

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

УДК 621.317.78

Кейзеров  
Евгений Игоревич

Методика определения метрологических характеристик измерителей  
мощности КВЧ диапазона

### **АВТОРЕФЕРАТ**

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

---

Научный руководитель  
Белошицкий А. П.  
кандидат технических наук,  
доцент

---

Минск 2019

## 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. 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. Приборы для измерения мощности СВЧ, кроме основного своего назначения используются также для измерения интенсивности излучения при медико-биологических исследованиях, для определения потерь в четырехполюсниках, коэффициента отражения, частотных характеристик различных радиоустройств.

Современные достижения в области СВЧ техники открывают принципиально новые пути и возможности построения систем, служащих для скоростной передачи информации. Это обуславливает необходимость разработки средств измерений СВЧ диапазона длин волн, а также решения вопросов их метрологического обеспечения. С точки зрения метрологии решение этих задач в миллиметровом диапазоне длин волн связано с решением ряда уникальных проблем, поскольку размеры компонентов на этих частотах сравнимы с длиной волны.

Одной из особенностей работы в диапазоне СВЧ является уделение особого внимания измерению мощности электромагнитных сигналов, как единственной энергетической характеристики, однозначно характеризующей интенсивность электромагнитных колебаний. Именно поэтому существует большая потребность в измерителях мощности сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

Поддержание высоких метрологических характеристик ваттметров КВЧ диапазона невозможно без их метрологического обеспечения, а также выполнения таких видов метрологических работ, как метрологическая аттестация, периодическая поверка и калибровка.

Для их проведения требуются специально разработанные методики, учитывающие специфику проведения СВЧ измерений, конструктивные и эксплуатационные характеристики ваттметров и требования нормативных документов в этой области.

Таким образом, разработка методики определения метрологических характеристик ваттметра поглощаемой мощности КВЧ диапазона является актуальной и важной задачей.

Целью данной магистерской диссертации является разработка методики определения метрологических характеристик измерителя поглощаемой мощности КВЧ диапазона.

Для достижения этой цели в работе поставлены следующие задачи:

- Обзор и анализ методов и средств измерений поглощаемой мощности;
- анализ принципа работы схемы и особенностей реализации измерителя поглощаемой мощности;
- разработка и обоснование методики калибровки и методики поверки измерителя поглощаемой мощности;
- экспериментальное исследование измерителя при опробовании методики калибровки.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Интенсивное освоение микроволнового диапазона открывает принципиально новые возможности создания и развития устройств и систем скоростной передачи информации, радиолокации и радионавигации, радиоразведки и радиопротиводействия, связи и телевидения, космических и радиоастрономических исследований. При создании и использовании систем и устройств микроволнового диапазона уделяется большое внимание требованиям контроля параметров и их характеристик.

Постоянно возрастающая необходимость возрастания пропускной способности каналов связи и средств телекоммуникаций, повышение точности и разрешающей способности навигационных систем и средств обнаружения, освоения новых технологических процессов наукоемких производствах ведет к использованию электромагнитных колебаний с более высокими частотами.

В настоящее время отечественной электронной промышленностью активно осваивается миллиметровый диапазон длин волн. Разработка радиолокационной и навигационной аппаратуры авиационного и спутникового базирования в этом диапазоне особенно актуальна. С увеличением частоты появляется возможность уменьшения размеров сечения волноводного тракта, габаритных размеров и массы аппаратуры, что весьма актуально особенно для мобильных применений.

Одной из особенностей работы в диапазонах СВЧ и КВЧ является уделение особого внимания измерению мощности электромагнитных сигналов, как единственной энергетической характеристики, однозначно характеризующей интенсивность электромагнитных колебаний. Именно поэтому существует большая потребность в измерителях мощности сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

Поддержание высоких метрологических характеристик ваттметров КВЧ диапазона невозможно без их метрологического обеспечения, а также выполнения таких видов метрологических работ, как метрологическая аттестация, периодическая поверка или калибровка.

Для их проведения требуются специально разработанные методики, учитывающие специфику проведения КВЧ измерений, конструктивные и эксплуатационные характеристики ваттметров и требования нормативных документов в этой области.

Таким образом, разработка методик определения метрологических характеристик измерителей мощности КВЧ диапазона является актуальной и важной задачей.

Целью данной магистерской диссертации является разработка методик определения метрологических характеристик измерителей мощности КВЧ диапазона.

