

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное**

**учреждение высшего образования**

**«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций**

**им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»**

---

Дисциплина «Техническая электродинамика»

**Лабораторная работа № 5**

Исследование нерегулярных элементов в прямоугольном волноводе

Выполнили:  
ст. гр. ИКТЗ-83  
Миколаени М. С.  
Громов А. А.

Проверил:  
Гуреев А. Е.

---

Санкт-Петербург  
2020

### Цель работы:

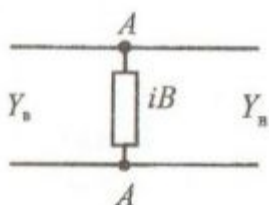
1. Экспериментальное исследование в прямоугольном одноволновом волноводе различных нерегулярных элементов: индуктивной, емкостной и резонансной диафрагм, индуктивного штыря.
2. Расчет на ЭВМ теоретических зависимостей от частоты коэффициента стоячей волны (КСВ) исследуемых нерегулярных элементов.
3. Сопоставление результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов.

### Теоретическая часть:

1. В прямоугольном одноволновом волноводе на нерегулярном элементе возникает сложное электромагнитное поле, состоящее в общем случае из трех бегущих волн основного типа  $H_{10}$  (падающей от генератора, отраженной нерегулярным элементом и прошедшей через нерегулярный элемент) и бесконечного множества местных затухающих полей высших типов. С практической точки зрения основной интерес представляет учет влияния нерегулярного элемента на распространение по волноводу рабочей волны основного типа  $H_{10}$ . В такой постановке задачи можно заменить волновод с волной  $H_{10}$  эквивалентной ему длинной линией, в которой распространяются волны условных напряжения и тока, а нерегулярный элемент заменить его эквивалентной схемой (схемой замещения), состоящей из сосредоточенных реактивных и активных элементов и включенной в эквивалентную длинную линию.

Представление реального волноводного тракта эквивалентной схемой в виде длинной линии с включенными в эту линию схемами замещения отдельных нерегулярных элементов позволяет с помощью сравнительно простых методов теории линейных электрических цепей рассчитать прохождение волны рабочего типа  $H_{10}$  по всему тракту и носит название метода эквивалентных схем. При этом, в частности, коэффициент отражения по напряженности электрического поля волны  $H_{10}$  от нерегулярного элемента оказывается равным коэффициенту отражения по условному напряжению от схемы замещения этого элемента, включенной в эквивалентную длинную линию.

Эквивалентная схема является только одним из способов представления уже готового решения волноводной задачи, полученного



другим методом (теоретическим или экспериментальным).

2. Все исследуемые в работе нерегулярные элементы (индуктивная, емкостная и резонансная диафрагмы, индуктивный штырь) имеют однотипную эквивалентную схему. Она изображена на рис. 5.1 и представляет собой реактивную проводимость  $iB$ , которая включена параллельно в длинную линию, эквивалентную волноводу с волной  $H_{10}$  и имеющую волновую проводимость  $Y_B$ . Эту проводимость можно считать равной характеристической проводимости  $Y_C$  бегущей волны  $H_{10}$ . Согласно приведенной схеме в сечении AA, в котором расположена диафрагма или штырь, подключена параллельно линии результирующая проводимость  $\underline{Y}_{AA} = Y_B + i\hat{B}$ , нормированное значение которой

$$\hat{\underline{Y}}_{AA} = \underline{Y}_{AA} / Y_B = 1 + i\hat{B}.$$

Выразив согласно теории длинных линий коэффициент отражения  $\underline{\rho}_{AA}$  через нормированную проводимость, получим

$$\underline{\rho}_{AA} = \frac{1 - \hat{\underline{Y}}_{AA}}{1 + \hat{\underline{Y}}_{AA}} = -\frac{i\hat{B}}{2 + i\hat{B}}.$$

Этому коэффициенту отражения соответствует коэффициент стоячей волны

$$K_{с.в} = \frac{1 + |\underline{\rho}_{AA}|}{1 - |\underline{\rho}_{AA}|} = \frac{\sqrt{4 + \hat{B}^2} + |\hat{B}|}{\sqrt{4 + \hat{B}^2} - |\hat{B}|}.$$

