

Электроника СВЧ

Лекция 8. Замедляющие системы

Характеристики и параметры замедляющих систем

условие *фазового синхронизма*: $v_\phi \approx v_0$, $v_0 = 5,93 \times 10^5 \sqrt{U_0}$

коэффициент замедления замедляющей системы $n = \frac{c}{v_\phi} \approx \frac{505}{\sqrt{U_0}}$

Уравнение электромагнитной волны,
распространяющейся вдоль
продольной оси z системы

$$E = E_0 \exp(j\omega t + \gamma z) = E_0 \exp[j(\omega t - \beta z) + \alpha z]$$

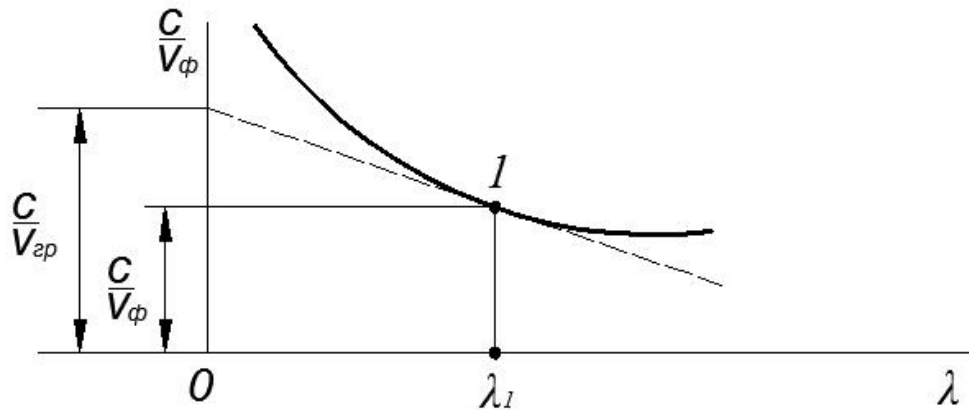
Где $\gamma = \alpha - j\beta$ - постоянная распространения,
 α - амплитудная постоянная
 β – фазовая постоянная

$$\beta = \frac{\omega}{v_\phi} = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{зам}}} = \frac{2\pi c}{v_\phi}$$

$$v_\phi = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta} \quad - \text{ фазовая скорость волны}$$

$$v_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{d\beta} = \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} = v_\phi \left(1 - \frac{\omega}{v_\phi} \frac{dv_\phi}{d\omega} \right)^{-1} = \left[\frac{1}{v_\phi} - \lambda_0 \frac{d\left(\frac{1}{v_\phi}\right)}{d\lambda_0} \right]^{-1} \quad - \text{ групповая скорость волны}$$

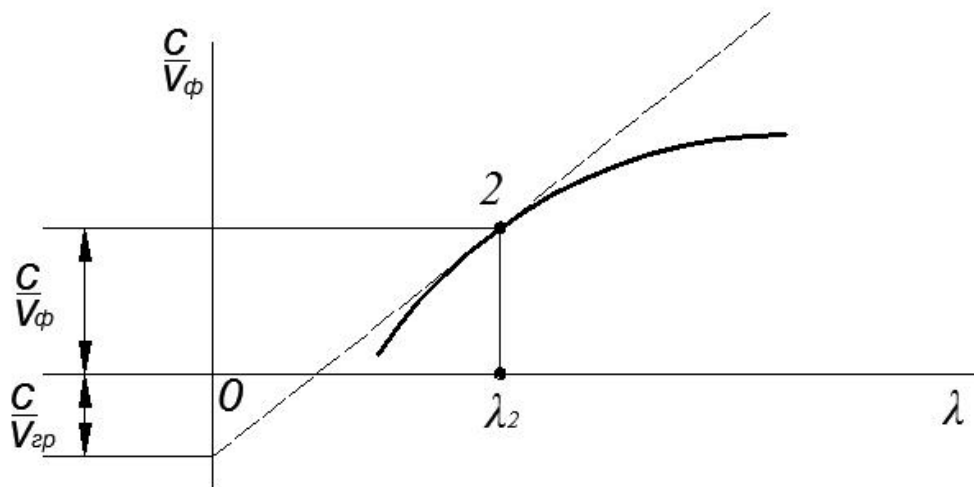
Пример дисперсионных характеристик линии передачи



