

Краткое пособие по моделированию и постобработке ускоряющих ячеек и резонаторов



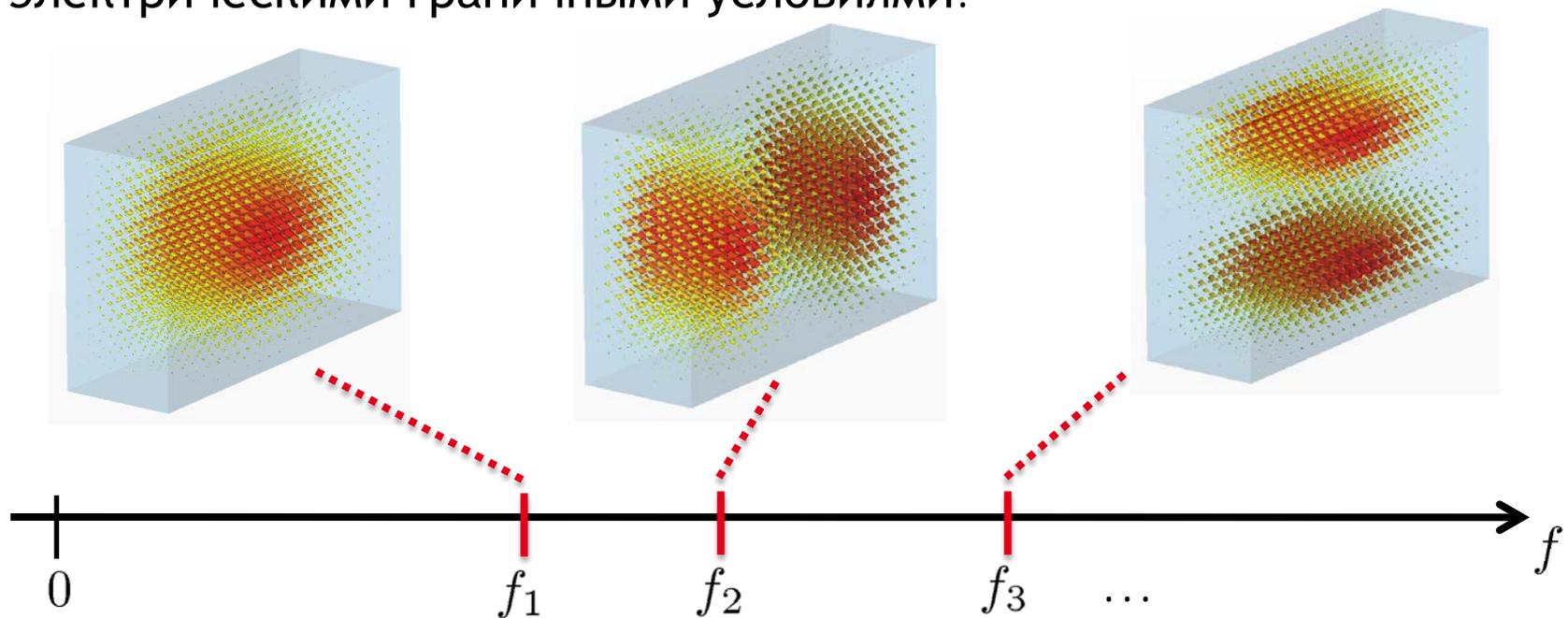
Содержание

- Собственные виды колебаний (моды) и собственные частоты
- Обзор вычислителя собственных мод (E-солвера)
- Постобработка результатов моделирования
 - Добротность
 - Шунтовое сопротивление
 - R/Q
- Построение TESLA ячейки
- Экспорт результатов полей в формате ASCII

