

УДК 631.317.08

## МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

*Маскей М. Ш. гр.367041, Касперович М. М. научный сотрудник центра 1.9  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Белошицкий А. П. – кандидат технических наук, доцент*

**Аннотация.** В материалах доклада рассматривается разработанная методика оценивания неопределенности результатов измерений, выполненных с помощью эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц.

**Ключевые слова:** методика, неопределенность, эталон, ослабление, электромагнитные колебания

**Введение.** В последнее время достигнут существенный прогресс на пути промышленного освоения миллиметрового диапазона волн. Это обстоятельство стимулировало ускоренное создание разнообразных средств измерений (СИ) этого диапазона, в том числе скалярных и векторных анализаторов цепей и измерительных аттенуаторов [1]. Для проведения работ по метрологической оценке этих СИ в Республике Беларусь отсутствует соответствующее эталонное оборудование. Научно-образовательным инновационным центром сверхвысокочастотных (СВЧ) технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9) БГУИР ведутся работы по созданию национального эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц. В докладе приводится описание методики оценивания неопределенности результатов измерений ослабления, выполненных с помощью указанного эталона.

**Основная часть.** Для проведения измерений ослабления при помощи эталона необходимо собрать измерительный тракт и выполнить калибровку эталона на измеряемой частоте. После чего подключить объект измерений и выполнить измерения. Количество измерений выбирают в зависимости от требуемой точности. Для высокоточных измерений рекомендуется провести не менее 10 повторных наблюдений.

Для оценки неопределенности результатов измерений ослабления с использованием эталона необходимо учитывать не только точность самого измерения, но и степень точности самого эталона. При этом важно провести анализ всех возможных источников ошибок и учитывать их в расчетах. Для составления модели измерения ослабления с помощью эталона были проанализированы и выявлены источники неопределенности измерений. Основными источниками неопределенности измерений для данной измерительной задачи являются: неопределенность измерения ослабления на промежуточной частоте, неопределенность измерения ослабления из-за недостаточной развязки измерительного канала, неопределенность измерения ослабления из-за нелинейности входных цепей и неопределенность измерения ослабления из-за рассогласования

измерительного тракта. При правильном учете данных неопределенностей в модели измерения можно достаточно точно определить значение ослабления.

Для оценки неопределенности была предложена следующая модель измерения:

$$A = A_{и} + \delta_{пч} + \delta_{н} + \delta_{из} + \delta_{расс}, \quad (1)$$

где  $A$  – результат измерений, дБ;

$A_{и}$  – измеренное значение ослабления, дБ;

$\delta_{пч}$  – неопределенность измерения ослабления на промежуточной частоте (ПЧ), дБ;

$\delta_{из}$  – неопределенность измерения ослабления из-за недостаточной изоляции (развязки) измерительного канала, дБ;  $\delta_{н}$  – неопределенность измерения ослабления из-за нелинейности входных цепей, дБ;

$\delta_{расс}$  – неопределенность измерения ослабления из-за рассогласования измерительного тракта, дБ.

Входная величина типа  $A$  неопределенности характеризуется нормальным видом распределения с оценкой величины в децибелах. Оценка величины представлена результатами нескольких наблюдений, а стандартная неопределенность определяется из выражения:

$$u(A_{и}) = \frac{1}{\sqrt{n(n-1)}} \sum_{i=1}^n (A_{иi} - A_{и})^2, \text{ дБ} \quad (2)$$

Неопределенность величины  $\delta_{пч}$  классифицируется как тип В и характеризуется прямоугольным видом распределения, с оценкой величины, соответствующей 0 дБ. Интервал, в котором находится значение входной величины, определяется пределами допускаемой основной абсолютной погрешности измерения ослабления на ПЧ  $d_1$ , а стандартная неопределенность равна:

$$u(\delta_{пч}) = \frac{d_1}{\sqrt{3}}, \text{ дБ} \quad (3)$$

Неопределенность величины  $\delta_{н}$  также имеет тип В, при этом она характеризуется прямоугольным видом распределения и оценкой величины, соответствующей 0 дБ. Интервал, в котором находится значение входной величины, определяется нелинейностью входных цепей  $d_2$ , а стандартная неопределенность определяется соотношением:

$$u(\delta_{н}) = \frac{d_2}{\sqrt{3}}, \text{ дБ} \quad (4)$$

Неопределенность величины  $\delta_{из}$  имеет тип В и описывается прямоугольным видом распределения с оценкой величины 0 дБ. Интервал, в котором находится значение входной величины, определяется значением паразитного сигнала вследствие недостаточной изоляции  $d_3$ , а стандартная неопределенность определяется из выражения:

$$d_3$$

$$u(\delta_{\text{из}}) = \frac{d_4}{\sqrt{3}}, \text{ дБ} \quad (5)$$

Неопределенность величины  $\Pi_{\text{расс}}$  имеет тип В, но характеризуется распределением в форме арксинусоидальной кривой, с оценкой величины 0 дБ. Интервал, в котором находится значение входной величины, зависит от максимально возможного рассогласования в измерительном тракте  $d_4$ , а стандартная неопределенность равна:

$$u(\delta_{\text{расс}}) = \frac{d_4}{\sqrt{2}}, \text{ дБ} \quad (6)$$

*Неопределенность случайной составляющей.* Сигнал с выхода объекта измерений, имеет небольшие колебания амплитуды в процессе измерения. Такие колебания приводят к некоторой неопределенности в измерении ослабления. Помимо тепловых шумов с увеличением частоты флуктуации значительно увеличиваются также из-за эффекта фазового 60-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов

шума. В эталоне предусмотрена возможность снижения случайной неопределенности измерения путем усреднения.