Сопротивление связи
замедляющей системы:

$$R_{св} = \frac{E_z^2}{2\beta^2 P}$$

Положительная дисперсия



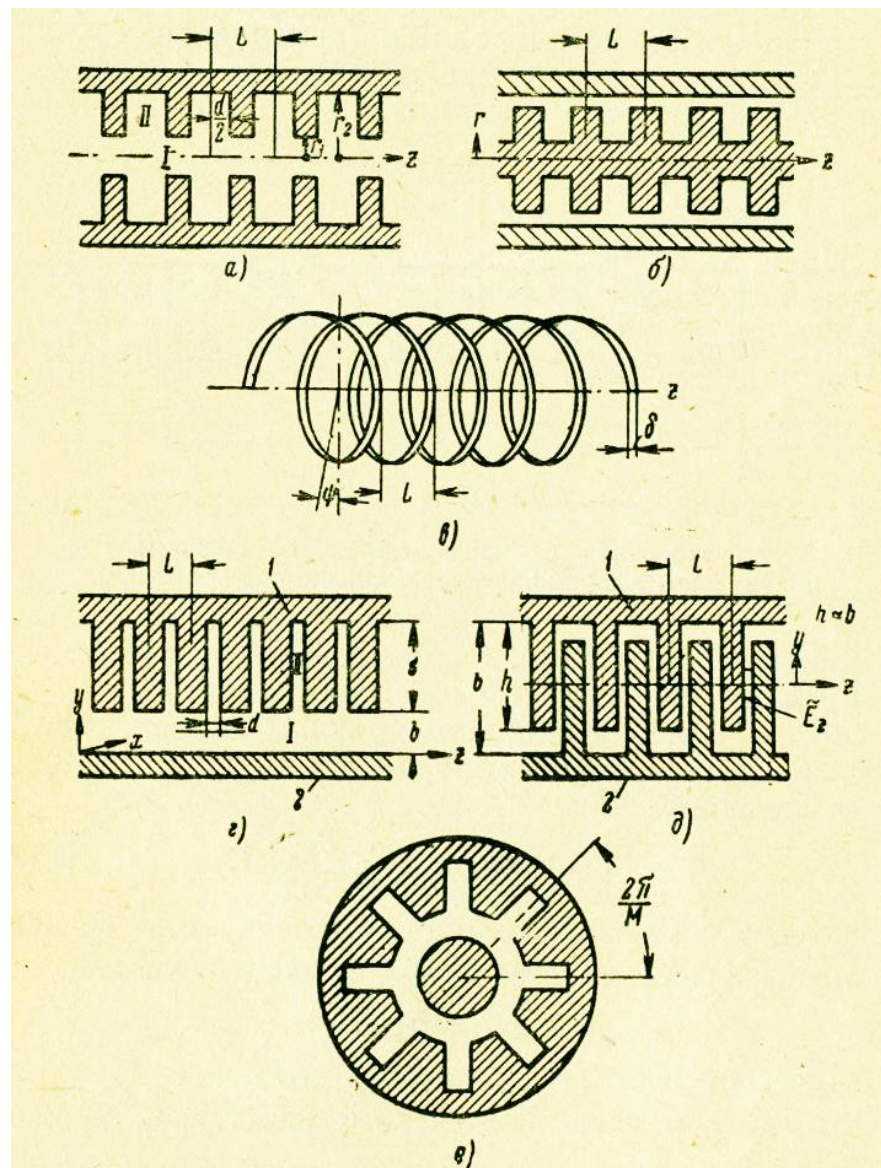
E_z – продольная составляющая
электрического поля

