

УДК 537.872.081.1(476)

А. С. Волынец

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В статье сформулированы основные направления, по которым проходили исследования при создании национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15. К ним относятся: выбор метода воспроизведения и передачи единицы; разработка структуры построения эталона и путей совершенствования этой структуры; автоматизация выполнения работ при использовании эталона не только для новых типов средств измерений, но и с учетом введения конструктивных новаций в структуре построения эталона; синтез новой математической модели, описывающей точностные характеристики эталона с учетом использования метода измерения, выбранной и усовершенствованной структуры построения эталона; повышение точности эталона за счет применения модернизированных методов уменьшения составляющих погрешности, неопределенности измерений при воспроизведении единицы, при передаче размера этой единицы нижестоящим по точности средствам измерений в процессе проведения поверок или калибровок.

This article outlines the major directions of research that have been followed when establishing the National Measurement Standard NE RB 26-15 for electromagnetic field energy flux density, i.e.: determination of an appropriate method for realization and dissemination of the quantity unit; development of the standard's structure and means for further improvement of its structural composition; automation of working processes not only to facilitate use of the standard for newer measuring instruments but also to account for constructive innovations in its structure; synthesis of a new mathematical model describing the characteristics of the standard with regard to the measurement method applied and to the chosen and improved standard's structural composition; provision for increased accuracy of the standard through application of updated methods to reduce components of error and the uncertainty of measurements in realization of the quantity unit and dissemination thereof to lower accuracy measuring instruments by the process of their verification or calibration.

Введение

Предпосылкой создания и исследования национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15 явилась необходимость метрологического обеспечения имеющегося в стране парка средств измерений в условиях возникшего противоречия между современными требованиями к диапазону частот и точности воспроизведения и передачи единицы плотности потока энергии (ППЭ) электромагнитного поля (ЭМП) с должным уровнем автоматизации и возможностями обеспечить точностные характеристики в рамках существующей системы воспроизведения и передачи единицы с помощью эксплуатируемой в стране установки для поверки измерителей плотности потока энергии П1-9. Установка П1-9 не обеспечивала возможность воспроизведения единицы ППЭ на произвольной частоте из рабочего диапазона частот, что требовалось отечественной промышленности, особенно в быстроразвивающейся отрасли – электросвязи. Имеющиеся аппаратно-программные средства

установки П1-9 были разработаны для автоматизированной поверки выходящих из обращения типов измерителей ППЭ (ПЗ-19, ПЗ-20 и др.), не обеспечивая при этом не только автоматизацию выполнения работ новых типов средств измерений (СИ), но и возможность их позиционирования в опорно-поворотном устройстве эталона. Таким образом, возникла необходимость разработки нового национального эталона, способного воспроизводить и передавать единицу ППЭ в произвольной точке широкого диапазона частот, повысить точность измерений и обеспечить потребности республики в метрологическом контроле новых типов СИ по данному виду измерений.

Основные направления исследований при создании эталона

1. Среди рассмотренных методов воспроизведения и передачи единицы ППЭ выделены метод эталонного поля, в соответствии с которым величина плотности потока энергии определяется точным расчетом параметров элек-

тромагнитных волн, излучаемых антенной с известными характеристиками, и метод эталонной антенны, в соответствии с которым величина ЭМП измеряется эталонным измерителем уровней ППЭ, состоящим из измерительной антенны и измерителя мощности.

При передаче размера единицы ППЭ используется метод замещения эталонного преобразователя на исследуемый. Основным недостатком метода эталонного поля по сравнению с методом эталонной антенны является необходимость учета переотражений сигналов в связи с неидеальностью условий свободного пространства, а также установление жестких требований к характеристикам излучающих систем. Основным недостатком метода эталонной антенны является более сложная процедура реализации и обработки первичной измерительной информации, однако данный недостаток может быть исправлен применением средств автоматизации. Учитывая преимущества и недостатки обоих методов, в основу работы эталона был положен метод эталонной антенны. Предпосылками для выбора этого направления послужили наличие опыта работы БелГИМ с установкой П1-9, в основу работы которой также положен метод эталонной антенны, и возможность применения установки П1-9 для дальнейших исследований характеристик создаваемого эталона, проведения сличений. При разработке национального эталона использован опыт, полученный при построении аналогичного государственного эталона Российской Федерации ГЭТ 160-2006 [1].

2. Основная часть работ по разработке структуры эталона, его модулей и компонентов с учетом необходимых требований к технико-экономической эффективности проекта, а также по разработке системы позиционирования излучающих и измерительных антенн, средств автоматизации измерений выполнена совместно с Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники в рамках задания 2.3 «Разработать и создать эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля» подпрограммы «Эталон Беларуси» Государственной научно-технической программы «Эталон и научные приборы» на 2010–2015 годы. Совершенствование структуры построения эталона заключается в том, что обеспечены возможности совмещения осей излучающей и приемной антенн по высоте и установления заданного угла поворота по азимуту и вокруг оси антенн, боковое перемещение антенн и установка расстояния между ними. Применение для крепления антенн адаптеров байонетного типа позволяет осуществлять быстрое и точное позиционирование антенн, снижая до миниму-

ма составляющие погрешности из-за неточности установки антенн в заданную точку пространства. Усовершенствованная структура построения, состав и принцип действия эталона защищены патентом на полезную модель и рассмотрены в [2].

