

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

*Маскей М. Ш., Касперович М. М.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
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 неопределённости измерений. Основными источниками неопределённости 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:

$$A = A_i + \delta_{ПЧ} + \delta_n + \delta_{из} + \delta_{расс}, \quad (1)$$

где  $A$  – результат измерений, дБ;

$A_i$  – 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;  $\delta_n$  – 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:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A_i - \bar{A})^2}{(A_i - \bar{A})^2}, \quad \text{дБ} = \frac{1}{n(n-1)} \sum \quad (2)$$

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:

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

Неопределенность величины  $\delta_n$  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:

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

Неопределенность величины  $d_3$  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:

$$d_3 \quad u(\delta_{\text{из}}) = \frac{1}{\sqrt{3}}, \text{ дБ} \quad (5)$$

Неопределенность величины  $P_{\text{расс}}$  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:

$$d_4 \quad u(\delta_{\text{расс}}) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ дБ} \quad (6)$$

*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 развязка (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

$$\text{Аиз-Ах} \quad d^3 = -20 \cdot \lg \left( 1 - 10^{-20} \right), \quad (7)$$

где  $A_{\text{из}}$ ,  $A_{\text{х}}$  – ослабления объекта измерения и развязка между опорными

измерительными каналами СВЧ тракта эталона соответственно, дБ.

х

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

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 использованных источников:**

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.