P – мощность, переносимая
волной

$$P = W v_{gr}$$

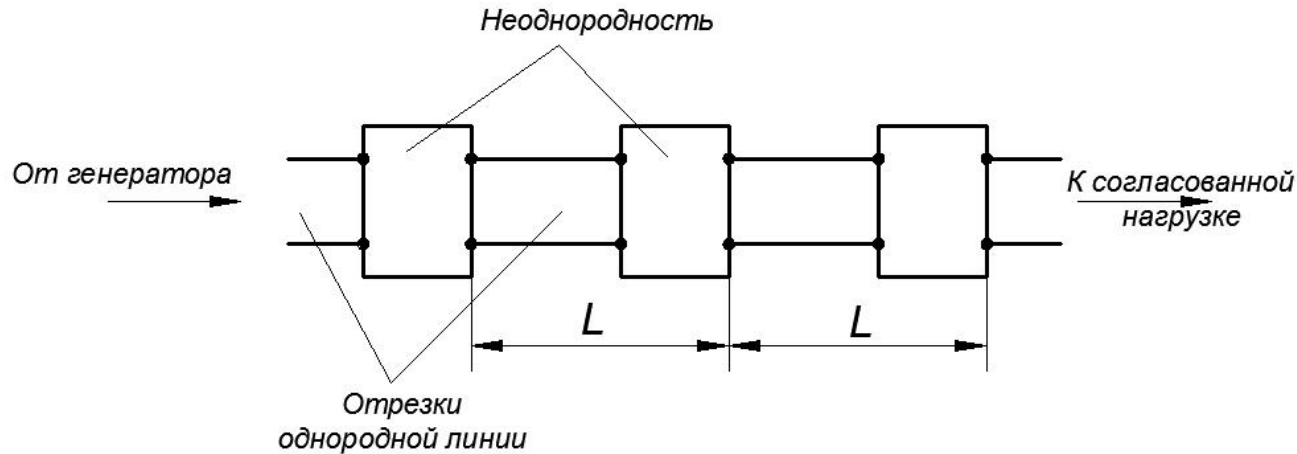
W – энергия, запасенная на
единице длины системы

Отрицательная дисперсия



а) диафрагмированный цилиндрический волновод, б) коаксиальная линия с диафрагмами на внутреннем проводнике, в) ленточная спираль, г) плоский магнетрон, д) система типа «встречные штыри», е) цилиндрический магнетрон

Периодические системы. Пространственные гармоники



Эквивалентная схема периодической замедляющей системы

$E = E_m e^{j(\omega t - \beta z)}$ - уравнение электромагнитной волны в периодической системе без потерь, нагруженной на согласованную нагрузку

$$E = E_{m1} e^{j(\omega t - \beta z)} \sum_{-\infty}^{\infty} C_p e^{-jp \frac{2\pi}{L} z} = \sum_{-\infty}^{\infty} E_p e^{j\left[\omega t - \left(\beta + \frac{2\pi p}{L}\right) z\right]}$$

$$E = \sum_{-\infty}^{+\infty} E_p e^{j(\omega t - \beta_p z)} \quad \text{- уравнение электромагнитной волны с учетом пространственных гармоник}$$

где $\beta_p = \beta + \frac{2\pi p}{L} z$; $p=0; \pm 1; \pm 2 \dots$

Фазовая скорость пространственной гармоники: $v_{\text{фр}} = \frac{\omega}{\beta_p}$

$p=0$ - нулевая гармоника или основная волна

$p \neq 0$ – высшие пространственные гармоники

Фазовая постоянная пространственных гармоник: $\beta_p = \beta_0 + \frac{2\pi p}{L}$

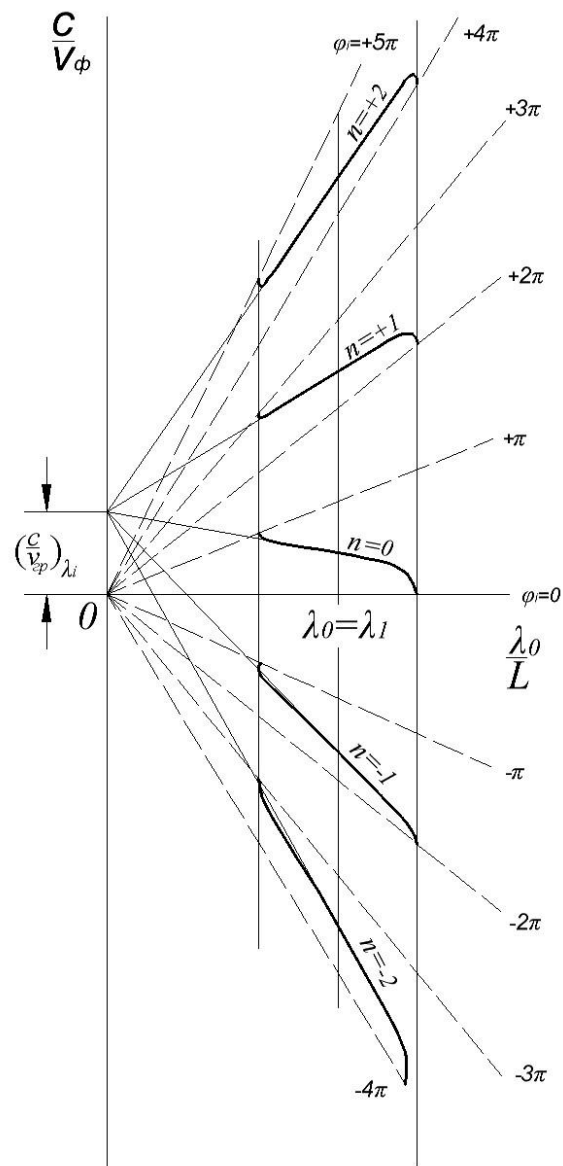
величина фазового сдвига нулевой гармоники на одном шаге (периоде) структуры $\varphi = \beta L$ изменяется в пределах