Собственные моды и собственные частоты

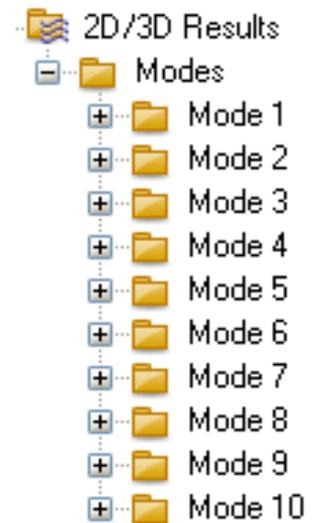
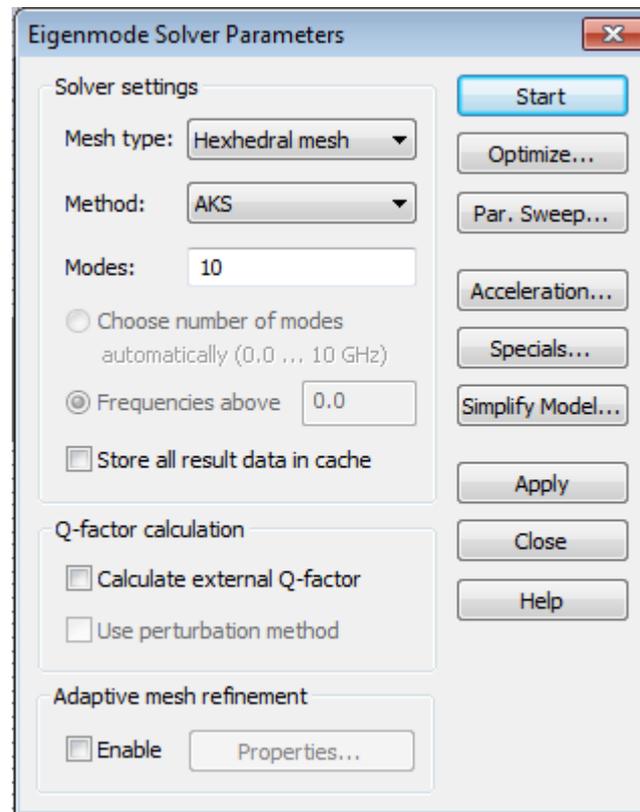
В случае замкнутых структур электромагнитные поля возбуждаются только на определенных частотах (собственных). Соответствующие распределения полей называются собственными модами.

Пример: Первые собственные моды прямоугольного резонатора с электрическими граничными условиями.



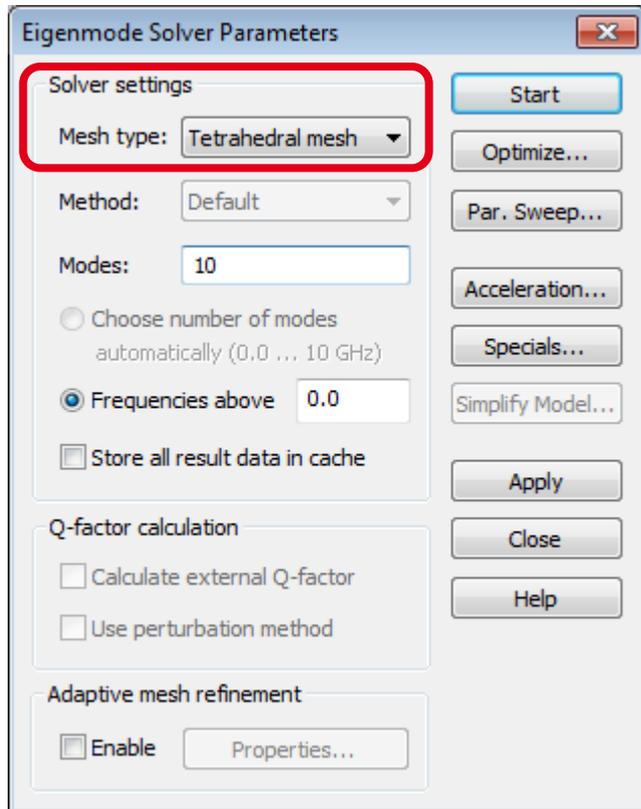
Вычислитель собственных мод

Е-солвер пакета CST MICROWAVE STUDIO позволяет получить собственные моды и собственные частоты исследуемой структуры.



При расчете все собственные моды нормируются на 1 Дж запасенной энергии.

Вычислитель собственных мод – выбор метода моделирования



На сегодняшний день рекомендуется использовать вычислитель собственных мод, работающий на тетраэдральной сетке:

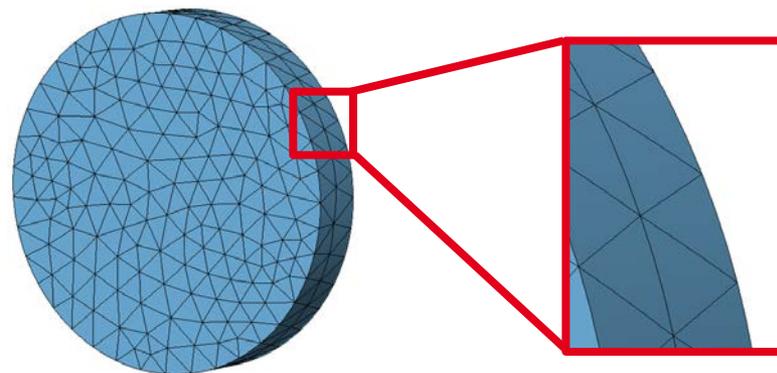
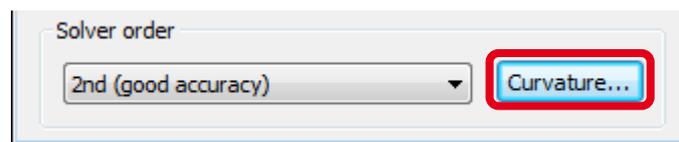
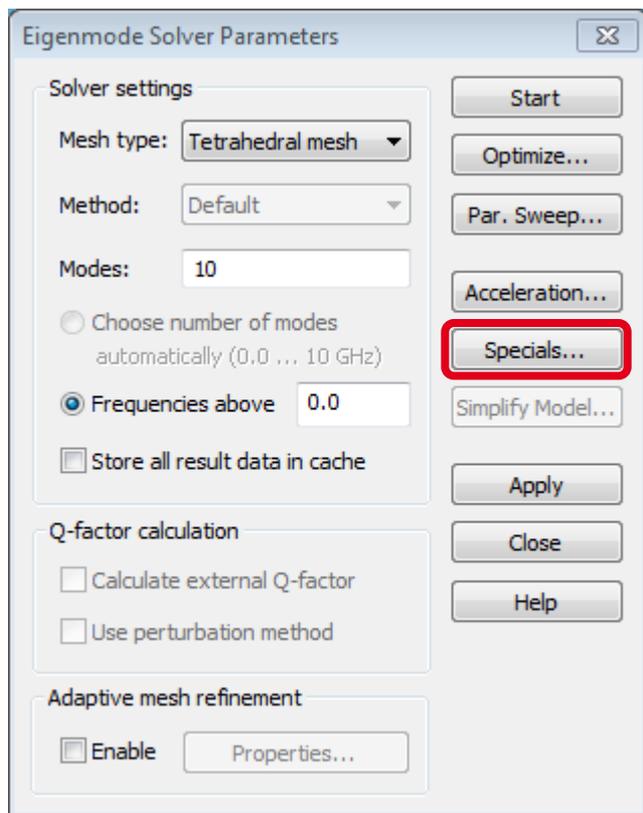
+ исключительно точное отображение геометрии (криволинейными тетраэдрами высшего порядка)

+ Эффективный и надежный алгоритм

Алгоритмы постарше для гексаэдральной сетки (JDM и AKS) могут использоваться в резерве на случай появления проблем сеточного разбиения, вызванных при CAD импорте

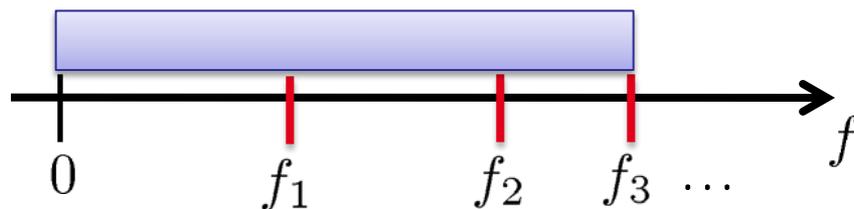
Вычислитель собственных мод - сеточное разбиение

Рекомендуется установить использование криволинейных элементов для точного разбиения границ модели. (По умолчанию Ver. 2013)



Вычислитель собственных мод - выбор моды

По умолчанию вычислитель проводит поиск первых N мод начиная с меньшей собственной частоты.



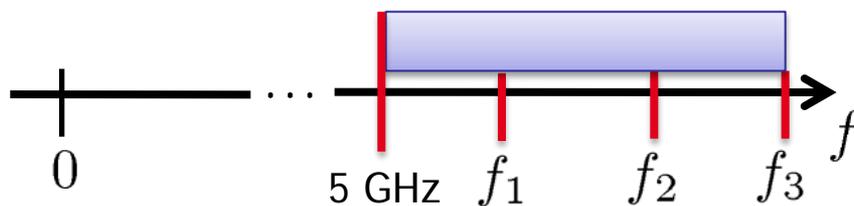
Modes:

Choose number of modes automatically (0.0 ... 10 GHz)

Frequencies above

Расчет первых 3-х мод.

