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 (SJTV) 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.

Ю. Л. Анохин, О. Н. Величко, д.т.н.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТА МАСШТАБНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДО $750/\sqrt{3}$ кВ

Статья посвящена результатам исследования метрологических характеристик созданного Государственного первичного эталона единицы коэффициента масштабного преобразования напряжения переменного тока до $750/\sqrt{3}$ кВ. Созданный эталон стал основой для метрологического обеспечения измерения сверхвысоких напряжений переменного тока. Эталон обеспечил калибровку прецизионных измерительных трансформаторов сверхвысокого напряжения для энергетической отрасли национальной экономики.

В статье проведен анализ условий хранения и использования созданного эталона, методов измерения и воспроизведения единицы коэффициента масштабного преобразования напряжения переменного тока. Приведенные результаты исследования метрологических характеристик эталона, которые подтвердили регламентированные для эталона характеристики.

Ключевые слова: государственный эталон, высокое напряжение, метрологическая характеристика, неопределенность измерений, трансформатор напряжения.

Yu. L. Anokhin, O. M. Velychko, DSc

RESEARCH OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE STATE PRIMARY STANDARD OF UNIT OF SCALING FACTOR OF AC VOLTAGE TO $750/\sqrt{3}$ kV

The article is devoted to the results of research of metrological characteristics of the newly created State primary standard of the unit of scaling factor of alternating current (AC) voltage up to $750/\sqrt{3}$ kV. Until 2019, there was no metrological support for ultra-high voltage measurements in Ukraine. From 2016 to 2019, the State Enterprise "Ukrmetrteststandard" carried out research work on the development of the state primary standard unit of scaling factor of AC for ultra-high voltage. The created standard became the basis for metrological support of measurement of ultrahigh voltages of alternating current. The standard using for calibration of precision ultra-high voltage measuring transformers in the energy sector of the national economy.

The created standard consists of a set of high-precision measuring instruments and is stored in a specially equipped laboratory. For reproduction and keeping of unit of scaling factor of AC voltage the method of comparison of currents with use of the bridge of AC and two measuring condensers is used. The article analyzes the conditions of keeping and using of the newly created standard, methods of measurement and reproduction of the unit of scaling factor of AC voltage. The results of the study of metrological characteristics of the standard are presented, which confirmed the characteristics regulated for the standard.

Keywords: state standard, high voltage, metrological characteristic, measurement uncertainty, voltage transformer.

DOI 10.32684/2412-5288-2020-2-17-22-27

Вступ

Електрична енергія виробляється потужними електростанціями, а споживається порівняно малопотужними електроприймачами, які розподілені на значній території. Передача електричної енергії здійснюється за допомогою електричних мереж. Від ефективності передачі електроенергії на відстань, залежить у цілому робота електроенергетичних систем.

Вся електрична енергія виробляється, передається і розподіляється на високих напругах [1, 2]. В Україні використовуються наступні класи змінної напруги при передачі та розподілу елек-

тричної енергії: низька напруга (220 В, 380 В); середня напруга (6 кВ, 10 кВ, 35 кВ); висока напруга (110 кВ, 150 кВ, 220 кВ, 330 кВ); надвисока напруга (400 кВ, 500 кВ, 750 кВ). На території країни знаходяться понад 200 вимірювальних трансформаторів напруги (ТН) класу напруг 750 кВ.

До 2019 р. в Україні було відсутнє метрологічне забезпечення вимірювань надвисокої напруги. З 2016 по 2019 рр. Державне підприємство (ДП) «Укрметртестстандарт» (м. Київ) здійснило науково-дослідну роботу з розробки державного первинного еталону (ДПЕ) одиниці

коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму до $750/\sqrt{3}$ кВ. У результаті цих робіт був створений державний (національний) первинний еталон України НДЕТУ ЕМ-01-2019, який вирішив вказану проблему.

Результати вимірювань за допомогою ТН класу напруг 750 кВ використовується під час обліку електричної енергії та контролю безпеки умов праці. Ці ТН повинні мати перевірені метрологічні характеристики (МХ). Робочі ТН цього класу напруг мають значні масо-габаритні характеристики, тому їх калібрування за межами країни практично неможливе. Створення еталону НДЕТУ ЕМ-01-2019 дозволило реалізувати систему метрологічного забезпечення [3–5], яка має мінімальну залежність від національних метрологічних інститутів (НМІ) інших країн.

Актуальним є періодичне дослідження МХ новоствореного національного еталону одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму до $750/\sqrt{3}$ кВ.

