**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  |  | ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ: | | | | | | | | | | | | | | |
| Факультет | Е | |  | Заведующий кафедрой | | | | | |  | | | | Е6 | | | | | | |
|  | индекс факультета | |  |  | | | | |  | | | | | | индекс кафедры | | |
| Выпускающая кафедра | Е6 | |  | | Егоренков Л.С. | | |  | | | |  | | | | | | | |
|  | индекс кафедры | |  | | Фамилия ИО | |  | | | | подпись | | | | | | | | | | |
| Группа | Е6М31 | |  | «\_\_\_\_\_» | |  | | | | | | | | | | 2019 г. | | |
|  | индекс группы | |  |  | |  | | | | | | |  | | | |

**отчет**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **о прохождении** | | | производственной | | | | | | | | | | | | | | **практики** | | | | | | | |
| наименование практики | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Филиппова Александра Вячеславовича | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **обучающегося по**  **направлению/специальности** | | | | | | 27.04.04 | | |  | | Управление в технических | | | | | | | | | |
| нужное подчеркнуть | | | | | | код | | | |  | | полное наименование направления/специальности | | | | | |
| системах. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Руководитель практики:** | | | | | Митчин Н.А., к.т.н. | | | | | | | | | | | | | | |
|  | | Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Срок прохождения практики:** | | | | с | | 05.03.2019 | | | | | | г. |  | по | 26.03.2019 | | | г. | | | |
| **Должность обучающегося на практике:** | | | | | | | *магистрант* | | | | | | | | | | | | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Руководитель практики:** | | | |  | | |  |  | | | | |  | | | | | |
|  | | |  | Митчин Н.А. | | |  | |  | | |  | |  | | | | |
| Подпись | | |  | Фамилия ИО | | |  | |  | | | |  | |  | | |
| «\_\_\_» |  | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | | |  | 2019 г. |  |  | |  |  | | | | |  |  | | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2019г.

Оглавление

[ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ 3](#_Toc7207996)

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc7207997)

[1 СВЕДЕНИЯ О ПРЕДПРИЯТИИ 5](#_Toc7207998)

[***1.1.АДМИНИСТРАТИВНО-ФИНАНСОВАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЯ*** 5](#_Toc7207999)

[**1.2.*ПРОГРАММНОЕ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ*** 5](#_Toc7208000)

[2 ЗАДАЧИ ПРАКТИКИ 5](#_Toc7208001)

[**2.1.*ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ*** 5](#_Toc7208002)

[**2.2.*ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА*** 5](#_Toc7208003)

[***2.3.РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРАКТИКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА, ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ****.* 6](#_Toc7208004)

[2.3.1.Измерение и испытание в СВЧ диапазоне 6](#_Toc7208005)

[2.3.2. Способы измерения СВЧ мощности 6](#_Toc7208006)

[2.3.3. Методы измерения СВЧ мощности 8](#_Toc7208007)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 14](#_Toc7208008)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 15](#_Toc7208009)

**ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

ПХ - пластина Холла

СВЧ - сверхвысокочастотная

ЭДС - Электродвижущая сила

**ВВЕДЕНИЕ**

В качестве места прохождения практики был выбран Балтийский Государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ», кафедра Е6 БГТУ «ВОЕНМЕХ».

БГТУ «ВОЕНМЕХ» является ярким представителем инженерной школы России, сумевшим сохранить и приумножить достижения отечественного и мирового инженерно-технического образования. За свою 86-летнюю историю вуз подготовил для оборонной промышленности, народно-хозяйственного комплекса страны более 70 000 первоклассных специалистов, многие из которых сегодня руководят предприятиями, фирмами, конструкторскими бюро, а также возглавляют научные коллективы.

Целью практики является изучение методов измерения мощности электромагнитных колебаний.

