

# Цилиндрический резонатор и его модификации в качестве стабилизатора СВЧ колебаний

В.И. Мотренко, Э.Ю. Седышев

СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

**Аннотация:** создание высокочастотных генераторов – актуальная задача в области сверхвысоких частот. Предметом исследования является генератор на активном двухполоснике в цилиндрическом резонаторе. В работе произведён расчёт резонансных частот для трёх типов электромагнитных колебаний цилиндрического резонатора в зависимости от его геометрических размеров и заполнения. Экспериментально проверено наличие генерации на рассчитанных частотах. Сделаны выводы о целесообразности дальнейшего исследования цилиндрических резонаторов и их сегментов.

**Ключевые слова:** СВЧ, генератор, цилиндрический резонатор, сегмент

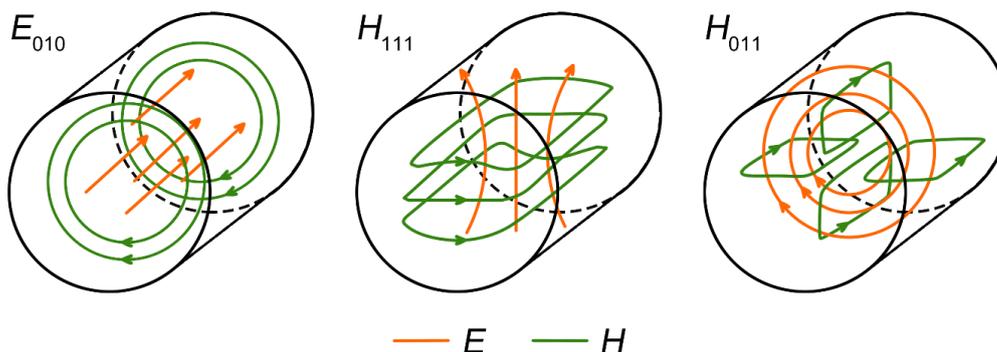
## 1. Введение

Развитие микроволновой техники в последние годы обращает внимание разработчиков на объёмные цилиндрические резонаторы. Данный тип резонаторов имеет меньшую добротность, чем сферические [1], но обладает конструктивной простотой и удобен для установки активных элементов внутри.

Целью работы является создание высокостабильного генератора на цилиндрическом резонаторе и его сегментах в объёмном интегральном исполнении с использованием активных двухполосников СВЧ.

## 2. Расчёт и экспериментальные результаты

В цилиндрических резонаторах существуют электрические колебания –  $E_{mnp}$  и магнитные –  $H_{mnp}$ . На рисунке 1 показаны структуры полей трёх основных типов колебаний:  $E_{010}$ ,  $H_{111}$ ,  $H_{011}$ .



**Рисунок 1.** Структура электромагнитного поля в цилиндрическом резонаторе для разных типов колебаний.

Резонансные частоты цилиндрического резонатора вычисляются по следующей формуле:

$$f = \frac{c}{\lambda_0}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda_0$  – резонансная длина волны.

Длина волны  $\lambda_0$  зависит от типа колебаний и рассчитывается по формулам [2]:

- для волн типа  $E_{mnp}$ :

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{\nu_{mn}^E}{\pi \cdot R}\right)^2}}, \quad (2)$$

- для волн типа  $H_{mnp}$ :

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{\nu_{mn}^H}{\pi \cdot R}\right)^2}}, \quad (3)$$

где  $\nu_{mn}^E$ ,  $\nu_{mn}^H$  – корни функций Бесселя и их производных,  $L$  – длина резонатора,  $R$  – радиус.

Добротность цилиндрического резонатора можно рассчитать по формуле (4):