Также вычислитель позволят найти собственные моды, рабочие частоты которых будут выше определенной, заданной пользователем



Modes:

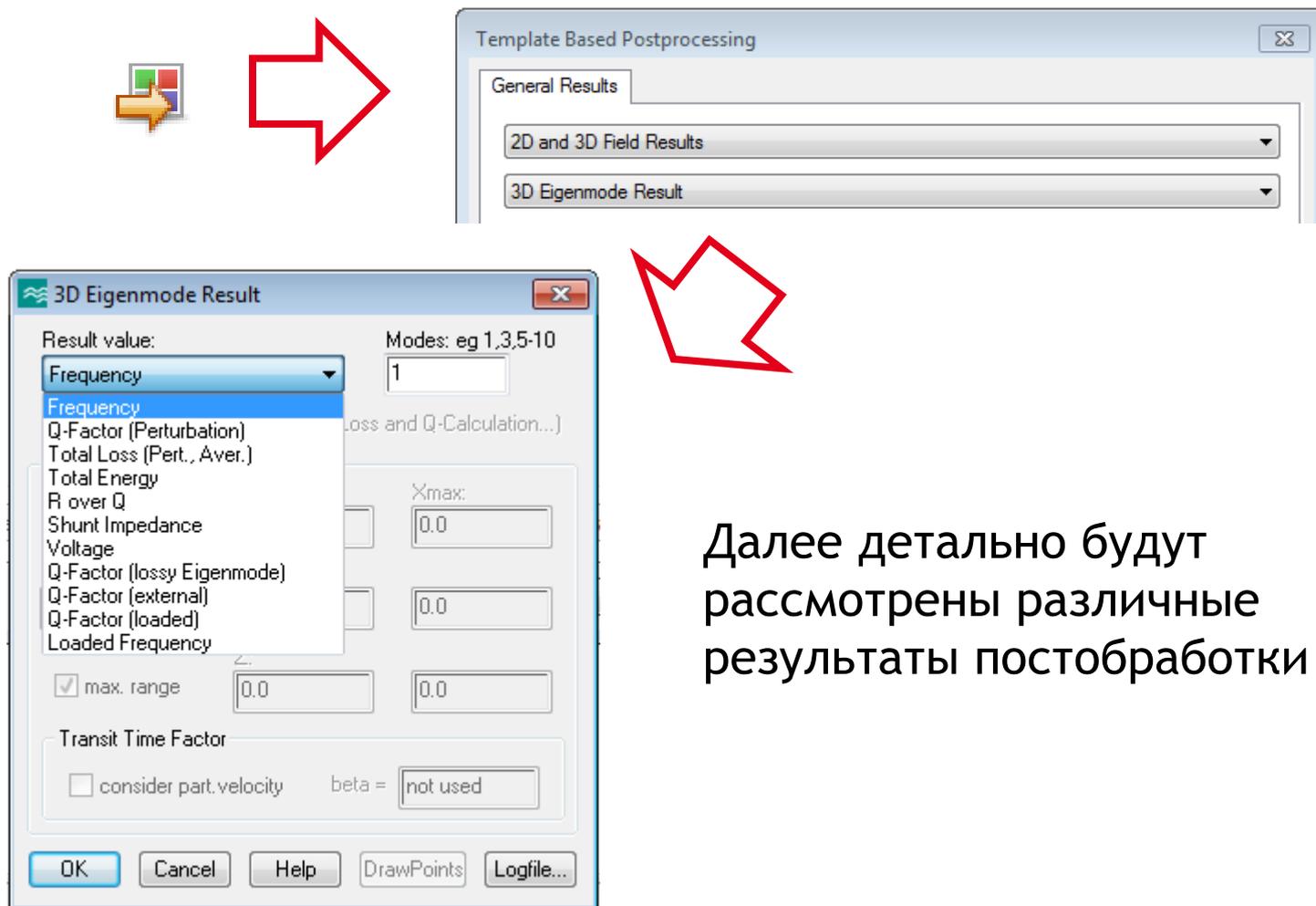
Choose number of modes automatically (0.0 ... 10 GHz)

Frequencies above

Расчет первых 3-х собственных мод, начиная с 5 ГГц.

Постобработка

Пользователю доступны шаблоны постобработки собственных мод.



