

УДК 001.4:389.1

О.Н. Величко, С.Р. Карпенко, В.Н. Гачок

*ГП «Всеукраинский государственный научно-производственный центр стандартизации, метрологии, сертификации и защиты прав потребителей», научно-производственный институт метрологического обеспечения измерений электромагнитных величин, Киев*

## **ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ КАЛИБРОВКЕ РАБОЧИХ ЭТАЛОНОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НА ГОСУДАРСТВЕННОМ ЭТАЛОНЕ ЕДИНИЦ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ**

*Для метрологического обеспечения высокоточных средств учета электрической энергии в Государственном предприятии «Укрметртестстандарт» хранится Государственный эталон единиц электрической мощности и коэффициента мощности. Проведена оценка суммарной стандартной неопределенности измерений при калибровке рабочих эталонов коэффициента мощности на указанном государственном эталоне.*

**Ключевые слова:** неопределенность, коэффициент мощности, калибровка, эталон.

### **Введение**

Для метрологического обеспечения высокоточных средств учета электрической энергии в Государственном предприятии (ГП) «Укрметртестстандарт» с 2002 г. функционирует Государственный эталон единиц электрической мощности и коэффициента мощности (ДЕТУ 08-08-02, далее – Государственный эталон). Утверждена «Государственная поверочная схема для средств измерений электрической мощности и коэффициента мощности в диапазоне частот от 40 до 20000 Гц» (ДСТУ 4116) [1], которая устанавливает порядок передачи размера единиц электрической мощности и коэффициента мощности от Государственного эталона с помощью вторичных и рабочих эталонов рабочим средствам измерений.

Всего в Украине эксплуатируется более 500 единиц рабочих эталонов электрической мощности, электрической энергии и коэффициента мощности первого (класс точности 0,02 и 0,05) и второго разрядов (класс точности 0,1 и 0,2). С помощью этих рабочих эталонов осуществляется метрологическое обеспечение более чем 30-ти миллионов рабочих средств измерительной техники электрической мощности, электрической энергии (электросчетчиков) и коэффициента мощности.

Анализ подтвержденных метрологических характеристик рабочих эталонов, которые исследовались на Государственном эталоне, показал, что наиболее высокую стабильность показали рабочие эталоны высокого класса точности производства компании ZERA (Германия) и НПО «Квант» (Российская Федерация). Среди производителей рабочих эталонов более низких классов точности хорошо себя зарекомендовали рабочие эталоны компаний ZERA, MTE и EMH.

Для подтверждения измерительных и калибровочных возможностей ГП «Укрметртестстандарт» как национального метрологического института (НМИ) Украины и установления степени эквивалентности Государственного эталона с национальными эталонами, которые хранятся в других НМИ, в 2006 – 2011 гг. эталон ДЕТУ 08-08-02 принял участие в международных сличениях по проекту EURAMET.EM-K5.1 (проект EURAMET № 687). В сличениях принимали участие НМИ из 12 стран, среди которых НМИ Германии, Франции, Нидерландов, Финляндии, Индии. Результаты сличений опубликованы на сайте Международного бюро по мерам и весам (BIPM) в Базе данных ключевых сличений (KCDB) [2].

В 2008 – 2012 гг. ГП «Укрметртестстандарт» проводило как пилотная лаборатория международные сличения национальных эталонов электрической мощности трех НМИ (Болгарии, Украины и Беларуси) в рамках проекта COOMET.EM-S2 (проект COOMET 344/UA/05). Пилотной лабораторией завершено согласование финального отчета о сличениях [3], который в дальнейшем будет опубликован в KCDB.

В последние годы энергогенерирующие и энергоснабжающие предприятия и производители счетчиков электрической энергии интенсивно обновляют парк средств измерительной техники электрической мощности высоких классов точности. Значительно возросла потребность в калибровке рабочих эталонов для испытательных и калибровочных лабораторий, аккредитованных Национальным агентством по аккредитации Украины в соответствии с требованиями национального стандарта ДСТУ ISO/IEC 17025 [4].