3. Разработанные алгоритмы воспроизведения и передачи единицы ППЭ ЭМП, положенные в структуру управляющего программного обеспечения, позволяют в автоматизированном режиме выполнять метрологический контроль широкого спектра средств измерений, в первую очередь измерителей ППЭ, измерителей напряженности электромагнитного поля, измерительных антенн с линейной и круговой поляризационной характеристикой [3]. При использовании управляющих сигналов программного обеспечения осуществляется их точная юстировка, с применением поправок и калибровочных коэффициентов ведется учет всех влияющих на результаты измерений характеристик компонентов эталона, что позволяет минимизировать влияние случайных погрешностей на результат измерений.

4. Синтез новой математической модели, описывающей точностные характеристики эталона с учетом его схемно-конструктивных особенностей, позволил выполнить предварительную оценку его метрологических характеристик и выделить наиболее существенные источники неисключенной систематической погрешности (НСП) эталона. По этой оценке границы НСП при воспроизведении единицы ППЭ ЭМП составили $\pm(10,0 \dots 23,4) \%$ в зависимости от частоты воспроизводимой единицы, что не обеспечивает необходимого запаса по точности для выполнения поверки (калибровки) СИ во всем рабочем диапазоне частот эталона.

5. Анализ источников погрешности при воспроизведении единицы ППЭ и разработка методов их уменьшения дали следующие результаты.

Погрешность из-за рассогласования в сверхвысокочастотном (СВЧ) измерительном тракте эталона $\delta_{\text{рас}}$ определяется коэффициентами отражения входа термоэлектрического преобразователя измерителя мощности и выхода применяемой измерительной антенны эталона. Для расчетов значения погрешности в качестве априорной информации можно использовать



данные формуляров на измерительные антенны и термоэлектрические преобразователи измерителя мощности, содержащие информацию о значениях коэффициента стоячей волны по напряжению, из которых несложно найти значения модулей коэффициентов отражения. Границы погрешности из-за рассогласования можно оценить по формулам [3]:

$$\delta_{\text{рас-}} = \left(\frac{(1 - |\dot{\Gamma}_{\Pi}|^2)(1 - |\dot{\Gamma}_A|^2)}{(1 - |\dot{\Gamma}_{\Pi}| |\dot{\Gamma}_A|)^2} - 1 \right) 100 \%;$$

$$\delta_{\text{рас+}} = \left(\frac{(1 - |\dot{\Gamma}_{\Pi}|^2)(1 - |\dot{\Gamma}_A|^2)}{(1 + |\dot{\Gamma}_{\Pi}| |\dot{\Gamma}_A|)^2} - 1 \right) 100 \%,$$

где $|\dot{\Gamma}_{\Pi}|$ и $|\dot{\Gamma}_A|$ – модули комплексных коэффициентов отражения входа термоэлектрического преобразователя измерителя мощности и выхода измерительной антенны соответственно, отн. ед.

В качестве результата измерений берется максимальное по модулю из значений $\delta_{\text{рас-}}$ и $\delta_{\text{рас+}}$. Границы погрешности из-за рассогласования, рассчитанные на начальном этапе по приведенным формулам, составляли $\pm(1,2 \dots 17,8) \%$.

Для уменьшения систематической погрешности из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте был разработан модернизированный метод, основанный на применении поправочных множителей, отличающийся использованием для расчета множителей информации о модулях и аргументах комплексных коэффициентов отражения компонентов СВЧ измерительного тракта. Метод был подробно рассмотрен в [5] и позволил, выполнив измерения комплексных коэффициентов отражения термоэлектрических преобразователей и измерительных антенн, рассчитать и ввести в результаты измерений поправочные множители, обеспечивая снижение погрешности из-за рассогласования в 9–10 раз. Термоэлектрические преобразователи измерителей мощности и измерительные антенны были исследованы в безэховой камере эталона, измерения комплексных коэффициентов отражения выполнены с шагом 1 МГц во всем рабочем диапазоне частот эталона. В результате применения метода границы НСП из-за рассогласования были уменьшены до $\pm(0,1 \dots 1,5) \%$.

Погрешность определения эффективной площади эталонной антенны $\delta_{\text{эфф}}$ определяется методикой ее измерения и точностными характеристиками применяемых для этого эталонных СИ. Что касается эксплуатируемой до создания эталона установки П1-9, то калибровка эталонных антенн осуществлялась на национальном эталоне ГЭТ 160-2006

с расширенной неопределенностью результатов измерений не более $\pm(7,2 \dots 12,2) \%$ в зависимости от диапазона частот.

Анализ методов измерений эффективной площади приведен в [6]. В качестве наиболее перспективного метода был выделен метод трех антенн, позволяющий осуществить прослеживаемость результатов измерений к единице длины – метру, при этом отпадает надобность транспортирования антенн разработанного эталона за границу для получения единицы ППЭ от вышестоящих по поверочной схеме эталонов, что, несомненно, является одним из основных его достоинств. Был разработан модернизированный метод, заключающийся в использовании уравнений измерений, включающих поправочные множители с учетом комплексных коэффициентов отражения компонентов СВЧ тракта излучающего и измерительного блока эталона, что позволило уменьшить погрешность метода трех антенн более чем в 5 раз. Границы неисключенной систематической погрешности при определении эффективной площади антенн ETS3115, П6-63, П6-64 по предложенной методике составили $\pm(2,3 \dots 3,8) \%$ [6].

