

УДК 621.385.623.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ДВУХМОДОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЕЙ ФРАКТАЛЬНОГО ДВУХАЗОРНОГО РЕЗОНАТОРА С ЭЛЕКТРОНАМИ В МНОГОЛУЧЕВОМ КЛИСТРОДЕ¹

В. А. Царев, А. И. Корчагин, А. Ю. Мирошниченко

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.
кафедра «Электронные приборы и устройства»

Получена 19 декабря 2012 г.

Аннотация. В статье описываются результаты исследования, с помощью разработанной программы трехмерного моделирования, влияния неоднородности высокочастотного электрического поля в пространстве взаимодействия на электродинамические и электронные характеристики выходного двухазорного фрактального резонатора многолучевого клистрода.

Ключевые слова: многолучевой клистрод, двухазорный резонатор, фрактальная резонансная система, синфазный и противофазный виды колебаний, третья гармоника.

Abstract: Results of designing and simulating a multibeam high efficiency klystrode with by utilizing a third-harmonic field in the output two-gaps fractal cavity are presented. The article presents the resulting calculation using three-dimensional modeling of basic electromagnetic and electronic characteristics investigated the resonant system.

Key words: klystrode, two-gaps resonator, fractal cavity, multiple-beam, inphase-mode, antiphase-mode, efficiency, hird-harmonic field.

¹Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.0909 «Исследование физических процессов в мощных многолучевых СВЧ электровакуумных приборах с электродинамическими системами, выполненными на основе многомодовых резонаторов»

Введение

Развитие современных электровакуумных СВЧ приборов сопровождается повышением их мощности и эффективности, расширением частотных диапазонов, использованием специальных режимов работы и новых конструкций электродинамических систем.

В последние годы в радиоэлектронике особое внимание уделяется разработке и исследованию нетрадиционных конструкций колебательных систем – фрактальным резонаторам [1]. Впервые конструкция многолучевого клистрода с фрактальными двухззорными резонаторами (ФДР) древовидного типа была предложена в [2]. Такие резонаторы, также как и фрактальные антенны, могут быть чрезвычайно эффективны при разработке многолучевых двухчастотных или многочастотных электронных приборов клистронного типа, работающих в качестве мощных усилителей, генераторов или умножителей частоты [3].

Многочастотный режим работы, при котором взаимодействие электронов с СВЧ полем осуществляется не только на основном, но и на высших видах колебаний резонаторов, частоты которых могут быть кратными частоте основного сигнала, представляет особый интерес. Этот интерес связан с возможностью использования поля третьей гармоники в выходном резонаторе клистрода и настройке на нее частоты одной из высших мод выходного резонатора [4].

Однако свойства фрактальных резонаторов при работе их в многомодовом режиме не исследованы, поскольку такие системы характеризуются сложной геометрией, неоднородным трехмерным распределением ВЧ электрического поля, и требуют высокой точности расчета электронных и электродинамических параметров.

Целью настоящей работы исследование влияния геометрических и электрических параметров ФДР на их электродинамические и электронные характеристики при работе в двухмодовом режиме с помощью разработанной программы трехмерного моделирования [5].

1. Особенности фрактальных резонаторов

Фракталами называют бесконечно самоподобные фигуры, каждый фрагмент которых повторяется при уменьшении масштаба. Фракталы находят все большее и большее применение в науке и технике. Одной из самых распространенных форм фракталов является, так называемый, древовидный фрактал Пифагора [6]. Он называется так потому, что каждая тройка попарно соприкасающихся квадратов (рис. 1) ограничивает прямоугольный треугольник и получается картинка, которой часто иллюстрируют теорему Пифагора.

