

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 537.872.081

**ВОЛЫНЕЦ**  
Алексей Сергеевич

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.11.08 – Радиоизмерительные приборы

Минск 2022

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Гусинский Александр Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Козлов Сергей Вячеславович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Горшков Сергей Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, директор ООО «Милитсофт Солюшенс».

Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «24» февраля 2022 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.06 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «21» января 2022 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент

О.В. Бойправ

## ВВЕДЕНИЕ

Измерение плотности потока энергии электромагнитного поля относится к сфере государственного регулирования. Так, в соответствии с Законом Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» измерители уровней электромагнитных излучений и измерительные антенны входят в перечень средств измерений, подлежащих обязательной государственной поверке при применении их для измерений в областях обеспечения защиты жизни и здоровья человека, обороны и безопасности государства, экспертизы на электромагнитную совместимость. Кроме того, средства измерений параметров электромагнитного поля используются в промышленности, научных исследованиях, экологии, транспорте, телекоммуникациях и других отраслях.

В Республике Беларусь эксплуатируется большое количество измерителей плотности потока энергии типа ПЗ- и измерительных антенн типа Пб-, а также ряд импортных измерителей плотности потока энергии (Narda, HI и др.). Перечисленные средства измерений обеспечивают контроль уровней электромагнитного поля в соответствии с требованиями стандартов системы безопасности труда, санитарных правил и норм, устанавливающих предельно допустимые уровни воздействия электромагнитных излучений на людей. Полученные с их помощью результаты измерений позволяют провести аттестацию рабочих мест по безопасности в части электромагнитных излучений, сертификацию продукции по параметрам электромагнитной совместимости, специследования по защите информации, осуществить контроль за использованием радиочастотного спектра и решить прочие задачи, требующие измерения параметров электромагнитных полей. Для обеспечения достоверности результатов этих работ необходимо предусмотреть выполнение метрологической оценки указанной группы средств измерений. Эксплуатируемая в Республике Беларусь установка для поверки измерителей плотности потока энергии электромагнитного поля П1-9 не обеспечивает метрологическую оценку средств измерений плотности потока энергии в полном объеме. Возникло противоречие между современными требованиями промышленности к обеспечению необходимого диапазона частот и точности воспроизведения и передачи единицы плотности потока энергии электромагнитного поля с должным уровнем автоматизации и возможностями обеспечить данные характеристики в рамках существующей системы воспроизведения и передачи единицы с помощью эксплуатируемой в стране установки П1-9. Это противоречие подтверждает необходимость модернизации методов воспроизведения и передачи единицы плотности потока энергии и разработки нового эталона.

Данная диссертационная работа посвящена решению научной задачи по совершенствованию существующих принципов и методов воспроизведения и передачи единицы плотности потока энергии, созданию на их основе и исследованию эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля, что обусловлено требованиями развития таких отраслей промышленности, как радиоэлектроника и приборостроение.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертационной работы соответствует подразделу 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156.

Основная научная программа, связанная с проведенными исследованиями, – задание 2.3 «Разработать и создать эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля» научно-технической подпрограммы «Эталоны Беларуси» государственной научно-технической программы «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований («Эталоны и научные приборы»), 2011–2015 гг.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное обоснование усовершенствованных методов и средств измерений для воспроизведения и передачи единицы плотности потока энергии электромагнитного поля, отличающихся повышенной точностью, создание и внедрение на их основе эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля, что позволит существенно повысить точность по данному виду измерений и метрологически обеспечить имеющиеся в стране средства измерений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научные задачи:

1. Проанализировать существующие и разработать усовершенствованные методы воспроизведения единицы плотности потока энергии электромагнитного поля и передачи ее размера различным типам средств измерений, проанализировать источники погрешности измерений.

2. Разработать метод уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте при проведении высокоточных измерений плотности потока энергии электромагнитного поля, а также при определении эффективной площади измерительной антенны методом трех антенн.

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

4. Создать на основе разработанных высокоточных методов и средств измерений плотности потока энергии электромагнитного поля аппаратно-программные средства эталона с характеристиками, соответствующими современным требованиям уровня развития радиоэлектроники.

5. Оценить точностные характеристики эталона при воспроизведении и передаче единицы плотности потока энергии с учетом предложенных методов уменьшения составляющих погрешности измерений.

### **Научная новизна**

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден метод уменьшения погрешности из-за рассогласования в СВЧ тракте, основанный на применении комплексных коэффициентов отражения элементов тракта вместо их модулей для расчета поправочных множителей, используемых при определении плотности потока энергии электромагнитного поля и эффективной площади антенн и позволяющих уменьшить погрешность из-за рассогласования в 9–10 раз.

2. Разработан и обоснован метод определения коэффициента безэховости экранированной безэховой камеры на основе применения прецизионной дипольной антенны вместо рупорной, что позволяет сократить количество операций при проведении измерений и одновременно получить информацию о пространственной структуре электромагнитного поля в безэховой камере за меньшее время измерений.

3. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден метод измерений коэффициента усиления антенны с эллиптической поляризацией с применением измерительной антенны с линейной поляризацией способом замещения на основе введения дополнительного корректирующего коэффициента, зависящего от параметров эллиптичности исследуемой антенны.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод уменьшения погрешности из-за рассогласования в СВЧ тракте, основанный на использовании комплексных коэффициентов отражения элементов СВЧ тракта вместо их модулей для расчета поправочных множителей, используемых при определении плотности потока энергии электромагнитного поля и эффективной площади антенн, позволяющий уменьшить относительную неисключенную систематическую погрешность из-за рассогласования при измерениях методом замещения в 9–10 раз до уровня  $\pm(0,1-1,6) \cdot 10^{-2}$ , а относительную погрешность определения эффективной площади методом трех антенн в 3–5 раз до уровня  $\pm(2,9-3,9) \cdot 10^{-2}$ .

2. Метод определения коэффициента безэховости экранированной безэховой камеры, основанный на применении прецизионной дипольной антенны вместо рупорной в сочетании с алгоритмами обработки результатов

измерений, основанными на сравнении теоретических и экспериментальных данных о напряженности электромагнитного поля, позволяющий снизить дискретность по частоте при измерениях значений коэффициента безэховости в различных точках камеры в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц с одновременным уменьшением времени измерений не менее чем в 15 раз при сохранении точности измерений.

3. Метод измерений коэффициента усиления антенны СВЧ диапазона, основанный на применении измерительной антенны с линейной поляризацией способом замещения в сочетании с использованием дополнительного корректирующего коэффициента, зависящего от коэффициента эллиптичности исследуемой антенны, позволяющий определять коэффициент усиления антенны с эллиптической поляризационной характеристикой в диапазоне частот от 300 МГц до 39,65 ГГц с расширенной неопределенностью результатов измерений не более 1,0 дБ при доверительной вероятности  $p = 0,95$ .