$$0 \leq \varphi_0 \leq \pi$$

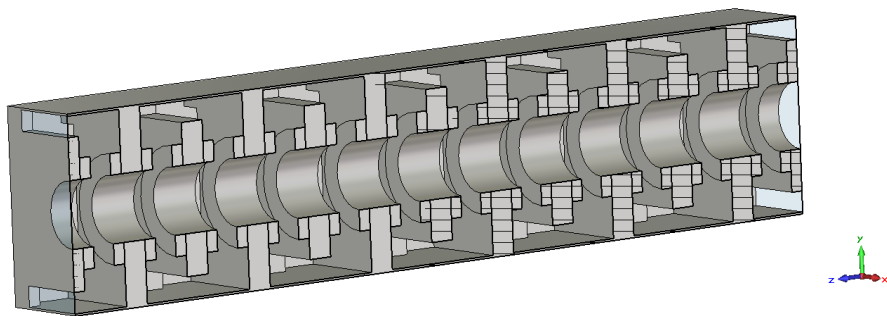
фазовая скорость пространственных гармоник
$$v_{\text{фр}} = \frac{\omega}{\beta_0 + \frac{2\pi p}{L}} = v_{\text{ф0}} \frac{L}{L + \lambda_{\text{змп}}}$$

групповая скорость пространственных гармоник

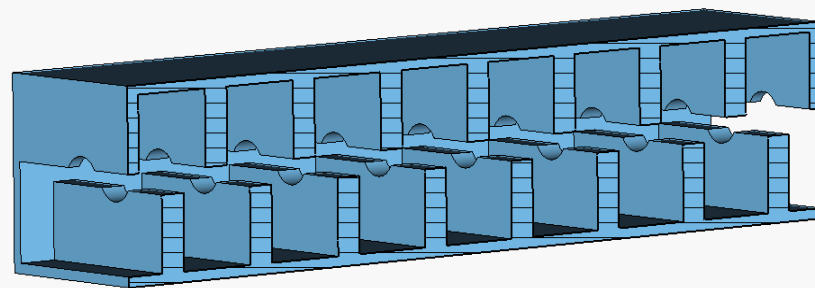
$$v_{\text{грр}} = \left(\frac{d\beta_p}{d\omega} \right)^{-1} = \left(\frac{d\beta_0}{d\omega} \right)^{-1} = v_{\text{гр0}}$$



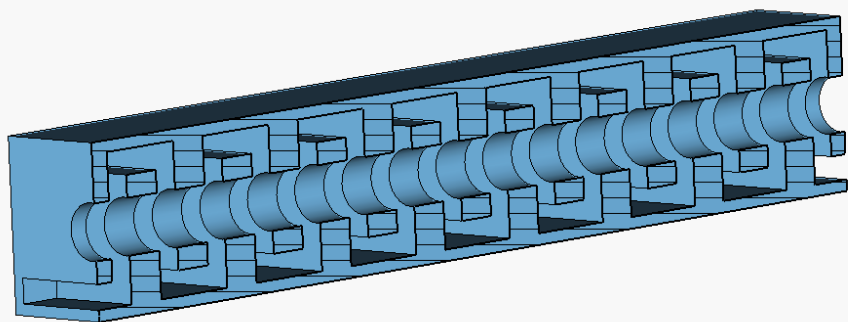
дисперсионные кривые, построенные для пространственных гармоник в периодической замедляющей системе с положительной дисперсией, соответствующей полосовому фильтру



