

# Прикладні аспекти: електричні та магнітні вимірювання

УДК 389.14:621.3

Ю.Л. Анохин, Р.В. Вендичанский, В.В. Копшин

ГП «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ГП «Укрметрстандарт»)

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Статья посвящена калибровке измерительных систем высокого напряжения переменного тока, которые применяют для измерения приложенного высокого напряжения при испытании электрической прочности изоляции трансформаторов и реакторов. Предложена процедура калибровки измерительных систем высокого напряжения переменного тока, с использованием национальных эталонов напряжения переменного тока до 220 кВ. Приведена обработка результатов измерений. Рассмотрены основные источники неопределенности результатов измерений при калибровке. Показана метрологическая прослеживаемость результатов измерений к национальным эталонам.

**Ключевые слова:** высокое напряжение, измерительная система, масштабный коэффициент, отклонение напряжения, относительная погрешность, неопределенность измерений.

### Введение

**Постановка проблемы.** Методы испытания электрической прочности изоляции трансформаторов и реакторов приложенным высоким напряжением переменного тока установлены в стандарте [1].

Требования к характеристикам погрешности измерительных систем высокого напряжения переменного тока (далее – ИС), которые применяют для измерения высокого напряжения при испытании электрической прочности изоляции трансформаторов и реакторов, установлены в стандарте [2]. Калибровка ИС в диапазоне напряжения от 13 кВ до 600 кВ на частотах от 50 Гц до 225 Гц осуществляется в ГП «Укрметрстандарт» с использованием двух национальных эталонов [3, 4].

Оценивание неопределенности измерений при калибровке ИС установлено в стандарте [5].

**Цель статьи.** Особенности оценки неопределенности измерений при калибровке ИС.

### Основной раздел

**Процедура калибровки ИС.** Калибровку ИС проводят непосредственным сличением с эталоном.

Схема включения ИС при калибровке приведена на рис. 1.

**Действительный масштабный коэффициент на частоте 50 Гц.** Калибровку ИС проводят во всем диапазоне входного напряжения ИС,  $U_{вх}$ .

Измерение проводят в 3 точках диапазона

входного напряжения ИС:

$$U_{нач}; 0,5 \cdot (U_{кон} - U_{нач}); \text{ и } U_{кон}, \quad (1)$$

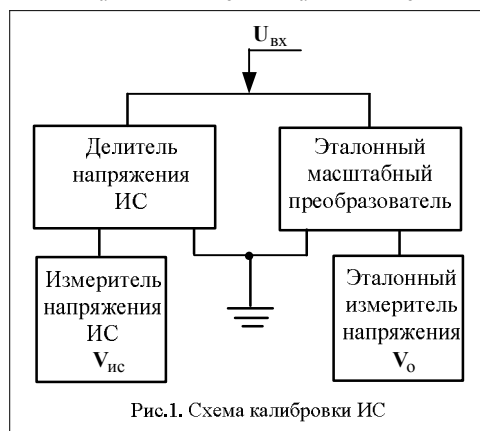


Рис.1. Схема калибровки ИС

где  $U_{нач}$  – начальное значение диапазона измерения входного напряжения ИС;  $U_{кон}$  – конечное значение диапазона измерения входного напряжения ИС.

Если конечное значение диапазона измерения входного напряжения ИС превышает 220 кВ, то измерения проводят при  $U_{кон} = 220$  кВ.

Действительный масштабный коэффициент ИС,  $M_{ис}$ , определяют по формуле:

$$M_{ис} = \frac{M_0 \cdot U_0}{U_{вых}}, \quad (2)$$

где  $M_0$  – масштабный коэффициент эталона;  $U_0$  – показание эталонного измерителя напряжения  $V_0$ ;  $U_{вых}$  – выходное напряжение делителя напряжения

ИС, определяемое по показаниям измерителя напряжения ИС  $V_{ис}$ .