1. Аналіз публікацій та досліджень

Аналіз калібрувальних та вимірювальних можливостей НМІ світу [6] засвідчив, що МХ новоствореного створеного еталону НДЕТУ ЕМ-01-2019 (максимальна напруга – $750/\sqrt{3}$ кВ, розширена відносна невизначеність – $4,4 \cdot 10^{-5}$) знаходяться на рівні МХ національних еталонів аналогічного призначення таких технічно розвинених країн, як Австралія (550 кВ, $6,0 \cdot 10^{-5}$), Аргентина (525 кВ, $3,0 \cdot 10^{-5}$), Іспанія (500 кВ, $1,0 \cdot 10^{-4}$) та Російська Федерація ($750/\sqrt{3}$ кВ, $2,0 \cdot 10^{-4}$).

Традиційно для відтворення і зберігання одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму використовується метод компарування [1–4]. Новостворений еталон, як і зазначені еталони інших країн, побудовані на традиційній основі. Оскільки серед високовольтних ТН класу напруг 750 кВ в Україні застосовуються лише ємнісні трансформатори напруги типу НДЕ-750, джерело високої напруги, яке використовується для перевірки високовольтних вимірювальних ТН, повинно бути розраховане на живлення ємнісного навантаження.

ДПЕ має застосовуватись для визначення МХ відповідних вторинних еталонів, а також деяких прецизійних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) – високовольтних ТН. Відповідно до ДСТУ 3231 [7], ДПЕ повинен зберігатися та застосовуватися згідно з правилами зберігання та застосування. Його невиключена систематична похибка і середнє квадратичне відхилення (СКВ) повинні бути добре дослідженими, нестабільність за рік не повинна перевищувати допустимого за паспортом еталона значення.

2. Постановка завдання

Високовольтні вимірювальні ТН, які необхідно калібрувати за допомогою ДПЕ, мають доволі широку сферу застосування. Основним застосуванням ДПЕ є відтворення одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму, а також передавання розміру цієї одиниці вторинним еталонам та іншим прецизійним ЗВТ.

Відповідно до ДСТУ 3231 [7], ДПЕ повинен зберігатися та застосовуватися у дуже стабільних умовах, а його МХ повинні бути добре визначеними. Оскільки ДПЕ є складним комплексом ЗВТ, то для його стабільного функціонування проводиться періодичне калібрування деяких складових цього ДПЕ.

Метою статті є висвітлення результатів дослідження ДПЕ одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму до $750/\sqrt{3}$ кВ, зокрема:

- складу комплексу ЗВТ еталону для відтворення одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму до $750/\sqrt{3}$ кВ;
- умов зберігання та застосування створеного еталону та основних його МХ;
- основних МХ створеного еталону, які підтверджують його регламентовані МХ.

3. Склад національного еталона, умови його застосування та основні метрологічні характеристики

ДП «Укрметртестстандарт» має багаторічний позитивний досвід створення, експлуатації та звірення національних еталонів одиниць високих напруг постійного та змінного струмів.

ДПЕ одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму до $750/\sqrt{3}$ кВ призначений для відтворення, зберігання та передавання розміру одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму вторинним еталонам та іншим високоточним ЗВТ з метою забезпечення єдності вимірювань у країні.

Загальний вигляд основних складових Державного первинного еталона одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму до $750/\sqrt{3}$ кВ представлений на рисунку 1. Місцем зберігання еталона є високовольтний зал ДП «Укрметртестстандарт» і лабораторія техніки високих напруг Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Еталон складається із комплексу високоточних ЗВТ:

- високовольтний еталонний конденсатор МСР-600;
- конденсатор вимірювальний СА 6003;

Рисунок 1 – Загальний вигляд основних складових Державного первинного еталона одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму до $750/\sqrt{3}$ кВ

- міст високовольтний еталонний МВЕ-01;
- джерело напруги змінного струму ДЗС-520-1;
- магазин навантажень СА 5055.

Площа основної лабораторії, де розташований еталон, становить 40 м^2 , а габаритні розміри (маса) складових еталону такі:

- високовольтного еталонного конденсатора МСР-600 – не більше $1400 \times 1400 \times 3400$ мм (не більше 660 кг);
- джерела напруги змінного струму ДЗС-520-1 в робочому положенні – не більше $2395 \times 2320 \times 5500$ мм без врахування пульта керування (не більше 3200 кг);
- конденсатора вимірювального СА 6003 – не більше $400 \times 400 \times 800$ мм (не більше 20 кг);
- магазину навантажень СА 5055 – не більше $300 \times 500 \times 700$ мм (не більше 20 кг);
- моста високовольтного еталонного МВЕ-01 – не більше $300 \times 500 \times 700$ мм (не більше 20 кг).

