



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Сибирский федеральный университет

Кафедра «Радиотехника»



Красноярск, 2008



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Сибирский федеральный университет
Кафедра «Радиотехника»

К.т.н., доцент кафедры РТ Алешечкин Андрей Михайлович

Метрология и радиоизмерения

Лекция 9. Измерение мощности

Институт инженерной физики и радиоэлектроники

Направление 210200.62 Радиотехника

План лекции

- 1. Общие сведения
- 2. Измерение мощности в диапазонах низких и высоких частот
- 3. Измерение мощности в диапазоне СВЧ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Общие сведения

- Приборы для измерения мощности электрических сигналов называются **ваттметрами** или **измерителями мощности**.
- Протекание тока по электрической цепи сопровождается потреблением от источника сигнала энергии, скорость поступления которой характеризуется мощностью.
- Различают **мгновенную, среднюю, активную и реактивную** мощности.
- Под **мгновенной мощностью** понимается произведение мгновенного значения напряжения на мгновенное значение тока, протекающего по участку электрической цепи, в которой происходит измерение:

$$p(t) = u(t)i(t)$$

- Под **средней мощностью** электрического синусоидального сигнала понимается среднее значение мгновенной мощности за период сигнала T :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt$$

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

- Если ток $I = I_{\max} \sin(\omega t)$, а напряжение на участке электрической цепи $U = U_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$, то:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T I_{\max} U_{\max} \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) dt = UI \cos \varphi$$

- Для периодического сигнала сложной формы мощность можно определять с помощью преобразования Фурье:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n$$

где U_0, I_0 – постоянные составляющие; U_n, I_n – среднеквадратические значения гармоник напряжения и тока; φ_n – фазовый сдвиг между гармониками U_n и I_n .

- **Активная мощность** представляет собой энергию, которая выделяется (поглощается) в единицу времени в виде тепла на активном сопротивлении R_H :

$$P = I^2 R_H$$

- Активная мощность измеряется в ваттах.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

- Под **реактивной мощностью** понимается произведение напряжения U на участке цепи на ток I , протекающий по этому участку, и на синус угла φ между ними:

$$Q=UI \sin \varphi$$

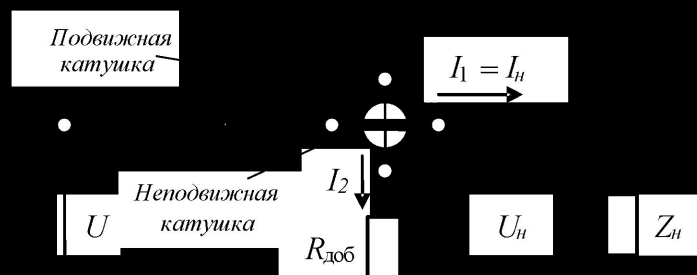
- Реактивную мощность принято измерять в вольт-амперах реактивных (вар). Реактивная мощность характеризует собой ту часть энергии, которой обмениваются между собой генератор сигнала (источник) и приёмник.
- На постоянном и переменном токе низкой частоты измерение мощности производится обычно косвенными методами по результатам прямых измерений тока, напряжения и сдвига фаз между ними.
- Поэтому на частотах выше 30...50 МГц применяются методы измерения, основанные на преобразовании энергии электромагнитного поля в другие виды энергии, более удобные для измерения.

Измерение мощности в диапазонах НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ЧАСТОТ

- Обычно измеряют среднюю мощность периодического электрического сигнала.
- Все методы измерения можно разделить на две основные группы:
- Преобразователи **первой группы** строятся по тем же принципам, что и аналогичные преобразователи электронных вольтметров.
- Ко **второй группе** относят методы измерения, основанные на выполнении вычислительных операций в соответствии с математическим определением средней мощности (методы перемножения). Применяются устройства прямого и косвенного перемножения.

1. Ваттметры электродинамической системы

- Эти электромеханические приборы относятся ко второй группе и применяются на частотах до 10 кГц. В них устройствами прямого перемножения являются измерительные механизмы.



