

**ВОЗБУЖДЕНИЕ БЕГУЩИХ ВОЛН В ЗАМКНУТОМ
РАВНОМЕРНОИЗОГНУТОМ ВОЛНОВОДЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО
СЕЧЕНИЯ**

Е. В. ПАДУСОВА, В. И. ШИМАНСКИЙ, Е. В. МИЛЮТИНА

(Представлено семинаром радиотехнического факультета)

Получение бегущих волн в замкнутой кольцевой линии основано на идее, высказанной Нейманом [1], и может быть осуществлено путем направленного распространения волн в линии при согласовании с ней возбуждающих элементов.

В случае направленного распространения волн в замкнутой однородной линии имеет место многократное сложение бегущих в одном направлении волн, в результате чего, при выполнении необходимых фазовых соотношений, происходит увеличение энергии бегущей волны, запасенной в линии.

Последнее обстоятельство дает право называть подобные системы резонаторами бегущих волн.

Для создания резонатора бегущей волны могут применяться длинные линии различных типов: двухпроводные линии, коаксиальные кабели, волноводы различных форм сечения.

Волноводные резонаторы бегущих волн могут быть образованы либо соединением неизогнутых секций волновода с помощью уголков или изгибов¹⁾, либо замыканием концов равномерноизогнутого волновода, имеющего угловую длину, равную 2π .

В резонаторе первого типа может быть возбужден любой тип волны, свойственный волноводам прямоугольного сечения, поэтому при проектировании резонатора может быть использована теория неизогнутых волноводов. Для анализа структуры полей и условий распространения волн в резонаторе второго типа может быть применена теория распространения волн в изогнутых волноводах, позволяющая произвести построение структуры поля в волноводах, а также определить длину волны в волноводе, критическую длину волны и фазовую скорость распространения волн [2, 3].

Нами проводилось исследование резонатора, образованного изгибанием волновода прямоугольного сечения. Поэтому для построения структуры поля в волноводе и определения λ_g и v_ϕ использовалась работа [3], рассматривающая изогнутые волноводы прямоугольного сечения.

¹⁾ Подобный случай рассмотрен в работе [4].

При рассмотрении волн в изогнутых волноводах применяется цилиндрическая система координат (рис. 1).

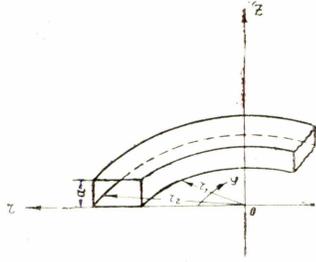


Рис. 1. Расположение системы координат для равномерноизогнутого волновода.

Типы волн в равномерно изогнутых волноводах классифицируются по наличию компонент поля (E или H) вдоль оси z .

Решение уравнений Максвелла, проведенное при помощи метода вектора Герца \bar{Z} , ориентированного по направлению оси тороида z : $\bar{Z}_e = \Pi_e \bar{e}_z$, $\bar{Z}_m = \Pi_m \bar{e}_z$ ($\Pi_\varphi = \Pi_r = 0$) определяет составляющие поля для волн типа E и H следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= \frac{\partial^2 \Pi_e}{\partial z \cdot \partial r}, & E_\varphi &= \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Pi_e}{\partial z \cdot \partial \varphi}, & E_z &= k^2 \Pi_e + \frac{\partial^2 \Pi_e}{\partial z^2} \\ H_r &= -j \frac{k}{r} \frac{\partial \Pi_e}{\partial \varphi}, & H_\varphi &= jk \frac{\partial \Pi_e}{\partial r}, & H_z &= 0 \end{aligned} \right\} E \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} E_r &= j \frac{k}{r} \frac{\partial \Pi_m}{\partial \varphi}, & E_\varphi &= \frac{1}{r} \frac{\partial \Pi_m}{\partial r}, & E_z &= 0 \\ H_r &= \frac{\partial^2 \Pi_m}{\partial z \cdot \partial r}, & H_\varphi &= \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Pi_m}{\partial z \cdot \partial \varphi}, & H_z &= k^2 \Pi_m + \frac{\partial^2 \Pi_m}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} H \quad (2)$$

