

УДК 621.317.08

РАЗРАБОТКА ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 37,5 ДО 178,4 ГГц

Гусинский А.В., Кондрашов Д.А., Касперович М.М., Толочко Т.К., Сайков А.В.,
Свирид М.С., Белошицкий А.П., Захаров И.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь,
gusinski@bsuir.by*

Аннотация. Представлены результаты выполнения научно-исследовательской работы по созданию национального эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц, проведен анализ влияющих величин при определении коэффициента калибровки и определен алгоритм обработки результатов наблюдений при проведении исследований метрологических характеристик эталона.

Ключевые слова. Эталон, мощность, СВЧ диапазон, преобразователь мощности, калибровочный коэффициент, калибровка.

Измерения в диапазоне миллиметровых длин волн широко распространены в таких областях как радиолокация, радионавигация, радиосвязь, медицина, метеорология, космическая, авиационная и оборонная промышленности, при научных исследованиях. Основной энергетической характеристикой сигналов в данном диапазоне является мощность электромагнитных колебаний, точность измерения которой позволяет с высокой степенью достоверности определять технические характеристики проектируемых радиоэлектронных систем и их компонентов. Научно-образовательным инновационным центром сверхвысокочастотных (СВЧ) технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9) БГУИР ведутся работы по созданию национального эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц для обеспечения метрологической оценки ваттметров с точностью, не уступающей ведущим метрологическим институтам. Работы осуществляются в рамках реализации подпрограммы «Эталон Беларуси» государственной научно-технической программы «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование», 2021–2025 годы».

Описание и принцип действия эталона единицы мощности

Эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц предназначен:

- для воспроизведения, хранения и передачи единицы мощности электромагнитных колебаний рабочим средствам измерений с целью обеспечения единства измерений в Республике Беларусь;

- проверки, калибровки, метрологической экспертизы и испытаний с целью утверждения типа ваттметров поглощаемой и проходящей мощности указанного диапазона;

- измерений мощности электромагнитных колебаний на выходе генераторов и передатчиков, настройки сверхвысокочастотных трактов.

Эталон единицы мощности представляет собой программно-аппаратный комплекс и обеспечивает проведение измерений в автоматическом режиме на 4 поддиапазонах:

- поддиапазон 1 – диапазон частот от 37,5 до 53,6 ГГц, сечение тракта $5,2 \times 2,6$ мм;
- поддиапазон 2 – диапазон частот от 53,6 до 78,3 ГГц, сечение тракта $3,6 \times 1,8$ мм;
- поддиапазон 3 – диапазон частот от 78,3 до 118,1 ГГц, сечение тракта $2,4 \times 1,2$ мм;
- поддиапазон 4 – диапазон частот от 118,1 до 178,6 ГГц, сечение тракта $1,6 \times 0,8$ мм.

В состав эталона входят: источники сигналов, устройства сличений, измерители поглощаемой мощности, ПЭВМ, комплекты соединительных коаксиальных и интерфейсных кабелей. В общем виде структурная схема эталона единицы мощности представлена на рисунке 1.

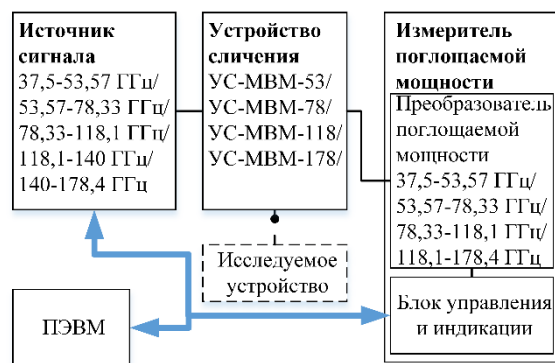


Рисунок 1 – Структурная схема эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц

Источники сигналов обеспечивают формирование сигналов электромагнитных колебаний сверхвысоких частот в режиме непрерывной генерации.

Устройства сличения представляют собой комбинацию направленного ответвителя и согласующих устройств. Направленный ответвитель содержит два отрезка волновода. Через отверстия в стенке, разделяющей волноводы, часть мощности, распространяющейся в основной линии (основной канал) от источника СВЧ сигнала ответвляется в боковое плечо (вспомогательный канал), к выходу которого подключается измеритель поглощаемой мощности. Выход основного канала устройства сличения предназначен для подключения исследуемого устройства (напри-



мер, калибруемого/поверяемого ваттметра поглощаемой мощности).

