

УДК 621.317.089.6:621.317.784.023

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АППАРАТУРЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
КОЛЕБАНИЙ ВЫСШЕЙ ТОЧНОСТИ**

В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 78,33 ДО 118,10 ГГц

**А.В. Коудельный, И.М. Малай, А.И. Матвеев,
В.А. Перепелкин, И.П. Чирков**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
lab201@vniiftri.ru*

Аннотация. Приведены структурная схема, технические характеристики и результаты исследований комплекса аппаратуры для измерений мощности электромагнитных колебаний высшей точности в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц.

Ключевые слова: мощность, ваттметр, эталон, сверхвысокая частота.

**DEVELOPMENT OF A COMPLEX OF EQUIPMENT
FOR POWER MEASUREMENTS ELECTROMAGNETIC
OSCILLATIONS OF THE HIGHEST ACCURACY
IN THE FREQUENCY RANGE FROM 78.33 TO 118.10 GHz**

**A.V. Koudelny, I.M. Malay, A.I. Matveev,
V.A. Perepelkin, I.P. Chirkov**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
lab201@vniiftri.ru*

Annotation. The block diagram, technical characteristics and research results of a complex of equipment for measuring the power of electromagnetic oscillations of the highest accuracy in the frequency range from 78.33 to 118.10 GHz are presented.

Key words: power, power meter, standard, ultrahigh frequency.

В связи с быстро растущим интересом к системам миллиметровых и субмиллиметровых волн потребность в аппаратуре для измерений мощности электромагнитных колебаний высшей точности на этих длинах волн становится всё более актуальной. Средства измерений мощности для таких высоких частот находят более широкое применение в областях обязательного государственного регулирования, а их количество ежегодно растёт. Кроме того, измерители мощности СВЧ обеспечивают метрологическую основу для измерений других параметров, таких как линейность, ослабление, плотность потока энергии и коэффициент усиления антенн. Отсутствие первичного

эталона и сформированной системы обеспечения единства измерений мощности электромагнитных колебаний в диапазоне миллиметровых длин волн является серьёзной научно-технической проблемой.

Совокупное количество применяемых в диапазоне частот от 37,50 до 118,1 ГГц ваттметров составляет около 10000 приборов. Кроме ваттметров в обращении находится значительное количество средств измерений, часть параметров которых выражены в значениях мощности электромагнитных колебаний, таких как измерительные приёмники, анализаторы спектра, анализаторы цепей, генераторы сигналов.

На предприятиях, разрабатывающих продукцию для применения в областях радионавигации, радиозондирования и радиосвязи, для метрологического обеспечения выпуска и эксплуатации блоков и узлов технических средств миллиметрового диапазона созданы соответствующие службы. В настоящее время большинство при техническом контроле, поверке и калибровке опираются на ваттметры поглощаемой мощности МЗ-75, пределы допускаемой погрешности и уровни измеряемой мощности которых в зависимости от частоты составляют от 6 до 25 %.

Анализ результатов международных ключевых сличений и таблиц калибровочных возможностей мировых метрологических институтов, опубликованных и постоянно обновляемых на сайте Международного бюро мер и весов (МБМВ), показывает, что всего 8 стран самостоятельно обеспечивают независимое воспроизведение единицы мощности СВЧ с помощью своих национальных эталонов в диапазоне частот до 110 ГГц. Среди них: США (NIST), Великобритания (NPL), Германия (PTB), Франция (BNM-LCIE), Украина (НПО «Метрология»). По значительному количеству публикаций активная работа по разработке национальных эталонов единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 75 до 330 ГГц ведётся в Японии (NMIJ), Китае (NIM) и Южной Корее (KRISS).

В качестве основного волноводного тракта систем миллиметрового диапазона в России и за рубежом используются полые металлические одномодовые волноводы прямоугольных сечений. При этом только Украина имеет национальный эталон мощности СВЧ в диапазоне частот от 78,33 до 178,4 ГГц в волноводных трактах по ГОСТ 13317. Остальные страны имеют национальные эталоны в волноводном тракте WR-10 (диапазон частот от 75 до 110 ГГц). Широкое распространение получили также коаксиальные линии передачи, верхняя частота которых за последние несколько лет увеличилась с 18 до 110 ГГц. Это привело к значительному расширению номенклатуры применяемых в промышленности коаксиальных ваттметров.