Выражение для потенциальной функции в случае волн типа E имеет вид:

$$\Pi_e = D \cdot \cos \frac{m\pi}{a} z [I_n(\chi r) - P N_n(\chi r)] e^{\pm jn\varphi}, \quad (3)$$

а для волн типа H :

$$\Pi_m = D \cdot \sin \frac{m\pi}{a} z [I_n(\chi r) - P' N_n(\chi r)] e^{\pm jn\varphi}. \quad (4)$$

Здесь $\chi = \frac{x_{nq}}{r_2}$, m и q — количество вариантов поля по осям z и r

$$P = -\frac{I_n(X_{nq})}{N_n(X_{nq})} = -\frac{I_n(C X_{nq})}{N_n(C X_{nq})} \quad (5)$$

$$P' = -\frac{I_n'(X_{nq})}{N_n'(X_{nq})} = -\frac{I_n'(C X_{nq})}{N_n'(C X_{nq})} \quad (6)$$

$$C = \frac{r_1}{r_2}.$$

Изменение поля вдоль изогнутой оси волновода происходит по закону $e^{\pm jn\varphi}$; здесь n является угловой постоянной распространения. В зависимости от того, действительна или мнимая n , волны в волно-

воде будут распространяющиеся или нераспространяющиеся. Критическим условием является $n=0$.

Распространение электромагнитных колебаний в равномерноизогнутом волноводе может быть охарактеризовано двумя скоростями:

угловой фазовой скоростью $v_\varphi = \frac{\omega}{n}$ и линейной фазовой скоростью

$$v_\varphi = \frac{\omega}{n} r.$$

Угловая фазовая скорость является величиной постоянной и определяет равномерный поворот фронта волны в волноводе относительно его центральной оси. Линейная фазовая скорость изменяется по радиусу волновода, достигая максимального значения на наружном радиусе и минимального на внутреннем радиусе.

Отсюда следует, что при соответствующем расчете волновода можно на некоторой окружности радиуса R получить фазовую скорость, равную скорости света.

Угловой и линейной фазовым скоростям соответствуют угловая и линейная длины волн $\lambda_\varphi = \frac{2\pi}{n}$ и $\lambda_g = \frac{2\pi}{n} r$.

Линейная длина волны, как и фазовая скорость, изменяется по сечению волновода.

При расчете геометрических размеров волновода удобно задаваться длиной волны в свободном пространстве. Длина волны генератора может быть определена из равенства

$$k^2 = \kappa^2 + \gamma^2, \text{ где } \gamma^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2, \quad k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon,$$

отсюда

$$\lambda_a = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{X_{nq}}{\pi r^2}\right)^2 + \left(\frac{m}{a}\right)^2}} = \frac{2(r_2 - r_1)}{\sqrt{\frac{X_{nq}^2 (1-c)^2}{\pi^2} + \left(\frac{m\beta}{2}\right)^2}} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{2(r_2 - r_1)}{a}.$$

Если $n=0$, то волна в волноводе распространяться не сможет. В этом случае $\lambda_a = \lambda_{кр}$

$$\lambda_{кр} = \frac{2(r_2 - r_1)}{\sqrt{\frac{x_{0q}^2 (1-c)^2}{\pi^2} + \left(\frac{m\beta}{2}\right)^2}}.$$

При замыкании изогнутого волновода в кольцо и возбуждении его одним возбудителем образуется тороидальный резонатор, в котором при выполнении условия резонанса существует стоячая волна.

Для возбуждения бегущей волны тороидальный резонатор необходимо возбуждать направленными возбудителями, в частном случае

двумя емкостными штырями, расположенными на расстоянии $\frac{l\lambda_q}{4} = \frac{l2\pi}{4n}$, где l — нечетное целое число.