Эффективная площадь антенны П6-62 в диапазоне частот от 0,3 до 1,0 ГГц была определена методом эталонной антенны с помощью эталонной установки напряженности электрического поля УНЭП, прошедшей калибровку на государственных эталонах Российской Федерации. Границы относительной погрешности определения эффективной площади составили не более $\pm 4,5 \%$.

Погрешность измерения мощности сигнала на выходе эталонной антенны $\delta_{\text{им}}$ определяется точностными характеристиками используемого при проведении измерений измерителя мощности. В состав эталона входят измерители мощности РМ2, у которых пределы допускаемой погрешности измерения мощности зависят от диапазона частот и предела измерений и на этапе предварительных экспериментальных исследований составили не более $\pm(4,0 \dots 6,7) \%$. Суть предложенной модернизации для снижения этой составляющей погрешности заключается в использовании национального эталона единицы мощности электромагнитных колебаний НЭ РБ 39-18. Все термоэлектрические преобразователи измерителей мощности эталона были исследованы и отградуированы на оборудовании эталона единицы мощности и после введения в математическую модель измерений индивидуальных градуировочных коэффициентов границы НСП при измерении мощности на выходе эталонных антенн составили не более $\pm(1,7 \dots 3,2) \%$.

Границы погрешности из-за переотражений между антеннами $\delta_{\text{отр}}$ определяются геометрическими размерами измерительной и излучающей антенн, а также расстоянием между ними. Расстояние между антеннами следует выбирать из условия

$$D = n \frac{A^2}{\lambda},$$

где $n = 2, 3, 4 \dots$;

A – максимальный размер рупорной антенны, м;
 λ – длина волны, м.

Тогда погрешность из-за переотражений может быть определена по формулам:

$$\delta_{\text{отр}} = 0,09 \frac{Z^2 q^2}{n^2}, \quad q = \frac{S_{\text{эфф}}}{S_r}, \quad Z = \frac{S_r}{A^2},$$

где $S_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь рупорной антенны, м²;

S_r – геометрическая поверхность раскрыва рупорной антенны, м²;

λ – длина волны, м [7].

Приведенные формулы не учитывают переотражений от устройства юстировки и перемещения антенны, что можно сделать при оценивании погрешности из-за переотражений в безэховой камере. В результате расчетов на основании параметров антенн эталона границы относительной погрешности из-за переотражений между антеннами составили не более $\pm(0,1 \dots 0,7) \%$.

Границы погрешности из-за неточности позиционирования и юстировки эталонных антенн $\delta_{\text{поз}}$ и неточности позиционирования при замещении эталонной антенны на исследуемую $\delta_{\text{зам}}$ определяются неточностью установки расстояния между антеннами, неточностью установки антенн по высоте, неточностью наведения на максимум приема и могут быть оценены при проведении серии экспериментальных исследований. Погрешность наведения на максимум приема (согласование электрических осей антенн) зависит от разрешающей способности измерителя мощности на выходе антенны и технических характеристик устройства юстировки и перемещения антенн, осуществляющего поворот антенны по азимуту, углу места и углу поляризации. Погрешность входящего в состав эталона устройства юстировки и перемещения антенны по расстоянию в продольном и поперечном направлениях составляет не более ± 1 мм, по азимуту и поляризации – не более ± 1 градус. Суммарная погрешность позиционирования измерительных и излучающих антенн эталона составляет не более $\pm 0,5 \%$, погрешность замещения для малонаправленных антенн – не более $\pm 1,5 \%$ [7].

Относительная погрешность из-за непостоянства электромагнитного поля за время из-

мерений $\delta_{\text{нс}}$ обусловлена двумя причинами. Во-первых, она определяется кратковременной нестабильностью сигнала излучающего блока эталона. У входящего в состав эталона генератора сигналов нестабильность уровня выходной мощности за 15 мин работы – не более $\pm 0,01$ дБ, что достаточно для проведения измерений. Выходной сигнал подается на вход излучающей антенны через направленный ответвитель с подключенным в его боковом плече измерителем мощности РМ2. В случае необходимости амплитуда выходного сигнала генератора корректируется с помощью программного обеспечения.

Во-вторых, на постоянство поля в требуемой точке пространства могут оказать влияние внешние электромагнитные поля. Поскольку в состав эталона входит экранированная безэховая камера, сводящая к минимуму возможность влияния на результаты измерений внешних электромагнитных полей, а также используются направленные антенны, экспериментальные исследования показали, что суммарная погрешность за счет непостоянства поля при работе эталона не превышает $\pm 0,5 \%$.

Погрешность из-за переотражений электромагнитных полей от стен безэховой камеры и местных предметов $\delta_{\text{бэх}}$ (например, опоры крепления устройства юстировки и перемещения антенн) обусловлена тем, что энергия в приемную антенну попадает не только прямым лучом, но и по более сложным схемам. В экранированных безэховых камерах (БЭК) условия распространения электромагнитных волн должны быть приближены к идеальным условиям свободного пространства. Для этого внутренние поверхности камеры покрывают радиопоглощающим материалом. Из-за неполного поглощения возникает интерференция электромагнитных волн, обусловленная сложением амплитуд электромагнитного поля излучающей антенны и вторичных источников излучения. Влияние каждого вторичного источника определяется коэффициентом отражения радиопоглощающего материала для соответствующего угла падения волны, диаграммами направленности излучающей и измерительной антенн, а также взаимным расположением основного и вторичного источников излучения относительно измерительной антенны. В литературе описаны способы учета такой погрешности при однолучевом отражении электромагнитных волн, например при проведении измерений на открытых измерительных площадках [7, 8]. В условиях многолучевых переотражений применение таких методик сложно реализуемо. Основным параметром, характеризующим безэховую камеру, является

коэффициент безэховости. Коэффициент безэховости определяет величину неисключенной систематической составляющей погрешности из-за переотражений в БЭК, снизить которую применением поправочных множителей затруднительно. Разработаны методики, позволяющие оценить коэффициент безэховости без проведения экспериментальных исследований, а лишь исходя из габаритных размеров БЭК, объема безэховой зоны и применяемых радиопоглощающих материалов. Тем не менее прогнозировать погрешность из-за переотражений менее $\pm(3,0 \dots 5,0) \%$, основываясь лишь на теоретических расчетах, неверно [9, 10].

