УДК 621.317.1

В. В. Ісаєв, к.т.н., **О. М. Величко**, д.т.н.

Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів», м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕРЖАВНОГО ПЕРВИННОГО ЕТАЛОНУ ОДИНИЦІ СИЛИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Стаття присвячена результатам дослідження з метою вирішення проблеми метрологічного забезпечення виробництва та експлуатації термоелектричних перетворювачів сили струму, прецизійних вимірювачів і джерел сили змінного струму в галузях національної економіки. Оптимальним рішенням проблеми метрологічного забезпечення є створення національного еталона одиниці сили змінного струму.

У статті проведено теоретичні дослідження, порівняння із закордонними аналогами та аналіз методів вимірювання й відтворення сили змінного струму. Здійснено аналіз прецизійних засобів, призначених для вимірювання, відтворення й компарування сили та напруги змінного струму. Для побудови національного еталону обрано метод компарування сили змінного струму із еквівалентною силою постійного струму за допомогою прецизійного термоелектричного перетворювача та шунтів.

Ключові слова: державний еталон, сила струму, метрологічна характеристика, термоперетворювач, прецизійний шунт, невизначеність вимірювань.

В. В. Ісаєв, к.т.н., **О. Н. Величко**, д.т.н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ СИЛЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Статья посвящена результатам исследования с целью решения проблемы метрологического обеспечения производства и эксплуатации термоэлектрических преобразователей силы тока, прецизионных измерителей и источников силы переменного тока в отраслях национальной экономики. Оптимальным решением проблемы метрологического обеспечения является создание национального эталона единицы силы переменного тока.

В статье проведены теоретические исследования, сравнение с зарубежными аналогами и анализ методов измерения и воспроизведения силы переменного тока. Осуществлен анализ прецизионных средств, предназначенных для измерения, воспроизводства и компарирования силы и напряжения переменного тока. Для построения национального эталона выбран метод компарирования силы переменного тока с эквивалентной силой постоянного тока с помощью прецизионного термоэлектрического преобразователя и шунтов.

Ключевые слова: государственный эталон, сила тока, метрологическая характеристика, термопреобразователь, прецизионный шунт, неопределенность измерений.

V. V. Isaiev, PhD, **O. M. Velychko**, DSc

RESEARCH OF THE STATE PRIMARY STANDARD OF UNIT OF ALTERNATING CURRENT

The article is devoted to the results of the research in order to solve the problem of metrological support of production and operation of thermoelectric power converters, precision meters and AC power sources in the branches of the national economy. The optimal solution to the problem of metrological support is to create a national standard unit of alternating current.

The article conducts theoretical research, comparison with foreign analogues and analysis of methods for measuring and reproducing the strength of alternating current. The analysis of the precision means intended for measurement, reproduction and comparison of force and voltage of alternating current is carried out. Theoretical bases of creation of a high-precision standard of unit of alternating current are outlined. To build a national standard, the method of comparing the AC current with the equivalent DC current using a precision thermoelectric converter and shunts was chosen. The composition and requirements to the operat-

ing conditions of the national standard are determined.

Since the storage and reproduction of a unit of alternating current must be realized by comparison with the equivalent direct current, the main source of uncertainty of measurements of this unit is a combination of uncertainties of measurements of thermoelectric comparator Fluke 792A, precision shunts A40, which are part of the standard, output voltage meters measure the electrical resistance to direct current and the output signal of the thermocomparator. According to the results of research work, for the first time in Ukraine the national standard of an alternating current unit was put into operation.

Keywords: state standard, current, metrological characteristic, thermal converter, precision shunt, measurement uncertainty.

DOI 10.32684/2412-5288-2020-2-17-14-22

Вступ

Точні електровимірювальні прилади, зокрема цифрові амперметри, лічильники електроенергії, які мають вимірювальні кола електричної напруги і змінного струму, широко використовуються в галузі енергетики. Вони повинні мати перевірені метрологічні характеристики (МХ). Втрата точності лічильників електроенергії може призвести до щорічних багатомільйонних збитків національної економіки.

Недостатній рівень прецизійності метрологічного забезпечення гальмує розвиток українського виробництва засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та випробувального обладнання для сили змінного струму, а також унеможливає визнання цієї продукції на світовому рівні. Найбільш точними засобами вимірювання є державні первинні еталони (ДПЕ) [1].

