

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.317.784

Демидович  
Вероника Константиновна

Калибровка ваттметров поглощаемой мощности  
в диапазоне частот 0,01 – 37,5 ГГц

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-38 80 01 «Приборостроение, метрология и  
информационно-измерительные приборы и системы»

---

Научный руководитель  
Белошицкий Анатолий Павлович  
кандидат технических наук, доцент

---

Минск 2015

Библиотека БГУИР

## **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие современной науки и техники требует непрерывного совершенствования радиоэлектронных средств. Среди большого разнообразия видов радиоизмерений в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) одно из ведущих мест занимает измерение мощности.

Приборы для измерения мощности, называемые ваттметрами, кроме основного своего назначения в диапазоне СВЧ используются также для измерения интенсивности излучения при медико–биологических исследованиях, для определения потерь в четырехполюсниках, коэффициента отражения, частотных характеристик различных радиоустройств и т.д. Ваттметры СВЧ диапазона входят в число основных приборов, используемых на всех этапах разработки, регулировки и выпуска в сферу обращения генераторов и усилителей СВЧ. В последнее время ваттметры СВЧ диапазона начали применять в системах с программным управлением для измерения и контроля уровня выходной мощности источников сигналов.

В связи с этим, весьма важными и актуальными являются задачи разработки новых современных СИ мощности в диапазоне СВЧ, обладающих высокими метрологическими характеристиками, степенью автоматизации измерений и широкими функциональными возможностями, а также методик контроля их метрологических характеристик.

Поддержание высоких метрологических характеристик ваттметров СВЧ диапазона невозможно без их метрологического обеспечения и, собственно, выполнения таких видов метрологических работ, как метрологическая аттестация (при выпуске из производства) и периодическая калибровка (при дальнейшей его эксплуатации).

Для их проведения требуются специально разработанные и научно обоснованные программы и методики, учитывающие специфику проведения СВЧ измерений, конструктивные и эксплуатационные характеристики ваттметров и требования нормативных документов в этой области. В настоящее время такие методики отсутствуют.

Целью настоящей работы является разработка методик калибровки ваттметра поглощаемой мощности в диапазоне частот 0,01 – 37,5 ГГц и научно обоснованных методик обработки измерительной информации, полученной при калибровке.

Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- анализ современных методов и средств измерений поглощаемой мощности в диапазоне частот 0,01 – 37,5 ГГц;
- разработка и обоснование методик калибровки ваттметра поглощаемой мощности СВЧ диапазона;
- разработка методик оценивание неопределенности измерения поглощаемой мощности в диапазоне частот 0,01 – 37,5 ГГц;
- экспериментальное исследование метрологических характеристик ваттметров СВЧ диапазона с использованием разработанных методик.

Библиотека БГУИР

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Современное развитие техники СВЧ диапазона предъявляет повышенные требования к средствам измерений, используемых при ее проектировании, производстве и эксплуатации. Наиболее используемые в этом диапазоне являются ваттметры поглощаемой мощности. Одним из важнейших элементов их метрологического обеспечения является периодическая калибровка. В настоящее время методы калибровки ваттметров не достаточно разработаны и отсутствуют научно обоснованные методики оценивания неопределенностей при измерении мощности в СВЧ диапазоне. В связи с этим задача разработки методов калибровки ваттметров и оценки неопределенности измерений мощности являются весьма важными и актуальными.

Целью работы является разработка методик калибровки ваттметров поглощаемой мощности в диапазоне частот 0,01 – 37,5 ГГц и научно обоснованных методик обработки измерительной информации, полученной при калибровке. Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- анализ современных методов и средств измерений поглощаемой мощности в диапазоне частот 0,01 – 37,5 ГГц;
- разработка и обоснование методик калибровки ваттметра поглощаемой мощности СВЧ диапазона;
- разработка методик оценивание неопределенности измерения поглощаемой мощности в диапазоне частот 0,01 – 37,5 ГГц;
- экспериментальное исследование метрологических характеристик ваттметров СВЧ диапазона с использованием разработанных методик.

Новизна работы определяется следующими результатами:

- разработаны и обоснованы методики калибровки ваттметра поглощаемой мощности СВЧ диапазона, позволяющие проводить калибровку любого типа ваттметра, работающего в диапазоне 0,01 – 37,5 ГГц;
- предложены алгоритмы обработки результатов экспериментальных исследований ваттметров при их калибровке и оценке неопределенности измерений.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные и исследованные методики калибровки являются основой для написания методик калибровки ваттметров конкретных типов.