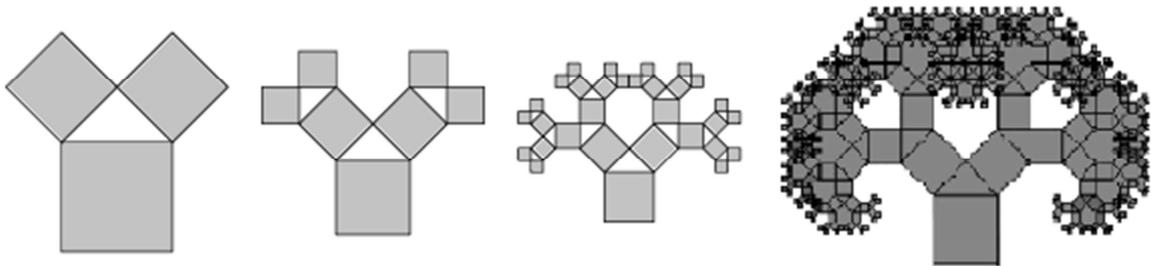


Рис. 1. Этапы создания идеального древовидного фрактала Пифагора

На рис. 2 показан переход от трех идеальных древовидных фракталов Пифагора к реальному двухззорному резонатору, в котором можно различить характерные признаки «идеального дерева»: «ствол», три крупные «ветви» и «листья».

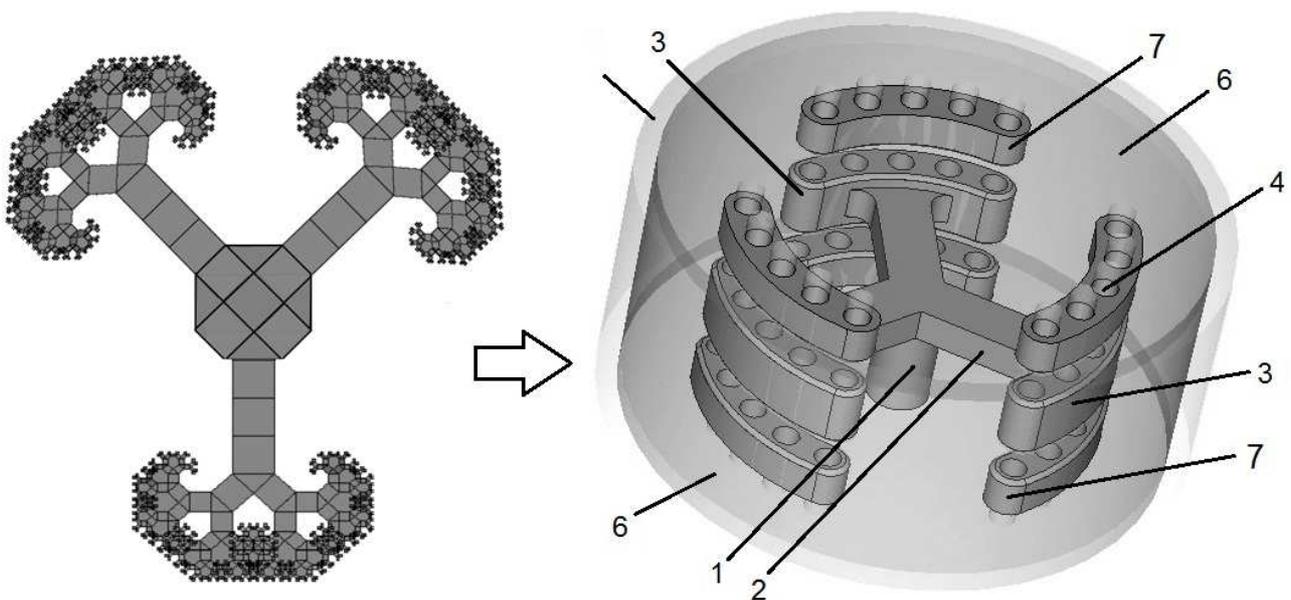


Рис. 2. Идеальный фрактал и реальный резонатор:

- 1 - опорный проводник – «ствол», 2 - радиально направленные проводники – «ветки», 3- центральные электроды – «листья», 4- пролетные каналы, 5- цилиндрический корпус резонатора, 6 - боковые крышки, 7 - пролетные трубы

Схематическое изображение резонатора с обозначением основных характерных размеров приведено на рис. 3. Размеры системы представлены в таблице 1.