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Результаты диссертационной работы, сформулированные в защищаемых положениях и выводах, отражают личный вклад соискателя, который заключается в выдвижении и проверке идей и гипотез, теоретическом и экспериментальном обосновании высокоточных методов и средств измерений плотности потока энергии электромагнитного поля, анализе и интерпретации результатов исследований. Основные работы по созданию эталона выполнены соискателем в качестве ответственного исполнителя задания 2.3 «Разработать и создать эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля», а также при проведении ежегодных научно-исследовательских работ в качестве ученого хранителя эталона.

Основными соавторами публикаций автора по тематике диссертационной работы являются научный руководитель к.т.н., доцент А. В. Гусинский, определивший направление исследований, его цели и задачи; к.т.н., доцент А. М. Кострикин, принимавший участие в обсуждении методов исследований, а также в планировании работ и интерпретации результатов исследований. Остальные соавторы: старший преподаватель С. М. Лапшин, научные сотрудники А. В. Ворошень и Д. А. Кондрашов участвовали в разработке широкополосного широкодиапазонного генератора сигналов; ведущий инженер А. В. Галыго участвовал в проведении экспериментальных исследований антенн с круговой поляризацией; ведущий инженер О. А. Волынец участвовала в разработке антенных креплений. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

## **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IV Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2011» (Минск, 16–18 ноября 2011 г.); VIII Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2015» (Минск, 25–27 ноября 2015 г.); IX Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2016» (Минск, 23–25 ноября 2016 г.); Международная научно-техническая конференция «Метрология-2017» (Минск, 4–5 апреля 2017 г.); X Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2017» (Минск, 1–3 ноября 2017 г.); Международная научно-техническая конференция «Метрология и измерительная техника (Метрология-2018)» (Харьков, 9–11 октября 2018 г.); XI Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2018» (Минск, 14–16 ноября 2018 г.); Международная научно-техническая конференция «Метрология-2019» (Минск, 27–28 марта 2019 г.). Материалы диссертации докладывались и обсуждались на заседаниях научно-технического совета республиканского унитарного предприятия «Белорусский государственный институт метрологии» (БелГИМ) и в рамках участия соискателя в VI Международном конкурсе «Лучший молодой метролог КООМЕТ», 17–18 мая 2017 г., Астана.

## **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований, представленным в диссертации, опубликовано 15 работ, в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах, 4 статьи в сборниках материалов конференций, 2 тезиса докладов. Получены 1 Евразийский патент на изобретение, 2 патента Республики Беларусь на полезную модель. Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3,15 авторских листа.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и 2 приложений. Полный объем диссертации составляет 183 страницы; из них 119 страниц занимает текст, 22 страницы занимают 45 иллюстраций, на 26 страницах приведены 26 таблиц, 3 страницы занимают 2 приложения. Библиографический список состоит из 122 наименований на 13 страницах, из которых 15 – публикации соискателя.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней рассмотрено современное состояние измерений плотности потока энергии (ППЭ) электромагнитного поля, выполнен анализ точностных характеристик подвергаемых метрологической оценке средств измерений, преимуществ и недостатков возможных для применения методов и способов воспроизведения и передачи единицы ППЭ электромагнитного поля. Среди методов был выделен метод замещения с использованием эталонной антенны (метод эталонной антенны), рассмотренный на примере Государственного первичного эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля в диапазоне частот 0,3–178 ГГц ГЭТ 160-2006 (Российская Федерация). В основу метода положено поочередное измерение в заданной точке пространства ППЭ исследуемым и эталонным измерителем ППЭ, состоящим из эталонной антенны и измерителя мощности. Особенностью рассмотренной реализации метода является уменьшение погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном (СВЧ) тракте за счет использования совместной градуировки эталонной антенны и преобразователя измерителя мощности. В то же время такой подход, в случае необходимости замены первичного преобразователя измерителя мощности, приводит к необходимости проведения повторных продолжительных исследований характеристик как преобразователя, так и измерительной антенны. На основе проведенного анализа для дальнейших исследований выбран метод эталонной антенны, сформулированы основные направления совершенствования метода и поставлены частные научные задачи.

Во **второй главе** предложен и описан усовершенствованный метод воспроизведения и передачи единицы ППЭ для различных типов средств измерений, математические модели измерений при воспроизведении и передаче единицы измерителям ППЭ и определении эффективной площади измерительных антенн. Разработан метод определения коэффициента усиления антенн с эллиптической поляризационной характеристикой с использованием линейно поляризованных эталонных антенн. Измерения по предложенному методу проводят в два этапа. На первом этапе определяют коэффициент усиления исследуемой антенны методом замещения с использованием линейно-поляризованной эталонной антенны. На втором этапе определяют коэффициент эллиптичности исследуемой антенны, на основании которого производят расчет корректирующего коэффициента. Искомый коэффициент усиления антенны с эллиптической поляризацией находят расчетным путем по формулам:

$$G_{\text{ЭЛ}} = G_{\text{дБ}} + G_{\text{кор}} + 3; \quad G_{\text{кор}} = 10 \cdot \lg(0,5(1 + K_{\text{эл}}^2)), \quad (1)$$

где  $G_{\text{ЭЛ}}$  – коэффициент усиления исследуемой антенны с эллиптической поляризацией, дБ;



$G_{\text{дБ}}$  – коэффициент усиления исследуемой антенны, определенный методом замещения с использованием линейно-поляризованной эталонной антенны, дБ;

$G_{\text{кор}}$  – корректирующий коэффициент, дБ;

$K_{\text{эл}}$  – коэффициент эллиптичности исследуемой антенны, отн. ед.

Для антенны, имеющей идеальную круговую поляризационную характеристику, у которой коэффициент эллиптичности равен единице, корректирующий коэффициент равен нулю. В случае, когда исследуемая антенна имеет близкую к линейной поляризационную характеристику, корректирующий коэффициент стремится к минус 3. Таким образом, получена универсальная формула определения коэффициента усиления антенны вне зависимости от степени эллиптичности ее поляризационной характеристики. Расширенная неопределенность результатов измерений коэффициентов усиления предложенным методом составляет 1,0 дБ при доверительной вероятности  $p = 0,95$ . В данной главе также приводятся результаты предварительной оценки неисключенной систематической погрешности (НСП) воспроизведения и передачи единицы ППЭ электромагнитного поля методом эталонной антенны. Определены наиболее существенные источники погрешности: погрешность определения эффективной площади эталонной антенны; погрешность из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте; погрешность измерения мощности сигнала на выходе эталонной антенны; погрешность из-за переотражений электромагнитных полей от стен безэховой камеры (БЭК).

