

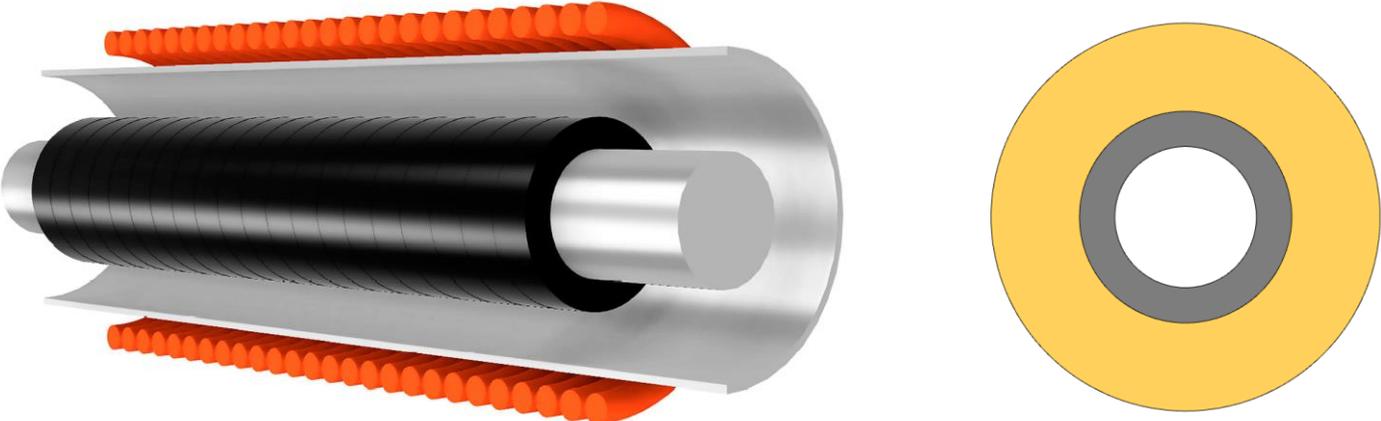
Особенности дисперсии основной волны в ферритовых коаксиальных линиях, вызванные наличием двух разнородных диэлектрических слоёв

Докладчик: Патраков Виталий Евгеньевич, аспирант 1 года обучения

Руководитель: Рукин Сергей Николаевич, д.т.н., чл.-корр. РАН

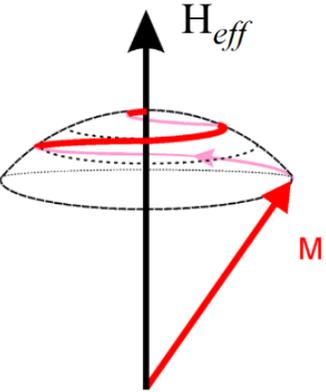
Лаборатория импульсной техники

Ферритовая коаксиальная линия с продольным подмагничиванием

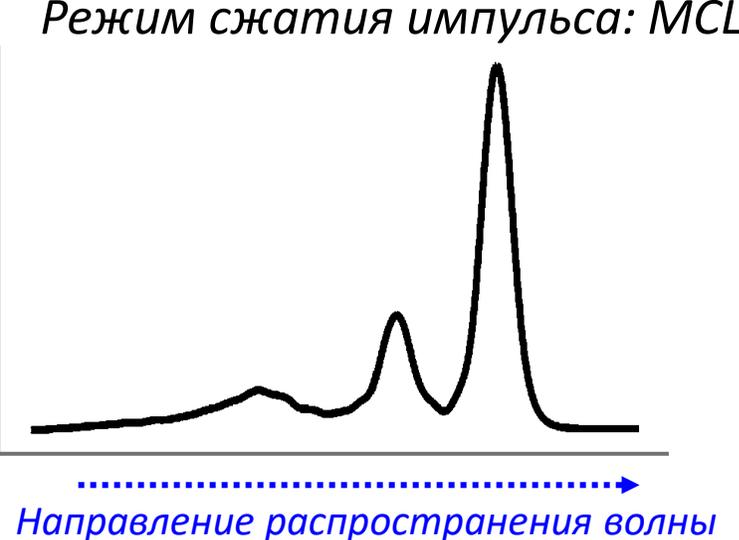
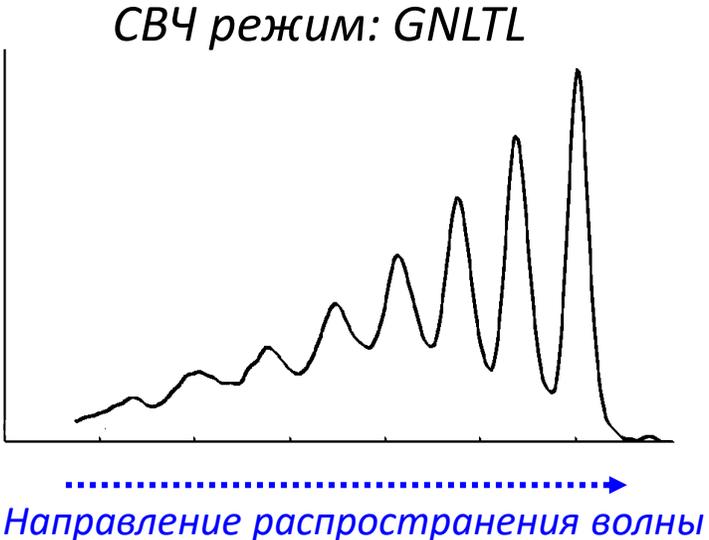