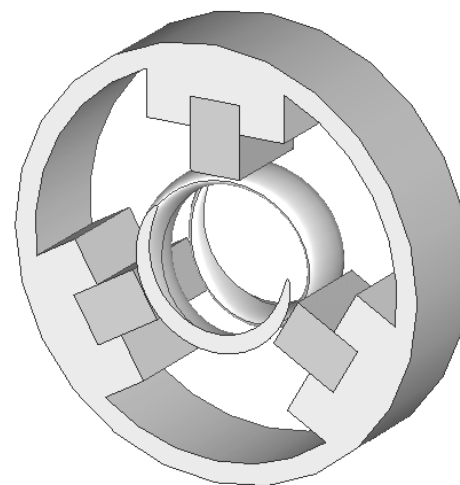
(a)



(б)



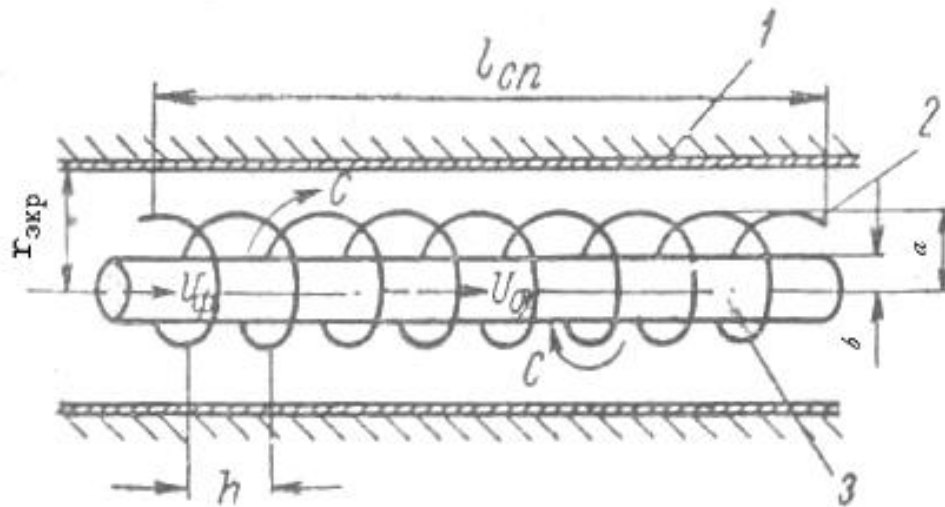
(в)



(г)

а) – резонаторная ЗС типа Millitron; б) – гребенчатая ЗС (Staggered double vane); в) – петляющий волновод
г) – спиральная ЗС

Спиральная замедляющая система

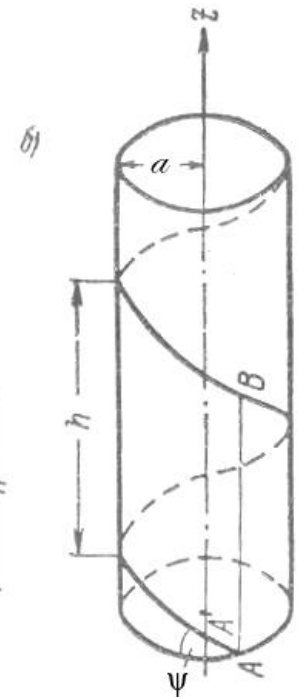
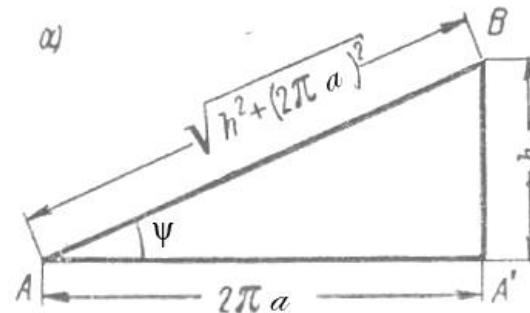