В **третьей главе** предложены и описаны методы уменьшения наиболее существенных составляющих погрешности, входящих в математическую модель измерений. Для уменьшения погрешности из-за рассогласования в СВЧ тракте между эталонной антенной и термоэлектрическим преобразователем измерителя мощности при воспроизведении единицы ППЭ электромагнитного поля предложен метод с использованием векторного анализатора цепей. Метод отличается применением поправочного множителя  $\mu$ , рассчитанного на основе результатов измерений комплексных коэффициентов отражения входа термоэлектрического преобразователя измерителя мощности и выхода эталонной измерительной антенны:

$$\mu = \frac{(1 - \Gamma_{\text{АС}} \cdot \Gamma_{\text{ПС}} + \Gamma_{\text{АС}} \cdot \Gamma_{\text{ПС}})^2 + (\Gamma_{\text{АС}} \cdot \Gamma_{\text{ПС}} + \Gamma_{\text{АС}} \cdot \Gamma_{\text{ПС}})^2}{(1 - \Gamma_{\text{ПС}}^2 - \Gamma_{\text{ПС}}^2) \cdot (1 - \Gamma_{\text{АС}}^2 - \Gamma_{\text{АС}}^2)}, \quad (2)$$

где  $\Gamma_{\text{ПС}}$ ,  $\Gamma_{\text{ПС}}$  – действительная и мнимая составляющая комплексных коэффициентов отражения входа термоэлектрического преобразователя измерителя мощности;

$\Gamma_{\text{АС}}$ ,  $\Gamma_{\text{АС}}$  – действительная и мнимая составляющая комплексных коэффициентов отражения выхода антенны;

$$\Gamma_{AC} = |\dot{\Gamma}_A| \cdot \cos \varphi_A; \quad \Gamma_{AS} = |\dot{\Gamma}_A| \cdot \sin \varphi_A; \quad \Gamma_{PC} = |\dot{\Gamma}_\Pi| \cdot \cos \varphi_\Pi; \quad \Gamma_{PS} = |\dot{\Gamma}_\Pi| \cdot \sin \varphi_\Pi,$$

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

$\varphi_\Pi$ ,  $\varphi_A$  – аргументы комплексных коэффициентов отражения входа термоэлектрического преобразователя измерителя мощности и антенны, градус.

Для оценивания остатка НСП из-за рассогласования  $\delta_{\text{pac}}$  после применения поправочного множителя использована формула:

$$\delta_{\text{pac}} = \frac{(1 - |\dot{\Gamma}_\Pi|^2) \cdot (1 - |\dot{\Gamma}_A|^2)}{|1 - \dot{\Gamma}_\Pi \cdot \dot{\Gamma}_A|^2} - 1 \approx -|\dot{\Gamma}_\Pi|^2 - |\dot{\Gamma}_A|^2 + 2 \cdot |\dot{\Gamma}_\Pi| \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол между  $\dot{\Gamma}_\Pi$  и  $\dot{\Gamma}_A$ , градус.

Можно выделить три составляющие погрешности из-за рассогласования:

$$\delta_{\text{pac1}} = -|\dot{\Gamma}_\Pi|^2, \quad \delta_{\text{pac2}} = -|\dot{\Gamma}_A|^2 \quad \text{и} \quad \delta_{\text{pac3}} = 2 \cdot |\dot{\Gamma}_\Pi| \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot \cos \alpha. \quad \text{Для анализа}$$

эффективности предложенного метода рассмотрены три возможных случая. Для случая, когда нет коррекции результатов измерений с помощью поправочного множителя, оценивание систематической погрешности можно осуществить, используя значения составляющих  $\delta_{\text{pac1}}$ ,  $\delta_{\text{pac2}}$  и  $\delta_{\text{pac3}}$  с учетом возможных значений угла  $\alpha$  от  $-\pi$  до  $\pi$ .

Для случая введения поправочного множителя, основанного на результатах измерений модулей комплексных коэффициентов отражения  $|\dot{\Gamma}_\Pi|$  и  $|\dot{\Gamma}_A|$  (при использовании скалярного анализатора цепей), в формуле (3) остается только составляющая  $\delta_{\text{pac3}}$ , но добавляются две составляющие  $\delta_{\text{pac4}}$  и  $\delta_{\text{pac5}}$ , связанные с неидеальностью характеристик применяемого скалярного анализатора цепей. Предельные значения этих составляющих будут равны:

$$\delta_{\text{pac4}} = \frac{d\delta_{\text{pac1}}}{d|\dot{\Gamma}_\Pi|} \cdot |\dot{\Gamma}_\Pi| \cdot \delta_{|\dot{\Gamma}_\Pi|} = -2 \cdot |\dot{\Gamma}_\Pi|^2 \cdot \delta_{|\dot{\Gamma}_\Pi|}; \quad \delta_{\text{pac5}} = \frac{d\delta_{\text{pac2}}}{d|\dot{\Gamma}_A|} \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot \delta_{|\dot{\Gamma}_A|} = -2 \cdot |\dot{\Gamma}_A|^2 \cdot \delta_{|\dot{\Gamma}_A|}, \quad (4)$$

где  $\delta_{|\dot{\Gamma}|}$  – относительная погрешность измерения модулей комплексных коэффициентов отражения, отн.ед.

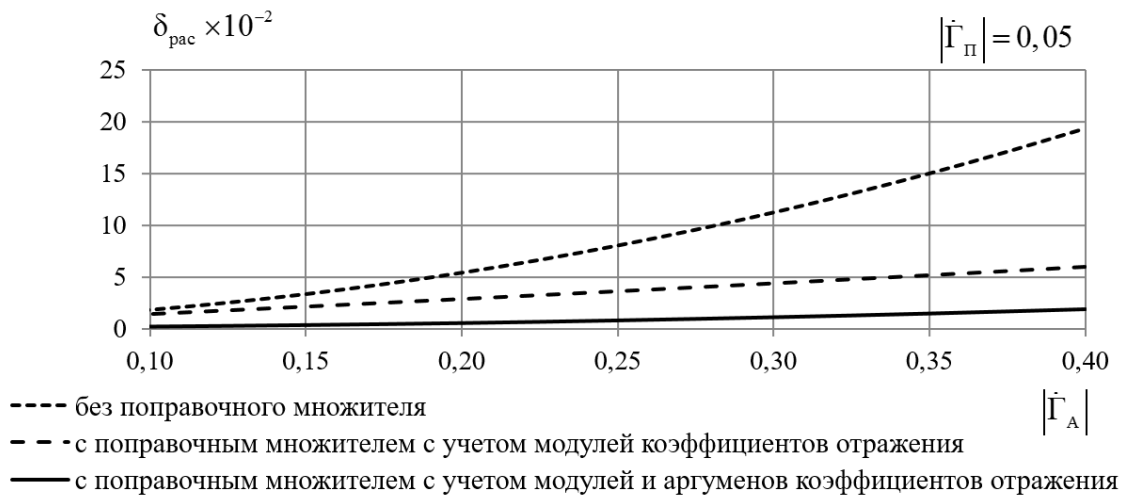
Для случая использования векторного анализатора цепей и введения поправочного множителя, основанного на результатах измерений модулей и аргументов комплексных коэффициентов отражения, остаются только

составляющие погрешности, связанные с неидеальностью характеристик векторного анализатора цепей. Предельные значения этих составляющих будут равны  $|\delta_{\text{рас}4}|$  и  $|\delta_{\text{рас}5}|$ , кроме того добавятся новые составляющие:

$$|\delta_{\text{рас}6}| \approx |\delta_{\text{рас}7}| \approx 2 \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot |\dot{\Gamma}_\Pi| \cdot \delta_{|\dot{\Gamma}|}; \quad |\delta_{\text{рас}8}| = 3,14 \cdot |\dot{\Gamma}_A| \cdot |\dot{\Gamma}_\Pi| \cdot \delta_\varphi, \quad (5)$$

где  $\delta_\varphi$  – относительная погрешность измерения аргументов комплексных коэффициентов отражения векторным анализатором цепей, отн.ед.