- **Соленоид**
- **Феррит**
- **Изоляция**

Соленоид: продольное поле H_z
 Питающий импульс: азимутальное поле H_θ → Эффективное поле $H_{eff} = \sqrt{H_\theta^2 + H_z^2}$

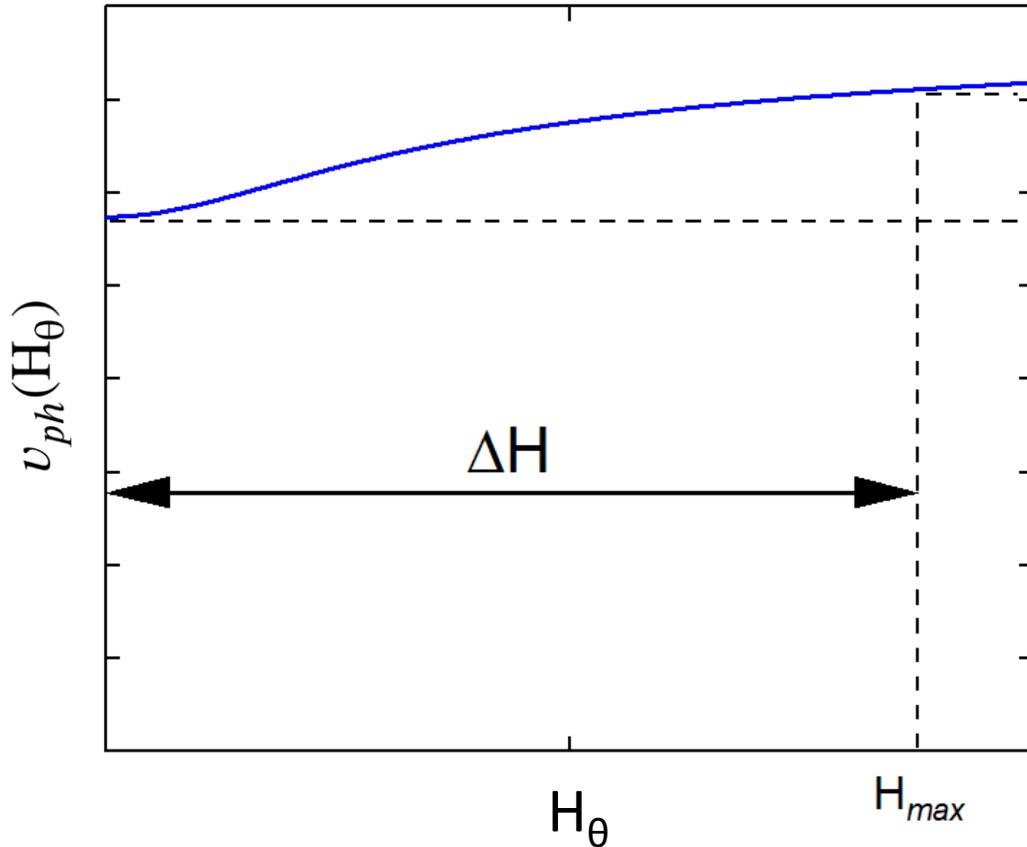


Прецессия намагниченности

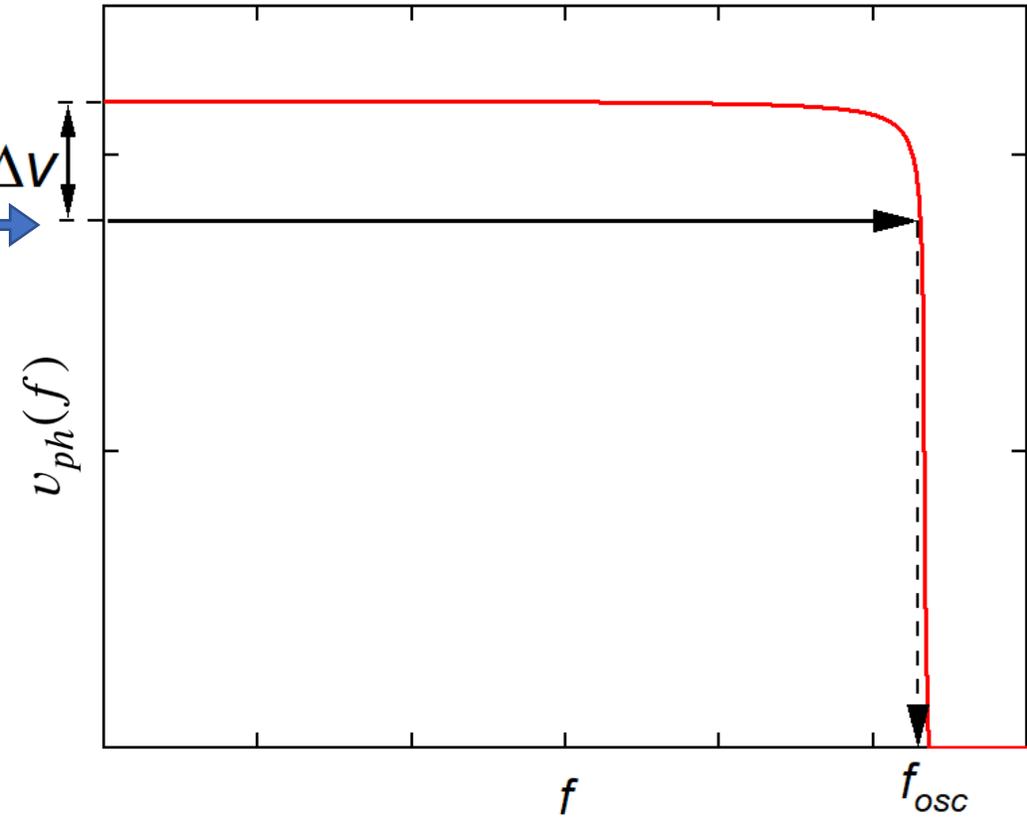


Генерация колебаний: гиромагнитный механизм

Нелинейные магнитные свойства ферритовой линии



Гиромагнитные дисперсионные свойства ферритовой линии



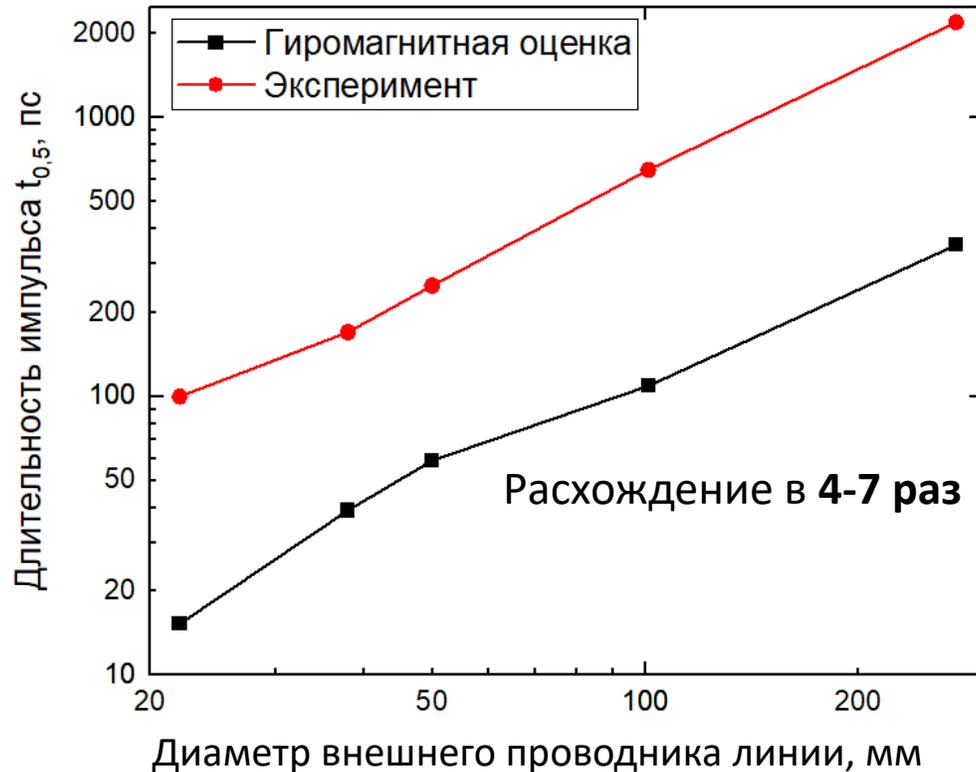
Частота генерации:
$$f_{osc} = \frac{\gamma \mu_0 H_\theta}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{(S_f/S_{line}) \cdot M_s}{H_{eff}}} \approx f_{Larmor} \approx 35 \frac{\text{МГц}}{\text{кА/м}} \cdot H_{eff}$$

Проблемы гиромагнитного механизма в MCL

Оценка длительности импульса по f_{osc} :

$$t_{0,5} \approx 0,5 \cdot \frac{1}{f_{osc}}$$

Номер линии	1	2	3 (D = 38 мм)	4 (D = 22 мм)
$t_{0,5 \text{ osc}}$	350	109	39	15
$t_{0,5 \text{ exp}}$	2200	650	170	100