$$Q = \frac{V}{S * \Delta}, \quad (4)$$

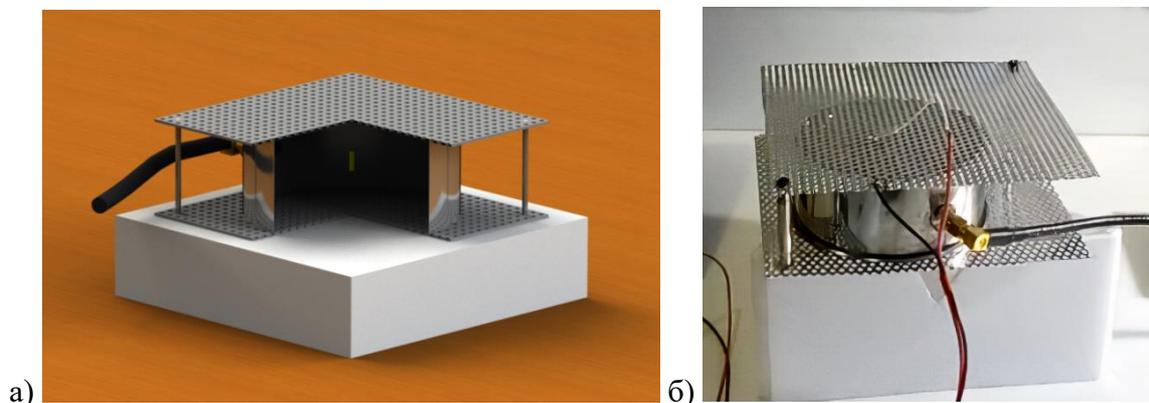
где  $Q$  – добротность резонатора,  $V$  – объём резонатора,  $S$  – площадь внутренней поверхности резонатора,  $\Delta$  – толщина скин-слоя.

Для экспериментов был выбран цилиндр с высотой 34 мм и радиусом 39 мм [3]. Его резонансные частоты и добротности для основных типов колебаний были рассчитаны по формулам выше и сведены в таблицу 1.

**Таблица 1.** Резонансные частоты и добротности цилиндра

Параметр	$E_{010}$	$H_{111}$	$H_{011}$
$f$ , ГГц	2,944	4,954	6,44
$Q$	5871	7615	8683

3D модель генератора и сам генератор представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Генератор на цилиндрическом резонаторе: а – 3D модель, б – макет.

Конечный лабораторный стенд состоит из цилиндра, двух оснований с перфорацией, активного элемента, помещённого внутрь, а также элементов подачи смещения от источника питания.

Подав питание на активный элемент, получаем следующую спектральную характеристику (рисунок 3). Как видно, генерация начинается с 4 ГГц, но отсутствует монохромный сигнал, характерный для генератора. Отчётливо видны зоны возможной генерации.

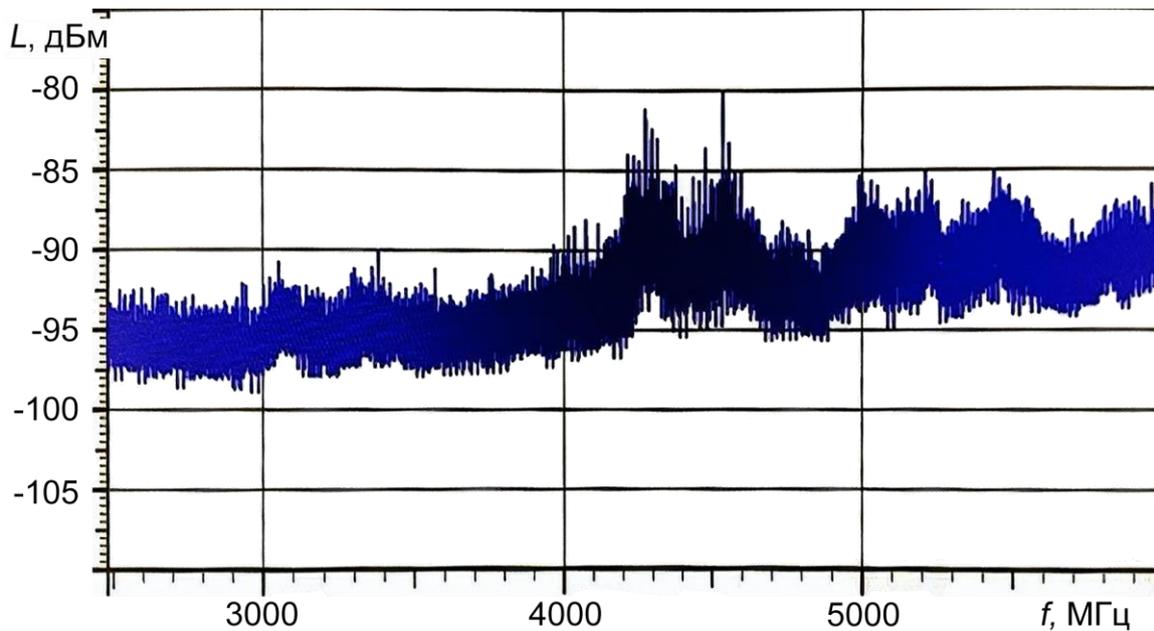


Рисунок 3. Спектральная характеристика.

По результатам эксперимента было принято решение повысить добротность резонатора, заменив перфорированные поверхности на сплошные.