Известные методы определения коэффициента безэховости БЭК требуют либо наличия измерительных антенн с почти идеальными диаграммами направленности, либо предполагают трудоемкие и длительные по времени исследования. Анализ методов определения коэффициента безэховости экранированной безэховой камеры выполнен в работе [11]. В [11] также приведена разработанная методика определения коэффициента безэховости, основанная на сравнении теоретических и экспериментальных данных результатов измерений напряженности электромагнитного поля, создаваемого перемещающейся прецизионной излучающей антенной. Методика позволяет с использованием средств автоматизации по

ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 и адаптированных алгоритмов обработки данных выполнять измерения в автоматическом режиме с малым шагом перестройки частоты и в широком диапазоне частот. Это существенно сокращает трудоемкость и время выполнения работ по определению коэффициента безэховости камеры в сравнении с известными методами. По результатам экспериментальных исследований значение коэффициента безэховости БЭК эталона составило минус (30 ... 35) дБ в диапазоне частот от 1 до 3 ГГц и минус (35 ... 40) дБ – в диапазоне частот от 3 до 18 ГГц. Пределы погрешности из-за переотражений от стен БЭК, например при измерении модуля коэффициента передачи между антеннами, $\delta_{\text{бэх}}$, %, можно рассчитать по формуле [12]:

$$\delta_{\text{бэх}} = \pm \frac{10^{\eta/20}}{F(\Theta, \varphi)} 100 \%,$$

где η – коэффициент безэховости экранированной БЭК, дБ;

$F(\Theta, \varphi)$ – нормированная амплитудная диаграмма направленности антенны в зависимости от углов Θ и φ в направлении источника электромагнитного поля в системе координат согласно [13].

С учетом полученного значения коэффициента безэховости экранированная БЭК эталона обеспечивает условия для воспроизведения и передачи единицы ППЭ с НСП из-за переотражений не более $\pm(1,0 \dots 2,0) \%$.

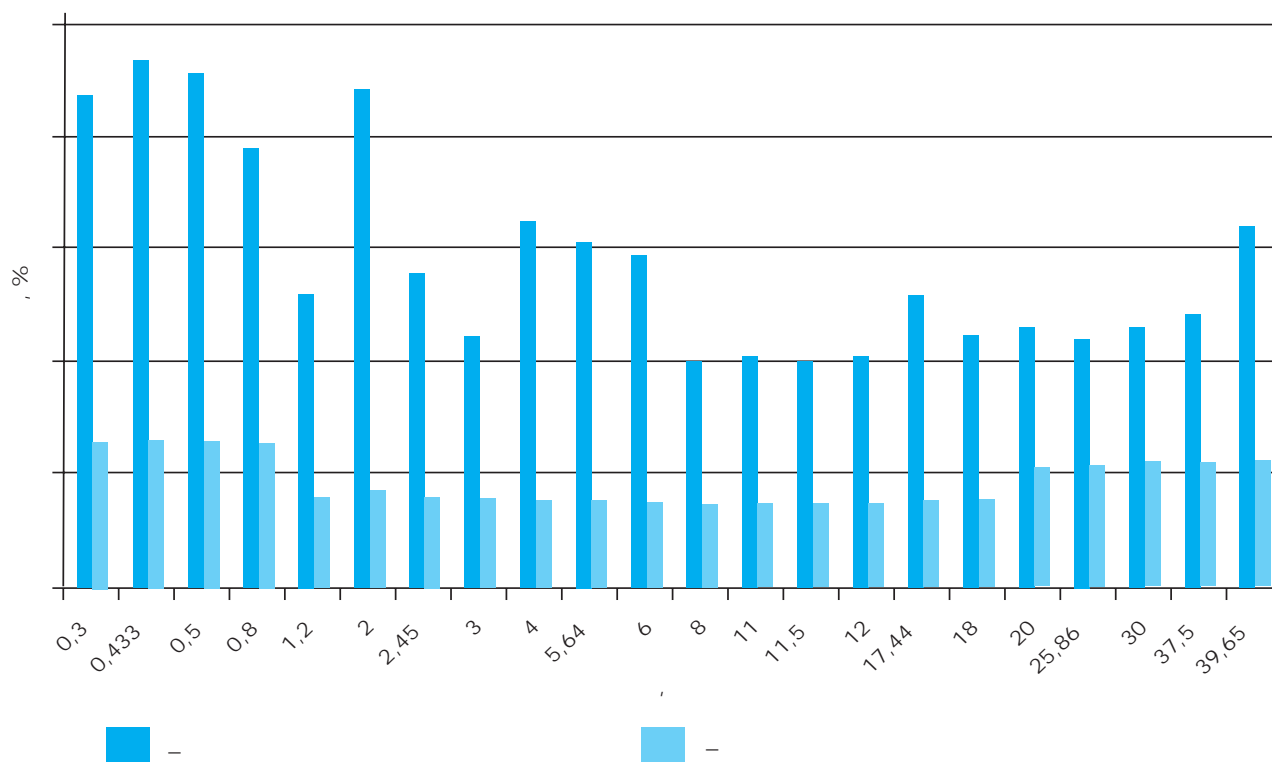


Рис. 1. Результаты оценивания НСП до и после выполнения научно-исследовательской работы по усовершенствованию эталона

