

# **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ**

Практическое занятие №7

**ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ**

- **Основные расчетные формулы:**

- 1. Коэффициент замедления:

$$v_3 = \frac{v_\phi}{v_3} = \frac{\lambda}{\lambda_3}, \quad (7.1)$$

- где  $v_\phi$  – фазовая скорость замедленной волны;  $\lambda_3$  – длина замедленной волны.

- 2. Коэффициент замедления спиральной

структуры;

(7.2)

$$v_3 = \frac{2\pi a}{L}$$

- где  $a$  и  $L$  – соответственно радиус и шаг спирали спиральной замедляющей структуры.

- 3. Коэффициент замедления гребенчатой

структуры

$$v_3 = \frac{1}{|\cos kd|}$$

, (7.3)

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

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

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

- где  $E_m$  и  $H_m$  – амплитуды электрического и магнитного полей;  $k_y = k_1 \sqrt{v_3^2 - 1}$  – поперечное волновое число в воздухе, характеризующее затухание волны по мере удаления от поверхности замедляющей структуры;
- $k_z = 2\pi/\lambda_3$  – 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

$$L \ll \lambda_3, \quad (7.6)$$

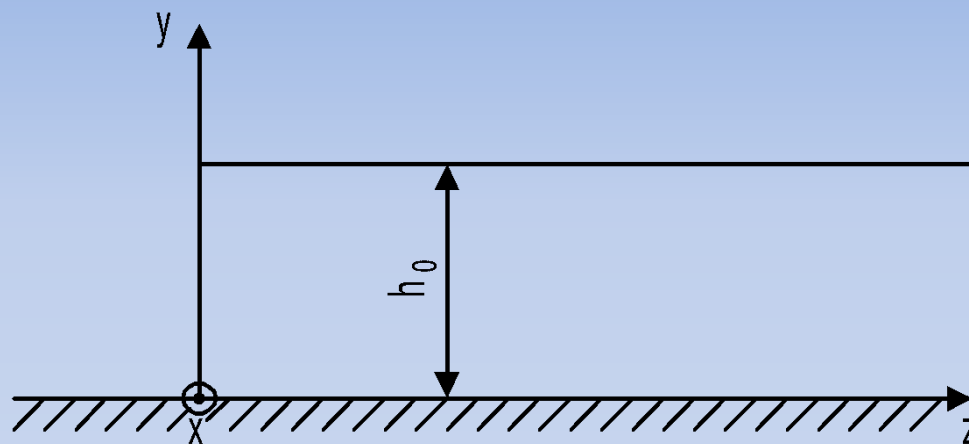
- где  $L$  – период замедляющей структуры (для спиральной структуры – шаг спирали).

- ***Примеры решения типовых задач:***

- 1. Показать, почему замедляющая структура может применяться в качестве волновода поверхностных волн?

- Решение

- 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  $v_z$  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

$$\Pi_{\text{cp}} = \frac{E_y H_x}{2} \quad .$$

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

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

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

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

- При  $y \rightarrow 0$  получим
- Таким образом, в конечном, прилегающем к поверхности замедляющей структуры слое концентрируется часть энергии

- Или с учетом, что ,

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

$$k_y = k \sqrt{v_3^2 - 1}$$

$$\sqrt{v_3^2 - 1} = -\frac{\ln\left(1 - \frac{P_{h_0}}{P_\infty}\right)}{4\pi} \cdot \frac{\lambda}{h_0}$$

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

$$\sqrt{v_3^2 - 1} = -\frac{\ln(1 - 0,9)}{4\pi} = 0,183$$

- Следовательно,  $v_3 = \sqrt{1,183} = 1,09$ .
- Таким образом, при отлнчии 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  $v_3 = 4$ . На каком расстоянии от замедляющей структуры напряженность поля уменьшится  $\hat{v}_r = 7$  раз? Длина волны генератора 5 см.

- Решение

- 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  $\frac{E_{my}(y=0)}{E_{my}(y)}$ , тогда
- $$\frac{E_{my}(y=0)}{E_{my}(y)} = 7$$

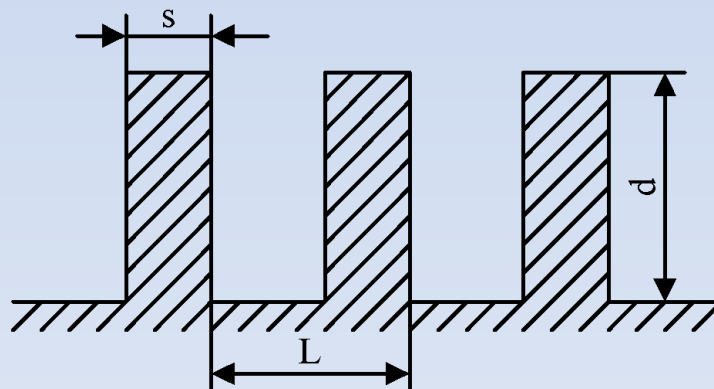
• Следовательно  $1/\exp(-k_y y) = e$

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

•  $k_y y = 1$ ,  $y = 1/k_y$ ,

• 
$$y = \frac{1}{k\sqrt{v_3^2 - 1}} = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{v_3^2 - 1}} = \frac{0,07}{2\pi\sqrt{4^2 - 1}} = 2,88 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

- 3. Рассчитать геометрические размеры канавок однородной гребенчатой структуры в волноводно-щелевой антенной решетке для замедления фазовой скорости с коэффициентом замедления  $v_3 = 7$ , если длина волны генератора  $\lambda = 15$  см.
- Решение
- На рисунке 7.2 изображен продольный разрез замедляющей системы



• Рисунок 7.2

- Глубину канавок найдем из выражения (7.3)

$$d = \frac{\lambda_{\Gamma} \cdot \arccos(1/v_3)}{2\pi} = \frac{0,15 \cdot \arccos(1/7)}{2\pi} = 0,034 \text{ м}$$

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

$$L \ll \frac{\lambda_{\Gamma}}{v_3}$$

- 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 0,7 м.

- Решение

- Шаг спирали определим из выражения (7.2)

- На основании соотношения (7.1) справедливо, что
- $$L = \frac{\pi D \lambda_3}{\lambda} = \frac{\pi \cdot 0,015 \cdot 0,08}{0,7} = 0,539$$

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.