

УДК 621.317

И.П. Захаров<sup>1</sup>, В.В. Князев<sup>2</sup>, Н.С. Шевченко<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина<sup>2</sup>Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина

## ПРОЦЕДУРА ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕЛЕНИЯ АТТЕНЮАТОРА НА ЭТАЛОНЕ СН

Рассматривается процедура оценивания неопределенности измерения коэффициента деления аттенюатора на эталоне СН, основанная на модельном подходе. По результатам анализа схемы измерительной установки и процедуры измерения составлено модельное уравнение, получены формулы для расчета относительных стандартных неопределенностей типа А и В, относительной суммарной стандартной и расширенной неопределенности измерения коэффициента деления аттенюатора. Составлен бюджет неопределенности измерения коэффициента деления аттенюатора, проведен анализ доминирующих вкладов неопределенности.

**Ключевые слова:** неопределенность измерения, эталон, коэффициент деления, стандартная неопределенность, суммарная стандартная неопределенность, расширенная неопределенность, метод редукации.

### Введение

Международные стандарты по электромагнитной совместимости (ЭМС) устанавливают требования к техническим средствам по устойчивости к действию электромагнитных помех, имеющих импульсную природу. Для метрологического обеспечения проведения таких испытаний в Украине создан эталон единиц максимальных значений напряженности импульсного электрического и магнитного полей (эталон РЭМП) [1]. Эталон РЭМП обеспечивает воспроизведение в рабочем объеме импульсов напряженностей электрического и магнитного полей, аттестацию и поверку средств измерений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей. Эталон РЭМП может быть также использован для метрологической аттестации шунтов и аттенюаторов (делителей) при реверсном его использовании. В таком случае эталон именуется – эталон СН (силы тока и напряжения).

При работе на эталонах международное соглашение [2] регламентирует производить оценивание заявленной неопределенности измерений. В статье рассматривается процедура оценивания неопределенности измерений на эталоне СН, основанная на модельном подходе, изложенном в [3, 4].

### 1. Анализ схемы измерительной установки

Схема измерительной установки представлена на рис. 1. При помощи осциллографов на выходе исследуемого аттенюатора в первом канале и на выходе датчика напряженности электрического поля во втором канале получают осциллограммы импульсов напряжений. Результат измерения определяют количеством делений на экране осциллографа, которые отвечают максимальному значению сигнала в первом

( $X_1$ ) и во втором ( $X_2$ ) каналах. Результат измерения коэффициента деления определяется при десятикратном воспроизведении импульса электрического поля. Обработка экспериментальных данных осуществляется графоаналитическим методом.

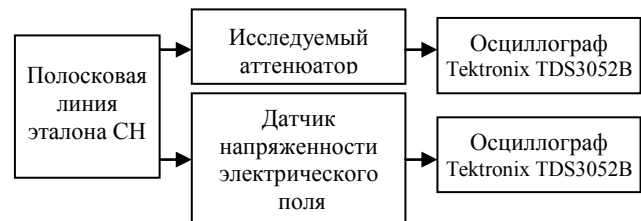


Рис. 1. Схема измерительной установки

### 2. Процедура оценивания неопределенности измерения коэффициента деления аттенюатора

Значение коэффициента деления рассчитывается через среднее арифметическое  $n$  результатов наблюдений отношения ( $X_2/X_1$ ). Таким образом, анализ схемы измерительной установки и процедуры измерения позволяет записать модельное уравнение в следующем общем виде:

$$k_a = \left( \frac{X_2}{X_1} \right) \frac{k_2 \cdot h}{k_1 \cdot k_1}, \quad (1)$$

где  $\left( \frac{X_2}{X_1} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{X_{2i}}{X_{1i}}$  (2);  $X_{1i}$ ,  $X_{2i}$  –  $i$ -ое наблюдение

максимального значения осциллограмм в первом и во втором каналах соответственно;  $k_1$  – коэффициент преобразования датчика напряженности электрического поля, В/(В/м);  $k_1$  – коэффициент чувствительности осциллографа по каналу 1, В/дел;  $k_2$  – коэффициент чувствительности осциллографа

по каналу 2, В/дел;  $h$  – высота полосковой линии, м.

