

Лабораторная работа 3.7.2  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В  
ВОЛНОВОДАХ

Аксенова Светлана

22 сентября 2020 г.

**Цель работы:** знакомство с методами получения и анализа электромагнитных волн СВЧ-диапазона.

**В работе используются:** генератор сигналов сверхвысокой частоты, измерительная линия, усилитель, загрузка, отрезок волновода с поглощающей нагрузкой, отрезки волноводов различных сечений, детекторная головка.

## 1 Теоретическое введение

Передача энергии электромагнитных колебаний низкой частоты (50 Гц) происходит по проводам. На более высоких частотах (до 300 МГц) используются двухпроводные линии и коаксиальные кабели. Но на ещё более высоких частотах (до 300 ГГц) при колебании с длинами волн (в вакууме) от 1 м до 1 мм (*диапазон сверхвысоких частот* или, сокращённо, СВЧ) такая передача энергии становится малоэффективной из-за больших потерь: резко возрастает сопротивление проводов из-за *скин-эффекта* - вытеснения тока на поверхность, а в двухпроводной линии, кроме того, потери растут вследствие излучения энергии в окружающее пространство.

В СВЧ-диапазоне энергия передаётся с помощью металлических труб, называемых волноводами. Электромагнитные волны могут распространяться по металлическим трубам любого профиля, но из технологических соображений сечения волноводов делаются либо круглыми, либо прямоугольными.

Если длина волны становится больше некоторого *критического* значения  $\lambda_{cr}$ , а циклическая частота, соответственно, меньше критического значения  $\omega_{cr}$ , то электромагнитная волна не может распространяться вдоль волновода - при попадании в него она быстро (экспоненциально) затухает.

Если в волноводе имеется препятствие или нерегулярность, распространяющаяся по оси  $z$  волна частично или полностью отражается от него. При сложении отражённой и падающей волн образуется *стоячая волна* с узлами и пучностями. Расстояние между узлами  $\Delta z_m$  (или между пучностями) соответствует половине длины волны:

$$\Delta z_m = \frac{\pi}{k_z} = \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Измерив это расстояние, можно рассчитать фазовую скорость СВЧ-сигнала

$$v_f = \frac{\omega}{k_z} = c \sqrt{\frac{k_x^2}{k_z^2} + 1} = \frac{c}{\sqrt{1 - \omega_{cr}^2/\omega^2}}, \quad (2)$$

где  $\omega_{cr} = \pi c/a$  - критическая частота волны. Длина волны в волноводе

$$\lambda_w = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_{cr}^2}}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме,  $a$  - размер сечения волновода.

Пусть отражённая волна имеет амплитуду  $rE_0$ , где  $E_0$  - амплитуда падающей волны,  $r$  - коэффициент отражения по амплитуде. Отражённая и падающая

волна интерферируют и образуют в волноводе *стоячую волну* вдоль оси волновода  $z$ . Максимальное (в пучности) и минимальное (в узле) значения амплитуды поля равны, соответственно

$$E_{max} = E_0(1 + r), E_{min} = E_0(1 - r) \quad (4)$$

Отношение  $K = E_{max}/E_{min}$  называется *коэффициентом стоячей волны* (к.с.в.). Он связан с коэффициентом отражения от препятствий по амплитуде соотношением

$$r = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} = \frac{K - 1}{K + 1}. \quad (5)$$

В случае полного отражения (металлическая загрузка)  $r = 1$  и  $K \rightarrow \infty$ . Если же на входе торца вставлено вещество, полностью поглощающее СВЧ-излучение (*согласованная нагрузка*), то  $r = 0$  и  $K = 1$ .

