

УДК 381.14:621.3

Ю.Л. Анохин, В.Н. Кикало, В.В. Копшин, С.Н. Носко

ГП Укрметртестстандарт, Киев

ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

В работе рассмотрены вопросы верификации результатов измерений при калибровке трансформаторов напряжения. Приведена методика калибровки трансформаторов напряжения на государственном эталоне единиц электрического напряжения переменного тока и коэффициента масштабного преобразования электрического напряжения (КМПЭН) на частоте 50 Гц ДЕТУ 08-05-99. Дан бюджет неопределенности измерений при калибровке. Дана оценка неопределенности результатов измерений при калибровке.

Ключевые слова: вариация, коэффициент трансформации, неопределенности измерений, относительное отклонение коэффициента трансформации, трансформатор напряжения.

Введение

Вся электрическая энергия вырабатывается, передается и распределяется на высоком напряжении. В этих случаях измерение количества электрической энергии осуществляется счетчиками электрической энергии, включенными через трансформаторы напряжения (ТН). Точность учёта электрической энергии регламентируется "Инструкцией про порядок коммерческого учёта электрической энергии", которая утверждена Советом Оптового рынка электрической энергии. Точность измерения электрической энергии является функцией точности электросчетчиков и ТН. Причем, доминирующую составляющую погрешности измерения электрической энергии, как правило, вносят трансформаторы напряжения. Поэтому метрологические характеристики ТН очень важны.

В связи с вступлением Украины в мировую организацию торговли выполнена гармонизация национального стандарта на ТН с международным стандартом [1], для улучшения конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке.

Кроме того, в связи с провозглашением Украиной курса на европейскую интеграцию стоит задача адаптации результатов измерений с использованием государственных эталонов к требованиям международных стандартов.

В порядке внедрения системы управления качеством в практику воспроизведения единиц измерений на государственных эталонах и их передачи подчиненным вторичным и рабочим эталонам, согласно требований ДСТУ ISO/IEC 17025 [2] выполнена разработка документа – МК 08/29-12-2005 "Трансформаторы напряжения измерительные. Методика калибровки на государственном эталоне Украины ДЕТУ 08-05-99" [3].

Калибровочные и измерительные возможности национального метрологического института (НМИ) характеризуют качество метрологических услуг, представляемых потребителям на постоянной осно-

ве. Оценка точности калибровки и измерений, гарантируемой НМИ потребителям её метрологических услуг, выражается в виде значения расширенной неопределенности результатов измерений, проведенных НМИ.

Оценивание неопределенности измерений

В рассматриваемой работе проведено оценивание неопределенности измерений при калибровке трансформаторов напряжения.

Методика калибровки МК 08/29-12-2005 устанавливает объем калибровки ТН, условия проведения калибровки, методы и средства калибровки, обработку результатов наблюдений, а также оформление результатов калибровки.

Калибровку ТН проводят методом сличения с государственным эталоном ДЕТУ 08-05-99 (далее эталон) при помощи компаратора. При этом комплексный коэффициент трансформации ТН определяется согласно [4]:

$$\dot{K} = N \cdot \left(1 - \dot{\gamma}_T \right), \quad (1)$$

$$\text{где } N = U_{1n} / U_{2n}; \quad (2)$$

$$\dot{\gamma}_T = f_T + j\delta_T; \quad (3)$$

N – постоянная для калибруемого ТН (номинальный коэффициент трансформации по [4], $\dot{\gamma}_T$ – комплексное отклонение комплексного коэффициента трансформации \dot{K} от постоянной N ; U_{1n} – первичное номинальное напряжение ТН; U_{2n} – вторичное номинальное напряжение ТН; K – коэффициент трансформации ТН по [4]; δ_T – фазовое смещение вторичного напряжения ТН (U_X) относительно вторичного напряжения эталона (U_0) (фазовое смещение).

Коефіцієнт трансформації ТН знаходиться по формуле [4]:

$$K = N \cdot (1 - f_T), \quad (4)$$

где f_T – относительное отклонение коэффициента трансформации K от постоянной N (далее – относительное отклонение коэффициента трансформации). При этом эталон должен иметь постоянную, равную постоянной калибруемого ТН.

Калибровку ТН проводят при значениях первичного напряжения, равных 80, 100 и 120% номинального значения, а для каждого значения напряжения проводят дважды – при увеличении и при уменьшении напряжения. Значения полной мощности, отдаваемой ТН в цепь нагрузки вторичной обмотки, равны 25 и 100% номинального значения (S_N) при номинальном коэффициенте мощности, для каждого значения напряжения.

Результат измерения f_T – относительного отклонения коэффициента трансформации определяют как среднее арифметическое значение по формуле:

$$f_T = \left(\bar{f}_{\uparrow} + \bar{f}_{\downarrow} \right) / 2, \quad (5)$$

где \bar{f}_{\uparrow} – среднее значение относительного отклонения коэффициента трансформации при установлении напряжения со стороны меньших значений; \bar{f}_{\downarrow} – среднее значение относительного отклонения коэффициента трансформации при установлении напряжения со стороны больших значений.