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

– обзор и анализ методов и средств измерений мощности в СВЧ и КВЧ диапазонах;

– рассмотрены устройство, принципа действия и особенности реализации измерителя поглощаемой мощности;

– разработаны и обоснованы методики калибровки и методики поверки измерителя поглощаемой мощности КВЧ диапазона;

– проведены экспериментальные исследования метрологических характеристик измерителя поглощаемой мощности КВЧ диапазона с использованием разработанных методик.

Новизна работы определяется следующими результатами:

– разработаны и обоснованы методика калибровки и поверки измерителя поглощаемой мощности КВЧ диапазона;

– предложены и обоснованы алгоритмы обработки результатов экспериментальных исследований измерителей поглощаемой мощности при их калибровке и оценке неопределенности измерений.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная методика калибровки является основой для написания методик калибровки измерителей мощности КВЧ диапазона конкретных типов и исследования их метрологических характеристик.

Результаты работы апробированы на 54-й Научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. Инфокоммуникации. – Минск, БГУИР, 2018, и опубликованы в материалах конференции.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** рассматривается общая характеристика методов измерения мощности, типовые схемы включения ваттметров поглощаемой и проходящей мощности в передающий тракт. В работе изложены следующие методы измерений: тепловые (калориметрический, болометрический, термоэлектрический); метод вольтметра; метод с использованием частотно-избирательных ферритовых элементов.

Рассмотрены современные средства измерений поглощаемой мощности на примере измерителя поглощаемой мощности Agilent E4418B с диодным преобразователем N8488A.

Во **второй главе** описывается устройство, принцип действия и структурная схема измерителя поглощаемой мощности M2-MBM-78.

Ваттметр предназначен для измерения мощности синусоидальных КВЧ сигналов и среднего значения мощности импульсно-модулированных КВЧ сигналов в волноводных трактах сечением  $3,6 \times 1,8$  мм (53,57 – 78,33 ГГц).

Принцип действия ваттметров основан на преобразовании СВЧ сигнала при помощи пикового детектора в постоянное напряжение пропорциональное амплитуде входного СВЧ сигнала, с последующим его измерением.

Конструктивно ваттметр выполнен в виде БИ и преобразователя КВЧ диодного, соединяемого с БИ посредством гибкого кабеля.

Структурная схема ваттметра приведена на рисунке 1.

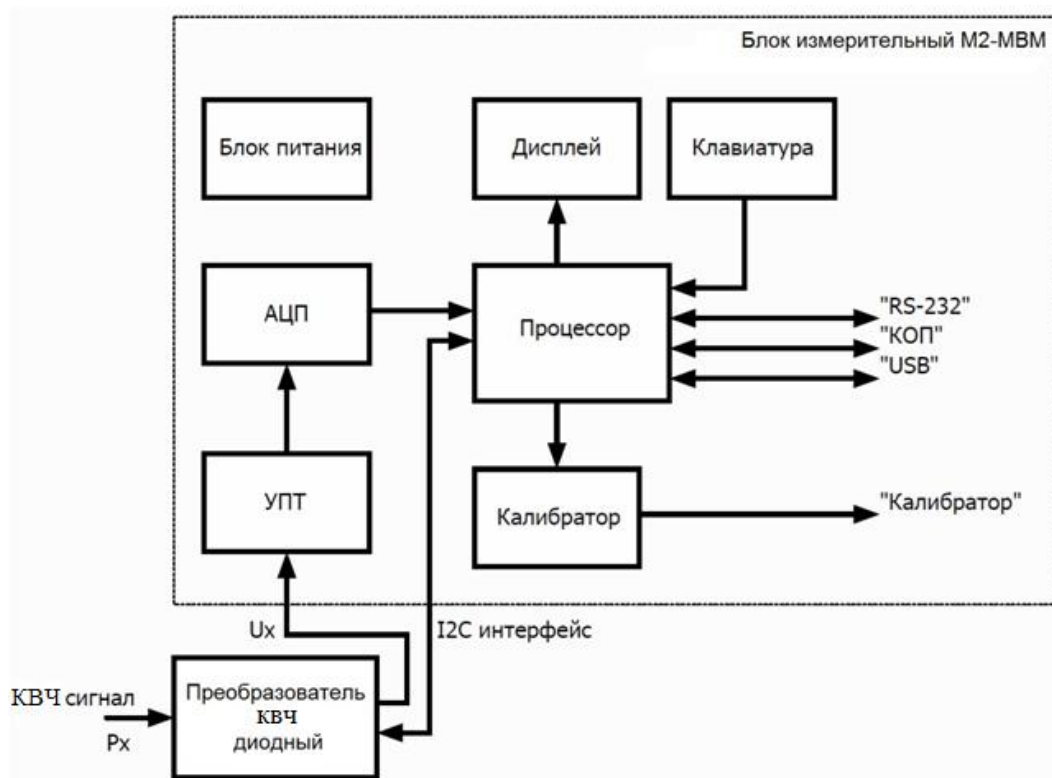


Рисунок 1 – Структурная схема ваттметра

Блок измерительный М2-МВМ содержит:

- усилитель постоянного тока (УПТ);
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- процессор;
- ЖКИ дисплей;
- клавиатуру;
- блок питания;
- контроллер интерфейса RS-232;
- контроллер интерфейса USB;
- калибратор напряжения переменного тока.

В преобразователе КВЧ происходит преобразование мощности входного КВЧ сигнала, подлежащего измерению, в напряжение постоянного тока, пропорциональное величине измеряемой мощности.

Преобразование КВЧ мощности происходит в детекторной секции, входящей в состав преобразователя КВЧ, которая является согласованной нагрузкой для источника КВЧ сигнала подлежащего измерению.

Структурная схема преобразователя КВЧ приведена на рисунке 2.

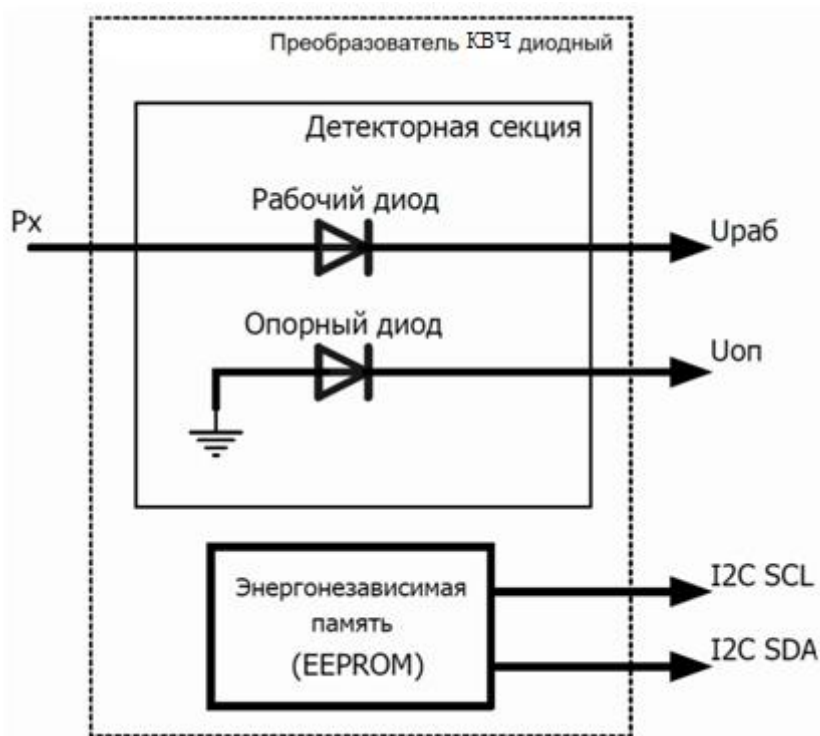


Рисунок 2 – Структурная схема преобразователя СВЧ

В **третьей главе** приводится разработанная методика калибровки измерителя поглощаемой мощности М2-МВМ-78.

В этой методике установлены операции и средства калибровки М2-МВМ-78, описаны процедуры определения метрологических характеристик измерителя, представлен алгоритм обработки результатов измерения.

Оценка результатов измерения КСВН входа приемного преобразователя измерителя мощности

Модель измерения:

$$K_{CTU} = K_{CTU_{\text{э}}} + \Delta_{\text{э}}, \text{ отн. ед.}, \quad (1)$$

где  $K_{CTU}$  – КСВН входа приемного преобразователя калибруемого ИМ, отн. ед.;

$K_{CTU_{\text{э}}}$  – показание измерителя КСВН панорамного, отн. ед.;

$\Delta_{\text{э}}$  – поправка, обусловленная неидеальностью измерителя КСВН панорамного, отн. ед.