Кількість високоточних вимірювачів струму, що експлуатуються в Україні, становить близько 250 одиниць, а загальна кількість ЗВТ для вимірювання змінного струму сягає 100000 одиниць. Для калібрування еталонів підприємств за межами держави необхідні значні щорічні валютні витрати. Подальша передача розміру одиниці до решти еталонів, яке має виконуватись за методикою кругових звірянь ЗВТ однакового рівня точності, не забезпечує для них необхідну метрологічну надійність та супроводжується значними трудовитратами [2].

З 2016 по 2019 рр. Державне підприємство «Укрметртестстандарт» здійснило науково-дослідну роботу з розробки державного первинного еталону одиниці змінного струму. Підставою для розробки цього еталону стала наявність великого парку ЗВТ цієї одиниці в Україні. У результаті цих робіт був створений державний (національний) первинний еталон України НДЕТУ ЕМ-03-2020, котрий дозволив реалізувати систему метрологічного забезпечення, яке матиме мінімальну залежність від національних метрологічних інститутів (НМІ) інших країн [3, 4].

Актуальним є дослідження шляхів створен-

ня національного еталону одиниці сили змінного струму та встановлення МХ такого еталону.

1 Аналіз публікацій та досліджень

Аналіз калібрувальних та вимірювальних можливостей НМІ [5] світу засвідчив, що переважну більшість методів реалізації національних еталонів виконано з використанням термоелектричного перетворення. Це дозволяє досягти невизначеності вимірювань в одиницях, десятках або сотнях мкА/А в залежності від частоти [6, 7].

Для високоточного відтворення та вимірювання електричних величин змінного струму із застосуванням термоелектричних перетворювачів використовують метод порівняння діючого значення гармонічного електричного сигналу з еквівалентною фізичною величиною постійного електричного сигналу з різночасовим компаруванням напруги або струму [8, 9]. Термоперетворювачі, що застосовуються при порівнянні характеризуються різницею між вхідним змінним сигналом та вхідним постійним сигналом під назвою АС-DC різниця передачі (похибка компарування).

ДПЕ має застосовуватись для визначення МХ вторинних еталонів, а також деяких прецизійних засобів вимірювання чи відтворення одиниці змінного струму. Відповідно до ДСТУ 3231 [10], ДПЕ повинен зберігатися та застосовуватися згідно з правилами зберігання та застосування. Його невиключена систематична похибка (НСП) та середнє квадратичне відхилення (СКВ) повинні бути добре дослідженими, нестабільність за рік не повинна перевищувати допустимого за паспортом значення.

2. Постановка завдання

ЗВТ, які слід калібрувати за допомогою ДПЕ, мають широку сферу застосування: облік електроенергії та енергоресурсів; виробництво вимірювальної та випробувальної техніки; наукові дослідження з вимірювання змінного струму під час фізичних експериментів тощо. Наявність ДПЕ створює передумови наявності системи метрологічного забезпечення з мінімальною залежністю від зовнішніх НМІ.

Зрозуміло, що ДПЕ має застосовуватись для відтворення одиниці змінного струму, а також для передавання розміру одиниці фізичної величини вторинним еталонам та деяким іншим прецизійним ЗВТ. Відповідно до ДСТУ 3231 [10], ДПЕ повинен зберігатися та застосовуватися у дуже стабільних умовах. Його МХ повинні бути добре визначеними, нестабільність за рік не повинна перевищувати визначеної величини. Оскільки ДПЕ найчастіше є складним комплексом ЗВТ, для його стабільного функціонування проводиться періодичне калібрування деяких складових, а також регулярне технічне обслуговування, заміна зіпсованих вузлів.

Метою статті є висвітлення результатів роботи зі створення ДПЕ одиниці змінного струму, зокрема:

- нарис теоретичного базису функціонування зазначеного еталону;
- формування складу комплексу вимірювальних приладів для відтворення одиниці змінного струму;
- оцінювання невизначеності вимірювань та інших МХ при розповсюдженні одиниці змінного струму.