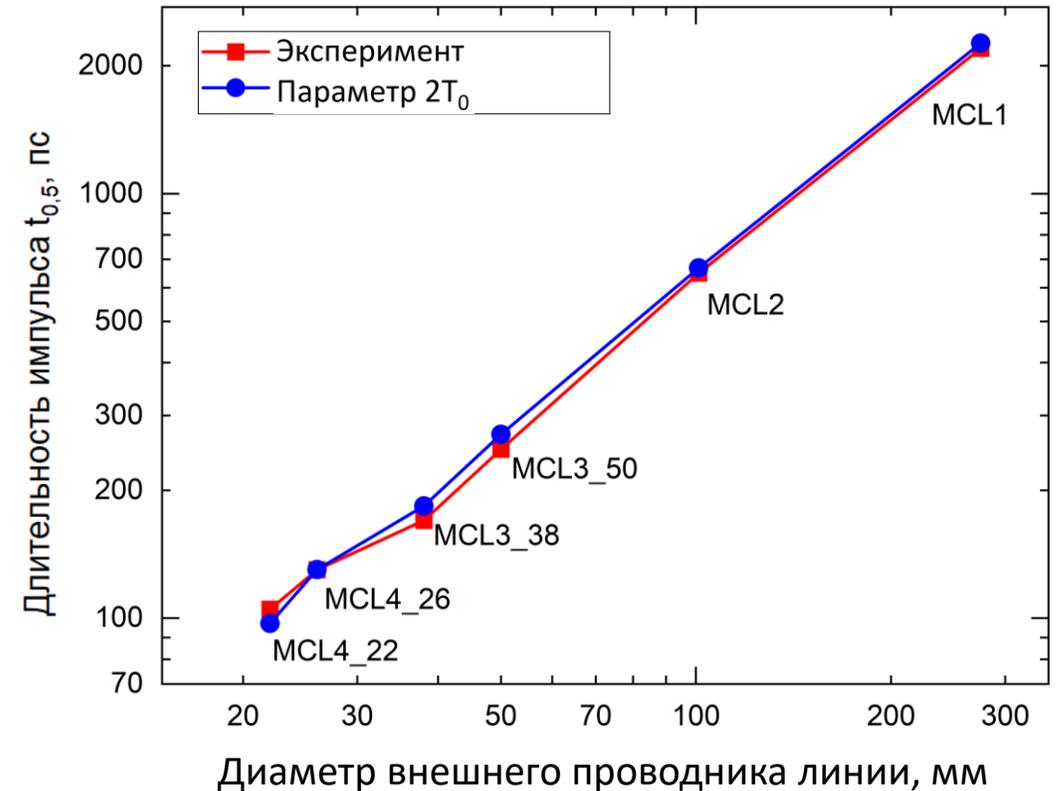


?

Экспериментальные наблюдения:

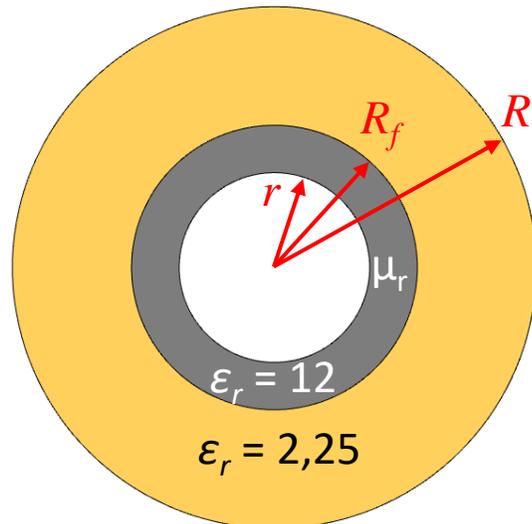
$$t_{0,5} \approx 2 \cdot T_0 = 2 \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_{oil} \cdot \mu_{oil} \cdot \frac{(D-D_{ferr})}{2}} + \sqrt{\varepsilon_{ferr} \cdot \mu_{ferr} \cdot \frac{(D_{ferr}-d)}{2}}}{c}$$

Номер линии	1	2	3 (D = 38 мм)	4 (D = 22 мм)
$t_{0,5 \text{ exp}}$	2200	650	170	100
$2T_0$	2260	670	183	97

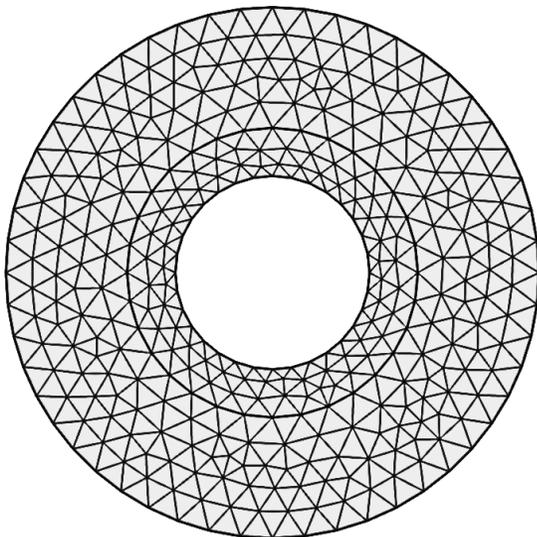


?

Анализ дисперсии основной волны: численная модель



Сетка для
численного анализа



$$\omega = 2\pi \cdot f_0; \quad f_0 = [f_1, f_2, \dots, f_{max}]$$

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{E}} + \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \epsilon_r \cdot \mu_r \cdot \dot{\mathbf{E}} = 0$$

$$\dot{\mathbf{E}}(x, y, z) = \dot{\mathbf{E}}(x, y) \cdot e^{-i \cdot \beta \cdot z}$$

$$\frac{\partial^2 \dot{\mathbf{E}}(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{E}}(x, y)}{\partial y^2} + \dot{\mathbf{E}}(x, y) \left(\frac{\omega^2}{c^2} \cdot \epsilon_r \cdot \mu_r - \beta^2 \right) = 0$$

Считаем, что
феррит насыщен: $\mu_r = \mu_{sat} = \left(1 + \frac{M_s}{H_{eff}} \right) \sim 1$

$$\text{ГУ: } \rho = r, \rho = R : \mathbf{n} \times \dot{\mathbf{E}} = 0$$

Численный анализ методом
конечных элементов: поиск
собственных значений –
волновых чисел β