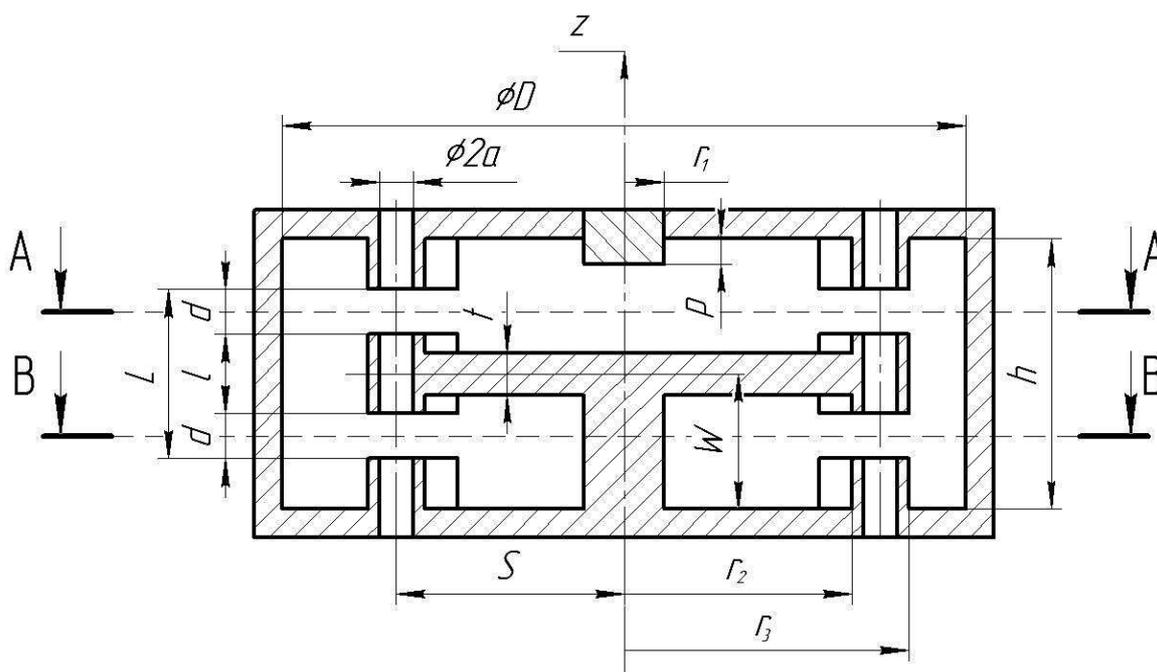


Рис. 3. Геометрические размеры исследуемой структуры резонатора

Таблица №1.

Параметр		Значение
радиус пролетного канала, мм	a	3
внутренняя высота резонатора, мм	h	48
смещение центра втулки относительно центра резонатора, мм	S	40
относительный диаметр резонатора	D/h	2.50
смещение «ветки» относительно боковых крышек	W/h	0.50
относительная толщина «ветки»	t/h	0.15
относительная длина втулки	l/a	ver.
относительная ширина зазора	d/a	ver.
относительный радиус опорного проводника	r_1/S	0.175
число пролетных каналов в одной втулке	N_b	5
общее число каналов	N	15

2. Электродинамические характеристики

Исследовалось поведение синфазного и противофазного видов колебаний от относительной ширины зазора d/a при условии, что относительная длина двойного зазора оставалась неизменной $L/a = (l + 2 \cdot d)/a = const$.

