

С.А. Ахмадов

## МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ЗАЯВЛЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ УКРАИНЫ

В данной статье рассмотрена методика расчета поправок и оценивания заявленной неопределенности при воспроизведении единицы активной электрической мощности на государственном эталоне единиц электрической мощности и коэффициента мощности Украины, соответствующая требованиям «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements».

*государственный эталон, воспроизведение, мощность, коэффициент мощности, неопределенность, погрешность, поправка*

**Анализ источников неопределенности результата воспроизведения активной электрической мощности.** В основе воспроизведения единицы активной электрической мощности лежит метод сравнения при помощи термоэлектрических преобразователей, постоянного и переменного напряжения, а также постоянного и переменного тока [1, 2]. Ниже приводятся основные источники неопределенности результата воспроизведения.

**Мера постоянного напряжения.** Мера постоянного напряжения используется для калибровки вольтметра постоянного напряжения. Значение напряжения меры известно с неопределенностью  $\tilde{\theta}_{МН}$  (далее по тексту знак тильды над обозначением указывает, что величина выражена в относительных единицах).

**Вольтметр постоянного напряжения HP3458A.** Перед проведением процедуры воспроизведения, вольтметр постоянного напряжения калибруют по мере постоянного напряжения. При определении неопределенности, вносимой вольтметром, пользуются паспортными данными вольтметра (табл. 1).

Таблица 1

Паспортные данные вольтметра

Диапазон измерения	Неопределенность от значения, %	Неопределенность от диапазона, %	Дополнительная неопределенность (для диапазона измерения 1000 В)
1000 В	0,0006	0,00001	$0,0012 \cdot (V_{in}/1000)^2$
100 В	0,0006	0,00003	-
10 В	0,00041	0,000005	-
1 В	0,00046	0,00003	-
0,1 В	0,0005	0,0003	-

Примечание:  $V_{in}$  – значение постоянного напряжения, измеряемое вольтметром.

Формулы для расчета неопределенности вольтметра постоянного напряжения (с учетом неопреде-

ленности меры напряжения  $\tilde{\theta}_{МН}$ ) на разных пределах представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Относительная неопределенность  $\tilde{\theta}_{VDC}$

Диапазон измерения	Значение неопределенности, %
1000 В	$\tilde{\theta}_{МН} + 0,0006 + 0,00001 \cdot (1000 / V_{in}) + 0,0012 \cdot (V_{in} / 1000)^2$
100 В	$\tilde{\theta}_{МН} + 0,0006 + 0,00003 \cdot (100 / V_{in})$
10 В	$\tilde{\theta}_{МН} + 0,00041 + 0,000005 \cdot (10 / V_{in})$
1 В	$\tilde{\theta}_{МН} + 0,00046 + 0,00003 \cdot (1 / V_{in})$
0,1 В	$\tilde{\theta}_{МН} + 0,0005 + 0,0003 \cdot (0,1 / V_{in})$

Таблица 3

Абсолютная неопределенность  $\theta_{VDC}$

Предел измерения	Значение неопределенности, В
1000 В	$V_{in} \cdot (\tilde{\theta}_{VDC1000}) / 100$
100 В	$V_{in} \cdot (\tilde{\theta}_{VDC100}) / 100$
10 В	$V_{in} \cdot (\tilde{\theta}_{VDC10}) / 100$
1 В	$V_{in} \cdot (\tilde{\theta}_{VDC1}) / 100$
0,1 В	$V_{in} \cdot (\tilde{\theta}_{VDC0,1}) / 100$

При расчетах используются два различных значения для  $\tilde{\theta}_{VDC}$  и  $\theta_{VDC}$ , а именно:

– при измерении напряжения:  $\tilde{\theta}_{VDC\_V}$  (%) и  $\theta_{VDC\_V}$  (В);

– при измерении тока косвенным методом:  $\tilde{\theta}_{VDC\_I}$  (%) и  $\theta_{VDC\_I}$  (А).

$\theta_{VDC\_I}$  выражается в абсолютных единицах и приводится к амперам по формуле:

$$\theta_{V_{DC\_I}} = \theta_{V_{DC}} / R, \quad (1)$$

где  $\theta_{V_{DC}}$  – неопределенность в соответствии с диапазоном измерения вольтметра;  $R$  – сопротивление шунта, используемого при измерении тока косвенным методом.

*Эталонные меры электрического сопротивления (1-го разряда) (шунты).* Измерение постоянного тока осуществляется косвенным методом, а именно, при помощи измерения напряжения, выделяемого на шунте, который включен в цепь тока.

При аттестации эталона используются три шунта с номинальными значениями сопротивления: 1 Ом; 0,1 Ом; 0,01 Ом.

