



# **Поглощение волн «шепчущей галереи»**

**М.А.Миронов**

**Акустический институт  
им. акад. Н.Н.Андреева, г. Москва**

**СЕАА, Светлогорск, 17 – 22 сентября 2018 г.**

## **Содержание:**

- Что такое волны «шепчущей галереи»?
- Вентилятор – источник волн «шепчущей галереи»
- Оптимизация ЗПК - рецепт
- Примеры оптимальных ЗПК для волн «шепчущей галереи»
- Обсуждение

# Волны «шепчущей галереи» в соборе Святого Павла, Лондон Рэлей – 1876 г. и 1910 г.



Купол собора, вид снизу

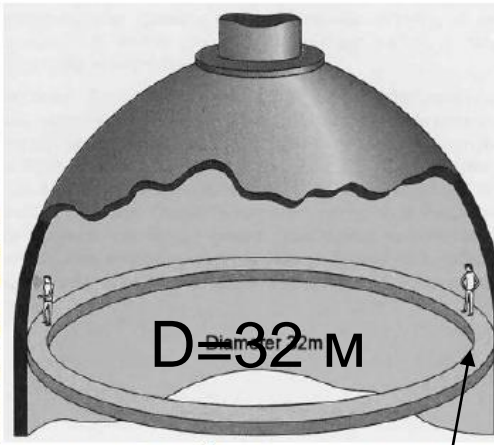


Схема купола с галереей