3. Теоретичні основи створення національного еталону змінного струму

Всі існуючі в світі національні еталони одиниці сили змінного струму використовують наступні методи вимірювання – метод компарування змінного струму із еквівалентним постійним струмом за допомогою прецизійного термоелектричного перетворювача та шунтів, метод відтворення одиниці змінного струму з використанням багатифункціональних калібраторів-артефактів чи прецизійних вимірювачів із добре визначеними та дослідженими МХ, а також метод визначення величини струму шляхом обчислення за законом Ома для надто малих струмів [5].

Зважаючи на рівень національного науково-технічного та економічного розвитку, доцільним є використання в якості орієнтиру досвіду експлуатації національних еталонів країн з подібними показниками загального розвитку держави, наприклад, Польської Республіки, Туреччини чи Угорщини. В усіх перелічених державах в основу побудови еталонів найвищого рівня покладено метод термоелектричного компарування змінного струму з постійним струмом за допомогою термоелектричних АС-DC перетворювачів та шунтів [7].

На відміну від постійного струму, амплітуда змінних величин – сили чи напруги змінного струму – періодично змінює полярність і їхнє миттєве значення не є незмінною величиною у

проміжку між зміною полярності. Кожне миттєве значення сили змінного струму має специфічну амплітуду та полярність. Постійна та змінна сили струму є еквівалентними в сенсі продукування ідентичного середнього значення потужності, розсіяваної на чистому активному опорі. Середня потужність розсіюється як тепло, що по черзі вимірюється сенсором, котрий має безпосередню залежність вихідної величини від температури й ця вихідна величина забезпечує сигнал постійної напруги, пропорційний вхідній температурі. Пристрої такого роду мають назву термоелектричні перетворювачі [11].

Оскільки головними елементами створюваного еталону мають бути прецизійний термоперетворювач та прецизійний шунт, слід розглянути особливості їхньої конструкції та техніки застосування. При дослідженні переходу від змінного до постійного струму, зазвичай фокусуються на особливостях використання термоелектричних перетворювачів для вимірювання середнього значення потужності, яка продукується змінним струмом на активному опорі, для порівняння із значенням потужності, що продукується еквівалентним постійним струмом на тому ж опорі [12]. Порівняння змінної й постійної сил струму частіше за все виконується з використанням термоелектричного перетворювача, котрий вимірює падіння напруги постійного та змінного струму уздовж струмового шунта.

Чутливим елементом такого термоперетворювача є термічний елемент – коротенький нагрівальний провідник із електрично ізольованою від нього термодіафрагмою. При чому обидва елементи розміщуються у скляній вакуумованій оболонці. Почергово вхідні сигнали постійного й змінного струму потрапляють на вхід термоперетворювача, спричиняючи протікання струму відповідного роду крізь нагрівальний елемент, внаслідок чого відбувається підвищення температури, котре відображується у вихідному сигналі термодіафрагми. Внаслідок того, що електрична потужність пропорційна квадратичному значенню сили струму залежність вихідної термоелектрорушійної сили E_{TCC} перетворювача сили струму термоелектричного має вигляд:

$$E_{TCC} = k \cdot I^2, \quad (1)$$

де k – характеристичний коефіцієнт термоперетворювача сили струму;

I – діюче значення сили змінного струму чи еквівалентне значення постійної сили струму.

Максимальне значення вимірюваної термоперетворювачем сили струму визначається вели-

чиною перерізу нагрівача, котрий безпосередньо вмикається у ланцюг, де протікає вимірюваний струм. Діапазон сили струму, що можливо вимірювати за допомогою термоперетворювачів становить від одиниць міліампер до десятків ампер.

Максимальна частота вимірюваного струму залежить від перерізу нагрівача та його довжини й за мінімальних розмірів сягає сотень мегагерц. До головних переваг термоелектричних перетворювачів на базі термопари слід віднести незалежність показів таких ЗВТ від форми кривої вхідного сигналу, як наслідок, високу точність порівняння величин постійного та змінного струмів. До недоліків слід віднести нелінійну залежність вихідного сигналу та неприпустимість перевантаження вхідного кола термоперетворювача. На відміну від попереднього типу термоперетворювачів, RMS-сенсори мають майже лінійну залежність вихідного сигналу $U_{\text{вих}}$ від вхідного:

$$U_{\text{вих}} = K \cdot U_{\text{вх}}, \quad (2)$$

де K – характеристичний коефіцієнт термоперетворювача на базі RMS-сенсору;

$U_{\text{вх}}$ – діюче значення вхідної напруги змінного струму чи еквівалентне значення постійної напруги.