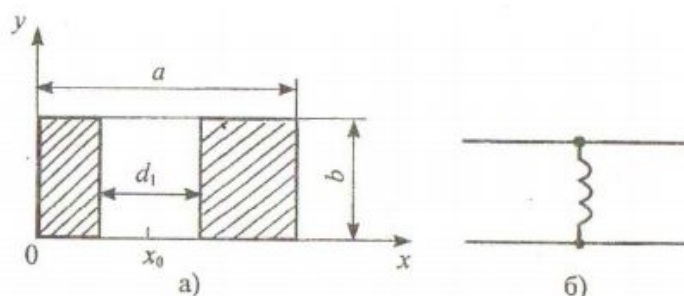


Рис. 5.2

3. Диафрагма в волноводе представляет собой тонкую поперечную металлическую перегородку с отверстием. На рис. 5.2, а указаны геометрические параметры диафрагмы, края которой параллельны узким стенкам

волновода ( $x_0$  — координата середины отверстия). Эквивалентная реактивность такой диафрагмы имеет для волны  $H_{10}$  индуктивный

характер (рис. 5.2,6), вследствие чего эту диафрагму называют индуктивной. Ее нормированная проводимость определяется приближенным выражением

$$\hat{B} = -\frac{\Lambda}{a} \left[ \left( \operatorname{cosec} \frac{\pi d_1}{2a} \operatorname{cosec} \frac{\pi x_0}{a} \right)^2 - 1 \right].$$

Здесь и далее  $\Lambda$  есть длина волны поля  $H_{10}$  в волноводе, которая выражается соотношением

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2}},$$

где  $\lambda = c/f$  — длина волны в безграничной среде, параметры которой  $\varepsilon_a$  и  $\mu_a$  совпадают с параметрами среды, заполняющей волновод (если волновод заполнен воздухом, то  $c = c_0 = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = 3 \cdot 10^8$  м/с).

В случае симметричной индуктивной диафрагмы  $x_0 = a/2$  имеем

$$\hat{B} = -\frac{\Lambda}{a} \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi d_1}{2a}.$$

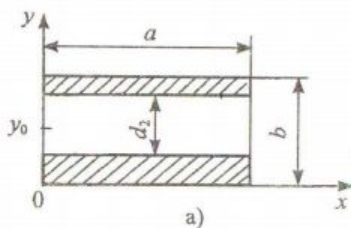
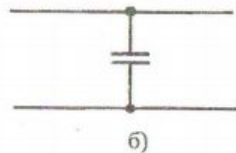


Рис. 5.3



На рис. 5.3,а указаны геометрические параметры диафрагмы, края которой параллельны широким стенкам волновода ( $y_0$  — координата середины отверстия). Эквивалентная

реактивность такой диафрагмы имеет для волны  $H_{10}$  емкостной характер (рис. 5.3,б), вследствие чего эту диафрагму называют емкостной. Ее нормированная проводимость определяется приближенным выражением

$$\hat{B} = \frac{4b}{\Lambda} \ln \left( \operatorname{cosec} \frac{\pi d_2}{2b} \operatorname{cosec} \frac{\pi y_0}{b} \right). \quad (5.7)$$

В случае симметричной емкостной диафрагмы  $y_0 = b/2$  и вместо (5.7) получаем

$$\hat{B} = \frac{4b}{\Lambda} \ln \left( \operatorname{cosec} \frac{\pi d_2}{2b} \right). \quad (5.8)$$

В работе исследуются симметричные диафрагмы.