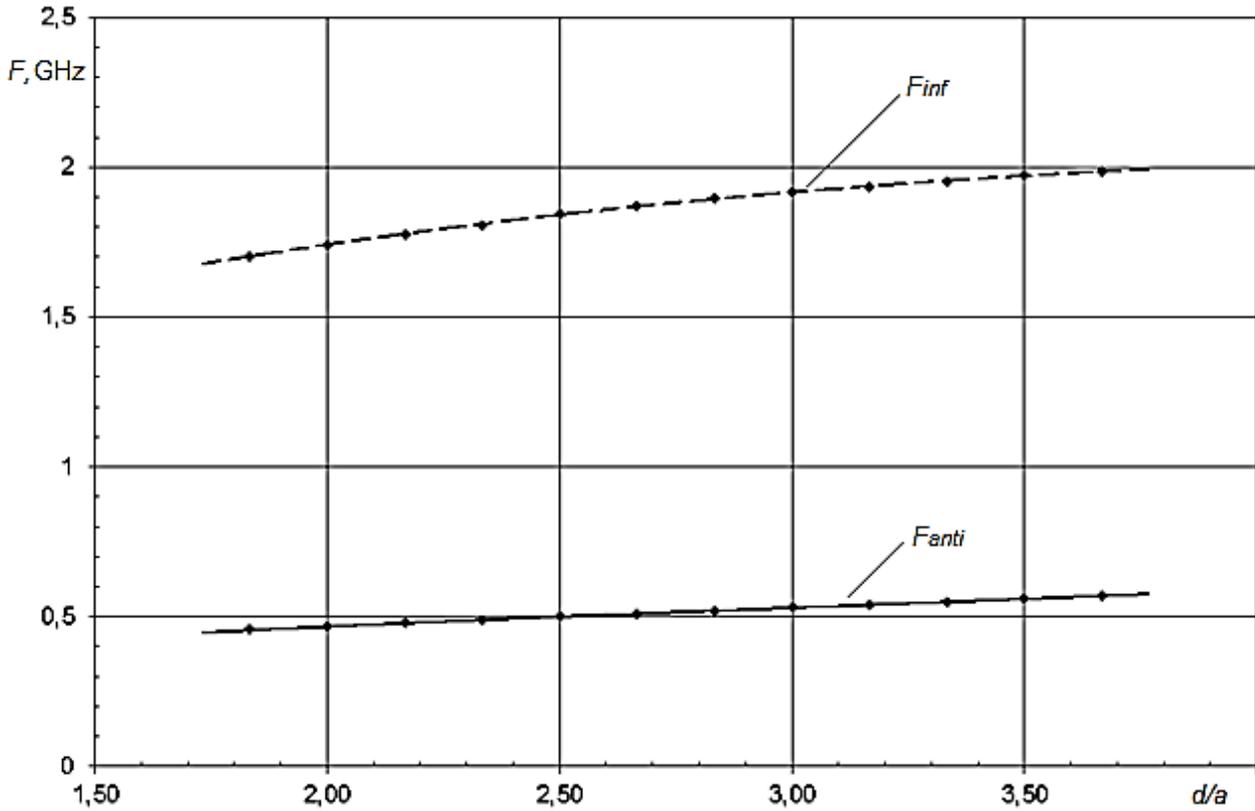


Рис. 4. Зависимость частот противофазного F_{anti} (π -мода) и синфазного F_{inf} (2π -мода) видов колебаний от отношения d/a

Приведенные на рис. 4 и 5 зависимости подтверждают, что несомненным достоинством ФДР при работе на основной моде является то, что они имеют меньшие габаритные размеры и более высокое характеристическое сопротивление $\rho = R/Q$ по сравнению с классическими конструкциями однозазорных резонаторов, используемых в многолучевых приборах. Это происходит потому, что противофазный вид колебаний определяется размерами внутреннего проводника «дерева» и «ветвей» во фрактале (линией ВЧ тока), а такая линия намного длиннее, чем линейные размеры самого фрактала, определяемые корпусом резонатора.