Далее детально будут рассмотрены различные результаты постобработки

Добротность (Q-factor)

В случае если резонатор обладает потерями, электромагнитная энергия n -й моды будет спадать по экспоненциальному закону:

$$W_n(t) = W_0 \cdot e^{\frac{-\omega_n}{Q_n} \cdot t}$$

Добротность позволяет охарактеризовать резонатор с точки зрения сохранения энергии в нем

$$Q_n := \omega_n \cdot \frac{W_n}{P_{L_n}}$$

Q_n - Добротность n -й собственной моды резонатора

ω_n - Собственная частота n -й моды (в случае без потерь)

W_n - Запасенная энергия n -й моды

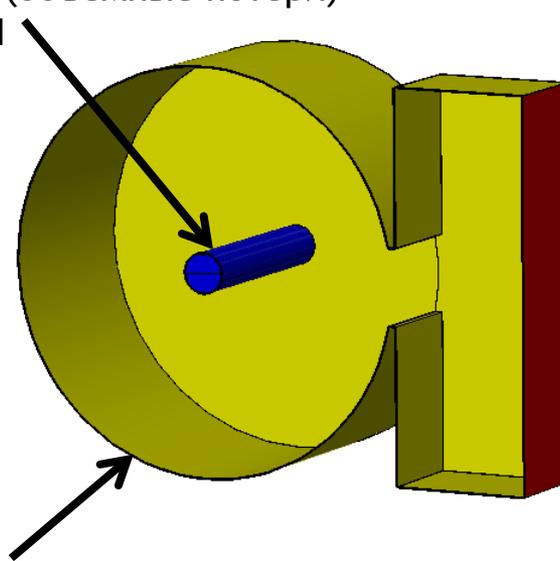
P_{L_n} - Потери мощности n -й моды dW_n/dt

Добротность - механизмы потерь

В модели может существовать несколько механизмов потерь:

Потери в диэлектрике (объемные потери)
Тип материала: normal

Связь с волноводом (порт)



Добротность всей структуры - результат суперпозиции разных механизмов потерь. По этой причине добротность можно разделить на несколько частей, соответствующим этим потерям.

Конечная проводимость материала корпуса (поверхностные потери)
Тип материала: lossy metal

$$\frac{1}{Q_n} = \frac{P_{\text{volume}_n} + P_{\text{surface}_n} + P_{\text{external}_n}}{\omega_n \cdot W_n} = \frac{1}{Q_{\text{volume}_n}} + \frac{1}{Q_{\text{surface}_n}} + \frac{1}{Q_{\text{external}_n}}$$

Добротность – потери в диэлектрике и в стенах

Добротность, связанная с объемными и поверхностными потерями, может быть рассчитана с помощью метода возмущения:

1. Расчет собственных мод модели без потерь (E-солвер автоматически игнорирует эти потери).
2. При поиске добротности свойства материалов заменяются на расчетные (Results → Loss and Q Calculation).

Фоновый материал

Металл с потерями

Q_{surface}

Q_{volume}

Material/Solid	Conductivity	Mue	Loss/W(peak)	Loss/%	Q
Cond. Enclosure	5.8000e+007	1	1.3386e+003	0.000748	2.2655e+007
Copper (annealed)	5.8000e+007	1	1.2972e+006	0.724	2.3380e+004
Sum of Surface Losses			1.2985e+006	0.725	2.3356e+004
Volume Losses			1.7778e+008	99.3	1.7059e+002
Sum			1.7908e+008		1.6935e+002

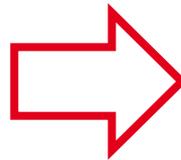
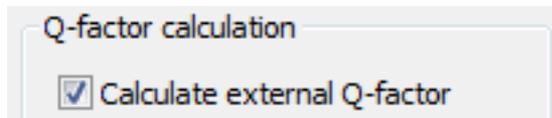
Обратите внимание: Этот же расчет можно выполнить с помощью шаблонов постобработки собственных мод.

Внешняя добротность

При подключении волновода к резонатору часть электромагнитной энергии может передаваться в этот волновод.

Описать эти потери можно с использованием внешней добротности, $Q_{external}$.