Измеритель поглощаемой мощности включает четыре волноводных калориметрических преобразователя поглощаемой мощности и блок управления и индикации [1].

Программное обеспечение позволяет управлять работой измерительного оборудования с ПЭВМ, устанавливать поддиапазон, частотные точки, уровни измерительных сигналов, режимы измерений (определение коэффициента эффективности, коэффициента передачи или погрешности измерения мощности исследуемого устройства), считывать измерительную информацию с блока управления и индикации, обеспечивает корректировку измеренных значений с учетом коэффициентов калибровки и представление измерительной информации в форме, удобной для дальнейшей математической обработки в соответствии с методиками поверки/калибровки.

СВЧ сигнал с выхода источника сигнала поступает на вход устройства сличения, в котором часть мощности ответвляется в боковое плечо и поступает на вход измерителя поглощаемой мощности. Мощность, измеренная измерителем поглощаемой мощности во вспомогательном канале, пропорциональна мощности, падающей на вход исследуемого устройства.

Исследование метрологических характеристик эталона единицы мощности

Исследование метрологических характеристик эталона единицы мощности проводилось расчетно-экспериментальным методом.

При проведении исследований на дискретных частотах определялись следующие основные параметры эталона единицы мощности:

1) модуль и фаза коэффициента отражения входа преобразователей поглощаемой мощности и выходов основного и вспомогательного каналов устройств сличения;

2) коэффициент, учитывающий погрешность измерения мощности замещения блоком управления и индикации в динамическом диапазоне относительно уровня мощности, на котором определяется коэффициент калибровки (приблизительно 1 или 5 мВт в зависимости от частотного диапазона);

3) коэффициент калибровки системы, включающей измеритель поглощаемой мощности и устройство сличения.

Определение модуля и фазы коэффициента отражения входа преобразователей поглощаемой мощности ($|\Gamma_{МВМ}|, \varphi_{МВМ}$) и выходов основного ($|\Gamma_{Comp1}|, \varphi_{Comp1}$) и вспомогательного каналов ($|\Gamma_{Comp2}|, \varphi_{Comp2}$) устройств сличения осуществлялось методом прямых измерений с помощью векторного анализатора цепей.

Определение коэффициента, учитывающего погрешность измерения мощности замещения блоком управления и индикации в динамическом диапазоне относительно уровня мощности, на котором определяется коэффициент калибровки, осуществлялось

методом прямых измерений с помощью калибратора напряжения постоянного тока.

Коэффициент калибровки системы, включающей измеритель поглощаемой мощности и устройство сличения, определялся методом косвенных измерений с помощью эталонных преобразователей мощности и измерителя мощности болометрического, откалиброванных во ФГУП ВНИИФТРИ [2].

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений коэффициента калибровки обеспечивается к Государственному первичному эталону единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 118,1 ГГц ГЭТ 167-2021, РФ и Государственному рабочему эталону единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне значений от 0,1 до 10 мВт в диапазоне частот от 37,5 до 220 ГГц, рег. № 3.1.ZZT.0288.2018, РФ.

Математическая модель измерений представлена формулой

$$K_B = \frac{P_S}{P_{Comp} K_K} d_{Sind} \mu_S, \quad (1)$$

где K_B – коэффициент калибровки системы, включающей измеритель поглощаемой мощности и устройство сличения, отн. ед.;

P_S/P_{Comp} – отношение показаний измерителя мощности болометрического, подключенного к выходу основного канала устройства сличения и измерителя поглощаемой мощности во вспомогательном канале, отн. ед.;

K_K – коэффициент калибровки эталонного преобразователя мощности из состава измерителя мощности болометрического, отн. ед.;

d_{Sind} – коэффициент, учитывающий погрешность измерения мощности замещения, отн. ед.;

μ_S – коэффициент рассогласования, отн. ед.