- Угол поворота α стрелки ваттметра, соединённой с подвижной частью (токовой катушкой) прибора, будет прямо пропорционален активной мощности в нагрузке, последовательно с которой и включается токовая катушка

$$\alpha \approx (kUI / R) \cos \varphi \approx kP$$

- Где k – коэффициент пропорциональности
- Ваттметры электродинамической системы могут применяться для измерения электрической мощности в цепях как постоянного, так и переменного тока низкой частоты. наиболее широко они используются для измерения мощности в электрических цепях промышленной частоты (50 Гц) и с частотой 400 Гц.

2. Метод перемножения

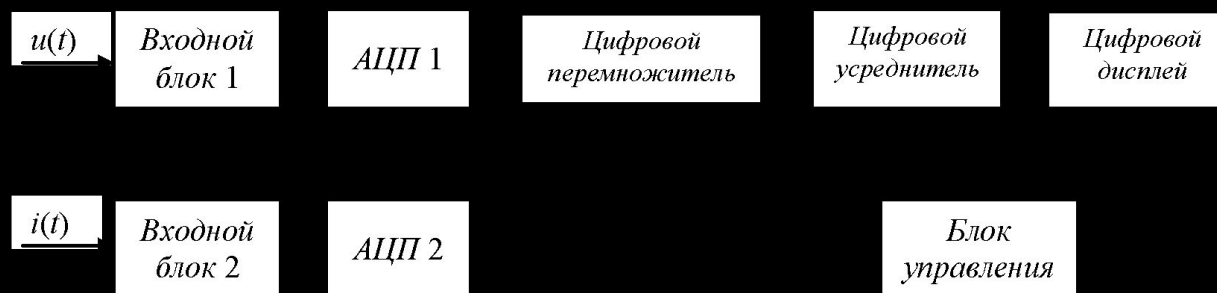
- Среднюю мощность, потребляемую цепью переменного тока можно найти, перемножая мгновенные значения напряжения и тока с последующим усреднением произведения. Подобная задача решается с помощью аналоговых и цифровых перемножающих схем.
- Многие ваттметры, построенные с применением аналоговых перемножителей сигналов, имеют цифровой индикатор (дисплей).



- В перемножителях используются нелинейные элементы с идентичными и стабильными параметрами, имеющие квадратичные характеристики.

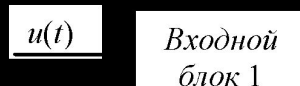
2. Метод перемножения

- В ваттметре с цифровым перемножением между входными блоками 1, 2 и цифровым перемножителем включаются аналого-цифровые преобразователи АЦП 1 и АЦП 2, соответственно. В них мгновенные значения напряжения и тока преобразуются в цифровые коды (числовые эквиваленты), которые перемножаются цифровым перемножителем. АЦП 1,2 и цифровой перемножитель выполняются обычно в виде БИС. Данный ваттметр собран по схеме с жёсткой логикой и имеет высокое быстродействие, которое определяется характеристиками АЦП и цифрового перемножителя.



2. Метод перемножения

- Цифровые ваттметры в настоящее время выполняют часто по схеме, содержащей встроенный микропроцессор, который кроме операций по тестированию и управлению работой всего прибора выполняет также и все математические операции (перемножение, усреднение и др.). Программы управления и выполнения математических операций записываются в ПЗУ микропроцессорной системы.



- Быстродействие цифрового микропроцессорного ваттметра обычно ниже, чем ваттметра, собранного по схеме с жёсткой логикой, однако следует отметить то, что он обладает всеми свойствами, которые имеют приборы с встроёнными микропроцессорами и, следовательно, в пределах своей применимости имеет существенные преимущества перед ваттметром, собранным по схеме с жёсткой логикой.

Измерение мощности в диапазоне СВЧ

- Измерение мощности в диапазоне СВЧ – один из самых распространённых и важных видов измерений. В отличие от измерения мощности на низких и высоких частотах все методы измерения мощности на СВЧ основаны на эквивалентном преобразовании энергии электромагнитных колебаний в другие виды энергии, более удобные для измерений – тепловую, механическую и т. д., с последующим вторичным преобразованием в электрический сигнал.
- Ваттметры СВЧ обычно классифицируют по способу включения в измерительный тракт. При этом различают ваттметры **проходящей мощности** и ваттметры **поглощаемой мощности**.

Генератор

Наг

- В ваттметрах **поглощаемой мощности** измеряемая мощность полностью поглощается согласованной нагрузкой и затем измеряется мощность теплового процесса. Из-за полного поглощения мощности нагрузкой использование такого ваттметра возможно только при отключенном потребителе.

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ СВЧ

- Ваттметры **проходящей мощности** применяются обычно для непрерывного контроля уровня мощности, поступающей от источника к нагрузке при эксплуатации радиотехнических передающих устройств.
- Преобразователи ваттметров проходящей мощности включают в линию передачи электромагнитной энергии непосредственно или через направленные ответвители.
- В зависимости от способа преобразования и воздействия электромагнитной энергии ваттметры бывают **тепловые, пндеромоторные и электронные.**
- В соответствии с измеряемым параметром – ваттметры **среднего значения мощности** и ваттметры **импульсной мощности.**
- В зависимости от конструкции – ваттметры **с коаксиальным входом** и ваттметры **с волноводным входом.**
- В соответствии с уровнем измеряемой мощности – ваттметры **малой** (до 10 мВт), **средней** (10мВт... 10 Вт), **большой** (свыше 10 Вт) мощности.
- В соответствии с ГОСТ имеется ряд значений классов точности ваттметров: 1,0; 1,5; 2,5; 6,0; 10,0; 15,0; 25,0, допускающий также возможность относить широкодиапазонные и многопредельные ваттметры к различным классам точности на различных участках диапазона частот и различных пределах измерений.

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ СВЧ

- Самыми распространёнными являются тепловые методы измерения, основанные на преобразовании мощности электромагнитных колебаний СВЧ в тепловую мощность, с последующим преобразованием в электрический сигнал:
 1. терморезисторный метод;
 2. термоэлектрический метод;
 3. калориметрический метод.

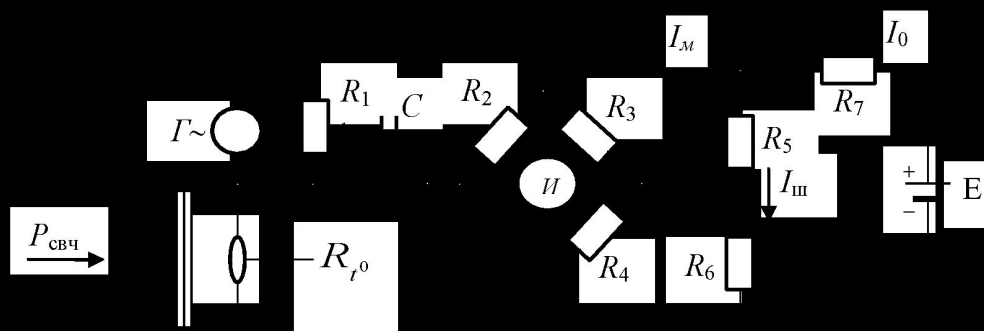
1. Терморезисторный метод измерения мощности

- Данный метод основан на измерении изменения активного сопротивления **терморезистора** при рассеянии в нём электромагнитной энергии и является одним из самых распространённых методов измерения малых мощностей. В качестве терморезисторов используются **термисторы** и болометры.
- **Термистор** – это полупроводниковый терморезистор, сопротивление которого зависит от температуры и, следовательно, от рассеиваемой на нём мощности СВЧ колебаний, вызывающей его нагрев.
- Термистор имеет отрицательный температурный коэффициент сопротивления и два типа конструктивного исполнения – стержневой и бусинковый.
- Термисторы имеют достаточно высокую чувствительность, лежащую в пределах 10...100 Ом/мВт, для чего его рабочую точку выбирают на участке с максимальной крутизной характеристики
- **Болометр** – это проволочный или плёночный терморезистор, помещённый в стеклянный, вакуумный или наполненный инертным газом, баллон.
- Активное сопротивление плёночного болометра практически не зависит от частоты вплоть до сверхвысоких частот.
- Плёночные болометры имеют меньшую чувствительность, чем термисторы – они применяются для измерения мощностей от 1...2 мВт до 1 Вт.

1. Терморезисторный метод измерения мощности

- Ваттметр для измерения мощности СВЧ колебаний состоит из двух основных частей – термисторного или болометрического измерительного преобразователя (головки) и измерительной схемы.
- Внутри головки, состоящей из отрезка коаксиальной линии или волновода, помещается терморезистор (термистор или болометр). В соответствующем режиме, определяемом значением тока через терморезистор, он является согласованной нагрузкой для СВЧ тракта (что необходимо для полного поглощения измеряемой мощности), на конце которого включена головка.
- Изменение сопротивления терморезистора измеряется обычно с помощью мостовых схем – неуравновешенных и уравновешенных мостов.
- Неуравновешенные мосты, применяемые для создания ваттметров по типу приборов прямого действия, имеют более низкую точность, чем уравновешенные, применяемые в ваттметрах, основанных на методе сравнения.
- Преимуществом неуравновешенных мостов является наглядность индикации результатов измерений.
- При подаче СВЧ колебаний, вследствие изменения сопротивления терморезистора R_x баланс моста нарушается, и его восстанавливают, изменяя ток питания моста, следовательно, и терморезистора с помощью сопротивления R_6 и источника питания E .

1. Терморезисторный метод измерения мощности



- В настоящее время широко применяются автоматические измерители мощности СВЧ колебаний, что связано в основном с двумя причинами:
 1. развитием автоматизированных систем контроля;
 2. сложностью управления работой прибора, связанной с балансировкой мостовых схем, являющимися основными элементами любого терморезисторного ваттметра.
- Как правило, такие автоматические измерители мощности строятся с применением микропроцессоров.

1. Терморезисторный метод измерения мощности

$$P_{\text{нвч}} = \left[(I_0 + \Delta I_1)^2 - (I_0 + \Delta I_2)^2 \right] R_{t0} / 4.$$

- Прибор позволяет производить многократные измерения с автоматической обработкой их результатов.

1. Терморезисторный метод измерения мощности

Погрешности терморезисторных ваттметров.

- 1. Погрешность меры.** Если в ваттметре мощность СВЧ колебаний сравнивается с мощностью постоянного тока, то мерой является источник постоянного тока, следовательно, погрешность меры определяется нестабильностью тока и погрешностью его измерения.
- 2. Погрешность преобразования.** Основные причины появления таких погрешностей следующие:
 - несовершенное согласование сопротивления головки с волновым сопротивлением тракта, что вызывает появление систематической погрешности, которую в принципе можно определить и учесть;
 - плохие контакты между терморезистором и головкой, а также головкой и трактом, что также вызывает появление погрешности.
- 3. Погрешность сравнения.** Значение этой погрешности зависит от точности измерения мостовой схемы, характеристики терморезистора, точного поддержания рабочего сопротивления терморезистора, температуры окружающей среды (температурная погрешность).
- 4. Погрешность фиксации** результатов измерений. Она зависит в основном от типа отсчётного устройства.

2. Термоэлектрический метод измерения мощности

- Данный метод основан на измерении значения термоЭДС, которая возникает при нагревании термопреобразователя энергией СВЧ колебаний.
- Ваттметры, реализующие такой метод измерения мощности, состоят из приёмного термопреобразователя и измерительной части. Они характеризуются широким диапазоном частот и большим динамическим диапазоном.
- Основным элементом преобразователя является **блок дифференциальных высокочастотных термопар**, выполняющих функции согласованной нагрузки и дифференциального термометра.
- **Преимущества** – малая зависимость от температуры окружающей среды и малое время подготовки прибора к работе.
- **Недостатки** – ограниченный верхний уровень динамического диапазона и недостаточная устойчивость к перегрузкам, что ограничивает допустимое значение средней мощности при измерении импульсных сигналов.
- Верхний уровень измеряемой мощности повышают установкой перед измерительной камерой калиброванного аттенюатора (поглощающего или предельного).

2. Термоэлектрический метод измерения мощности

- **Поглощающий волноводный аттенюатор** состоит из отрезка волновода, с помещённым внутри слоем эффективно поглощающего СВЧ энергию вещества.
- В **предельном волноводном аттенюаторе** используется явление экспоненциального затухания электромагнитного поля вдоль волновода, поперечные размеры которого меньше критических для его рабочей длины волны.
- Кроме тонкоплёночных термопар применяются тонкоплёночные терморезисторы высокой прочности, выполненные в виде металлической пленки из *нитрида тантала*, нанесённой на кремниевый кристалл.
- Это соединение представляет собой «горячий» конец получившейся термопары, а второй конец резистора и удалённый от центра конец кристалла служат её холодными концами.
- Такой резистор, помещённый в измерительную головку, выполняет функцию оконечной нагрузки широкополосного тракта в рабочей полосе частот (до 18...20 ГГц) и обеспечивает хорошее согласование нагрузки с трактом передачи СВЧ.
- На одном кристалле обычно располагаются две подобных термопары, соединённые последовательно.
- Чувствительность такого термоэлектрического преобразователя – порядка 160 мкВ/мВт.

3. Калориметрический метод измерения мощности

- Калориметрический метод основан на определении количества тепла, рассеиваемого на нагрузке, являющейся поглощающим сопротивлением в линии передачи СВЧ мощности.
- Термодинамическое состояние калориметрической нагрузки можно описать уравнением:

$$P_H = H(T - T_{cp}) + cV(dT / dt)$$

где P_H – мощность рассеиваемая в калориметрической нагрузке; $T(T_{cp})$ – температура (начальная температура) среды, в которой находится нагрузка; H – коэффициент теплоотдачи; c – удельная теплоёмкость нагрузки.

- Разность температур можно определить по формуле:

$$T - T_{cp} = P_H [1 - \exp(-t / \tau)] / H$$

- где $\tau = cV/H$ – тепловая постоянная времени.
- Для любого калориметра по результатам измерения разности температур $T - T_{cp}$ можно вычислить поглощаемую мощность, если известны физические постоянные (H, c) в уравнении.

3. Калориметрический метод измерения мощности

- На практике определение постоянных затруднено, поэтому используют два предельных режима работы калориметра, и, соответственно, две формулы, вытекающие из уравнения для этих режимов:

$$P=c(dT / dt) \text{ при } t \rightarrow 0$$

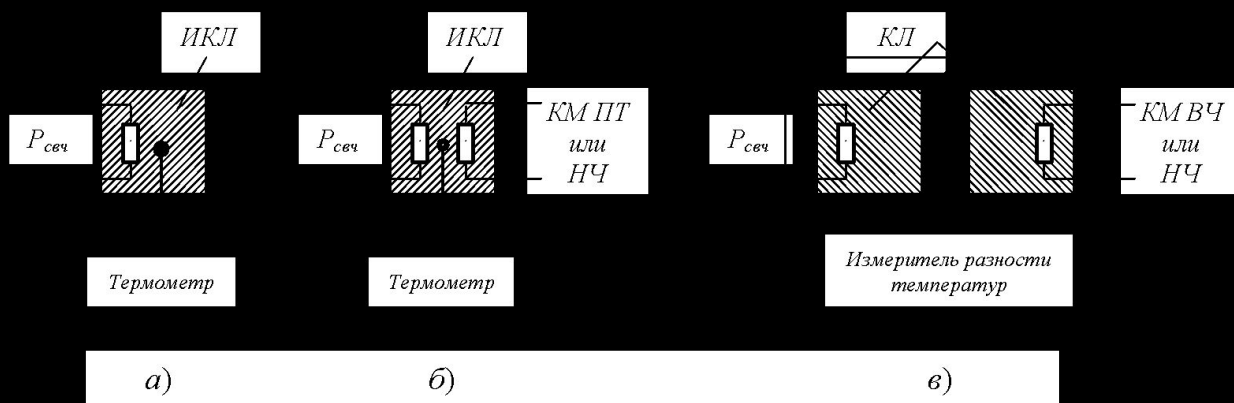
$$P=(T-T_{cp})H \text{ при } t \rightarrow \infty$$

- Из первого соотношения следует, что время измерения должно быть значительно меньше τ . Потери тепла в окружающую среду должны быть малы и обязательно учтены в процессе измерения.
- Такие калориметры называются **адиабатическими**, их достоинством является то, что для определения мощности достаточно знать только теплоёмкость нагрузки и скорость изменения температуры (dT/dt).
- Мощность P , усреднённая за время Δt , определяется выражением:

$$P=kmc(dT / dt)$$

где k – коэффициент пропорциональности, m – масса термоизолированной калориметрической насадки.

3. Калориметрический метод измерения мощности



а – адиабатический калориметр, *б* – адиабатический калориметр с калибровкой термометра известной мощностью, *в* – дифференциальный адиабатический калориметр

ИКЛ – изолированная калориметрическая нагрузка, КЛ – частично изолированная калориметрическая нагрузка, КМ – калиброванная мощность, ПТ – постоянный ток, НЧ (ВЧ) – низкая (высокая) частота

- Измерение мощности заключается в измерении разности температур между двумя нагрузками. Тепловая симметрия системы значительно снижает влияние температуры окружающей среды и повышает чувствительность калориметрического метода измерения мощности СВЧ.

3. Калориметрический метод измерения мощности

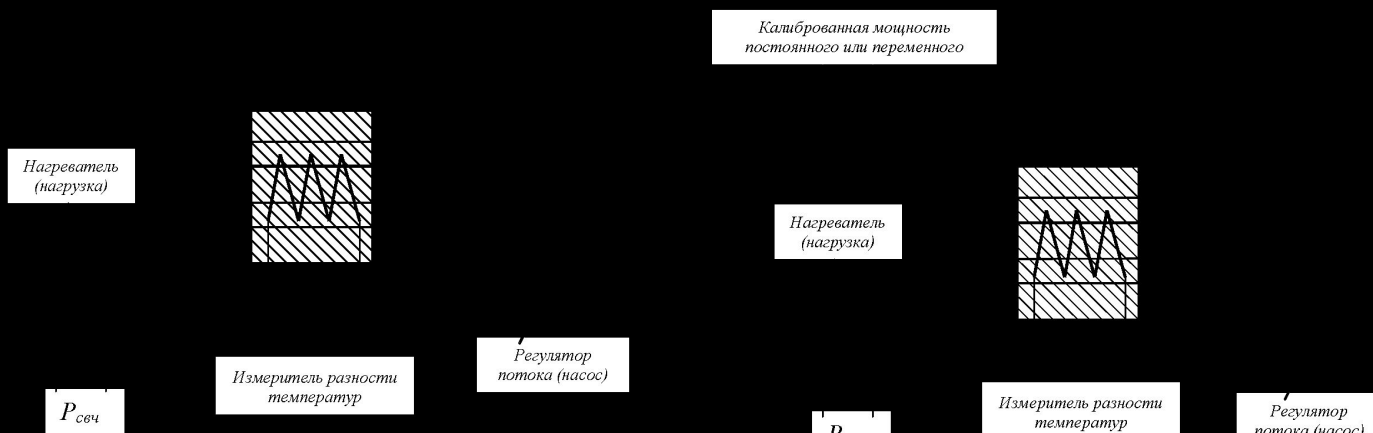
- Основной недостаток адиабатических калориметров – необходимость периодического отключения мощности СВЧ от полезной нагрузки.
- Подобного недостатка лишены так называемые **проточные калориметры**, основными элементами которых являются калориметрическая нагрузка для преобразования электромагнитной энергии СВЧ в тепловую энергию в жидкости (обычно воде), устройство для циркуляции жидкости и измеритель температуры.
- Зависимость измеряемой мощности от скорости поглощения энергии определяет равенством:

$$P_{\text{изм}} = 4,187 v B c \Delta T$$

где $k = 4,187$; v – скорость протекания жидкости через нагрузку; B – плотность жидкости (поглощающей нагрузки); c – удельная теплоёмкость жидкости; ΔT – разность температур.

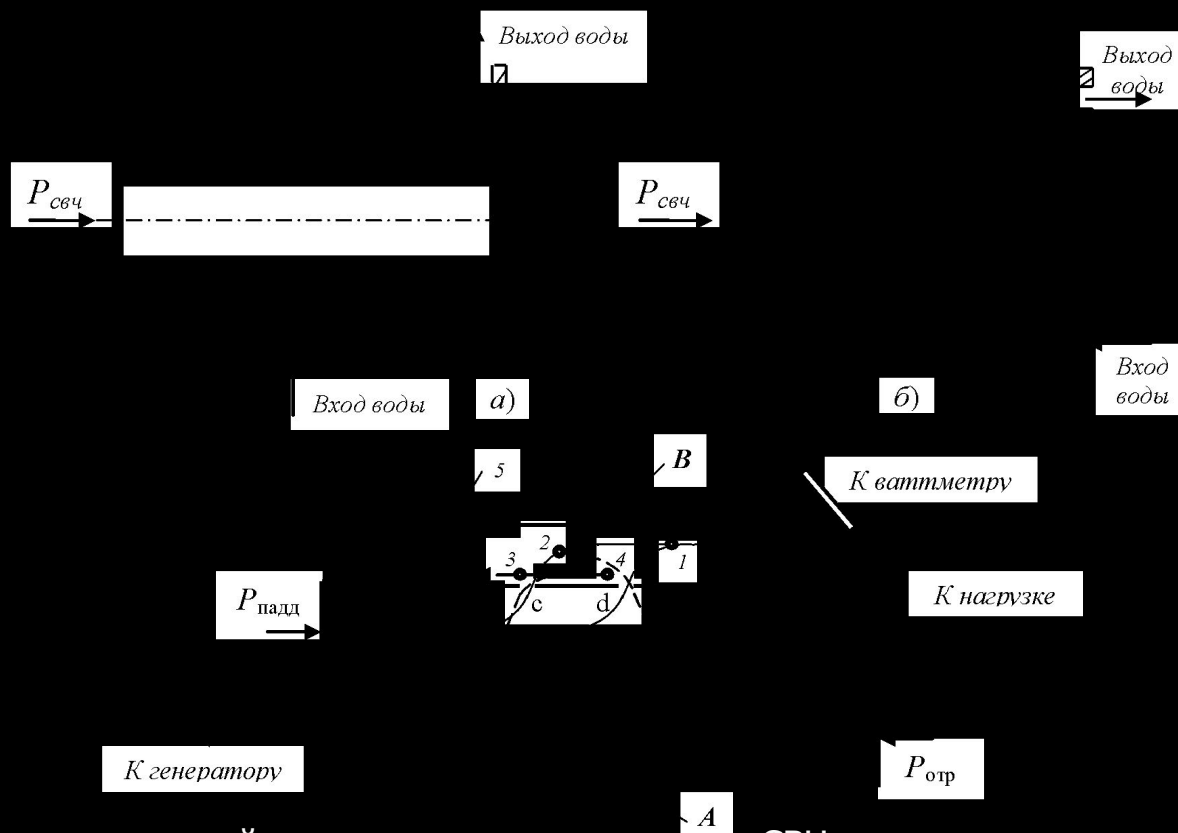
- При постоянных значениях v , c и B измеряемая мощность пропорциональна разности температур: $P_{\text{изм}} = 4,187 \Delta T$.

3. Калориметрический метод измерения мощности



- В проточном калориметре замкнутого типа вода используется многократно.
- Циркуляцию воды обеспечивает насос, включённый в замкнутый контур системы. Разность температур втекающей в нагрузку и вытекающей из неё воды измеряется батареей (блоком) дифференциальных термопар, которые включены последовательно, так что их холодные спаи омываются входными, а горячие спаи выходными потоками воды.
- Калориметрические нагрузки проточных калориметров в зависимости от диапазона частот и условий согласования с передающим трактом имеют различные конструкции.

3. Калориметрический метод измерения мощности



- Калориметрический метод измерения мощности СВЧ является самым точным. Погрешности образцовых калориметров составляют около 1%, а промышленные калориметры имеют погрешность 2,5...5%.