На рисунке 1 приведены графики зависимости границ относительной погрешности из-за рассогласования  $\delta_{\text{рас}}$  до и после внесения поправочного множителя для различных значений  $|\dot{\Gamma}_A|$  при  $|\dot{\Gamma}_\Pi| = 0,05$ .



**Рисунок 1. – Графики зависимости границ относительной погрешности из-за рассогласования от  $|\dot{\Gamma}_A|$**

Для снижения погрешности определения эффективной площади эталонных антенн предложен и описан модернизированный метод трех антенн. Суть модернизации заключается в использовании векторного анализатора цепей для измерений комплексных коэффициентов отражения компонентов СВЧ тракта и применении на их основе поправочных множителей. Для измерений используют три антенны, проводят три серии измерений. Решив систему уравнений, построенных на основе уравнения распространения электромагнитных волн в свободном пространстве, эффективные площади каждой из трех антенн могут быть определены по формулам:

$$S_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{23}} \cdot M_1, \quad S_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{13}} \cdot M_2, \quad S_3 = \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12}} \cdot M_3, \quad (6)$$

где  $S_1, S_2, S_3$  – эффективная площадь исследуемых антенн №1, 2 и 3,  $\text{м}^2$ ;

$R_{ij} = \lambda \cdot r \cdot \sqrt{\frac{P_j}{P_i}}$  – переменная, введенная для упрощения выражения;

$\lambda$  – длина волны, м;

$r$  – расстояние между антеннами, м;

$P_j$  – мощность сигнала, измеренная измерителем мощности на выходе  $j$ -ой приемной антенны в каждой серии измерений, Вт;

$P_i$  – мощность сигнала, измеренная измерителем мощности на выходе генератора сигналов, подключаемого к  $i$ -ой излучающей антенне в каждой серии измерений, Вт.

$M_1, M_2, M_3$  – поправочные множители на рассогласование в СВЧ тракте,

$$M_1 \approx \frac{\left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_2| \cdot |\dot{\Gamma}_{\Pi}| \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_{\Pi})\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_\Gamma| \cdot |\dot{\Gamma}_1| \cdot \cos(\varphi_\Gamma - \varphi_1)\right)}{\left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_\Gamma| \cdot |\dot{\Gamma}_2| \cdot \cos(\varphi_\Gamma - \varphi_2)\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 - |\dot{\Gamma}_1|^2\right) \cdot \left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_\Gamma| \cdot |\dot{\Gamma}_{\Pi}| \cdot \cos(\varphi_\Gamma - \varphi_{\Pi})\right)^{\frac{1}{2}}}; \quad (7)$$

$$M_2 \approx \frac{\left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_2| \cdot |\dot{\Gamma}_{\Pi}| \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_{\Pi})\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_\Gamma| \cdot |\dot{\Gamma}_2| \cdot \cos(\varphi_\Gamma - \varphi_2)\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_\Gamma| \cdot |\dot{\Gamma}_{\Pi}| \cdot \cos(\varphi_\Gamma - \varphi_{\Pi})\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 - |\dot{\Gamma}_2|^2\right)}; \quad (8)$$

$$M_3 \approx \frac{\left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_3| \cdot |\dot{\Gamma}_{\Pi}| \cdot \cos(\varphi_3 - \varphi_{\Pi})\right) \cdot \left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_\Gamma| \cdot |\dot{\Gamma}_2| \cdot \cos(\varphi_\Gamma - \varphi_2)\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(1 - |\dot{\Gamma}_3|^2\right) \cdot \left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_\Gamma| \cdot |\dot{\Gamma}_{\Pi}| \cdot \cos(\varphi_\Gamma - \varphi_{\Pi})\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 - 2 \cdot |\dot{\Gamma}_2| \cdot |\dot{\Gamma}_{\Pi}| \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_{\Pi})\right)^{\frac{1}{2}}}; \quad (9)$$

где  $|\dot{\Gamma}_\Gamma|, |\dot{\Gamma}_1|, |\dot{\Gamma}_2|, |\dot{\Gamma}_3|$  – модули комплексных коэффициентов отражения выхода генератора сигналов, антенн № 1, 2 и 3 соответственно, отн.ед.;

$\varphi_\Gamma, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – аргументы комплексных коэффициентов отражения выхода генератора сигналов, антенны № 1, 2 и 3 соответственно, градус.

По результатам экспериментальных исследований определены эффективные площади эталонных антенн, подтверждена метрологическая совместимость полученных результатов с результатами калибровки этих антенн на государственных эталонах Российской Федерации (ВНИИФТРИ).

Для определения коэффициента безэховости экранированной БЭК предложен и описан метод измерений, основанный на сравнении теоретических и экспериментальных данных о напряженности электромагнитного поля, создаваемого перемещающейся антенной. Метод отличается применением прецизионной дипольной излучающей антенны вместо рупорной, что позволяет с использованием автоматизированного

позиционера и разработанных алгоритмов обработки данных сократить время выполнения измерений не менее чем в 15 раз с сохранением точности измерений. Излучающую дипольную антенну располагают в рабочей зоне БЭК в опорную точку на расстоянии  $r_{\text{изм}}$ , на излучающую антенну подают сигнал с генератора сигналов и фиксируют анализатором спектра показания напряжения сигнала  $M_{\text{изм}}$  на выходе измерительной антенны. Далее последовательно перемещают излучающую антенну в безэховой зоне, увеличивая расстояние между антеннами и фиксируя в каждой точке значение напряжения на выходе измерительной антенны. Нормируют результаты измерений в точках к расстоянию, относящемуся к опорной точке, по формуле:

$$M' = M_{\text{изм}} + 20 \cdot \lg \left( \frac{r_{\text{изм.реал}}}{r_{\text{изм}}} \right), \quad (10)$$

где  $M'$  – нормированное значение напряжения, дБ(мкВ);

$M_{\text{изм}}$  – измеренное значение напряжения анализатором спектра на выходе измерительной антенны, дБ(мкВ);

$r_{\text{изм}}$  – расстояние от измерительной антенны до опорной точки, см;

$r_{\text{изм.реал}}$  – расстояние от измерительной антенны до точки проведения измерений, см.