Среднее арифметическое значение действительного масштабного коэффициента ИС,  $\bar{M}_{ис}$ , определяют по формуле:

$$\bar{M}_{ис} = \frac{M_{ис,max} + M_{ис,min}}{2}, \quad (3)$$

где  $M_{ис,max}$  – наибольшее из трех значений действительного масштабного коэффициента;

$M_{ис,min}$  – наименьшее из трех значений действительного масштабного коэффициента.

Относительное отклонение среднего арифметического значения действительного масштабного коэффициента ИС от номинального масштабного коэффициента на частоте 50 Гц,  $\delta_{M_{ис}}$ , определяют по формуле:

$$\delta_{M_{ис}} = \frac{M_{ном} - \bar{M}_{ис}}{\bar{M}_{ис}} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где  $M_{ном}$  – номинальный масштабный коэффициент ИС, установленный в паспорте ИС.

В паспорт ИС вносится  $\bar{M}_{ис}$  вместо  $M_{ном}$ , если модуль относительного отклонения масштабного коэффициента,  $\delta_{M_{ис}}$ , превышает 0,5 %:

$$|\delta_{M_{ис}}| > 0,5 \%. \quad (5)$$

Для многодиапазонных ИС действительный масштабный коэффициент определяют для каждого диапазона измерений.

Измеритель напряжения ИС  $V_{ис}$  также градуируют по входному напряжению ИС в киловольтах с учетом значения принятого масштабного коэффициента.

Таким образом, по измерителю напряжения ИС  $V_{ис}$  так же производят отсчет входного напряжения ИС,  $U_{вх}$ , алгоритм которого определяют по формуле:

$$U_{вх} = \bar{M}_{ис} \cdot U_{вых}. \quad (6)$$

**Определение входного напряжения ИС на частоте 50 Гц.** Измерение проводят в 5 точках диапазона измерения входного напряжения ИС:

$$U_{нач}; 0,2 \cdot (U_{кон} - U_{нач}); 0,5 \cdot (U_{кон} - U_{нач}); 0,8 \cdot (U_{кон} - U_{нач}); \text{ и } U_{кон}. \quad (7)$$

Относительное отклонение входного напряжения ИС от действительного значения напряжения при  $j$ -м наблюдении на частоте 50 Гц в каждой точке диапазона измерения,  $\delta_{u,j}$ , определяют по формуле:

$$\delta_{u,j} = \frac{U_{вх,j} - U_{о,j} \cdot M_o}{U_{о,j} \cdot M_o} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где  $U_{вх,j}$  – показание измерителя напряжения ИС  $V_{ис}$  входного напряжения при  $j$ -м наблюдении,  $U_{о,j}$  – показание эталонного измерителя напряже-

ния  $V_o$  при  $j$ -м наблюдении.

Среднее арифметическое значение относительного отклонения входного напряжения ИС на частоте 50 Гц в каждой диапазона измерения,  $\bar{\delta}_u$ , определяют по формуле:

$$\bar{\delta}_u = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{u,j}, \quad (9)$$

где  $m = 5$  – количество наблюдений.

Среднее арифметическое значение входного напряжения ИС,  $\bar{U}_{вх}$ , определяют через напряжение рабочего эталона по формуле:

$$\bar{U}_{вх} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_{вх,j} = \bar{U}_o \cdot M_o \cdot \left(1 + \frac{\bar{\delta}_u}{100}\right), \quad (10)$$

где  $\bar{U}_o$  – среднее арифметическое значение показания эталонного измерителя напряжения  $V_o$ , которое определяют по формуле:

$$\bar{U}_o = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_{о,j}. \quad (11)$$

Для многодиапазонных ИС определение входного напряжения проводится для каждого диапазона измерений.

