

Электродинамика и распространение радиоволн

Семинар 12

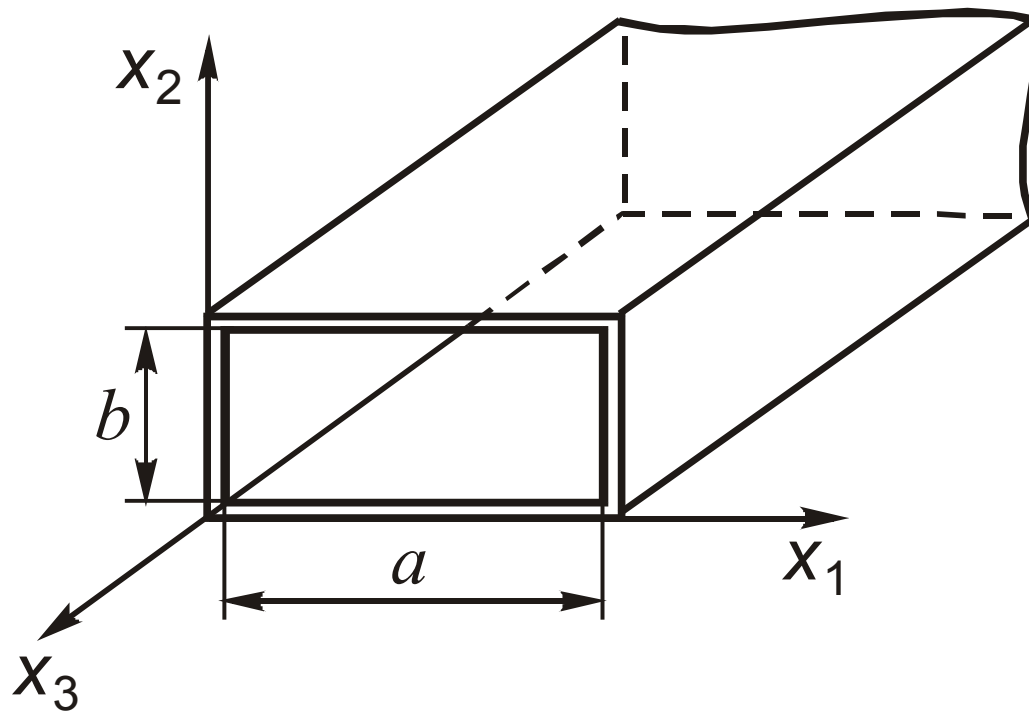
Русов Юрий Сергеевич

1. Изучить ошибки в расчетах предыдущего семинара.
2. Изучить примеры решения задач.
3. Решить предлагаемые задачи, используя исходные данные для своего варианта. Вариант задания определяется следующими параметрами: М – номер группы (1 для РЛ1-41, 2 для РЛ1-42, 3 для РЛ1-43, 4 для РЛ1-44, 5 для РЛ1-49, 6 для РЛ6-41, 7 для РЛ6-49), N – порядковый номер студента в списке группы.
4. Завершить выполнение Домашнего задания №2. Задание доступно по ссылкам в личных кабинетах (в названии файла указаны потоки РЛ1 и РЛ6). Срок сдачи 12 неделя.

Работа над ошибками

При решении задачи об определении распространяющихся волн в волноводе у некоторых получалось выполнение условия распространения при сочетании индексов $m=1$, $n=1$. Так как критические длины для волн E_{mn} и H_{mn} в прямоугольном волноводе совпадают, то выполнение условия распространения при ненулевых индексах m и n означает, что в прямоугольном волноводе могут распространяться оба типа волн E_{mn} и H_{mn} . Т.е. выполнение условия распространения при сочетании индексов $m=1$, $n=1$ означает, что могут распространяться волны E_{11} и H_{11} . При хотя бы одном нулевом индексе соответствующая волна типа E в прямоугольном волноводе не существует (см. лекции).