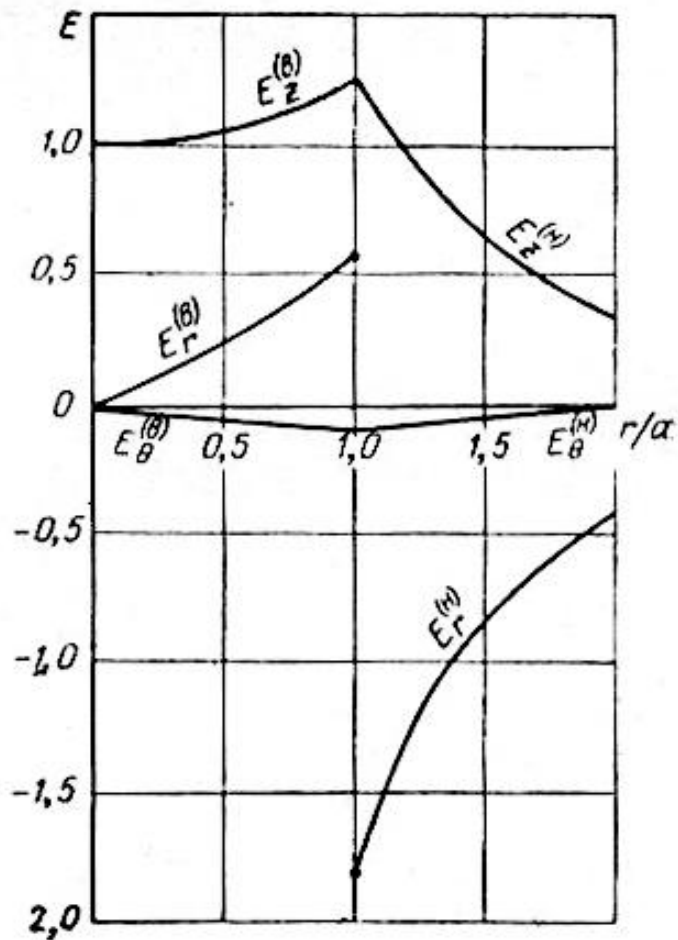
Спиральная коаксиальная
линия

- 1 – металлический экран;
- 2 – спираль;
- 3 – электронный поток

Спирально-проводящий цилиндр

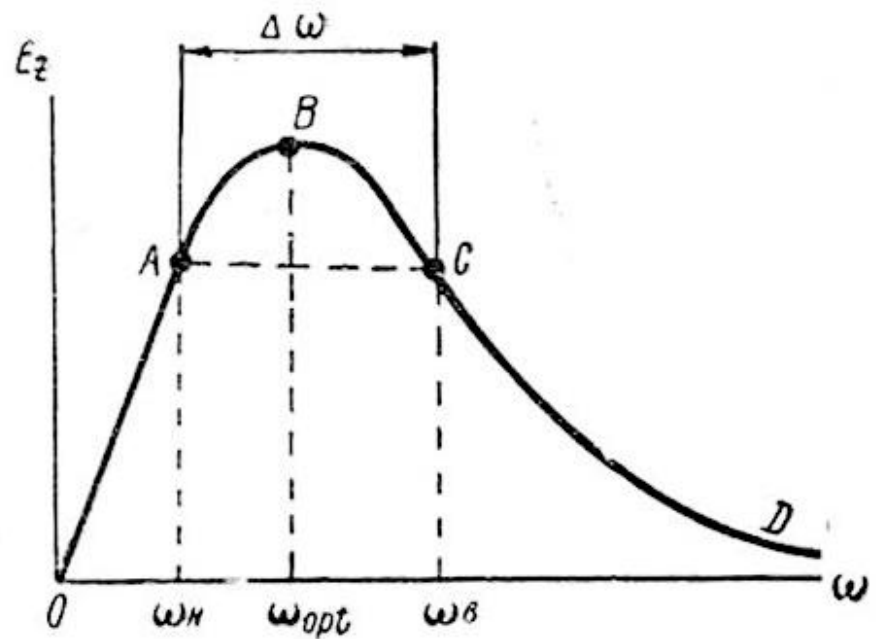
h – шаг спирали, a – средний радиус
спирали