Модельное уравнение (1) позволяет записать выражение для относительной суммарной стандартной неопределенности измеряемого параметра  $k_a$  (закон распространения неопределенности) как

$$\tilde{u}_c(k_a) = \sqrt{\tilde{u}_A^2(\overline{X_2/X_1}) + \tilde{u}_1^2 + \tilde{u}_h^2 + \tilde{u}_1^2 + \tilde{u}_2^2}, \quad (3)$$

где  $\tilde{u}_A(\overline{X_2/X_1}) = \frac{u_A(\overline{X_2/X_1})}{X_2/X_1} \cdot 100\%$  (4) – относительная неопределенность по типу А измерения отношения амплитуд осциллограмм импульсов, причем

$$u_A(\overline{X_2/X_1}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_{2i}/X_{1i} - \overline{X_2/X_1})^2}; \quad (5)$$

$\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_1, \tilde{u}_h$  – относительные стандартные неопределенности, соответственно, коэффициентов чувствительности вертикальных шкал осциллографов  $k_1, k_2$ , коэффициента преобразования датчика напряженности электрического поля  $k_1$  и измерения расстояния между электродами датчика  $h$ .

В общем виде относительная стандартная неопределенность по типу В  $j$ -й входной величины  $x_j$  определяется по формуле:

$$\tilde{u}(x_j) = u(x_j) \cdot 100\% / |\hat{x}_j|, \quad (6)$$

где  $u(x_j)$  – стандартная неопределенность по типу В:

$$u(x_j) = \theta_j / \alpha_j, \quad (7)$$

где  $\theta_j$  – границы неисключенной систематической погрешности (НСП)  $j$ -й входной величины;  $\alpha_j$  – коэффициент, который отвечает принятому закону распределения внутри границ НСП.

Если границы НСП входной величины представлены в относительном виде  $\tilde{\theta}_j$ , то относительная стандартная неопределенность по типу В определяется по формуле (7), в которую вместо  $\theta_j$  подставляют  $\tilde{\theta}_j$ .

Расширенная неопределенность искомого исходного параметра оценивается по формуле:

$$U(k_a) = \frac{t_{0,95}(v_{\text{eff}}) \cdot \hat{k}_a \cdot \tilde{u}_c(k_a)}{100\%}, \quad (8)$$

где  $t_{0,95}(v_{\text{eff}})$  – коэффициент охвата, определяемый по табл. Стьюдента для вероятности 0,95 и эффективного числа степеней свободы, которое рассчитывается по формуле Велча-Сатерсвейта:

$$v_{\text{eff}} = (n-1) \left[ \frac{\tilde{u}_c(k_a)}{\tilde{u}_A(\overline{X_2/X_1})} \right]^4. \quad (9)$$

По результатам расчетов составляется бюджет неопределенности (табл. 1) и производится запись результата измерения:

$$k_a = \hat{k}_a \pm U(k_a); p = 0,95.$$

#### 4. Пример оценивания неопределенности измерения коэффициента деления высоковольтного аттенюатора

Результаты наблюдений максимального значения осциллограмм в первом и втором каналах для одного из уровней испытательного напряжения приведены в табл. 2.

Реализация процедуры оценивания неопределенности измерения осуществляется в следующем порядке:

1. Осуществляется оценка входной величины  $\overline{X_2/X_1}$  по формуле (2), коэффициентов  $k_1, k_2, k_1$  и расстояния  $h$  по паспортным данным на соответствующие приборы. Рассчитывается оценка выходной величины  $k_a$  по формуле (1) при подстановке значений  $\overline{X_2/X_1}, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_1, \hat{h}$ . Для данного примера оценки входных величин и оценка выходной величины приведены в табл. 3.