Прецизійний термоперетворювач, котрий входить до складу створеного еталону, а саме Fluke 792A, у своїй конструкції містить RMS-сенсор, струм крізь який не повинен перевищувати 10 мА. З метою розширення діапазону вимірюваної сили струму до необхідних за технічним завданням значень використовується комплект прецизійних шунтів А40, вихідна напруга якого повинна потрапляти на термоперетворювач Fluke 792A.

Елементарний шунт являє собою низькоомний резистор та виконує функцію перетворення сили електричного струму у напругу. Головним недоліком шунта вважається відсутність гальванічної розв'язки між колом, у якому протікає вимірюваний струм та колом обробки інформативного сигналу. Для того, щоб збільшення температури шунта під час протікання струму в ньому не спричиняло зміни вихідної термо-ЕРС термоперетворювача, шунти виготовляють з матеріалів із великим питомим опором та малим температурним коефіцієнтом (константан, манганін, нікелін тощо).

Невизначеність вимірювального шунта залежить від параметрів оточуючого повітря (найбільше від температури), наявності реактивної складової опору, паразитної ємності. Коакси-

альні шунти виробництва фірми Fluke типу А40, спроектовані спеціальним чином, що уможливує зменшення індуктивності шунтів до надмалих значень.

Що стосується елементів створюваного еталону, котрі необхідні для визначення еквівалентного значення сили постійного струму, а саме, міра електричного опору постійному струмові й прецизійний вимірювач її вихідної напруги, їхній вплив на результат відтворення одиниці сили змінного струму прямує до нехтовних величин, в порівнянні з впливом вище розглянутих головних елементів – прецизійних шунтів і термоперетворювача, сумарний внесок яких на порядок вищий.

Цикл вимірювання зазвичай триває від трьох до шести хвилин і складається з декількох етапів почергового подання змінного струму та постійного струму. Таким чином зводиться до мінімуму вплив термоелектричних ефектів в середині термоперетворювачів і дрейфу під час вимірювання. При цьому необхідно контролювати значення вихідного сигналу опорного термоперетворювача Fluke 792A зі складу створеного еталону, яке має нехтовну величину дрейфу в порівнянні з термоперетворювачем, котрому передається розмір одиниці змінного струму. У випадку передавання зазначеної одиниці прецизійному вимірювачу чи джерелу струму, таким чином компенсується п'ятихвилинний дрейф цих засобів вимірювальної техніки.

4. Формування складу національного еталона змінного струму

ДП «Укрметртестстандарт» має позитивний досвід експлуатації [13] прецизійних ЗВТ таких, як прецизійний термокомпаратор 792A, а також багатофункціональний калібратор 5720A, виробництва фірми Fluke, США, прецизійний мультиметр 3458A, виробництва фірми Hewlett-Packard, США тощо, технічно доцільним та економічно обґрунтованим є використання саме таких технічних засобів у складі розроблюваного державного первинного еталону одиниці змінного струму.

Прецизійний термокомпаратор Fluke 792A та шунти А40 мають багаторічну історію застосування у якості еталонів найвищого рівня у багатьох країнах світу [14, 15], а винятково великий досвід виробництва прецизійних засобів вимірювальної техніки фірмою Fluke та її позитивний імідж у світі, свідчать на користь саме такого вибору. Окрім цього, слід відзначити, що розробка та дослідження окремого комплексу термоперетворювачів сили змінного струму, як це реалізовано, наприклад, у Національному інституті стандартів та технологій NIST, США

[16], потребуватиме залучення значних обсягів фінансування й багаторічних досліджень, що на сьогоднішній день не є адекватним рішенням.

Для реалізації еталону необхідно щонайменше 11 прецизійних шунтів А40 виробництва фірми Fluke Corporation для ряду номінальної сили змінного струму, що дозволить метрологічно забезпечити підлеглі засоби вимірювальної техніки у діапазоні сили струму від 0,01 до 20 А та у діапазоні частот від 10 Гц до 100 кГц, а саме - шунт А40 10 мА, шунт А40 20 мА, шунт А40 50 мА, шунт А40 100 мА, шунт А40 200 мА, шунт А40 500 мА, шунт А40 1 А, шунт А40 2 А, шунт А40 5 А, шунт А40 10А, шунт А40 20 А.

