

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 № 2

Исследование электромагнитного поля в прямоугольном волноводе

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

Проверил:
Гуреев А. Е.

Санкт-Петербург
2020

Цель работы:

- Экспериментальное исследование структуры электромагнитного поля волны основного типа H_{10} и высшего типа H_{20} в прямоугольном волноводе.
- Измерение длины волны в волноводе для волны типа H_{10}
- Изучение зависимости фазовой скорости от частоты для волны типа H_{10}
- Исследование отражающего фильтра для подавления нежелательного типа волны.

Схема установки и оборудование:

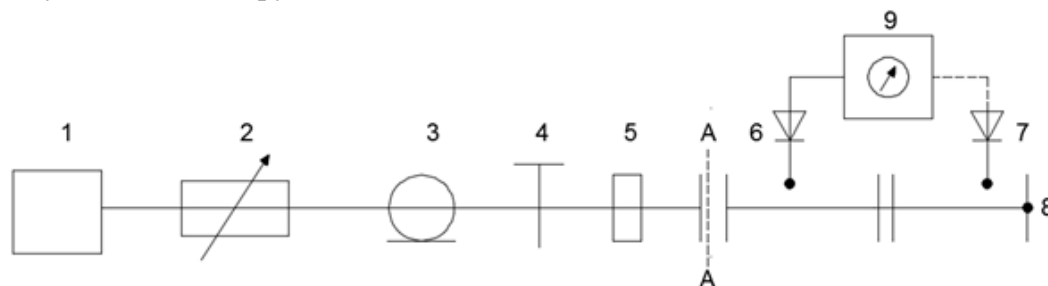


Рис 2.1 - Схема лабораторной установки

В состав системы входят:

1. Генератор высокочастотных колебаний
2. Переменный аттенюатор
3. Коаксиальный волновод
4. Переход с коаксиального волновод на прямоугольный
5. Прямоугольный волновод
6. Измерительная линия
7. Устройство для измерения зависимости амплитуды E от поперечной координаты
8. Короткозамыкающая пластина
9. Индикатор

Габариты прямоугольного волновода:

- $a \times b = 72 \times 34 \text{ мм}^2$
- Электрическая проницаемость диэлектрика в полости волновода (воздух) $\epsilon = 1$

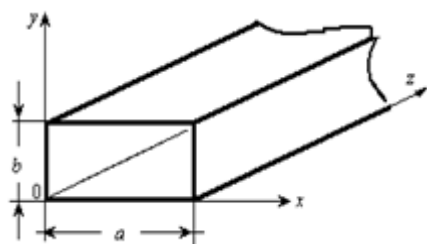


Рис 2.2 Исследуемый волновод.

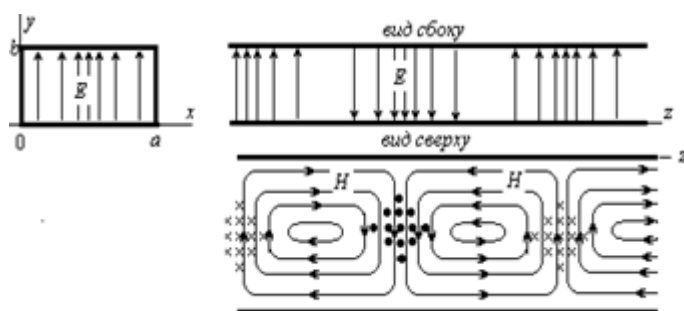


Рис 2.3 Поле основного типа H_{10} в волноводе

Теоретическая часть:

Прямоугольный волновод получил широкое распространение на практике как линия передачи СВЧ. В прямоугольном волноводе может существовать бесконечное множество типов волн E_{mn} и H_{mn} .

Для волн типа E_{mn} m и n должны быть отличными от нуля, а для волн типа H_{mn} значения m и n по отдельности могут быть равны нулю.

У волн типа E_{mn} наряду с поперечными составляющими векторов поля существует также продольная составляющая напряженности электрического поля и отсутствует продольная напряженности магнитного поля; у поля типа H_{mn} наряду с поперечными составляющими векторов поля отсутствует продольная составляющая напряженности электрического поля и существует продольная напряженности магнитного поля.

Волны типов E_{mn} и H_{mn} характеризуются критической длиной волны $\lambda_{кр} = 2/\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}$, которая в общем случае зависит от размеров a и b поперечного сечения волновода и от типа поля (от значения индексов и т.п.). Критические длины волн образуют бесконечную

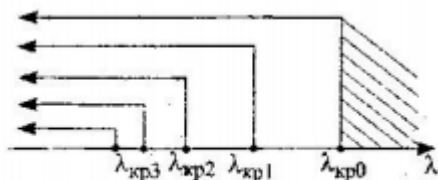


Рис. 2.1

убывающую последовательность значений (рис 2.1).

Если $\lambda < \lambda_{кр}$, то поле представляет собой распространяющуюся плоскую бегущую волну, которая носит вдоль волновода энергию.

Если $\lambda > \lambda_{кр}$, поле представляет собой местное экспоненциально затухающее вдоль волновода поле, которое не может переносить энергию.