Для обеспечения обработки результатов и оценки неопределенности измерений при калибров-

ке рабочих эталонов электрической мощности и коэффициента мощности в ГП «Укрметртестстандарт» разработана методика калибровки «МКУ 032-11/08-2011 Метрология. Рабочие эталоны электрической мощности и коэффициента мощности в режиме измерения активной электрической мощности. Методика калибровки на государственном эталоне ДЕТУ 08-08-02».

## Основной раздел

### 1. Особенности измерения коэффициента мощности

Активная мощность – величина, которая характеризует процесс преобразования электроэнергии в какой-либо другой вид энергии и определяется по формуле (1):

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (1)$$

Множитель  $\cos \varphi$ , входящий в приведенную формулу (1), называется *коэффициентом мощности*. Он показывает, какая часть полной мощности при данной нагрузке преобразуется в полезную. На рис. 1 показана зависимость активной мощности в цепях переменного тока при различных значениях коэффициента мощности.

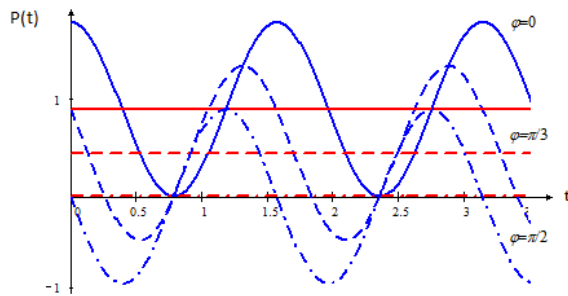


Рис. 1. Зависимость активной мощности в цепях переменного тока при различных значениях коэффициента мощности (среднее значение  $P$  – горизонтальные прямые): сплошные линии –  $\varphi = 0$ , штриховые –  $\varphi = \pi/3$ , штрих-пунктирные –  $\varphi = \pi/2$

Рациональная эксплуатация источников тока и линий электропередачи требует, чтобы доля активной мощности в общем её количестве была как можно больше, поэтому необходимо стремиться к увеличению коэффициента мощности. Чем ближе нагрузка по своему характеру к активной, тем коэффициент мощности ближе к единице.

На рис. 1 видно, что график мгновенной мощности частично заходит в отрицательную область и тем больше, чем меньше коэффициент мощности. При этом доля полезной мощности  $P$  уменьшается. Если  $\varphi = \pi/2$ , что характерно для реактивной нагрузки, полезная мощность обращается в нуль.

Чтобы получить необходимую полезную мощность при малом  $\cos \varphi$ , приходится обеспечивать

большой ток. При этом возрастают потери энергии на внутреннем сопротивлении источника, а также в подводящих проводах. Поэтому вопрос об увеличении коэффициента мощности всегда актуален.

### 2. Оценка неопределенности при калибровке измерителей коэффициента мощности

Процедура калибровки рабочих эталонов электрической мощности при измерении активной электрической мощности описана в работе [5].

В данной статье описана методика оценивания неопределенности результатов измерений при калибровке измерителей коэффициента мощности.

В соответствии с эксплуатационной документацией подключают калибруемый рабочий эталон коэффициента мощности к эталону ДЕТУ 08-08-02 и проводят его опробование рис. 2.

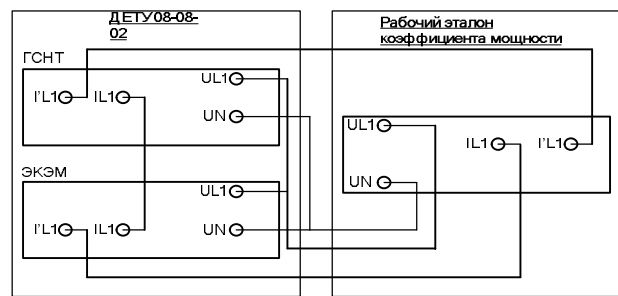


Рис. 2. Схема подключения рабочего эталона к эталону ДЕТУ 08-08-02

Калибровка рабочего эталона коэффициента мощности проводится в соответствии с обобщенной структурной схемой измерений, приведенной на рис. 3.