За допомогою спеціального узгоджувально-го адаптера 792А/7004 вимірювальна інформація з виходу шунта потрапляє на вхід термоелектричного прецизійного перетворювача 792А. Таким чином, прецизійні шунти А40 у поєднанні з прецизійним АС-DC перетворювачем 792А

являтимуть собою основу державного еталону одиниці сили змінного струму. Для забезпечення високої метрологічної точності опосередкованого вимірювання сили постійного струму за законом Ома, необхідна стабілізована міра постійної напруги, котра передаватиме розмір одиниці сталої напруги від ДПЕ до прецизійних вимірювачів постійної напруги, які вимірюватимуть вихідні сигнали термоперетворювачів сили струму й міри опору.

5. Результати досліджень еталона

ДПЕ одиниці сили змінного струму призначений для відтворення, зберігання та передавання розміру одиниці сили струму вторинним еталонам та іншим високоточним ЗВТ з метою забезпечення єдності вимірювань в державі.

Загальний вигляд Державного первинного еталона одиниці сили змінного струму представлений на рисунку 1.

Рисунок 1 – загальний вид Державного первинного еталона одиниці сили змінного струму

Еталон складається із комплексу високоточних ЗВТ:

- комплект з 2-х мір напруги Н4-100;
- комплект з 11-ти прецизійних струмових шунтів А40;
- комплект з 5-ти мір електричного опору (МС 3050М; 2хМС 3061; 2хР321);
- еталонний термоелектричний компаратор напруги постійного і змінного струму Fluke

792А;

- компаратор напруги постійного струму Р3003;
- калібратор-компаратор універсальний КМ300К;
- прецизійний мультиметр Agilent 3458А;
- калібратор постійного та змінного струму Fluke 5522А;
- перетворювач-підсилювач Clarke-Hess

8100.

Діапазон значень сили змінного струму, відтворюваних еталоном складає:

- від 1 мА до 5 А для діапазону частот від 10 Гц до 100 кГц

- понад 5 А до 20 А для діапазону частот від 10 Гц до 50 кГц.

ДПЕ забезпечує відтворення одиниці сили струму з СКВ результатів вимірювань, яке знаходиться в інтервалі від $3 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ при 10-ти незалежних спостереженнях.

НСП створеного еталона не перевищує значень, які знаходяться в інтервалі від $1 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-4}$.

Еталон забезпечує відтворення/зберігання одиниці вимірювання з невизначеністю:

- стандартна відносна невизначеність за типом А – $u_A = 2,1 \cdot 10^{-6} \div 1,0 \cdot 10^{-4}$;

- стандартна відносна невизначеність за типом В – $u_B = 1,3 \cdot 10^{-5} \div 5,9 \cdot 10^{-4}$;

- сумарна відносна стандартна невизначеність – $u_c = 1,3 \cdot 10^{-5} \div 6 \cdot 10^{-4}$;

- розширена відносна невизначеність – $U = 2,6 \cdot 10^{-5} \div 1,2 \cdot 10^{-3}$ (при коефіцієнті охоплення $k = 2$ та довірчої ймовірності $P = 0,95$).

Нестабільність державного еталона за рік не перевищує значень, які знаходяться в інтервалі від $1,2 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-4}$.

Для зберігання і відтворення МХ еталона умови зберігання та застосування еталона повинні задовольняти наступним вимогам:

умови зберігання:

- температура навколишнього повітря – від 15 до 30 °С;

- відносна вологість навколишнього повітря – до 80 %;

- атмосферний тиск – від 84 до 106 кПа;

умови застосування:

- температура навколишнього повітря – 23 ± 2 °С;

- відносна вологість навколишнього повітря – до 80 %;

- атмосферний тиск – від 84 до 106 кПа;

- напруга мережі живлення – від 198 до 242 В;

- частота мережі живлення – від 49,6 до

50,4 Гц;

- потужність, споживана еталоном – не більше 2 кВА.

Відтворення одиниці сили змінного струму здійснюється шляхом порівняння середньоквадратичного значення сили змінного струму з еквівалентним значенням сили постійного струму, визначеного за законом Ома. Таким чином, відбувається перехід від одиниць напруги постійного струму й електричного опору до сили змінного струму. Порівняння еквівалентних значень сил струму здійснюється за допомогою прецизійних шунтів А40 в поєднанні з еталоном термоелектричним компаратором напруги постійного та змінного струму Fluke 792A.

