

## **Лабораторная работа № 18.**

### **Изучение работы клистрона непрерывного действия на высоком уровне мощности.**

*Целью настоящей работы является изучение работы СВЧ усилителя – клистрона с максимальной выходной мощностью 50 кВт. Рассматриваются методики построения трактов низкого уровня СВЧ мощности, обеспечивающих требуемый сигнал на входе клистрона, волноводных трактов высокого уровня СВЧ мощности, обеспечивающих поглощение выходной мощности клистрона, методы измерения выходной мощности клистрона, а также амплитудной и амплитудно-частотной характеристики клистрона.*

1. Введение.
2. Экспериментальная установка
3. Порядок выполнения работы.
4. Принцип работы клистрона.
5. Система высоковольтного питания клистрона.
6. Методика измерения СВЧ мощности.
7. Контрольные вопросы.

#### 1. Введение.

Многорезонаторные клистроны можно разделить на клистроны непрерывного действия и импульсные. Многорезонаторные клистроны широко применяются в выходных каскадах мощных передатчиков дециметровых и сантиметровых волн. Обычно клистроны в непрерывном режиме применяются в качестве передатчиков тропосферной связи с уровнями мощности 1—20 кВт и систем связи "Земля—спутник" с уровнями мощности до 50 кВт. Клистроны непрерывного режима работы мощностью от 50 до 500 кВт (сверхмощные) применяются для передатчиков радиолокационных станций и станций управления на межпланетных расстояниях. Клистроны для телевизионных передатчиков работают на уровнях мощности до 50 кВт. В установках промышленного нагрева используются мощности от 1 до 50 кВт.

Многорезонаторные усилительные клистроны получили широкое распространение при проектировании и создании систем СВЧ питания линейных резонансных ускорителей. Идея линейного резонансного ускорения, при котором частица проходит через последовательность промежутков, находящихся под напряжением, является одной из старейших в области ускорительной физики и относится, по крайней мере, к 1924 г.

Метод линейного резонансного ускорения обладает рядом достоинств, которые обуславливают его важную роль в физике средних и высоких энергий, медицине и ряде отраслей промышленности.

Конструкция линейного резонансного ускорителя определяется необходимостью иметь эффективную высокочастотную систему питания, обеспечивающую создание требуемого электромагнитного поля в ускоряющей структуре, а также требованиями компактности и надежности работы. Особые требования, которые предъявляются к СВЧ системе ускорителя, находят отражение также в том факте, что наиболее жесткие допуски на его параметры, вообще говоря, связаны с обеспечением нужного распределения ускоряющего электрического поля.

Одним из основных этапов при разработке систем СВЧ питания ускорителей является испытания клистронов на высоком уровне мощности с использованием волноводных согласованных нагрузок. Измеряемые в процессе таких испытаний амплитудные и амплитудно-частотные характеристики клистронов являются определяющими при выборе структурных схем систем СВЧ питания ускорителей, конструкции ускоряющих секций, а также алгоритмов контроля и управления параметрами ускоряющего поля.

В настоящей лабораторной работе проводится изучение работы многорезонаторного клистрона непрерывного действия на высоком уровне мощности.

## 2. Экспериментальная установка

Блок-схема экспериментальной установки показана на Рис. 1.

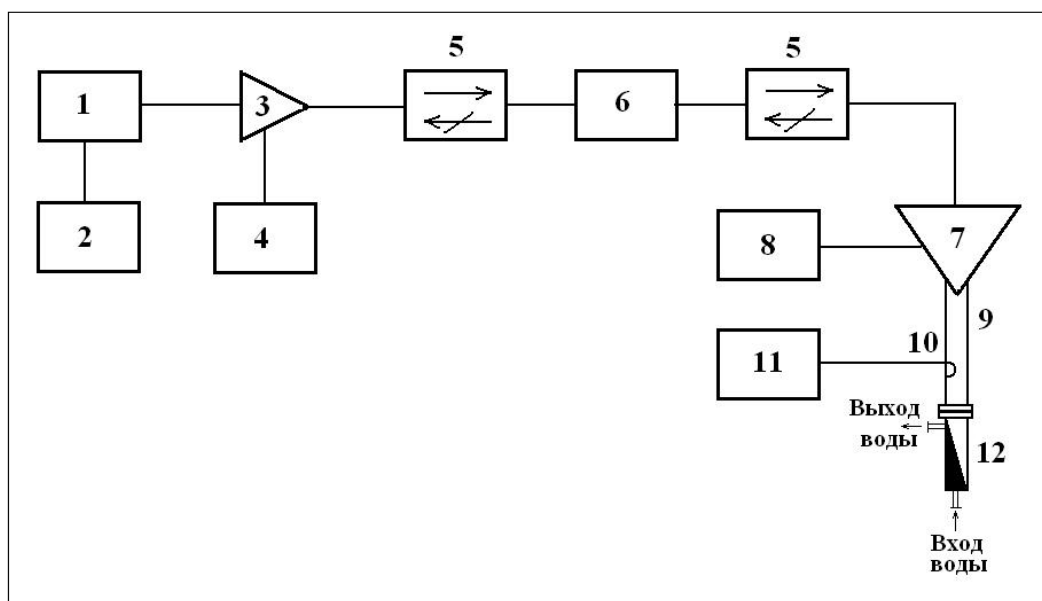


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:  
1 – СВЧ генератор Г4-122;

- 2 – Частотомер ЧЗ-34А;
- 3 – Усилитель СВЧ мощности ( $P_{\max} = 4.5$  Вт);
- 4 – Источник питания Б5-47;
- 5 – Ферритовый циркулятор;
- 6 – Механический регулируемый аттенюатор (0 – 30 дБ)
- 7 – Клистрон
- 8 – Высоковольтный источник питания ВИП – 16к – 5.5;
- 9 – Соединительный волновод;
- 10 – Петля связи;
- 11 – Ваттметр поглощаемой мощности Я2М-66;
- 12 – Водяная согласованная нагрузка.

Экспериментальная установка включает в себя тракт низкого уровня мощности, формирующий входной сигнал клистронного усилителя мощности. В состав тракта входят: СВЧ генератор Г4-122 с выходной мощностью от 0 до 200 мВт (1) в диапазоне рабочей частоты  $f = 2450$  МГц, частотомер ЧЗ-34А (2), усилитель СВЧ мощности (3) с источником питания (4), имеющий максимальную выходную мощность в насыщении 4.5 Вт, два коаксиальных ферритовых циркулятора (5), обеспечивающих развязку между соединяемыми приборами по отраженной волне, коаксиальный механический регулируемый аттенюатор с проградуированной шкалой (ослабление от 0 до 30 дБ). Сигнал с выхода тракта низкого уровня мощности, регулируемый по частоте и по мощности от 0 до 4.5 Вт, подается на вход клистрона (7), волноводный выход которого соединен с водяной согласованной нагрузкой (12) через соединительный волновод (9). В боковой стенке соединительного волновода (9) установлена петля связи (10) с переходным ослаблением 46 дБ, которая используется для дополнительного измерения выходной мощности клистрона ваттметром (11). Основное измерение выходной мощности клистрона проводится калориметрическим методом по разности температур воды на входе и выходе согласованной нагрузки (12). Входная и выходная температуры измеряются термосопротивлениями, не показанными на Рис. 1. Расход воды измеряется на входе нагрузки калиброванным расходомером (на Рис. 1 не показан).

### 3. Порядок выполнения работы.

1. Измерить зависимость мощности на входе клистрона (на выходе тракта низкого уровня мощности) от ослабления аттенюатора на рабочей частоте  $f = 2450$  МГц. Оформить данные в виде таблицы.

2. Подготовка клистрона к работе. Включение высоковольтного источника питания клистрона, вывод параметров “холостого хода” клистрона (входная мощность  $P_{вх} = 0$ ) на рабочий режим: высокое напряжение 15 кВ, ток луча 4 А.

3. Измерить амплитудную характеристику клистрона (зависимость выходной мощности ( $P_{вых}$ ) от входной ( $P_{вх}$ )) на рабочей частоте  $f = 2450$  МГц с параметрами питания 15 кВ/4 А. Построить график зависимости  $P_{вых}(P_{вх})$ . Определить коэффициент усиления клистрона. Определить КПД клистрона при данных параметрах высоковольтного питания.

4. Измерить амплитудно-частотную характеристику клистрона в насыщении в диапазоне частот  $f = 2450 \pm 10$  МГц с шагом 1 МГц. Построить график зависимости  $P_{вых}(f)$ .

#### 4. Принцип работы клистрона.

Клистроны относятся к классу электронно-лучевых приборов СВЧ с динамическим управлением электронным потоком. Схема устройства и включения двухрезонаторного пролетного клистрона изображена на Рис. 1.

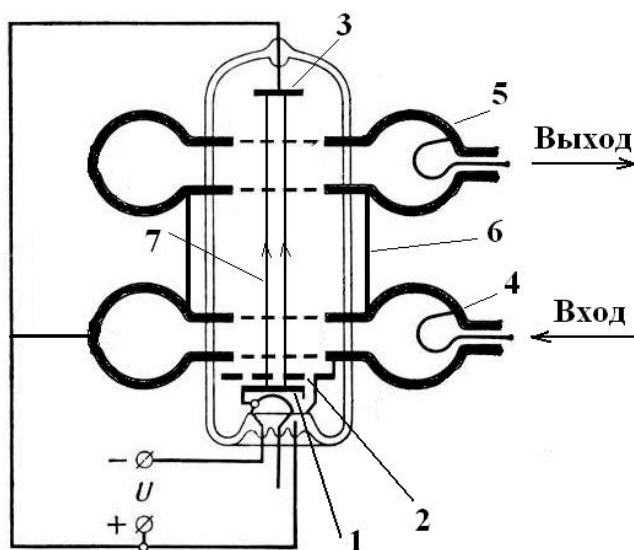


Рис. 1. Устройство двухрезонаторного клистрона:

1 – катод; 2 – управляющий электрод; 3 – коллектор; 4, 5 – входной и выходной резонаторы; 6 – трубка дрейфа; 7 – электронный поток.

Первый резонатор клистрона служит для модуляции электронного пучка и называется иногда группирователем. Второй резонатор служит для отбора

высокочастотной энергии от пучка, имеющего модуляцию по плотности. Металлическая труба, находящаяся между двумя резонаторами, экранирует пространство дрейфа (пространство группировки) от внешних постоянных и переменных электрических полей. Именно в трубке дрейфа происходит преобразование скоростной модуляции в модуляцию электронного потока по плотности. От действия магнитных полей при рассмотрении клистронов можно отвлечься, за исключением продольного постоянного магнитного поля, применяемого для фокусировки электронного потока. В двухрезонаторном клистроне немодулированный электронный поток, выходящий из катода, поступает в первый резонатор, между стенками которого имеется продольное электрическое поле СВЧ. Это поле производит скоростную модуляцию электронного потока. Двигаясь в пространстве дрейфа, электроны постепенно образуют сгустки. Эти сгустки поступают во второй резонатор с частотой, равной частоте входного сигнала, и наводят ток, протекающий по внутренней поверхности стенок второго резонатора. Появляющееся в результате между сетками резонатора электрическое поле тормозит электроны. Кинетическая энергия электронов, полученная ими от источника ускоряющего напряжения  $U$ , преобразуется в энергию СВЧ колебаний и поступает через вывод энергии в выходную нагрузку. Что касается электронов, прошедших через второй зазор, то они оседают на коллекторе и рассеивают в нем в виде тепла оставшуюся кинетическую энергию.

Развитие принципов пролетных клистронов привело к созданию многорезонаторных клистронов, которые имеют один или несколько промежуточных резонаторов, расположенных между входным и выходным резонаторами. Многорезонаторные клистроны обеспечивают значительное повышение коэффициента усиления, КПД и выходной мощности в сравнении с двухрезонаторными клистроном.

Одним из путей повышения коэффициента усиления является каскадное включение двухрезонаторных клистронов, показанное на Рис. 2,а. Принцип каскадного соединения усилителей широко применяется в диапазоне низких частот. Этот принцип используется также и в диапазоне СВЧ. Однако устройство, наладка и питание усилительной цепочки при этом неоправданно усложняются.

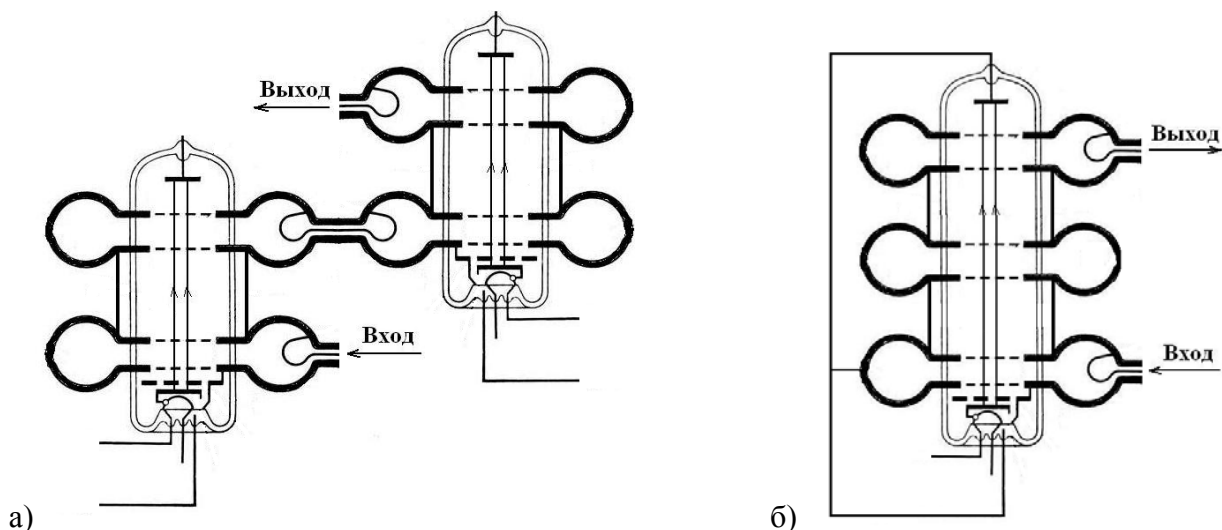


Рис. 2. Каскадное соединение усилительных двухрезонаторных клистронов (а) и трехрезонаторный клистронный усилитель (б).

При рассмотрении Рис. 2,а напрашивается мысль объединить второй резонатор первого каскада с первым резонатором второго каскада и использовать общий электронный луч, как это показано на Рис. 2,б. Клистрон, изображенный на этом рисунке, имеет в общем случае  $N$  полых резонаторов, разделенных промежутками дрейфа. В первом приближении каскадный клистрон, имеющий  $N$  резонаторов, можно разбить на  $(N - 1)$  простейших двухрезонаторных усилителей. Так, второй резонатор трехрезонаторного клистрона играет роль выходного резонатора по отношению к первому резонатору и роль группирователя по отношению к последнему резонатору. В общем случае следует рассматривать все резонаторы, кроме последнего, как сложный многорезонаторный группирователь, определяющий конвекционный электронный ток в выходном зазоре.

Увеличивая число резонаторов до 5 - 7 и более, можно получить в принципе громадное усиление, превышающее 100 дБ. Обычно такая величина коэффициента усиления для практических целей не требуется. Кроме того, при очень больших усилениях клистрон склонен к самовозбуждению за счет различных механизмов паразитной обратной связи. Поэтому в современных клистропах увеличение числа резонаторов используется не для неограниченного повышения коэффициента усиления, а для расширения рабочей полосы частот за счет специфической настройки резонансных частот промежуточных резонаторов.

В настоящей работе используется четырехрезонаторный клистрон непрерывного действия, параметры которого приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры четырехрезонаторного клистрона непрерывного действия.

Резонансная частота	2450 МГц
Рабочая полоса частот	$\pm 6$ МГц
Макс. вых. мощность	50 кВт
КПД	70%
Коэффициент усиления	$\sim 40$ дБ
Напряжение луча	15.0 кВ
Ток луча	4.7 А
Фокусировка	Постоянные магниты

## 5. Система высоковольтного питания клистрона.

5.1 Технические требования к высоковольтному высокостабильному источнику питания клистрона.

### 5.1.1 Состав аппаратуры:

- источник напряжения катода,
- источник напряжения управляющего электрода,
- источник тока накала подогревателя катода,
- источник напряжения электроразрядного насоса (ЭРН),
- контроллер источника высоковольтного питания клистрона.

Блок-схема системы питания клистрона показана на Рис. 3.





- контроллер источника питания обеспечивает его включение, прогрев клистрона, контроль и регулирование параметров питания и выключение в местном и дистанционном режимах;
- в местном режиме управление источником осуществляется с помощью компьютера, подсоединенного к контроллеру через интерфейс типа “Ethernet”;
- в дистанционном режиме контроллер через интерфейс типа “Ethernet” подсоединяется к управляющей станции комплекса.

В соответствии с приведенными техническими требованиями был разработан высоковольтный высокостабильный источник питания клистрона.

## 5.2 Высоковольтный источник питания клистрона ВИП – 16к – 5.5.

(ВИП – 16к – 5.5

| L - номинальное значение выходного тока, А

L - номинальное значение выходного напряжения, кВ)

### 5.2.1 Характеристики высоковольтного источника питания ВИП – 16к – 5.5

Структурная схема источника питания ВИП-16к-5.5 приведена на Рис. 4.

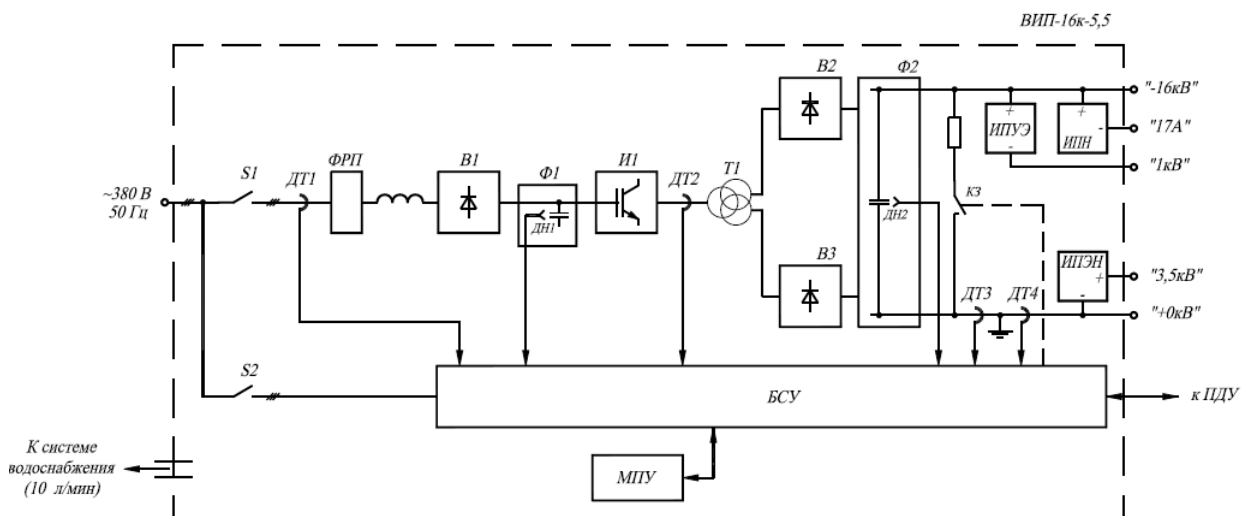


Рис. 4. Структурная схема источника питания ВИП-16к-5.5

Обозначения на структурной схеме:

S1 – автоматический выключатель (силовой);  
 S2 – автоматический выключатель (управление);  
 ДТ1 – датчик фазных токов ВИП;  
 ФРП – фильтр радиопомех;  
 В1 – выпрямитель сетевой;  
 Ф1 – фильтр ЗПТ;  
 ДН1 – датчик напряжения ЗПТ;  
 И1 – инвертор;  
 ДТ2 – датчик тока инвертора;  
 Т1 – повышающий трансформатор;  
 В2, В3 – выпрямитель высоковольтный;  
 Ф2 – выходной фильтр;  
 КЗ – короткозамыкатель;

ДН2 – датчик напряжения катода;  
 ДТ3 – датчик тока катода;  
 ДТ4 – датчик тока коллектора;  
 БСУ – блок системы управления;  
 МПУ – местная панель управления;  
 ПДУ – пульт дистанционного управления;  
 Выходные контакты:  
 “-16кВ” – подключение катода;  
 “17А” – подключение подогревателя катода;  
 “1кВ” – подключение управляющего электрода;  
 “3,5кВ” – подключение ЭРН;  
 “+0кВ” – подключение коллектора.

Входные параметры и выходные параметры источника питания катода приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Входные параметры и выходные параметры источника питания катода

№ п.п.	Наименование параметра	Усл. обозн.	Значение
Входные параметры			
1.	напряжение питающей сети (трехфазное, переменное)		$380 \text{ В} \pm 10 \%^1$
2.	частота питающей сети		$(50 \pm 0,4) \text{ Гц}$
Выходные параметры. Питание катода <sup>2</sup> .			
3.	диапазон регулировки выходного напряжения (полюс "плюс" заземляется в стойке ВИП)		$-(5 \div 16) \text{ кВ}$
4.	номинальное значение выходного напряжения	$U_N$	$- 16 \text{ кВ}$
5.	номинальный ток нагрузки	$I_N$	$5,5 \text{ А}$
6.	номинальная выходная мощность	$P_N$	$88 \text{ кВт}$
7.	изменение выходного напряжения под воздействием внешних факторов – не хуже		$\pm 1,5 \% \text{ от } U_N$
8.	долговременная стабилизация напряжения – не хуже		$\pm 1,5 \% \text{ от } U_N$
9.	относительный уровень пульсаций в режиме токопотребления в интервале напряжений 13-16 кВ, не более		$10^{-3}$

Помимо высоковольтного питания катода клистрона с параметрами, приведенными в таблице, источник ВИП-16к-5.5 обеспечивает питание подогревателя катода (накал катода), питание управляющего электрода и питание встроенного в клистрон электроразрядного насоса.

Источник ВИП-16к-5.5 оснащен комплексом внутренних блокировок – защит, определяющих аварийное состояние самого ВИП.

Также, источник ВИП-16к-5.5 оснащен комплексом внешних блокировок – защит, определяющих аварийное состояние нагрузки, срабатывание которых приводит к определенному алгоритму их отработки системой управления ВИП-16к-5.5:

1) Защита по току катода (току луча). Порог защиты – регулируемый в пределах  $4 \div 6$  А. Срабатывание защиты приводит к отключению источника питания катода (ИПК) и сетевого выпрямителя (СВ), опусканию штанги короткозамыкателя.

2) Защита по току резонатора. Уровень тока резонатора определяется как разница токов катода и коллектора (датчики ДТ2 и ДТ3 на рис. 4). Порог защиты – регулируемый в пределах  $1 \div 1,5$  А. Срабатывание защиты приводит к отключению ИПК и СВ, опусканию штанги короткозамыкателя.

3) Защита по току электроразрядного насоса имеет два порога:

- порог защиты 0,1мА. Срабатывание защиты приводит к отключению только ИПК и СВ, опусканию штанги короткозамыкателя;

- порог защиты 5мА. Срабатывание защиты приводит к отключению всего ВИП.

4) Защита по входу внешней блокировки. Срабатывание защиты приводит к отключению ИПК и СВ, опусканию штанги короткозамыкателя.

## 6. Методика измерения СВЧ мощности.

В настоящей работе требуется измерить амплитудную характеристику клистрона (зависимость выходной мощности клистрона от входной на рабочей частоте 2450 МГц) и амплитудно-частотную характеристику клистрона (зависимость выходной мощности клистрона от частоты в диапазоне частот  $2450 \pm 10$  МГц).

Входная мощность клистрона изменяется в диапазоне 0 – 3 Вт. При измерении входной мощности к выходу СВЧ тракта низкого уровня мощности вместо входа клистрона присоединяется стандартный ваттметр поглощаемой мощности Я2М-66 с преобразователем измерительным калориметрическим, обеспечивающим измерение поглощенной мощности от 0 до 1 Вт. При превышении мощности сигнала величины 1 Вт на вход преобразователя ставятся фиксированные коаксиальные аттенюаторы 3 дБ и 6 дБ, обеспечивающие ослабление мощности СВЧ сигнала, поступающего на вход ваттметра, в 2 и 4 раза, соответственно. При калибровке СВЧ мощности, поступающей на вход клистрона, измеряется зависимость мощности (ваттметр Я2М-66) от величины ослабления регулируемого механического аттенюатора в тракте низкого уровня мощности с учетом приведенных выше коэффициентов 2 и 4.

Выходная мощность клистрона изменяется в диапазоне 0 – 50 кВт. Эта мощность поступает в согласованную нагрузку, представляющую собой цилиндрический или

прямоугольный волновод с внутренними каналами, по которым под давлением протекает дистиллированная вода, поглощающая СВЧ мощность, поступающую в нагрузку.

Измерение СВЧ мощности, поступающей в согласованную нагрузку, проводится калориметрическим методом. Широкое применение этого метода оправдано простотой превращения энергии электрического тока в теплоту. Используемая в настоящей работе нагрузка относится к группе проточных калориметров с переменной температурой. В проточных калориметрах содержится жидкость, играющая роль переносчика тепла от рабочего тела во внешнюю среду. При использовании для этих целей дистиллированной воды, в силу ее большой поглощающей способности на частотах свыше 500 МГц она выполняет роль объемного поглотителя СВЧ мощности и является рабочим телом калориметра. Структурная схема проточного калориметра показана на Рис. 5.

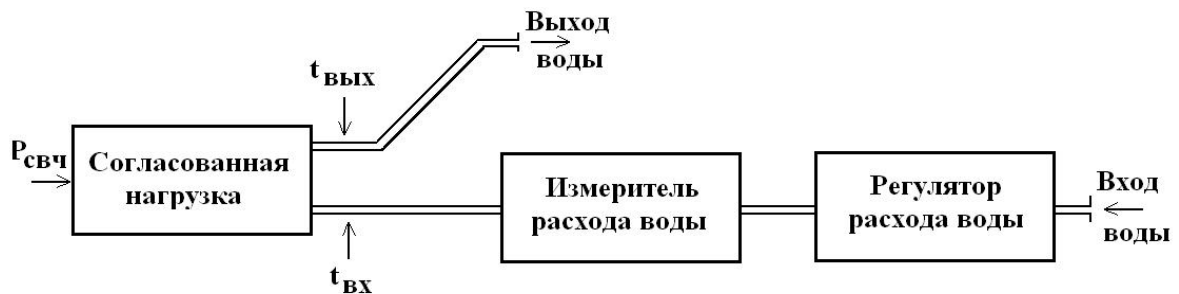


Рис. 5. Структурная схема проточного калориметра.

В проточных калориметрах процесс измерения СВЧ мощности сводится к измерению приращения температуры рабочего тела в установившемся режиме и расхода циркулирующей жидкости. Приращение температуры жидкости определяют с помощью термометров, термосопротивлений (как в нашем случае), а ее регулируемый расход – расходомером.

Если принять, что вся СВЧ мощность полностью расходуется на разогрев воды, а удельная теплоемкость воды и ее расход постоянны, то измеряемую мощность в установившемся режиме можно определить согласно выражению

$$P_{СВЧ} = c_{t^0 y \delta} \cdot q \cdot \rho \cdot \Delta t ,$$

где  $c_{t^0 y \delta}$  - удельная теплоемкость воды, Дж/кг,  $q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с,  $\rho$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>,  $\Delta t$  - разность температур воды на входе и выходе нагрузки, °С.

## 7. Контрольные вопросы.

1. Дать определение коэффициента усиления клистрона (в [дБ]).
2. Дать качественное объяснение принципа клистронной группировки на примере двухрезонаторного клистрона.

3. Перечислить источники питания, входящие в состав высоковольтного источника питания клистрона ВИП-16к-5.5.

4. Описать методику измерения мощности с использованием проточных калориметров с переменной температурой.

#### Литература.

1. И.В. Лебедев. Техника и приборы сверхвысоких частот, т. I, М.-Л., Госэнергоиздат, 1961.
2. И.В. Лебедев. Техника и приборы сверхвысоких частот, т. II. Электровакуумные приборы СВЧ, М., Высшая школа, 1972.
3. М.И. Билько, А.К. Томашевский, П.П. Шаров, Е.А. Баймуратов. Измерение мощности на СВЧ. М., Советское радио, 1976.