## 2 Волны в волноводе при частоте выше критической

**Экспериментальная установка.** Схема для исследования структуры волн в волноводе при частоте выше критической представлена на [Рисунке 1](#). Моду-

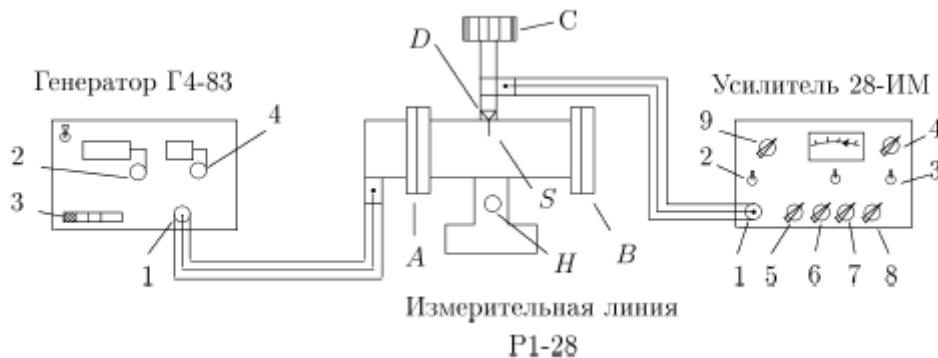


Рисунок 1 – Схема для исследования структуры волн СВЧ

лированный сигнал от высокочастотного генератора поступает на вход А измерительной линии (отрезок волновода с продольной щелью длиной в несколько полуволн), вдоль которой перемещается зонд S (металлический штырь в щели, реагирующий на электрическое поле в волноводе). Высокочастотный сигнал с зонда поступает на кристаллический детектор D. С нагрузки детектора снимается огибающая высокочастотного сигнала и подается на усилитель низкой частоты. Величина сигнала регистрируется вольтметром V (встроен в усилитель). Перед началом работы нужно провести калибровку приборов по техническому описанию и удостовериться, что рабочая частота выше рассчитанной критической. Параметры установки указаны в [Таблице 1](#).