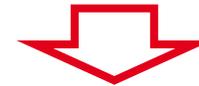
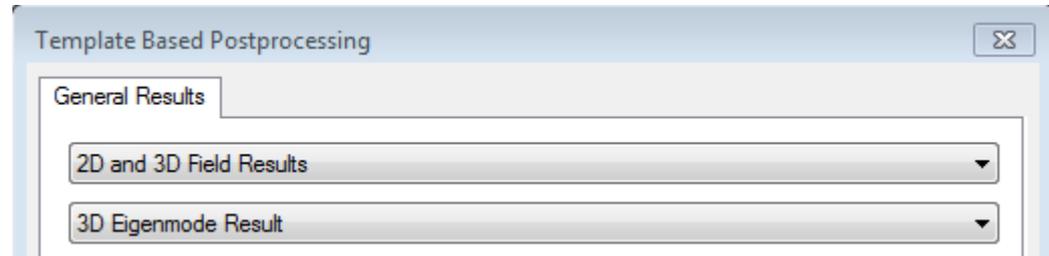
$Q_{external}$ может быть рассчитана всеми солверами. Перед запуском необходимо активировать расчет внешней добротности.



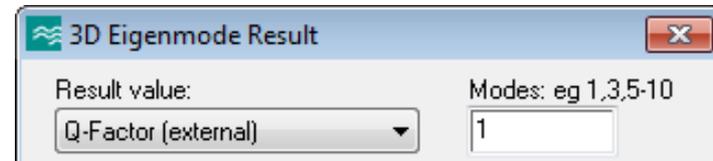
External Q-factor results:		
Mode	Loaded Frequency	External Q
1	2.425 GHz	1.027e+004
2	3.140 GHz	1.158

Добротность - шаблон постобработки

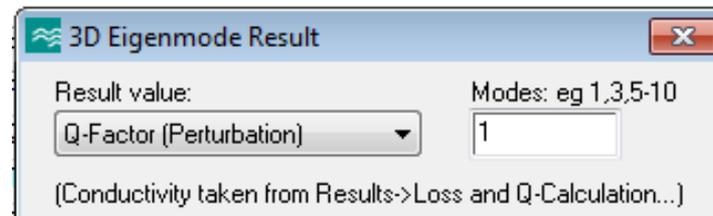
Шаблоны постобработки позволяют получить любые значения добротности.



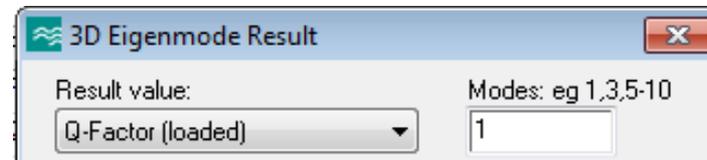
Q_{external}



$$Q_{\text{pert}} = \left(\frac{1}{Q_{\text{volume}}} + \frac{1}{Q_{\text{surface}}} \right)^{-1}$$



$$Q_{\text{loaded}} = \left(\frac{1}{Q_{\text{pert}}} + \frac{1}{Q_{\text{external}}} \right)^{-1}$$

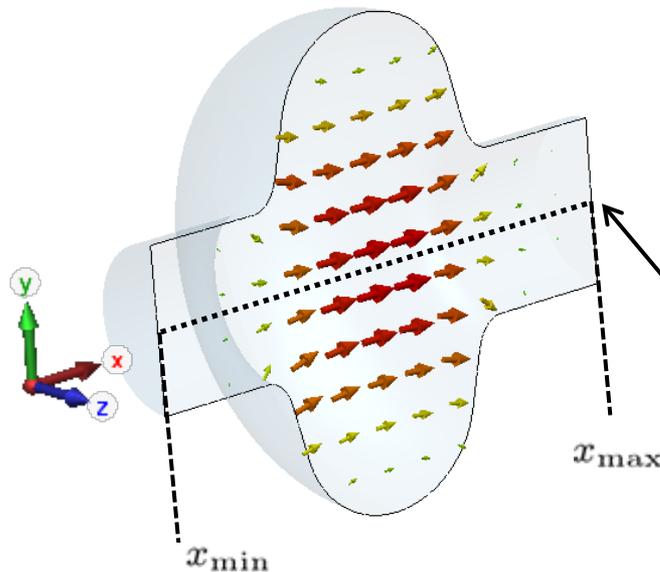


Шунтовое сопротивление

Шунтовое сопротивление определяется отношением квадрата амплитуды напряженности n -й гармоники продольной составляющей электрического поля к потерям мощности на единицу длины структуры:

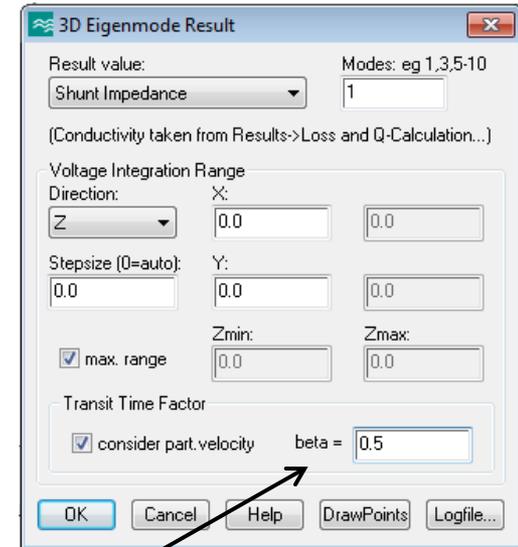
$$R_n := \frac{|U_n|^2}{P_{\text{loss}_n}}$$

$$U_n := \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} E_x(x) \cdot e^{j \frac{\omega_n x}{\beta \cdot c_0}} dx$$



Путь интегрирования

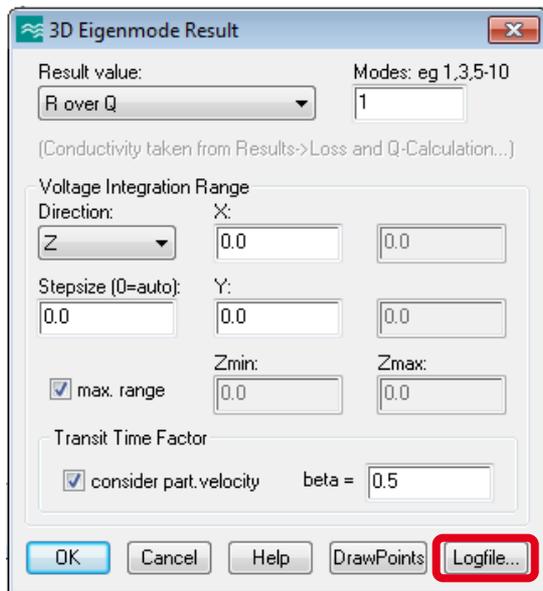
Возможен учет скорости частиц.



R/Q

Величина R/Q представляет отношение шунтового сопротивления структуры к её добротности. Зависит только от геометрии, часто используется для сравнения резонаторов одних резонаторов с другими.

