

УДК 621

ВЫСОКОТОЧНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ И СОЗДАНИЕ ЭТАЛОНА НА ИХ ОСНОВЕ

Вольнец А.С.

РУП «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приводятся результаты разработки и применения методов и средств измерения плотности потока энергии электромагнитного поля в микроволновом диапазоне и создания эталона на их основе.

Ключевые слова: плотность потока энергии электромагнитного поля, методы измерений, эталон.

HIGH-PRECISION METHODS AND MEANS OF MEASURING THE ENERGY FLUX DENSITY OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE MICROWAVE RANGE AND CREATION OF THE STANDARD

Volynets A.

*Belarusian State Institute of Metrology
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper presents the results of the development and application of methods and instruments for measuring the energy flow density of the electromagnetic field in the microwave range and the creation of a standard.

Key words: energy flux density of the electromagnetic field, measurement methods, standard.

*Адрес для переписки: Вольнец А.С., Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Республика Беларусь
e-mail: info@belgim.by*

Измерение плотности потока энергии (далее – ППЭ) электромагнитного поля является предметом государственного регулирования. Так в соответствии с Законом Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» измерители уровней электромагнитных излучений и измерительные антенны входят в перечень категорий средств измерений, подлежащих обязательной государственной поверке при применении в измерениях для обеспечения защиты жизни и здоровья человека, обороны и безопасности государства, экспертизы на электромагнитную совместимость. В Республике Беларусь эксплуатируется большое количество средств измерений, которые обеспечивают контроль параметров электромагнитного поля и метрологическую оценку которых необходимо обеспечить. Эксплуатируемая до разработки эталона в Республике Беларусь установка для поверки измерителей ППЭ электромагнитного поля П1-9 не обеспечивала метрологическую оценку средств измерений ППЭ с требуемой точностью, кроме того не обеспечивалась возможность позиционирования при проведении измерений новых моделей средств измерений. Появилась необходимость разработки усовершенствованных методов воспроизведения и передачи единицы ППЭ электромагнитного поля, созданию и внедрению на их основе эталона единицы ППЭ электромагнитного поля миллиметрового диапазона, а также исследованию его характеристик. Для достижения поставленной цели были решены следующие научные задачи:

1. Анализ существующих и разработка усовершенствованных методов воспроизведения единицы ППЭ электромагнитного поля и передачи ее размера различным типам средств измерений, анализ источников погрешности измерений.

2. Разработка метода уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте и алгоритмов применения его при высокоточных измерениях ППЭ электромагнитного поля, а также при определении эффективной площади измерительной антенны методом трех антенн.

3. Разработка метода определения коэффициента безэховости экранированной безэховой камеры, позволяющего упростить процедуру измерений для получения большей информации о пространственной и частотной структуре электромагнитного поля в безэховой камере при сокращении времени выполнения измерений с сохранением точности измерений.

4. Создание на основе разработанных высокоточных методов и средств измерений ППЭ электромагнитного поля аппаратно-программных средств эталона с характеристиками, соответствующими требованиям уровня развития техники.

5. Оценивание точностных характеристик эталона при воспроизведении и передаче единицы ППЭ с учетом предложенных методов уменьшения составляющих погрешности измерений.

Среди методов воспроизведения и передачи единицы ППЭ для исследований был выбран метод эталонной антенны. В основу метода положено поочередное измерение в заданной точке пространства ППЭ исследуемым и эталонным измерителем ППЭ, состоящим из эталонной антенны и измерителя мощности, расчет ППЭ по формуле

$$P_{ЭТ} = \frac{P_{ПА}}{S_{ЭТ}},$$

где $P_{ПА}$ – значение мощности сигнала на выходе эталонной измерительной антенны, Вт; $S_{ЭТ}$ – эф-

эффективная площадь эталонной измерительной антенны, м^2 [1].