2. Вычисляются стандартные неопределенности входных величин:

а) неопределенность измерения по типу А определяется для входной величины  $\overline{X_2/X_1}$  по формуле (5), а относительная неопределенность по типу А рассчитывается по формуле (4);

б) относительная неопределенность измерения по типу В определяется для параметров  $k_1, k_2, k_1$  по формуле (7), а относительная неопределенность по типу В для  $h$  рассчитывается по формуле (6).

Для данного примера границы НСП:

– для  $k_1, k_2$  границы НСП  $\theta_1 = \theta_2 = 1,5\%$  в предположении равномерного закона распределения погрешности внутри границ ( $\alpha = \sqrt{3}$ );

– для  $k_1$  и  $h$  границы НСП соответственно  $\theta_1 = 4,2\%, \theta_h = 0,11$  в предположении нормального распределения погрешности внутри границ с вероятностью 0,95 ( $\alpha = 1,96$ ).

3. Рассчитывается суммарная относительная стандартная неопределенность по формуле (3).

4. Рассчитывается по формуле (9) эффективное число степеней свободы и для полученного значения  $v_{\text{eff}}$  по табл. Стьюдента для вероятности 0,95 определяется коэффициент охвата. В данном примере для  $v_{\text{eff}} = 879748$  коэффициент охвата равен 1,96.

5) Вычисляется относительная расширенная неопределенность путем умножения суммарной относительной стандартной неопределенности на коэффициент охвата. Полученное значение заносится в бюджет неопределенности (табл. 3). Расширенная неопределенность в абсолютных единицах рассчитывается по формуле (8).

Таблица 1

Бюджет неопределенности измерений коэффициента деления аттенюатора

Входная величина	Оценки входных величин	Относительные стандартные неопределенности входных величин	Число степеней свободы	Распределение вероятностей
$\overline{X_2/X_1}$	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{X}_{2i}}{\hat{X}_{1i}}$	$\tilde{u}_A(\overline{X_2/X_1}), \%$	$n-1$	Стьюдент
$k_1$	$\hat{k}_1$	$\tilde{u}_1, \%$	$\infty$	Равномерный
$k_{\bar{1}}$	$\hat{k}_{\bar{1}}$	$\tilde{u}_{\bar{1}}, \%$	$\infty$	Нормальный
$k_2$	$\hat{k}_2$	$\tilde{u}_2, \%$	$\infty$	Равномерный
$h$	$\hat{h}$	$\tilde{u}_h, \%$	$\infty$	Нормальный
Выходная величина	Оценка выходной величины	Относительная суммарная стандартная неопределенность	Эффективное число степеней свободы	Расширенная неопределенность
$k_a$	$\hat{k}_a$	$\tilde{u}_c(k_a), \%$	$\nu_{\text{eff}}$	$U(k_a), \%$

Таблица 2

Результаты наблюдений максимального значения осциллограмм в первом и во втором каналах

№ набл., i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X_{1i}$	3,00	3,02	2,95	3,06	2,96	2,97	3,04	3,03	3,01	2,96
$X_{2i}$	2,95	2,98	2,92	2,99	2,91	2,92	2,98	2,96	2,97	2,92
$X_{2i}/X_{1i}$	0,983	0,987	0,990	0,977	0,983	0,983	0,980	0,977	0,987	0,986

Таблица 3

Бюджет неопределенности измерения коэффициента деления аттенюатора

Входная величина	Оценки входных величин	Относительные стандартные неопределенности входных величин, %	Число степеней свободы	Распределение вероятностей
$\overline{X_2/X_1}$	0,983	0,138	$n-1$	Стьюдент
$k_1$	0,2 В/дел.	0,87	$\infty$	Равномерный
$k_{\bar{1}}$	$2,15 \cdot 10^{-5}$ В/(В/м)	2,14	$\infty$	Нормальный
$k_2$	0,1 В/дел.	0,87	$\infty$	Равномерный
$h$	0,478 м	0,011	$\infty$	Нормальный
Выходная величина	Оценка выходной величины	Относительная суммарная стандартная неопределенность	Эффективное число степеней свободы	Расширенная неопределенность, %
$k_a$	10927	2,47	879748	4,845

б) Производится запись результата измерения коэффициента деления аттенюатора:

$$k_a = 10930 \pm 530 ; p = 0,95.$$

Результаты расчета неопределенности измерений коэффициента деления аттенюатора приведены в табл. 3.