Відтворення одиниці сили постійного струму здійснюється за допомогою комплексу ЗВТ, до якого входять міри напруги Н4-100, комплект мір електричного опору (МС3050М, МС3061, Р321), калібратор сили і напруги постійного та змінного струму Fluke 5522A (в режимі сили або напруги постійного струму), калібратор-компаратор універсальний КМ300К, та компаратор напруг Р3003. При цьому передавання на еталон розміру одиниці напруги від первинного еталона ЕРС та постійної напруги здійснюється за допомогою мір напруги Н4-100, а розміру одиниці опору від первинного еталона електричного опору здійснюється за допомогою зазначеного комплексу мір електричного опору.

Генерація сили змінного струму у діапазоні частот від 20 Гц до 100 кГц здійснюється за допомогою калібратора сили і напруги постійного та змінного струму Fluke 5522A та підсилювача-перетворювача напруги у силу струму Clarke-Hess 8100A. Встановлена сила струму при порівнянні протікає крізь прецизійний шунт А40, вихідний сигнал якого потрапляє на вхід термоелектричного компаратора Fluke 792A. В еталоні застосовується метод різночасового порівняння.

Дослідження МХ еталона здійснюється один раз на рік. Періодичність калібрування комплексу еталонних шунтів А40 – 1 раз на 4 роки.

Результати оцінювання НСП, СКВ і сумарної стандартної невизначеності ДПЕ одиниці сили змінного струму наведені у табл. 1-3 відповідно.

Таблиця 1 – Оцінювання НСП ДПЕ одиниці сили змінного струму

Сила змінного струму, А	Частота, кГц	Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Розширена невизначеність вхідної величини	Внесок у сумарну НСП, %
20	0,01	R_M , Ом	0,001000057	0,000000008	12,2
		V_+ , В	0,0200218	0,00 00018	7,6
		V_- , В	-0,0200219	0,00000018	7,6
		δ_{TC}	0,00004	0,00002	30,5
		δ_{SH}	0,000004	0,000039	59,4
		V_{ac} , В	0,4004658	0,0000008	1,2
		V_{dc+} , В	0,4004657	0,0000008	1,2
		V_{dc-} , В	0,4004659	0,0000008	1,2
Оцінка вихідної величини, А		Оцінка сумарної НСП, А		Оцінка відносної сумарної НСП	
20,020659		1,14E-03		5,69E-05	

Таблиця 2 – Оцінювання СКВ ДПЕ одиниці сили змінного струму

Сила змінного струму, А	Частота, кГц	Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	СКВ вимірювання вхідної величини	Внесок у сумарне СКВ, %
20	0,01	R_M , Ом	0,001000057	-	-
		V_+ , В	0,0200218	0,0000001	28,
		V_- , В	-0,0200219	0,0000001	28,6
		δ_{TC}	0,00004	-	-
		δ_{SH}	0,000004	-	-
		V_{ac} , В	0,4004658	0,0000015	42,9
		V_{dc+} , В	0,4004657	0,000001	14,3
		V_{dc-} , В	0,4004659	0,000001	14,3
Оцінка вихідної величини, А		Оцінка сумарного СКВ, А		Оцінка відносного сумарного СКВ	
20,02066		1,75E-04		8,75E-06	

Таблиця 3 – Оцінювання сумарної стандартної невизначеності ДПЕ одиниці сили змінного струму

Сила змінно- го струму, А	Частота, кГц	Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Оцінка стан- дартної неви- значеність (тип А чи В)	Коефіцієнт чутливості	Внесок у сумар- ну стандартну невизначеність, А
20	0,01	R_M , Ом	0,001000057	0,4E-08 (В)	-20000 В/Ом ²	8,0E-05
		V_+ , В	0,0200218	1,0E-07 (А)	1000 Ом ⁻¹	1,0E-04
				1,8E-07 (В)		2,0E-04
		V_- , В	-0,0200219	1,0E-07 (А)	1000 Ом ⁻¹	1,0E-04
				1,8E-07 (В)		2,0E-04
		δ_{TC}	0,00004	1,0E-05 (В)	20 А	2,0E-04
		δ_{SH}	0,000004	2,0E-05 (В)	20 А	3,9E-04
		V_{ac} , В	0,4004658	1,5E-06 (А)	50 Ом ⁻¹	7,5E-05
				8,0E-07 (В)		4,0E-05
		V_{ac} , В	0,4004657	1,0E-06 (А)	-50 Ом ⁻¹	5,0E-05
				8,0E-07 (В)		4,0E-05
		V_{dc-} , В	0,4004659	1,0E-06 (А)	-50 Ом ⁻¹	5,0E-05
				8,0E-07 (В)		4,0E-05
Оцінка вихідної величини, А		Оцінка сумарної стан- дартної невизначеності, А		Сумарна стандартна відно- сна невизначеність		Розширена невизначеність
20.02066		5,04E-04		2,52E-05		5,04E-05