В таблице 1 приведены типы ваттметров с диапазоном частот выше 78,33 ГГц, представленные на мировом рынке и применяемые в важных отраслях промышленности, в том числе в сферах государственного регулирования.

Таблица 1

Ваттметры с диапазоном частот выше 78,33 ГГц

Тип	Диапазон частот, ГГц	Изготовитель	Диапазон измерений	Погрешность	Тракт
Волноводный тракт					
M3-75/5	78,33–118,1	Брянский ЭМЗ, СССР	1 мкВт– 10 мВт	±10 %	2,4×1,2
M3-75/6	118,1–178,4			±10 %	1,6×0,8
DPM-12	60–90	ЗАО «ДОК», Россия	1 мкВт– 30 мВт	±2 дБ	WR12
DPM-10	75–110				WR10
DPM-08	90–140				WR8
DPM-06	110–170				WR6
M1-25M/03	78,33–118,1	ELMIKA, Литва	1 мкВт– 20 мВт	±3 %	2,4×1,2
M1-25M/02	118,1–178,4				1,6×0,8
W8486A	75–110	Keysight Tech., США	1 мкВт– 100 мВт	±7 %	WR10
NRP110TGW	75–110	Rohde & Schwarz, Германия	0,3 мкВт– 100 мВт	±5 %	WR10
PM5	75–110	VDI, США	2 мкВт– 200 мВт	±6 %	WR10
M2-MBM-118	78,33–118,1	MWM LAB, Республика Беларусь	1 мкВт– 10 мВт	±10 %	2,4×1,2
M2-MBM-178	118,1–178,4			±15 %	1,6×0,8
Коаксиальный тракт					
NRP110T	0–110	Rohde & Schwarz, Германия	0,3 мкВт– 100 мВт	±8 %	1,00/0,43 мм
MA24510A	9 кГц–110 ГГц	Anritsu, Япония	1 пВт– 10 мВт	±1,0 дБ	1,00/0,43 мм
U8489A	9 кГц–110 ГГц	Agilent Technologies, США	1 мкВт– 100 мВт	±8 %	1,00/0,43 мм

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» в период 2017–2019 гг. выполнена работа по созданию комплекса аппаратуры для измерений мощности электромагнитных колебаний высшей точности в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц (КА ИМЭК). Данная работа является продолжением цикла работ по совершенствованию Государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах в диапазоне частот от 37,5 до 78,33 ГГц (ГЭТ 167-2017).

Основные задачи, решаемые при разработке комплекса аппаратуры:

- реализация независимого воспроизведения единицы мощности электромагнитных колебаний в расширенном до 118,1 ГГц диапазоне частот;
- разработка аппаратуры, обеспечивающей хранение и передачу единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц;
- обеспечение возможности участия в международных сличениях с национальными эталонами других стран для подтверждения компетенции.

КА ИМЭК предназначен для расширения рабочего диапазона частот Государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах ГЭТ 167.

Область применения разрабатываемого комплекса — обеспечение единства измерений мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц.

Для обеспечения выполнения функций состав КА ИМЭК включает в себя:

- установку калориметрическую для измерения коэффициента эффективности эталонных преобразователей мощности и обеспечения прослеживаемости единицы мощности электромагнитных колебаний к основным единицам СИ в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц в волноводных трактах в составе:
 - микрокалориметр;
 - средства измерения мощности замещения;
 - преобразователь мощности измерительный болометрический;
 - источник СВЧ-сигналов.
- эталонный измеритель мощности для воспроизведения, хранения и передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц в составе:
 - преобразователи мощности;
 - измерительный блок.
- компарирующую установку для передачи размера единицы мощности СВЧ рабочим эталонам и ваттметрам СВЧ в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц.

