

ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ И ПЕРЕДАЧЕ ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ НАЦИОНАЛЬНЫМ ЭТАЛОНОМ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ НЭ РБ 26-15

Вольнец А.С.

*Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь*

Национальный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ26-15 предназначен для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы плотности потока энергии (далее ППЭ) в свободном пространстве. В основу работа эталона положен метод эталонной антенны, в соответствии с которым значение ППЭ определяется с помощью эталонного измерителя ППЭ, состоящего из эталонной измерительной антенны и измерителя мощности [1].

Источниками неисключенной систематической погрешности воспроизведения и передачи единицы ППЭ являются: погрешность измерения мощности на выходе эталонной антенны, погрешность эффективной площади эталонной антенны, погрешность за счёт рассогласования в СВЧ измерительном тракте, погрешность за счёт переотражений между антеннами, погрешность из-за неплоскостности электромагнитного поля в месте сличения антенн, погрешность замещения эталонной антенны на исследуемую, погрешность из-за непостоянства электромагнитного поля за время измерений, погрешность из-за переотражений электромагнитных полей от стен безэховой камеры [2]. Анализ показал преобладание ряда составляющих погрешности, в первую очередь: погрешности определения эффективной площади эталонной антенны и погрешности из-за рассогласований в СВЧ измерительном тракте [3].

Оценивание погрешности из-за рассогласований в СВЧ измерительном тракте

В общем случае, действительное значение мощности на выходе эталонной антенны можно определить по формуле [4]

$$P_A = P_{ИЗМ} \frac{|1 - \dot{\Gamma}_П \dot{\Gamma}_A|^2}{(1 - |\dot{\Gamma}_П|^2) \cdot (1 - |\dot{\Gamma}_A|^2)}, \quad (1)$$

где $P_{ИЗМ}$ – мощность, поглощённая термоэлектрическим преобразователем;

P_A – действительное значение мощности сигнала на выходе антенны;

$\dot{\Gamma}_A$ и $\dot{\Gamma}_П$ – комплексные коэффициенты отражения измерительной антенны и термоэлектрического преобразователя измерителя мощности.

Тогда относительную систематическую погрешность из-за рассогласований в СВЧ измерительном тракте можно найти из формулы

$$\delta_{рас} = \frac{(1 - |\dot{\Gamma}_П|^2) \cdot (1 - |\dot{\Gamma}_A|^2)}{|1 - \dot{\Gamma}_П \dot{\Gamma}_A|^2} - 1 =$$

$$= -\frac{|\dot{\Gamma}_П|^2}{(1 - \dot{\Gamma}_П \dot{\Gamma}_A)^2} - \frac{|\dot{\Gamma}_A|^2}{(1 - \dot{\Gamma}_П \dot{\Gamma}_A)^2} + \left(\frac{1}{(1 - \dot{\Gamma}_П \dot{\Gamma}_A)^2} - 1 \right) \quad (2)$$

Как видно из формулы (2), можно выделить три составляющие погрешности из-за рассогласования $\delta_{рас}$: $\delta_{рас1}$, $\delta_{рас2}$, $\delta_{рас3}$. Пренебрегая погрешностями второго порядка малости, получим

$$\delta_{рас1} \approx -|\dot{\Gamma}_П|^2; \quad (3)$$

$$\delta_{рас2} \approx -|\dot{\Gamma}_A|^2; \quad (4)$$

$$\delta_{рас3} \approx 2 \cdot |\dot{\Gamma}_П| \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

где α – угол между единичным вектором и вектором, соответствующим векторному произведению $\dot{\Gamma}_П \cdot \dot{\Gamma}_A$.

Среди существующих методов уменьшения систематической погрешности из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте нами использован метод, основанный на использовании поправочного множителя. Причем для получения максимальной точности нами было предложено измерение коэффициентов отражения векторным анализатором цепей и расчет поправочного множителя с учетом модулей и аргументов комплексных коэффициентов отражения.

Для ввода поправочного множителя мы ввели ряд обозначений

$$\dot{\Gamma}_A = \Gamma_{AC} + j\Gamma_{AS};$$

$$\Gamma_{AC} = |\dot{\Gamma}_A| \cos \varphi_A; \quad \Gamma_{AS} = |\dot{\Gamma}_A| \sin \varphi_A, \quad (6)$$

$$\dot{\Gamma}_П = \Gamma_{PC} + j\Gamma_{PS};$$

$$\Gamma_{PC} = |\dot{\Gamma}_П| \cos \varphi_P; \quad \Gamma_{PS} = |\dot{\Gamma}_П| \sin \varphi_P, \quad (7)$$

где Γ_{PC} , Γ_{AC} , Γ_{PS} , Γ_{AS} – действительные и мнимые составляющие комплексных коэффициентов отражений термоэлектрического преобразователя и измерительной антенны;

$|\dot{\Gamma}_П|$, $|\dot{\Gamma}_A|$ – модули комплексных коэффициентов отражений термоэлектрического преобразователя и измерительной антенны, отн. ед.; φ_P , φ_A – аргументы комплексных коэффициентов отражений термоэлектрического преобразователя и измерительной антенны, градус.