**1 СВЕДЕНИЯ О ПРЕДПРИЯТИИ**

**1.1.АДМИНИСТРАТИВНО-ФИНАНСОВАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЯ**

Административно-финансовая деятельность предприятия предоставляется в следующих документах, которые можно найти на официальном сайте БГТУ «ВОЕНМЕХ» [1], а именно:

• Устав БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова [2];

• Правила внутреннего распорядка [3];

• Лицензия на правоведения образовательной деятельности

• Свидетельство о государственной аккредитации

**1.2.*ПРОГРАММНОЕ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ***

Ввиду того, что БГТУ «ВОЕНМЕХ» имеет большое множество различных кафедр для реализации программ обучения, детально систематизировать программное и аппаратное обеспечение не представляется возможным. Среди аппаратного обеспечения можно выделить:

• ЭВМ/ПЭВМ,

• вычислительные кластеры,

• демонстрационные стенды,

измерительная аппаратура,

• периферийные устройства.

Среди программного обеспечения можно выделить:

• ПО общего назначения,

• Прикладное ПО специального (профессионального) назначения.

**2 ЗАДАЧИ ПРАКТИКИ**

**2.1.*ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ***

В качестве практического задания, были поставлены следующие задачи:

1. Познакомится со способами измерения СВЧ мощности.
2. Познакомится с методами измерения СВЧ мощности.

**2.2.*ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА***

Для обеспечения организации инвентаризации были предоставлены:

• Персональный компьютер.

## *2.3.РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРАКТИКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА, ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.*

**2.3.1.Измерение и испытание в СВЧ диапазоне**

Мощность в общем виде есть физическая величина, которая определяется работой, производимой в единицу времени. Единица мощности ватт (Вт) соответствует мощности, при которой за одну секунду выполняется работа в один джоуль (Дж). На постоянном токе и переменном токе низкой частоты непосредственное измерение мощности зачастую заменяется измерением действующего значения электрического напряжения на нагрузке U, действующего значения тока, протекающего через нагрузку, угла сдвига фаз между током и напряжения . В СВЧ диапазоне измерение напряжения и тока становится затруднительным. Соизмеримость размеров входных цепей измерительных устройств с длинной волны является одной из причин неоднозначности измерения напряжения и тока. Измерения сопровождаются значительными частотными погрешностями. Следует добавить, что измерение напряжения и тока в волноводных трактах при некоторых типах волн, теряет практический смысл, так как продольная составляющая в проводнике отсутствует, а реальная разность потенциалов между концами любого диаметра сечения волновода равна нулю. В связи со сказанным на частотах начиная с десятков мегагерц предпочтительным и более точным становиться непосредственное измерение мощности, а на частотах свыше 10000 МГц – это единственный вид измерения, однозначно характеризующий интенсивность электромагнитного колебания. Для непосредственного измерения мощности СВЧ применяют методы, основанные на фундаментальных физических законах, включающих метод прямого измерения основных величин: массы, длинны и времени.

При этом различают два основных случая:

* измерение мощности, проходящей от источника в данную нагрузку;
* измерение мощности, которую источник может отдать в согласованную нагрузку (поглощаемой мощности).

**2.3.2. Способы измерения СВЧ мощности**

Измерение мощности источника электромагнитных колебаний (генератора).

Согласно общепринятому определению, под мощностью генератора понимают мощность, отдаваемую им в согласованную нагрузку (рис.1).В этом случае измеряемая мощность полностью рассеивается на некотором измерительном эквиваленте нагрузки с последующим измерением мощности теплового процесса. Такие измерители мощности называются ваттметрами поглощающего типа. Так как нагрузка должна полностью поглощать измеряемую мощность, то использование прибора возможно лишь при отключенном потребителе. Результат измерения будет наиболее точным, если входное сопротивление измерительного прибора полностью согласовано с выходным сопротивлением исследуемого генератора или волновым сопротивлением линии передачи, т. е. .

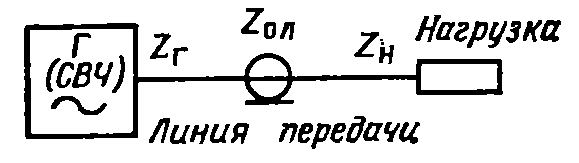


Рисунок 1.