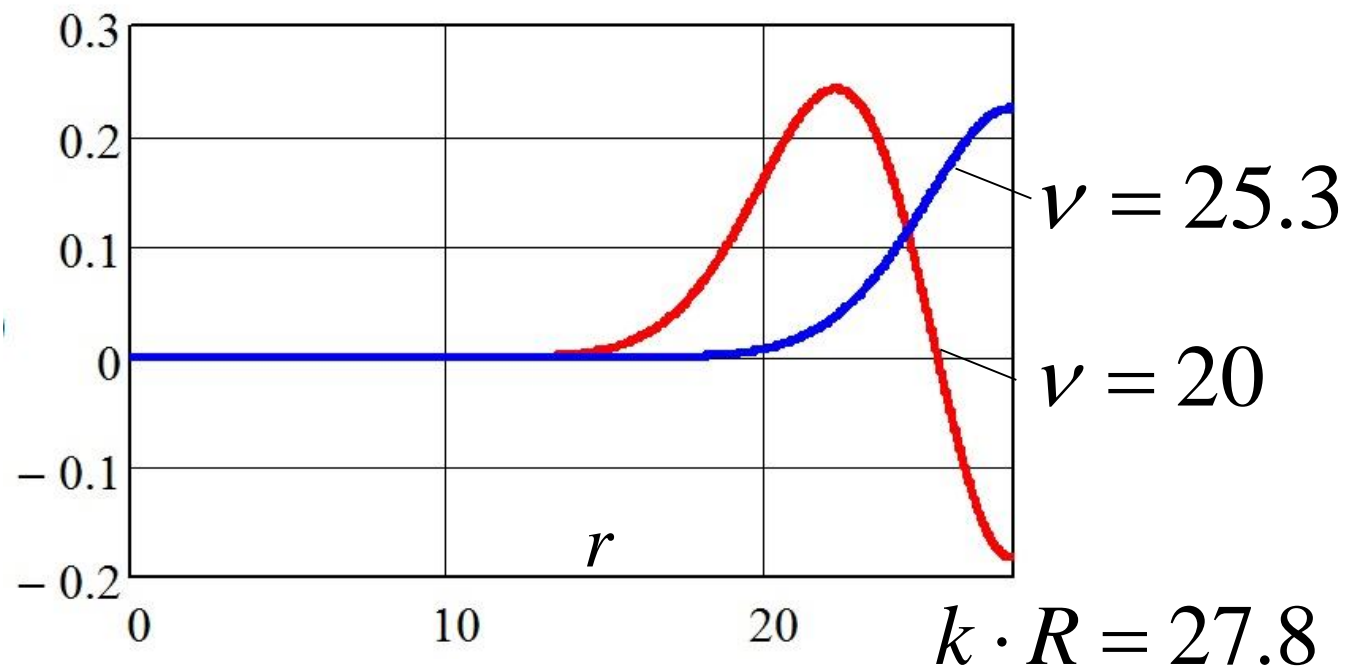
Акустическое поле в галерее

$$p_\nu(r) = A_\nu \cdot J_\nu(k_n r) \cdot e^{i \cdot \nu \cdot \theta}$$

$$k_n \Rightarrow dJ_\nu(k_n r) / dr \big|_{r=R} = 0$$

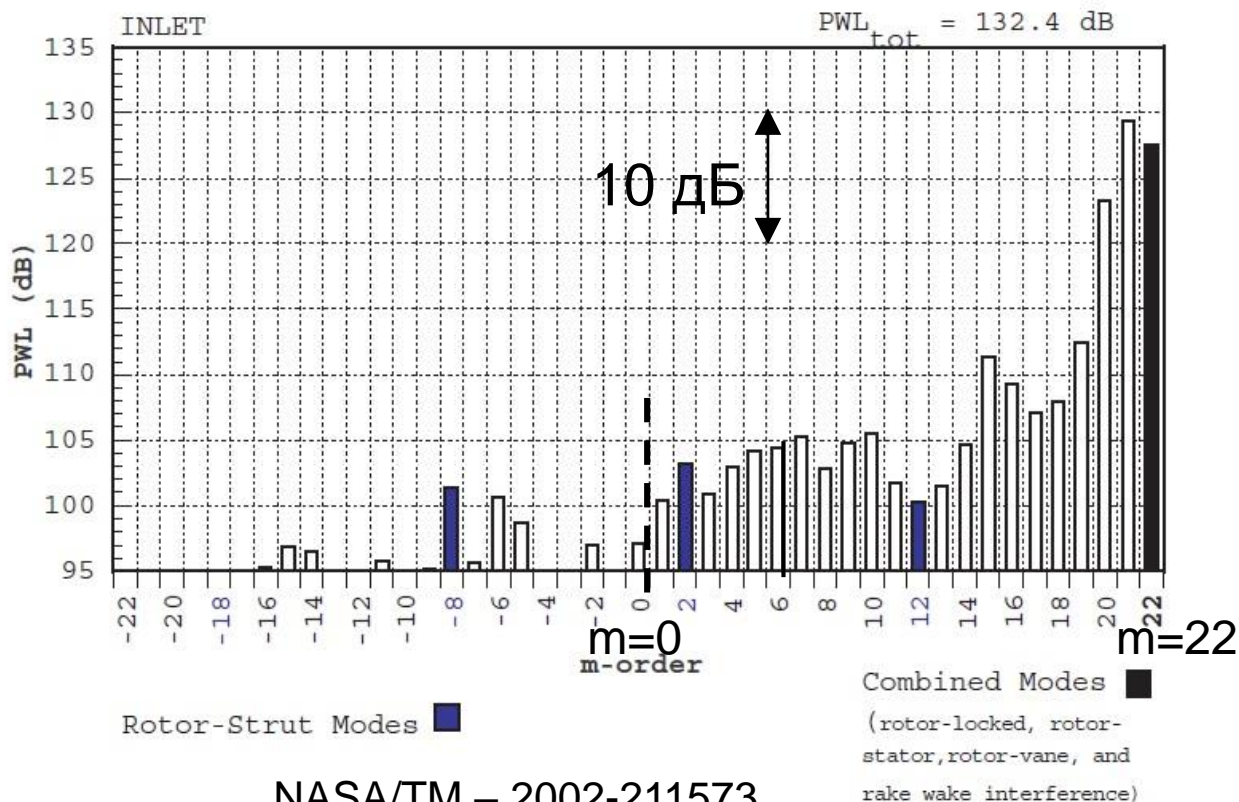
$$\nu \sim k \cdot R \quad - \text{волны «шепчущей галереи»}$$

## Радиальное распределение давления в волнах «шепчущей галереи»



# Вентилятор – источник волн «шепчущей галереи»

Вентилятор - много лопаток. Соответственно, угловые номера силы, генерирующие звук, большие. Линейные скорости вращения, близкие к скорости звука.