Зависимость сопротивления шунтов от температуры имеет вид:

$$R(t) = R_{ном} + (\alpha \cdot (t - 20)) + (\beta \cdot (t - 20) \cdot (t - 20)),$$

где  $R_{ном}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – значения, определенные при калибровке шунтов.

Температура шунта измеряется при помощи встроенного в него термометра.

У шунта есть две основные составляющие неопределенности:  $\tilde{\theta}_R$  и  $\tilde{\theta}_{Rt}$  (обе составляющие выражены в процентах):

$\tilde{\theta}_R$  – это неопределенность калибровки шунта (с учетом дрейфа от времени);

$\tilde{\theta}_{Rt}$  – это неопределенность определения значения сопротивления шунта, обусловленная неопределенностью измерения температуры:

$$\tilde{\theta}_{Rt} = 100 \cdot \frac{R(t + \Delta t) - R(t)}{R(t)},$$

где  $t$  – температура (градусы Цельсия), измеренная при помощи встроенного термометра;  $\Delta t$  – неопределенность измерения температуры (градусы Цельсия).

В формуле расчета неопределенности результата воспроизведения единицы активной электрической мощности используются две составляющие неопределенности шунта ( $\theta_R$  и  $\theta_{Rt}$ ), выраженные в абсолютных единицах и приведенные к амперам.

Составляющие неопределенности шунта  $\theta_R$  и  $\theta_{Rt}$  рассчитываются по формулам:

$$\theta_R = \left| -\frac{V_R}{R^2} \right| \cdot \frac{\tilde{\theta}_R \cdot R}{100}; \quad (2)$$

$$\theta_{Rt} = \left| -\frac{V_R}{R^2} \right| \cdot \frac{\tilde{\theta}_{Rt} \cdot R}{100}, \quad (3)$$

где  $R$  – значение сопротивления шунта, используемого при измерении тока косвенным методом;  $V_R$  – напряжение, выделяемое на шунте при прохождении через него измеряемого тока.

*Термопреобразователь.* Термопреобразователь используется для сравнения переменного напряжения с постоянным напряжением.

Так как термопреобразователь не идеален, то для получения на его выходе одного и того же напряжения, необходимо подать на его вход незначительно отличающиеся напряжения  $V_{AC}$  (переменное) и  $V_{DC}$  (постоянное). Эта разница выражается в поправке термопреобразователя и определяется как:

$$\tilde{\delta}_{ТП} = 100 \cdot (V_{AC} - V_{DC}) / V_{DC}, \quad (4)$$

где  $\tilde{\delta}_{ТП}$  выражается в процентах.

При обработке результатов измерений, в которых использовался термопреобразователь, необходимо учитывать его поправку.

Поправка термопреобразователя  $\tilde{\delta}_{ТП}$  используется при вычислении поправок эталона по напряжению и току.

Помимо поправки, термопреобразователь характеризуется неопределенностью  $\tilde{\theta}_{ТП}$  (выражается в процентах).

В формуле расчета неопределенности результата воспроизведения единицы активной электрической мощности используются две неопределенности термопреобразователя ( $\theta_{ТП\_V}$  и  $\theta_{ТП\_I}$ ), выраженные в абсолютных единицах, а именно:

– при измерении напряжения

$$\theta_{ТП\_V} = (\tilde{\theta}_{ТП} \cdot V_{in}) / 100, \text{ В};$$

– при измерении тока косвенным методом

$$\theta_{ТП\_I} = (\tilde{\theta}_{ТП} \cdot I_{in}) / 100, \text{ А},$$

где  $V_{in}$  – номинальное напряжение, при котором проводилось измерение, В;  $I_{in}$  – номинальный ток, при котором проводилось измерение, А.

*Измеритель угла сдвига фазы.* Неопределенность измерения угла сдвига фазы влияет на неопределенность измерения активной электрической мощности. Для учета и уменьшения данного влияния используются:

– поправка измерителя угла сдвига фазы  $\Delta_\varphi$  (выражается в градусах);

– неопределенность измерителя угла сдвига фазы  $\theta_\varphi$  (выражается в градусах).

Поправка измерителя угла сдвига фазы  $\Delta_\varphi$  определяется как:

$$\Delta_\varphi = \text{Физм} - \text{Фист}. \quad (5)$$

При аттестации измерителя угла сдвига фазы, определяют значения  $\Delta_\varphi$  и  $\theta_\varphi$  для разных углов сдвига фазы между напряжением и током.

Поправка измерителя угла сдвига фазы  $\Delta_\varphi$  используется при вычислении поправки эталона по активной электрической мощности.