Для распространения в волноводе бегущей волны только основного типа при заданном значении λ и местных затухающих полей всех остальных типов необходимо выбрать размеры поперечного сечения т. о., чтобы одновременно выполнялись сл. неравенства: $\lambda_{кр0} > \lambda > \lambda_{кр1}$, где $\lambda_{кр0}$ и $\lambda_{кр1}$ – критические длины волн полей основного и первого высшего типа, который имеет наибольшее значение $\lambda_{кр}$ после поля основного типа.

Условие одноволнового режима (для H_{10}): $2a > \lambda > a$.

Критическая частота $f = c/\lambda_{кр}$. Переходя от длин волн к частоте: $f_{кр0} < f < f_{кр1}$, **причем с в случае $a \geq b$ $f_{кр0} = c/2a$ и $f_{кр1} = c/a$.**

Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от координаты x :

$$E_m(x)/E_{\max m} = \sin(\Pi x/a).$$

Скорость, с которой распространяются вдоль оси z плоские поверхности постоянной фазы бегущей волны, называются ее фазовой скоростью: $v_{\phi} = c/\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{кр})^2}$, для H_{10} прямоугольного волновода $\lambda_{кр} = 2a$.

Скорость распространения энергии, переносимой вдоль оси волновода гармонической бегущей волной: $v_z = c2/v_{\phi} = c\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{кр})^2}$.

Бегущая волна типа H_{10} характеризуется длиной волны в волноводе Λ , определяемой расстоянием вдоль оси волновода, на котором фаза волны изменяется на 2Π :

$$\Lambda = v_{\phi}T = v_{\phi}/f = \lambda / \sqrt{1-(\lambda/\lambda_{кр})^2}.$$

Распределение амплитуд напряженности электрического поля вдоль оси x : $E_m(x)/E_{\max m} = |\sin(\Pi x/a)|$.

Отражающий фильтр для подавления нежелательного типа волны обычно представляет собой решетку из тонких проводников, ориентированных параллельно вектору напряженности этой волны. В этом случае подавленный тип волны интенсивно возбуждает в проводниках электрические токи и отражается решеткой.

Если проводники решетки ориентированы ортогонально линиям вектора напряженности волны рабочего типа, то эта волна не возбуждает в проводниках токов и происходит сквозь решётку почти без отражения.

Предварительные расчеты:

- $a \cdot b = 72 \cdot 34 \text{ мм}^2$
 $c = c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
 $f_{кр0} < f < f_{кр1}$
Так как $a \geq b$, то $f_{кр0} = c/2a$ и $f_{кр1} = c/a$
 $f_{кр0} = (3 \cdot 10^8 \text{ м/с}) / (2 \cdot 72 \text{ мм}^2) = 2083,3 \text{ МГц}$
 $f_{кр1} = (3 \cdot 10^8 \text{ м/с}) / (72 \text{ мм}^2) = 4166,6 \text{ МГц}$
 $2083,3 \text{ МГц} < f < 4166,6 \text{ МГц}$

- Построим зависимость амплитуды электрического поля от координаты x :
 Формула выражающая зависимость:

$$E_m(x) / E_{max} = \sin(\pi x / a), \text{ где } a = 72 \text{ мм}$$

$E_m(x) / E_{max}$

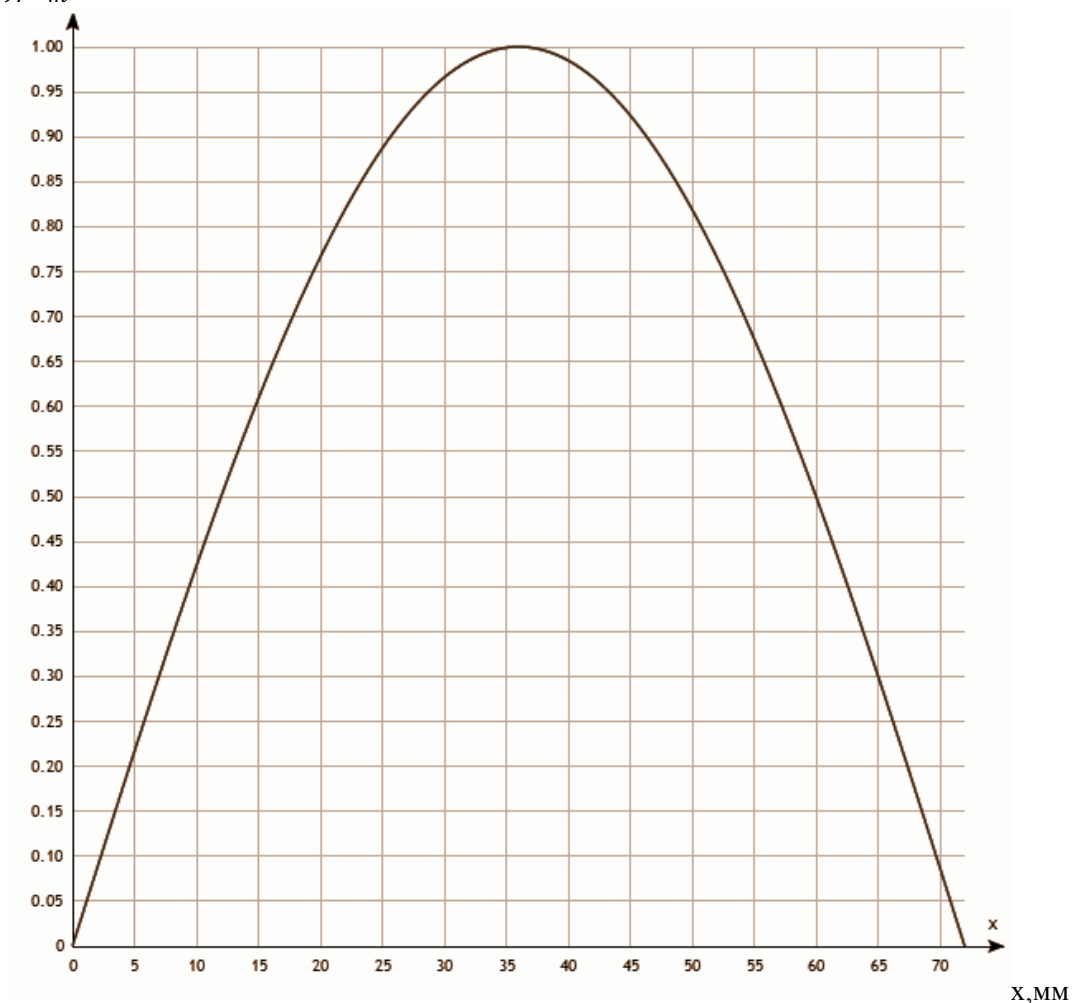


Рис. 2.4 “Теоретическая зависимость амплитуды электрического поля от координаты x ”

1. Рассчитаем для исследуемого волновода зависимости $V_{\phi}(f)$, $V_z(f)$ и $\Lambda(f)$ в полосе частот 2800-3800 МГц, с интервалом 200 МГц (для волны типа H₁₀).

f, МГц	$\lambda_{\text{расч}}, \text{ м}$	$\Lambda_{\text{расч}}, \text{ м}$	$v_{\phi \text{ расч}}, 10^8 \text{ м/с}$	$v_z \text{ расч}, 10^8 \text{ м/с}$	$\Lambda_{\text{эксп}}, \text{ м}$	$v_{\phi \text{ эксп}}, 10^8 \text{ м/с}$	$v_z \text{ эксп}, 10^8 \text{ м/с}$
2800	0,11	0,17	4,64	1,9	0,18	5,04	1,8
3000	0,1	0,14	4,17	2,15	0,14	4,2	2,23
3200	0,09	0,12	3,84	2,34	0,12	3,84	2,34
3400	0,088	0,11	3,79	2,37	-	-	-
3600	0,083	0,1	3,67	2,45	-	-	-
3800	0,079	0,09	3,59	2,51	-	-	-

Формулы для расчета:

$$\lambda = cT = c/f, \lambda_{\text{кр}} = 2a$$

$$v_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}}; \quad v_z = \frac{c^2}{v_{\phi}} = c * \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}; \quad \Lambda = v_{\phi} * T = \frac{v_{\phi}}{f} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}}$$

3. Определим частотную границу, начиная с которой по рассматриваемому волноводу может распространяться бегущая волна типа H₂₀

$$f > f_{\text{кр}} \Rightarrow f > c/a$$

$$f_{\text{кр1}} = \frac{3 * 10^8}{72 * 10^{-3}} = 4,2 \text{ ГГц}$$

$$f > 4,2 \text{ ГГц}$$

Измерения:

Измерение уровня E вдоль поперечной координаты x :

x , мм	$a(x)$, мВ	$\sqrt{a(x)/a_{\max}}$
0	0,0	0,00
0,7	1,1	0,27
10	2,6	0,51
15	4,7	0,69
20	7	0,84
25	8,4	0,92
30	9,5	0,98
35	9,9	1
40	9,7	0,99
45	8,9	0,95
50	7,6	0,88
55	5,5	0,75
60	2,8	0,53
65	0,6	0,25

Данные таблицы проиллюстрированы на рис 2.5.