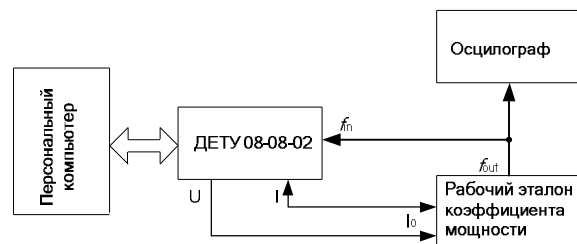


Рис. 3. Обобщенная структурная схема измерений

Модель измерения в соответствии со схемой измерения в относительной форме имеет вид:

$$\delta_k = \delta'_{\text{опкм}} + \Delta'_{\text{оЭТ}} + \theta'_{\text{оЭТ}} + \delta_{\text{кв}}, \quad (2)$$

где  $\Delta'_{\text{оЭТ}}$  – случайная составляющая погрешности (СКО) эталона ДЕТУ 08-08-02 по коэффициенту мощности в относительной форме (с паспорта эталона ДЕТУ 08-08-02);

$\theta'_{\text{оЭТ}}$  – неисключенная систематическая погрешность (НСП) эталона ДЕТУ 08-08-02 по коэф-

фіцієнту потужності в відносительній формі (с паспорту еталона ДЕТУ 08-08-02);

$\delta_{\text{кв}}$  – погрешность квантования для калибруемого рабочего эталона в относительной форме;

$\delta'_{\text{опкм}}$  – значение относительной погрешности получены расчетным путем,  $\delta'_{\text{опкм}} = \frac{\lambda_{\text{рЭ}} - \lambda_{\text{ЭТ}}}{\lambda_{\text{ЭТ}}}$ ;

$\lambda_{\text{рЭ}}$  – значение коэффициента мощности, измеренное рабочим эталоном;

$\lambda_{\text{ЭТ}}$  – опорное значение коэффициента мощности, полученное с помощью эталона ДЕТУ 08-08-02.

При обработке результатов измерений используется их приведение к прямым измерениям, что позволяет не учитывать при расчетах корреляцию, возникающую из-за использования общей меры. При проведении многократных измерений коэффициента мощности, результат калибровки будет определяться по формуле (3):

$$\hat{\delta}_{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{\text{рЭ}i} - \lambda_{\text{ЭТ}}}{\lambda_{\text{ЭТ}}}, \quad (3)$$

где  $\hat{\delta}_{\text{кλ}}$  – определяют на основании экспериментальных данных для серии из 20 измерений коэффициента мощности ( $n = 20$ );

$\lambda_{\text{рЭ}i}$  –  $i$ -й результат измерения коэффициента мощности с помощью рабочего эталона.

В соответствии с моделью измерения при расчете суммарной стандартной неопределенности учитывается ряд составляющих в форме относительных стандартных неопределенностей.

Составляющая неопределенности по типу А – неопределенность, связанная с рассеянием относительной разности показаний калибруемого рабочего эталона и эталона ДЕТУ 08-08-02, определяется по формуле (4):

$$u_A(\delta_{\text{кλ}}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda_{\text{рЭ}i} - \lambda_{\text{ЭТ}}}{\lambda_{\text{ЭТ}}} - \hat{\delta}_{\text{кλ}} \right)^2}. \quad (4)$$

Число степеней свободы для составляющей  $v_A = n - 1 = 19$ .

Составляющие неопределенности по типу В вычисляются по метрологическим характеристикам эталона ДЕТУ 08-08-02, приведенных его в паспорте.