Результаты работы были апробированы на Международной НТК, приуроченной к 50-летию МРТИ – БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 г.), V НТС «Надежность, живучесть и эффективность сложных систем» (Минск, 28 ноября 2013 г., ВА РБ) и опубликованы в материалах этих конференций.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводятся результаты анализа методов и современных средств измерения поглощаемой мощности в СВЧ диапазоне. Существующие в настоящее время методы и средства позволяют измерять мощности радиоэлектронных средств от долей микроватт до единиц киловатт в диапазоне частот в СВЧ и КВЧ диапазоне с достаточной для измерительной практики точностью. Каждый из использованных методов измерения мощности имеет свои преимущества, особенности применения и недостатки. Результаты сравнительной характеристики методов измерения мощности приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов измерения электромагнитной мощности

Метод	Уровень измеряемой мощности	Относительная погрешность, %
<b>I. Тепловой</b>		
1 Статический калориметр	100 мкВт – 1 кВт	0,5 – 3
2 Проточный калориметр	1 – 10 Вт	2 – 5
3 <u>Терморезисторы:</u>		
термисторный	$10^{-6} - 10^{-2}$ Вт	1 – 5
пленочный	$10^{-3} - 10^{-1}$ Вт	2 – 5
4 Термопары:		
прямого подогрева	$10^{-3} - 10^{-1}$ Вт	2 (до 18 ГГц)
косвенного подогрева	$10^{-3} - 10^{-1}$ Вт	2 (до 40 ГГц)
<b>II. Электронный</b>		
1 Вакуумный диод	20 мВт – 200 Вт	10–20(до 2,5 ГГц)
2 Кристаллический диод	$10^{-6} - 10^{-3}$ Вт	5–20(до 40 ГГц)
3 На эффекте Холла	$10^{-3} - 1$ Вт	10 (до 40 ГГц)
<b>III. Механический</b>		
1 Давление излучения	10 – 50 мВт	5 (3–40 ГГц)
2 Крутильный	10 – 200 Вт	2–3 (до 10 ГГц)

Во второй главе описываются принцип действия и особенности работы ваттметра поглощаемой мощности СВЧ диапазона РМ 0,01 – 37,5.

Ваттметр поглощаемой мощности СВЧ диапазона РМ 0,01 – 37,5 предназначен для измерения мощности синусоидальных СВЧ сигналов и среднего значения мощности импульсно-модулированных СВЧ сигналов в

коаксиальных трактах сечением  $7,0 \times 3,04$  мм (0,01 – 17,85 ГГц), волноводных трактах сечением  $11 \times 5,5$  мм (17,44 – 25,86 ГГц) и  $7,2 \times 3,4$  мм (25,86 – 37,5 ГГц).

В основу работы прибора положен принцип преобразования мощности СВЧ сигнала в тепловую энергию с последующим измерением термо-э.д.с. на выходе преобразователя СВЧ ваттметра, которая пропорционально падающей на него мощности СВЧ сигнала.

Ваттметр состоит из выносного преобразователя СВЧ, соединенного с блоком ваттметра измерительным РМ2. Структурная схема ваттметра представлена на рисунке 1.