Определяют коэффициент стоячей волны по напряжению и коэффициент безэховости камеры по формулам:

$$K_{\text{с дБ}} = M'_{\text{max}} - M'_{\text{min}}; \quad K_{\text{с}} = 10^{\frac{K_{\text{с дБ}}}{20}}; \quad K_{\text{Б}} = \frac{K_{\text{с}} - 1}{K_{\text{с}} + 1}, \quad (11)$$

где  $K_{\text{с дБ}}$  – коэффициент стоячей волны по напряжению БЭК, выраженный в логарифмических единицах, дБ;

$M'_{\text{max}}$  и  $M'_{\text{min}}$  – максимальное и минимальное значение нормированного значения напряжения  $M'$  при перемещении излучающей антенны по точкам в каждой позиции безэховой зоны, дБ(мкВ);

$K_{\text{с}}$  – коэффициент стоячей волны по напряжению БЭК;

$K_{\text{Б}}$  – коэффициент безэховости БЭК, отн. ед.

На основании экспериментальных исследований доказана сопоставимость результатов измерений по разработанной методике с результатами измерений методом перемещающегося индикатора с использованием рупорной антенны. Выполнено обоснование требований к диаграмме направленности излучающей дипольной антенны и ее влияние на результаты измерений.

В четвертой главе приводится описание предложенной оригинальной структуры эталона (рисунок 2), которая защищена патентом ВУ 12043, особенностей технической реализации его модулей и блоков, а также средств автоматизации выполнения поверочных и калибровочных работ.

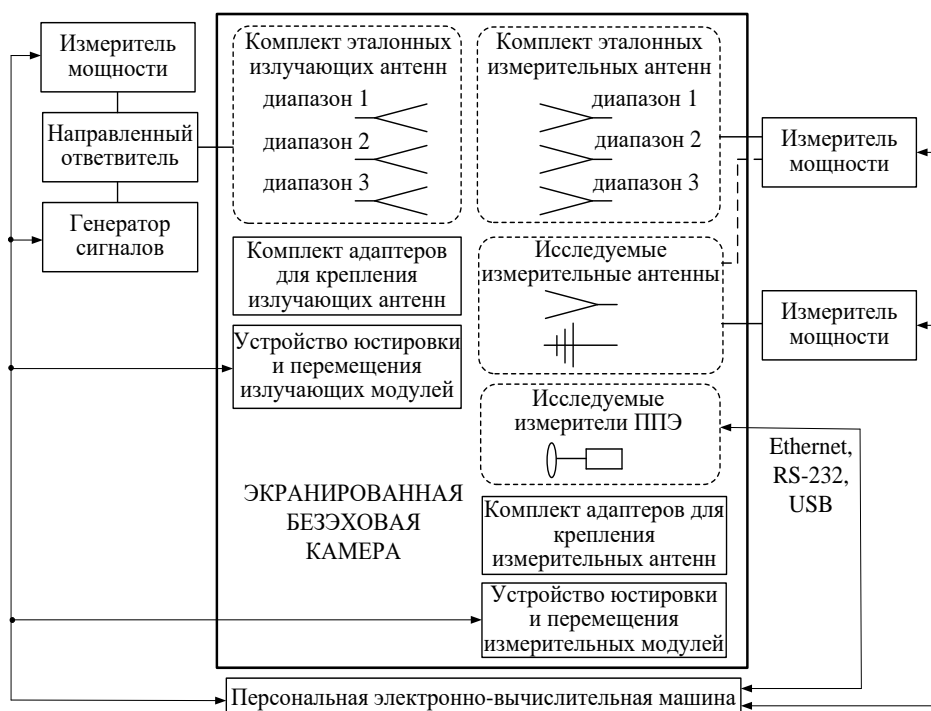
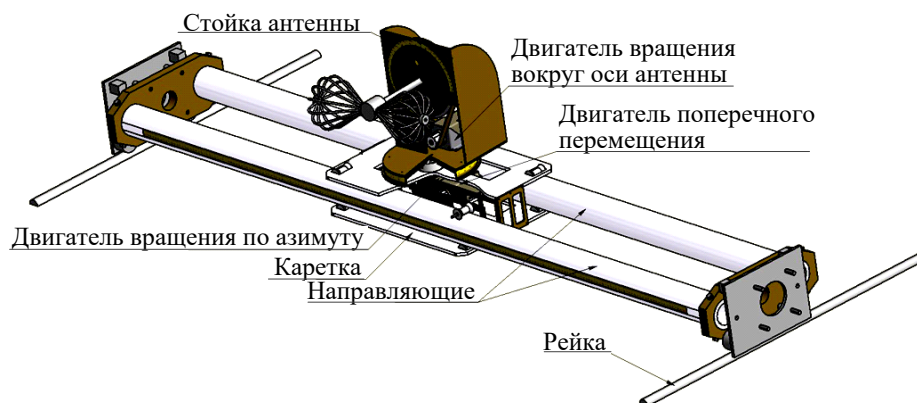


Рисунок 2. – Структурная схема эталона единицы ППЭ электромагнитного поля

В состав эталона входят широкополосный по частоте генератор сигналов, направленный ответвитель, измерители мощности, комплект эталонных излучающих и измерительных антенн, устройство позиционирования, экранированная безэховая камера и управляющая персональная электронно-вычислительная машина с прикладным программным обеспечением. Устройство позиционирования состоит из устройств юстировки и перемещения излучающих и измерительных модулей, адаптеров для крепления излучающих и измерительных антенн. Устройство юстировки и перемещения измерительных модулей представляет собой раму, которая перемещается по рейкам, расположенным на боковых стенках безэховой камеры для обеспечения установки антенны на разные расстояния. По направляющим рамы перемещается каретка, обеспечивающая поперечное перемещение антенны. На каретке размещена стойка антенны, позволяющая вращать антенну вокруг ее оси и по азимуту. Движение по всем четырем направлениям осуществляется шаговыми двигателями, которые под управлением программного обеспечения позволяют устанавливать антенну в заданную точку пространства с необходимой точностью, обеспечивая погрешность из-за неточности позиционирования не более  $\pm 0,5 \cdot 10^{-2}$ . Схематическое изображение конструкции устройства юстировки и перемещения измерительных модулей приведено на рисунке 3. Антенное крепление защищено патентом ВУ 12780.



**Рисунок 3. – Схематическое изображение конструкции устройства юстировки и перемещения измерительных модулей**

Прикладное программное обеспечение служит для управления устройством позиционирования, излучающим и измерительным блоками эталона; осуществления алгоритмов обработки измерительной информации при реализации предложенных методов уменьшения НСП; реализации функции слежения за выходной мощностью генератора за время измерений, используя показания подключенного к боковому плечу направленного ответвителя измерителя мощности.

**В четвертой** главе также приводится описание предложенной структуры построения широкополосного по частоте генератора сигналов, состоящего из опорного генератора, задающего генератора и блока расширения. Структура отличается использованием в блоке расширения балансного смесителя, в котором происходит взаимодействие выходного сигнала блока расширения и второй гармоники выходного сигнала задающего генератора, что позволяет сформировать на выходе генератора стабильные по уровню сигналы с малыми флуктуациями фазы. Структура широкополосного генератора сигналов защищена Евразийским патентом 036472.