Разработанная структура КА ИМЭК и предложенное разделение на составные установки позволяют закрепить за разными частями определённые функции, что обеспечивает возможность выполнения одновременно работ по исследованию аппаратуры калориметрической установки и калориметрических преобразователей и передаче единицы на компарирующей установке. Так, эталонный ваттметр хранит и передаёт единицу мощности в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц. При этом установка калориметрическая позволяет осуществлять исследование характеристик эталонного ваттметра. Установка компарирующая позволяет проводить поверку и калибровку всех типов ваттметров СВЧ, работающих в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц.

КА ИМЭК применяется в нескольких режимах, различающихся составами используемой аппаратуры, алгоритмами проведения измерений и типами включения в тракт:

- определение коэффициента эффективности K_e полупроводниковых болометрических преобразователей в микрокалориметре (установка калориметрическая);
- поверка/калибровка ваттметров и преобразователей поглощаемой и проходящей мощности СВЧ (установка компарирующая).

В зависимости от типа поверяемого прибора используются различные оборудование и схемы подключения к системе КА ИМЭК.

Выбор режимов работы КА ИМЭК осуществляет оператор путём сборки соответствующих схем соединений приборов, задействованных в измерениях, и выбора требуемого режима работы КА ИМЭК в соответствии с руководством по эксплуатации и руководствами оператора.

Рассмотрим работу составных частей КА ИМЭК.

Установка калориметрическая

Блок-схема калориметрической установки приведена на рис. 1.

Установка включает в себя: калибратор постоянного напряжения (прибор для поверки вольтметров программируемый В1-13); нановольтметр Agilent 34420A; магазин сопротивлений Р4830/2; генератор СВЧ-сигналов Г4-143еМ; устройство управления (компьютер); теплоизолированную камеру; микрокалориметрический компаратор; тепловой экран; полупроводниковый болометрический преобразователь ПБП; тело сравнения ТС; чувствительный детектор разности температур ДТ. Микрокалориметрический компаратор размещается в термоизолированной камере. Мощность СВЧ подводится к микрокалориметру с помощью волновода. Регистрирующая аппаратура и генератор СВЧ находятся вне этой камеры для минимизации тепловых воздействий на результаты измерений.

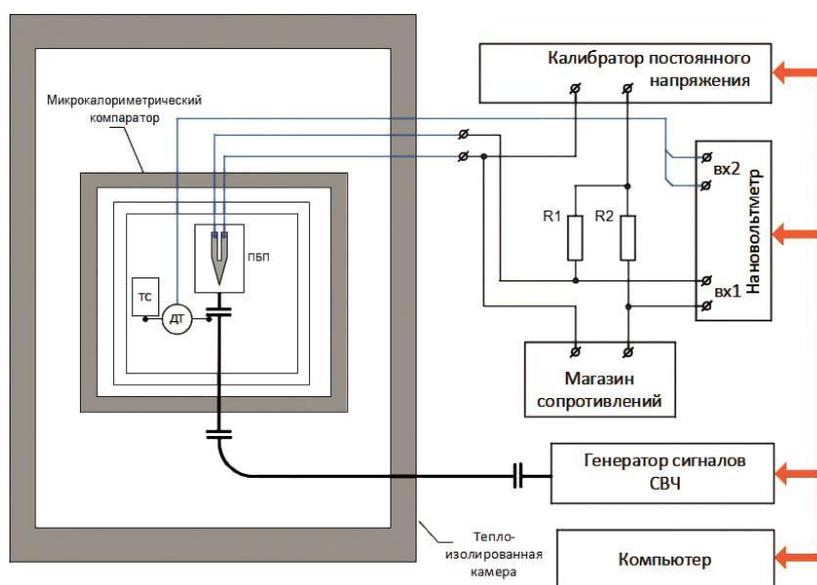


Рис. 1. Блок-схема калориметрической установки:

ПБП — полупроводниковый болометрический преобразователь;
ТС — тело сравнения; ДТ — чувствительный детектор разности температур