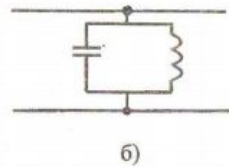
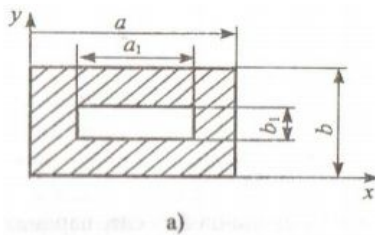


Рис. 5.4

- 5 На рис. 5.4,а изображена диафрагма, которую можно рассматривать как результат совмещения в одном и том же поперечном сечении волновода симметричных индуктивной и емкостной диафрагм. Для волны

Ну такая диафрагма имеет эквивалентную схему в виде параллельного колебательного контура (рис. 5.4,б). Если размеры  $a_1$  и  $b_1$  прямоугольного отверстия этой диафрагмы удовлетворяют соотношению

$$\frac{a_1}{b_1} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_1}\right)^2} \approx \frac{a}{b} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}, \quad (5.9)$$

то диафрагма становится резонансной, т. е. ее эквивалентная проводимость оказывается равной нулю. Волна  $H_{10}$  частоты  $f_p = c/\lambda$  (где  $\lambda$  — длина волны, фигурирующая в уравнении (5.9)) проходит через резонансную диафрагму без отражения, так как в этом случае волны, отраженные от эквивалентных индуктивности и емкости (рис. 5.4,б), имеют одинаковые амплитуды и противоположные фазы и компенсируют друг друга. Очевидно, что при заданных  $a$ ,  $b$  и  $\lambda$  одно уравнение (5.9) не может определить однозначно два размера  $a_1$  и  $b_1$  диафрагмы. Согласно (5.9) предельные случаи резонансной диафрагмы таковы:  $a_1 = a$ ,  $b_1 = b$  (диафрагма отсутствует) и  $a_1 \rightarrow \lambda/2$ ,  $b_1 \rightarrow 0$  (узкая полуволновая щель).

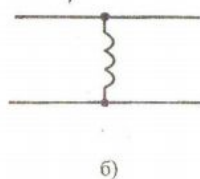
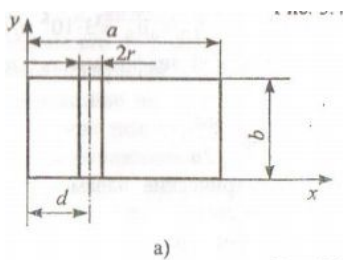


Рис. 5.5

6. На рис. 5.5, а указаны геометрические параметры штыря диаметром  $2r$ , соединяющего широкие стенки волновода. Эквивалентная реактивность такого штыря имеет для волны  $H_{10}$  индуктивный характер (рис. 5.5,б), вследствие чего этот штырь называют индуктивным. Его

нормированная проводимость при малом диаметре ( $r \ll a$ ) определяется приближенным выражением

$$\hat{B} = - \frac{2(\Lambda/a) \cdot \sin^2(\pi d/a)}{\ln\left(\frac{2a}{\pi r} \sin \frac{\pi d}{a}\right) - \sin^2 \frac{\pi d}{a} \left(2 + \frac{k^2 a^2}{\pi^2}\right) + k^2 d^2 \left(\frac{3}{2} + \frac{\pi^2 d^2}{36a^2} - \ln \frac{2\pi d}{a}\right)},$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ .

## I. Схемы

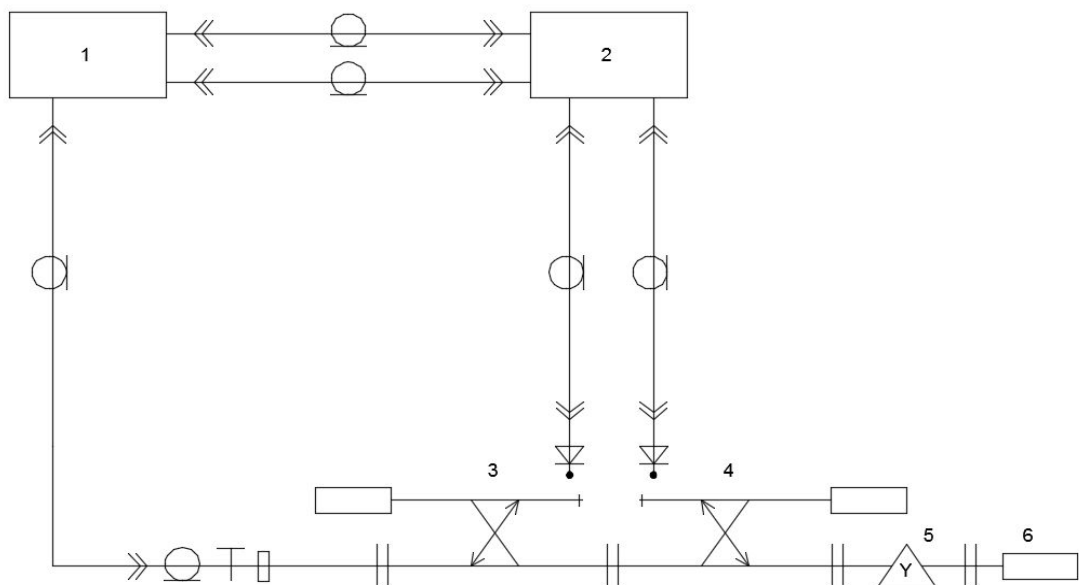


Рис 5.1 - Структурная схема лабораторной установки

В состав системы входят:

- 1) Генератор качающейся частоты.
- 2) Индикатор.
- 3) Направленное ответвление "падающая волна".
- 4) Направленное ответвление "отраженная волна".
- 5) Исследуемый нерегулярный элемент.
- 6) Поглощающая оконечная нагрузка.

## II. Результат работы.

### Формулы для расчётов к таблице 5.1

Коэффициент отражения:

$$K_{\text{св}} = \frac{\sqrt{4 + \widehat{B}^2 + |\widehat{B}|}}{\sqrt{4 + \widehat{B}^2 - |\widehat{B}|}}$$

Нормированная проводимость:

Для L:

$$\widehat{B} = -\frac{\Delta}{a} \operatorname{ctg} \frac{\pi d}{2a}$$

Для C:

$$\widehat{B} = \frac{4B}{\Lambda} \ln(\operatorname{cosec} \frac{\pi d}{2b})$$

Для штыря:

$$\widehat{B} = \frac{2(\frac{\Delta}{a}) \sin^2(\frac{\pi d}{a})}{\ln(\frac{2a}{\Lambda} \sin(\frac{\pi d}{a})) - \sin^2 \frac{\pi d}{a} (2 + \frac{K^2 d^2}{\pi^2}) + K^2 d^2 (\frac{3}{2} + \frac{d^2 d^2}{36a^2} - \ln \frac{2\pi d}{a})}$$

Таблица 5.1

Вид нерегулярного элемента, его геометрические параметры	$f$ , ГГц	9	9,5	10	10,5	11
L штырь $d = 11.5$ мм $r = 0.3$ мм	$K_{с.в}$ , расчет	1.54	1.402	1.306	1.234	1.180
	$K_{с.в}$ , эксп.	8	6.2	8.4	4.8	4.1
L диафрагма $d = 14.5$ мм	$K_{с.в}$ , расчет	2.1	1.94	1.84	1.76	1.67
	$K_{с.в}$ , эксп.	2.39	1.97	1.8	1.78	1.66
C диафрагма $d = 4$ мм	$K_{с.в}$ , расчет	1.54	1.62	1.7	1.77	1.85
	$K_{с.в}$ , эксп.	1.46	1.56	1.68	1.69	1.77
LC диафрагма $a \times b = 17$ мм $\times$ 3.5 мм	$K_{с.в}$ , расчет	1.23	1.04	1.175	1.123	1.26
	$K_{с.в}$ , эксп.	1.3	1.09	1.8	1.15	1.3

Данные таблицы, как зависимости  $K_{с.в}$  от  $f$ , проиллюстрированы на рис. 5.6