**В пятой** главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оцениванию метрологических характеристик созданного эталона до и после применения разработанных методов уменьшения погрешности. При расчете НСП эталона были учтены следующие составляющие погрешности:

- погрешность из-за рассогласования в СВЧ измерительном тракте, значение которой уменьшено в 9–10 раз до уровня  $\pm(0,1–1,6) \cdot 10^{-2}$  за счет применения разработанного метода с использованием поправочных множителей;
- погрешность определения эффективной площади эталонных измерительных антенн, значение которой уменьшено в 2,0–2,5 раза до уровня  $\pm(2,9–3,9) \cdot 10^{-2}$  за счет применения модернизированного метода трех антенн;
- погрешность из-за переотражений электромагнитных волн от стен БЭК, значение которой уменьшено в 2–3 раза до уровня  $\pm(1,0–2,0) \cdot 10^{-2}$  по результатам исследований характеристик БЭК разработанным методом;
- погрешность измерения мощности сигнала на выходе эталонной антенны, значение которой уменьшено в 2 раза до уровня  $\pm(1,7–3,2) \cdot 10^{-2}$

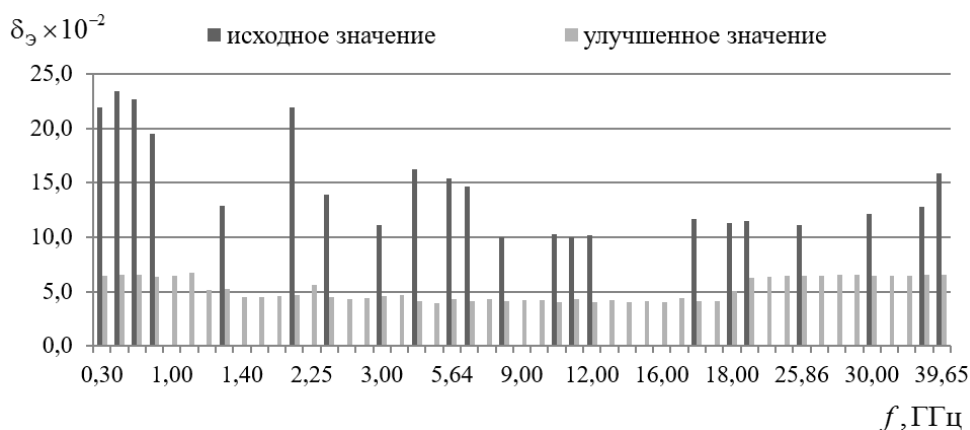
за счет применения в математической модели индивидуальных градуировочных коэффициентов, определенных по результатам исследований термоэлектрических преобразователей измерителей мощности на оборудовании Национального эталона единицы мощности электромагнитных колебаний НЭ РБ 39-18;

- погрешность из-за неточности позиционирования антенн, значение которой составило не более  $\pm 0,5 \cdot 10^{-2}$  за счет применения оригинального устройства позиционирования под управлением программного обеспечения;

- погрешность из-за непостоянства электромагнитного поля за время измерений, значение которой составило не более  $\pm 0,5 \cdot 10^{-2}$  за счет применения оригинального широкополосного генератора сигналов и функции слежения за выходной мощностью под управлением программного обеспечения;

- погрешность из-за переотражений между антеннами, значения которой составили  $\pm (0,1 - 0,7) \cdot 10^{-2}$  в зависимости от диапазона частот.

Границы НСП воспроизведения единицы ППЭ в целом удалось сократить в 2,5–3,0 раза от уровня  $\pm (10,0 - 23,4) \cdot 10^{-2}$  до уровня  $\pm (4,0 - 6,7) \cdot 10^{-2}$ . Результаты оценки границ суммарной НСП воспроизведения единицы ППЭ  $\delta_{\Sigma}$  до и после применения предложенных методов уменьшения погрешности приведены на рисунке 4.



**Рисунок 4. – Результаты оценивания границ исходных и улучшенных значений суммарной НСП воспроизведения единицы ППЭ электромагнитного поля**

Суммарное значение среднего квадратического отклонения (СКО) результатов измерений составило  $(0,1 - 1,3) \cdot 10^{-2}$ , в которое входит оценка СКО результатов измерений мощности сигнала на выходе эталонной измерительной антенны при воспроизведении единицы ППЭ и оценка СКО результатов измерений эффективной площади эталонной антенны методом трех антенн. В пятой главе также приведена оценка погрешности передачи размера единицы ППЭ от эталона нижестоящим по точности средствам измерений, результаты оценивания неопределенности измерений эффективной площади эталонных антенн методом трех антенн, а также результаты оценивания неопределенности измерений при воспроизведении единицы ППЭ электромагнитного поля эталоном.



**В приложениях** представлены копия акта о практическом использовании результатов диссертационной работы и копия свидетельства об утверждении национального эталона.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Выполнен анализ достоинств и недостатков применяемых методов и способов воспроизведения и передачи единицы плотности потока энергии электромагнитного поля, для исследований выбран метод эталонной антенны. Разработан метод определения коэффициента усиления антенн с эллиптической поляризацией, позволяющий применять в качестве эталонных антенны с линейной поляризацией за счет использования корректирующих коэффициентов, зависящих от коэффициентов эллиптичности исследуемых антенн. Выполнен анализ источников погрешности воспроизведения и передачи единицы плотности потока энергии, обоснована необходимость совершенствования метода для улучшения его точностных характеристик [1, 2, 7, 9].

2. Разработан модернизированный метод уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте за счет применения поправочного множителя, рассчитываемого на основе результатов измерений комплексных коэффициентов отражения эталонной измерительной антенны и термоэлектрического преобразователя измерителя мощности. Выполнен анализ эффективности метода; доказано, что применение метода позволяет снизить погрешность из-за рассогласования в 9–10 раз до уровня  $\pm(0,1-1,6) \cdot 10^{-2}$  [3, 8].

Разработан модернизированный метод трех антенн, отличительной особенностью которого является коррекция результатов измерений с использованием поправочных множителей, определяемых из значений комплексных коэффициентов отражения компонентов сверхвысокочастотного измерительного и излучающего тракта. Проведены исследования, подтверждающие уменьшение погрешности определения эффективной площади антенн при использовании предложенного метода 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, 10, 11].

3. Разработан метод измерений коэффициента безэховости экранированной безэховой камеры, основанный на сравнении теоретических и экспериментальных данных о напряженности электромагнитного поля, создаваемого перемещающейся прецизионной антенной. Основным преимуществом метода является возможность сократить время выполнения измерений не менее чем в 15 раз по сравнению с методом перемещающегося индикатора с сохранением точности измерений. Это позволяет получить

более полную информацию о пространственной структуре электромагнитного поля в безэховой камере за меньшее время измерений и снизить погрешность из-за переотражений от стен безэховой камеры в 2–3 раза до уровня  $\pm(1,0 - 2,0) \cdot 10^{-2}$  [5, 12].