Прямоугольный волновод



Прямоугольный волновод

Задача 1. Определить предельную и допустимую рабочую мощность в прямоугольном волноводе с поперечным сечением axb , работающем на волне основного типа на частоте f , если волновод заполнен воздухом.

Решение.

Предельной мощностью называется наибольшая мощность, которую можно передать по волноводу без электрического пробоя.

Основным типом волны в прямоугольном волноводе является волна H_{10} . Для нее предельная мощность в режиме бегущей волны определяется формулой

$$P_{\text{пред.б.в}} = \frac{E_{\text{пред}}^2}{4Z_c} ab \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}.$$

Прямоугольный волновод

Рассчитывается длина волны в среде, заполняющей волновод

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{f\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}.$$

Для воздуха относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon=1$ и относительная магнитная проницаемость $\mu=1$. С учетом этого длина волны в среде, заполняющей волновод определяется по формуле

$$\lambda = \frac{1}{f\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}.$$

Прямоугольный волновод

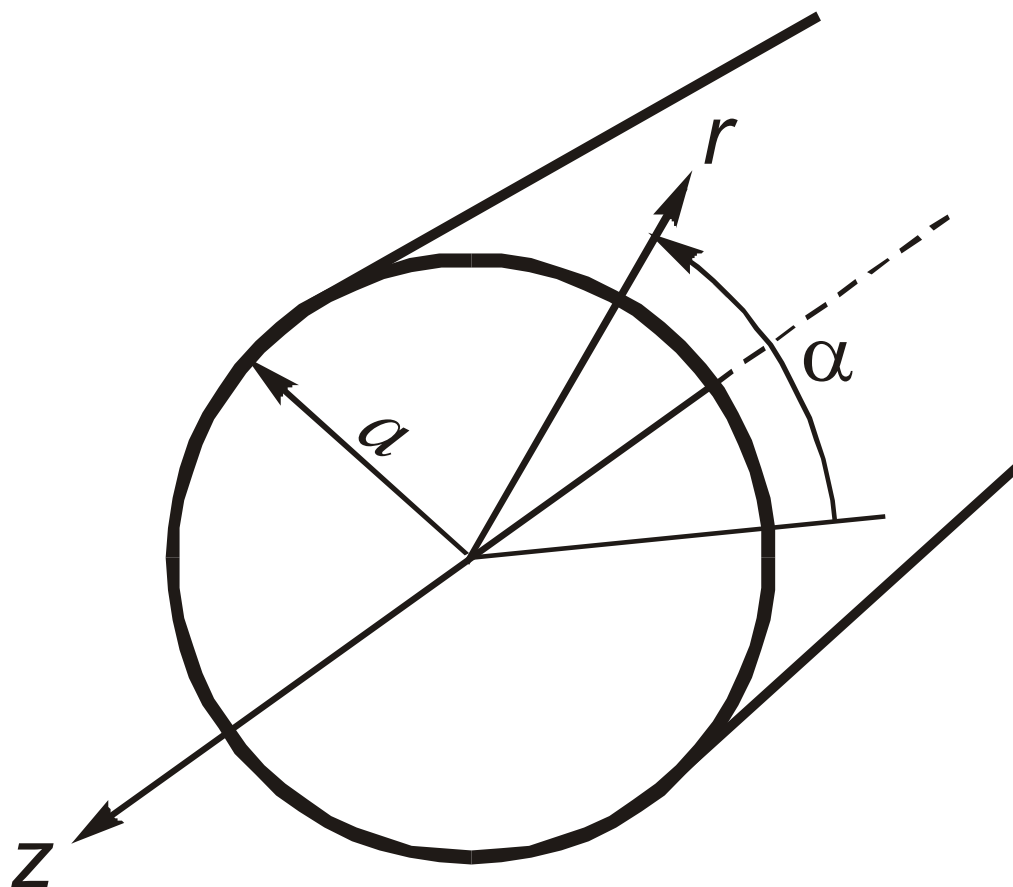
Для воздуха при нормальном атмосферном давлении и нормальной ионизации предельная напряженность электрического поля равна 30 кВ/см.