Висновки

За результатами виконаної науково-дослідної роботи спеціальною комісією було зроблено офіційний висновок про відповідність створеного еталону технічному завданню та про можливість надання статусу національного еталону України. Таким чином, фахівцями ДП «Укрметрестандарт» створено головний елемент системи метрологічного забезпечення виробництва та експлуатації засобів вимірювань сили змінного струму.

В роботі, зокрема:

- розглянуто теоретичні основи функціонування державного первинного еталону одиниці сили змінного струму, де зазначені основні процеси, що супроводжують відтворення зазначеної одиниці;
- сформовано склад комплексу вимірювальних приладів для відтворення одиниці сили змінного струму, зокрема, визначено необхідні засоби вимірювання, джерела струму, еталонні міри;
- досліджено основні метрологічні характеристики створеного еталону, а саме: невиключену систематичну похибку, середнє квадратичне відхилення, сумарну стандартну невизначенність вимірювань при відтворенні одиниці сили змінного струму.

Список використаних джерел

1. Ісаєв В. Проблема прецизійного вимірювання сили змінного струму в Україні. XIII Міжнародна конференція «Modern scientific potential 2017», 2017, С. 34-38.
2. Velychko O., Gordiyenko T. Metrological Traceability at Different Measurement Levels. Standards, Methods and Solutions of Metrology / Edited by Luigi Cocco. Published by IntechOpen, London, United Kingdom. 2019. Chapter 1. P. 1–21. DOI: 10.5772/intechopen. 84853.
3. Isaiev V. V. Development stages of state standard of alternating current unit. XIV International scientific conference “Current research and development – 2018”, 2018, vol. 8, P. 17-21.
4. Isaiev V., Velychko O. Evaluating uncertainty of alternating current reproduction using national standard. 24th IMEKO TC4 International Symposium, 2020, P. 385-389.
5. Calibration and Measurement Capabilities – CMCs. URL: <https://www.bipm.org/kcdb/>
6. Kinard J.R., Hastings J. R., Lipe T. E., Childers C. B. AC-DC difference calibrations. NIST special publication 250-27. National Institute of Standards and Technology (US), 1989, 312 с.
7. Klönz M., Laiz H., Spiegel T., Bittel P. AC-

DC current transfer step-up and step-down calibration and uncertainty calculation. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 2002, vol. 51, no. 5., 1027-1034.

8. Pogliano U., Bosco G. C., Lanzillotti M. Generalized automatic system for ac/dc transfer, ac voltage, and ac current measurements. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 2006, vol. 55, no. 5, 1747-1751.

9. Pogliano U., Bosco G. C., Serazio D. Coaxial shunts as ac–dc transfer standards of current // IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 2009, vol. 58, no. 4, 872-877.

10. ДСТУ 3231:2007 Метрологія. Еталони одиниць вимірювань державні, первинні та вторинні. Основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування // Держспожистандарт України, 2008, 24 с.

11. Halawa M., Al-Rashid N. Performance of single junction thermal voltage converter (SJTV) at 1 MHz via equivalent electrical circuit simulation // 12th International conference on computer modelling and simulation, 2010, P. 631-636.

12. Calibration: Philosophy in Practice. Fluke Corporation, 1994, 526 p.

13. Величко О., Ісаєв В. Дослідження метрологічних характеристик державного первинного еталону одиниці змінної напруги. Метрологія та прилади, 2017, № 5, 13-19.

14. Funck T., Hadzhieva I. Draft B report of EUROMET.EM-K6.a. Metrologia, 2007, vol. 44, 01012-01012.

15. Heine G., Garcocz M., Waldmann W. International comparison of ac-dc current transfer standards. Metrologia, 2017, vol. 54(1A), 01011.