Анализ величин, входящих в математическую модель измерений:

– отношение показаний измерителя мощности болометрического, подключенного к выходу основного канала устройства сличения и измерителя поглощаемой мощности во вспомогательном канале P_S/P_{Comp}

Тип неопределенности: А

Вид распределения: нормальное

Значение оценки и стандартная неопределенность для данной входной величины определяются по формулам (2) и (3) соответственно на основании статистической обработки ряда наблюдений.

$$\overline{(P_S/P_{Comp})} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_S/P_{Comp})_i, \quad (2)$$

где $(P_S/P_{Comp})_i$ – результат i -го наблюдения,
 n – количество наблюдений.

$$u(P_S/P_{Comp}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n ((P_S/P_{Comp})_i - \overline{(P_S/P_{Comp})})^2}; \quad (3)$$

– коэффициент калибровки эталонного преобразователя мощности из состава измерителя мощности болометрического K_K

Тип неопределенности: В

Значение оценки входной величины и соответствующая расширенная неопределенность представлены в сертификате калибровки преобразователя мощности. Стандартная неопределенность находится как частное расширенной неопределенности и коэффициента охвата.

– коэффициент, учитывающий погрешность измерения мощности замещения d_{Sind}

Тип неопределенности: В

Вид распределения: нормальное

Значение оценки: 1

Стандартная неопределенность определяется как корень квадратный из суммы квадратов относительной погрешности измерения мощности и суммарной стандартной неопределенности, указанных в сертификате калибровки измерителя мощности болометрического;

– коэффициент рассогласования μ_S .

Так как система, включающая измеритель поглощаемой мощности и устройство сличения, а также эталонный преобразователь мощности не в полной мере согласованы, то существует неопределенность из-за возможного рассогласования [3]. Значение оценки для коэффициента рассогласования составляет 1. В общем случае, когда фазовые соотношения коэффициентов отражения выхода устройства сличения и входа эталонного преобразователя неизвестны, границы отклонений определяются выражением

$$\mu_S = 1 \pm 2|\Gamma_{Comp}||\Gamma_S|, \text{ отн.ед.}, \quad (4)$$

где $|\Gamma_{Comp}|$ – модуль коэффициента отражения выхода устройства сличения, отн.ед.

$|\Gamma_S|$ – модуль коэффициента отражения входа преобразователя, отн.ед. (из свидетельства о калибровке эталонного преобразователя)

Интервал, в котором находится значение входной величины, определяется по формуле

$$a = \pm 2|\Gamma_{Comp}||\Gamma_S|, \text{ отн.ед.}, \quad (5)$$

Данная величина имеет арксинусоидальный закон распределения, соответственно стандартная неопределенность из-за рассогласования может быть вычислена по формуле

$$u(\mu_S) = a/\sqrt{2}, \text{ отн.ед.} \quad (6)$$

Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Коэффициенты чувствительности определяются по формулам

$$C_{P_S/P_{Comp}} = \frac{d_{Sind}\mu_S}{K_K} \quad (7.1)$$

$$C_{K_K} = -\frac{P_S}{P_{Comp}K_K^2}d_{Sind}\mu_S \quad (7.2)$$

$$C_{d_{Sind}} = \frac{P_S}{P_{Comp}K_K}\mu_S \quad (7.3)$$

$$C_{\mu_S} = \frac{P_S}{P_{Co}K_K}d_{Sind} \quad (7.4)$$

Вклад в неопределенность каждой входной величины вычисляется по формулам

$$u_1(K_B) = C_{P_S/P_{Comp}}u(P_S/P_{Comp}) \quad (8.1)$$

$$u_2(K_B) = C_{K_K}u(K_K) \quad (8.2)$$

$$u_3(K_B) = C_{d_{Sind}}u(d_{Sind}) \quad (8.3)$$

$$u_4(K_B) = C_{\mu_S}u(\mu_S) \quad (8.4)$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения вычисляется по формуле

$$u_c^2(K_B) = \sum_{j=1}^n u_j^2(K_B), \quad (9)$$

Пример оценки неопределенности при определении коэффициента калибровки системы, включающей измеритель поглощаемой мощности и устройство сличения:

На частоте 78,33 ГГц по результатам обработки ряда наблюдений были получены оценка величины и соответствующая стандартная неопределенность $(P_S/P_{Comp}) = 0,802$, $u(P_S/P_{Comp}) = 0,0016$.

В свидетельстве о калибровке эталонного преобразователя ПБП-2,4 для данной частоты указано значение коэффициента калибровки 0,969, расширенная неопределенность результатов измерения калибровочного коэффициента преобразователя $U_{K_K} = 1,29\%$ при коэффициенте охвата $k=2$. Соответственно стандартная неопределенность $u(K_K) = 0,0065$.

В свидетельстве о калибровке измерителя мощности болометрического погрешность измерения мощности -0,092% и расширенная неопределенность действительного значения мощности подогрева не превышает 0,025 % при коэффициенте охвата $k=2$. Соответственно стандартная неопределенность оценки коэффициента, учитывающего погрешность измерения мощности замещения составляет $u(d_{Sind}) = 0,0009$.