Измерение электрической мощности, выделяемой в нагрузке, полное сопротивление которой может быть произвольно.

В этом случае между генератором и нагрузкой включается специальное устройство, преобразующее в другую форму лишь незначительную часть передаваемой по линия энергии и не нарушающее процесса ее передачи (Рис.2)

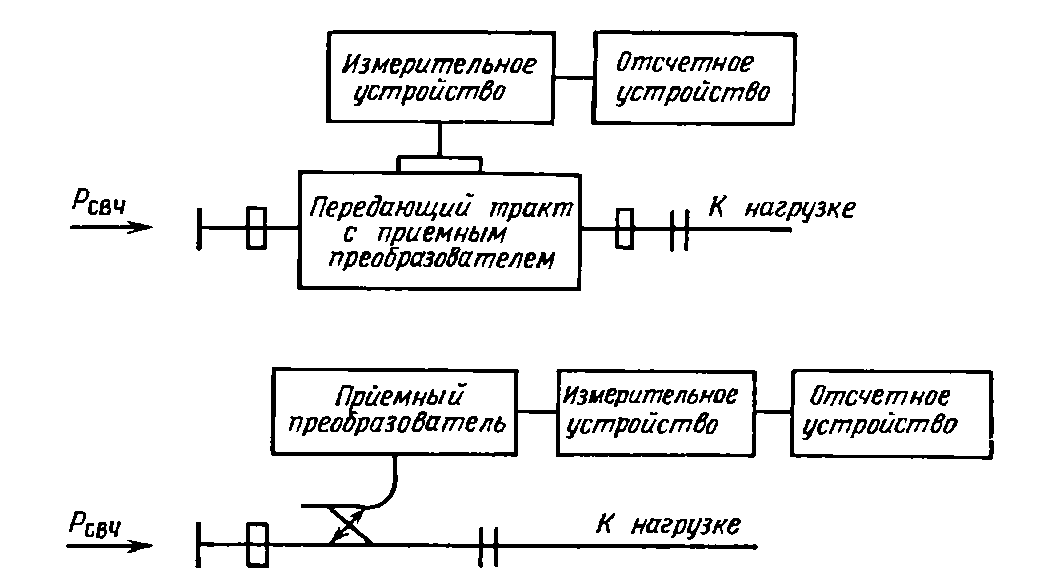


Рисунок 2.

Принципиальное отличие этих двух групп заключается в том, что приемные преобразователи в первом случае рассеивают всю подводимую СВЧ мощность, а во втором, как правило, потребляют незначительную часть мощности, проходящей в нагрузку.

*Измерительное устройство*

Как правило, оно включает узлы и блоки, преобразующие выходной сигнал приемного преобразователя в сигнал, удобный для индикации и подачи на отсчетное устройство, калибратор (при необходимости) и другие вспомогательные узлы. В зависимости от типа приемного преобразователя, измерительным устройством может служить самобалансирующийся мост или мост с ручной балансировкой (для биологический и термисторных ваттметров), усилитель постоянного или переменного тока, импульсный усилитель, механическая измерительная система и т.д.

Основные требования, предъявляемые к *измерительному*:

- постоянство коэффициента передачи в рабочих условиях эксплуатации (линейная амплитудная характеристика);

- малая инерционность;

- малая нестабильности показаний (в том числе дрейф нуля);

- удобное и (или) автоматизированное управление.

Отсчетное устройство

Индуцирует мощность, рассеиваемую преобразователем, в аналоговом или цифровом виде. Обычно отсчетное устройство совмещают с измерительным.

**2.3.3. Методы измерения СВЧ мощности**

*А. Измерение поглощаемой мощности*

Измерение поглощаемой мощности является наиболее распространенным видом измерения СВЧ мощности. Приемные преобразователи ваттметров поглощаемой мощности, являющиеся эквивалентом согласованной нагрузки, включат на конце передающей линии. В зависимости от вида применяемых преобразователей различают следующие методы измерений: тепловые (калориметрический, болометрический, термоэлектрический); метод вольтметра; метод с использованием частотно – избирательных ферритовых элементов.