16. Kinard J. R., Lipe T. E., Childers C. B. Extension of the NIST ac-dc difference calibration service for current to 100 kHz. Journal of research of the national institute of standards and technology, 1997, vol. 102, no. 1, 75-83.

References

1. Isaiev, V. (2017). Problem of precision measurement of the alternating current in Ukraine. XIII International scientific and practical conference «Modern scientific potential 2017».
2. Velychko, O., Gordiyenko, T. (2019). Metrological Traceability at Different Measurement Levels. Standards, Methods and Solutions of Metrology. Edited by Luigi Cocco. Published by IntechOpen, London, United Kingdom. Chapter 1. pp. 1–21. DOI: 10.5772/intechopen. 84853.
3. Isaiev, V. V. (2018). Development stages of state standard of alternating current unit. XIV International scientific conference “Current research and

development – 2018”.

4. Isaiev, V., Velychko, O. (2020). Evaluating uncertainty of alternating current reproduction using national standard. 24th IMEKO TC4 International Symposium, 2020.

5. Calibration and Measurement Capabilities – CMCs. Available at: <https://www.bipm.org/kcdb/>

6. Kinard, J. R., Hastings, J. R., Lipe, T. E., Childers, C. B. (1989). AC-DC difference calibrations. NIST special publication 250-27. National Institute of Standards and Technology (US).

7. Klonz, M., Laiz, H., Spiegel, T., Bittel, P. (2002). AC-DC current transfer step-up and step-down calibration and uncertainty calculation. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 51(5), 1027-1034.

8. Pogliano, U., Bosco, G. C., Lanzillotti, M. (2006). Generalized automatic system for ac/dc transfer, ac voltage, and ac current measurements. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 55(5), 1747-1751.

9. Pogliano, U., Bosco, G. C., Serazio, D. (2009). Coaxial shunts as ac–dc transfer standards of current. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 58(4), 872-877.

10. DSTU 3231:2007 Metrology. Primary and secondary state standards of units of measurements.

Main points, order of development, approval, registration, storage and use. Derzhspozhystandart of Ukraine.

11. Halawa, M., Al-Rashid, N. (2010). Performance of single junction thermal voltage converter (SJTVC) at 1 MHz via equivalent electrical circuit simulation. 12th International conference on computer modelling and simulation.

12. Calibration: Philosophy in Practice. Fluke Corporation, 1994, 526 p.

13. Velychko, O., Isaiev, V. (2017). Research of metrological characteristic of the state primary standard of the unit electric variable voltage. Metrology and instruments, 67(5), 13-19.

14. Funck, T., Hadzhieva, I. (2007). Draft B report of EUROMET.EM-K6.a. Metrologia, 44, 01012-01012.

15. Heine, G., Garcocz, M., Waldmann, W. (2017). International comparison of ac-dc current transfer standards. Metrologia, 54(1A), 01011.

16. Kinard, J. R., Lipe, T. E., Childers, C. B. (1997). Extension of the NIST ac-dc difference calibration service for current to 100 kHz. Journal of research of the national institute of standards and technology, 102(1), 75-83.

Надійшла до редакції 28.11.2020

УДК 621.317.1

Ю. Л. Анохін, О. М. Величко, д.т.н.

Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів», м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕРЖАВНОГО ПЕРВИННОГО ЕТАЛОНУ ОДИНИЦІ КОЕФІЦІЄНТА МАСШТАБНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ ДО $750/\sqrt{3}$ кВ

Стаття присвячена результатам дослідження метрологічних характеристик новоствореного Державного первинного еталону одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму до $750/\sqrt{3}$ кВ. Створений еталон став основою для метрологічного забезпечення вимірювання надвисоких напруг змінного струму. Еталон забезпечив калібрування прецизійних вимірювальних трансформаторів надвисокої напруги для енергетичної галузі національної економіки.

У статті проведено аналіз умов збереження та використання новоствореного еталона, методів вимірювання й відтворення одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму. Наведені результати дослідження метрологічних характеристик еталона, які підтвердили регламентовані для еталона характеристики.

Ключові слова: державний еталон, висока напруга, метрологічна характеристика, невизначеність вимірювань, трансформатор напруги.