COMSOL Multiphysics

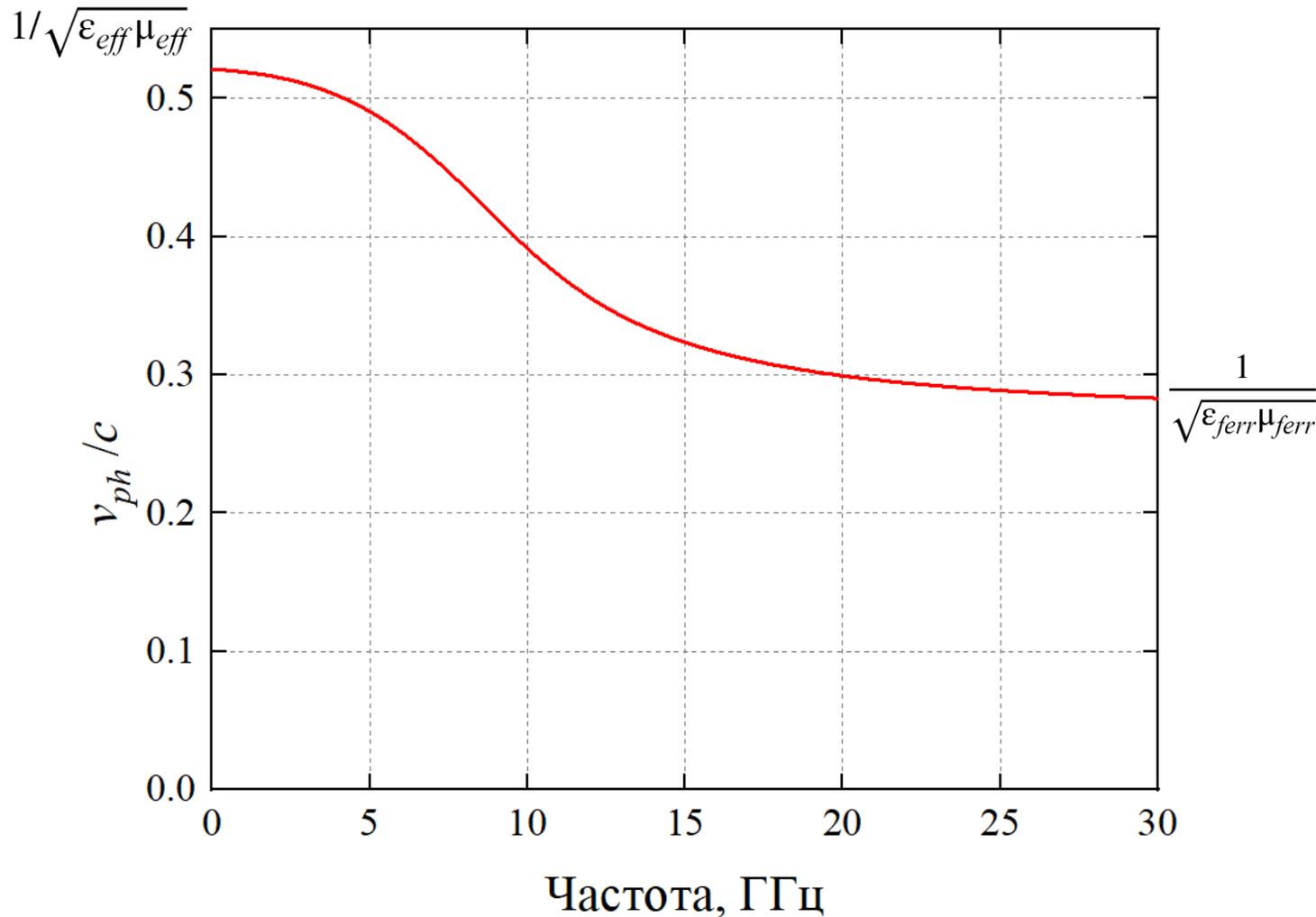
$$\beta(f_0)$$

$$v_{ph} \equiv \frac{\omega}{\beta}$$

$$v_{ph}(f_0) = \frac{2\pi \cdot f_0}{\beta(f_0)}$$

Результаты моделирования

Дисперсия и класс основной волны

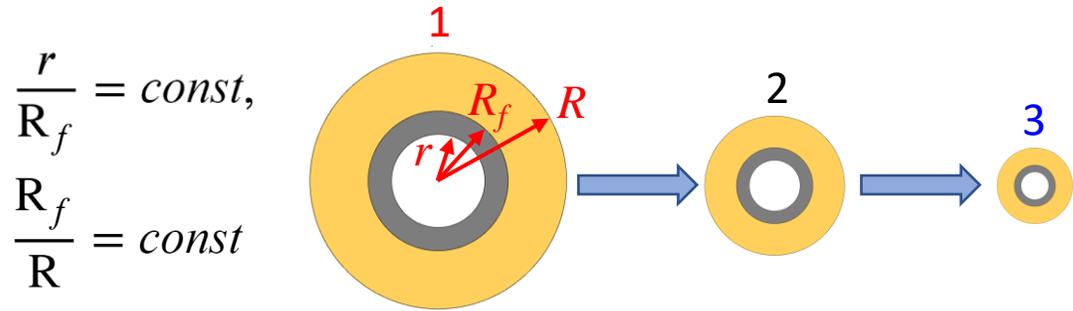


Анализ:

- Основная волна – не ТЕМ (как предполагается в традиционной теории)
- На низких частотах v_{ph} стремится к скорости волны ТЕМ, усредненной между 2 слоями
- Высокочастотные волны концентрируются в слое с большей величиной произведения $(\epsilon\mu)$ - эффект диэлектрического волновода
- Анализ полей показывает, что волна относится к классу ТМ (имеет компоненты E_r , E_z , и H_θ)
- В литературе волны такого типа обозначаются TM_{00} (E_{00}), они характерны для направляющих систем с несколькими диэлектриками в сечении (линии поверхностной волны (ЛПВ), микрополосковые линии)