$E_m(x)/E_{m\text{макс}}$

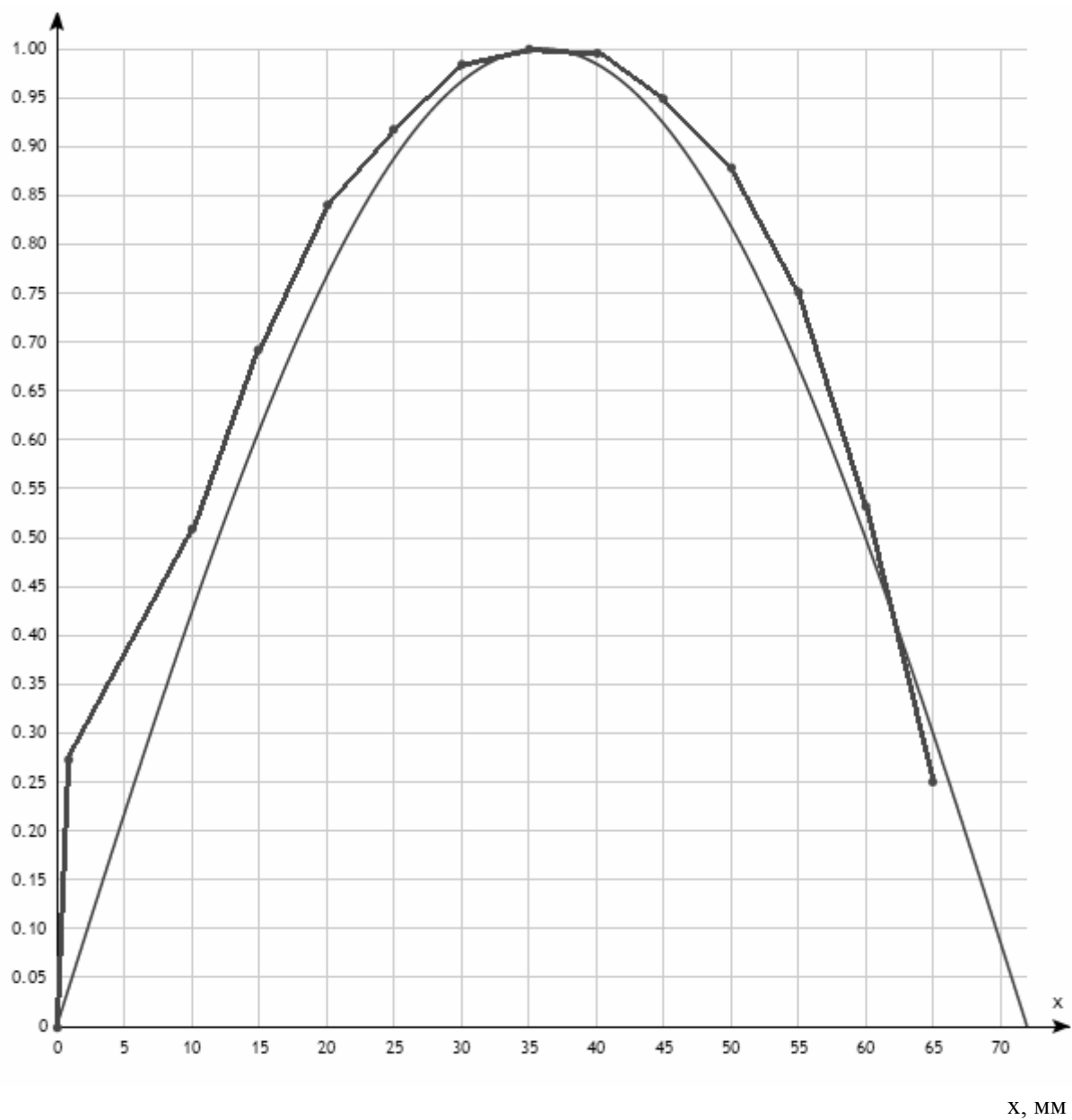


Рис. 2.5 “График экспериментальной и теоретической кривой $E_m(x)/E_{m\text{макс}}$ ”

Измерение уровня E вдоль продольной координаты z :