Измерение мощности с помощью резистивных термочувствительных элементов (терморезисторов)

Наиболее распространенным методом измерения малых мощностей, на котором построены промышленные ваттметры, является метод измерения сопротивления терморезистора при рассеянии в нем электромагнитной энергии. В качестве резистивных термочувствительных элементов используются болометры, сопротивление которых растет с повышением температуры (положительный температурный коэффициент сопротивления), и термисторы, сопротивление которых с ростом температуры падает.

Основными преимуществами термисторов по сравнению с болометрами являются их более высокая чувствительность и большая устойчивость к перегрузкам.

Термистором называют терморезистор, изготовленный из специального полупроводникового материала, обладающего большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, т.е. температурная характеристика термистора — отрицательная. Применяют два типа термисторов: стержневой и бусинковый. Стержневые термисторы обладают более высокой электрической прочностью и имеют относительно меньшее реактивное сопротивление. Термисторы бусинкового типа при прочих равных условиях имеют меньшую поверхность охлаждения и поэтому обладают большей чувствительностью. Чувствительность термистора высокая— от 10 до 100 Ом/мВт. Для получения высокой чувствительности рабочую точку термистоpa выбирают на участке с максимальной крутизной характеристики.

*Болометр* — проволочный или пленочный терморезистор с положительной температурной характеристикой, помещенный в стеклянный (вакуумный или наполненный инертным газом) баллон. Для увеличения чувствительности нить выполнена из материала с высоким температурным коэффициентом сопротивления. Болометры менее чувствительны, чем терморезисторы, но имеют более стабильные, не зависящие от температуры окружающей среды характеристики.

Термистор или болометр помещают внутрь измерительной головки, состоящей из отрезка волновода или коаксиальной линии. Изменение сопротивления терморезистора при рассеянии в нем электромагнитной энергии измеряется обычно с помощью мостовых схем.

Промышленные терморезисторные ваттметры имеют общую абсолютную погрешность порядка 4...10 %. Погрешности измерения таких ваттметров определяются в основном степенью согласованности нагрузки и качеством измерительной головки. Существенным недостатком термисторных и болометрических ваттметров является ограничение максимального значения измеряемой мощности . Практически стандартные термисторы способны выдержать без разрушения мощность, не превосходящую нескольких десятков милливатт.

*Измерение мощности термопарами*

Данный метод измерения основан на регистрации значения термо ЭДС, возникающей при нагревании термопары энергией СВЧ. Структурная схема ваттметра состоит из приемного термопреобразователя и измерительной части. Основным элементом преобразователя является блок высокочастотных дифференциальных термопар, одновременно выполняющих функции согласованной нагрузки и дифференциального термометра. В СВЧ-диапазоне чаще применяют термопары в виде тонких металлических пленок, напыленных на диэлектрическую подложку.

Основным элементом измерительной части прибора является вольтметр постоянного тока с цифровым дисплеем.

К преимуществам таких ваттметров следует отнести малую зависимость результатов измерения от колебаний температуры окружающей среды и малое время подготовки прибора к работе. Недостатки ваттметров: ограниченный верхний уровень динамического диапазона и недостаточная устойчивость к перегрузкам, ограничивающая допустимое значение средней мощности при измерении импульсных сигналов. Практически стандартные термопары способны выдерживать без разрушения мощность, не превышающую 50... 75 мВт. Уровень измеряемой мощности может быть несколько увеличен, если перед термисторной, болометрической или термопарной камерой поместить калиброванный аттенюатор.

*Калориметрический метод измерения мощности*

Калориметрический метод измерения мощности отличается высокой точностью, является универсальным и используется во всем радиотехническом диапазоне частот, как для малых, так и для больших мощностей. Meтод основан на преобразовании энергии электромагнитных колебаний, поглощаемых согласованной нагрузкой, в тепловую. Поглощение энергии поглотителем, составляющим основной элемент прибора, можно зарегистрировать либо непосредственно по изменению его температуры, либо косвенно как изменение объема, давления или других характеристик.