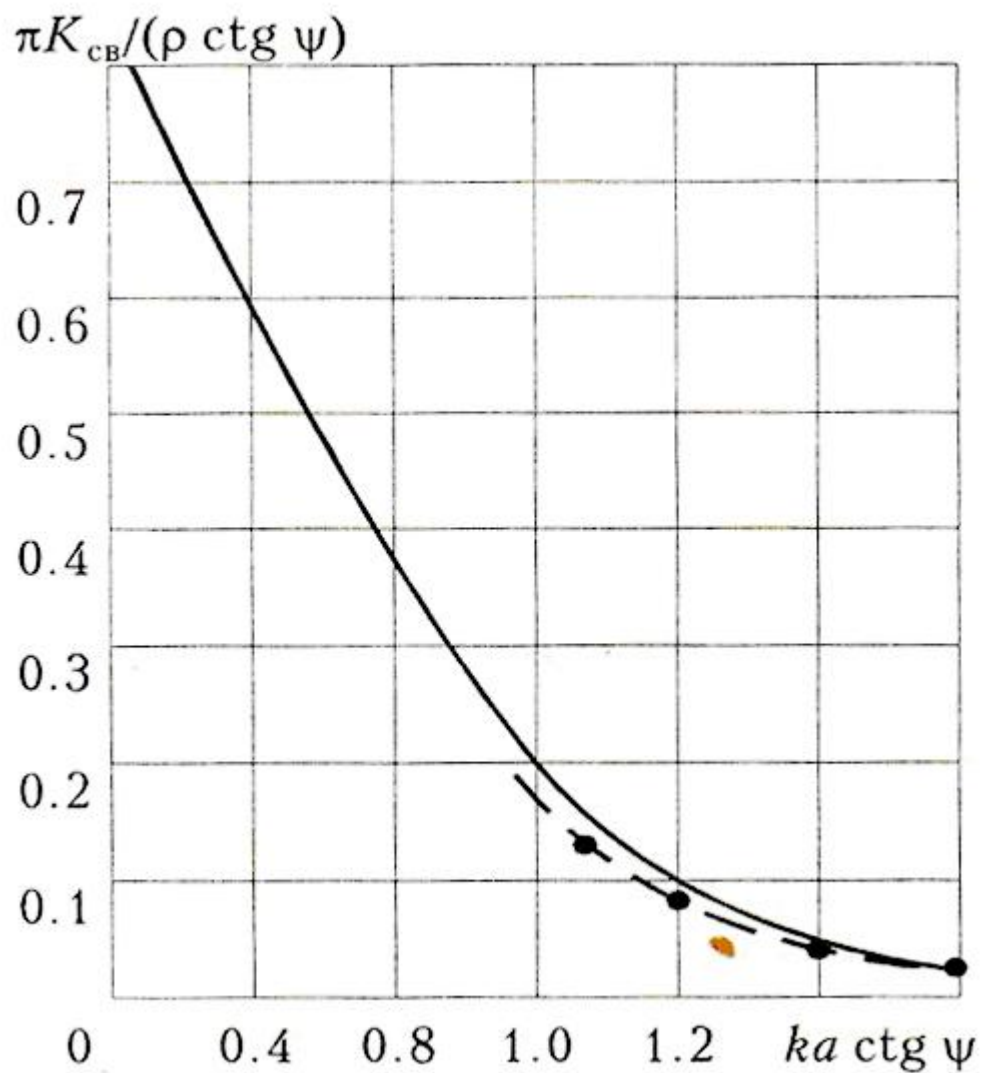


Распределение электрического поля
вдоль радиуса

(E_z , E_r , E_θ – продольная,
радиальная и азимутальная
компоненты напряженности
электрического поля)



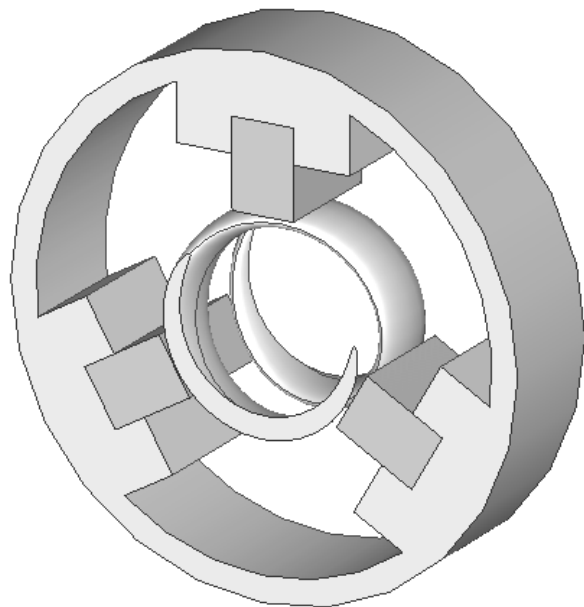
Характер зависимости продольной
составляющей электрического поля на
оси замедляющей системы от частоты