Умови зберігання для еталонного конденсатора МСР-600 і джерела напруги змінного струму ДЗС-520-1 такі:

- температура навколишнього середовища від мінус 10 до 35°C ;
- відносна вологість повітря до 80 %;
- атмосферний тиск від 86 до 106,7 кПа.

Для конденсатора вимірювального СА 6003,

моста високовольтного еталонного МВЕ-01, магазину навантажень СА 5055 температура навколишнього середовища становить $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ при тих же значеннях відносної вологості повітря і атмосферного тиску, що і для еталонного конденсатора МСР-600 і джерела напруги змінного струму ДЗС-520-1.

Під час застосування еталона повинні виконуватись такі умови:

- температура навколишнього середовища $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$;
- відносна вологість повітря до 80 %;
- атмосферний тиск від 86 до 106,7 кПа;
- напруга мережі живлення $(220 \pm 20) \text{ В}$;
- коефіцієнт несинусоїдальності напруги живлення не більше 5 %;
- споживана потужність від 1 до 20 кВ·А.

Високовольтний еталонний конденсатор МСР-600 зберігається у вертикальному положенні з тиском 4 бар. Джерело напруги змінного струму ДЗС-520-1 зберігається в горизонтальному або вертикальному положенні з тиском 3 бар.

Для відтворення і зберігання одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму використовується метод компарування струмів з використанням моста змінного струму і двох вимірювальних конденсаторів [8].

Діапазон значень коефіцієнта масштабного перетворення електричної напруги змінного

струму, що відтворюється еталоном, становить від $\frac{330/\sqrt{3} \text{ кВ}}{100/\sqrt{3}; 100/3; 100 \text{ В}}$ до $\frac{750/\sqrt{3} \text{ кВ}}{100/\sqrt{3}; 100/3; 100 \text{ В}}$.

Основні МХ еталона такі:

- діапазон номінальних первинних напруг від $330/\sqrt{3}$ до $750/\sqrt{3}$ кВ;
- діапазон номінальних вторинних напруг від $100/\sqrt{3}$ до 100 В ;
- номінальна робоча частота 50 Гц ;
- середні квадратичні відхилення (СКВ) відносно результату вимірювань від $2 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ за умови десяти незалежних спостережень;
- СКВ абсолютне результату вимірювань від $0,1'$ до $0,5'$ за умови десяти незалежних спостережень;
- невиключена систематична відносна похибка напруги від $5 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-4}$;
- невиключена систематична кутова абсолютна похибка від $0,5'$ до $1'$;
- сумарна стандартна відносна невизначеність (U) при відтворенні коефіцієнта масштабного перетворення електричної напруги змінного струму від $5 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-4}$.

Дослідження МХ еталона повинно здійснюватися один раз на три роки.

4. Результати дослідження метрологічних характеристик еталона

Високовольтний вимірювальний конденсатор високовольтного модуля джерела ДЗС-520-I слугує основою для передачі розміру масштабного коефіцієнту перетворення електричної напруги від еталонного конденсатора МСР 600 ТН ємнісного типу НДЕ-750 при виконанні за допомогою ДЗС-520-I їх повірки на підстанціях класу напруг 750 кВ . Тому є важливим дослідження параметрів цього конденсатора (ємність $C_{\text{ВН}}$ і тангенсу кута втрат $\text{tg } \delta$) в залежності від прикладеної до нього напруги.

Для одержання такої залежності еталонний конденсатор МСР 600 був підключений на вихідну напругу високовольтного модуля за допомогою високовольтної шини. З використанням моста змінного струму МВЕ-01 одержані залежності $C_{\text{ВН}}$ і $\text{tg } \delta$ високовольтного вимірювального конденсатора високовольтного модуля від високої напруги $U_{\text{ВН}}$ представлені в табл. 1.

Отримані результати підтверджують стабільність характеристик високовольтного вимірювального конденсатора високовольтного модуля комплексу обладнання еталона в діапазоні робочих напруг. При збільшенні напруги $U_{\text{ВН}}$ від $49,2 \text{ кВ}$ до $518,0 \text{ кВ}$ значення ємності $C_{\text{ВН}}$ дуже незначно зменшується, а значення тангенсу кута втрат $\text{tg } \delta$ збільшується не більше як 20% . При визначенні даних $C_{\text{ВН}}$ і $\text{tg } \delta$ приймалось, що

значення ємності еталонного конденсатора $C_1 = 51,287 \text{ пФ}$, а значення його тангенса кута втрат $\text{tg } \delta$ – менше 10^{-5} відносних одиниць.

