

УДК 381.14; 621.3

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

ГП Укрметртестстандарт, Киев

КЛЮЧЕВЫЕ СЛИЧЕНИЯ ЭТАЛОНОВ ОТНОШЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При выработке и распределении электрической энергии измерение осуществляется электросчетчиками, включенными через трансформаторы напряжения. Доминирующую составляющую в погрешность измерения количества электрической энергии вносят трансформаторы напряжения. Для калибровки трансформаторов напряжения применяются эталоны отношений напряжений. С целью оценки калибровочных и измерительных возможностей и установления степени эквивалентности национальных эталонов проводятся сличения эталонов. Рассмотрены алгоритмы по определению опорного значения ключевого сличения, его неопределенности и степени эквивалентности национальных эталонов отношений напряжений.

трансформатор напряжения, сличение, опорное значение, эквивалентность эталонов, неопределенность, калибровочные и измерительные возможности

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

Вся электрическая энергия вырабатывается, передается и распределяется на высоком напряжении. В этих случаях измерение электрической энергии осуществляется счетчиками электрической энергии, включенными через трансформаторы напряжения. Точность измерения электрической энергии является функцией точности счетчиков и трансформаторов напряжения, причем доминирующую составляющую погрешности измерения электрической энергии, как правило, вносят трансформаторы напряжения.

Характеристикой трансформатора напряжения, которая используется для определения количества электрической энергии, является коэффициент трансформации [1]:

$$k_u = \frac{U_1}{U_2}, \quad (1)$$

где k_u – действительное значение коэффициента трансформации трансформатор напряжения; U_1 – действительное значение первичного напряжения; U_2 – действительное значение вторичного напряжения.

Для передачи размера единицы измерения трансформаторам напряжения применяются эталоны отношений напряжений (единицы коэффициента масштабного преобразования напряжения) переменного тока. Учитывая важность электрической энергии для народного хозяйства, возникает вопрос об оценке точности калибровки и измерений, гарантируемой национальным метрологическим институтом (НМИ) потребителям, и взаимном признании результатов измерений.

Ключевое сличение ССЕМ (Консультативный комитет по электричеству и магнетизму), выпол-

няемое ССЕМ Международного комитета мер и весов (СIPM) [2], приводит к опорному значению ключевого сличения, его неопределенности и установлению степени эквивалентности эталонов.

Ключевые сличения (КС) региональных метрологических организаций (РМО), например, КО-ОМЕТ, проводятся с целью распространения метрологической эквивалентности на эталоны НМИ, не принимавших участия в КС ССЕМ.

В рекомендации КООМЕТ [3] даны алгоритмы установления степени эквивалентности эталонов НМИ, участвующих в РМО КС, по отношению к опорному значению КС ССЕМ через результаты измерений, полученные в связующих НМИ, которые участвовали в обоих сличениях.

КС ССЕМ эталонов отношений напряжения не проводились. Укрметртестстандарт направил в КО-ОМЕТ предложения о поведении КС эталонов отношений напряжения и подготовил технический протокол согласно [2]. В техническом протоколе приведены алгоритмы нахождения опорного значения КС применительно к трансформаторам напряжения, которые согласованы с [4]. Предполагаемые участники уже изъявили желание участвовать в предлагаемых сличениях.

Основной материал

Ниже рассмотрены основные положения технического протокола.

Измеряемые величины. При КС измеряются две величины: погрешность напряжения f_u (погрешность отношения напряжения или погрешность коэффициента трансформации) и угловая погрешность δ_u (фазовое смещение напряжений).

Погрешность напряжения f_u определяют по формуле [5] (в относительных единицах):

$$f_u = \frac{U_2 \cdot k_u - U_1}{U_1}. \quad (2)$$

Угловая погрешность δ_u , в минутах, это угол между векторами первичного напряжения U_1 и вторичного напряжения U_2 при таком выборе их направлений, чтобы для идеального трансформатора напряжения этот угол был равен нулю.

Эталонные сравнения. В качестве эталонов сравнения предполагается использовать трансформаторы напряжения, которые стабильны во времени, со следующими метрологическими характеристиками: первичное номинальное напряжение 6, 10 кВ и выше; вторичное номинальное напряжение 100 В; нагрузка 5 В·А, $\cos \varphi = 1$ и 0 В·А (холостой ход).