Для реализации функции воспроизведения и передачи единицы ППЭ были разработаны методики измерений для различных типов средств измерений. Учитывая наличие задач по метрологической оценке антенн с эллиптической поляризационной характеристикой, был теоретически обоснован и экспериментально подтвержден метод применения эталонных антенн с линейной поляризацией для определения коэффициента усиления антенн с эллиптической поляризацией способом замещения на основе введения дополнительных корректирующих коэффициентов, зависящих от параметров эллиптичности антенн. Искомый коэффициент усиления антенны с эллиптической поляризацией находят расчетным путем по формуле:

$$G_{\text{ЭЛ}} = G_{\text{лин}} + G_{\text{кор}} + 3,$$

где $G_{\text{ЭЛ}}$ – коэффициент усиления антенны с эллиптической поляризацией, дБ; $G_{\text{лин}}$ – коэффициент усиления, определенный с помощью линейно поляризованной эталонной антенны, дБ; $G_{\text{кор}}$ – корректирующий коэффициент, дБ.

Корректирующий коэффициент рассчитывают исходя из коэффициента эллиптичности антенны по формуле:

$$G_{\text{кор}} = 10 \cdot \lg \left(0,5 \left(1 + \frac{1}{Z} \right) \right),$$

где Z – коэффициент эллиптичности антенны [2].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что расширенная неопределенность результатов измерений коэффициента усиления антенны с эллиптической поляризационной характеристикой по предложенной методике составляет $\pm 1,0$ дБ.

Среди источников погрешности измерений при воспроизведении и передаче единицы ППЭ электромагнитного поля, дающих основной вклад в неисключенную систематическую погрешность и определяющих точностные характеристики метода эталонной антенны, были выделены неидеальность характеристик измерителя мощности при измерениях мощности на выходе эталонной антенны, погрешность определения эффективной площади эталонной антенны, погрешность из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте, переотражения электромагнитных полей от стен безэховой камеры.

Для уменьшения погрешности из-за рассогласования был разработан модернизированный метод уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте эталона за счет применения поправочного множителя на основе результатов экспериментальных исследований комплексных коэффициентов отражения эталонной измерительной антенны и термоэлектрического преобразователя измерителя мощности. Выполнен анализ эффективности метода, проведены экспериментальные исследования и определены

поправочные множители для работы с эталоном. Практическое использование метода позволило снизить погрешность из-за рассогласования в 9–10 раз до уровня $\pm(0,1-1,6) \cdot 10^{-2}$ [3].

Разработан модернизированный метод трех антенн, отличительной особенностью которого является коррекция результатов измерений с использованием поправочного множителя, определяемого из значений комплексных коэффициентов отражения компонентов сверхвысокочастотного измерительного и излучающего тракта эталона. Доказано, что предложенная модернизация метода позволяет уменьшить его погрешность в 3–5 раз до уровня $\pm(2,9-3,9) \cdot 10^{-2}$. Определена эффективная площадь эталонных измерительных антенн модернизированным методом, подтверждена метрологическая совместимость полученных результатов с результатами измерений национального метрологического института Российской Федерации [4].

Для уменьшения исключения неисключенной систематической погрешности из-за переотражений от стен безэховой камеры была разработана методика выполнения измерений коэффициента безэховости экранированной безэховой камеры, основанная на сравнении теоретических и экспериментальных данных о напряженности электромагнитного поля, создаваемого перемещающейся прецизионной антенной. Основным преимуществом методики является существенное сокращение времени выполнения измерений за счет использования автоматизированных измерительных комплексов и разработанных алгоритмов обработки данных. На основании экспериментальных исследований доказана сопоставимость результатов измерений по разработанной методике с результатами известного метода. Практическое применение метода позволило уменьшить погрешность измерений из-за переотражений в безэховой камере в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц в 2–3 раза [5].

Разработана структура построения эталона, его блоков и компонентов, создано устройство позиционирования, позволяющее осуществить установку эталонных и исследуемых измерительных антенн (измерителей плотности потока энергии), произвести под управлением программного обеспечения их позиционирование. Эталон был утвержден в качестве Национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15 в 2015 году, по результатам выполненной научно-исследовательской работы в 2020 году были улучшены его метрологические характеристики и утвержден новый паспорт эталона.