Неопределенность измерителя угла сдвига фазы  $\theta_\varphi$  используется в формуле расчета неопределенности результата воспроизведения единицы активной электрической мощности.

**Вычисление поправок эталона по напряжению, току и активной электрической мощности.** Ниже приводится вывод формул для расчета поправок, используемых при воспроизведении единицы активной электрической мощности на государственном эталоне единиц электрической мощности и коэффициента мощности Украины.

*Поправка эталона по напряжению.* Поправка в целевом диапазоне напряжения  $\delta_V$  (выражается в процентах) вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \delta_V &= \bar{\delta}_V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{Vi} = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{V_{AC\text{ИЗМ}i} - V_{AC\text{ИСТ}i}}{V_{AC\text{ИСТ}i}} \cdot 100\% \right) = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{V_{AC\text{ИЗМ}i}}{V_{AC\text{ИСТ}i}} - 1 \right) \cdot 100 \right) = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{V_{AC\text{ИЗМ}i}}{V_{DCi} \cdot \left( 1 + \frac{\tilde{\delta}_{ТП}}{100} \right)} - 1 \right) \cdot 100 \right) = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{V_{AC\text{ИЗМ}1i} + V_{AC\text{ИЗМ}2i}}{\frac{|V_{DC+i}| + |V_{DC-i}|}{2} \cdot \left( 1 + \frac{\tilde{\delta}_{ТП}}{100} \right)} - 1 \right) \cdot 100 \right) \end{aligned}$$

Итак,

$$\delta_V = \frac{1}{n} \times \left( \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{V_{AC\text{ИЗМ}1i} + V_{AC\text{ИЗМ}2i}}{\frac{|V_{DC+i}| + |V_{DC-i}|}{2} \cdot \left( 1 + \frac{\tilde{\delta}_{ТП}}{100} \right)} - 1 \right) \cdot 100 \right) \right), \quad (6)$$

где  $n$  – количество измерений.

*Поправка эталона по току.* Поправка в целевом диапазоне тока  $\delta_I$  (выражается в процентах) вычисляется по формуле:

$$\delta_I = \bar{\delta}_I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{Ii} =$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{I_{AC\text{ИЗМ}i} - I_{AC\text{ИСТ}i}}{I_{AC\text{ИСТ}i}} \cdot 100\% \right) =$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{I_{AC\text{ИЗМ}i}}{I_{AC\text{ИСТ}i}} - 1 \right) \cdot 100 \right) =$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{I_{AC\text{ИЗМ}i}}{I_{DCi} \cdot \left( 1 + \frac{\tilde{\delta}_{ТП}}{100} \right)} - 1 \right) \cdot 100 \right) =$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{I_{AC\text{ИЗМ}1i} + I_{AC\text{ИЗМ}2i}}{\frac{|V_{R\_DC+i}| + |V_{R\_DC-i}|}{2 \cdot R} \cdot \left( 1 + \frac{\tilde{\delta}_{ТП}}{100} \right)} - 1 \right) \cdot 100 \right)$$

Итак,

$$\delta_I = \frac{1}{n} \times$$

$$\left( \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{I_{AC\text{ИЗМ}1i} + I_{AC\text{ИЗМ}2i}}{\frac{|V_{R\_DC+i}| + |V_{R\_DC-i}|}{2 \cdot R} \cdot \left( 1 + \frac{\tilde{\delta}_{ТП}}{100} \right)} - 1 \right) \cdot 100 \right) \right), \quad (7)$$

где  $n$  – количество измерений;  $R$  – сопротивление шунта;  $V_{R\_DCi}$  – напряжение, выделяемое на шунте при прохождении через него постоянного тока  $I_{DCi}$ .

*Поправка эталона по активной электрической мощности.* Поправка эталона по активной электрической мощности (при соответствующей комбинации целевого диапазона напряжения и целевого диапазона тока)  $\delta_P$  (выражается в процентах) вычисляется по формуле:

$$\delta_P = \left( \left( 1 + \frac{\delta_V}{100} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\delta_I}{100} \right) \times \frac{\cos(\varphi_{ИЗМ} \cdot \pi/180)}{\cos((\varphi_{ИЗМ} - \Delta_\varphi) \cdot \pi/180)} - 1 \right) \cdot 100, \quad (8)$$

где  $\delta_P = \frac{P_{ИЗМ} - P_{ИСТ}}{P_{ИСТ}} \cdot 100\%$  – поправка эталона по

активной мощности;  $\delta_V$  – поправка в целевом диапазоне напряжения;  $\delta_I$  – поправка в целевом диапазоне тока;  $\varphi_{ИЗМ}$  – угол сдвига фазы, при котором производится измерение;  $\Delta_\varphi = \varphi_{ИЗМ} - \varphi_{ИСТ}$  – поправка измерителя угла сдвига фазы (выражается в градусах).