Надежные калориметрические методы отличаются обратимостъю в том смысле, что с поглотителем не происходит никаких необратимых изменений и все калориметры возвращаются в свое первоначальное состояние за время установления равновесия.

Калориметрические измерители состоят из двух частей: поглощающей нагрузки и измерителя температуры. Наиболее распространены нагрузки с проточной водой. Мощность, поглощаемая в водяной нагрузке с проточной водой, определяется по разности температур на выходе и входе нагрузки калориметра и по скорости расхода протекающей воды.

*Б. Измерение проходящей мощности.*

Под проходящей мощностью понимают разность мощностей падающей

и отраженной электромагнитных волн:

Проходящую мощность электромагнитной волны можно измерить рассмотренными ранее ваттметрами, используемыми совместно с направленными ответвителями, или приборами, действие которых основано на использовании физических явлений, не требующих полного поглощения измеряемой энергии. К таким приборам относятся измерители мощности на преобразователях Холла, с поглощающей стенкой и др. В последние годы для измерения мощности СВЧ-колебаний начали использовать эффект так называемых горячих носителей тока в полупроводниках.

В волноводных измерителях мощности разделение падающих и отраженных волн СВЧ-энергии производят волноводным направленным ответвителем, упрощенная структурная схема которого представлена на рис.3

Структура классического направленного ответвителя содержит две волноводные линии: главную А и вспомогательную В, имеющие общую стенку. По главной волноводной линии распространяется падающая волна от генератора к нагрузке и отраженная от нагрузки к генератору. Вспомогательная волноводная линия работает в режиме согласования с обеих сторон. Между главной и вспомогательной линиями имеются отверстия в общей стенке. Расстояние между отверстиями cd равно четверти длины волны, распространяющейся в главной линии. Через отверстия c и d падающая и отраженная волны проникают во вспомогательную линию, но фазовые сдвиги этих волн таковы, что около отверстия d падающие волны складываются — точка 1, а отраженные — вычитаются и взаимно компенсируются — точка 2.

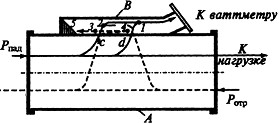


Рисунок 3. Использование направленного ответвителя в ваттметрах

Около отверстия c, наоборот; складывают отраженные волны — точка 3 и взаимно компенсируются падающие — точка 4.В результате падающая волна поступает на ваттметр, а мощность отраженной волны рассеивается на согласованной нагрузке 5. Таким образом, измеряется мощность падающей волны. Измерение мощности отраженной волны, необходимое для определения проходящей мощности, может осуществляться тем же ответвителем, или вторым, развернутым на 180°.

Достоинствами ваттметров на основе направленных ответвителей являются широкие пределы измеряемой мощности 10-4...105 Вт; возможность раздельного измерения падающей, отраженной и проходящей мощности. Диапазон частот таких ваттметров 0,03... 40 ГГц, пределы допускаемых погрешностей 2,5... 10 %.

*Измерение мощности преобразователями Холла*

Прямое перемножение при измерении мощности можно также получить, используя полупроводниковые преобразователи Холла.

Если специальную полупроводниковую пластину, по которой течёт ток I (показан пунктиром на рис. 4, а), возбуждаемый электрическим полем напряженностью E, поместить в магнитное поле с напряженностью H (индукцией В), то между ее точками, лежащими на прямой, перпендикулярной направлениям протекающего тока I и магнитного поля, возникает разность потенциалов (эффект Холла), определяемая как

где k — коэффициент пропорциональности.

