# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ

## Практическое занятие №7

ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

- ***Основные расчетные формулы:***
- 1. Коэффициент замедления:

$$\nu_з = \frac{v_ф}{v_з} = \frac{\lambda}{\lambda_з}, \qquad (7.1)$$

- где $v_ф$ – фазовая скорость замедленной волны; $\lambda_з$ – длина замедленной волны.
- 2. Коэффициент замедления спиральной структуры;

$$\nu_з = \frac{2\pi a}{L} \qquad (7.2)$$

- где a и L – соответственно радиус и шаг спирали спиральной замедляющей структуры.
- 3. Коэффициент замедления гребенчатой структуры

$$\nu_з = \frac{1}{|\cos kd|}, \qquad (7.3)$$

- где d – глубина канавок замедляющей гребенчатой структуры.
- 4. Структура поля вдоль гребенчатой замедляющей структуры

$$\dot{E}_m = E_m e^{-k_y y} e^{-ik_z z} \quad (7.4)$$

$$\dot{H}_m = H_m e^{-k_y y} e^{-ik_z z} \quad (7.5)$$

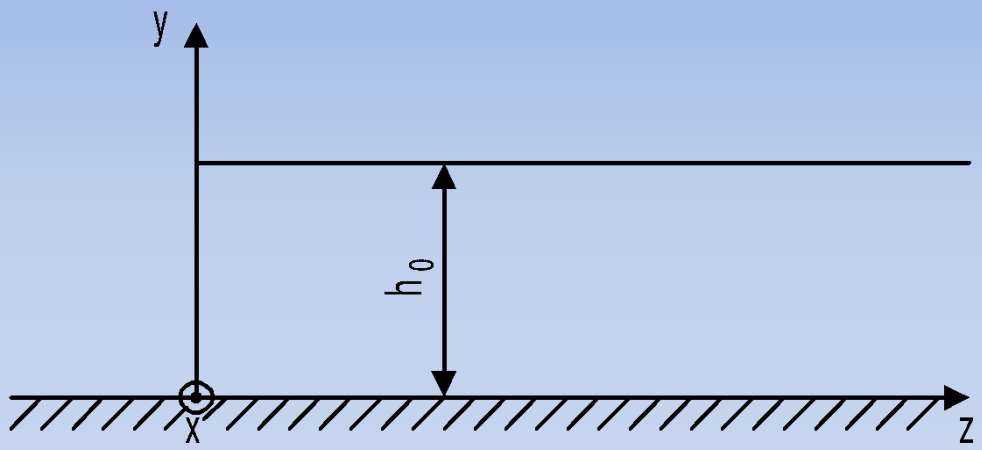
- где $E_m$ и $H_m$ – амплитуды электрического и магнитного полей; $k_y = k\sqrt{\nu_з^2 - 1}$ – поперечное волновое число в воздухе, характеризующее затухание волны по мере удаления от поверхности замедляющей структуры;
- $k_z = 2\pi/\lambda_з$ – продольное волновое число, характеризующее изменение фазы волны при ее распространении вдоль замедляющей структуры; z и y – координаты, характеризующие изменение поля, соответственно, вдоль и поперек (от поверхности) замедляющей структуры.

- 5. Условие однородности замедляющей структуры

$$L << \lambda_з \quad , \qquad (7.6)$$

- где L – период замедляющей структуры (для спиральной структуры – шаг спирали).

- ***Примеры решения типовых задач:***
- 1. Показать, почему замедляющая структура может применяться в качестве волновода поверхностных волн?
- <u>Решение</u>
- Если основная часть электромагнитной энергии концентрируется в непосредственной близости от поверхности замедляющей структуры, она может быть применена в качестве волновода поверхностных волн. Оказывается, что даже при небольшом отличии $v_з$ от 1, явление это ярко выражено. Покажем это.
- Пусть электромагнитное поле движется вдоль оси z (рисунок 7.1)




- Рисунок 7.1

- 
- Среднее значение вектора Пойнтинга за период равно

$$\Pi_{ср} = \frac{E_y H_x}{2}.$$

- На основании соотношений (7.4) и (7.5) справедливо, что

$$\Pi_{ср} = \frac{E_{my} H_{mx}}{2} e^{-2k_y y}$$

- Определим мощность волн в сечении $0 < y < h_0$ при x, равном единице длины:

$$P_{h_0} = \int_0^{h_0} \pi_{cp} dy = \frac{E_{my} H_{mx}}{4k_y}\left(1 - e^{-2k_y h_0}\right).$$

- При $y \to \infty$ получим
- Таким образом, в конечном, прилегающем к поверхности замедляющей структуры слое концентрируется часть энергии

$$\frac{P_{h_0}}{P_\infty} = 1 - e^{-2k_y h_0}.$$

- Или с учетом, что ,

$$k_y = k\sqrt{\nu_з^2 - 1}$$

$$\sqrt{\nu_з^2 - 1} = -\frac{\ln\left(1 - \frac{P_{h_0}}{P_\infty}\right)}{4\pi} \cdot \frac{\lambda}{h_0}$$