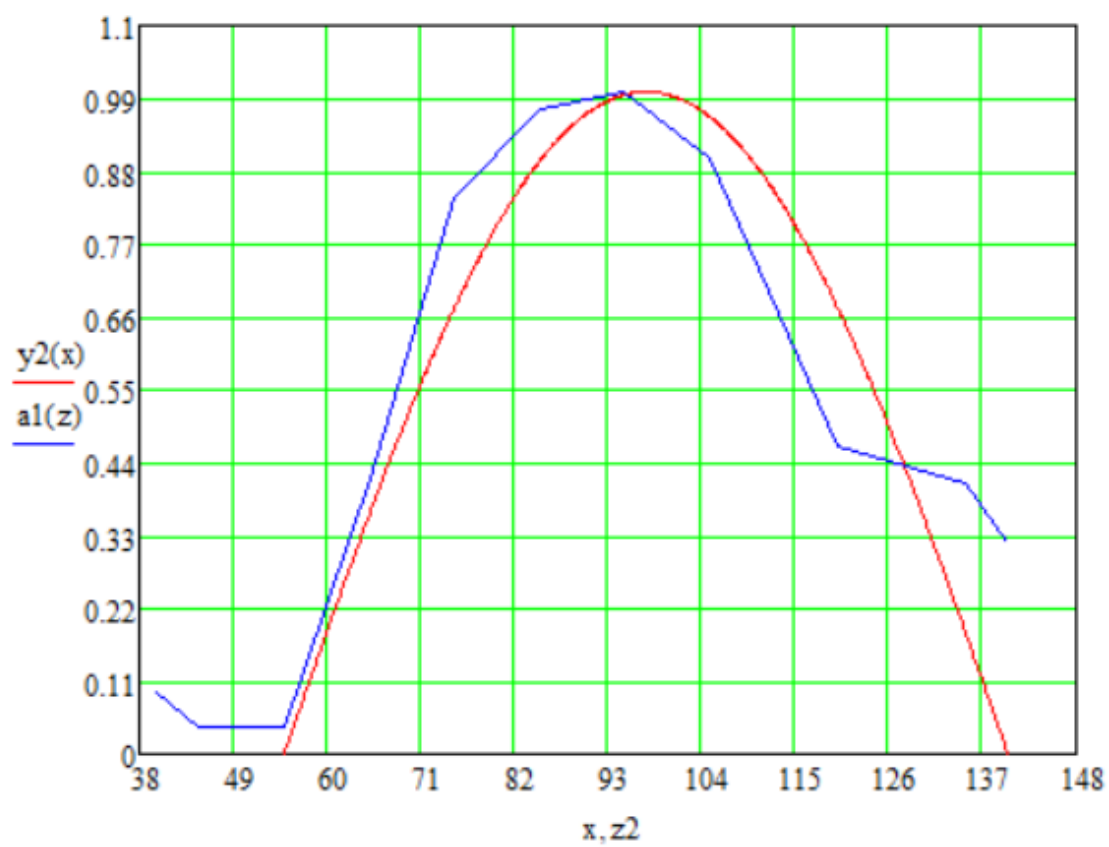
$f = 2800$ МГц

	z	$a(z)$	$\sqrt{a(z)/a_{\text{макс}}}$
	40	0,05	0,092

	45	0,01	0,041
z_1	55	0,01	0,041
	65	1	0,415
	75	4,1	0,840
	85	5,5	0,973
z_0	95	5,8	1
	105	4,7	0,9
	120	1,25	0,464
z_2	135	0,01	0,041
	140	0,6	0,321

Данные таблицы проиллюстрированы на рис 2.6.

$E_m(z)/E_{m\text{макс}}$



z, mm

Рис. 2.6 “График экспериментальной и теоретической кривой $E_m(z)/E_{m\text{макс}}$ ”

Из рис 2.9 находим Λ :

$$\Lambda \approx (140 - 50) * 2 \approx 180 \text{ мм}$$

Находим следующие величины:

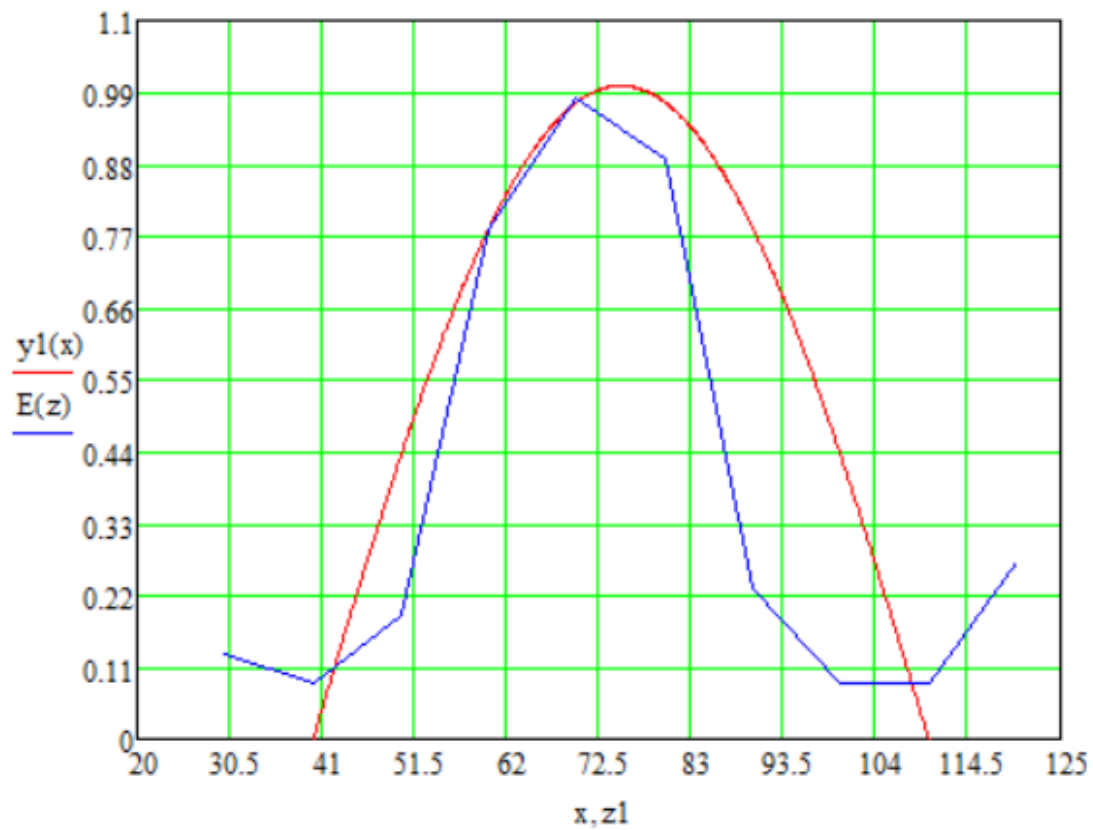
$$v_\phi = \Lambda * f_l = 0,18 \text{ м} * 2800 \text{ МГц} = 5,04 * 10^8 \text{ м/с}$$

$$v_s = c^2/v_\phi = (3*10^8 \text{ м/с})^2/5,04 * 10^8 \text{ м/с} = 1,8 * 10^8 \text{ м/с}$$

$$f = 3000 \text{ МГц}$$

	z	$a(z)$	$\sqrt{a(z)/a_{\max}}$
	30	0,05	0,13
z_1	40	0,02	0,085
	50	0,1	0,19
	60	1,7	0,78
	70	2,7	0,98
	80	2	0,89
	90	0,15	0,23
	100	0,02	0,085
z_2	110	0,02	0,085
	120	0,2	0,27

$$E_m(z)/E_{m\text{макс}}$$



z, мм

Рис. 2.7 “График экспериментальной и теоретической кривой $E_m(z)/E_{m\text{макс}}$ ”

