

О. М. Величко, д.т.н., Р. В. Вендичанський

ДП «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації метрології сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт»), м. Київ

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ПОДІЛЬНИКІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Розглянуто удосконалений метод калібрування подільників високої напруги постійного струму на державному первинному еталоні одиниці електричної напруги постійного струму в діапазоні від 1 до 180 кВ ДЕТУ 08-04-99. Визначені складові загальної невизначеності вимірювань обумовлені умовами експлуатації та приведена їх кількісна оцінка на прикладі подільника напруги зразкового ДНО-180.

Ключові слова: масштабний коефіцієнт, коефіцієнт поділу, подільник високої напруги, невизначеність вимірювань

Вступ

Ізоляцію кабельних ліній та іншого електро-технічного обладнання в експлуатації періодично випробовують високою напругою постійного струму відповідно до встановлених норм [1].

Для контролю високої напруги постійного струму використовують робочі вимірювачі та прецизійні подільники високої напруги постійного струму (ПН).

Визначення або контроль метрологічних характеристик робочих ПН проводиться шляхом повірки або калібрування з використанням робочих еталонів високої напруги постійного струму та еталонного вольтметра. Прецизійні ПН калібрують по національному еталону.

Півірка ПН проводиться згідно національного стандарту ДСТУ 3026-95 [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методи калібрування ПН за рівнем прикладеної напруги можна розділити на високовольтні та низьковольтні.

До низьковольтних методів калібрування ПН належать методики [3, 4]. Згідно з цими методиками на вхід ПН подається висока наруга, яка вимірюється високовольтним еталонним засобом вимірювальної техніки (ЗВТ), а вихідна наруга – низьковольтним еталонним ЗВТ. Дійсне значення масштабного коефіцієнту визначається як відношення високої напруги на вході ПН до значення напруги на його виході. Ці методики передбачають можливість оцінки експериментальним шляхом ефекту самонагрівання ПН. Слід зазначити, що ефект самонагрівання для резистивних прецизійних ПН є значним та може складати декілька десятків відсотка.

До низьковольтних методів можна віднести методики [5, 6]. Методика калібрування ПН [5] визначає дійсне значення масштабного коефіцієнта ПН як відношення дійсного значення опору

високовольтного плеча до дійсного значення опору низьковольтного плеча ПН. Дійсне значення опору резисторів з яких складається ПН визначають за допомогою моста Уитстона. Вплив самонагрівання за даною методикою розраховується на основі паспортних значень температурного коефіцієнту опору резисторів.

Застосування цього метода потребує порушення цілісності конструкції ПН, що знижує надійність калібруемого ПН.

Іншим прикладом низьковольтного методу є методика викладена в статті [6]. Вона заснована на принципі послідовного подавання на калібруємих та еталонних ПН каліброваної напруги в діапазоні від 0 до 1000 В зі змінним кроком від 1 до 10 В. Дійсне значення масштабного коефіцієнта розраховується за спеціальною методикою. Дана методика не передбачає можливість визначення впливу самонагрівання на результати вимірювання ПН.

Проте жоден з документів не враховує інші фактори впливу, які обумовлені специфічними умовами експлуатації ПН. Так високовольтні випробування та вимірювання проводяться в спеціально огорожених ділянках – високовольтних полях (далі - ВП). Зазвичай розмір ВП обирають лише за критерієм дотримання необхідних відстаней для виключення пробоя при проведенні вимірювань. За нормами [7] огорожу стаціонарного ВП виконують з металевої сітки, яка повинна бути заземлена. В умовах обмеженої площі ВП така огорожа може впливати на роботу ПН. Також не поодинокі випадки, коли вимірювання необхідно провести поблизу обладнання яке знаходиться під напругою, що також може впливати на результати вимірювання.

До виходу ПН в реальних умовах експлуатації можуть підключатися ЗВТ з різним вхідним опором, як з великим (вольтметри) так і з віднос-

но незначним (осцилографи, аналізатори), що впливає значною мірою на точність вимірювання ПН.

Виходячи з вище перерахованих обставин, наведені методи калібруванні не завжди в повній мірі враховують ефекти які присутні в реальних умовах експлуатації ПН.

Постановка завдання

З прийняттям нового Закону України з питань метрологічної діяльності [8] та прагненням підприємств та організацій до впровадження системи управління якістю за вимогами стандарту ДСТУ ISO/IEC 9001 [9] все більшої актуальності набуває питання калібрування ЗВТ. На цей момент відсутній національний нормативний документ на методику калібрування ПН. Наведені методики калібрування ПН [3-6] не враховують особливості їх експлуатації, що негативно впливає на достовірність метрологічних характеристик отриманих при калібруванні.