Границы относительной неисключенной систематической погрешности эталона при воспроизведении единицы ППЭ были найдены по формуле

$$\delta_3 = \pm 1,1 \sqrt{\delta_{\text{им}}^2 + \delta_{\text{эфф}}^2 + \delta_{\text{рас}}^2 + \delta_{\text{отр}}^2 + \delta_{\text{поз}}^2 + \delta_{\text{нс}}^2 + \delta_{\text{бэх}}^2}.$$

В результате применения разработанных модернизированных методов улучшения точностных характеристик эталона границы НСП были сокращены в 3–4 раза и составляют не более $\pm(4,1 \dots 6,6) \%$. Результаты оценивания НСП до и после выполнения научно-исследовательской работы по совершенствованию эталона приведены на рис. 1.

Оценивание неопределенности измерений при воспроизведении единицы ППЭ ЭМП выполнено в соответствии с ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределенность измерения – Часть 3: Руководство по выражению неопределенности измерений (GUM:1995)» с учетом требований ГОСТ 8.381-2009 [14]. Функция измерений представлена в виде:

$$\Pi_{\text{эт}} = \frac{\mu k P_{\text{эт}}}{S_{\text{эт}}} (1 + \delta_{\text{им}} + \delta_{\text{рас}} + \delta_{\text{отр}} + \delta_{\text{поз}} + \delta_{\text{нс}} + \delta_{\text{бэх}}),$$

где $\Pi_{\text{эт}}$ – воспроизводимое эталонное значение единицы ППЭ ЭМП, Вт/м²;

$P_{\text{эт}}$ – мощность сигнала на выходе эталонной измерительной антенны, Вт;

$S_{\text{эт}}$ – эффективная площадь эталонной измерительной антенны, м²;

μ – поправочный множитель на рассогласование в СВЧ измерительном тракте между эталонной антенной и термоэлектрическим преобразователем измерителя мощности;

k – поправочный множитель на коэффициент преобразования термоэлектрического преобразователя измерителя мощности;

$\delta_{\text{им}}$ – поправка на неидеальность характеристик измерителя мощности при измерениях мощности на выходе эталонной антенны после использования поправочного множителя k , отн. ед.;

$\delta_{\text{рас}}$ – поправка на неисключенный остаток погрешности из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте между эталонной антенной и термоэлектрическим преобразователем измерителя мощности после введения поправочного множителя μ , отн. ед.;

$\delta_{\text{отр}}$ – поправка на переотражения между антеннами, отн. ед.;

$\delta_{\text{поз}}$ – поправка на неточность позиционирования и юстировки эталонной излучающей и измерительной антенны, отн. ед.;

$\delta_{\text{нс}}$ – поправка на непостоянство электромагнитного поля за время измерений, отн. ед.;

$\delta_{\text{бэх}}$ – поправка на переотражения электромагнитных полей в БЭК, отн. ед.

Анализ входных величин и расчет стандартных неопределенностей приведен в таблице 1.

Таблица 1

Анализ входных величин

Входная величина $P_{\text{эт}}$, Вт	<p>Тип неопределенности: А</p> <p>Вид распределения: нормальное</p> <p>Значение оценки: $\bar{P}_{\text{эт}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{\text{эт}i}$, Вт,</p> <p>где $P_{\text{эт}i}$ – результат i-го наблюдения, Вт;</p> <p>n – количество наблюдений.</p> <p>Стандартная неопределенность: $u(P_{\text{эт}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{\text{эт}i} - \bar{P}_{\text{эт}})^2}{n(n-1)}}$, Вт</p>
Входная величина μ	<p>Значение оценки: μ, определяется по результатам экспериментальных исследований на основании комплексных коэффициентов отражения выхода эталонной измерительной антенны и входа термоэлектрического преобразователя измерителя мощности. Рассматривается как постоянная величина</p>
Входная величина k	<p>Значение оценки: k, определяется по результатам калибровки измерителя мощности на оборудовании национального эталона единицы мощности электромагнитных колебаний НЭ РБ 39-18. Рассматривается как постоянная величина</p>
Входная величина $S_{\text{эт}}$, м ²	<p>Тип неопределенности: В</p> <p>Вид распределения: нормальное</p> <p>Значение оценки: $S_{\text{эт}}$, м²</p> <p>– для эталонных измерительных антенн ETS 3115, П6-63 и П6-64 определяется по результатам калибровки методом трех антенн [6];</p> <p>– для измерительной антенны П6-62 определяется по результатам калибровки методом эталонной антенны с помощью эталонной установки напряженности электрического поля УНЭП.</p> <p>Стандартная неопределенность: $u(S_{\text{эт}})$, м², – определяется по результатам калибровки; составляет $(1,48 \dots 2,25) \cdot 10^{-2}$ отн. ед. для эталонных измерительных антенн ETS 3115, П6-63 и П6-64, и $2,59 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. – для эталонной измерительной антенны П6-62</p>