Из рис 2.7 находим Λ :

$$\Lambda \approx (110 - 40) * 2 \approx 140 \text{ мм}$$

Находим следующие величины:

$$v_\phi = \Lambda * f_l = 0,14 \text{ м} * 3000 \text{ МГц} = 4,2 * 10^8 \text{ м/с}$$

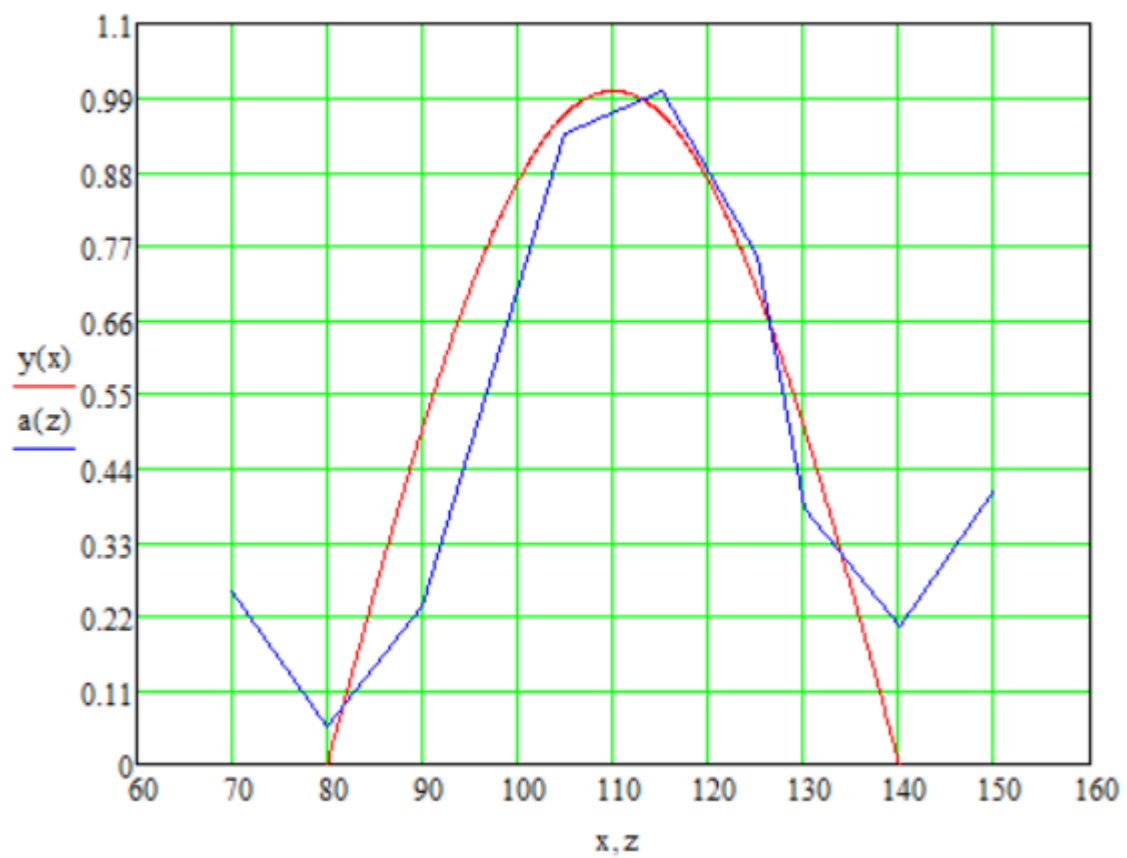
$$v_\gamma = c^2/v_\phi = (3*10^8 \text{ м/с})^2/4,02 * 10^8 \text{ м/с} = 2,23 * 10^8 \text{ м/с}$$

$$f = 3200 \text{ МГц}$$

	z	a(z)	$\sqrt{(a(z)/a_{\text{макс}})}$
	70	0,6	0,258
z ₁	80	0,03	0,057
	90	0,5	0,235

	105	7,9	0,936
z_0	115	9	1
	125	5	0,745
	130	1,3	0,38
z_2	140	0,03	0,2057
	150	1,5	0,408

$E_m(z)/E_{m\text{макс}}$



$z, \text{ мм}$

Рис. 2.8 “График экспериментальной и теоретической кривой $E_m(z)/E_{m\text{макс}}$ ”

Из рис 2.8 находим Λ :

$$\Lambda \approx (140 - 80) * 2 \approx 120 \text{ мм}$$

Находим следующие величины:

$$v_\phi = \Lambda * f_l = 0,12 \text{ м} * 3200 \text{ МГц} = 3,84 * 10^8 \text{ м/с}$$

$$v_s = c^2/v_\phi = (3*10^8 \text{ м/с})^2 / 3,84 * 10^8 \text{ м/с} = 2,3 * 10^8 \text{ м/с}$$