Автоматическое замещение мощности СВЧ, рассеянной в болометре преобразователя ПБП, реализуется с помощью мостовой схемы, образованной прецизионными резисторами R1 и R2, магазином сопротивлений и, собственно, болометром преобразователя. Напряжение на питающую диагональ моста подаётся с прецизионного источника постоянного напряжения. Напряжение сигнальной диагонали моста подаётся на вход «Vx1» нановольтметра. Калибратор напряжения и нановольтметр управляются с помощью компьютера через интерфейс USB. Система автобалансировки имеет индивидуально подобранные для каждого преобразователя коэффициенты регулирования, обеспечивающие минимальный переходный процесс при подаче мощности СВЧ. Компьютер и все измерительные приборы, входящие в состав установки калориметрической, питаются от мощного источника бесперебойного питания, чем обеспечивается устойчивая непрерывная работа установки в течение длительного времени. Необходимость длительной непрерывной работы установки обусловлена медленным процессом установления теплового равновесия в микрокалориметре и большим количеством частот, на которых требуется проведение измерений.

Процесс проведения измерений на микрокалориметре производится под управлением компьютерной программы. Современная вычислительная техника и широкий выбор исполнительных устройств и средств измерений, снабжённых интерфейсами для подключения к компьютерам, позволяют не только проводить регистрацию и обработку результатов измерений, но также дают возможность организовать управление происходящими в микрокалориметре процессами по сколь угодно сложным алгоритмам.

Для улучшения технических характеристик микрокалориметра были применены следующие технические решения:

- для повышения чувствительности микрокалориметра применены тепловые развязки из гальванически наращенного никеля с толщиной стенок волновода 100 мкм, а также чувствительный чип-термистор, расположенный на опорных плоскостях (фланцах) симметричных теплоизолированных каналов микрокалориметра;
- для снижения погрешности из-за перефланцевания использована конструкция фланца, описанная в [1], обеспечивающая хорошую повторяемость при повторном подключении;
- для обеспечения возможности проведения международных сличений с минимальной погрешностью в качестве опорного канала использован канал волновода сечением 2,54×1,27 мм (волновод WR10) с соответствующей тепловой развязкой, при этом микрокалориметр обеспечивает непосредственное определение K_{Σ} преобразователей в трактах 2,4×1,2 и WR10 без применения волноводно-волноводного перехода;

- предусмотрена возможность регулирования длины тепловой развязки путём подвижного крепления к корпусу микрокалориметра, что существенно упрощает сборку микрокалориметра и позволяет экспериментально оценить влияние потерь в тепловой развязке на результат измерения коэффициента эффективности аттестуемого преобразователя.

Конструкция дифференциального микрокалориметра предусматривает двухконтурную защиту от внешней тепловой помехи и обеспечивает чувствительность не менее 1 мВ/мВт.

Применённая схема калориметра, а также входящее в состав установки калориметрической оборудование и измерительные приборы позволяют проводить измерения коэффициента эффективности болометрических, термисторных и термоэлектрических преобразователей, работающих в режиме автоматического замещения поглощённой мощности СВЧ, эквивалентной по тепловому воздействию мощностью постоянного тока.

На рис. 2, 3 приведены соответственно внешний вид микрокалориметра и калориметрической установки.



Рис. 2. Внешний вид микрокалориметра с подключённым болометрическим преобразователем



Рис. 3. Внешний вид калориметрической установки

Эталонный измеритель мощности

Эталонный измеритель мощности включает в себя:

- комплект полупроводниковых болометрических преобразователей, работающих в тракте $2,4 \times 1,2$ мм с фланцем по ГОСТ 13317-89;
- комплект полупроводниковых болометрических преобразователей, работающих в тракте $2,54 \times 1,27$ мм (WR10) с фланцем UG 387/UM;
- блок измерительный.

В качестве преобразователя мощности СВЧ используются полупроводниковые болометрические преобразователи (ПБП), конструкция которых описана в [2–4].

Внешний вид комплекта полупроводниковых болометрических преобразователей WR10 приведён на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид комплекта ПБП для волноводного тракта WR10

На рис. 5 приведена типичная частотная зависимость коэффициента эффективности полупроводникового болометрического преобразователя мощности СВЧ, измеренная в калориметре, и частотная зависимость K_K серийно выпускаемого ваттметра РМ5.