*Неопределенность измерения ослабления, обусловленная нелинейностью входных цепей.*

Нелинейность присуща многим устройствам, входящим в состав эталона, однако нелинейность преобразователей частоты (смесителей) и предварительных усилителей превалирует настолько, что нелинейностью остальных устройств можно пренебречь. Уровень сигнала на СВЧ-входе смесителя должен поддерживаться как минимум на 30 дБ ниже уровня гетеродина, чтобы добиться наименьшей ошибки из-за нелинейности. Измерения должны проводиться на малых уровнях сигнала, чтобы обеспечить работу смесителей в своей линейной области.

*Неопределенность измерения ослабления из-за недостаточной развязки (изоляция)*

*измерительного канала.* Развязка измерительного канала важна из-за паразитных сигналов, которые могут исказить результаты измерений. Влияние развязки измерительного канала проявляется в виде присутствия на входе смесителя измерительного канала паразитного сигнала с постоянной (или медленно дрейфующей) амплитудой и фазой. Пока полезный сигнал остается много больше этого паразитного сигнала, влияние последнего пренебрежимо мало. Но при уменьшении амплитуды входного измерительного сигнала с ростом измеряемого ослабления паразитный сигнал начинает искажать результат измерения, векторно (с учетом амплитуд и фаз) складываясь с полезным сигналом. Одним из наиболее часто встречающихся источников этого паразитного сигнала является наводка входного и усиленного сигнала опорного канала в измерительный канал. Поэтому изоляцией или развязкой каналов принято называть просачивание мощности из опорного в измерительный канал и выражать ее в децибелах.

Поскольку в общем случае угол при векторном суммировании полезного и паразитного сигналов неизвестен, для оценки интервала ошибки необходимо использовать наихудший случай – синфазное детектирование. В таком случае для границы интервала можно записать

$$d^{\delta} = -20 \cdot \lg \left( 1 - 10^{-\frac{A_{\text{из}} - A_x}{20}} \right), \quad (7)$$

где  $A_{\text{из}}$ ,  $A_x$  – ослабления объекта измерения и развязка между опорными измерительными каналами СВЧ тракта эталона соответственно, дБ.

x

$$A_{из} - A_x = 20 \cdot (---), \quad (8) \quad x_{из}$$

где  $x$ ,  $x_{из}$  – амплитуды сигнала через объект измерения и сигнала утечки соответственно, дБ.  
*Неопределенность измерения ослабления на промежуточной частоте.* По принципу действия эталон производит перенос значения измеряемой величины на ПЧ и осуществляет сравнение его значения с низкочастотным эталонным значением (ослабление на ПЧ), которое в свою очередь имеет свою неопределенность при его определении. Эта неопределенность зависит от погрешности измерения ослабления приемником сигналов ПЧ входящим в состав эталона.  
*Неопределенность измерения из-за рассогласования измерительного тракта.* Значение величины  $d_4$  для расчета этой неопределенности по формуле (6) можно определить из выражения:

$$d_4 = 8,2 [\Gamma_r \cdot \Gamma_c \cdot (K^2 + 1) + \Gamma_r \cdot \Gamma_1 + \Gamma_c \cdot \Gamma_2], \quad (9)$$

где  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  – коэффициентов отражения от входа и выхода объекта измеряемого устройства;

$\Gamma_r$ ,  $\Gamma_c$  – модули коэффициентов отражения тракта СВЧ по обе стороны (со стороны входа и выхода) измеряемого устройства;  $K$  – модуль коэффициента передачи измеряемого устройства.

**Заключение.** Разработанная методика позволяет оценить неопределенность результатов измерения ослабления, выполненных с помощью эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц.

#### **Список литературы**

1. Богуш, В. А. Векторные анализаторы цепей сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн/ В. А. Богуш [и др.]. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2019. – 328 с.

UDC 631.317.08

### **METHODOLOGY FOR ESTIMATION OF UNCERTAINTY OF THE RESULTS OF MEASUREMENTS PERFORMED USING THE STANDARD OF THE UNIT OF ATTENUATION OF ELECTROMAGNETIC OSCILLATIONS**

*Maskey M.S. gr.367041, Kasperovich M.M. Research Associate of the Center 1.9  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus  
Beloshitsky A. P. – Cand. Sc. (Tech.), associate professor*

**Annotation.** In the materials of the report the developed methodology of estimation of uncertainty of the results of measurements made with the help of the standard of the unit of attenuation of electromagnetic oscillations in the frequency range from 37.5 to 178.4 GHz is considered.

**Keywords:** methodology, uncertainty, standard, attenuation, electromagnetic oscillations