Методика проведения измерений. Сличения национальных (государственных) эталонов проводится путем измерения метрологических характеристик эталона сравнения (f_u и δ_u) на этих эталонах. Измерения проводятся при значениях первичного напряжения 40, 60, 80, 100 и 120% от первичного номинального напряжения на частоте 50 Гц и при двух нагрузках 5 В·А и $\cos \varphi = 1$, также при 0 В·А (холостой ход).

Каждый участник сличений проводит по $m = 10$ наблюдений на каждом напряжении и при каждой нагрузке. В качестве результатов измерений каждый НМИ представляет среднее арифметическое значение из 10 наблюдений и неопределенность измерений.

Методы сличения. Методы сличения эталонов сравнения с национальными эталонами зависят от оборудования лабораторий НМИ: сличение с эталонным трансформатором напряжения и компаратором напряжения [6], сличение с эталонным конденсатором и компаратором тока [6] и сличение с эталонным емкостным делителем напряжения [7].

Обработка результатов измерений. Вычисляют опорное значение КС как средневзвешенное значение представленных НМИ результатов измерений по формулам:

$$f_o = \frac{\sum_{L=1}^n f_L \cdot u^{-2}(f_L)}{\sum_{L=1}^n u^{-2}(f_L)}; \quad (3)$$

$$\delta_o = \frac{\sum_{L=1}^n \delta_L \cdot u^{-2}(\delta_L)}{\sum_{L=1}^n u^{-2}(\delta_L)}, \quad (4)$$

где f_o , δ_o – опорные значения ключевого сличения для погрешности напряжения и угловой погрешности; f_L , δ_L – результаты измерений погрешности напряжения и угловой погрешности для каждой лаборатории, которая принимает участие в сличениях;

$u(f_L)$, $u(\delta_L)$ – суммарные стандартные неопределенности погрешности напряжения и угловой погрешности, которые представлены каждой лабораторией, принимавшей участие в сличении; n – число лабораторий, которые принимают участие в сличении.

Суммарная стандартная неопределенность опорного значения для погрешности напряжения $u(f_o)$ и угловой погрешности $u(\delta_o)$ определяются по формулам:

$$u(f_o) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{L=1}^n u^{-2}(f_L)}}; \quad (5)$$

$$u(\delta_o) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{L=1}^n u^{-2}(\delta_L)}}. \quad (6)$$

Расширенные неопределенности опорного значения для погрешности напряжения $U(f_o)$ и угловой погрешности $U(\delta_o)$ для коэффициента охвата $k = 2$ при уровне доверия 95% определяются по формулам:

$$U(f_o) = 2u(f_o); \quad (7) \quad U(\delta_o) = 2u(\delta_o). \quad (8)$$

Степень эквивалентности L -й лаборатории НМИ определяют как разницу результатов измерения лаборатории, которая принимает участие в сличении, и опорным значением для погрешности напряжения $\Delta(f_L)$ и угловой погрешности $\Delta(\delta_L)$ по формулам:

$$\Delta(f_L) = f_L - f_o; \quad (9) \quad \Delta(\delta_L) = \delta_L - \delta_o. \quad (10)$$

Суммарная стандартная неопределенность этой разницы для погрешности напряжения $u(\Delta f_L)$ и угловой погрешности $u(\Delta \delta_L)$ определяются по формулам:

$$u(\Delta f_L) = \sqrt{u^2(f_L) - u^2(f_o)}; \quad (11)$$

$$u(\Delta \delta_L) = \sqrt{u^2(\delta_L) - u^2(\delta_o)}. \quad (12)$$

Расширенные неопределенности этой разницы для погрешности напряжения $U(\Delta f_L)$ и угловой погрешности $U(\Delta \delta_L)$ определяются по формулам:

$$U(\Delta f_L) = 2u(\Delta f_L); \quad (13) \quad U(\Delta \delta_L) = 2u(\Delta \delta_L). \quad (14)$$

Опорные значения и их неопределенности, которые заслуживают доверия, и в предположении того, что для результатов измерения правомерно приписать гауссово распределение, характеризуются распределением χ^2 .

Определяют характеристики этого распределения для результатов измерений погрешности напряжения χ_{fL}^2 и угловой погрешности $\chi_{\delta L}^2$ для каждого НМИ, который принимает участие в сличении, по формулам:

$$\chi_{f_L}^2 = \sum_{L=1}^n \frac{(f_L - f_0)^2}{u^2(f_L)}; \quad (15)$$

$$\chi_{\delta_L}^2 = \sum_{L=1}^n \frac{(\delta_L - \delta_0)^2}{u^2(\delta_L)}. \quad (16)$$

Распределение χ^2 характеризуется отношением R_B :

$$\chi^2 = R_B^2 \cdot (n-1). \quad (17)$$

Отношение R_B определяют из формулы (17):

$$R_B = \sqrt{\frac{\chi^2}{n-1}}. \quad (18)$$

Функция χ^2 табулирована. Для вероятности $P = 0,95$ и числа степеней свободы $(n-1)$ определяют значение R_B по формуле (18).