Продолжение таблицы 1

Входная величина $\delta_{им}$, отн. ед.	<p>Тип неопределенности: В</p> <p>Вид распределения: нормальное</p> <p>Значение оценки: 0 отн. ед.</p> <p>Стандартная неопределенность: $u(\delta_{им}) = (0,85 \dots 1,6) \cdot 10^{-2}$, отн. ед., – определяется по результатам калибровки измерителя мощности на оборудовании национального эталона единицы мощности электромагнитных колебаний НЭ РБ 39-18</p>
Входная величина $\delta_{рас}$, отн. ед.	<p>Тип неопределенности: В</p> <p>Вид распределения: арксинусоидальное</p> <p>Значение оценки: 0 отн. ед.</p> <p>Интервал, в котором находится значение входной величины: $r_{рас} = \pm(0,1 \dots 1,5) \cdot 10^{-2}$, отн. ед., – остаток неисключенной систематической погрешности после применения поправочного множителя μ [5]</p> <p>Стандартная неопределенность: $u(\delta_{рас}) = \frac{r_{рас}}{\sqrt{2}} = (0,07 \dots 1,06) \cdot 10^{-2}$, отн. ед.</p>
Входная величина $\delta_{отр}$, отн. ед.	<p>Тип неопределенности: В</p> <p>Вид распределения: равномерное</p> <p>Значение оценки: 0 отн. ед.</p> <p>Интервал, в котором находится значение входной величины: $r_{отр} = \pm(0,1 \dots 0,7) \cdot 10^{-2}$ – рассмотрено выше при анализе источников НСП эталона</p> <p>Стандартная неопределенность: $u(\delta_{отр}) = \frac{r_{отр}}{\sqrt{3}} = (0,07 \dots 0,41) \cdot 10^{-2}$, отн. ед.</p>
Входная величина $\delta_{поз}$, отн. ед.	<p>Тип неопределенности: В</p> <p>Вид распределения: равномерное</p> <p>Значение оценки: 0 отн. ед.</p> <p>Интервал, в котором находится значение входной величины: $r_{поз} = \pm 0,5 \cdot 10^{-2}$, отн. ед., – рассмотрено выше при анализе источников НСП эталона</p> <p>Стандартная неопределенность: $u(\delta_{поз}) = \frac{0,5 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{3}} = 0,288 \cdot 10^{-2}$, отн. ед.</p>
Входная величина $\delta_{нс}$, отн. ед.	<p>Тип неопределенности: В</p> <p>Вид распределения: равномерное</p> <p>Значение оценки: 0 отн. ед.</p> <p>Интервал, в котором находится значение входной величины: $r_{нс} = \pm 0,5 \cdot 10^{-2}$, отн. ед., – рассмотрено выше при анализе источников НСП эталона</p> <p>Стандартная неопределенность: $u(\delta_{нс}) = \frac{0,5 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{3}} = 0,288 \cdot 10^{-2}$, отн. ед.</p>
Входная величина $\delta_{бэх}$, отн. ед.	<p>Тип неопределенности: В</p> <p>Вид распределения: равномерное</p> <p>Значение оценки: 0 отн. ед.</p> <p>Интервал, в котором находится значение входной величины: $r_{бэх} = \pm(1,5 \dots 3,0) \cdot 10^{-2}$, отн. ед., – по результатам экспериментальных исследований [11]</p> <p>Стандартная неопределенность: $u(\delta_{бэх}) = \frac{r_{бэх}}{\sqrt{3}} = (0,87 \dots 1,73) \cdot 10^{-2}$, отн. ед.</p>

Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Коэффициенты чувствительности определяются как частные производные и будут равны:

$$C_{P_{эт}} = \frac{\partial \Pi_{эт}}{\partial P_{эт}} = \frac{\mu k}{S_{эт}} (1 + \delta_{им} + \delta_{рас} + \delta_{отр} + \delta_{поз} + \delta_{нс} + \delta_{бэх});$$

$$C_{S_{эт}} = \frac{\partial \Pi_{эт}}{\partial S_{эт}} = \frac{\mu k P_{эт}}{S_{эт}^2} (1 + \delta_{им} + \delta_{рас} + \delta_{отр} + \delta_{поз} + \delta_{нс} + \delta_{бэх});$$

$$C_{\delta_{им}} = \frac{\partial \Pi_{эт}}{\partial \delta_{им}} = \frac{\mu k P_{эт}}{S_{эт}}; C_{\delta_{рас}} = \frac{\partial \Pi_{эт}}{\partial \delta_{рас}} = \frac{\mu k P_{эт}}{S_{эт}}; C_{\delta_{отр}} = \frac{\partial \Pi_{эт}}{\partial \delta_{отр}} = \frac{\mu k P_{эт}}{S_{эт}};$$

$$C_{\delta_{поз}} = \frac{\partial \Pi_{эт}}{\partial \delta_{поз}} = \frac{\mu k P_{эт}}{S_{эт}}; C_{\delta_{нс}} = \frac{\partial \Pi_{эт}}{\partial \delta_{нс}} = \frac{\mu k P_{эт}}{S_{эт}}; C_{\delta_{бэх}} = \frac{\partial \Pi_{эт}}{\partial \delta_{бэх}} = \frac{\mu k P_{эт}}{S_{эт}};$$

$$C_{\mu} = 0; C_k = 0.$$

Вклады $u_j(F)$ каждой входной величины в суммарную стандартную неопределенность вычисляются по формуле

$$u_j(F) = c_j u(x_j),$$

где x_j – оценка j -й входной величины;

F – оценка измеряемой величины;

c_j – коэффициент чувствительности для j -й входной величины.