NASA/TM – 2002-211573

Duct Mode Measurements on TFE731 Full Scale Engine. D.Sutcliff, K. Konno, L.Heidelberg

<http://gltrs.grc.nasa.gov/GLTRS>

Как бороться с вращающимися модами? Нужна оптимизация ЗПК.  
Что понимать под оптимизацией?

Минимум суммарной излучаемой мощности

Минимум излучаемой мощности на некоторой частоте

Минимум EPNL дБ в трех точках

**Максимум поглощения при отражении от границ**

..... что-то еще?

# Как оптимизировать?

**Слияние мод - В.Ж.Тестер**. The optimization of modal sound attenuation in ducts in the absence of mean flow J. Sound Vib. 27, 477-513, (1973).

**Неоднородный импеданс** – смотреть, не получится ли лучше, чем при однородном импедансе - L.M.B.C. Campos and, J.M.G.S. Oliveira. On the optimization of non-uniform acoustic liners on annular nozzles J. Sound Vib. 275, 557-576, (2004)

**Задача оптимизации в строгой постановке** (с минимизацией целевой функции) D. Stanescu, L. Mathelin and M.Y Hussaini. Optimal acoustic design of fan inlets for noise radiation. 9th AIAA/CEAS AIAA 2003

“In order to ensure aero-engine liners are optimised, **improved duct propagation prediction models are required**, in particular for 3D intakes (including non-linear propagation effects) and for 3D bypass ducts (including propagation through the jet shear layer)”

**In “Acoustic liners for modern aero-engines.” Andrew Kempton**

Chief Noise Specialist, Rolls-Royce, Visiting Professor, University of Southampton  
(internet source: CEAS\_ASC\_XNoise\_FV\_K1 Kempton)

Ни один из подходов не реализован ни практически, ни даже теоретически. Оптимум не найден.

В докладе СЕАА 2010 (см. также Акуст. журн. 2011, **57**, 6) предложен простой, однозначный, конструктивный (в математическом смысле – с реализуемым алгоритмом построения) подход к оптимизации.

Формулировка подхода:

**Поверхность, на которую падает звук, должна его поглощать полностью (остается только падающее поле).**



Рецепт:

$$p(\vec{r}, \omega) = p_0(\vec{r}, \omega) + p_r(\vec{r}, \omega)$$



$$Z(\vec{r}, \omega) \Big|_{r \in S} = \frac{i\omega\rho \cdot p_0(\vec{r}, \omega)}{\partial p_0(\vec{r}, \omega) / \partial n} \Big|_{\vec{r} \in S}$$

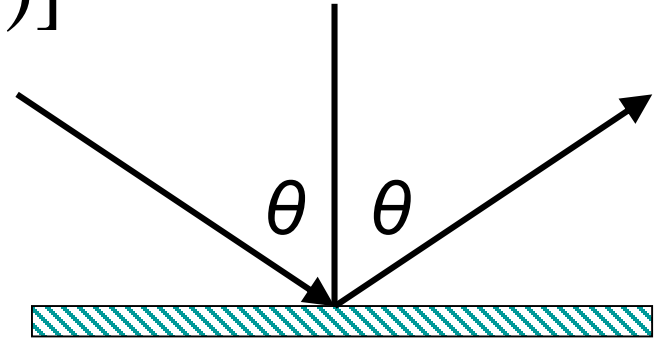
**При таком импедансе границы падающее поле поглощается.**