Среднее квадратическое отклонение (далее – СКО) среднего арифметического значения относительного отклонения входного напряжения в каждой точке диапазона измерений,  $S_{o, \bar{\delta}_u}$ , определяется

по формуле:

$$S_{o, \bar{\delta}_u} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\delta_{u,j} - \bar{\delta}_u)^2}{m \cdot (m-1)}}. \quad (12)$$

**Определение входного напряжения ИС на частотах  $f = 60, 100$  или  $225$  Гц.** Относительное отклонение напряжения ИС при изменении частоты от 50 Гц до  $f = 60, 100$  или  $225$  Гц определяют прямыми измерениями измерителем напряжения ИС  $V_{ис}$  напряжения до 1000 В, которое воспроизводит эталонный калибратор напряжения.

Первоначально по измерителю напряжения ИС  $V_{ис}$  определяют напряжение на частоте 50 Гц, а затем на частоте  $f = 60, 100$  или  $225$  Гц.

Измерение проводят в 3 точках диапазона измерения напряжения измерителя напряжения ИС  $V_{ис}$  от 10 до 1000 В:

$$U_{v,нач}; 0,5 \cdot (U_{v,кон} - U_{v,нач}); U_{v,кон}, \quad (13)$$

где  $U_{v,нач}$  – начальное значение диапазона измерения напряжения измерителя напряжения ИС  $V_{ис}$ ;  $U_{v,кон}$  – конечное значение диапазона измерения напряжения измерителя напряжения ИС  $V_{ис}$ .

Относительное отклонение показаний измерителя напряжения ИС  $V_{ис}$  при изменении частоты при  $h$ -м наблюдении в каждой точке диапазона измерения,  $\delta_{f,h}$ , определяют по формуле:

$$\delta_{f,h} = \frac{U_{f,h} - U_{50,h}}{U_{50,h}} \cdot 100 \%, \quad (14)$$

где  $U_{f,h}$  – показание измерителя напряжения ИС  $V_{ис}$  на частоте  $f = 60, 100$  или  $225$  Гц при  $h$ -м наблюдении;  $U_{50,h}$  – показание измерителя напряжения ИС  $V_{ис}$  на частоте  $50$  Гц при  $h$ -м наблюдении.

Среднее арифметическое значение относительного отклонения показаний измерителя напряжения ИС  $V_{ис}$  при изменении частоты в каждой точке диапазона измерения,  $\bar{\delta}_f$ , определяют по формуле:

$$\bar{\delta}_f = \frac{1}{w} \sum_{h=1}^w \delta_{f,h}, \quad (15)$$

где  $w = 5$  – количество наблюдений.

Среднее арифметическое значение входного напряжения ИС,  $\bar{U}_{вх,f}$ , на частотах  $f = 60, 100$  или  $225$  Гц определяют через входное напряжение ИС на частоте  $50$  Гц по формуле:

$$\bar{U}_{вх,f} = \bar{U}_{вх} \cdot \left( 1 + \frac{\bar{\delta}_f}{100} \right). \quad (16)$$

СКО относительного отклонения показания измерителя напряжения ИС  $V_{ис}$  при изменении частоты в каждой точке диапазона измерения,  $S_{(\Delta)\bar{\delta}_f}$ , определяют по формуле:

$$S_{(\Delta)\bar{\delta}_f} = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^w (\delta_{f,h} - \bar{\delta}_f)^2}{w \cdot (w-1)}}. \quad (17)$$

**Оценивание неопределенности измерений.** Оценивание неопределенности измерений вполне согласно рекомендациям [5, 6].

**Оценка неопределенности измерений входного напряжения ИС на частоте 50 Гц.** Среднее арифметическое значение входного напряжения ИС на частоте  $50$  Гц,  $\bar{U}_{вх}$ , выраженное через напряжение эталона, определяют по формуле (10).

Стандартную неопределенность измерений среднего арифметического значения входного напряжения ИС на частоте  $50$  Гц,  $u(\bar{U}_{вх})$ , определяют по формуле:

$$u(\bar{U}_{вх}) = \sqrt{\sum_{q=1}^5 u^2(y_q)}, \quad (18)$$

где  $u(y_q)$  – стандартная неопределенность измерений составляющей величины  $y_q$  ( $q$ -я составляющая) среднего арифметического значения входного

напряжения ИС на частоте  $50$  Гц.