Оценка результатов измерения отклонения измерения мощности

Модель измерения:

$$\begin{aligned} \Delta_P &= P_{\text{и}}(1 - |\Gamma_{\text{э}}|^2) - P_{\text{э}} \cdot (1 - |\Gamma_{\text{и}}|^2) - \Delta_K - \Delta_{\text{н}} + \Delta_{\text{рас.э}} + \Delta_{\text{рас.и}} + \Delta_{\text{д}} = \\ &= P_{\text{и}} \cdot 4 \cdot K_{CTU_{\text{э}}} / (1 + K_{CTU_{\text{э}}})^2 - 4 \cdot K_{CTU_{\text{и}}} \cdot U_{\text{э}} / ((1 + K_{CTU_{\text{и}}})^2 \cdot (K_{\text{п}} + \Delta'_K)) - \\ &\quad - \Delta_{\text{н}} + \Delta_{\text{рас.э}} + \Delta_{\text{рас.и}} + \Delta_{\text{д}}, \text{ мВт} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta_P$  – отклонение измерения мощности калибруемого ИМ, мВт;

$P_{\text{и}}$  – показание калибруемого ИМ, мВт;

$P_{\text{э}}$  – показание эталонного измерителя поглощаемой мощности, мВт;

$|\Gamma_{\text{э(и)}}| = \frac{K_{CTU_{\text{э(и)}}} - 1}{K_{CTU_{\text{э(и)}}} + 1}$  – модуль коэффициента отражения эталонного либо

калибруемого ИМ, отн. ед.;

$K_{CTU_{\text{э(и)}}}$  – КСВН входа эталонного либо калибруемого ИМ, отн. ед.;

$U_{\text{э}}$  – показание вольтметра, применяемого совместно с эталонным измерителем поглощаемой мощности, мВ;

$K_{\text{п}}$  – коэффициент преобразования эталонного измерителя поглощаемой мощности на частоте калибровке, мВ/мВт;

$\Delta'_K$  – поправка, обусловленная нелинейностью функции преобразования эталонного измерителя поглощаемой мощности, мВ/мВт;

$\Delta_{\text{н}}$  – поправка, обусловленная нестабильностью мощности применяемого генератора, мВт;

$\Delta_{\text{рас.э}}$ ,  $\Delta_{\text{рас.и}}$  – поправка, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте эталонного и калибруемого ИМ соответственно, мВт;

$\Delta_{\text{д}}$  – поправка, обусловленная дискретностью устройства отображения калибруемого ИМ, мВт.

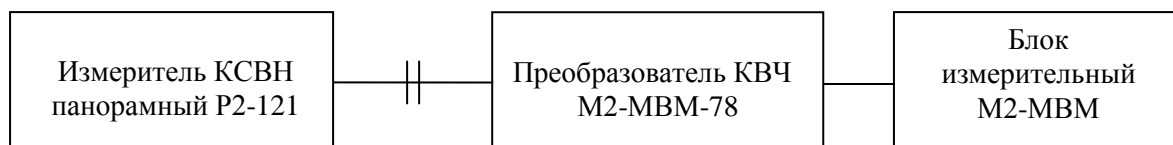


Для этих параметров составлены бюджеты неопределенности и приведены выражения стандартной и расширенной неопределенности измерения калибруемых параметров.

В **четвертой главе** приводится разработанная методика поверки измерителя поглощаемой мощности М2-МВМ-78.

Определение КСВН преобразователей ваттметров

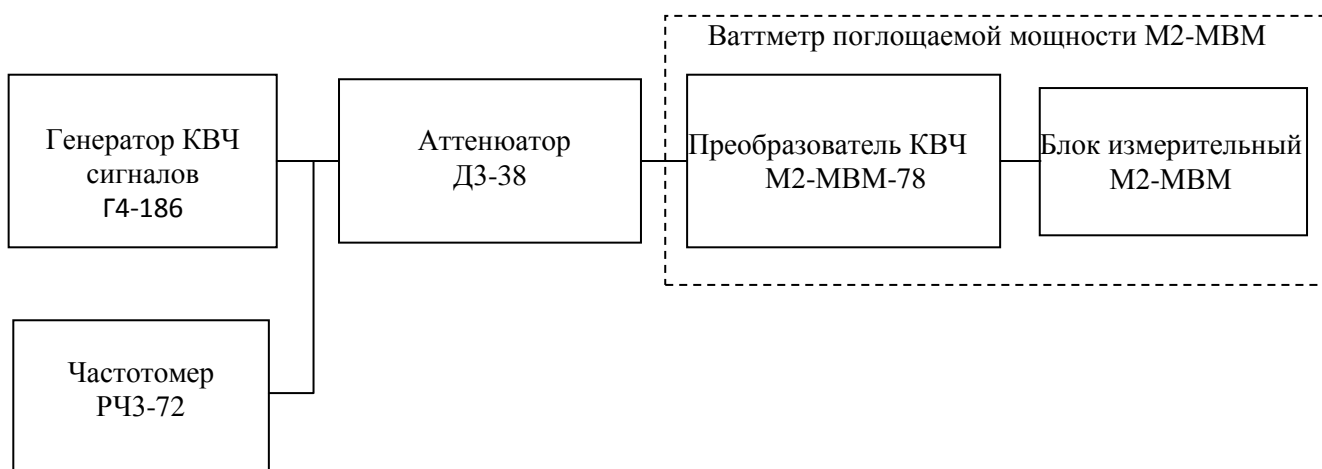
Определение КСВН преобразователя КВЧ М2-МВМ-78 производится с помощью панорамного измерителя КСВН Р2-121 по схеме, представленной на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Схема соединения приборов для измерения КСВН преобразователя СВЧ в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц**