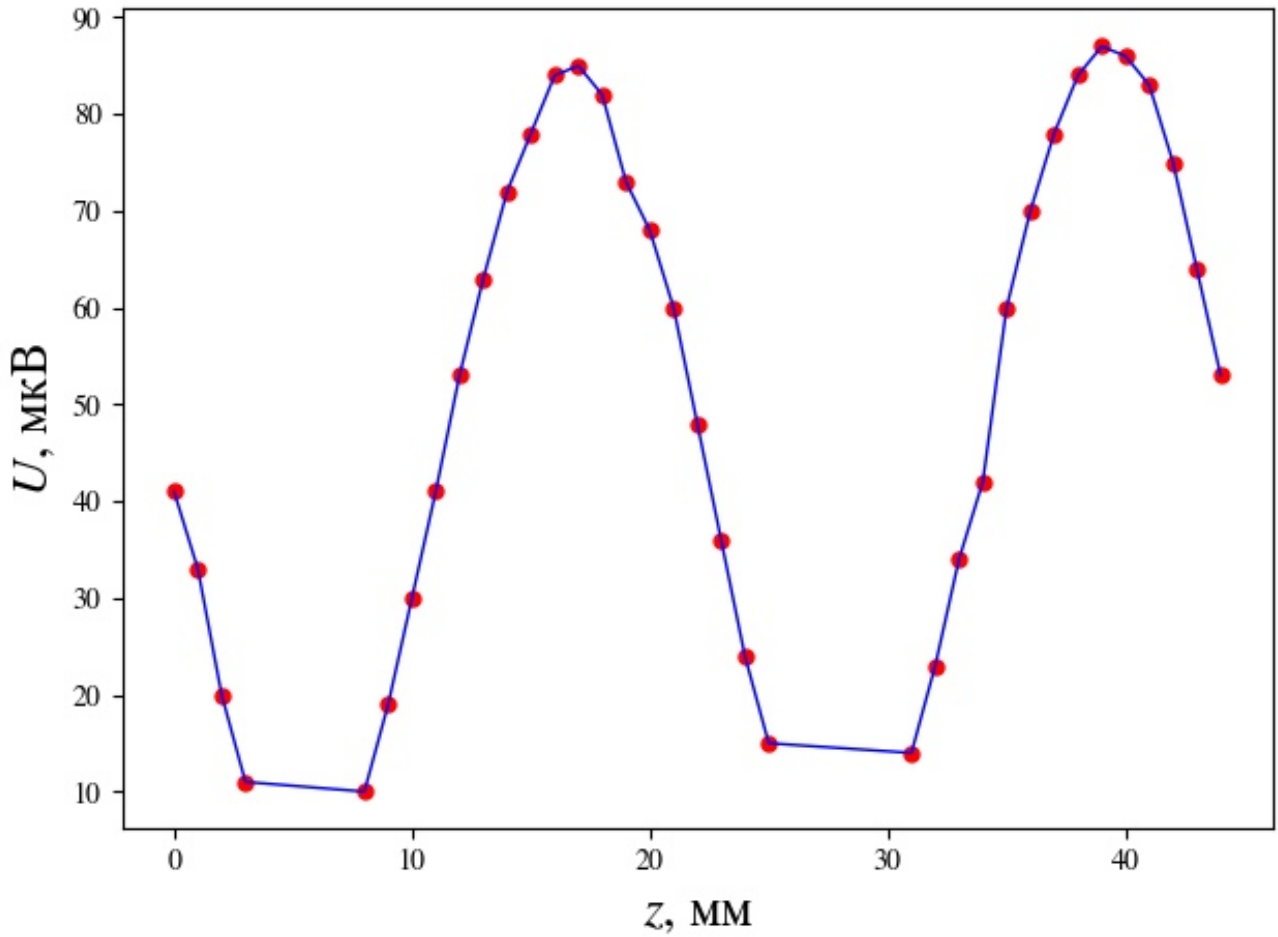


Рисунок 2 – График зависимости  $U(z)$

$a$	23 мм
$\nu_0$	9320 МГц
$\nu_r$	6520 МГц
$\lambda_{cr}$	46 мм

Таблица 1 – Параметры установки для исследования структуры волн при частоте выше критической

## 2.1 Определение длины СВЧ-сигнала в волноводе

Была снята зависимость напряжения  $U$  от положения зонда  $z$  (Рисунок 2). Вольтметр не измеряет напряжение меньше 10 мкВ, поэтому внизу график не заострён. Из графика была определена длина волны  $\lambda_w$

$$\lambda_w = 44 \pm 1 \text{ мм.}$$

По формуле (3) была посчитана теоретическая длина волны, она равна 45 мм. Небольшое отличие, которое укладывается в погрешность, говорит о том, что измерения проводились точно.

По формуле (2) была рассчитана фазовая скорость волн в волноводе. Она

больше, чем скорость света в вакууме

$$u_f = (4,20 \pm 0,18) \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

## 2.2 Определение коэффициентов отражения

Были измерены максимальное и минимальное напряжение без металлической загрузки с фланца измерительной линии и с волноводом с поглощающей нагрузкой. Данные представлены в [Таблице 2](#).

Без загрузки	Значение
$U_{min}$	10 мкВ
$U_{max}$	25 мкВ
С загрузкой	Значение
$U_{min}$	10 мкВ
$U_{max}$	25 мкВ

Таблица 2 – Измерение максимального и минимального напряжений

Устройство детекторной головки, установленный на измерительной линии, таково, что отклик вольтметра  $U$  на величину напряжённости электрического поля  $E$  в волноводе является степенной функцией:  $U \propto E^n$ . Показатель степени  $n$  зависит от величины сигнала: при малых сигналах детектирование *квадратичное* ( $n=2$ ). По данным из таблицы посчитаем коэффициенты отражения для двух случаев. Если снять металлическую загрузку, то

$$r = 0,22 \pm 0,01.$$

Для волновода с поглощающей нагрузкой

$$r = 0,0627 \pm 0,0028.$$

Полученный результаты согласуются с теорией, т.к. для волновода с поглощающей нагрузкой  $r = 0$ .

## 3 Исследование затухания волн при частоте ниже критической

**Экспериментальная установка** представлена на [Рисунке 3](#). У этой установки есть только одно отличие от предыдущей. Дополнительный набор начинается и заканчивается волноводами переменного сечения I и II. Между ними можно разместить 1, 2 или 3 одинаковых отрезка с постоянным сечением. В такой системе волны с частотами меньше критической экспоненциально затухают. Параметры установки представлены в [Таблице 3](#).