Метою статті є запропонувати методику калібрування прецизійних подільників високої напруги, що враховує вплив факторів обумовлених реальними умовами експлуатації, провести її аналіз, а також показати простежуваність результатів вимірювань при калібруванні ПН до національних еталонів інших країн.

Основний текст

В реальних умовах експлуатації на ПН можуть впливати наступні фактори:

- тривалість знаходження ПН під дією високої напруги (самонагрівання);
- вплив заземлених об'єктів [10];
- вплив об'єктів під напругою [10];
- вхідний опір приладу, який підключається до виходу ПН.

У статті розглянута методика калібрування ПН за допомогою Державного первинного еталона одиниці електричної напруги постійного струму у діапазоні від 1 до 180 кВ ДЕТУ 08-04-99 (далі – ДПЕ).

Калібрування ПН проводять методом опосередкованих вимірювань. Вхідна напруга ПН вимірюється ДПЕ, а вихідна напруга – еталонним вольтметром. Вхідний опір еталонного вольтметра повинен відповідати вхідному опору ЗВТ, який підключається до виходу ПН в експлуатації.

1 Розрахунок поправки до номінального масштабного коефіцієнту ПН

Дійсний масштабний коефіцієнт ПН при i -тому спостереженні k_i визначається за формулою:

$$k_i = \frac{U_{SSi}}{U_{out i}}, \quad (1)$$

де U_{SSi} – значення високої напруги, що вимірюється ДПЕ при i -тому спостереженні (у В) та визначається за формулою:

$$U_{SSi} = U_{SSs} + U_{SSVi}, \quad (2)$$

де U_{SSs} – дійсне значення напруги складеної міри ДПЕ, В;

U_{SSVi} – покази вольтметра ДПЕ при i -тому спостереженні, В;

$U_{out i}$ – покази еталонного вольтметра при i -тому спостереженні вихідної напруги ПН, В.

При калібруванні визначають поправку до номінального масштабного коефіцієнту ПН при i -тому спостереженні δ_{ki} за формулою:

$$\delta_{ki} = \frac{k_i - k_{nom}}{k_{nom}}, \quad (3)$$

де k_{nom} – номінальний масштабний коефіцієнт ПН.

Калібрування ПН проводять у п'яти точках номінального інтервалу показів вхідної напруги:

$$U_{inf}; 0,2 \cdot U_{sup}; 0,5 \cdot U_{sup}; 0,8 \cdot U_{sup} \text{ та } U_{sup},$$

де U_{inf} – нижнє значення напруги номінального інтервалу показів ПН, В;

U_{sup} – верхнє значення напруги номінального інтервалу показів ПН, В.

Для кожної точки номінального інтервалу показів ПН проводять 10 спостережень і визначають середнє арифметичне значення поправки до масштабного коефіцієнту ПН $\bar{\delta}_k$ за формулою:

$$\bar{\delta}_k = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_{ki}}{n}, \quad (4)$$

де n – кількість спостережень.

Стандартна невизначеність вимірювань середнього арифметичного значення поправки до масштабного коефіцієнту ПН u_δ , у відносних одиницях, визначають за формулою:

$$u_\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{ki} - \bar{\delta}_k)^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

2 Аналіз впливу зовнішніх факторів на результати вимірювання ПН

2.1 Аналіз впливу самонагрівання на масштабний коефіцієнт ПН.

Відхилення дійсного значення масштабного коефіцієнту від номінального з урахуванням впливу самонагрівання ПН в кінцевий момент часу при i -тому спостереженні δ_{hi} визначають за формулою:

$$\delta_{hi} = \frac{k_{hi} - k_{nom}}{k_{nom}}, \quad (6)$$

де k_{hi} – дійсний масштабний коефіцієнт при i -тому спостереженні в кінцевий момент часу самонагрівання ПН, який визначають за формулою:

$$k_{r,i} = \frac{U_{ss} + U_{SSV i}}{U_{out r i}}, \quad (7)$$

де $U_{SSV i}$ – покази вольметра ДПЕ при i -тому спостереженні в кінцевий момент часу самонагрівання ПН, В;

$U_{out r i}$ – покази еталонного вольметра при i -тому спостереженні вихідної напруги в кінцевий момент часу самонагрівання ПН, В.

При напрузі, що дорівнює верхньому значенню напруги номінального інтервалу показів вхідної напруги ПН, проводять 10 спостережень.