Теперь, учитывая формулы (1), (6) и (7) после математических преобразований получим выражение для поправочного множителя μ

$$\mu = \frac{(1 - \Gamma_{AC}\Gamma_{PC} + \Gamma_{AS}\Gamma_{PS})^2 + (\Gamma_{AC}\Gamma_{PS} + \Gamma_{AS}\Gamma_{PC})^2}{(1 - \Gamma_{PC}^2 - \Gamma_{PS}^2) \cdot (1 - \Gamma_{AC}^2 - \Gamma_{AS}^2)}. \quad (8)$$

Выполнив измерения комплексных коэффициентов отражения и воспользовавшись выражениями (6) – (8), можно найти поправочный множитель μ , использовать его для коррекции результатов измерений мощности сигнала на выходе измерительной антенны.

Неисключенный остаток систематической погрешности из-за рассогласований в СВЧ измерительном тракте $\delta_{S_{pac}}^*$ после внесения поправочного множителя можно оценить, используя формулу [4]

$$\delta_{S_{pac}}^* = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_{pac4}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{pac5}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{pac6}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{pac7}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{pac8}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$|\delta_{pac4}| = 2 \cdot |\dot{\Gamma}_{II}|^2 \cdot \delta_{|\Gamma|}, \quad |\delta_{pac5}| = 2 \cdot |\dot{\Gamma}_A|^2 \cdot \delta_{|\Gamma|},$$

$$|\delta_{pac6}| \approx 2 \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot |\dot{\Gamma}_{II}| \cdot \delta_{|\Gamma|}, \quad |\delta_{pac7}| \approx 2 \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot |\dot{\Gamma}_{II}| \cdot \delta_{|\Gamma|},$$

$$|\delta_{pac8}| \approx 3,14 \cdot |\dot{\Gamma}_{II}| \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot \delta_{\varphi}.$$

Анализ показал, что использование поправочного множителя с учетом комплексных коэффициентов отражения позволяет снизить в 9–10 раз. Неисключенный остаток систематической погрешности из-за рассогласования в СВЧ тракте после введения поправочного множителя с учетом комплексных коэффициентов отражения в 4–6 раз меньше, чем после использования скалярных. При этом, чем больше значения коэффициентов отражения термоэлектрического преобразователя, тем эффективнее применение векторных измерений.

Значение погрешности эффективной площади эталонной антенны зависит от метода её определения и точностных характеристик применяемого при этом оборудования. Существуют различные методы определения эффективной площади: метод эталонной антенны, метод эталонного поля, методы двух и трех антенн. При реализации первых двух методов необходимо наличие эталонной антенны с известным коэффициентом усиления (эффективной площадью). Такие измерения могут быть выполнены метрологическими службами, располагающими более высокоточными эталонами, например, ВНИИФТРИ с использованием Государственного первичного эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля ГЭТ 160-2006 (РФ). Относительная погрешность результатов измерений эффективной площади с применением первых двух методов может составлять от 7 до 12 %.

Реализация второго и третьего метода основана на формуле передачи в свободном пространстве, в соответствии с которым для системы с двумя антеннами (излучающей и приемной), расположенных на некотором расстоянии друг от друга, мощность, принимаемая на согласованной нагрузке, подключенной к приемной антенне определяется как

$$P_r = P_o \cdot G_A \cdot G_B \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot R} \right)^2$$

где P_r – принятая измерительной антенной мощность, P_o – мощность, подведенная к передающей антенне, G_A – коэффициент усиления по мощности передающей антенны, и G_B – коэффициент усиления по мощности приемной антенны. Эта формула передачи неявно предполагает, что антенны подобраны по их поляризации, ориентации и расстояние между антеннами таково, что преобладают условия дальнего поля.

Формула передачи в свободном пространстве может быть записана в логарифмической форме

$$(G_A)_{dB} + (G_B)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_r}\right)$$

Метод двух антенн предполагает, что две антенны идентичны, тогда и их коэффициенты усиления равны

$$(G_A)_{dB} = (G_B)_{dB} = \frac{1}{2} \cdot \left[20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_r}\right) \right]$$

Процедура определения коэффициента усиления по мощности антенн сводится к измерению R , λ , P_o и P_r , а затем вычисления $(G_A)_{dB}$.

Если антенны А и В не являются идентичными, то требуется третья антенна для определения коэффициентов усиления.