Коэффициент отражения входа эталонного преобразователя мощности ПБП-2,4 указан в свидетельстве о калибровке $|\Gamma_S| = 0,0426$, коэффициент отражения основного канала устройства сличения определен в ранее проводимых исследованиях $|\Gamma_{Comp}| = 0,07$. Интервал, в котором находится значение входной величины, составляет $a = \pm 0,006$, стандартная неопределенность $u(\mu_S) = 0,0042$. Результаты определения коэффициентов чувствительности, вкладов в неопределенность, коэффициента калибровки и суммарной стандартной неопределенности представлены в бюджете неопределенности в таблице 1.

Таблица 1 - Бюджет неопределенности

Величина X_i	Оценка x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
P_S / P_{Comp} , отн.ед.	0,802	0,0016	1,0320	0,0017
K_K , отн. ед.	0,969	0,0065	-0,8537	-0,0055
d_{Sind} , отн. ед.	1,0	0,0009	0,8273	0,0008
μ_S , отн. ед.	1,0	0,0042	0,8273	0,0035
Суммарная неопределенность измерения				0,007
Коэффициент калибровки				0,827

Результат измерения коэффициента калибровки на частоте 78,33 ГГц составляет $(0,827 \pm 0,014)$ отн.ед. Указанная расширенная неопределенность получена умножением суммарной стандартной неопределенности измерений на коэффициент охвата $k = 2$, основанный на предполагаемом нормальном распределении измеряемой величины, и определяет интервал, соответствующий вероятности охвата приблизительно 95 %. Полученные значения соответствуют требованиям, установленным в техническом задании. Основной вклад в суммарную стандартную неопределенность вносят такие входные величины как коэффициент калибровки эталонного преобразователя мощности и коэффициент рассогласования. Для дальнейшего повышения точности измерений планируется учитывать фазовые составляющие коэффициентов отражения.

Заключение

В настоящий момент ведутся подготовительные работы по участию в пилотных сличениях эталона единицы мощности в рамках Евро-Азиатского со-

трудничества государственных метрологических учреждений, что позволит после завершения работ по созданию и регистрации национального эталона единицы мощности в качестве назначенного института провести работы для опубликования данных о калибровочных и измерительных возможностях при измерении мощности в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц.

На кафедре информационно-измерительных систем реализована интеграция образовательного процесса в научные исследования и производство наукоемкой и высокотехнологичной продукции. Разработанные учебные программы предусматривают практические и лабораторные работы, позволяющие ознакомиться с процессом разработки эталонов единиц величин (мощности и ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц), воспроизводящих единицы величин с наивысшей в стране точностью, а также включающие задания по моделированию процедур измерений, осуществляемых при исследовании метрологических характеристик эталона и измерительного оборудования из его состава, а также анализ влияющих величин и возможных источников погрешностей, расчет неопределенностей, систематической и случайной погрешностей.

Литература

1. Бурак, И.Ф. Измерение мощности СВЧ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн / И.Ф. Бурак [и др.]. – Москва: Горячая линия–Телеком, 2018. – 328 с.
2. Коудельный А.В., Малай И.М., Матвеев А.И., Перепелкин В.А., Чирков И.П. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–118,1 ГГц ГЭТ 167-2021. Измерительная техника. 2022;(6):3–8.
3. Богуш, В.А. Векторные анализаторы цепей сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / В.А. Богуш [и др.]. – Москва: Горячая линия –Телеком, 2019. – 328 с.

DEVELOPMENT OF THE STANDARD OF THE UNIT OF POWER OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN THE FREQUENCY RANGE FROM 37.5 TO 178.4 GHz

A.V. Gusinski, D.A. Kandrashou, M.M. Kaspiarovich, T.K. Talochka, A.V. Saikou,
M.S. Sviryd, A.P. Belashytski, I.A. Zakharau

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus, gusinski@bsuir.by

Abstract. The results of research of the creation of the national standard of the unit of power of electromagnetic waves in the frequency range from 37.5 to 178.4 GHz are presented, an analysis of the influencing factors in determining the calibration factor is conducted and an algorithm of processing the results of observations is defined during research of the metrological parameters of the standard.

Keywords. Standard, power, microwave range, power sensor, calibration factor, calibration.