После подстановки этих данных в формулу для предельной мощности рассчитывается значение предельной мощности.

Допустимая рабочая мощность рассчитывается с учетом наличия отраженной волны, запаса электрической прочности и неоднородностей, которые концентрируют электрическое поле. Вычислим минимальное рекомендуемое значение допустимой рабочей мощности

$$P_{\text{доп}} = \frac{1}{5} P_{\text{пред.б.в.}}$$

Круглый волновод



Круглый волновод

Задача 2. Круглый волновод диаметром $2a$ заполнен диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ , относительной магнитной проницаемостью $\mu=1$ и тангенсом угла электрических потерь $\operatorname{tg}\delta_{\epsilon}$. Стенки волновода изготовлены из немагнитного металла с удельной проводимостью σ . В волноводе распространяется волна основного типа с частотой колебаний f . Определить погонное затухание в волноводе и потери на длине z . Потери выразить в децибелах.

Круглый волновод

Решение.

Затухание волн в волноводах зависит от потерь в металлических стенках и в материале, заполняющем волновод. Коэффициент ослабления волны в волноводе складывается из двух составляющих, вызванных потерями в металлических стенках и в диэлектрике

$$\alpha_{\text{общ}} = \alpha_{\text{м}} + \alpha_{\text{д}}.$$

Основным типом волны в круглом волноводе является волна типа H_{11} . Для нее критическая длина волны равна

$$\lambda_{\text{кр}} = 3,41a.$$

Круглый волновод

Коэффициент ослабления за счет потерь в металлических стенках для волны основного типа определяется по формуле для волн типа H_{nm} в круглом волноводе в предположении, что волновод заполнен вакуумом или воздухом

$$\alpha_m = \frac{R_s}{Z_c a \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{kp}}\right)^2}} \left[\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{kp}}\right)^2 + \frac{m^2}{B_{nm}^2 - m^2} \right].$$

Подставляются значения $m=1$, $n=1$.

Круглый волновод

Вычисляем длину волны в вакууме

$$\lambda_0 = \frac{1}{f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} .$$

Для диэлектрика с малыми потерями ($\text{tg} \delta_{\text{э}} \ll 1$) характеристическое сопротивление среды и длину волны в среде, заполняющей волновод, приближенно можно определить как и для диэлектрика без потерь

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon \mu}} .$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\epsilon \epsilon_0}} .$$

Круглый волновод

Волновод заполнен диэлектриком, поэтому в формулу для α_m вместо длины волны в вакууме λ_0 подставляется длина волны в неограниченной среде, заполняющей волновод.

$$\alpha_m = \frac{R_s}{Z_c a \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \left[\left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2 + \frac{m^2}{B_{nm}^2 - m^2} \right].$$

B_{nm} – корень первой производной функции Бесселя.

$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{2\sigma}}$ – поверхностное сопротивление металла, из которого изготовлены стенки волновода. По условию задачи это немагнитный материал, значит $\mu_a = \mu_0$. Вычисляем значение R_s .

Круглый волновод

Корни A_{nm} функций Бесселя $J_n(x)$

n	$m=0$	$m=1$	$m=2$
1	2.405	3.832	5.135
2	5.520	7.016	8.417
3	8.654	10.714	11.620

Корни B_{nm} первой производной функций Бесселя $J'_n(x)$

n	$m=0$	$m=1$	$m=2$
1	3.832	1.841	3.052
2	7.016	5.335	6.705
3	10.174	8.536	9.965

Круглый волновод

Из таблицы берем значение $B_{11}=1,841$.

Подставляем численные данные в формулу для α_m .