Определение пределов основной погрешности ваттметра

Определение пределов основной погрешности ваттметра в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц проводится с использованием схемы, представленной на рисунке 4.



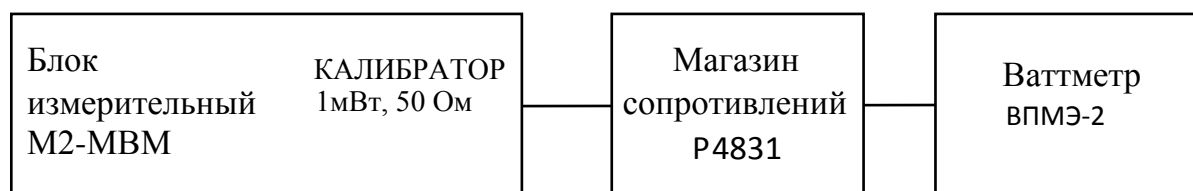
**Рисунок 4а – Схема соединения приборов для определения основной погрешности ваттметра в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц**



**Рисунок 46 – Схема соединения приборов для определения основной погрешности ваттметра в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц**

Определение номинального значения мощности выходного сигнала калибратора и допустимого отклонения от него.

При измерении мощности выходного сигнала калибратора собирается схема измерений в соответствии с рисунком 5.



**Рисунок 5 – Схема соединения приборов для определения значения выходной мощности калибратора**

В пятой главе представлены результаты калибровки измерителя поглощаемой мощности.

Результаты экспериментальных исследований при определении КСВН входа преобразователя и соответствующей неопределенности соответствуют требуемым значениям.

Результаты экспериментальных исследований при определении отклонения измерения мощности соответствуют требуемым.

В шестой главе представлены результаты поверки измерителя поглощаемой мощности.

Результаты экспериментальных исследований при определении коэффициента стоячей волны по напряжению преобразователя КВЧ удовлетворительны, т.к. значения КСВН преобразователя КВЧ не более 1,4.

Результаты экспериментальных исследований при определении основной погрешности измерения мощности СВЧ удовлетворительны, т.к. максимальные значения погрешностей  $\delta$  и  $|\delta_{ij}|$  не превышают 0,8 пределов.

Результаты экспериментальных исследований при определении мощности сигнала калибровки на переменном токе удовлетворительны т.к. мощность калибровки на переменном токе соответствует  $(1,00 \pm 0,01)$  мВт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе произведен анализ методов и средств измерения мощности диапазона СВЧ и КВЧ.

Рассмотрены устройство и принцип действия измерителя поглощаемой мощности. Описан принцип его действия, технические характеристики, структурная схема и порядок проведения измерений.

Разработана и обоснована методика калибровки измерителя поглощаемой мощности КВЧ диапазона. Предложены и обоснованы модели и алгоритмы обработки результатов измерений для оценки неопределенностей калибруемых параметров.

Разработана и обоснована методика поверки измерителя поглощаемой мощности КВЧ диапазона. Составлен порядок проводимых операций, выбраны эталонные средства измерений, необходимые для проведения поверки. В соответствии с требованиями нормативных документов, представлен алгоритм обработки результатов измерений.

Проведены экспериментальные исследования измерителя поглощаемой мощности с использованием разработанных методик калибровки и поверки.

Результаты работы апробированы на 54-й Научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. Инфокоммуникации. – Минск, БГУИР, 2018, и опубликованы в материалах конференции.