Амплитуда сигнала на выходе из волновода  $E$  убывает с пройденным расстоянием  $z$  как  $E = E_0 \exp(-\alpha z)$ , где  $E_0$  - амплитуда входного сигнала. Для мощности, пропорциональной квадрату амплитуды, имеем  $W = W_0 \exp(-2\alpha z)$

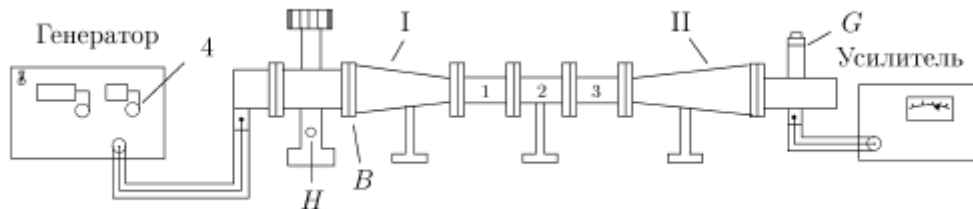


Рисунок 3 – Схема для исследования затуханий

или  $W = W_0 10^{-\beta z}$ , где  $\alpha = \beta \ln 10 / 2 \approx 1,15\beta$ . Ослабление интенсивности сигнала  $\gamma = \beta z$  принято измерять в *децибелах* (дБ):

$$\gamma = 10 \lg \frac{W_0}{W} \quad (6)$$

Величину  $\alpha z = \ln \frac{E_0}{E}$  также иногда измеряется в *неперах* (Нп): ослабление на 1 Нп соответствует уменьшению амплитуды в  $e$  раз.

Если при уменьшении количества вставок волновода поддерживать интенсивность выходного сигнала постоянной, то входной сигнал следует ослабить. Ослабление  $\beta z$  зависит от длины волновода  $z$  и измеряется по шкале генератора в децибелах. Таким образом, была измерена зависимость  $\gamma(z)$ , графический вид которой представлен на [Рисунке 4](#).

По методу наименьших квадратов был рассчитан коэффициент наклона графика

$$\beta = -1,42 \pm 0,17 \text{ дБ/см}$$

Волновод I	14,6 см
Волновод II	14,7 см
Волновод 1	5,7 см
Волновод 2	4 см
Волновод 3	5 см
Полная длина	44 см
Рабочая частота	9320 МГц
Размер стенки волновода-вставки	16 мм

Таблица 3 – Параметры установки 2

Его можно сравнить с коэффициентом  $\alpha$ , рассчитанным теоретически по формуле (7) и использовать связь  $\alpha$  и  $\beta$ .

$$\alpha = \frac{1}{c} \sqrt{\omega_{cr}^2 + \omega^2} = \frac{\pi}{a} \sqrt{1 - \frac{\lambda_{cr}^2}{\lambda_0^2}} \quad (7)$$