При длине волновода, равной целому числу волн, бегущие волны будут резонансными. Резонанс выразится в увеличении напряженности поля волны в $\frac{1}{1-\alpha}$ раз, где $\alpha < 1$ величина, характеризующая затухание волны в волноводе за один оборот волны по кольцу.

Основной целью эксперимента являлась проверка практической возможности возбуждения бегущих волн в равномерноизогнутом замкнутом волноводе.

При возникновении бегущей волны необходимо было произвести измерение линейной фазовой скорости на малом, среднем и большом радиусах волновода.

Эксперимент производился на двух замкнутых волноводных системах с размерами:

№ резонатора	r_1	r_2	a
I	7,5 мм	270 мм	100 мм
II	7,5 мм	270 мм	275 мм

Резонансные частоты для резонаторов с данными размерами определялись по формуле (7). Резонаторы изготовлялись из листовой латуни $\delta=0,8$ мм и $\delta=0,6$ мм.

В таблице 1 сведены результаты расчета и экспериментальной проверки резонансных частот резонаторов для волн типа E .

Таблица 1

Тип волны	Резонансные частоты (мгц)			
	Резонатор I		Резонатор II	
	расчетн.	эксперим.	расчетн.	эксперим.
E_{001}	518	520	518	510
E_{002}	1095	1097,5	1095	
E_{003}	1620		1620	
E_{011}	1595	1590	750	756
E_{012}	1845		1360	
E_{013}	2200		1650	
E_{101}	680	676	680	661
E_{102}	1215		1215	
E_{103}	1755		1755	
E_{111}	1650	1635	860	859
E_{112}	1935	1942	1280	1280
E_{113}	2320		1800	
E_{202}	1415		1415	
E_{203}	2056		2056	
E_{211}	1735	1740,5	670	669
E_{212}	2060		1500	
E_{213}	2460		2400	

При экспериментальной проверке резонансных частот резонаторы возбуждались генераторами ГСС-12, ГС-10, ГСС-Д. Частоты генератора и резонатора измерялись волномером средней точности ВСТ-Д.

Структура поля в резонаторе проверялась специально разработанными емкостными индикаторами поля.

Резонаторы I и II возбуждались на волне типа E_{111} .

Во избежание возникновения паразитных резонансов особое внимание обращалось на тщательность изготовления емкостных возбуждателей (исключались перекосы возбуждателей относительно торцевых и боковых стенок резонатора).

Возбуждение резонатора через боковую стенку исключало возможность возникновения волны H_{011} .

Структурная схема экспериментальной установки для возбуждения бегущей волны приведена на рис. 2.

Для получения фиксированного сдвига фаз использовалась измерительная линия ИЛД.

Связь индикатора поля с ол новодом была очень слабой. С целью контроля расогласований, вносимых индикатором поля, один из индикаторов поля был укреплен неподвижно.

Для подбора необходимых фазовых соотношений предусматривалась возможность перемещения возбуждающих элементов

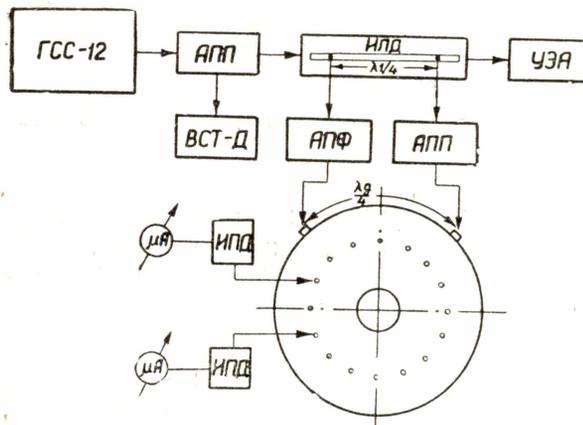


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки—1. ГСС-12—генератор стандартных сигналов; 2—АПП—аттенюатор поглотительный переменный; 3.—ИЛД—измерительная линия дециметровая; 4.—УЭА—угольный эквивалент антенны; 5.—ВСТ-Д—волномер средней точности дециметровый; 6.—АПФ—аттенюатор поглотительный фиксированный; 7—ИЛД—индикатор поля дециметровый.