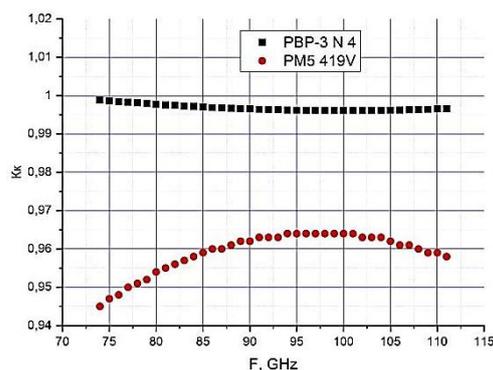


Рис. 5. Частотная зависимость K_K преобразователя ПБП-3 № 4 и серийно выпускаемого ваттметра РМ5

Коэффициент эффективности K_3 полупроводниковых болометрических преобразователей определяется в установке калориметрической и используется затем для передачи единицы мощности СВЧ с помощью установки компарирующей. Гладкость частотных характеристик болометрических преобразователей позволяет, используя процедуру интерполяции, применять их на любой произвольной частоте в диапазоне частот волновода практически без потери точности, а малые значения коэффициента отражения (КСВН) существенно снижают погрешность из-за рассогласования при передаче размера единицы мощности СВЧ КА ИМЭК к образцовым средствам измерений.

Компарирующая установка

Установка компарирующая предназначена для сличения эталонных ваттметров, входящих в состав КА ИМЭК, а также для передачи размера единицы мощности рабочим эталоном. В качестве компарирующей установки используется модернизированная компарирующая установка из состава первичного эталона ГЭТ-167, диапазон частот которой путём применения генератора Г4-143еМ и соответствующей доработки программного обеспечения расширен до 118,1 ГГц. В состав компарирующей установки входят современные средства измерения, которые поддерживают управление в удалённом режиме посредством наиболее распространённых интерфейсов связи.

Блок-схема компарирующей установки приведена на рис. 6.

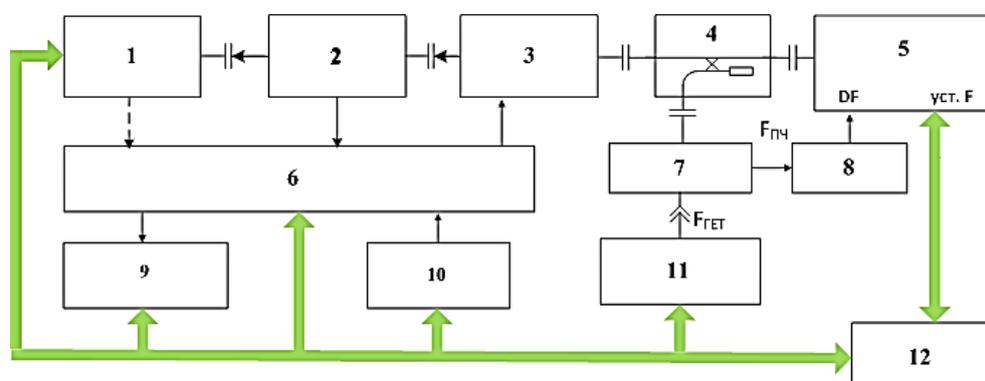


Рис. 6. Блок-схема компарирующей установки: 1 — ваттметр оконечного типа; 2 — ваттметр проходного типа; 3 — СВЧ-выключатель; 4 — направленный ответвитель; 5 — генератор сигналов СВЧ; 6 — блок измерительный; 7 — смеситель; 8 — модуль фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ); 9 — вольтметр универсальный; 10 — калибратор напряжения; 11 — синтезатор частот; 12 — компьютер

В компарирующей установке можно выделить две функциональные части — генераторную и индикационную. Генераторная часть обеспечивает требуемые значения мощности и частоты сигнала. Поддержание заданной частоты

в процессе измерения производится применением модуля фазовой автоподстройки частоты ФАПЧ, входящего в состав генератора Г4-143еМ, и синтезатора частоты RFSG20. Индикаторная часть компарирующей установки обеспечивает необходимые режимы работы приёмных преобразователей мощности СВЧ и производит преобразование измеряемой мощности СВЧ в цифровой код. Обе части работают согласованно под управлением компьютера, в который загружено специализированное программное обеспечение.