Тогда по теоретическому расчёту

$$\beta_{th} = 1,85 \pm 0,12 \text{ дБ/см}$$

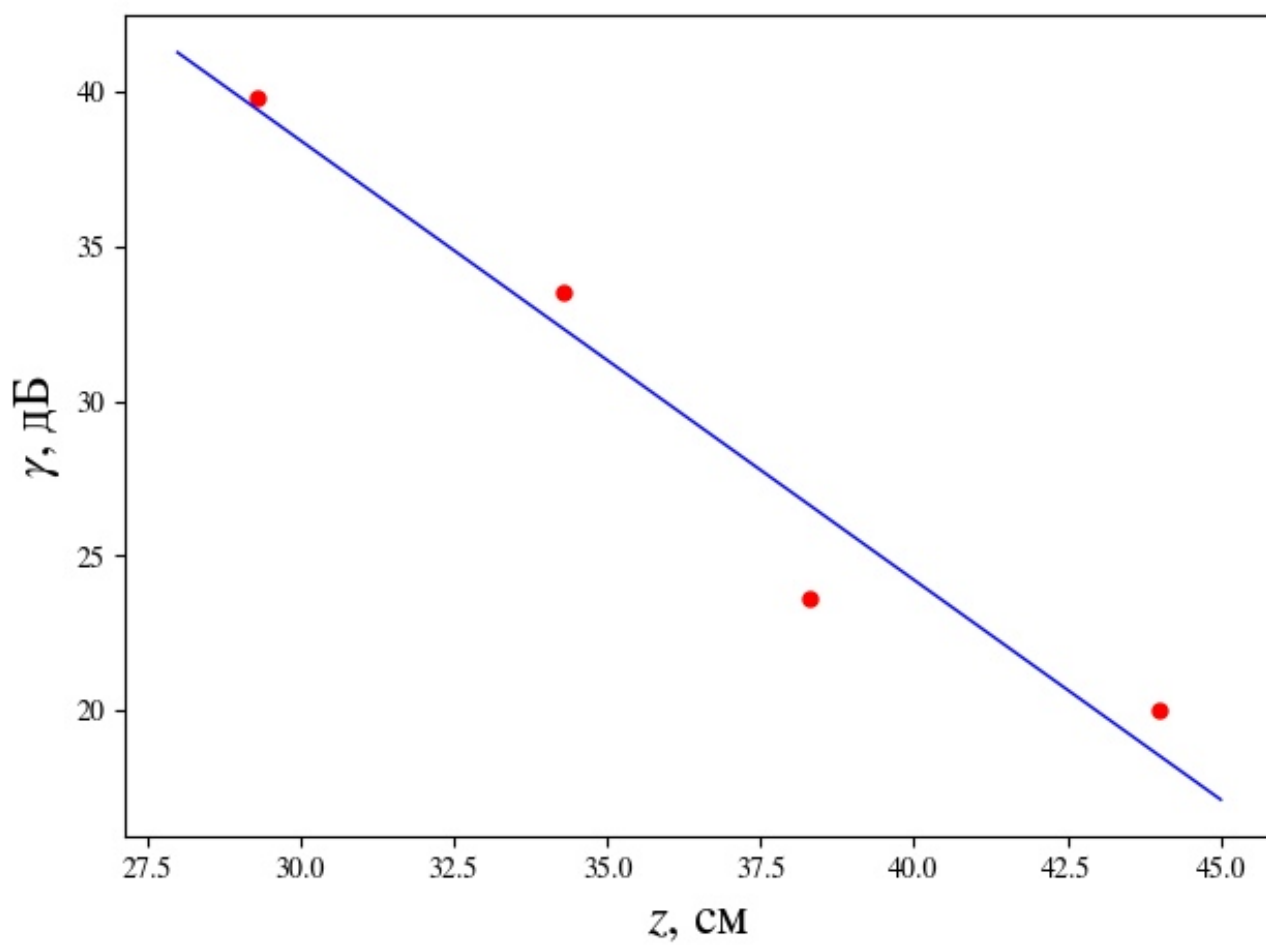


Рисунок 4 – Зависимость  $\gamma(z)$

## 4 Вывод

Были изучены методы анализа и получения СВЧ-сигналов при частоте ниже критической и выше критической. Длина волны, полученная экспериментально в 1 части исследования, отличается от теоретически посчитанной всего лишь на 2 %. Также была рассчитана фазовая скорость длины волны в волноводе. При исследовании затухания волн при частоте ниже критической отклонения был рассчитан коэффициент  $\beta$ , который не очень сильно отличается от рассчитанной.



## 5 Литература

1. Лабораторный практикум по общей физике: Учебное пособие в трех томах. Т. 2. Электричество и магнетизм. 2-е изд., перераб и дополн. / Никулин М.Г., Попов П.В, Нозик А.А. и др.; Под ред. А.В. Максимычева, М.Г. Никулина. – М.: МФТИ, 2019. – 370 с.

## 6 Приложение

[Ссылка на данные и их обработку](#)