Проведено дослідження залежності ємності від напруги для високовольтного еталонного конденсатора МСР-600 шляхом порівняння його з вбудованим конденсатором джерела напруги змінного струму ДЗС-520-I та взаємного порівняння вимірювальних електродів (C_1 і C_2). При цьому додатково досліджувались СКВ – відносно при вимірюванні коефіцієнту трансформації та абсолютне при вимірюванні різниці фаз первинної та вторинної напруг.

Результати порівняння високовольтного еталонного конденсатора МСР-600 з вбудованим конденсатором джерела напруги змінного струму ДЗС-520-I наведені в табл. 2 (напруга від $5,4$ до $521,6 \text{ кВ}$), для взаємного порівняння вимірювальних електродів – в табл. 3 (напруга від $22,5$ до $528,6 \text{ кВ}$).

У табл. 2 і 3 δ є кутом зсуву фаз між струмами, що протікають через зазначені конденсатори еталона, у абсолютних одиницях (у секундах).

Отримані результати СКВ для C і $\text{tg } \delta$ підтверджують регламентовані для еталона МХ. Значення δ для першого випадку (табл. 2) при збільшенні високої напруги збільшується від $0,01297'$ ($5,4 \text{ кВ}$) до $0,07904'$ ($521,6 \text{ кВ}$), тобто майже у 6 разів. Значення δ для другого випадку (табл. 2) при збільшенні високої напруги коливається у невеликих межах (біля 5%).

Висновки

Фахівцями ДП «Укрметртестстандарт» створено головний елемент системи метрологічного забезпечення виробництва та експлуатації трансформаторів високої напруги класу напруг 750 кВ .

В роботі розглянуто і проаналізовано:

- комплекс ЗВТ еталону для відтворення одиниці коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму до $750/\sqrt{3} \text{ кВ}$;
- умови зберігання та застосування створеного еталону та основні його МХ;
- результати дослідження основних МХ створеного еталону, які підтверджують його регламентовані МХ.

Список використаних джерел

1. Brandes D. Induktiver 750-kV-Spannungswandler. Techn. Mitt. AEG-TELEFUNKEN. 61, 1971, pp. 17-20.
2. Hillhous D. L., Peterson A. E. A 300-kV Compressed Gas Standard Capacitor with Negligible Voltage Dependence. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. IM-22, 1973,

no. 4, pp. 408–416.

3. Latzel H.-G., Wang L. A Voltage-Doubling Method for Measuring the Voltage Dependence of Compressed Gas Capacitors. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. IM-36. 1987, no. 3, pp. 730–734.

4. Jones R. G. Calibration of high voltage transformers. Conference on Precision Electromagnetic Measurement, 1988, pp. 207–208.

5. 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.

6. Calibration and Measurement Capabilities – CMCs [Електронний ресурс]. 2020. Режим доступу: <https://www.bipm.org/kcdb/>.

7. 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.

8. Anokhin Yu., Velychko O. Research of the State Primary Standard of the unit of scaling factor of AC voltage up to 750/√3 kV. Ukr. metrolog. zhurnal, 2021, Vyp. 1, (podano do druku).

References

1. Brandes D. Induktiver 750-kV-Spannungswandler, Techn. Mitt. AEG-TELEFUNKEN, 61, 1971, pp. 17-20.

2. Hillhous D. L., Peterson A. E. A 300-kV Compressed Gas Standard Capacitor with Negligible Voltage Dependence, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. IM-22, 1973, no. 4, pp. 408-416.

3. Latzel H.-G., Wang L. A Voltage-Doubling Method for Measuring the Voltage Dependence of Compressed Gas Capacitors, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. IM-36, 1987, no. 3, pp. 730-734.

4. Jones R. G. Calibration of high voltage transformers, Conference on Precision Electromagnetic Measurement, 1988, pp. 207-208.

5. 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.

6. Calibration and Measurement Capabilities – CMCs [Electronnyi resurs]. 2020. Rezhym dostupu: <https://www.bipm.org/kcdb/>.

7. 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.

8. Anokhin Yu., Velychko O. Research of the State Primary Standard of the unit of scaling factor of AC voltage up to 750/√3 kV. Ukr. metrolog. zhurnal, 2021, Vyp. 1, (submitted for printing).

Надійшла до редакції 04.12.2020