$V_g(f)$, м/с

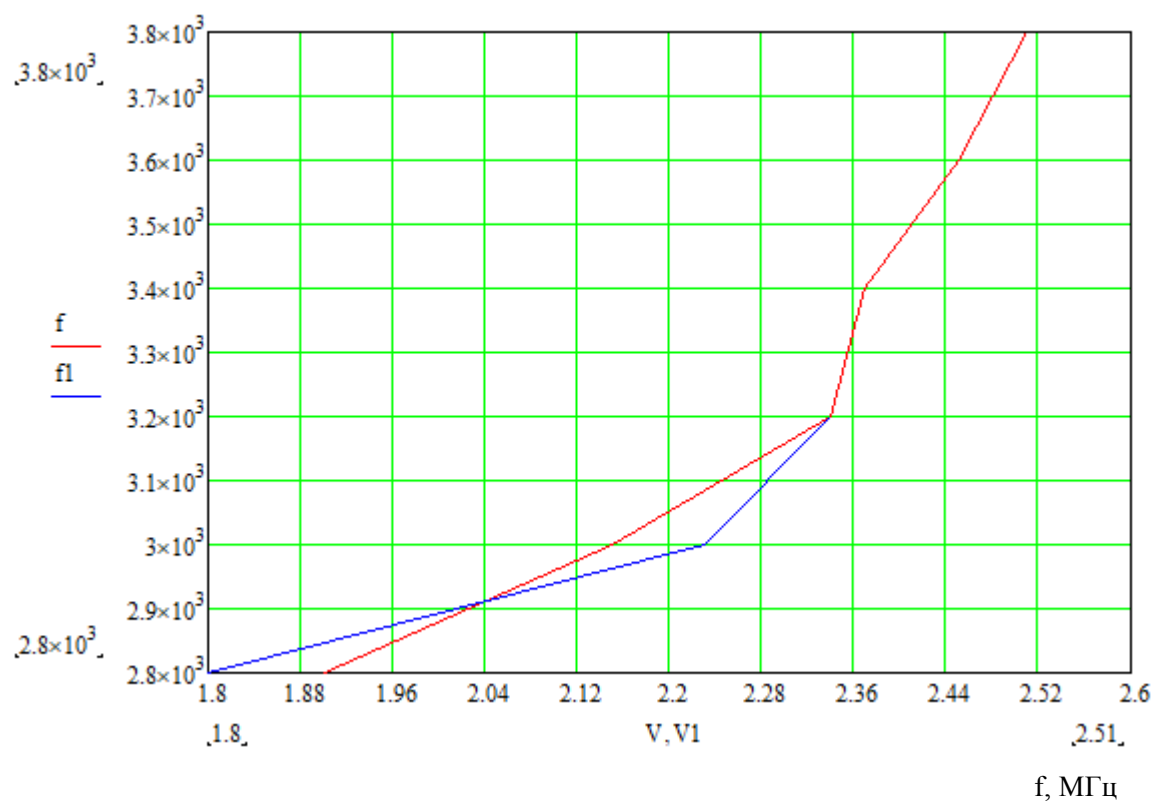
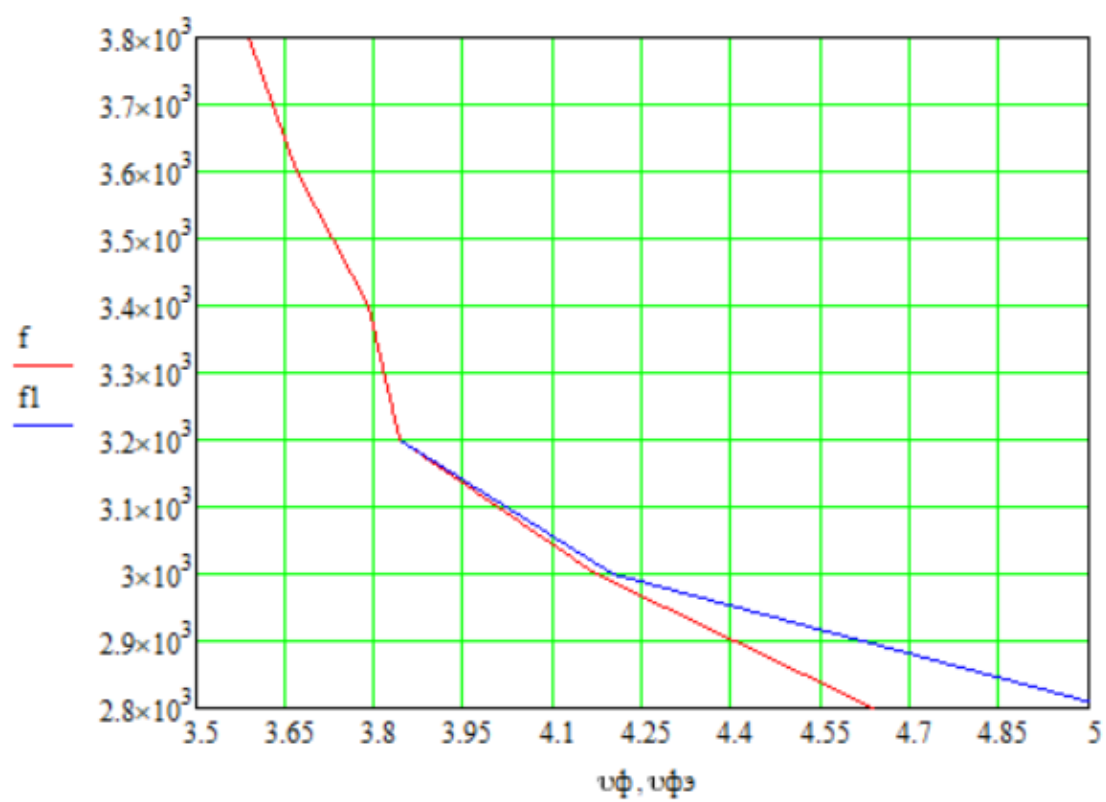