На следующем этапе работы была предложена 3D модель устройства (рисунок 4а), после чего был доработан лабораторный стенд. Новое исполнение генератора представлено на рисунке 4б, в нём съём энергии можно производить как с боковой поверхности, так и через нижнее основание цилиндра (зондируя ту или иную волновую моду).

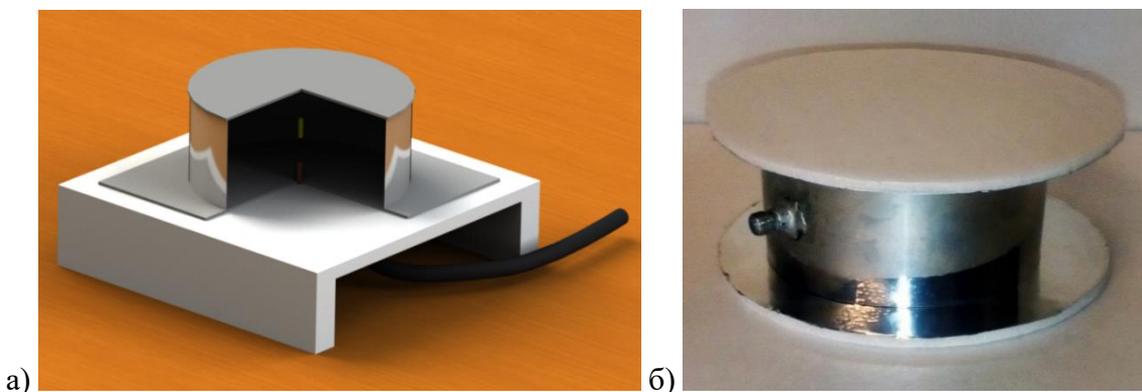
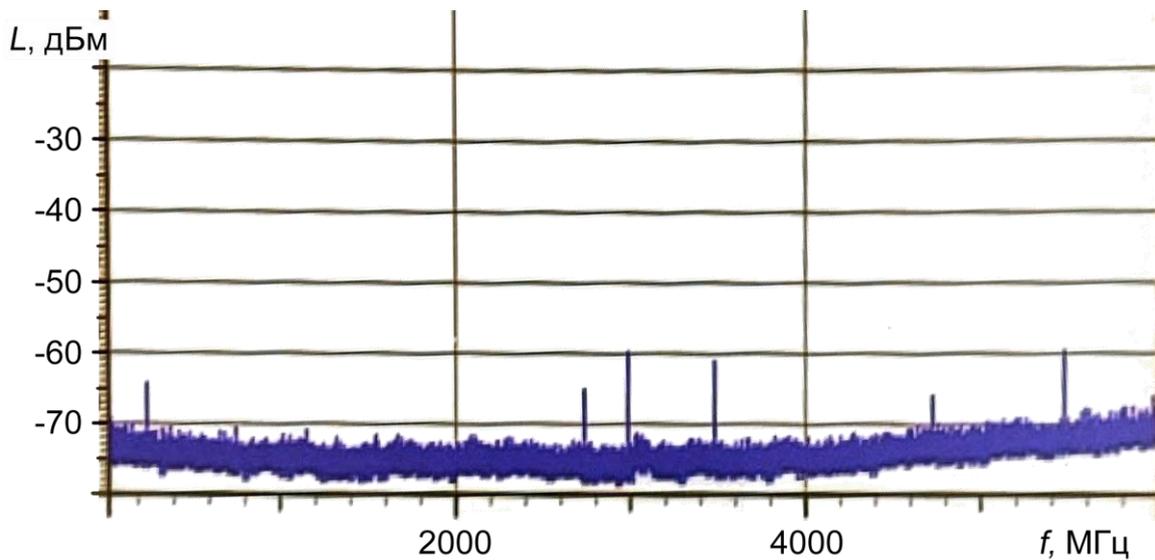


Рисунок 4. Генератор на цилиндрическом резонаторе: а – 3D модель, б – макет.

С новой конструкцией удалось получить спектральную характеристику (рисунок 5) высокочастотной генерации.