# Иллюстрации на простых примерах

## 1. Падение плоской волны на импедансную плоскость

$$p(x, z) = A \exp[i(\xi x - \sqrt{k^2 - \xi^2} z)]$$

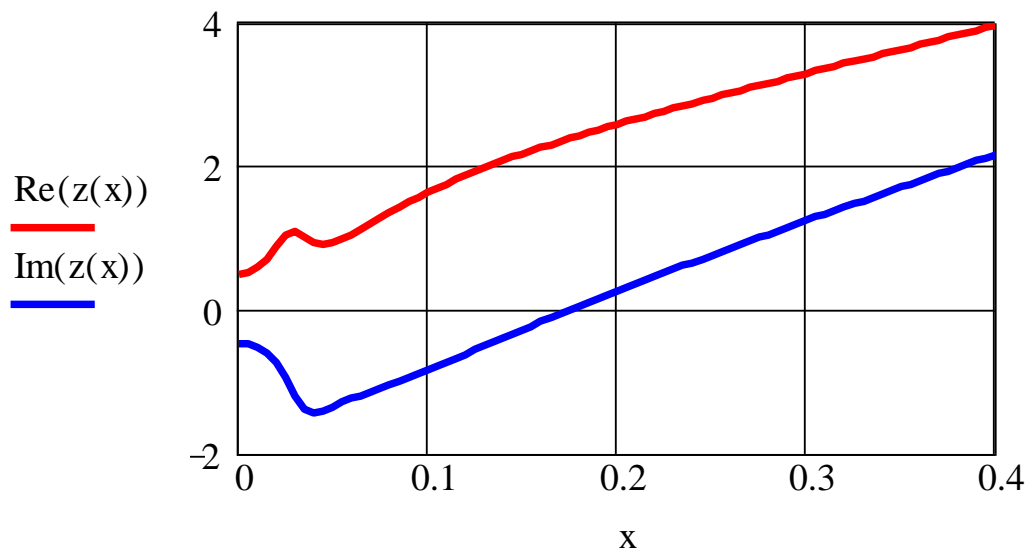
$$v_z(x, z) = \frac{i\sqrt{k^2 - \xi^2}}{-i\omega\rho} A \exp[....]$$



$$Z_{opt}(x, z=0) = -\frac{-i\omega\rho}{i\sqrt{k^2 - \xi^2}} = \frac{\omega\rho}{\sqrt{k^2 - \xi^2}} = \frac{\rho c}{\cos \theta}$$

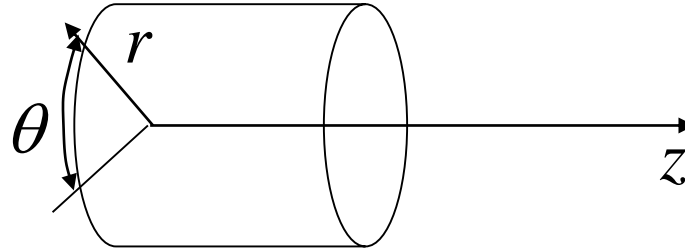
# Иллюстрации на простых примерах

## 2. Два точечных источника



$c=340\text{м/с}$ ,  $f=1500\text{ Гц}$ , . По оси абсцисс координата вдоль плоскости (в метрах).  $x_1=0.0\text{м}$ ,  $z_1=0.02\text{м}$ ;  $x_2=0.07\text{м}$ ,  $z_2=0.13\text{м}$ ;  $A_1=1$ ,  $A_2=0.8$ .