4. На основе предложенных высокоточных методов и средств измерений плотности потока энергии разработана оригинальная структура построения эталона, его блоков и компонентов. Создано устройство позиционирования, позволяющее осуществлять установку эталонных и исследуемых измерительных антенн (измерителей плотности потока энергии) и производить под управлением программного обеспечения их позиционирование, обеспечивая при этом погрешность из-за неточности позиционирования антенн не хуже  $\pm 0,5 \cdot 10^{-2}$ . Разработана оригинальная структура построения широкополосного по частоте генератора сигналов, обеспечивающая, при использовании совместно с функцией контроля выходной мощности управляющего программного обеспечения, нестабильность воспроизводимой единицы плотности потока энергии за время проведения измерений в пределах  $\pm 0,5 \cdot 10^{-2}$  [2, 13, 14, 15].

5. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований определены метрологические характеристики созданного эталона. Показано, что разработанные методы позволили сократить границы неисключенной систематической погрешности воспроизведения единицы в 2,5–3,0 раза от уровня  $\pm(10,0 - 23,4) \cdot 10^{-2}$  до уровня  $\pm(4,0 - 6,7) \cdot 10^{-2}$  и тем самым существенно повысить точность измерений параметров электромагнитных полей в стране. Созданный эталон обеспечивает воспроизведение единицы плотности потока энергии электромагнитного поля в диапазоне 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 плотности потока энергии электромагнитного поля эталоном 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 плотности потока энергии электромагнитного поля эталоном составляет  $(4,2 - 7,5) \cdot 10^{-2}$  ( $p = 0,95$ ) [6].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанные высокоточные методы и средства измерений плотности потока энергии электромагнитного поля и созданный на их основе эталон могут быть использованы для воспроизведения и передачи единицы

плотности потока энергии электромагнитного поля менее точным средствам измерений национальным метрологическим институтом и организациями, выполняющими метрологическую оценку средств измерений параметров электромагнитного поля. Модернизированные методы уменьшения погрешности воспроизведения единицы плотности потока энергии могут быть использованы при проведении метрологической оценки высокоточных средств измерений, разработке методик поверки и калибровки, проведении аттестации экранированных безэховых камер. Модернизированный метод трех антенн может быть использован для определения эффективной площади антенн с высокой точностью результатов измерений.

2. Основные результаты работы внедрены в БелГИМ при:

- разработке и исследованиях Национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15; утвержден Постановлением Госстандарта от 04.03.2015 № 11;

- выполнении научно-исследовательской работы по разработке методов уменьшения погрешности воспроизведения единицы плотности потока энергии электромагнитного поля; результаты исследований были рассмотрены научно-технической комиссией Госстандарта (протокол № 11-2020 от 29.10.2020), внесены изменения в Государственный реестр национальных эталонов Республики Беларусь и утвержден новый паспорт эталона с улучшенными метрологическими характеристиками;

- проведении аттестации безэховой камеры ОАО «МНИПИ», экранированной безэховой камеры Учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», площадок для специсследований в области защиты информации Комитета государственной безопасности Республики Беларусь, Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь;

- разработке методики калибровки МРП МК 43 16.612-2020 «Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Антенны измерительные рупорные из состава Национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15. Методика калибровки»;

- разработке методики оценивания неопределенности измерений при воспроизведении единицы плотности потока энергии эталоном («Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Национальный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15. Методика оценивания неопределенности»), утверждена 05.08.2020).

Выполнение перечисленных работ подтверждается актом о практическом использовании результатов исследований.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**

### **Статьи в научных журналах**

1. 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.

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. 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.

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 безэховости экранированной безэховой 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.

### **Статьи в сборниках материалов и трудов конференций**

7. Галыго, А. В. Методы калибровки антенн с круговой поляризацией с использованием линейно-поляризованных эталонных антенн / А. В. Галыго, А. С. Вольнец // Приборостроение-2011 : материалы 4-ой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 нояб. 2011 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2011. – С. 191–193.

8. Valynets, A. Improving accuracy characteristics of the National standard unit of power flux density NE RB 26–15 through the reduction of error due to impedance mismatch in the microwave measuring tract / A. Valynets // Best Young Metrologist-2017 : proceedings of VII International competition of COOMET, Astana, 17–18 May 2017 / RSE «KazInMetr» ; ed.: V. Krutikov [et al.]. – Astana, 2017. – P. 81–84.

9. Вольнец, А. С. Источники погрешности при воспроизведении и передаче единицы плотности потока энергии национальным эталоном единицы плотности потока энергии НЭ РБ 26–15 / А. С. Вольнец // Приборостроение-2017 : материалы 10-ой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1–3 нояб. 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – С. 125–127.

10. Вольнец, А. С. Источники погрешности при определении эффективной площади эталонных антенн национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26–15 методом трех антенн / А. С. Вольнец // Приборостроение-2018 : материалы 11-ой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14–16 нояб. 2018 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2018. – С. 207–210.

### Тезисы докладов конференций

11. Волынец, А. С. Реализация метода трех антенн при определении эффективной площади эталонных антенн национального эталона единицы плотности потока энергии НЭ РБ–15 / А. С. Волынец // Метрология и измерительная техника : тезисы докладов 11-ой Междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 9–11 окт. 2018 г. / Национальный научный центр «Институт метрологии»; отв. за вып. С. В. Белоусова. – Харьков, 2018. – С. 60.

12. Волынец, А. С. Методы определения коэффициента безэховости экранированных безэховых камер / А. С. Волынец // Метрология-2019 : тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 март. 2019 г. / Белорус. госуд. инст-т метрологии ; редкол.: В. Б. Татарский [и др.]. – Минск, 2019. – С. 281.

### Патенты

13. Эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля : полез. модель ВУ 12043 / А. С. Волынец, О. А. Волынец. – Опубл. 30.06.2019.

14. Широкодиапазонный генератор сигналов : Евразийский пат. 036472 / А. В. Гусинский, А. В. Ворошень, С. М. Лапшин, Д. А. Кондрашов, А. С. Волынец, А. М. Кострикин. – Опубл. 13.11.2020.

15. Антенное крепление : полез. модель ВУ 12780 / О. А. Волынец, А. С. Волынец. – Опубл. 30.12.2021.

## РЭЗІЮМЭ

Валынец Аляксей Сяргеевіч

### **Высокадакладныя метады і сродкі вымярэнняў шчыльнасці патоку энергіі электрамагнітнага поля ў мікрахвалевым дыяпазоне і стварэнне эталона на іх аснове**

**Ключавыя словы:** шчыльнасць патоку энергіі, вымяральная антэна, вымяральнік магутнасці, экранізаваная бязрэхавая камера, вектарны аналізатар ланцугоў, нявызначанасць вынікаў вымярэнняў.