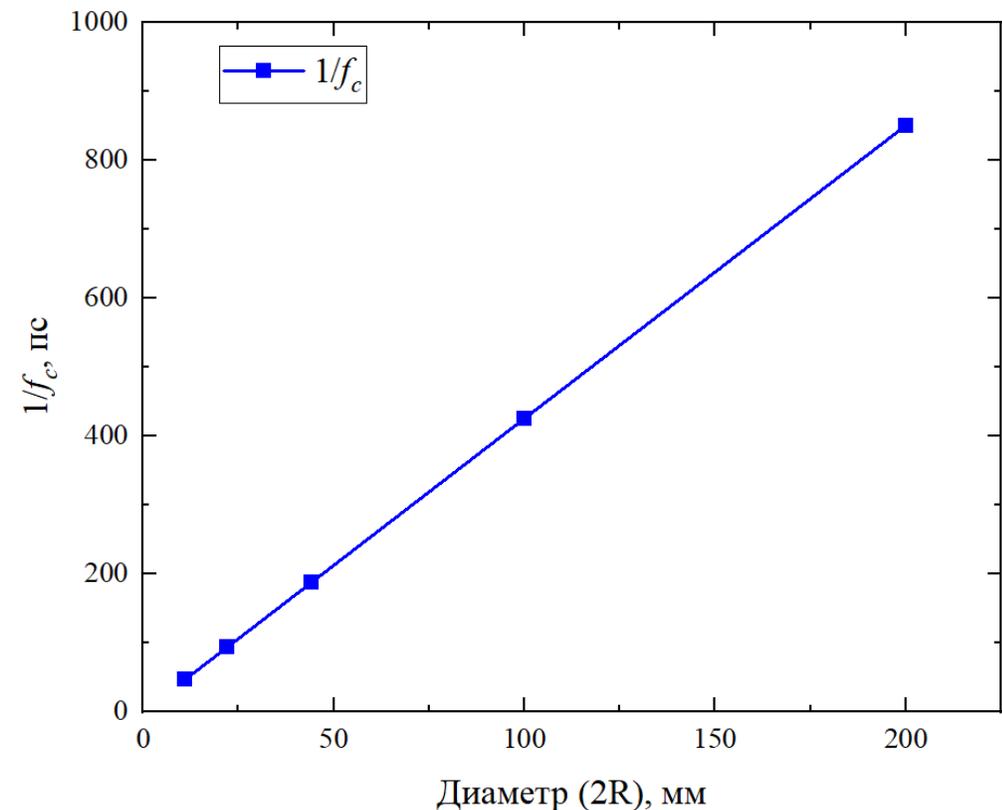
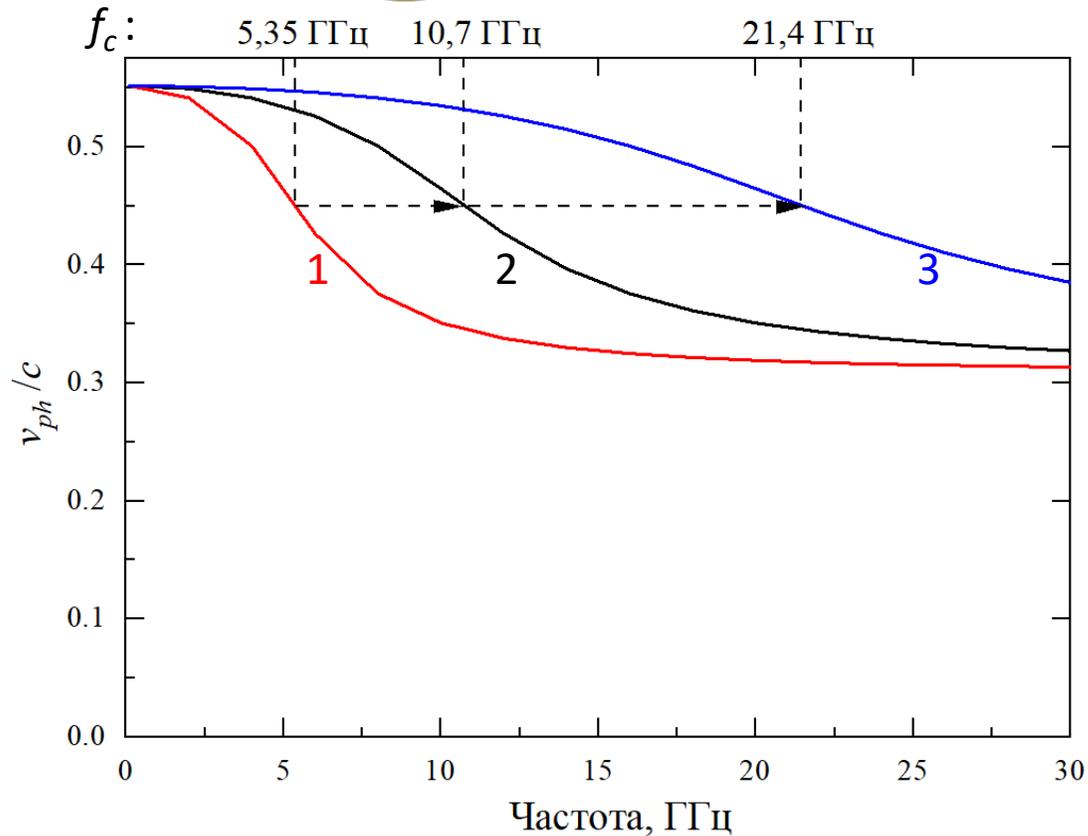
Результаты моделирования