по резонатору и вдоль измерительной линии в пределах $\frac{\lambda_g}{4} \pm \frac{\lambda_g}{8}$.

Равенство амплитуд возбуждателей устанавливалось изменением затухания переменного аттенюатора, включенного в один из кабелей возбуждателей.

В результате тщательного согласования возбуждающих элементов с волноводом, осуществления сдвига фаз на $\frac{\pi}{2}$ и подбора равенства амплитуд в резонаторе была получена бегущая волна с КБВ=0,75.

Получение больших КБВ затруднялось вследствие следующих обстоятельств:

1. Неидеальности изготовления резонатора и возбуждателей.
2. Нестабильности частоты генератора, возбуждающего резонатор.
3. Недостаточной мощности генераторов, что затрудняло регулирование амплитуд возбуждающих полей.

Измерение относительных фазовых скоростей распространения бегущей волны в резонаторе $\frac{v_\phi}{c}$ дало следующие результаты:

1. Для резонатора с размерами $r_1=7,5$ мм, $r_2=270$ мм, $a=100$ мм:

$$\frac{v_{\phi}}{c} = 1 \text{ на радиусе } R = 29 \text{ мм};$$

$$\text{на } r = 7,7 \text{ мм } \frac{v_{\phi}}{c} = 0,2; \text{ на } r = 265 \text{ мм } \frac{v_{\phi}}{c} = 9.$$

2. Для резонатора с размерами $r_1 = 7,5 \text{ мм}$, $r_2 = 270 \text{ мм}$, $a = 275 \text{ мм}$.

$$\frac{v_{\phi}}{c} = 1 \text{ на радиусе } R = 55 \text{ мм};$$

$$\text{на } r = 7,7 \text{ мм } \frac{v_{\phi}}{c} = 0,19; \text{ на } r = 265 \text{ мм } \frac{v_{\phi}}{c} = 4,75.$$

Таким образом, на основании проведенных экспериментов могут быть сделаны следующие выводы.

1. В тороидальном резонаторе может устойчиво существовать бегущая волна при возбуждении резонатора направленными возбудителями.

2. Структура полей бегущих волн полностью соответствует структуре полей коаксиальных резонаторов, для которых n не равно нулю. Бегущие волны характеризуются отсутствием вариантов поля по координате φ и отсутствием фазового сдвига между поперечными составляющими электрического и магнитного полей.

3. При проектировании резонаторов бегущей волны тороидального типа может быть использована теория коаксиальных резонаторов для определения структуры поля, геометрических размеров резонатора, выбора резонансной длины волны.

4. Возбуждение бегущей волны двумя емкостными возбудителями, разнесенными на $\frac{\lambda_g}{4}$, возможно, так как при таком расположении

возбудителей имеет место компенсация неоднородностей, вносимых возбудителями, за счет сдвига фаз отраженных волн на 180° .

Экспериментальная часть работы выполнялась на кафедре радио-передающих устройств МАИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейман М. С., Получение бегущих электромагнитных волн без потери мощности. Известия электропромышленности слабого тока, № 1, 1939.
2. Краснушкин П. Е., О волнах в изогнутых трубах, Ученые записки МГУ, Физика, выпуск 75, книга 2, ч. II, 1945.
3. Воскресенский Д. И., Равномерноизогнутый волновод прямоугольного поперечного сечения, Труды МАИ, выпуск 73, 1957.
4. S f e r a z z a P. I., Wave-travelling resonator, Tele—Tech, XI, 1955.