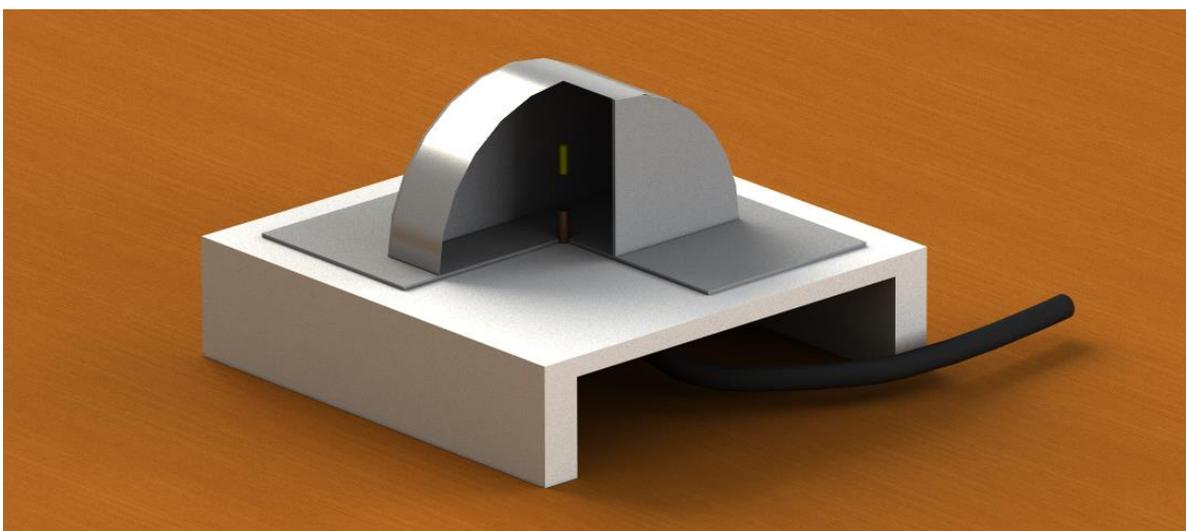


**Рисунок 5.** Спектральная характеристика.

Как видно из рисунка 5, стабильная генерация с различными максимумами по мощности возникает на частотах 2.8 ГГц, 3 ГГц, 3.5 ГГц, 4.7 ГГц и 5.4 ГГц.

Несоответствие между расчётными и экспериментальными резонансными частотами можно объяснить меньшей добротностью реального резонатора, потерями в местах соединения боковой грани с основаниями, а также «чистотой» используемых для резонатора материалов. Одновременное существование нескольких мод в объёме вносит свои коррективы в энергетику колебания.

Ранее, в Лаборатории синтеза СВЧ устройств исследовались генераторы на сфере и полусфере [1], поэтому было сделано предположение, что в качестве резонатора можно использовать и полуцилиндр (рисунок 6).



**Рисунок 6.** 3D модель генератора на полуцилиндре.

Оценим его добротность относительно полного цилиндра с помощью выражения (5):

$$A = \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (5)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – добротности цилиндрического и полуцилиндрического резонаторов соответственно.

Используя в формуле (4) известные выражения площади и объема цилиндра и полуцилиндра, подставив всё в (5), получим соотношение (6):

$$A = \frac{\pi * (R + L)}{2L + \pi * (R + L)}, \quad (6)$$

где  $R$  – радиус цилиндра,  $L$  – высота.

При  $L=34$  мм и  $R=39$  мм  $A=0,771$ . Используя генератор на таком полуцилиндре, то есть, уменьшив объем устройства в два раза, добротность снизится всего лишь на 23%.

Оценочный эксперимент с введением в резонатор перегородки, которая делила цилиндр на два полуцилиндра, подтвердил резонансные свойства сегмента. В результате чего был сделан вывод, что полуцилиндр можно использовать в качестве стабилизирующего объема в конструкциях СВЧ-генераторов.

### 3. Заключение

Созданный генератор колебаний СВЧ диапазона на цилиндрическом резонаторе показал способность одновременной генерации различных мод при достижении макетом некоторой пороговой добротности. Полученные колебания стабильны, их частоты зависят от множества параметров, но в первую очередь определяются конструкцией резонатора.

Работа доказывает возможность синтеза симметричных мод СВЧ колебания в различных сегментах цилиндрического резонатора самых разнообразных форм.

#### Список литературы

1. Бочаров Е. И., Коновалова Е. А., Седышев Э. Ю. Исследование проволочной модели полусферы в качестве резонатора СВЧ // Региональная научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей; Сборник лучших докладов конф. / Сост. Н. Н. Иванов. – СПб.: СПбГУТ, 2021. – С. 322-325.
2. Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцов А. Д. Техническая электродинамика. – 2000.
3. Коновалова Е. А., Мотренко В. И. Седышев Э. Ю. СВЧ генератор на активном двухполюснике в цилиндрическом резонаторе // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. X Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2021. Т. 3.