Рис. 2.9 “График экспериментальной и теоретической кривой $V_g(f)$ ”

$V_\phi(f)$, м/с



f, МГц

Рис. 2.10 “Теоретическая зависимость $V_\phi(f)$ ”

$\Lambda(f)$, мм

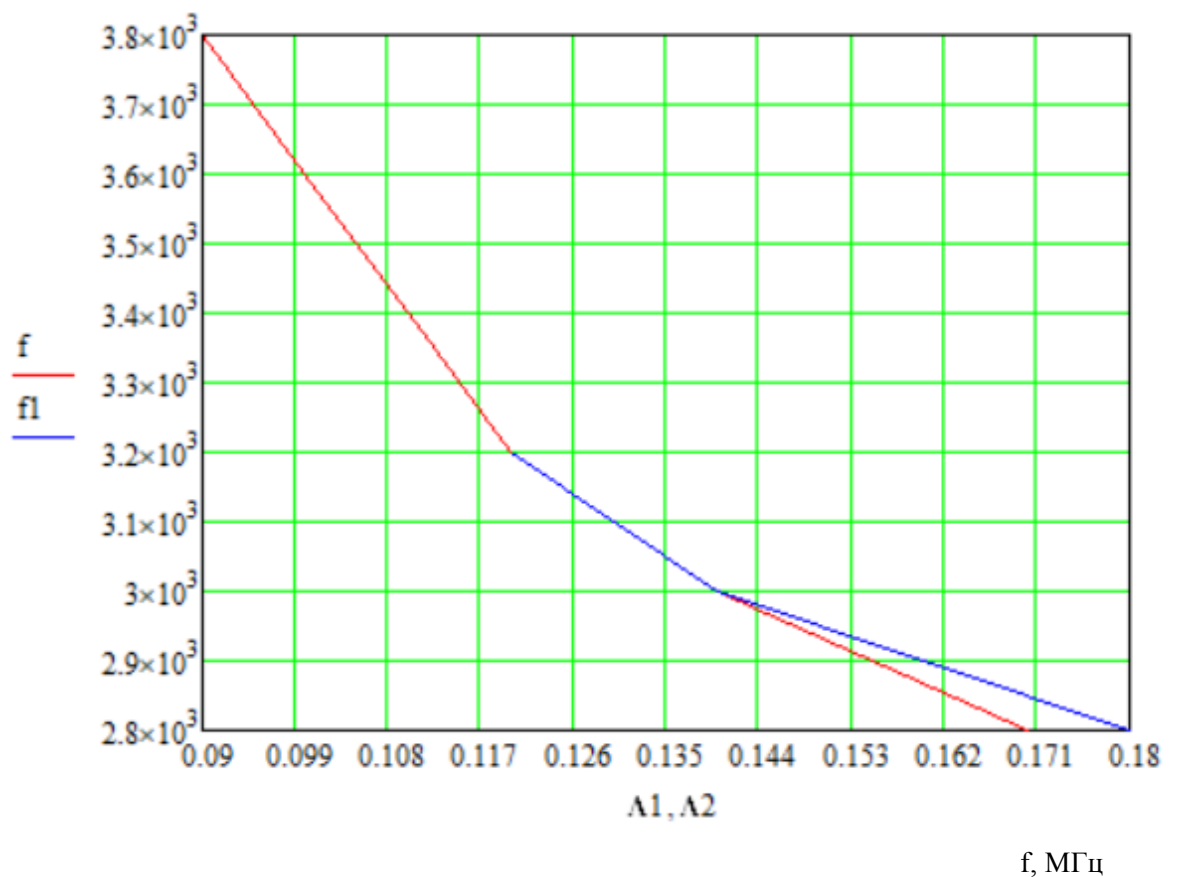


Рис. 2.11 “График экспериментальной и теоретической кривой $\Lambda(f)$ ”

Выводы:

1. Теоретические значения v_ϕ , v_z , Λ практически полностью совпадают с экспериментально измеренными.
2. Экспериментальные и теоретические графики v_ϕ , v_z , Λ почти совпадают, также графики экспериментальных и теоретических кривых $E_m(z)/E_{m\text{макс}}$ и $E_m(x)/E_{m\text{макс}}$ практически совпадают.