Средние значения \bar{f}_{\uparrow} и \bar{f}_{\downarrow} определяют, каждое, из $n=10$ наблюдений по формулам:

$$\bar{f}_{\uparrow} = \sum_{i=1}^n f_{\uparrow i} / n; \quad (6)$$

$$\bar{f}_{\downarrow} = \sum_{i=1}^n f_{\downarrow i} / n, \quad (7)$$

где $f_{\uparrow i}$ и $f_{\downarrow i}$ – показания компаратора относительного отклонения коэффициента трансформации при i -том наблюдении при установлении напряжения со стороны меньших значений и, соответственно, установлении напряжения со стороны больших значений.

Результат измерения δ_T – фазового смещения определяют как среднее арифметическое значение по формуле:

$$\delta_T = \left(\bar{\delta}_{\uparrow} + \bar{\delta}_{\downarrow} \right) / 2, \quad (8)$$

где $\bar{\delta}_{\uparrow}$ – среднее значение фазового смещения при установлении напряжения со стороны меньших значений; $\bar{\delta}_{\downarrow}$ – среднее значение фазового смещения при установлении напряжения со стороны больших значений.

Средние значения $\bar{\delta}_{\uparrow}$ и $\bar{\delta}_{\downarrow}$ определяются, каждое, из $n=10$ наблюдений по формулам:

$$\bar{\delta}_{\uparrow} = \sum_{i=1}^n \delta_{\uparrow i} / n; \quad (9)$$

$$\bar{\delta}_{\downarrow} = \sum_{i=1}^n \delta_{\downarrow i} / n, \quad (10)$$

где $\delta_{\uparrow i}$ и $\delta_{\downarrow i}$ – показания компаратора фазового смещения при i -том наблюдении при установлении напряжения со стороны меньших значений и соответственно установлении напряжения со стороны больших значений. Определяют среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерения относительного отклонения коэффициента трансформации (S_f) и соответственно фазового смещения (S_{δ}) по формулам (11) и (12) соответственно:

$$S_f = \sqrt{\frac{1}{2n(2n-1)} \left[\sum_{i=1}^{10} \left(f_{\uparrow i} - \bar{f}_{\uparrow} \right)^2 + \sum_{i=1}^{10} \left(f_{\downarrow i} - \bar{f}_{\downarrow} \right)^2 \right]}; \quad (11)$$

$$S_{\delta} = \sqrt{\frac{1}{2n(2n-1)} \left[\sum_{i=1}^{10} \left(\delta_{\uparrow i} - \bar{\delta}_{\uparrow} \right)^2 + \sum_{i=1}^{10} \left(\delta_{\downarrow i} - \bar{\delta}_{\downarrow} \right)^2 \right]}. \quad (12)$$

Вариация относительного отклонения коэффициента трансформации (V_f) и вариация фазового смещения (V_{δ}) определяются по формулам:

$$V_f = \left| \bar{f}_{\uparrow} - \bar{f}_{\downarrow} \right|, \quad (13)$$

$$V_{\delta} = \left| \bar{\delta}_{\uparrow} - \bar{\delta}_{\downarrow} \right|. \quad (14)$$

СКО вариации при измерении относительного отклонения коэффициента трансформации (S_{Vf}) и соответственно фазового смещения ($S_{V\delta}$) находят по формулам:

$$S_{Vf} = \frac{V_f}{2\sqrt{3}}, \quad (15)$$

$$S_{V\delta} = \frac{V_{\delta}}{2\sqrt{3}}. \quad (16)$$

Оценку стандартной неопределенности типа А относительного отклонения коэффициента трансформации (u_{Af}) и соответственно фазового смещения ($u_{A\delta}$) находят по формулам:

$$u_{Af} = \sqrt{S_f^2 + S_{Vf}^2}; \quad (17)$$

$$u_{A\delta} = \sqrt{S_{\delta}^2 + S_{V\delta}^2}. \quad (18)$$

Оценку стандартной неопределенности типа В относительного отклонения коэффициента трансформации (u_{Bf}) и соответственно фазового смещения ($u_{B\delta}$) находят по формулам:

$$u_{Bf} = \sqrt{S_{\text{Пф}}^2 + S_{\text{0ф}}^2 + S_{\text{3ф}}^2}; \quad (19)$$

$$u_{B\delta} = \sqrt{S_{\text{П}\delta}^2 + S_{\text{0}\delta}^2 + S_{\text{3}\delta}^2}, \quad (20)$$

где $S_{\Gamma f}$ и $S_{\Gamma \delta}$ - СКО передачи размера единицы КМПЭН от эталона к ТН по относительному отклонению коэффициента трансформации и фазовому смещению соответственно (значения СКО оговорено поверочной схемой ДСТУ3864 [5];