Согласно известной в физике теоремы Умова-Пойнтинга, плотность потока проходящей мощности СВЧ-колебаний в некоторой точке поля определяется векторным произведением электрической и магнитной напряженностей этого поля П = [ЕН[. Отсюда, если ток I будет функцией электрической напряженности E, то с помощью датчика Холла можно получить следующую зависимость напряжения от проходящей мощности:, где g— постоянный коэффициент, характеризующий образец — частоту и пр. Для измерения такой мощности пластину полупроводника (пластинку Холла — ПХ) помещают в волновод, как показано на 4,6.

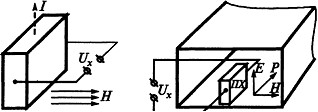


Рисунок 4. Преобразователи Холла: а — возникновение эффекта в электромагнитном поле, б— принцип измерения мощности в волноводе

Рассмотренный измеритель проходящей мощности обладает следующими достоинствами:

• может работать при любой нагрузке, а не только при согласованной;

• высокое быстродействие ваттметра дает возможность применять его при измерении импульсной мощности.

Однако практическая реализация ваттметров на эффекте Холла — достаточно сложная задача в силу многих факторов. Тем не менее, существуют ваттметры, измеряющие проходящую импульсную мощность до 100 кВт с погрешностью не более 10 %.

*Ваттметры на основе эффекта "горячих" носителей тока*

Из физики известно, что под воздействием электрического поля в полупроводнике увеличивается средняя хаотическая скорость свободных носителей зарядов или дырок), что эквивалентно повышению их температуры относительно температуры кристаллической решетки материала. Это явление в теории полупроводников называется разогревом носителей зарядов.

Если осуществить неоднородный "разогрев" полупроводниковой пластины, то должен возникнуть поток носителей зарядов из "горячей" области в "холодную". Вместе с тем оказывается, что ток в разомкнутой цепи равен нулю. Это обстоятельство свидетельствует о возникновении ЭДС, противодействующей движению зарядов. Величина такой ЭДС зависит от степени "разогрева" полупроводниковой пластины.

Для усиления эффекта неоднородному "разогреву" следует подвергать полупроводник, концентрация носителей в котором пространственно неоднородна. Если "разогрев" осуществляется полем СВЧ, то по значению ЭДС можно судить о проходящей мощности СВЧ. Поскольку интервал установления температуры носителей зарядов на несколько порядков меньше времени установления температуры кристаллической решетки, ваттметры на основе разогрева носителей зарядов позволяют непосредственно измерять импульсную мощность при длительностях импульсов до 0,1 мкс.

Основными узлами такого ваттметра являются приемный преобразователь с полупроводниковым элементом и измерительное устройство с цифровым отсчетом.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В сущности, измерение СВЧ мощности сводиться к измерению состояния различных материалов - индикаторов под воздействием СВЧ излучения.

Каждый метод измерения СВЧ мощности имеет свои преимущества и недостатки. Выбор метода измерения зависит от ряда причин, таких как: необходимая точность измерения, диапазон измеряемой мощности, сложность конструкции измерителя, стоимостью прибора и т.д.

# *СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ*

1. Официальный сайт БГТУ «ВОЕНМЕХ» [Электронный ресурс]. URL:

http://www.voenmeh.ru (дата обращения 05.07.2018).

2. Устав БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова [Электронный ресурс].

URL: http://voenmeh.ru/files/0/29.10.2015.pdf (дата обращения 05.07.2018).

3. Правила внутреннего распорядка [Электронный ресурс]. URL:

http://voenmeh.ru/files/0/pravila\_vnutr\_rasporyadka\_2011.pdf (дата обращения 05.07.2018).

4.В.В. Смирнов, С.В. Николаев.  Пассивные помехи.  Издательство "Радиоавионика", 2008.-400c

5.Радиоэлектронная заметность самолетов (по материалам открытой иностранной печати)//ЦАГИ. – 1986.-№ 665.-76 с.

6. Мицмахер,М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ /М.Ю. Мицмахер, В.А. Торгованов. – М.: Радио и связь,1982.-128 с.

7. М.И. Билько А.К. Томашевский "Измерение мощности на СВЧ" М. Сов. Радио 1976 год.