u_B$  лежить в межах  $(1,49 \times 10^{-8} - 8,15 \times 10^{-6})$ , що відповідає ТТЗ.

Сумарна стандартна невизначеність апаратної складової еталону  $u_C$ , лежить в межах  $(1,1001 \times 10^{-6} - 1,11704 \times 10^{-5})$ , що не перевищує показників, заданих в ТТЗ.

### Висновки

Наведені показники перевищують не тільки український, а й світовий рівень за деякими параметрами (діапазон рівнів напруги та частоти). Досягти цього вдалося завдяки розробці теорії і практики побудови:

- широкосмугових підсилювачів для діапазону частот і рівнів 30 МГц 30 В, де швидкість наростання сигналу перевищує десять тисяч вольт за мікросекунду;
- підсилювачів для діапазону частот до 100 кГц при напрузі 1000 вольт зі швидкістю наростання сигналу понад тисячу вольт за мікросекунду;
- мінімізації похибок від термоелектричних ефектів;
- застосування вітчизняної високотеплопровідної кераміки із нітриду алюмінію;
- повній автоматизації процесу вимірювань та корекції похибок.

Слід також зауважити, що поняття "невизначеність" стосовно розробленого еталону в статті вводиться не замість поняття "похибка", а поряд з ним. Якість результатів вимірювань в значній мірі визначається точністю, з якою ці результати були отримані. Необхідно, щоб всі результати вимірювань забезпечувалися єдиною характеристикою точності, якій на сьогоднішній день відповідно до міжнародних вимог є невизначеність. Використання простої і єдиної методики з вираження невизначеності дозволить швидше забезпечити узгодженість результатів

вимірювань, спрощуючи їх трактування і подальше правильне використання.

### Список літератури

1. Система воспроизведения единицы вольта на основе интерфейса IEEE-488.2 / Ю.М. Туз, В.В. Литвиш, О.В. Рахмаилов, М.В. Добролюбова, Ю.В. Артюхова // Международная научно-практическая конференция "Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments" ESEa-NTU-05. – М., 2005. – С. 34.
2. Туз Ю.М. Дослідження стабільності деяких прецизійних джерел напруги / Ю.М. Туз, М.В. Добролюбова // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2003. – № 5. – С. 37-41.
3. Дослідження стабільності компонентів комплекту апаратури відтворення одиниці напруги змінного струму / Ю.М. Туз, В.В. Литвиш, М.В. Добролюбова, О.В. Рахмаилов // Український метрологічний журнал – Х., 2004. – № 1. – 41-45.
4. Аналіз методичної похибки одного методу опосередкованого вимірювання синусної напруги / Ю.М. Туз, В.В. Литвиш, О.В. Рахмаилов, М.В. Добролюбова, В.І. Беда // Науковий журнал "Вісник Хмельницького національного університету". – 2007. – № 2. – С. 51-54.
5. Guide to the expression of the uncertainty in measurements GUM:193, First edition, ISO: Geneva, 1995.
6. РМГ 43-2001. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
7. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Зазальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.
8. Керівництво з вираження невизначеності у вимірюваннях / Пер. з англ. М.В. Москаленко. – Х.: ХДНДІМ, 2002. – 320 с.
9. ГОСТ 8.381-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения погрешностей.
10. Невизначеність вимірювання та характеристики похибки / А.М. Коцюба, В.М. Новіков, Н.В. Харченко, В.І. Згуря. – ССЯ, 2, 2004.
11. Дорожжовець М. Опрацювання результатів вимірювань / М. Дорожжовець. – Львів: "Львівська політехніка", 2007. – 260 с.

Надійшла до редколегії 16.07.2009

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

### ПОГРЕШНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ 0,001 ДО 1000 В ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 10 Гц ДО 30 МГц

Ю.М. Туз, М.В. Добролюбова, Ю.В. Артюхова

Представлены технические и метрологические характеристики эталона единицы электрического напряжения от 0,001 до 1000 В переменного тока в диапазоне частот от 10 Гц до 30 МГц, разработанного в НИИ АЭИ НТУУ "КПИ"; рассчитаны неопределенности для аппаратной составляющей эталона.

**Ключевые слова:** эталон, метрологические характеристики, технические характеристики, погрешность, неопределенность.

### ERRORS AND UNCERTAINTY OF STANDARD OF ELECTRIC VOLTAGE UNIT FROM 0,001 TO 1000 V OF ALTERNATING CURRENT IN THE RANGE OF FREQUENCIES FROM 10 Hz TO 30 MHz

Y.M. Tuz, M.V. Dobrolyubova, Y.V. Artyukhova

Technical and metrology characteristics of standard of electric voltage unit from 0,001 to 1000 V alternating current in the range of frequencies from 10 Hz to 30 MHz, developed by research institute of AER NTUU "KPI", are presented; calculated the uncertainties for the hardware component of standard.

**Keywords:** standard, metrological characteristics, technical characteristics, error, uncertainty.