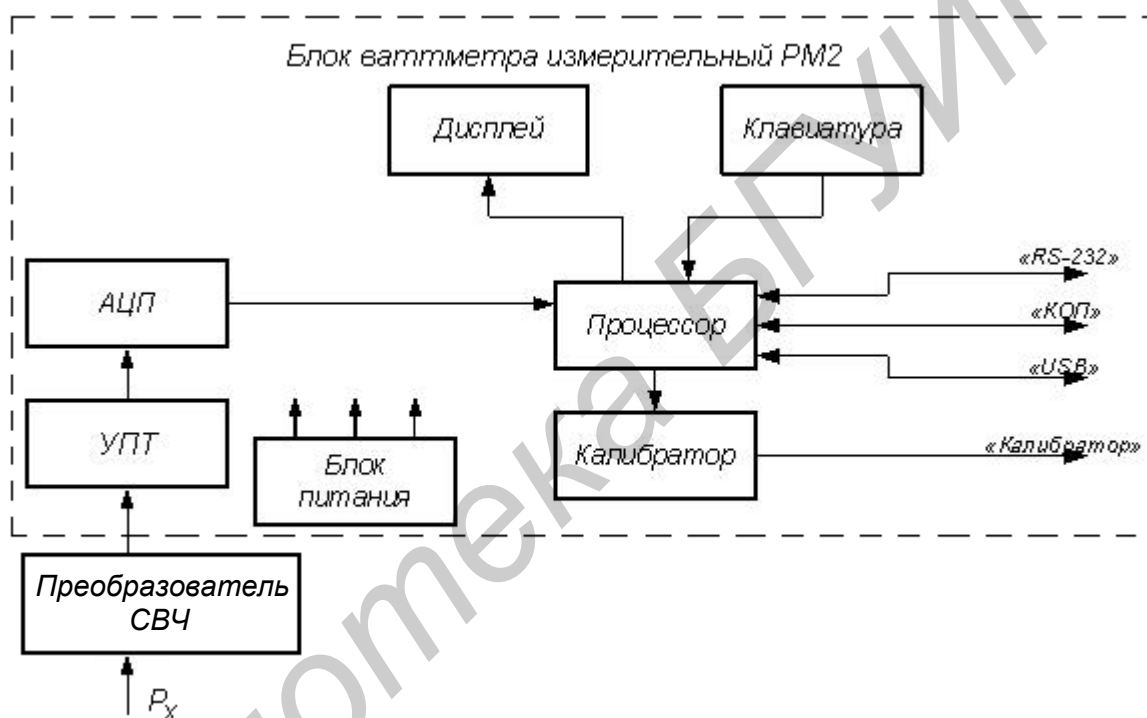


Рисунок 1 – Структурная схема ваттметра

Этот ваттметр обладает широкими функциональными возможностями:

- измерение мощности синусоидальных СВЧ сигналов и среднего значения мощности импульсно-модулированных СВЧ сигналов с отображением результата: в ваттах (Вт, мВт и мкВт); в децибелах относительно уровня мощности 1 милливатт (дБм); децибелах относительно заданного пользователем уровня мощности (дБ);
- ручное, автоматическое или дистанционное управление работой ваттметра;
- автоматическое переключение пределов измерения;
- возможность предварительной записи пользователем в память ваттметра информации о типе используемого преобразователя СВЧ и его

калибровочных коэффициентах с целью использования ее в процессе измерения для автоматической коррекции результатов измерения;

- формирование сигнала калибровки преобразователя СВЧ на переменном токе;

- расчет и отображение статистической информации по проведенным измерениям;

- обмен информацией с внешними устройствами через интерфейсы RS 232, USB, КОП;

- возможность установки пользователем опорного уровня мощности при отображении результатов измерения в дБ;

- компенсацию смещения нуля в автоматическом либо ручном режимах;

- отображение информации об используемом преобразователе СВЧ ваттметра и внешнем аттенюаторе (информация предварительно вводится в память блока ваттметра измерительного (далее БИ) пользователем);

- автоматический учет времени наработки.

Диапазон рабочих частот ваттметра от 0,01 ГГц до 37,5 ГГц.

Диапазон измерения мощности от 1 мкВт до 10 мВт. Возможно расширение диапазона измерения при использовании аттенюаторов.

Разрешающая способность ваттметра 0,1 мкВт.

Пределы допускаемой основной погрешности измерения мощности, не более

$$\delta = \pm \left[ 4 + 0,1 \cdot \left( \frac{P_k}{P_x} - 1 \right) \right], \% \quad (1)$$

в диапазоне частот от 0,01 до 12 ГГц;

$$\delta = \pm \left[ 6 + 0,1 \cdot \left( \frac{P_k}{P_x} - 1 \right) \right], \% \quad (2)$$

в диапазоне частот от 12 до 37,5 ГГц;

где  $P_k$  – конечные значения пределов измерения (10 мкВт, 100 мкВт, 1 мВт, 10 мВт);

$P_x$  – измеряемое значение мощности.

В третьей главе описаны основные этапы разработки и правила построения методики калибровки средств измерений. Приводятся разработанные методики калибровки в диапазонах частот 0,01 – 17,85 ГГц, 17,44 – 25,86 ГГц, 25,86 – 37,5 ГГц. В этих методиках установлены методы и



средства калибровки ваттметра в этих диапазонах частот, описаны процедуры измерений при определении КСВН СВЧ преобразователей ваттметра, номинальное значение мощности выходного сигнала калибратора, а также определения действительных значений измерения мощности. Для этих режимов калибровки разработаны методики обработки результатов измерений и оценки неопределенности калибруемых параметров.

Для оценки неопределенности измерения мощности выбрана следующая модель:

$$P = P_u + \Delta_\gamma + \Delta_\epsilon + \Delta_\delta \quad (3)$$

где  $P_u$  – показание калибруемого ваттметра, мВт;  
 $\Delta_\gamma$  – поправка, обусловленная неточностью рабочего эталона, мВт;  
 $\Delta_\epsilon$  – поправка, обусловленная неточностью ваттметра, мВт;  
 $\Delta_\delta$  – поправка, обусловленная дискретностью показаний ваттметра, мВт.

Для оценки неопределенности определения КСВН измерительного преобразователя используется следующая модель:

$$K_{CTU} = K_{CTU\gamma} + \Delta_\gamma, \quad (4)$$

где  $K_{CTU}$  – КСВН входа приемного преобразователя калибруемого ваттметра, отн. ед.;  
 $K_{CTU\gamma}$  – показание измерителя КСВН панорамного, отн. ед.;  
 $\Delta_\gamma$  – поправка, обусловленная неидеальностью измерителя КСВН панорамного, отн. ед.