Результаты расчета опорного значения и его неопределенности определяют на соответствие тесту R_B . Для каждого НМИ, который принимает участие в сличении, из совместного решения формул (15) – (17) определяют отношение R_{f_L} для результатов измерений погрешности напряжения и R_{δ_L} для угловой погрешности по формулам:

$$R_{f_L} = \sqrt{\frac{\sum_{L=1}^n u^{-2}(f_L) \cdot (f_L - f_0)}{n-1}}; \quad (19)$$

$$R_{\delta_L} = \sqrt{\frac{\sum_{L=1}^n u^{-2}(\delta_L) \cdot (\delta_L - \delta_0)}{n-1}}. \quad (20)$$

Отбирают результаты измерений тех лабораторий, для которых выполняется неравенство:

$$R_{f_L} > R_B; \quad (21) \quad R_{\delta_L} > R_B. \quad (22)$$

Для этих лабораторий определяют доверительные коэффициенты для результатов измерений погрешности напряжения $E_n(f_L)$ и для угловой погрешности $E_n(\delta_L)$ по формулам:

$$E_n(f_L) = \frac{|\Delta f_L|}{2u(\Delta f_L)}; \quad (23)$$

$$E_n(\delta_L) = \frac{|\Delta \delta_L|}{2u(\Delta \delta_L)}. \quad (24)$$

Результаты лабораторий с доверительными коэффициентами больше единицы:

$$E_n(f_L) > 1; \quad (25) \quad E_n(\delta_L) > 1, \quad (26)$$

не включают для расчета окончательных опорных значений и их неопределенностей.

Рассчитывают окончательные (без исключенных НМИ) опорные значения КС по формулам (3) и (4), их суммарные стандартные неопределенности по формулам (5) и (6), а также расширенные неопределенности опорного значения по

формулам (7) и (8).

Определяют степень эквивалентности каждого национального эталона, т.е. степень, до которой значение национального эталона соответствует опорному значению КС. Она выражается количественно как отклонение результатов измерений НМИ (без исключенных НМИ), которые принимают участие в сличении, от опорного значения КС для погрешности напряжения $\Delta(f_L)$ и угловой погрешности $\Delta(\delta_L)$ по формулам (9) и (10) и как расширенные неопределенности этих отклонений по формулам (13) - (14).

Для НМИ, результаты измерений которых не включают для расчета окончательных опорных значений сличения, расширенные неопределенности определяют по формулам:

$$U(\Delta f_L) = 2\sqrt{u^2(f_L) + u^2(f_0)}; \quad (27)$$

$$U(\Delta \delta_L) = 2\sqrt{u^2(\delta_L) + u^2(\delta_0)}. \quad (28)$$

Оформление результатов КС. По результатам сличений подготавливается отчет, в котором делаются выводы об установлении степени эквивалентности каждого национального эталона участника сличения, а также способ подтверждения заявленных калибровочных и измерительных возможностей (СМС).

Выводы

Приведены алгоритмы нахождения опорного значения КС и установления степени эквивалентности для национальных эталонов отношений напряжения. Эти данные будут положены в основу технического протокола КС.

Список литературы

1. ГОСТ 18685-73. Трансформаторы тока и напряжения. Термины и определения.
2. СООМЕТ R/GM/11:2006. Рекомендация КООМЕТ. Положение о сличении эталонов национальных метрологических институтов КООМЕТ.
3. СООМЕТ R/GM/14:2006. Рекомендация КООМЕТ. Руководство по оцениванию данных ключевых сличений КООМЕТ.
4. Cox M.G. The evaluation of key comparison data // Metrologia. – 2002. – № 39. – P. 589-595.
5. ДСТУ ГОСТ 1983-2003. Трансформатори напруги. Загальні технічні умови.
6. ГОСТ 8.216-88. ГСИ. Трансформаторы напряжения. Методика поверки.
7. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения: 2-е изд., перераб. и доп.; Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.

Поступила в редколлегию 14.05.2007

Рецензент: канд. техн. наук, доц. А.Б. Егоров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.