$f$ , ГГц

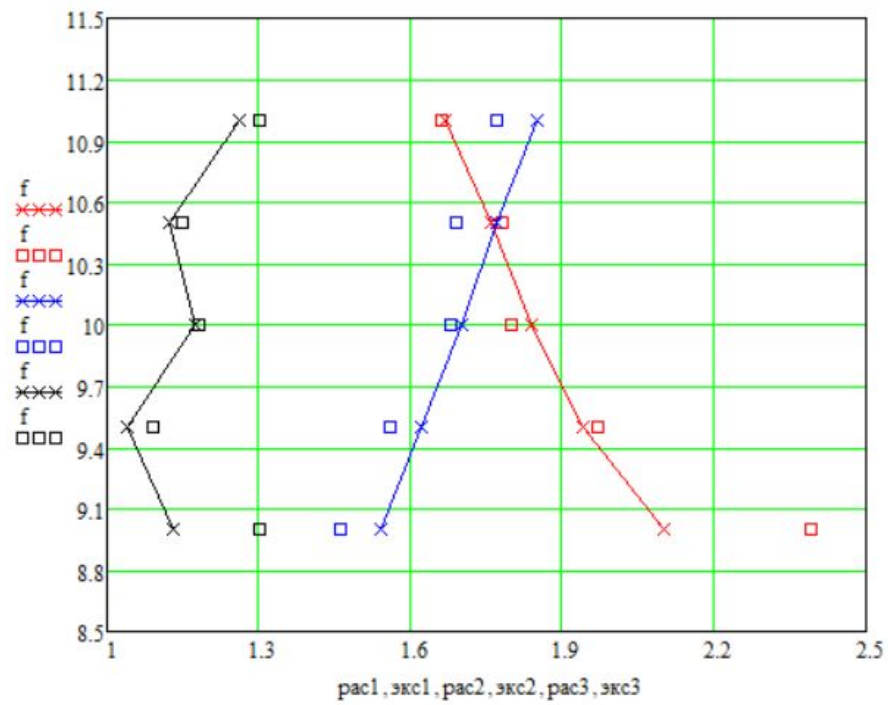


График 5.6 “Расчетные и экспериментальные значения  $K_{c,v}$ ”

черный - LC диафрагма

синий - C диафрагма

красный - L диафрагма

$f$ , ГГц



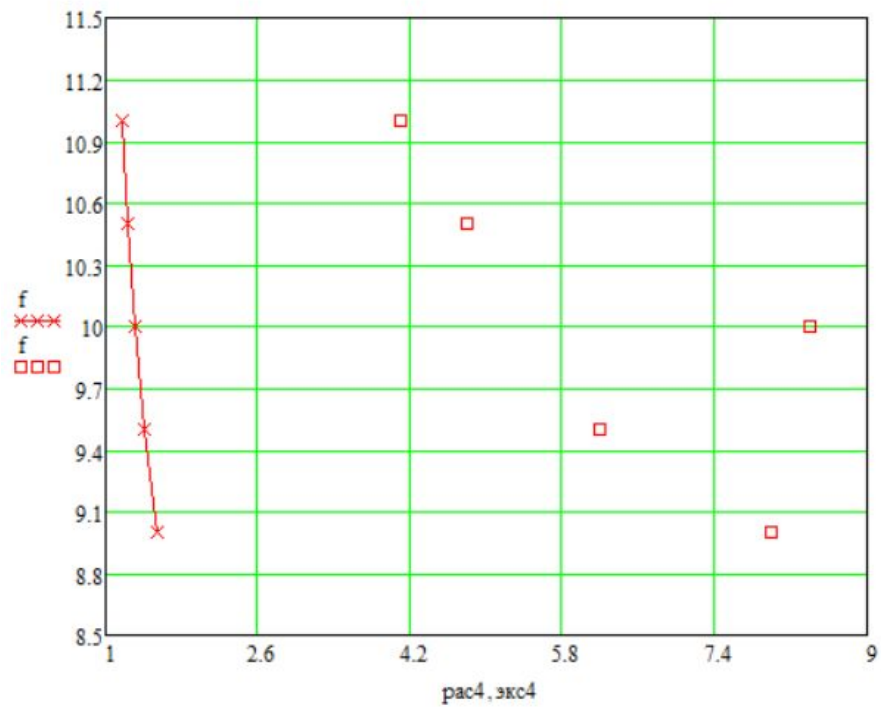


График 5.7 “Расчётные и экспериментальные значения  $K_{с.в}$  для индуктивного штыря”

### III. Вывод.

Найденные нами экспериментальные значения практически совпадают с теоретически рассчитанными величинами.

Таким образом, можно судить о правильности сделанных измерений.