Суммарную стандартную неопределенность результата измерения $u_c(F)$ вычисляют по формуле

$$u_c(F) = \sqrt{\sum_{j=1}^p c_j^2 u^2(x_j)},$$

где p – количество входных величин.

Процентный вклад вычисляют с помощью выражения $\frac{u_j^2(F)}{u_c^2(F)} 100\%$.

Расширенную неопределенность вычисляют по формуле $U = k u_c(F)$, где k – коэффициент охвата, который равен $k = 2,0$ в предположении нормального распределения возможных значений измеряемой величины при уровне доверия $P = 0,95$.

Пример бюджета неопределенности на частоте 4,0 ГГц для эталонной измерительной антенны ETS 3115 приведен в таблице 2.

Результаты оценивания неопределенности измерений при воспроизведении единицы ППЭ ЭМП в рабочем диапазоне работ усовершенствованного эталона, а также неисключенной систематической погрешности, среднего ква-

дратического отклонения результатов измерений при числе измерений $n = 5$ и доверительных границ суммарной погрешности при доверительной вероятности $P = 0,95$ приведены в таблице 3.

Погрешность передачи размера единицы ППЭ ЭМП состоит из суммы случайных и неисключенных систематических погрешностей метода передачи размера единицы. В неисключенную систематическую погрешность передачи размера единицы входят следующие составляющие:

$\delta_{\epsilon \text{ отр}}$ – относительная погрешность из-за переотражений между эталонной излучающей и исследуемой антенной, границы составляют не более $\pm(0,1...0,7)\%$;

$\delta_{\epsilon \text{ зам}}$ – относительная погрешность из-за неточности позиционирования при замещении эталонной антенны на исследуемую, границы составляют не более $\pm(1,5...2,0)\%$;

$\delta_{\epsilon \text{ бэж}}$ – относительная погрешность из-за переотражений электромагнитных полей от стен без-

Таблица 2

Бюджет неопределенности на частоте 4,0 ГГц

Величина X_j	Единица измерения	Значение x_j	Интервал	Тип неопределенности	Распределение вероятностей	Стандартная неопределенность $u(x_j)$	Коэффициент чувствительности c_j	Вклад в неопределенность u_j (Пэ), Вт/м ²	Процентный вклад, %
$P_{\text{эт}}$	Вт	0,0007818	–	A	норм.	0,000001	250,75	0,00014	0,2
$S_{\text{эт}}$	м ²	0,00464	0,00013	B	норм.	0,000069	–42,176	–0,00293	51,7
μ	–	1,101	–	–	–	–	–	–	–
k	–	1,0586	–	–	–	–	–	–	–
$\delta_{\text{им}}$	отн. ед.	0	0,017	B	норм.	0,008500	0,196	0,00167	16,8
$\delta_{\text{рас}}$	отн. ед.	0	0,011	B	арксин.	0,006351	0,196	0,00125	9,4
$\delta_{\text{отр}}$	отн. ед.	0	0,003	B	равном.	0,001732	0,196	0,00034	0,7
$\delta_{\text{поз}}$	отн. ед.	0	0,005	B	равном.	0,002887	0,196	0,00057	1,9
$\delta_{\text{нс}}$	отн. ед.	0	0,005	B	равном.	0,002887	0,196	0,00057	1,9
$\delta_{\text{бэж}}$	отн. ед.	0	0,015	B	равном.	0,008660	0,196	0,00170	17,4
$P_{\text{эт}}$	Вт/м ²	0,1960	–	–	–	0,0041	–	–	–
Расширенная неопределенность, Вт/м ² (коэффициент охвата $k = 2$ при $P = 0,95$)						0,0082	–	–	–
Расширенная неопределенность, % (коэффициент охвата $k = 2$ при $P = 0,95$)						4,1	–	–	–

Таблица 3

Точностные характеристики эталона при воспроизведении единицы ППЭ ЭМП

Частота, ГГц	НСП, %	СКО, %	Доверительные границы суммарной погрешности, %	Расширенная неопределенность, %
0,30	6,5	0,4	6,5	6,7
0,43	6,5	0,3	6,6	6,8
0,50	6,5	0,3	6,6	6,8
0,80	6,4	0,4	6,5	6,7
1,20	4,7	0,3	4,9	4,6
2,00	4,9	0,4	5,1	4,9
2,45	4,7	0,3	4,9	4,6
3,00	4,6	0,3	4,9	4,6
4,00	4,3	0,2	4,4	4,1
5,64	4,3	0,3	4,5	4,2
6,00	4,2	0,4	4,4	4,2
8,00	4,1	0,7	4,6	4,2
11,00	4,1	0,4	4,4	4,1
11,50	4,1	0,7	4,6	4,1
12,00	4,2	0,8	4,6	4,3
17,44	4,3	1,3	5,4	4,8
18,00	5,2	0,3	5,3	5,0
20,00	6,3	0,4	6,6	6,2
25,86	6,4	0,6	6,8	6,3
30,00	6,5	0,5	6,7	6,4
37,50	6,5	0,4	6,7	6,4
39,65	6,6	0,7	7,2	6,6

эховой камеры при проведении измерений исследуемой антенной, границы составляют не более $\pm(1,0...3,0)$ %;

$\delta_{\epsilon_{\text{НП}}}$ – относительная погрешность из-за неплоскостности электромагнитного поля в месте сличения антенн.