Середнє арифметичне значення відхилення дійсного значення масштабного коефіцієнту від номінального з урахуванням впливу самонагрівання ПН в кінцевий момент часу $\bar{\delta}_h$ визначається за формулою:

$$\bar{\delta}_h = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_{hi}}{n}. \quad (8)$$

Оцінка впливу самонагрівання на масштабний коефіцієнт ПН $\delta_{h inf}$, у відносних одиницях, визначається за формулою:

$$\delta_{h inf} = \left| \bar{\delta}_k - \bar{\delta}_h \right|. \quad (9)$$

2.2 Аналіз впливу заземлених об'єктів на масштабний коефіцієнт ПН

Відхилення дійсного значення масштабного коефіцієнту від номінального з урахуванням впливу заземлених об'єктів при i -тому спостереженні δ_{ti} визначають за формулою:

$$\delta_{ti} = \frac{k_{ti} - k_{nom}}{k_{nom}}, \quad (10)$$

де k_{ti} – дійсний масштабний коефіцієнт при i -тому спостереженні визначений під час впливу заземлених об'єктів, який визначають за формулою:

$$k_{ti} = \frac{U_{ss} + U_{SSV ti}}{U_{out ti}}, \quad (11)$$

де $U_{SSV ti}$ – покази вольметра ДПЕ при i -тому спостереженні під час впливу заземлених об'єктів на ПН, В;

$U_{out ti}$ – покази еталонного вольметра при i -тому спостереженні вихідної напруги під час впливу заземлених об'єктів на ПН, В.

При напрузі, що дорівнює верхньому значенню напруги номінального інтервалу показів вхідної напруги ПН, проводять 10 спостережень.

Середнє арифметичне значення відхилення дійсного значення масштабного коефіцієнту від номінального з урахуванням впливу заземлених об'єктів $\bar{\delta}_t$ визначається за формулою:

$$\bar{\delta}_t = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_{ti}}{n}. \quad (12)$$

Оцінка впливу заземлених об'єктів на масштабний коефіцієнт ПН $\delta_{t inf}$, у відносних одиницях, визначається за формулою:

$$\delta_{t inf} = \left| \bar{\delta}_k - \bar{\delta}_t \right|. \quad (13)$$

2.3 Аналіз впливу об'єктів під напругою на масштабний коефіцієнт ПН

Відхилення дійсного значення масштабного коефіцієнту від номінального з урахуванням впливу об'єктів під напругою при i -тому спостереженні δ_{ui} визначають за формулою:

$$\delta_{ui} = \frac{k_{ui} - k_{nom}}{k_{nom}}, \quad (14)$$

де k_{ui} – дійсний масштабний коефіцієнт при i -тому спостереженні визначений під час впливу об'єктів під напругою, який визначають за формулою:

$$k_{ui} = \frac{U_{ss} + U_{SSV ui}}{U_{out ui}}, \quad (15)$$

де $U_{SSV ui}$ – покази вольметра ДПЕ при i -тому спостереженні під час впливу об'єктів під напругою на ПН, В;

$U_{ou\ u\ i}$ – покази еталонного вольтметра при i -тому спостереженні вихідної напруги під час впливу об'єктів під напругою на ПН, В.

При напрузі, що дорівнює верхньому значенню напруги номінального інтервалу показів вхідної напруги ПН, проводять 10 спостережень.

Середнє арифметичне значення відхилення дійсного значення масштабного коефіцієнту від номінального викликане впливом об'єктів під напругою $\bar{\delta}_u$ визначається за формулою:

$$\bar{\delta}_u = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_{u\ i}}{n} \quad (16)$$

Оцінка впливу об'єктів під напругою на масштабний коефіцієнт ПН $\delta_{u\ inf}$, у відносних одиницях, визначається за формулою:

$$\delta_{u\ inf} = \left| \bar{\delta}_k - \bar{\delta}_u \right| \quad (17)$$

Складові загальної невизначеності вимірювань при калібруванні подільника напруги зразкового ДНО-180 наведені в табл. 1.

В табл. 1 наведені наступні позначення:

u_{SS} – стандартна невизначеність вимірювань отримана на ДПЕ;

u_V – стандартна невизначеність вимірювань еталонного вольтметра.

Таблиця 1 – Складові загальної невизначеності вимірювань

Позначення вхідної величини	Прийнятий закон розподілу	Алгоритм розрахунку стандартної невизначеності	Внесок стандартної невизначеності, у відносних одиницях
u_{SS}	нормальний	u_{SS}	$3,6 \cdot 10^{-4}$
u_V	нормальний	u_V	$1,1 \cdot 10^{-4}$
$\delta_{h\ inf}$	рівномірний	$\frac{\delta_{h\ inf}}{\sqrt{3}}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
$\delta_{t\ inf}$	рівномірний	$\frac{\delta_{t\ inf}}{\sqrt{3}}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
$\delta_{u\ inf}$	рівномірний	$\frac{\delta_{u\ inf}}{\sqrt{3}}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
u_{δ}	нормальний	u_{δ}	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Оцінювання невизначеності вимірювань по типу А поправки до масштабного коефіцієнту ПН u_A , у відносних одиницях, визначають за формулою:

$$u_A = \sqrt{u_{\delta}^2} \quad (18)$$

Оцінювання невизначеності вимірювань по типу В поправки до масштабного коефіцієнту ПН u_B , у відносних одиницях, визначають за формулою:

$$u_B = \sqrt{\frac{\delta_{h\ inf}^2}{3} + \frac{\delta_{t\ inf}^2}{3} + \frac{\delta_{u\ inf}^2}{3} + u_{SS}^2 + u_V^2} \quad (19)$$