Влияние пропорционального изменения поперечных размеров линии



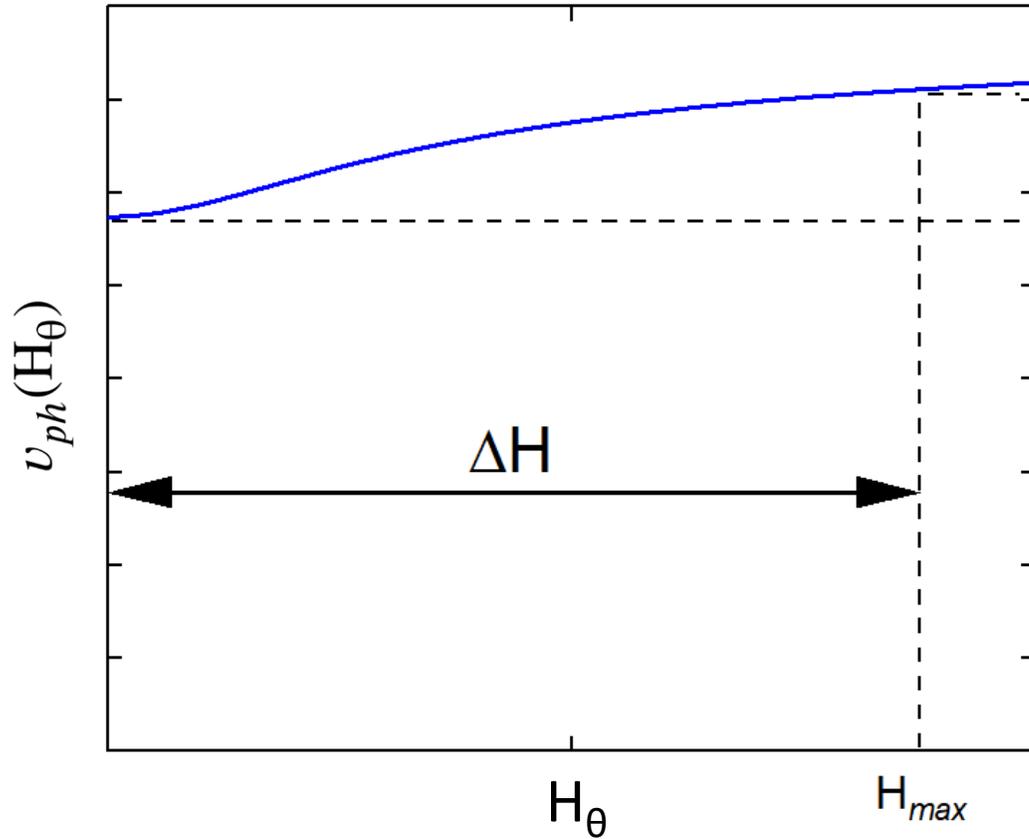
$$\frac{f_{c,2}}{f_{c,1}} = \frac{R_1}{R_2}$$

Связь дисперсионной характеристики с поперечными размерами, характерная для линий с поперечным резонансом (волноводы, ЛПВ и т.п.)