Суммарную стандартную неопределенность  $\sum_{q=1}^5 u(y_q)$  определяют по формуле:

$$\sum_{q=1}^5 u(y_q) = \sqrt{\frac{\delta_{m_0}^2}{3} + \frac{\delta_{v_0}^2}{3} + \frac{\delta_{\epsilon_\Sigma}^2}{3} + \frac{\bar{\delta}_u^2}{3} + S_{(\Delta)\bar{\delta}_u}^2}, \quad (19)$$

где  $\delta_{m_0}$  – пределы допускаемой относительной погрешности масштабного коэффициента эталона;  $\delta_{v_0}$  – пределы допускаемой относительной погрешности эталонного измерителя напряжения  $V_0$ ;  $\delta_{\epsilon_\Sigma}$  – пределы допускаемой относительной погрешности при передаче размера единицы напряжения от эталона к ИС при реализации метода непосредственного сличения.

Расширенную неопределенность измерений среднего арифметического значения входного напряжения ИС,  $U_{P(\bar{U}_{вх})}$ , для коэффициента охвата  $k = 2$  при уровне доверия  $95\%$  определяют по формуле, в процентах:

$$U_{P(\bar{U}_{вх})} = 2 \cdot u(\bar{U}_{вх}) \quad (20)$$

или с учетом формул (18) и (19) формула (20) имеет вид:

$$U_{P(\bar{U}_{вх})} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\delta_{m_0}^2}{3} + \frac{\delta_{v_0}^2}{3} + \frac{\delta_{\epsilon_\Sigma}^2}{3} + \frac{\bar{\delta}_u^2}{3} + S_{(\Delta)\bar{\delta}_u}^2}. \quad (21)$$

Находят максимальное значение расширенной неопределенности  $U_{P(\bar{U}_{вх})\max}$  по формуле (21) и приписывают это значение всему диапазону измерения входного напряжения ИС от  $U_{нач}$  до  $U_{кон}$  на частоте  $50$  Гц.

**Оценка неопределенности измерений входного напряжения ИС на частотах  $f = 60, 100$  или  $225$  Гц.** Среднее арифметическое значение входного напряжения ИС на частотах  $f = 60, 100$  или  $225$  Гц,  $\bar{U}_{вх,f}$ , выраженное через входное напряжение ИС на частоте  $50$  Гц, определяют по формуле (16).

Стандартную неопределенность измерений среднего арифметического значения входного напряжения ИС на частотах  $f = 60, 100$  и  $225$  Гц,  $u(\bar{U}_{вх,f})$ , определяют по формуле:

$$u(\bar{U}_{вх,f}) = \sqrt{\sum_{g=1}^4 u^2(z_g)}, \quad (22)$$

где  $u(z_g)$  – стандартная неопределенность измерений составляющей величины  $z_g$  ( $g$ -я составляющая) среднего арифметического значения входного напряжения ИС на частотах  $f = 60, 100$  или  $225$  Гц.

Суммарную стандартную неопределенность  $\sum_{g=1}^4 u(z_g)$  определяют по формуле:

$$\sum_{g=1}^4 u(z_g) = \sqrt{u^2(\bar{U}_{\text{вх}})_{\text{max}} + \frac{2\delta_{\text{кн}_0}^2}{3} + \frac{\delta_f^2}{3} + S_{(\Delta)\delta_f}^2}, \quad (23)$$

где  $\delta_{\text{кн}_0}$  – пределы допускаемой относительной погрешности эталонного калибратора напряжения.