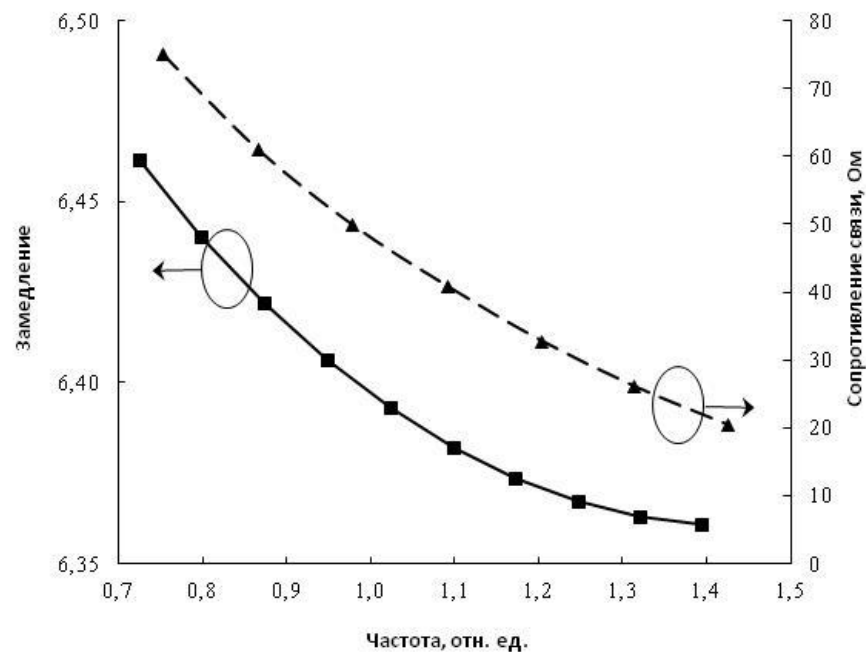
Зависимость от $ka \operatorname{ctg} \psi$ относительного значения
сопротивления связи спирально-проводящего цилиндра

Коэффициент замедления
рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{c}{v_{\phi}} = \frac{\beta}{k} = \frac{\Delta\varphi \cdot c}{h \cdot 2\pi f},$$

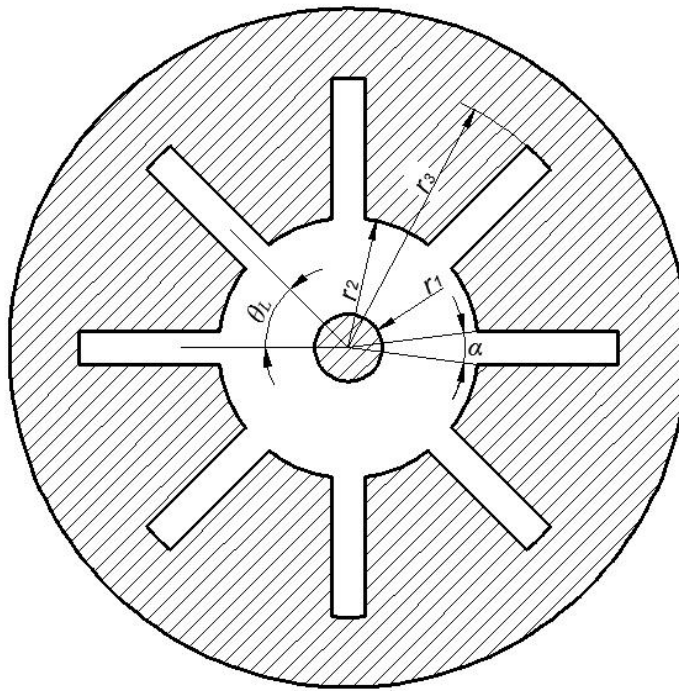


Трехмерная модель спиральной
замедляющей системы



Рассчитанные зависимости коэффициента
замедления и сопротивления связи
спиральной замедляющей системы от
частоты

Замедляющие системы, замкнутые в кольцо



Сечение замедляющей системы
магнетрона

$$M \varphi_{Ln} = M \varphi_{L0} + M 2\pi n = 2\pi(q + nM)$$

q – индекс вида колебаний

n – номер пространственной гармоники

M – количество щелей кольцевой замедляющей системы