Заключение. Разработанные методы позволили сократить границы неисключенной систематической погрешности воспроизведения единицы в 2,5–3,0 раза от уровня $\pm(1,0-23,4) \cdot 10^{-2}$ до уровня $\pm(4,0-6,7) \cdot 10^{-2}$ и тем самым существенно повысить точность измерений в области электромагнитных полей и излучений в стране. Созданный на основе разработанных высокоточных методов и средств измерений ППЭ эталон обеспечивает воспроизведение единицы ППЭ в диапа-

зоне частот от 300 МГц до 39,65 ГГц со средним квадратическим отклонением результатов измерений $(0,1-1,3) \cdot 10^{-2}$ при числе измерений $n = 5$ и неисключенной систематической погрешностью $\pm(4,0-6,7) \cdot 10^{-2}$. Доверительные границы суммарной погрешности воспроизведения единицы ППЭ электромагнитного поля эталоном в зависимости от диапазона частот оспроизводимой единицы составляют $\pm(4,0-7,8) \cdot 10^{-2}$ при доверительной вероятности $p=0,95$. Среднее квадратическое отклонение суммы неисключенных систематических и случайных погрешностей метода передачи размера единицы составляет $(1,8-5,5) \cdot 10^{-2}$. Расширенная неопределенность измерений при воспроизведении единицы ППЭ электромагнитного поля эталоном составляет $(4,2-7,5) \cdot 10^{-2}$ [6].

Литература

1. Вольнец, А. С. Национальный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля / А. С. Вольнец // Метрология и приборостроение. – 2016. – № 2. – С. 10–19.

2. Вольнец, А. С. Калибровка антенн с круговой поляризацией с использованием линейно поляризованных эталонных антенн / А. С. Вольнец, А. В. Гусинский // Метрология и приборостроение. – 2015. – № 1. – С. 18–22.

3. Вольнец, А. С. Повышение точностных характеристик национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля за счет уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте / А. С. Вольнец, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Метрология и приборостроение. – 2017. – № 1. – С. 17–24.

4. Вольнец, А. С. Определение эффективной площади эталонных антенн национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля методом трех антенн / А. С. Вольнец // Метрология и приборостроение. – 2018. – № 3. – С. 3–9.

5. Вольнец, А. С. Реализация метода КСВн при определении коэффициента беззховости экранированной беззховой камеры / А.С. Вольнец // Метрология и приборостроение. – 2019. – № 1. – С. 18–24.

6. Вольнец, А. С. Совершенствование национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля / А. С. Вольнец // Метрология и приборостроение. – 2020. – № 2. – С. 10–19.

УДК 531.383

ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП С ПОЗИЦИОННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Матвеев В.В.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором при позиционном возбуждении стоячей волны. Теоретически и экспериментально доказана нелинейная зависимость амплитуд колебаний пучности и узла от угловой скорости основания. Предложен способ формирования выходного сигнала гироскопа прямого измерения, позволяющий расширить линейную зону рабочей характеристики. Приведена структурная схема гироскопа для огибающих амплитуд колебаний пучности и узла стоячей волны.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, стоячая волна, структурная схема.

CORIOLIS VIBRATION GYROSCOPE WITH POSITIONAL EXCITATION OF A STANDING WAVE

Matveev V.

FSBEI HE "Tula State University"
Tula, Russia

Abstract. A Coriolis vibrating gyroscope with a metal resonator under positional excitation of a standing wave is considered. The nonlinear dependence of the amplitudes of the oscillations of the antinode and the node on the angular velocity of the base has been theoretically and experimentally proved. A method for generating the output signal of a direct measurement gyroscope is proposed, which makes it possible to expand the linear zone of the operating characteristic. The block diagram of the gyroscope for the envelopes of the amplitudes of the oscillations of the antinode and the node of the standing wave is presented.

Key words: Coriolis vibrating gyroscope, standing wave, structural diagram.

Адрес для переписки: Матвеев В.В., пр. Ленина, 92, г. Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

Математическая модель ВТГ. В волновом твердотельном гироскопе (ВТГ) с позиционным возбуждением для обнаружения угловой скорости основания используется свойство инерции

стоячей волны, возбуждаемой в резонаторе (рис. 1). Точки резонатора с максимальной амплитудой радиальных колебаний называются пучностями (*antinode*), а с минимальным – узла-