В качестве ваттметров проходного типа используются специально отобранные направленные ответвители с преобразователями мощности W8486A в боковом плече. В качестве ваттметров оконечного типа могут использоваться любые ваттметры, работающие в диапазоне частот 78,33–118,1 ГГц. Аттестация ваттметров проходного типа проводится с применением полупроводниковых болометрических преобразователей по значениям их коэффициента эффективности на каждой частоте, измеренного в микрокалориметре. Для работы в тракте WR-10 применяются аттестованные по потерям волноводные переходы.

Внешний вид компарирующей установки приведён на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид компарирующей установки

Программное обеспечение КА ИМЭК, кроме автоматизации непосредственного выполнения измерений и их первичной обработки, включает в себя возможность сохранять результаты всех измерений, выполненных на аппаратуре ИМЭК как при её аттестации и контроле стабильности, так и при передаче размера единицы рабочим эталонам и ваттметрам СВЧ.

Методической основой работы КА ИМЭК являются межгосударственный стандарт ГОСТ 8.569-2000 «ГСИ. Ваттметры СВЧ малой мощности диапазона частот 0,02–178,6 ГГц. Методика поверки и калибровки», а также ГОСТ 8.535-85 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений мощности электромагнитных колебаний в волноводном тракте в диапазоне частот от 78,3 до 178,6 ГГц».

В таблице 2 приведены основные технические характеристики КА ИМЭК.

Таблица 2

Основные технические характеристики КА ИМЭК

Наименование метрологических и технических характеристик	Значения
Диапазон частот, ГГц	от 78,33 до 118,1
Сечение волноводного тракта, мм	2,4×1,2 2,54×1,27
Диапазон значений мощности электромагнитных колебаний, в котором воспроизводится единица мощности, мВт	от 0,1 до 10
Неисключённая систематическая погрешность (НСП) воспроизведения единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот, %	от 2 до 4
Среднее квадратическое отклонение результата измерений при воспроизведении единицы мощности, не более, %	0,5
Конструкция сухого дифференциального калориметра должна предусматривать двухконтурную защиту от внешней тепловой помехи и обеспечивать чувствительность, не менее, мВ/мВт	1
Составляющая неисключённой систематической погрешности из-за неэквивалентности замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока или низкой частоты, не более, %	1,0
Модуль коэффициента отражения калориметрических преобразователей мощности, не более	0,1
Срок службы, не менее, лет	10

В настоящее время проводятся дополнительные исследования и уточнения метрологических характеристик КА ИМЭК с целью включения комплекса аппаратуры для измерений мощности электромагнитных колебаний высшей точности в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц в состав Государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах ГЭТ 167-2017. Опыт создания калориметрической установки планируется использовать в работах по совершенствованию ГЭТ 167 в части дальнейшего расширения диапазона частот. Запланировано проведение международных сличений эталонных ваттметров СВЧ в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц.

Список литературы

1. Семенов В.А. Проект изменения стандарта на присоединительные размеры элементов соединения СВЧ трактов электронных измерительных приборов // Метрология в радиоэлектронике: тезисы доклада XI Всерос. науч.-техн. конф. 19–21 июня 2018 г. — Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018. — С. 116–125.
2. Перепелкин В.А., Семенов В.А., Чирков И.П., Павлов А.В., Жогун М.В., Коудельный А.В. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 78,33 ГГц ГЭТ 167–2017 // Измерительная техника. — 2017. — № 10. — С. 3–6.
3. Коудельный А.В., Мыльников А.В., Перепёлкин В.А. Разработка и исследование полупроводниковых болометрических преобразователей мощности СВЧ оконечного типа // Исследования в области радиотехнических измерений: сборник научных трудов. — Менделеево: ВНИИФТРИ, 1987. — С. 27–34.
4. Коудельный А.В. Полупроводниковые болометрические преобразователи образцовых ваттметров СВЧ: дис. ... канд. техн. наук. — Менделеево: ВНИИФТРИ, 1987.

Статья поступила в редакцию: 30.03.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 09.04.2021 г.

Статья принята в работу: 12.04.2021 г.