Комбіновану (сумарну) стандартну невизначеність вимірювань поправки до масштабного коефіцієнту ПН u_c , у відносних одиницях, знаходять за формулою:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (20)$$

Розширену невизначеність вимірювань поправки до масштабного коефіцієнту ПН з урахуванням факторів впливу під час експлуатації U , для коефіцієнта охоплення $k = 2$ при рівні довіри 95, у відносних одиницях, визначають за формулою:

$$U = 2 \cdot \sqrt{\frac{\delta_{h\ inf}^2}{3} + \frac{\delta_{t\ inf}^2}{3} + \frac{\delta_{u\ inf}^2}{3} + u_{SS}^2 + u_V^2 + u_{\delta}^2} \quad (21)$$

Результат калібрування ПН записують у вигляді:

$$X = k_{nom} \cdot (1 + \bar{\delta}_k) \pm U \quad (22)$$

Висновки

Досліджено та кількісно оцінено на прикладі подільника високої напруги постійного струму ДНО-180 складові загальної невизначеності вимірювань при калібруванні прецизійних подільників напруги постійного струму, що обумовлені впливом факторів умов експлуатації.

Запропоновано методику калібрування прецизійних подільників високої напруги постійного струму, яка враховує умови їх експлуатації.

Показано простежуваність результатів вимірювань при калібруванні прецизійних подільників напруги постійного струму до національного первинного еталона, метрологічні можливості якого визнані міжнародним співтовариством та включені до міжнародної бази даних калібрувальних та вимірювальних можливостей країн.

Список використаних джерел

1. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.– Х.: Видавництво «Індустрія», 2007. – 272 с.

2. ДСТУ 3026-95. Метрологія. Подільники напруги постійного струму вимірювальні високочастотні. Методи та засоби повірки. [Текст]. – Київ: Держспоживстандарт України, 1996. – 16 с.
3. МКУ 053-29/08/2011 Метрологія. Делителі високого напруги постійного струму. Методика калібровки. [Текст] – Київ: ДП «Укрметрестандарт», 2011. – 22 с.
4. NBS Technical Note 1215. High Voltage Divider and Resistor Calibrations / M Misakian [and other] – Washington: U.S. Government Printing Office, 1985. – 31 p.
5. NBS Technical Note 349. The Design and Operation of A High Voltage Calibration Facility/ W. Winston, Jr Scott. Washington: U.S. Government Printing Office, 1966. – 27 p.
6. Parks H. High Voltage Divider Calibration with the Reference Step Method // 2015 NCSL International Conference proceedings/– Grapevine, Texas, USA, July 19-23. – P. 68–69.
7. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. НПАОП 40.1.-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98). – Х.: ФОРТ, 2008. – 192 с.
8. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 05.06.2014 № 1314-VII-ВРУ.
9. ДСТУ ISO ІЕС 9001: 2015. Системи управління якістю. Вимоги. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій [Текст]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 22 с.
10. ГОСТ 17512–82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением [Текст]. – Київ: Держспоживстандарт України, 1984. – 22 с.

Надійшла до редакції 13.11.2017

Рецензент: д.т.н, проф. Братченко Г. Д.,
Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Одеса.

О. Н. Величко, д.т.н., Р. В. Вендичанский

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА КАЛИБРОВКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрен усовершенствованный метод калибровки делителей высокого напряжения постоянного тока на государственном первичном эталоне единицы электрического напряжения постоянного тока в диапазоне от 1 до 180 кВ ДЕТУ 08-04-99. Определены составляющие общей неопределенности измерений, обусловленные условиями эксплуатации и приведена их количественная оценка на примере делителя напряжения образцового ДНО-180.

Ключевые слова: масштабный коэффициент, коэффициент деления, делитель высокого напряжения, неопределенность измерений.

O. M. Velychko, DSc, R. V. Vendychanskyi

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF CALIBRATION OF PRECISION DIVIDERS OF HIGH VOLTAGE

An improved method for calibrating high voltage direct current dividers is described at the state primary standard of a unit of direct current electric voltage in the range from 1 to 180 kV ДЕТУ 08-04-99. The components of the general uncertainty of measurements caused by operating conditions are determined and their quantitative estimation is given with the example of the voltage divider of the model ДНО-180.

Keywords: scale factor, division coefficient, high voltage divider, measurement uncertainty.