$S_{\theta f}$ и $S_{\theta \delta}$ - СКО неисключённой систематической погрешности (НСП) эталона при воспроизведении единицы КМПЭН по относительному отклонению коэффициента трансформации и фазовому смещению соответственно, которые находят по формулам:

$$S_{\theta f} = \frac{\Theta_f}{\sqrt{3}}; \quad (21)$$

$$S_{\theta \delta} = \frac{\Theta_{\delta}}{\sqrt{3}}; \quad (22)$$

где θ_f - НСП эталона при воспроизведении единицы КМПЭН по относительному отклонению коэффициента трансформации; θ_{δ} - НСП эталона при воспроизведении единицы КМПЭН по фазовому смещению; $S_{\Sigma f}$ - СКО случайной погрешности эталона при воспроизведении единицы КМПЭН по относительному отклонению коэффициента трансформации; $S_{\Sigma \delta}$ - СКО случайной погрешности эталона при воспроизведении единицы КМПЭН по фазовому смещению.

Оценку суммарной стандартной неопределённости измерения относительного отклонения коэффициента трансформации ($U_{\Sigma f}$) и фазового смещения соответственно ($U_{\Sigma \delta}$) находят по формулам:

$$u_{\Sigma f} = \sqrt{u_{A_f}^2 + u_{B_f}^2}; \quad (23)$$

$$u_{\Sigma \delta} = \sqrt{u_{A_{\delta}}^2 + u_{B_{\delta}}^2}. \quad (24)$$

Расширенная неопределённость измерения относительного отклонения коэффициента трансформации (U_f) и соответственно фазового смещения (U_{δ}) для коэффициента охвата $k=2$ при уровне доверия 95% определяются по формулам:

$$U_f = 2u_{\Sigma f}; \quad (25)$$

$$U_{\delta} = 2u_{\Sigma \delta}. \quad (26)$$

Результат калибровки ТН записывают в виде:

– по коэффициенту трансформации:

$$K = N \left[1 - \left(f_T \pm U_f \right) \right]; \quad (27)$$

или по относительному отклонению коэффициента трансформации:

$$f_T \pm U_f; \quad (28)$$

– по фазовому смещению:

$$\delta_T \pm U_{\delta}. \quad (29)$$

Выводы

Предложена оценка неопределённости результатов измерений при калибровке ТН. Она является проверкой прослеживаемости результатов измерений при калибровке ТН на государственном эталоне и подтверждения метрологических характеристик ТН.

Список литературы

1 ДСТУ ІЕС 60044-2:2008 Вимірювальні трансформатори. Частина 2. Трансформатори напруги індуктивні.

2 ДСТУ ISO/IEC 17025–2001. Общиє вимоги до компетентності испытательных и калибровочных лабораторий (ISO/IEC 17025: 1999, IDT).

3 Копшин В.В., Кікало В.М., Бутенко О.Г. Державний еталон одиниць електричної напруги змінного струму в діапазоні від 1 до $1,2 \cdot 330 / \sqrt{3}$ кВ та коефіцієнта масштабного перетворення електричної напруги на частоті 50 Гц // Український метрологічний журнал. - 2000. – Вип. 1. – С. 42–49.

4 Основы электроизмерительной техники / Под ред. М.И. Левина. - М.: Энергия, 1972. – 544 с.

5 ДСТУ 3864-99. Государственная поверочная схема для средств измерений электрического напряжения переменного тока в диапазоне от 1 до $500 / \sqrt{3}$ кВ и коэффициента масштабного преобразования электрического напряжения на частоте 50 Гц.

Поступила в редколлегию 6.05.2008

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

ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

Анохін Ю.Л., Кікало В.М., Копшин В.В., Носко С.М..

Розглянуті питання щодо оцінювання невизначеності результатів вимірювання при калібруванні трансформаторів напруги. Наведені алгоритми визначення розширеної невизначеності відносного відхилення відношення напруги та фазового зсуву. Приведена методика калібрування трансформаторів напруги на державному еталоні одиниць електричної напруги змінного струму і коефіцієнта масштабного перетворення електричної напруги.

Ключові слова: варіація, коефіцієнт трансформації, невизначеності вимірювань, відносне відхилення коефіцієнта трансформації, трансформатор напруги.

THE EVALUATION OF THE MEASUREMENT UNCERTAINTY UNDER VOLTAGE TRANSFORMERS CALIBRATION

Anokhin Yu.L., Kikalo V.N., Kopshyn V.V., Nosko S.N.

There have been considered the questions concerning the evaluation of the measurement results uncertainty under voltage transformers calibration. The algorithms of expanded uncertainty of the relative voltage ratio deviation and the phase displacement are given. The method of calibration of transformers of tension on the state standard of units of electric tension of alternating current and coefficient of scale transformation of electric tension is resulted.

Keywords: variation, coefficient of transformation, to the vagueness of measurements, relative rejection of coefficient of transformation, transformer of tension.