**Оценка неопределенности воспроизведения единицы активной электрической мощности.**

Уравнение измерений:

$$P = f(V, I, \varphi) = V \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (9)$$

где  $P$  – активная электрическая мощность;  $V$  – действующее значение напряжения;  $I$  – действующее значение тока;  $\varphi$  – угол сдвига фазы между напряжением и током.

Коэффициенты влияния:

$$\frac{\partial f}{\partial V} = I \cdot \cos \varphi \text{ – коэффициент влияния напряжения;}$$

$$\frac{\partial f}{\partial I} = V \cdot \cos \varphi \text{ – коэффициент влияния тока;}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi} = -V \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ – коэффициент влияния угла сдвига фазы.}$$

СКО по напряжению. СКО  $\tilde{S}(\bar{V})$  (выражается в процентах), характеризующее случайную составляющую неопределенности (тип А) при измерениях напряжения, вычисляется по формуле:

$$\tilde{S}(\bar{V}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{V_i} - \bar{\delta}_V)^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (10)$$

СКО по напряжению, выраженное в абсолютных единицах, равно

$$S(\bar{V}) = (\tilde{S}(\bar{V}) \cdot V_{in}) / 100, \text{ В.} \quad (11)$$

СКО по току. СКО  $\tilde{S}(\bar{I})$  (выражается в процентах), характеризующее случайную составляющую неопределенности (тип А) при измерениях тока, вычисляется по формуле:

$$\tilde{S}(\bar{I}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{I_i} - \bar{\delta}_I)^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (12)$$

СКО по току, выраженное в абсолютных единицах, равно

$$S(\bar{I}) = \frac{\tilde{S}(\bar{I}) \cdot I_{in}}{100}, \text{ А.} \quad (13)$$

Суммарная стандартная неопределенность. Суммарную стандартную неопределенность  $u(P)$  (выражена в процентах) вычисляют по следующей формуле:

$$u(P) = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial V}\right)^2 \cdot \aleph_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial I}\right)^2 \cdot \aleph_2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \varphi}\right)^2 \cdot \aleph_3}}{P} \cdot 100\%, \quad (14)$$

$$\text{где } \aleph_1 = \left( \left( \frac{\theta_{VDC} \cdot V}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left( \frac{\theta_{ТП} \cdot V}{\sqrt{3}} \right)^2 + S(\bar{V})^2 \right);$$

$$\aleph_2 = \left( \theta_{VDC\_I} / \sqrt{3} \right)^2 + \left( \theta_{ТП\_I} / \sqrt{3} \right)^2 + \left( \theta_R / \sqrt{3} \right)^2 + \left( \theta_{Rt} / \sqrt{3} \right)^2 + S(\bar{I})^2;$$

$$\aleph_3 = \left( \theta_\varphi \cdot \pi / 180 \right) / \sqrt{3};$$

$P = V_{in} \cdot I_{in} \cdot \cos(\varphi_{ИЗМ} \cdot \pi / 180)$  – активная мощность;  $\varphi_{ИЗМ}$  – угол сдвига фазы, при котором производится измерение.

Эффективное число степеней свободы. Эффективное число степеней свободы вычисляют по формуле:

$$v_{\text{eff}} = \frac{\left( u(P) \cdot \left( V_{in} \cdot I_{in} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{ИЗМ} \cdot \pi}{180}\right) \right) / 100 \right)^4}{\aleph_1^4 / (n-1) + \aleph_2^4 / (n-1)}, \quad (15)$$

$$\text{где } \aleph_1 = I_{in} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{ИЗМ} \cdot \pi}{180}\right) \cdot S(\bar{V});$$

$$\aleph_2 = V_{in} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{ИЗМ} \cdot \pi}{180}\right) \cdot S(\bar{I}).$$

Расширенная неопределенность. Расширенную неопределенность (выражена в процентах) вычисляют по формуле:

$$U = k \cdot u(P), \quad (16)$$

где  $k$  – коэффициент охвата (выбирается в зависимости от эффективного числа степеней свободы и доверительной вероятности).

**Выводы.** Предложенная методика расчета поправок и оценивания заявленной неопределенности государственного эталона единиц электрической мощности и коэффициента мощности Украины обеспечивает расширенную неопределенность воспроизведения единицы электрической мощности на уровне от 0,003 до 0,008%.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Грановский В.А. Динамические измерения: основы метрологического обеспечения. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 221 с.
2. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. – СПб.: Питер, 2004. – 380 с.

Поступила 5.04.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.