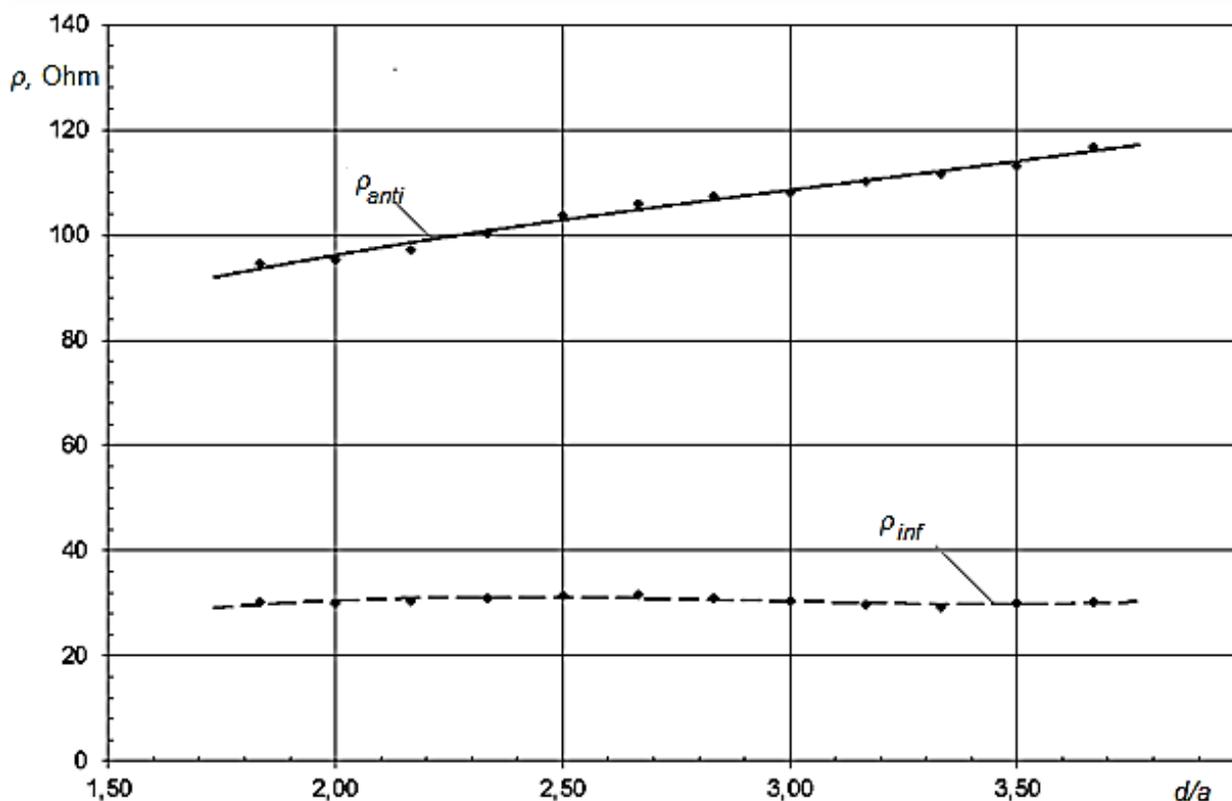


Рис. 5. Зависимость характеристического сопротивления в центральном канале, лежащем на оси «ветки», для противофазного ρ_{anti} и синфазного ρ_{inf} видов колебаний от изменения отношения d/a

Из рис. 5 видно, что характеристическое сопротивление синфазного вида при изменении отношения d/a остается практически неизменным, в то время как изменение ρ_{anti} составляет примерно 13%.

В результате исследований установлено, что вследствие разной чувствительности изменения частоты разных видов колебаний (F_{anti} и F_{inf}) к изменению длины подстроечного элемента p можно найти оптимальную длину этого элемента (рис. 6), соответствующую настройке на кратные частоты, находящиеся в отношении 1/3.