$$\frac{R_n}{Q_n} = \frac{|U_n|^2}{\omega_n \cdot W_n}$$



summary of electric voltage-integration:
=====

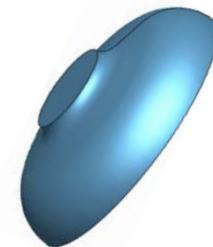
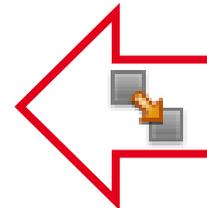
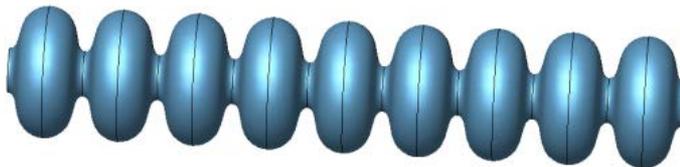
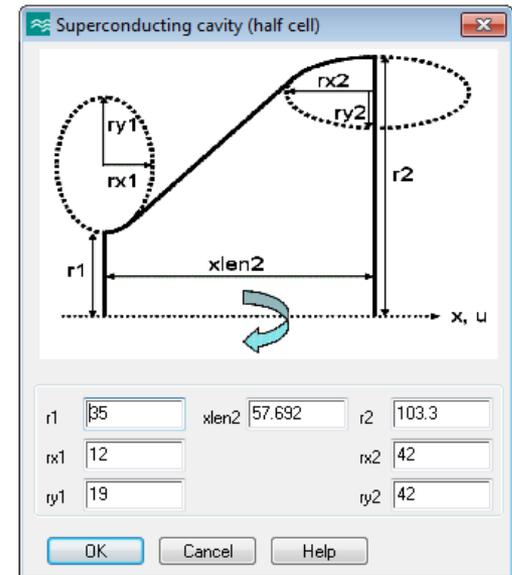
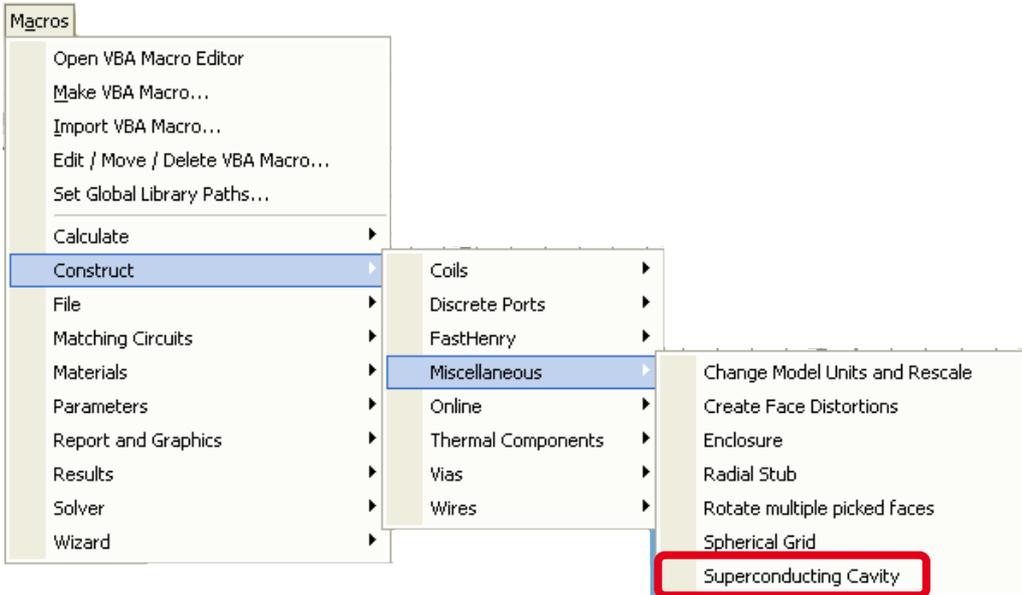
frequency = 2.41957044560488 GHz
beta = 0.5
V_real = -759747.626104853
V_imag = -4.46664627088467E-03
V_full = 759747.626104853

NData Points = 284

Дополнительная информация доступна в логфайле.

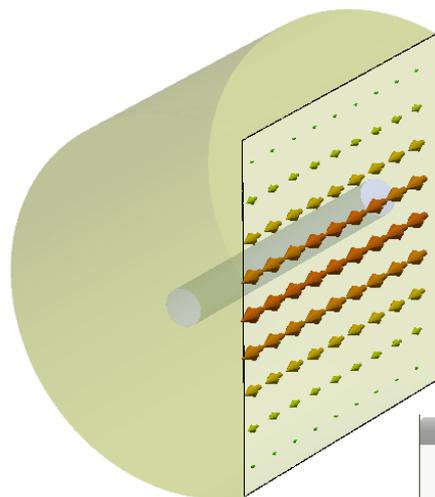
Построение Tesla резонатора

Для построения половины ячейки TESLA доступен макрос. С использованием операций трансформации легко построить многоячеечный резонатор..



Экспорт поля

Полученные распределения полей собственных мод (как и все 3D результаты из CST STUDIO SUITE™) могут быть экспортированы в ASCII файле для дальнейшей обработки.



Mode 1 E (peak)
Cutplane normal: 1, 0, 0
Cutplane position: 15.35
2D Maximum: 3.159e+07
Frequency: 2.424889802933
Phase: 0

x [mm]	y [mm]	z [mm]	ExRe [V/m]	EyRe [V/m]	EzRe [V/m]
15.35	39.8641	-37.3641	-4344.22	-7318.25	2.19591e+006
15.35	39.8641	-32.2281	-8122.45	-13660.5	2.19642e+006
15.35	39.8641	-27.0922	-10688.7	-17937.6	2.19721e+006
15.35	39.8641	-21.9562	-11706.6	-19604.8	2.1982e+006
15.35	39.8641	-16.8203	-11037.9	-18451.3	2.19924e+006
15.35	39.8641	-11.6843	-8804.66	-14699.9	2.20014e+006
15.35	39.8641	-6.5484	-5364.63	-8950.15	2.2008e+006
15.35	39.8641	-1.41245	-1199.21	-2000.14	2.2011e+006
15.35	39.8641	3.72349	3128.83	5218.95	2.20101e+006
15.35	39.8641	8.85944	7039.19	11746.9	2.20054e+006
15.35	39.8641	13.9954	9996.09	16697	2.19976e+006