Границы относительной погрешности из-за неплоскостности электромагнитного поля в месте сличения антенн $\delta_{\epsilon_{\text{НП}}}$ определяются характеристиками исследуемых антенн. Если две антенны с различными характеристиками эффективной площади сравниваются в неплоском поле, возникает погрешность, обусловленная различной реакцией этих антенн на неплоское поле. Для уменьшения погрешности из-за неплоскостности электромагнитного поля следует увеличивать расстояние между антеннами, которое должно быть не менее, чем определенное по формуле

$$D = 2 \frac{A^2}{\lambda}$$

где A – максимальный раскрыв рупорной антенны, м;
 λ – длина волны, м.

Если расстояние выбрано в соответствии с приведенной формулой, погрешность за счет неплоскостности не превышает $\pm 0,8$ дБ. При сличении двух неидентичных антенн, эффективная поверхность которых различается не более чем на ± 20 %, погрешность обычно не превышает ± 2 %. Таким образом, границы НСП из-за неплоскостности электромагнитного поля для расчетов приняты не более $\pm(2 \dots 7)$ % в зависимости от расстояния между антеннами и значениями их эффективной площади [7].

Оценку суммарного среднеквадратического отклонения результата измерений (СКО) при передаче единицы $\tilde{S}_{\epsilon\Sigma}$ находят по формуле

$$\tilde{S}_{\epsilon\Sigma} = \sqrt{\sum_{j=1}^k \frac{\delta_{\epsilon j}^2}{3} + S_{\epsilon}^2}$$

где $\delta_{\epsilon j}$ – граница j -й неисключенной систематической погрешности метода передачи размера единицы;

S_e – СКО случайной погрешности метода передачи размера единицы;

k – число неисключенных систематических погрешностей.

Случайная погрешность передачи определяется непосредственно при измерениях, СКО случайной погрешности метода передачи S_e обычно составляет (1 ... 3) %. Тогда суммарное СКО результата измерений при передаче единицы $\hat{S}_{e\Sigma}$ составит (1,8 ... 5,5) %.

Заключение

В результате выполненной научно-исследовательской работы по совершенствованию существующих принципов и методов воспроизведения единицы ППЭ национальным эталоном единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15 границы НСП эталона были сокращены в 3–4 раза. Разработанные модернизированные методы по снижению НСП внедрены в работу эталона, что позволило повысить точность по данному виду измерений. вванный эталон обеспечивает воспроизведение единицы плотности потока энергии в диапазоне частот от 300 МГц до 39,65 ГГц со среднеквадратическим отклонением результатов измерений от 0,2 до 1,3 % при числе измерений $n = 5$ и неисключенной систематической погрешности от $\pm(4,4 \dots 7,2)$ % в зависимости от диапазона частот и амплитуды единицы плотности потока энергии. Доверительные границы суммарной погрешности при воспроизведении единицы ППЭ ЭМП эталоном составляют $\pm(4,4 \dots 7,2)$ % при доверительной вероятности $P = 0,95$. Расширенная неопределенность результатов измерений при воспроизведении единицы составляет $\pm(4,1 \dots 6,8)$ % при доверительной вероятности $P = 0,95$ и допущении нормального закона распределения (коэффициент охвата $k = 2,0$).

Список использованной литературы

1. Тищенко, В. А. Создание и совершенствование эталонной базы в области радиочастотных электромагнитных измерений / В. А. Тищенко, М. В. Балаханов, В. И. Лукьянов. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013. – 198 с.

2. Вольнец, А. С. Национальный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля / А. С. Вольнец // Метрология и приборостроение. – 2016. – № 2. – С. 12–16.

3. 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.

4. IEEE Std 149-1979 (R2008) IEEE Standard Test Procedures for Antennas.

5. 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. 19–26.

6. 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.

7. Мелехов, М. Е. Поверка средств измерений напряженности электромагнитного поля: учеб. пособие / М. Е. Мелехов, П. А. Иващенко. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 92 с.

8. Hemming, Leland H. Antenna Gain Calibration on a Ground Reflection Range / Leland H. Hemming, Raymon A. Heaton // IEEE Transactions on antennas and propogation. – 1973. – Vol. AP-21, № 4. – P. 532–538.

9. Rodriguez, V. Validation of a Method for Predicting Anechoic Chamber Performance / V. Rodriguez // IEEE Antennas & Propagation Magazine. – 2018. – P. 31–40.

10. Мицмахер, М. Ю. Безэховые камеры СВЧ / М. Ю. Мицмахер, В. А. Торгованов. – М.: Радио и связь, 1982. – С. 129.

11. Вольнец, А. С. Реализация метода КСВн при определении коэффициента безэховости экранированной безэховой камеры / Вольнец, А. С. // Метрология и приборостроение. – 2019. – № 1. – С. 18–24.

12. Баженов, Н. Р. Применение результатов аттестации радиобезэховых камер при оценке точности измерения характеристик антенн навигационной аппаратуры потребителя / Н. Р. Баженов, И. М. Малай // Измерительная техника. – 2015. – № 5. – С. 61–63.

13. ГОСТ Р 8.773-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Антенны навигационной аппаратуры потребителей глобальной навигационной спутниковой системы. Нормируемые электрические параметры и методы их измерений.

14. ГОСТ 8.381-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения точности.

Алексей Сергеевич ВОЛЫНЕЦ,

начальник отдела радиоэлектронных измерений БелГИМ

Дата поступления 28.05.2020