Составляющая неопределенности  $u_{\text{В1}}(\delta_{\text{кλ}})$  – неопределенность, полученная из значения НСП (в относительной форме –  $\theta'_{\text{оЭТ}}$ ) эталона ДЕТУ 08-08-02 в предположении равномерного распределения НСП внутри границ (коэффициент охвата  $k = \sqrt{3}$ ), которая составляет:  $u_{\text{В1}}(\delta_{\text{кλ}}) = \theta'_{\text{оЭТ}} / k = 3,46 \cdot 10^{-4}$ .

Вторая составляющая неопределенности – неопределенность эталона ДЕТУ 08-08-02, полученная из значения его случайной составляющей погреш-

ности, равная СКО этой составляющей (в соответствии с паспортом эталона ДЕТУ 08-08-02), которая составляет:  $u_{\text{В2}}(\delta_{\text{кλ}}) = 1 \cdot 10^{-4}$ .

Третья составляющая неопределенности – неопределенность, связанная с погрешностью квантования ( $\delta_{\text{кв}}$ ) для калибруемого рабочего эталона коэффициента мощности. Составляющая выражается через единицу младшего разряда (ЕМР) калибруемого рабочего эталона коэффициента мощности и вычисляется по следующей формуле (5):

$$u_{\text{В3}}(\delta_{\text{кλ}}) = \frac{0,5\text{ЕМР}}{\lambda_{\text{к}} \sqrt{3}}, \quad (5)$$

где  $\lambda_{\text{к}}$  – значение коэффициента мощности.

Бюджет неопределенности измерения при калибровке рабочего эталона по коэффициенту мощности приведен в табл. 1.

Суммарную относительную стандартную неопределенность результата измерения коэффициента мощности определяют по формуле (6):

$$u_c(\delta_{\text{кλ}}) = \sqrt{\left( u_A(\delta_{\text{кλ}}) \right)^2 + \sum_{i=1}^m \left( u_{\text{В}i}(\delta_{\text{кλ}}) \right)^2}, \quad (6)$$

где  $m$  – количество составляющих неопределенности с оцениванием по типу В (в данном случае  $m = 3$ ).

Относительную расширенную неопределенность результата измерения коэффициента мощности оценивают по формуле (7):

$$U(P) = t(P, v_{\text{eff}}) \cdot u_c(\delta_{\text{кλ}}), \quad (7)$$

где  $t(P, v_{\text{eff}})$  – коэффициент Стьюдента для вероятности  $P=0,95$  и эффективного числа степеней свободы  $v_{\text{eff}}$ , которое в соответствии со стандартом ДСТУ–Н РМГ 43:2006 [6] рассчитывается по формуле:

$$v_{\text{eff}} = v_A \left[ u_c(\delta_{\text{к}}) / u_A(\delta_{\text{к}}) \right]^4. \quad (8)$$

## Выводы

Предложенная методика оценки неопределенности, в которой проведена оценка всех составляющих суммарной стандартной неопределенности, позволяет осуществлять калибровку высокоточных рабочих эталонов коэффициента мощности на Государственном эталоне единиц электрической мощности и коэффициента мощности в соответствии с установленными требованиями к аккредитованным испытательным и калибровочным лабораториям.

Реализация представленной методики позволяет обеспечивать документально подтвержденную метрологическую прослеживаемость рабочих эталонов коэффициента мощности к государственному эталону Украины, эквивалентному аналогичным национальным эталонам, которые хранятся в нацио-

нальных метрологических институтах других стран.