- Определим теперь $v_3$ в предположении, что 90% мощности находится в слое $h_0 = \lambda$

$$\sqrt{\nu_з^2 - 1} = -\frac{\ln(1 - 0{,}9)}{4\pi} = 0{,}183 \quad .$$

- Следовательно, $\nu_з = \sqrt{1{,}183} = 1{,}09$.
- Таким образом, при отличии коэффициента замедления всего на 0,09 от единицы основная часть (90%) электромагнитной энергии движется близко над замедляющей системой, что позволяет применить замедляющую систему в качестве линии передачи. Такие линии передачи (однопроводные) широко применяют в радиорелейных станциях связи.
-

- 2. Над замедляющей структурой возбуждается поверхностная волна с коэффициентом замедления $v_з$=4. На каком расстоянии от замедляющей структуры напряженность поля уменьшится в $\hat{в}_г = 7$ ***e*** раз? Длина волны генератора см.
- <u>Решение</u>
- Согласно (7.4) известно, что продольная составляющая электрического поля убывает экспоненциально при удалении от поверхности y=0

$$E_{my} = E_m e^{-k_y y}$$

.

- Отношение амплитуд на поверхности замедляющей структуры и на расстоянии " ***y***" по условию задачи равно ***e***, тогда

$$\frac{E_{my}(y=0)}{E_{my}(y)} = e$$

.

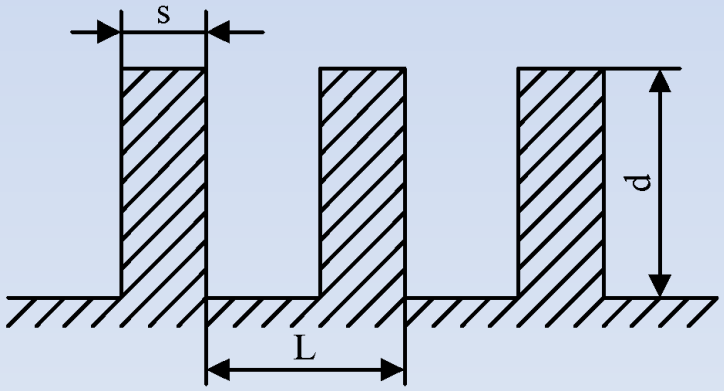
- Следовательно, $1/\exp(-k_y y) = e$

, или окончательно $e^{k_y y} = e$. Тогда можем записать

- $k_y y = 1$, $y = 1/k_y$,

- $$y = \frac{1}{k\sqrt{\nu_з^2 - 1}} = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{\nu_з^2 - 1}} = \frac{0{,}07}{2\pi\sqrt{4^2 - 1}} = 2{,}88 \cdot 10^{-3}\text{м.}$$

- 3. Рассчитать геометрические размеры канавок однородной гребенчатой структуры в волноводно-щелевой антенной решетке для замедления фазовой скорости с коэффициентом замедления $v_з$=7, если длина волны генератора $\lambda_0 = 15$ см.
- <u>Решение</u>
- На рисунке 7.2 изображен продольный разрез замедляющей системы




- Рисунок 7.2

- Глубину канавок найдем из выражения (7.3)

$$d = \frac{\lambda_г \cdot \arccos(1/\nu_з)}{2\pi} = \frac{0{,}15 \cdot \arccos(1/7)}{2\pi} = 0{,}034 \text{ м}.$$

- Так как система однородная, то на основании (7.6) будет справедливо

$$L << \frac{\lambda_г}{\nu_з}.$$

- Выбираем L=2 мм.
- Толщина зуба структуры s выбирается очень малой и обычно может быть определена из условий механической прочности и хорошего теплорассеяния.

- 4. Рассчитать геометрические размеры спирали лампы бегущей волны усилителя высокой частоты, в которой длина замедленной волны равна 0,08 м, а диаметр –1,5 см. Длина волны генератора $\lambda = 0,7$ м.
- <u>Решение</u>
- Шаг спирали определим из выражения (7.2)

$$L = \pi D / V_з$$

.

- На основании соотношения (7.1) справедливо, что

$$L = \frac{\pi D \lambda_з}{\lambda} = \frac{\pi \cdot 0,015 \cdot 0,08}{0,7} = 0,539$$

см.

- **Контрольные вопросы:**
- 1. Какие существуют способы замедления электромагнитных колебаний?
- 2. От каких факторов зависит коэффициент замедления спиральной структуры?
- 3. Какова дисперсионная характеристика спиральной замедляющей структуры?
- 4. От каких факторов зависит замедление фазовой скорости гребенчатой структуры?
- 5. Изобразите частотную зависимость замедления для гребенчатой структуры (дисперсионная характеристика).
- 6. Что такое пространственные гармоники? Чем отличаются пространственные гармоники от временных (частотных)?
- 7. От чего зависят частота, фазовая и групповая скорости пространственных гармоник?
- 8. Что такое прямые и обратные пространственные гармоники?
- 9. В чем преимущества передачи энергии поверхностными волнами.
- 10. Какие типы волноводов поверхностных волн существуют? Назовите их преимущества и недостатки.