## Более близкий к аэроакустике пример



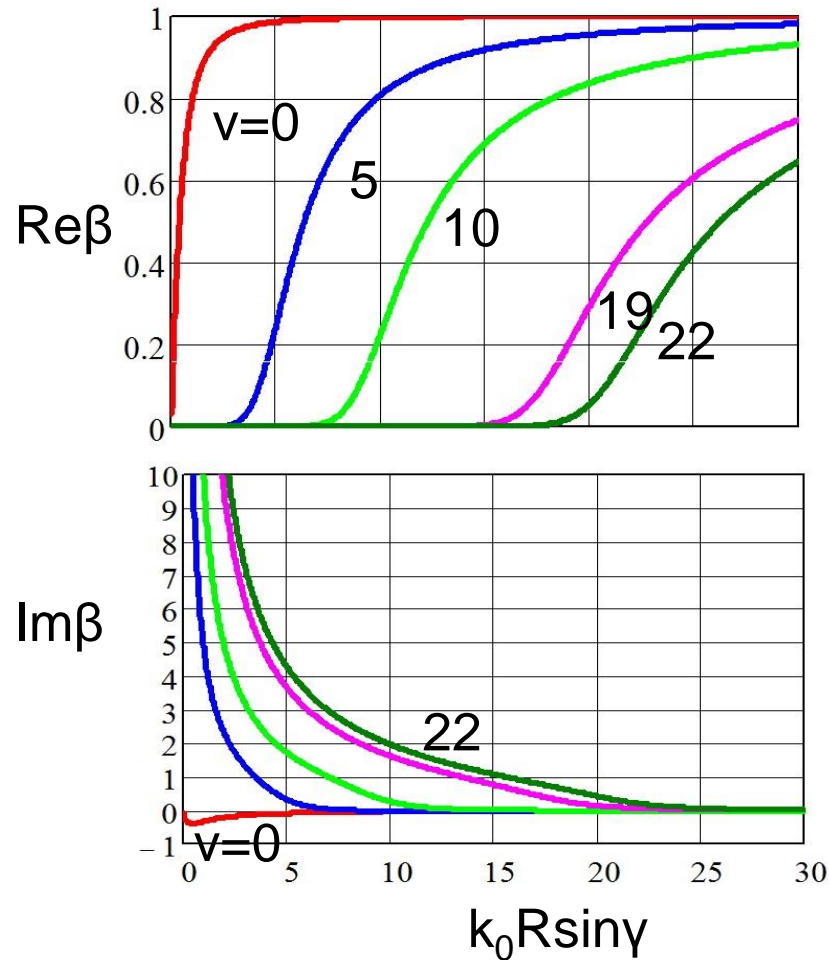
Поле давления в цилиндрической системе координат  $z, r, \theta$

$$p(z, r, \theta) = \iint_{\nu, k_z} A(\nu, k_z) \cdot H_\nu(r \cdot \sqrt{k_0^2 - k_z^2}) \cdot e^{ik_z z + i \cdot \nu \cdot \theta} d\nu \cdot dk_z$$

$A(\nu, k_z)$  - из эксперимента, или из модели

# Цилиндрическая расходящаяся волна, оптимальная проводимость

$$\beta(\nu, k_0 R \sin \gamma) \frac{\rho c}{\sin \gamma} = \left[ \frac{-H_{\nu+1}^{(1)}(k_0 R \sin \gamma)}{H_{\nu}^{(1)}(k_0 R \sin \gamma)} + \frac{\nu}{k_0 R \sin \gamma} \right]$$