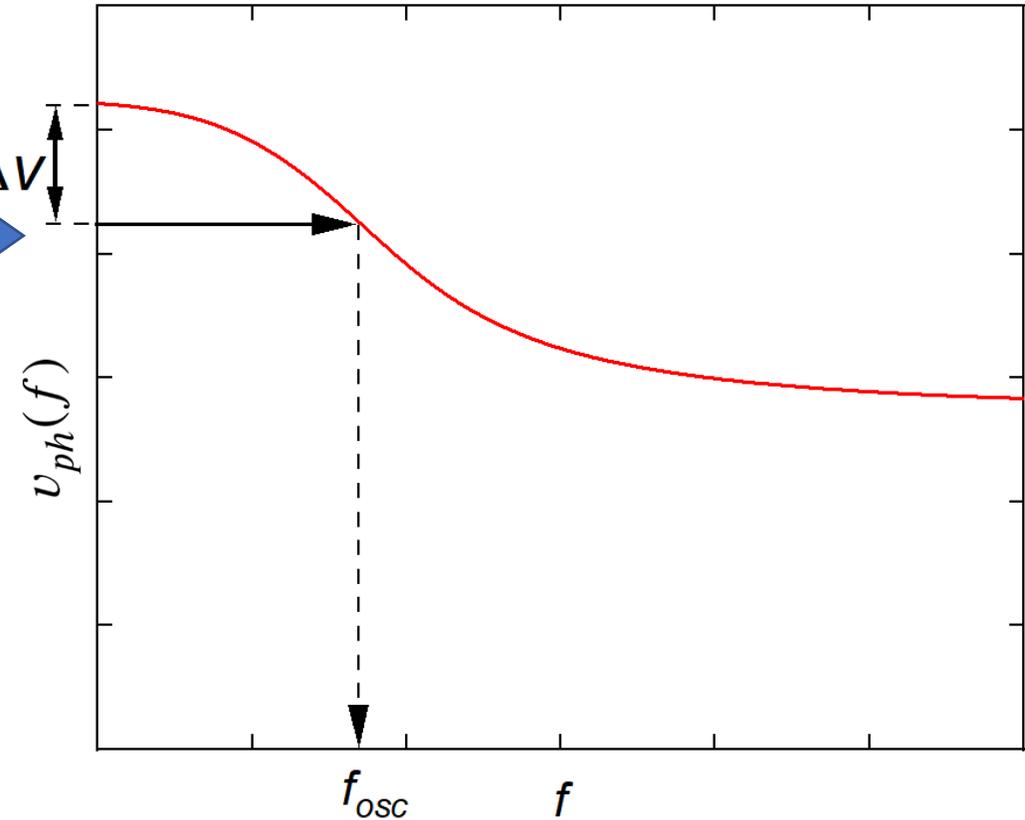


Генерация колебаний: учёт дисперсии волны TM_{00}

Нелинейные магнитные свойства линии

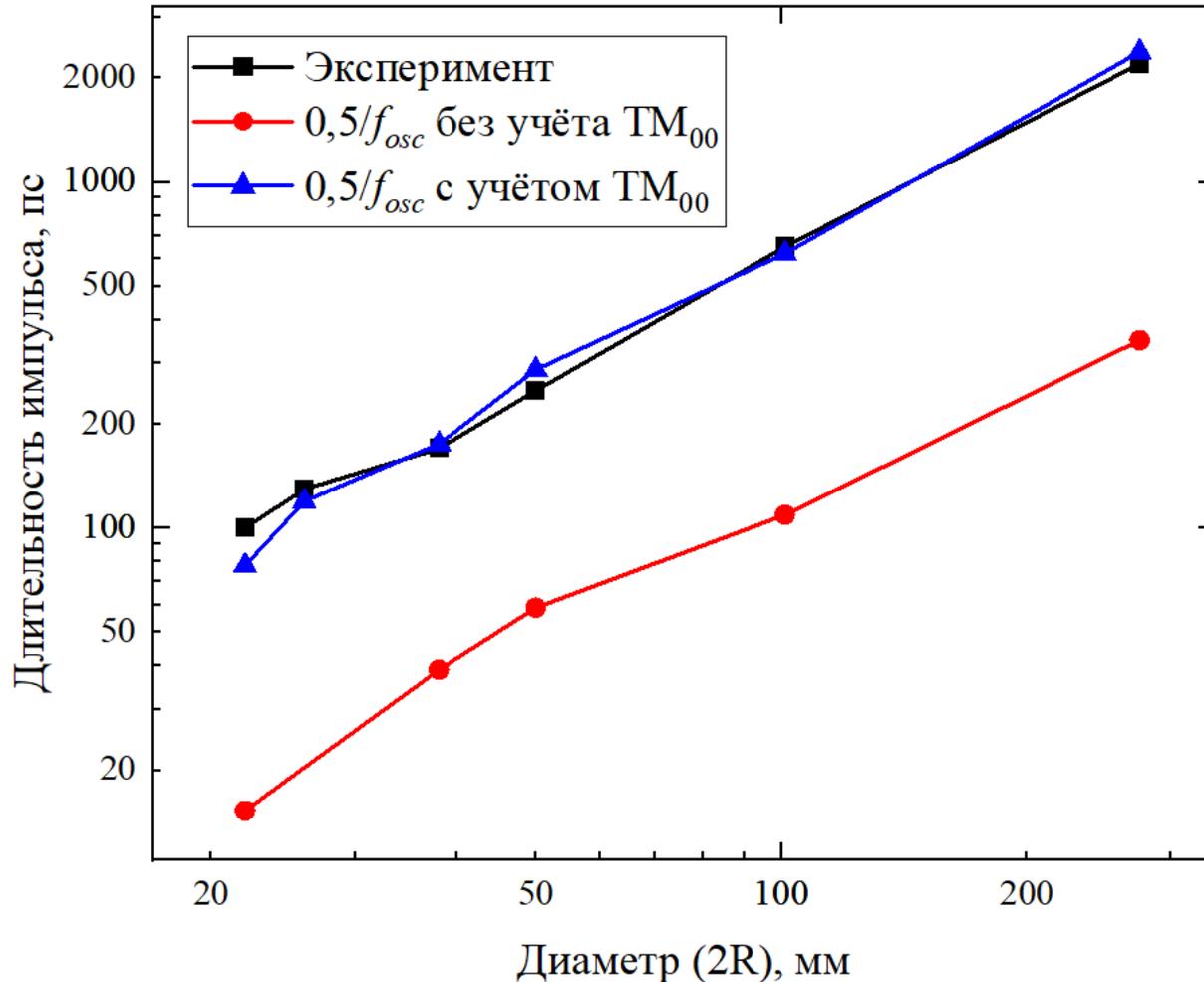


Дисперсионные свойства линии с волной TM_{00}



Частоту генерации f_{osc} находим по полученной численно характеристике

Генерация колебаний: оценка с учётом волны TM_{00}



- Согласие оценочной методики и эксперимента при учёте волны TM_{00} значительно улучшилось
- Возможные источники расхождений – неточность оценки нелинейности, различие в значениях свойств феррита от партии к партии
- Частота генерируемых колебаний в ферритовых линиях двухслойной конструкции (оценка):

$$f_{osc} = \min [f_{Larmor}, f_{TM00}] = \min \left[\frac{\gamma \mu_0 H_{eff}}{2\pi}, \frac{1}{4 \cdot T_0} \right]$$

- Критерий перехода в режим с дисперсией волны TM_{00} :

$$H_{eff} > \frac{2\pi}{4\gamma\mu_0 \cdot T_0} \approx \frac{7140 \left[\frac{\text{кА}}{\text{м}} \cdot \text{пс} \right]}{T_0 [\text{пс}]}$$

Выводы

1. Основной волной в коаксиальной линии с ферритовым и изоляционным слоями является не TEM-волна, а дисперсная волна TM_{00} , что является следствием различных значений произведения ($\epsilon\mu$) этих слоёв.
2. Существование в линии волны TM_{00} объясняет совпадение экспериментальной длительности импульса и удвоенного поперечного времени пробега волны. Также существование этого типа волны объясняет значительное расхождение между длительностью импульса и её оценкой по традиционной методике расчёта, которая учитывает только дисперсию, вызванную гиромагнитными процессами.
3. Показано, при каких условиях осуществляется переход от механизма генерации сигнала с гиромагнитной прецессией к механизму генерации с волной TM_{00} .

Спасибо за внимание!