Для метода трех антенн выполняется три набора измерений с использованием всех комбинаций трех антенн. Результатом является система из трех совместных уравнений, из которых быть определен коэффициент усиления (эффективная площадь) [5]:

$$(G_A)_{dB} + (G_B)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_r}\right)_{AB}$$

$$(G_A)_{dB} + (G_B)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_r}\right)_{AC}$$

$$(G_A)_{dB} + (G_B)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_r}\right)_{BC}$$

Реализация метода трех антенн заслуживает отдельного более детального рассмотрения. Относительная погрешность результатов измерений эффективной площади с применением метода трех антенн может достигать 1 - 3 %. Преимущество метода в том, что он позволяет выполнить измерения с высокой точностью и не требует наличия эталонных антенн. Недостатком является сложная процедура измерений и необходимость наличия трех конструктивно идентичных антенн. В настоящее время в БелГИМ ведутся работы по определению эффективной площади эталонных антенн методом трех антенн.

Погрешность из-за переотражений от стен безэховой камеры обусловлена тем, что энергия в приемную антенну попадает не только прямым лучом, но и по более сложным схемам, отражаясь

от пола и стен безэховой камеры. При этом значение погрешности из-за переотражений определяется коэффициентом безэховости камеры. Существуют различные способы определения коэффициента безэховости камеры: метод КСВН, метод наложения диаграмм направленности, метод двух приемных антенн и др. [6]. Нами был использован метод, основанный на перемещении излучающей изотропной антенны в объеме камеры, определении КСВН камеры в соответствии с ГОСТ CISPR 16-1-4-2016 с последующим пересчетом полученных результатов в коэффициент безэховости камеры. Для этих целей используется специальный комплект изотропных антенн и позиционер. Измеренное значение коэффициента безэховости составило – (20...30) дБ, что является достаточным для проведения измерений с погрешностью из-за переотражений в безэховой камере порядка 1–2%.

Погрешность из-за неплоскостности электромагнитного поля в месте сличения антенн возникает при сравнении двух антенн с различными характеристиками в неплоском поле и обусловлена различной реакцией этих антенн на неплоское поле. При правильном выборе расстояния и сличении двух неидентичных антенн, эффективная площадь которых отличается не более чем на 20 %, погрешность из-за неплоскостности электромагнитного поля обычно не превышает 2 %. Для получения меньшей погрешности необходимо увеличивать расстояние между антеннами.

Погрешность измерения мощности измерителем мощности определяется его метрологическими характеристиками. В составе эталона применен измеритель мощности РМ2 с комплектом термоэлектрических преобразователей, отградуированных непосредственно на исходном эталоне единицы мощности электромагнитных колебаний ИЭ РБ 19-10. Относительная погрешность измерения мощности измерителем мощности составила около 2 %.

Погрешность замещения эталонной антенны на исследуемую определяется погрешностью измерения расстояния между антеннами, высоты размещения и погрешностью наведения на максимум приема. Для малонаправленных антенн при условии, что поворотное устройство устройства осуществляют поворот антенны с погрешностью установки не хуже 1°, суммарная погрешность замещения обычно не превышает 1,5 %.

Заключение. Работы по исследованиям характеристик эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля ведутся постоянно. Применение поправочного множителя с учетом комплексных коэффициентов отражения в состав эталона позволило снизить погрешность из-за несогласования в СВЧ тракте эталона единицы ППЭ в 8–9 раз, а неисключенную систематическую погрешность эталона единицы ППЭ в целом в диапазоне частот от 0,3 до 6,0 ГГц и от 37,5 до 39,65 ГГц – в 1,5–2,0 раза. Суммарная неисключенная систематическая составляющая погрешности эталона на данном этапе составляет 11–12 %. Следующим этапом станет завершение работ по определению эффективной площади эталонных антенн методом трех антенн, что позволит еще улучшить его точностные характеристики.

1. Правила хранения и применения Национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15.
2. Мелехов М.Е., Иващенко П.А. Проверка средств измерений напряженности электромагнитного поля: учебное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1986 г.
3. Вольнец А.С. Национальный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля // Метрология и приборостроение.- 2016.- №2.
4. А.С. Вольнец, А.В. Гусинский, А.М. Кострикин. Повышение точностных характеристик национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля за счет уменьшения погрешности из-за несогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте // Метрология и приборостроение.- 2017.- №1
5. IEEE Std 149™-1979 (R2008) (Revision of IEEE Std 149-1965) IEEE Standard Test Procedures for Antennas – 129 с.
6. Безэховые камеры СВЧ / М. Ю. Мицмакер, В. А. Торгованов, 129 с. ил. 21 см., М. Радио и связь 1982.
7. ГОСТ 8.381-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения погрешностей.
8. ГОСТ CISPR 16-1-4-2016 Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Ч. 1–4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерения излучаемых помех.

УДК 006.86:616.12-088-71 (047)(476)

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ БИОПОТЕНЦИАЛОВ СЕРДЦА

Козак О.Г.

Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь

В статье проведен анализ современных приборов, применяемых в электрокардиографии, для диагностики болезней и патологии сердца,

рассмотрены методы испытаний и проверки приборов для измерения биоэлектрических потенциалов сердца. Проведен обзор