Для оценки результатов измерения коэффициента эффективности выбрана следующая модель:

$$K_{\text{эф}} = \frac{P_u}{\alpha_{\text{эт}} \cdot (1 - |\Gamma|^2) \cdot P_{\text{эт}}} \cdot \Delta_p = \frac{P_u}{\alpha_{\text{эт}} \cdot (4 \cdot K_{CTU} / (K_{CTU} + 1)^2) \cdot P_{\text{эт}}} \cdot \Delta_p, \quad (5)$$

где  $K_{\text{эф}}$  – коэффициент эффективности калибруемого ваттметра поглощаемой мощности, отн. ед.;  
 $P_u$  – показание калибруемого ваттметра поглощаемой мощности, мВт;  
 $\alpha_{\text{эт}}$  – калибровочный коэффициент эталонного преобразователя проходящей мощности на частоте калибровке, отн. ед.;

$$|\Gamma| = \frac{K_{CTU} - 1}{K_{CTU} + 1} - \text{модуль коэффициента отражения калибруемого}$$

измерителя поглощаемой мощности, отн. ед.;

$K_{CTU}$  – КСВН входа калибруемого измерителя или преобразователя поглощаемой мощности, отн. ед.;

$P_{эт}$  – показание эталонного измерителя проходящей мощности, мВт;

$\Delta_p$  – поправка, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте, отн. ед.

Для этих параметров составлены бюджеты неопределенности и приведены выражения стандартной и расширенной неопределенности измерения калибруемых параметров.

В четвертой главе приведены результаты метрологических экспериментальных исследований ваттметра поглощаемой мощности СВЧ диапазона при его калибровке. Приведены результаты калибровки ваттметра для номинального значения мощности 1 мВт на частотах 10 ГГц, 20 ГГц, 30 ГГц, а также результаты определения КСВН измерительного преобразователя ваттметра на этих частотах. Для этих калибруемых точек составлены бюджеты неопределенности и оценены действительные значения калибруемых параметров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ современных методов и средств измерений поглощаемой мощности в СВЧ диапазоне. Описаны основные характеристики методов и современных средств измерения мощности в СВЧ диапазоне.

Сравнительная характеристика методов и средств измерения мощности в СВЧ диапазоне показала, что существующие в настоящее время методы и средства измерения проходящей мощности позволяют измерять уровни мощности радиоэлектронных средств в широком диапазоне частот с необходимой для практики точностью. Каждый метод измерения имеет свои преимущества, особенности и недостатки. Наиболее преимущественными с точки зрения практической реализации является термоэлектрический метод.

Рассмотрены принцип действия, структурная схема, режимы работы ваттметра поглощаемой мощности СВЧ диапазона РМ 0,01 – 37,5, а также порядок работы с ним и его метрологических характеристик. Описанный ваттметр обладает широкими функциональными возможностями, позволяющими не только проводить измерения мощности в Вт, дБм дБ, а также проводить статическую обработку информации по проведенным измерениям, автоматический учет коррекции результатов измерения и обмен информации с внешними устройствами через интерфейсы USB, КОП и RS-232.

Приведены разработанные методики калибровки ваттметра поглощаемой мощности в диапазоне частот 0,01 – 17,85 ГГц, 17,44 – 25,86 ГГц, 25,86 – 37,5 ГГц, а также методика определения коэффициента эффективности ваттметра поглощаемой мощности. Разработаны научно обоснованные методики оценивания неопределенности измеряемых параметров ваттметра поглощаемой мощности.

Разработанные методики калибровки и методика оценивания неопределенности носят универсальный характер и могут быть использованы на практике при калибровке ваттметра поглощаемой мощности в диапазоне частот 0,01 – 37,5 ГГц и обработки измерительной информации, полученной при калибровке.

Приведены результаты экспериментальных исследований ваттметра поглощаемой мощности в диапазоне частот 0,01 – 37,5 ГГц, полученные с использованием разработанных методик калибровки и обработки измерительной информации, описанных выше.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 Доницков, О.В. Ваттметр поглощаемой мощности СВЧ диапазона / О.В. Доницков, А.В. Гусинский, А.Н. Луферов, А.В. Ворошень, В.К. Демидович // Материалы Международной НТК, приуроч. К 50-летию МРТИ – БГУИР в 2-х ч. Ч. 1 – Минск, 2014 – С.162 – 163.

2 Доницков, О.В. Измерение мощности систем СВЧ диапазона / О.В. Доницков, А.Н. Луферов, А.В. Ворошень, В.К. Демидович // Сборник материалов V НТС «Надежность, живучесть и эффективность сложных систем» – Минск, 2013 – С.2.

Библиотека БГУИР