Коэффициент ослабления для волн типов Е и Н за счет потерь в диэлектрике для немагнитных диэлектриков с малыми потерями (при $\mu=1$ и $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon \ll 1$) рассчитывается по формуле

$$\alpha_d \approx \frac{\pi \varepsilon \operatorname{tg}\delta_\varepsilon}{\lambda_0 \sqrt{1 - \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}}$$

Здесь λ_0 — длина волны в вакууме

Круглый волновод

Ослабление напряженности электрического и магнитного полей при распространении электромагнитной волны в волноводе с потерями определяется выражениями

$$\begin{aligned} E_m(z) &= E_m(0)e^{-\alpha z}, \\ H_m(z) &= H_m(0)e^{-\alpha z}. \end{aligned}$$

Здесь $\alpha = \alpha_{\text{общ}} = \alpha_m + \alpha_d$.

Мощность, переносимая электромагнитной волной, определяется через интегрирование среднего значения вектора Пойнтинга по поперечному сечению волновода, а значение вектора Пойнтинга определяется через векторное произведение векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} , поэтому ослабление мощности электромагнитной волны при распространении в волноводе с потерями определяется выражением

$$P(z) = P(0)e^{-2\alpha z}.$$

Круглый волновод

Если взять натуральный логарифм отношения напряженности электрического поля на входе в волновод к напряженности на выходе при длине отрезка волновода 1 м, то

$$\ln \frac{E_m(0)}{E_m(1)} = \ln \frac{E_m(0)}{E_m(0)e^{-\alpha z}} = \ln e^{-\alpha z} = \alpha$$

Полученная величина, численно равная коэффициенту ослабления, выражается в неперах на метр (Нп/м) и называется погонным затуханием.

Круглый волновод

Потери в радиотехнике чаще выражают в децибелах. Децибел (дБ) – это одна десятая от единицы отношения Бел.

Вносимые волноводом потери в дБ на длине волновода z выражаются через отношение мощности на входе к мощности на выходе волновода следующим образом

$$L \text{ [дБ]} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВЫХ}}} = 10 \log_{10} \frac{P(0)}{P(z)} = 10 \log_{10} e^{2\alpha z}$$

Вносимые потери в дБ на длине 1 м (погонное затухание в дБ)

$$L_1 \text{ [дБ]} = 10 \log_{10} \frac{P(0)}{P(1)} = 10 \log_{10} e^{2\alpha} = 20\alpha \log_{10} e \approx 8,686\alpha.$$

Вносимые волноводом потери в дБ на длине волновода z

$$L \text{ [дБ]} = 10 \log_{10} e^{2\alpha z} = z \cdot 10 \log_{10} e^{2\alpha} = z L_1$$

Задание для самостоятельного решения

1. Решить задачу 1 при значениях
 $f=37-0,1M$ ГГц,
 $a=7,2$ мм, $b=3,4$ мм,
2. Решить задачу 2 при значениях
 $a=8$ мм,
 $f=14+0,1N$ ГГц.
 $\varepsilon=2+0,1M$.
 $\operatorname{tg}\delta_3=0,0005$.
 $\sigma=5,7 \cdot 10^7$ См/м.

Литература

Основная литература по дисциплине

1. Голубева Н.С., Митрохин В.Н. Основы радиоэлектроники сверхвысоких частот: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 486 с. ISBN 5-7038-2740-X. Режим доступа: <http://ebooks.bmstu.ru/catalog/205/book1163.html>
2. Кугушев А.М., Голубева Н.С., Митрохин В.Н. Основы радиоэлектроники. Электродинамика и распространение радиоволн. Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 368 с.

Дополнительные учебные материалы

1. Сборник задач по курсу «Электродинамика и распространение радиоволн»: учеб. пособие / Баскаков С.И., Карташев В.Г., Лобов Г.Д., Филатова Е.А., Штыков В.В.; Под ред. С.И. Баскакова. М.: Высшая школа, 1981. 208 с.
2. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1992. 416 с.