Таблица 1

Бюджет неопределенности измерения  
при калибровке рабочего эталона по коэффициенту мощности

Входная величина	Оценка входной величины	Стандартная неопределенность	Тип оценивания стандартной неопределенности	Распределение вероятностей входной величины	Число степеней свободы	Относительный вклад неопределенности
Относительная разность показаний калибруемого рабочего эталона и эталона ДЕТУ 08-08-02, $\hat{\delta}_{к\lambda}$	$\hat{\delta}_{к\lambda}$	$u_A(\delta_{к\lambda})$	A	Нормальный	$n - 1$	$\frac{u_A^2(\delta_{к\lambda})}{u_c^2(\delta_{к\lambda})} \cdot 100\%$
НСП эталона ДЕТУ 08-08-02, $\theta'_{0ЭТ}$	0	$u_{B1}(\delta_{к\lambda})$	B	Равномерный	$\infty$	$\frac{u_{B1}^2(\delta_{к\lambda})}{u_c^2(\delta_{к\lambda})} \cdot 100\%$
Случайная составляющая погрешности эталона ДЕТУ 08-08-02, $\Delta'_{0ЭТ}$	0	$u_{B2}(\delta_{к\lambda})$	B	Нормальный	$\infty$	$\frac{u_{B2}^2(\delta_{к\lambda})}{u_c^2(\delta_{к\lambda})} \cdot 100\%$
Погрешность квантования рабочего эталона, $\delta_{кв}$	0	$u_{B3}(\delta_{к\lambda})$	B	Равномерный		$\frac{u_{B3}^2(\delta_{к\lambda})}{u_c^2(\delta_{к\lambda})} \cdot 100\%$
<b>Выходная величина</b>	$\hat{\delta}_{к\lambda}$	$u_c(\delta_{к\lambda})$	–	Нормальный	$\nu_{eff}$	Относительная расширенная неопределенность U(P)

## Список литературы

1. ДСТУ 4116-2002 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань електричної потужності і коефіцієнта потужності у діапазоні частот від 40 до 20000 Гц.

2. Електронний ресурс. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.bipm.org/exalead\\_kcdb/exa\\_kcdb.jsp?\\_p=AppB&q=EURAMET.EM-K5.1&x=0&y=0](http://www.bipm.org/exalead_kcdb/exa_kcdb.jsp?_p=AppB&q=EURAMET.EM-K5.1&x=0&y=0).

3. Електронний ресурс. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.bipm.org/exalead\\_kcdb/exa\\_kcdb.jsp?\\_p=AppB&q=COOMET.EM-S2&x=0&y=0](http://www.bipm.org/exalead_kcdb/exa_kcdb.jsp?_p=AppB&q=COOMET.EM-S2&x=0&y=0).

4. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.

5. Velychko O. Uncertainty evaluation of calibration of the working standard of electrical power with using of the State standard of the unit of electrical power / O. Velychko, S. Karpenko, V. Gachok // Lecture Notes in Information Technology. – Hong Kong, 2012. – Vol. 13. – P. 293-298.

6. ДСТУ–Н РМГ 43:2006. Метрологія. Застосування «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.

## ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕННОСТІ ПРИ КАЛІБРУВАННІ РОБОЧИХ ЕТАЛОНІВ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ НА ДЕРЖАВНОМУ ЕТАЛОНІ ОДИНИЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ І КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ

О.М. Величко, С.Р. Карпенко, В.М. Гачок

Для метрологічного забезпечення високоточних засобів обліку електричної енергії в Державному підприємстві «Укрметртестстандарт» функціонує Державний еталон одиниць електричної потужності і коефіцієнта потужності. Наведена оцінка невизначеності вимірювань при калібруванні робочих еталонів коефіцієнта потужності на вказаному державному еталоні.

**Ключові слова:** невизначеність, коефіцієнт потужності, калібрування, еталон.

## UNCERTAINTY EVALUATION OF THE CALIBRATION OF POWER FACTOR WORKING STANDARDS ON THE STATE STANDARD OF THE ELECTRICAL POWER AND POWER FACTOR UNIT

O.M. Velychko, S.R. Karpenko, V.N. Gachok

The State Standard of the electric power and power factor units is functioning in State Enterprise "Ukrmetrteststandard" for the metrology providing of high-fidelity measurement instruments of electric energy. An estimation of measurement uncertainty at calibration of power factor working standards with using indicated State Standard is shown.

**Keywords:** vagueness, power-factor, calibration, standard.