Расширенную неопределенность измерений среднего арифметического значения входного напряжения ИС на частотах  $f = 60, 100$  или  $225$  Гц,  $U_{P(\bar{U}_{\text{вх}}, f)}$ , для коэффициента охвата  $k = 2$  при уровне доверия 95 % определяют по формуле, в процентах:

$$U_{P(\bar{U}_{\text{вх}}, f)} = 2 \cdot u(\bar{U}_{\text{вх}}, f), \quad (24)$$

или с учетом формул (22) и (23) формула (24) имеет вид:

$$U_{P(\bar{U}_{\text{вх}}, f)} = 2 \sqrt{u^2(\bar{U}_{\text{вх}})_{\text{max}} + \frac{2\delta_{\text{кн}_0}^2}{3} + \frac{\delta_f^2}{3} + S_{(\Delta)\delta_f}^2}. \quad (25)$$

Находят максимальное значение расширенной неопределенности  $U_{P(\bar{U}_{\text{вх}}, f)_{\text{max}}}$  по формуле (25) и приписывают это значение всему диапазону измерения входного напряжения ИС от  $U_{\text{нач}}$  до  $U_{\text{кон}}$  на частотах  $f = 60, 100$  или  $225$  Гц.

**Метрологическая прослеживаемость.** Для признания результатов калибровки ИС за рубежом необходимо оценить неопределенность измерений и показать прослеживаемость измерений к национальным эталонам.

Калибровочные и измерительные возможности национальных метрологических институтов (далее – НМИ) установлены в международной базе данных.

UkrCSM/10 – идентификатор сервиса ГП «Укрметрстандарт» по национальному эталону [3],

UkrCSM/5 – идентификатор сервиса ГП «Укрметрстандарт» по национальному эталону [4] в международной базе данных калибровочных и измерительных возможностей НМИ.

## Выводы

Приведена процедура калибровки ИС. Выполнена оценка неопределенности измерений при калибровке ИС. Показана прослеживаемость результатов измерений к национальным эталонам.

Метрологические характеристики национальных эталонов, находящихся в ГП «Укрметрстандарт», признаны международной базой данных калибровочных и измерительных возможностей.

## Список литературы

1. ГОСТ 22756–77. Трансформаторы (силовые и напряжения) и реакторы. Методы испытания электрической прочности изоляции.
2. ГОСТ 17512–82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением.
3. ДСТУ 3864-99. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань електричної напруги змінного струму в діапазоні від 1 до 1,2·500/√3 кВ та коефіцієнта масштабного перетворення електричної напруги на частоті 50 Гц.
4. ДСТУ 4122:2006. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань електричної напруги від 0,1 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 1 МГц.
5. IEC 60060–2:2010 High-voltage test techniques. Part 2. Measuring systems.
6. РМГ 43-2001. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».

Поступила в редколлегию 7.02.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ І ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ВИСОКОЇ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Ю.Л. Анохін, Р.В. Вендичанський, В.В. Копшин

Стаття присвячена калібруванню вимірювальних систем високої напруги змінного струму, які застосовують для вимірювання прикладеної високої напруги при випробуванні електричної міцності ізоляції трансформаторів і реакторів. Запропоновано процедуру калібрування вимірювальних систем високої напруги змінного струму, з використанням національних еталонів напруги змінного струму до 220 кВ. Приведена обробка результатів вимірювань. Розглянуто основні джерела невизначеності результатів вимірювань при калібруванні. Показана метрологічна простежуваність результатів вимірювань до національних еталонів.

**Ключові слова:** висока напруга, вимірювальна система, масштабний коефіцієнт, відхилення напруги, відносна похибка, невизначеність вимірювань.

## RESULTS PROCESSING AND EVALUATION OF UNCERTAINTY MEASUREMENT AT HIGH VOLTAGE AC CALIBRATION MEASUREMENT SYSTEMS

Y.L. Anokhin, R.V. Vendichanskiy, V.V. Kopshyn

The article is devoted to the calibration of high voltage alternating current measuring systems, which is used to measure the applied high voltage withstand voltage test transformers and reactors. The procedure of calibration of the high voltage alternating current measuring system with the national standards of AC voltage to 220 kV was proposed. The results processing of measurements are presented. The main sources of uncertainty in the calibration measurements are examined. The metrological traceability of measurements to national standards is shown.

**Keywords:** high voltage measuring system, scale factor, voltage fluctuation, relative error, measurement uncertainty.