### Выводы

1. Выявлены источники неопределенности измерения коэффициента деления аттенюатора при использовании эталона напряженности импульсных электрических и магнитных полей.

2. Разработана процедура оценивания неопределенности измерения коэффициента деления аттенюатора при помощи эталона РЭМП, основанная на методе редукции. Применение такого метода устраняет ряд трудностей при оценивании неопределенности измерений, обусловленных наличием корреляции, возникающей в связи с проведением одновременных измерений импульсных напряжений по двум каналам, и нелинейностью, возникающей в результате деления одного значения на другое.

3. Составлен бюджет неопределенности измерения коэффициента деления аттенюатора, проведен анализ доминирующих вкладов неопределенности. В рассмотренном примере основной вклад в неопределенность измерения коэффициента деления аттенюатора вносит стандартная неопределенность по

типу В коефіцієнта чутливості датчика напруженності електричного поля  $k_1$ , которая составляет 2,14 %.

### Список литературы

1. Кравченко В.И. Исходный эталон Украины импульсных электрических и магнитных полей – цель создания эталона, требования к нему и его конструктивные характеристики / В.И. Кравченко, Ю.С. Немченко // *Електротехніка та електромеханіка*. – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – № 2. – С. 76-79.
2. *Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by*

*national metrology institutes. – Paris: International Committee for Weights and Measures, 1999. – P. 6-13.*

3. *JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – JCGM, 2008. – 120 p.*

4. ДСТУ-Н РМГ 43:2006. *Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений»*. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 23 с.

Поступила в редколлегию 21.04.2010

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

### ПРОЦЕДУРА ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОДІЛЕННЯ АТЕНЮАТОРА НА ЕТАЛОНІ СН

І.П. Захаров, В.В. Князев, Н.С. Шевченко

*Анотація:* у статті розглядається процедура оцінювання невизначеності вимірювання коефіцієнта поділення атенюатора на еталоні СН, заснована на модельному підході. За результатами аналізу схеми вимірювальної установки та процедури вимірювання складено модельне рівняння, отримані формули для розрахунку відносних стандартних невизначеностей типу А та В, відносної сумарної стандартної й розширеної невизначеності вимірювання коефіцієнта поділення атенюатора. Складено бюджет невизначеності вимірювань коефіцієнта поділення атенюатора, проведений аналіз домінуючих внесків невизначеності.

**Ключові слова:** невизначеність вимірювань, еталон, коефіцієнт поділення, стандартна невизначеність, сумарна стандартна невизначеність, розширена невизначеність, метод редукції.

### THE PROCEDURE OF UNCERTAINTY EVALUATION OF MEASUREMENT OF DIVISION FACTOR OF ATTENUATOR ON THE PULSE CURRENT & VOLTAGE STANDARD

I.P. Zakharov, V.V. Kniaziev, N.S. Shevchenko

*The annotation:* in article the procedure of uncertainty evaluation of measurement of division factor of attenuator with help on the standard CV, based on the modelling approach is considered. By results of the analysis of the scheme of measuring apparatus and of the process of evaluation the modeling equation is worked out, formulas for calculation of relative standard uncertainties of type A and B, the relative total standard and expanded uncertainties of measurement of division factor of attenuator are received. The budget of uncertainty of measurement of division factor of attenuator is made; the analysis of dominating contributions of uncertainty is carried out.

**Keywords:** uncertainty of measurement, the standard, division factor, standard uncertainty, the total standard uncertainty, the expanded uncertainty, a reduction method..