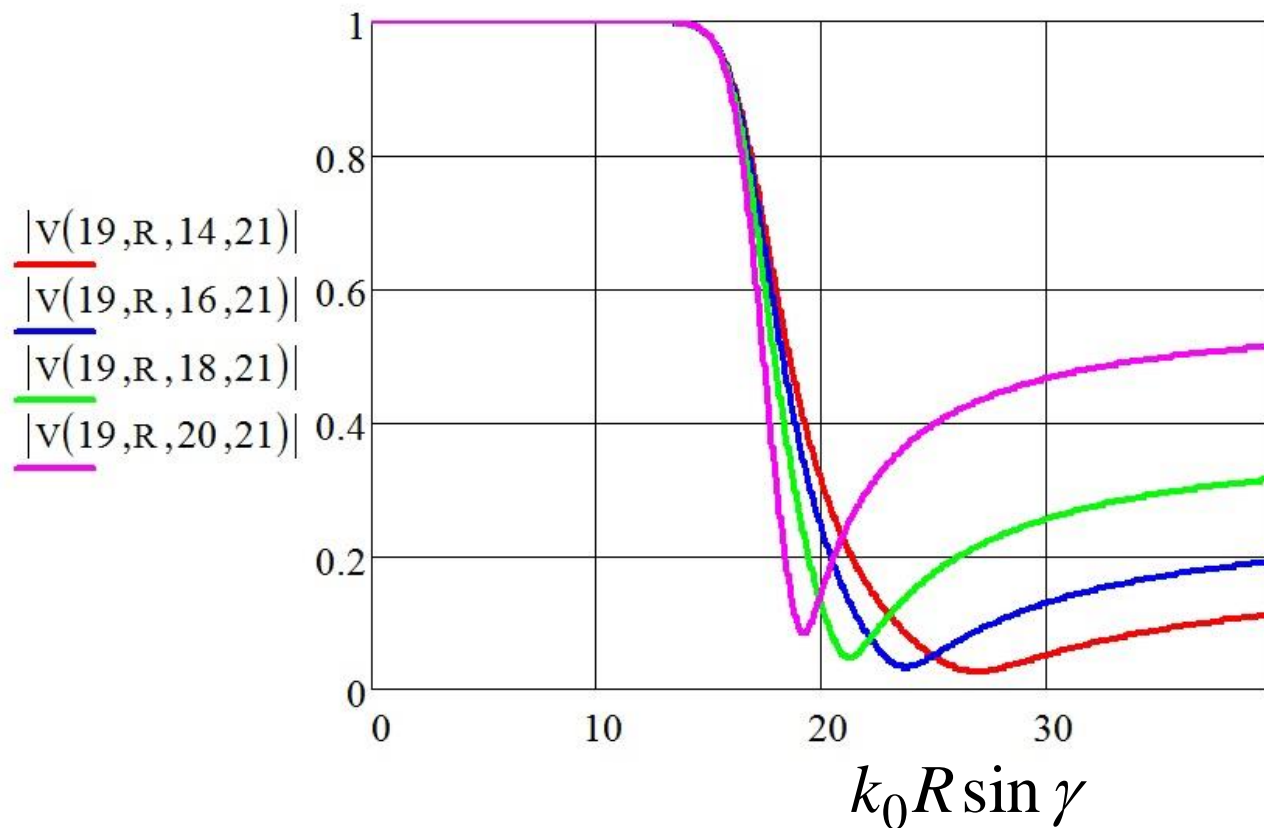


## Влияние неточности настройки на поглощение цилиндрических волн

Коэффициент отражения цилиндрической волны при любой проводимости границы:

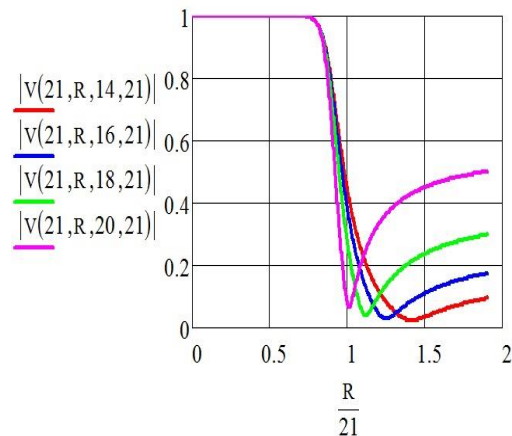
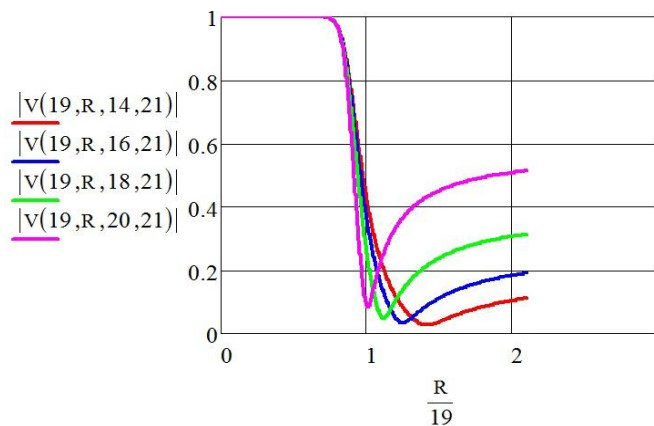
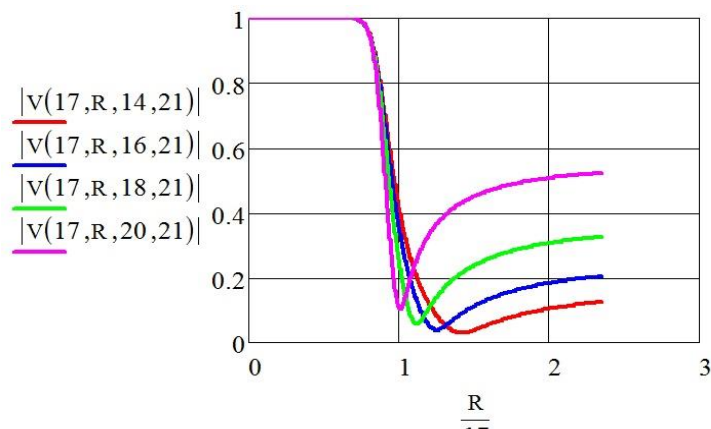
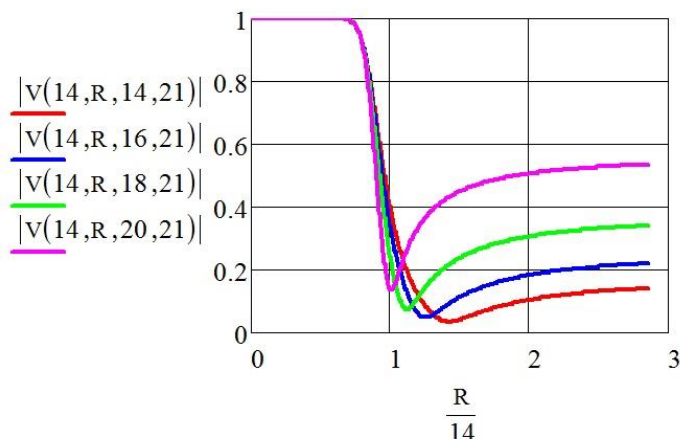
$$V = \frac{-H_{\nu}^{(1)}(k_0 R \sin \gamma) \cdot \beta \cdot i + H_{\nu}^{(1)'}(k_0 R \sin \gamma)}{H_{\nu}^{(2)}(k_0 R \sin \gamma) \cdot \beta \cdot i - H_{\nu}^{(2)'}(k_0 R \sin \gamma)}$$

# Влияние неточности настройки на поглощение цилиндрических волн



Зависимость коэффициента отражения 19-й угловой гармоники при настройке проводимости на другие угловые гармоники: 14, 16, 18, 20.

# Влияние неточности настройки на поглощение цилиндрических волн



Зависимость коэффициента отражения 14-й, 17-й, 19-й, 21-й угловых гармоник при настройке проводимости на другие угловые гармоники: 14, 16, 18, 20.



## **Выводы:**

Исходными данными для выбора и проектирования системы ЗПК должны быть параметры излучаемого поля, а не параметры волновода.

Для (теоретической) оптимизации ЗПК не нужно решать сложные, многофакторные вариационные задачи. Вместо этого нужно согласовывать импеданс с исходным, первичным полем, создаваемым источниками.

Для цилиндрических волн с большими угловыми номерами предложенный подход дает устойчивый к неточностям выбора результат.

## **Рекомендация:**

Предложенный принцип оптимизации ЗПК следует рекомендовать к применению.