**Мэта працы:** тарэтычнае і эксперыментальнае абгрунтаванне ўдасканаленых метадаў і сродкаў вымярэнняў для ўзнаўлення і перадачы адзінкі шчыльнасці патоку энергіі электрамагнітнага поля, якія адрозніваюцца павышанай дакладнасцю, стварэнне і ўкараненне на іх аснове эталона адзінкі шчыльнасці патоку энергіі электрамагнітнага поля, што дасць магчымасць істотна павысіць дакладнасць па гэтым відзе вымярэнняў і метралагічна забяспечыць наяўныя ў краіне сродкі вымярэнняў.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** метады замены з выкарыстаннем эталоннай антэны і вымяральніка магутнасці; мадэрнізаваны метады трох антэн з выкарыстаннем вектарнага аналізатара ланцугоў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацаваны метады вызначэння каэфіцыента ўзмацнення вымяральных антэн з эліптычнай палярызацыяй з выкарыстаннем лінейна палярызаваных эталонных антэн; мадэрнізаваны метады памяншэння хібнасці па прычыне разузгаднення ў звышвысокачастотным вымяральным тракце; распрацаваны метады вызначэння каэфіцыента бязрэхавасці экранаванай бязрэхавай камеры; удасканалены метады стварэння і перадачы адзінкі шчыльнасці патоку энергіі электрамагнітнага поля ў дыяпазоне частот ад 300 МГц да 39,65 ГГц, якія дазваляюць паменшыць нявыключаную сістэматычную хібнасць стварэння адзінкі шчыльнасці патоку энергіі ў 2,5–3 разы; распрацавана ўдасканаленая структура пабудовы эталона, шырокапалоснага генератара сігналаў і прылады пазіцыянавання, апаратна-праграмныя сродкі аўтаматызацыі выканання работ; вызначаны метралагічныя характарыстыкі эталона.

**Ступень выкарыстання і галіна прымянення:** створаны эталон можа быць выкарыстаны для ўзнаўлення і перадачы адзінкі шчыльнасці патоку энергіі электрамагнітнага поля менш дакладным сродкам вымярэнняў нацыянальным метралагічным інстытутам і арганізацыямі, якія выконваюць метралагічную ацэнку сродкаў вымярэнняў электрамагнітнага поля; мадэрнізаваныя метады памяншэння хібнасці ўзнаўлення адзінкі шчыльнасці патоку энергіі могуць быць выкарыстаны для памяншэння хібнасці вымярэнняў пры правядзенні метралагічнай ацэнкі высокадакладных сродкаў вымярэнняў, распрацоўцы метадык паверкі і каліброўкі, правядзенні міжлабараторных зверак і пацвярджэнні найлепшых вымяральных магчымасцей нацыянальным метралагічным інстытутам.

## РЕЗЮМЕ

**Волынец Алексей Сергеевич**

### **Высокоточные методы и средства измерений плотности потока энергии электромагнитного поля в микроволновом диапазоне и создание эталона на их основе**

**Ключевые слова:** плотность потока энергии, измерительная антенна, измеритель мощности, экранированная безэховая камера, векторный анализатор цепей, неопределенность результатов измерений.

**Цель работы:** теоретическое и экспериментальное обоснование усовершенствованных методов и средств измерений для воспроизведения и передачи единицы плотности потока энергии электромагнитного поля, отличающихся повышенной точностью, создание и внедрение на их основе эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля, что позволит существенно повысить точность по данному виду измерений и метрологически обеспечить имеющиеся в стране средства измерений.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** метод замещения с использованием эталонной антенны и измерителя мощности; модернизированный метод трех антенн с использованием векторного анализатора цепей.

**Полученные результаты и их новизна:** разработан метод определения коэффициента усиления измерительных антенн с эллиптической поляризацией с использованием линейно поляризованных эталонных антенн; модернизирован метод уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте; разработан метод определения коэффициента безэховости экранированной безэховой камеры; усовершенствованы методы воспроизведения и передачи единицы плотности потока энергии электромагнитного поля в диапазоне частот от 300 МГц до 39,65 ГГц, позволяющие уменьшить неисключенную систематическую погрешность воспроизведения единицы плотности потока энергии в 2,5–3 раза; разработана усовершенствованная структура построения эталона, широкополосного генератора сигналов и устройства позиционирования, аппаратно-программные средства автоматизации выполнения работ; определены метрологические характеристики эталона.

**Степень использования и область применения:** высокоточные методы и средства измерений плотности потока энергии и созданный эталон на их основе могут быть использованы для воспроизведения и передачи единицы плотности потока энергии электромагнитного поля менее точным средствам измерений национальным метрологическим институтом и организациями, выполняющими метрологическую оценку средств измерений параметров электромагнитного поля; модернизированные методы уменьшения погрешности воспроизведения единицы плотности потока энергии могут быть использованы для уменьшения погрешности измерений при проведении метрологической оценки высокоточных средств измерений, разработке методик поверки и калибровки, проведении межлабораторных сличений и подтверждении наилучших измерительных возможностей национальным метрологическим институтом.

## SUMMARY

**Volynets Aleksey**

### **Precision methods and instruments for measuring the power flux density of the electromagnetic field in the microwave range and establishing a measuring standard based on them**

**Key words:** power flux density, measuring antenna, power meter, shielded anechoic chamber, vector network analyzer, measurement uncertainty.

**The purpose of the work:** scientific and experimental substantiation of improved precision methods and measuring instruments for realization and dissemination of the unit of the power flux density of the electromagnetic field, establishment and introduction on their basis of a measuring standard for the power flux density of the electromagnetic field, which should significantly increase the accuracy of this type of measurements and ensure adequate metrological support for domestically available measuring instruments.

**Research methods and equipment used:** replacement method using a reference antenna and a power meter; modified three-antenna method using a vector network analyzer.

**Results obtained and novelty thereof:** a method for determining the gain of elliptically polarized measuring antennas by using linearly polarized reference antennas has been developed; the existing method of reducing the error due to mismatch in the microwave measuring path has been refined; a method for determining the anechoic factor of a shielded anechoic chamber has been developed; improved methods of realization and dissemination of the unit of the power flux density of the electromagnetic field in the frequency range of 300 MHz to 39.65 GHz, allowing to reduce the residual systematic error in realization of the power flux density unit by 2.5 – 3 times have been implemented; an improved design structure for a standard, a broadband signal generator and a positioning device has been established; hardware and software tools necessary to automate working operations have been developed; metrological characteristics of the standard have been determined.

**Scope and application:** the precision methods and instruments for measuring the power flux density of the electromagnetic flux and the measuring standard based on them can be used by the National Metrological Institute and by any bodies carrying out metrological evaluation of instruments that measure parameters of the electromagnetic field to realize and disseminate the unit of the electromagnetic field power flux density to less accurate measuring instruments; the refined methods for reducing the error of realization of the unit of electromagnetic field power flux density can be applied to reduce the measurement error when evaluating metrological performance of precision measuring instruments, developing verification and calibration procedures, taking part in inter-laboratory comparisons and demonstrating calibration and measurement capabilities of the National Metrological Institute.



*Научное издание*

**Вольнец Алексей Сергеевич**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.11.08 – Радиоизмерительные приборы

Подписано в печать 13.01.2022. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч. изд. л. 1,4. Тираж 60 экз. Заказ 2.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск