

Работа № 1

ГЕНЕРАЦИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЧ-ВОЛН В ВОЛНОВОДАХ

Цель работы: ознакомиться с принципом генерации СВЧ колебаний и устройствами для регулирования и измерения основных параметров электромагнитных волн в волноводах и свободном пространстве.

Оборудование: клистрон типа К-19, К-27 ($\lambda = 3\text{ см}$) с регулируемыми блоками питания типа Б5-32 (резонатор) и Б5-44 (накал), генератор пилообразного напряжения (напряжения отражателя), волноводный СВЧ тракт, включающий волномер типа Ч2-32, измерительную линию типа Р1-4 (ИВЛ-140), ферритовый вентиль, поляризационный аттенуатор типа Д5-5 (ДЗ-33А на раб. №2), согласованную нагрузку.

1. Введение

К диапазону СВЧ относятся электромагнитные излучения с частотами от 30 МГц до 1000 - 1500 ГГц (с длинами волн от 10 м до десятков микрометров). Он разбит на поддиапазоны: *метровые* волны 30 ... 300 МГц (10 ... 1 м), *дециметровые* – 300 ... 3000 МГц (1 м ... 10 см), *сантиметровые* 3000 ... 30000 МГц или 3 ... 30 ГГц (10 ... 1 см), *миллиметровые* 30 ... 300 ГГц (1 см ... 1 мм) и *субмиллиметровые* вплоть до инфракрасного излучения.

Данная работа посвящена изучению генерации и распространения СВЧ волн 3-х сантиметрового диапазона и основных характеристик устройств, применяемых для регулировки и измерения параметров этих волн в волноводах и свободном пространстве. Принцип действия и более подробная теория применяемых в работе устройств приведены в Методическом пособии к СВЧ практикуму. В теоретическом введении приведены лишь начальные сведения, необходимые для включения установки и получения экспериментальных данных.

1. 1. Описание установки

Установка (рис. 1) включает *генератор СВЧ* (отражательный клистрон 1 с регулируемыми блоками питания *отражателя* 2, *резонатора* 3 и *накала* 4) и *линию передачи* с измерительными устройствами и различными нагрузками.

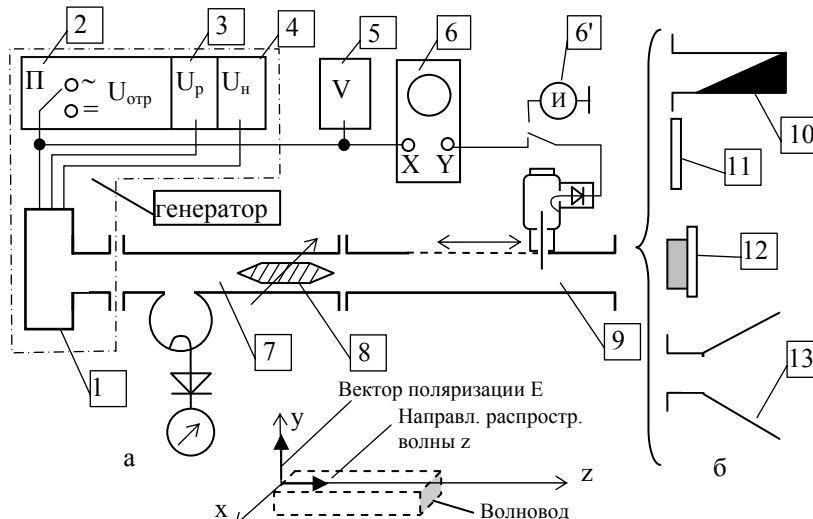


Рис. 1 Схема установки

а) *Измерительный тракт:* 1. Климстрон. 2. Блок питания отражателя. 3. Блок питания резонатора. 4. Блок питания накала. 5. Вольтметр. 6. Осциллограф. 6'. Микроамперметр. 7, 8. Частотометр с выходным аттенуатором. 9. Измерительная линия.

б) *Варианты нагрузок:* 10. Согласованная нагрузка. 11. Заглушка. 12. Заглушка с диэлектрической пластиной. 13. Излучающий рупор.

Блок питания отражателя может работать в двух переключаемых режимах: *постоянного* и *пилообразного* выходного напряжения.

Линия передачи, включает частотометр 7 с выходным аттенуатором 8 и измерительную линию 9. С детекторной головки измерительной линии сигнал подается на вход Y осциллографа, а на его вход X подается пилообразное напряжение отражателя клистрона. Это позволяет наблюдать на экране осциллографа зоны генерации клистрона при пилообразном напряжении отражателя. Если блок питания отражателя переведен с режима пилообразного в режим постоянного напряжения, то клистрон переходит в режим *непрерывной* генерации с постоянной выходной мощностью и частотой. Первый режим (пилообразного напряжения) применяется только для исследования зон генерации клистрона, второй – для всех остальных заданий.

К выходу линии передачи (измерительной линии) могут подключаться различные нагрузки (рис. 1,б).

1. 2. Ознакомительные представления об СВЧ поле, его генерации и распространении в волноводах

1. 2. 1. Отражательный клистрон

В работе используется СВЧ поле 3-х сантиметрового диапазона (длина волны около 3 см, частота около 10^{10} Гц). Поле генерируется отражательным клистроном (Приложение 1. п. 1.1.1.). Суть работы клистрона заключается в следующем. Непрерывный поток электронов, эмитируемых катодом, ускоряется постоянным напряжением U_p в направлении к тороидальному пустотелому резонатору со сквозным осевым отверстием, с обеих сторон затянутому сетками (рис. 2).

В резонаторе возникает высокочастотное электромагнитное поле, частота которого определяется резонансной частотой резонатора. В сечении отверстия резонатора электрическая составляющая СВЧ поля направлена вдоль оси катод–отражатель. Поэтому электроны пучка, влетающие в пространство за резонатор, оказываются модулированными по скорости в зависимости от того, в какой фазе СВЧ поля они пролетали через резонатор. Таким образом, в резонаторе электроны подвергаются *фазовой группировке* по скоростям. За резонатором электроны попадают в тормозящее поле отражателя, "заставляющее" их возвращаться обратно к резонатору. Расстояние, на которое электроны проникнут в пространство резонатор – отражатель, а, следовательно, и время, которое они "пробудут" в этом пространстве, зависит от

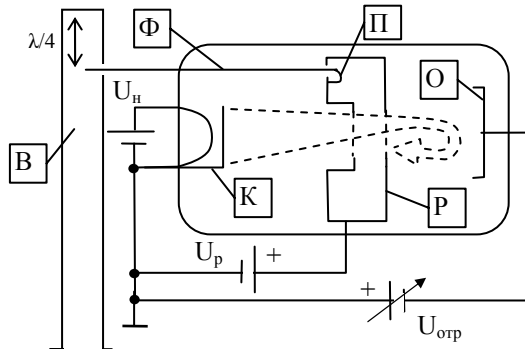


Рис. 2. Схема включения отражательного клистрона

К – катод, О – отражатель, Р – резонатор, П – петля связи, Ф – фидер, В – волновод, U_n , U_p , $U_{отр}$ – напряжения накала, резонатора и отражателя соответственно.

начальной скорости их влета, определяемой суммой постоянного напряжения U_p и переменной составляющей СВЧ поля резонатора, добавившейся во время пролета резонатора. Поэтому обратно к резонатору электроны возвращаются уже не в виде непрерывного потока, а в виде пространственно разделенных "групп", соответствующих фазовой группировке по скоростям. Таким образом в пространстве резонатор – отражатель *фазовая* группировка электронов превращается в *пространственную*. Если выполняется дополнительное условие на напряжение отражателя $U_{отр}$ такое, что возвращающиеся группы электронов попадают в фазу с СВЧ колебаниями резонатора, то они "подкачивают" энергию СВЧ колебаний и делают их незатухающими. Энергия этих колебаний отводится из резонатора в волновод с помощью петли связи П и фидера Ф.

Если на отражатель подано пилообразное напряжение, то СВЧ генерация будет происходить только при тех "отрезках" пилообразно нарастающего напряжения, которые удовлетворяют условию пространственной группировки. В результате непрерывная генерация превратится в импульсную, при которой генерация происходит только в пределах так называемых зон генерации. В первом упражнении задания предлагается исследовать эти зоны и их характеристики. Более подробно об этом говорится в Методическом пособии к работе п. 1.1.1.

1. 2. 2. СВЧ поле в волноводах и свободном пространстве

В работах практикума используются прямоугольные волноводы, возбуждаемые на основной моде колебания (Приложение 1 п. 1.2.2). Это означает, что поле в волноводе обладает следующими свойствами.

- Поле *линейно поляризовано* и вектор его электрической составляющей E направлен перпендикулярно широкой стенке.
- Длина волны поля в волноводе такова, что на расстоянии широкой стенки волновода a укладывается примерно половина длины волны: $\lambda_g = 2a$.
- Величина E максимальна в середине широкой стенки и убывает до нуля на краях волновода (на узких стенках), что диктуется граничными условиями для напряженности электрического поля на проводящих стенках.
- Поле, излученное из волновода (из открытого конца или из присоединенного к нему рупора), остается линейно поляризованным с тем же направлением вектора поляризации.
- Длина волны в свободном пространстве λ_0 связана с длиной волны в волноводе соотношением

$$\lambda_g = \lambda_0 / \left[1 - (\lambda_0 / 2a)^2 \right]^{1/2}. \quad (1)$$

2. Задания

2. 1. Изучение работы отражательного клистрона

Задание 1. Ознакомьтесь с принципом работы отражательного клистрона, частотомера и измерительной линии в Приложении 1, п.п. 1. 1. 1, 1. 3. 3, 1. 3. 4.

1. Включите блок питания *накала* и *отражателя* клистрона и **примерно через 1 мин. (!)** блок питания *резонатора*. Переключите питание отражателя в режим пилообразного напряжения и отрегулируйте его амплитуду таким образом, чтобы на экране осциллографа наблюдались зоны генерации (рис. 2).

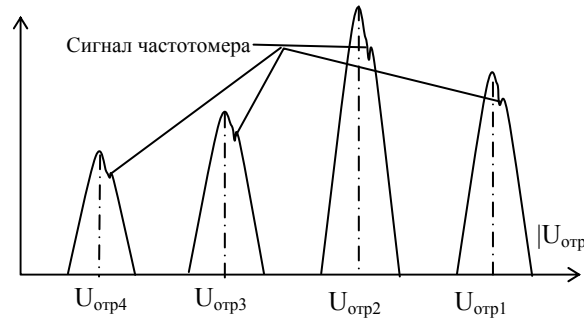


Рис. 2. Сигнал частотомера на зонах генерации

Примечание. 1). Включите осциллограф в режим развертки внешним сигналом. 2). Переключите частотомер в режим НГ (непрерывная генерация) и отключите тумблер "сеть". В этом режиме сигнал с детектора частотомера подается непосредственно на его стрелочный прибор. Ручку "чувствительность" частотомера поверните по часовой стрелке до упора. Аттенюатор частотомера выведите в крайнее положение против часовой стрелки (полное прохождение мощности излучения в линию).

2. Подстройте измерительную линию (если есть необходимость):

- Установите каретку линии в положение, соответствующее максимальной по величине картине зон генерации.
- Регулируя ручки настройки измерительной головки линии (см. рис. 12 Приложения 1), получите максимальный симметричный сигнал зон.
- Введите частично аттенюатор частотомера, что уменьшит наблюдаемый сигнал, но обеспечит развязку генератора от влияния зонда линии и отражений от различных нагрузок при выполнении последующих упражнений.

3. Измерьте величины напряжений отражателя $U_{отр,i}$, соответствующие максимумам мощности генерации в каждой зоне (рис. 2).

Примечания: 1). Измерения $U_{отр,i}$ можно осуществить либо по показаниям осциллографа, либо с помощью вольтметра V . В последнем случае нужно переключить блок питания отражателя в режим постоянного напряжения и "пройти" зоны генерации ручной регулировкой напряжения отражателя. 2). Кривые зон генерации должны быть симметричны. Их асимметрия может быть обусловлена либо тем, что резонансная настройка зонда и детектора измерительной линии не совпадает с частотой середины зоны генерации, либо слишком большим отраженным сигналом, влияющим на режим работы клистрона. 3). Для уменьшения влияния линии на работу генератора глубина погружения зонда линии, как правило, не должна быть максимальной, а аттенюатор частотомера не должен быть полностью выведен.

4. В режиме наблюдения зон генерации вращением ручки частоты частотомера добейтесь, чтобы на осциллограмме зон генерации появился "провал" (рис. 2). Он объясняется небольшим поглощением мощности СВЧ поля резонатором частотомера. Вращением ручки настройки частоты частотомера "прогоните" сигнал частотомера по всей зоне и определите диапазон изменения частоты в пределах зоны генерации клистрона. Убедитесь, что диапазон частот излучения примерно одинаков для всех зон, а максимумы излучения зон приходятся на одну и ту же частоту генерации.

Внимание: в данном режиме (при наличии пилообразного напряжения на отражателе) генерация СВЧ поля имеет импульсный характер, а его частота изменяется в пределах каждого импульса (зоны)! Поэтому для дальнейшей работы нужно отключить режим пилообразной развертки.

5. Переключите блок питания отражателя в режим выхода по постоянному току и, изменяя величину $U_{отр}$, настройтесь на зону максимальной мощности генерации (зона 2 на рис. 2). Дальнейшие упражнения будут выполняться в режиме непрерывной генерации клистрона на одной частоте. Поэтому отрегулируйте постоянное напряжение отражателя таким образом, чтобы оно соответствовало максимальной мощности излучения в наибольшей зоне генерации, и больше не изменяйте его. "Сбейте" настройку частотомера таким образом, чтобы он не фиксировал частоту генерации в этом режиме и не влиял на сигнал в линии.

2. 2. Градуировка детектора измерительной линии

Для измерений параметров СВЧ поля в волноводах и свободном пространстве используются различные приемники (зонды, антенны), нагрузкой которых являются СВЧ диоды (детекторы)¹. Выпрямлен-

¹ Описание конструкций и эквивалентную схему детекторных СВЧ диодов см. в Приложении 1, п. 1. 4. 4.

ный СВЧ диодом ток поступает на измерительный прибор. При малых мощностях излучения показания измерительного прибора A , подключенного к диоду, примерно пропорциональны квадрату напряжения на диоде U_d (в силу квадратичности вольтамперной характеристики последнего). В свою очередь, напряжение на диоде прямо пропорционально напряженности поля E в той точке пространства, в которую помещен диод (или зонд измерительной линии, с которого сигнал поступает на диод).

Однако при точных измерениях необходимо учитывать отклонение ВАХ диода от квадратичного закона. В этом случае для перевода показаний прибора, на который нагружен диод, в напряженность поля необходимо иметь *градуировочную кривую*, т. е. зависимость показаний A измерительного прибора от напряжения на нем U_d .

Для построения градуировочной кривой используют измерительную линию. В линии с *металлической заглушкой на конце* формируется стоячая волна с известной зависимостью напряженности поля вдоль оси z :

$$E(z) = 2E_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right), \quad (2)$$

где E_0 – амплитуда напряженности падающей и отраженной волны, λ – длина волны в волноводе, z – координата вдоль направления распространения падающей волны в волноводе.

Таким образом, при точно квадратичной ВАХ диода зависимость показаний прибора от расстояния вдоль оси z должна иметь вид

$$A(z)_{\text{теор}} = B \sin^2 \frac{2\pi}{\lambda} z. \quad (3)$$

где $B = \text{const}$ – переводной множитель от E к показаниям прибора A , зависящий от диода, настройки зонда и параметров измерительного прибора.

Для построения градуировочной кривой строят теоретическую зависимость (2) и на нее наносят точки экспериментальной зависимости (рис. 3).

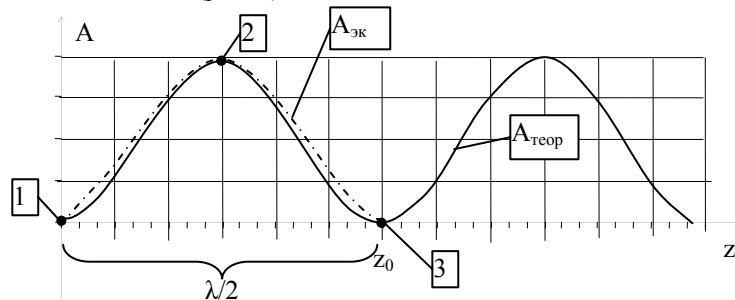


Рис. 3. "Привязка" экспериментальной зависимости $A_{\text{эк}} = A_{\text{max}} \sin^2 x$ к теоретической $A_{\text{теор}} = B \sin^2 x$.
1, 2, 3 – точки привязки кривых

Для практического построения градуировочной кривой обычно используют "линеаризацию" графиков, как указано ниже в задании 2.

Задание 2. Построить градуировочную кривую детектора измерительной линии.

1. Поставьте заглушку на конце измерительной линии, и по зависимости показаний прибора от расстояния вдоль линии определите положения узлов и пучностей поля на ней. По результатам измерений определите длину волны в волноводе λ как среднее по всем периодам стоячей волны.

Примечание. 1). Измерение положения узлов и пучностей снимите при прохождении вдоль всей линии в обе стороны. Для использования данных в других заданиях, запишите точное положение крайнего (ближнего к заглушке) узла стоячей волны. 2). В качестве индикатора измерительной линии используйте осциллограф со стандартной нагрузкой $R_{\text{вх}} = 60 \text{ Ом}$.

2. Установите зонд в точке левого минимума стоячей волны $z = z_0$ для того периода стоячей волны, который наиболее точно совпадает со средним значением λ , полученным в предыдущем пункте. Снимите зависимость показаний прибора детектора $A(z)$, изменяя z от z_0 до $(z_0 + \lambda/2)$ вдоль выбранного периода (рис. 3).

Примечание. 1). Зависимость снимите не менее чем по 10 – 12 точкам. Точка, соответствующая положению пучности стоячей волны A_{max} , должна входить обязательно. 2). Экспериментальная кривая должна быть точно "привязана" к теоретической по двум параметрам: $\lambda_{\text{эк}} = \lambda_{\text{теор}}$ и $A_{\text{max эк}} = B$.



Рис. 4. Градуировочный график детектора

3. Для проверки степени влияния входных параметров измерительной цепи на квадратичность характеристики диода уберите со входа осциллографа согласованную нагрузку $R = 60 \text{ Ом}$ и еще раз снимите зависимость $A(z)$.

Примечание. Эту зависимость можно снять по 5 – 6 точкам, одна из которых совпадает с пучностью.

Постройте линеаризованный график теоретической кривой $y = A_{\text{max}} \cdot \xi$, где $\xi = \sin^2(2\pi z/\lambda)$. Нанесите на этот график экспериментальные точки $A(z)$. Примерный вид графика показан на рис. 4.

4. Проверьте квадратичность характеристики диода, нагруженного на высокое (1 Мом) и низкое (60 Ом) сопротивление измерительного прибора

2. 3. Измерение КСВН и полного сопротивления различных нагрузок линии

Если сопротивление линии передачи всюду одинаково, то в ней распространяется чисто бегущая волна. Любое нарушение этого условия приводит к частичному отражению бегущей волны и образованию стоячей волны в линии. Величина отражения определяется отношением величины нагрузки Z_n к волновому сопротивлению линии передачи ρ (см. п. 1. 3. 3. Приложения 1).

В общем случае Z_n является комплексной величиной. Ее модуль характеризуется величиной КСВ - коэффициентом стоячей волны, а фаза определяет сдвиг положения узлов и пучностей стоячей волны относительно тех, какие они занимают в случае закороченной линии, т. е. при $Z = 0$. (При этом закоротка – заглушка – должна быть установлена в том же месте на линии передачи, в котором подключается исследуемая нагрузка). При измерениях вместо КСВ используют параметр КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению

$$\text{КСВН} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \cong \sqrt{\frac{A_{\max}}{A_{\min}}}, \quad (4)$$

где A_{\max} , A_{\min} – показания прибора линии в пучности и узле стоячей волны.

В частном случае закороченной линии (волновод с металлической заглушкой) в линии должна образовываться чисто стоячая волна. При этом теоретически (при идеально проводящем материале заглушки) $A_{\min} = 0$, а $\text{КСВН} = \infty$.

Задание 3. Определите КСВН линии, нагруженной на металлическую заглушку.

Примечание. Поскольку в этом случае сигнал в узле очень мал даже при максимальной чувствительности измерителя И, то погрешность определения КСВН по формуле (3) будет весьма велика. Поэтому определение КСВН закороченной линии рекомендуется провести по методике, изложенной в п. 1. 3. 3. 4. и формуле (12) Приложения 1.

Задание 4. Измерьте длину волны в свободном пространстве, используя заглушку, отнесенную от открытого торца линии, и сравните ее с длиной волны в волноводе (проверка формулы 1).

Задание 5. Определите КСВН согласованной нагрузки (Приложение 1. п. 1. 3. 5). Поставьте на конец линии согласованную нагрузку и определите ее КСВН, обусловленный неидеальностью поглощения мощности в согласованной нагрузке.