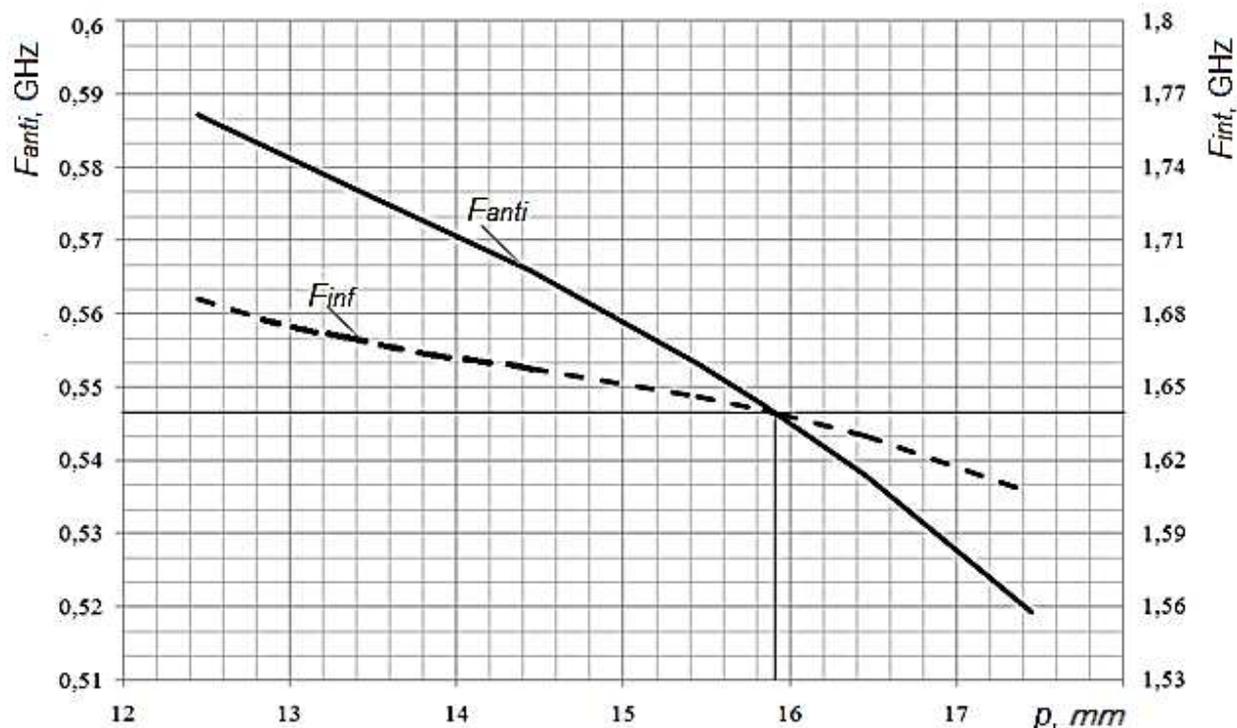


Рис. 6. Зависимость частот противофазного F_{anti} и синфазного F_{inf} видов от длины перемещения подстроечного элемента

Добротность резонатора Q на противофазном виде колебаний примерно 3000, а на синфазном виде – около 8000.

3. Исследование трехмерного характера распределения продольной компоненты ВЧ поля в пространстве взаимодействия

Хорошо известно, что из-за различия амплитуд ВЧ напряжений на разных пролетных каналах и нелинейного изменения переменного напряжения по продольной координате первого и второго зазоров не совпадают условия реализации максимального электронного КПД для лучей разных рядов.

Проведенные исследования, результаты которых приведены на рис. 7-9, подтверждают тот факт, что исследуемые системы характеризуются сложной геометрией и неоднородным трехмерным распределением ВЧ электрического поля в разных пролетных каналах по радиусу, а также по длине зазора.

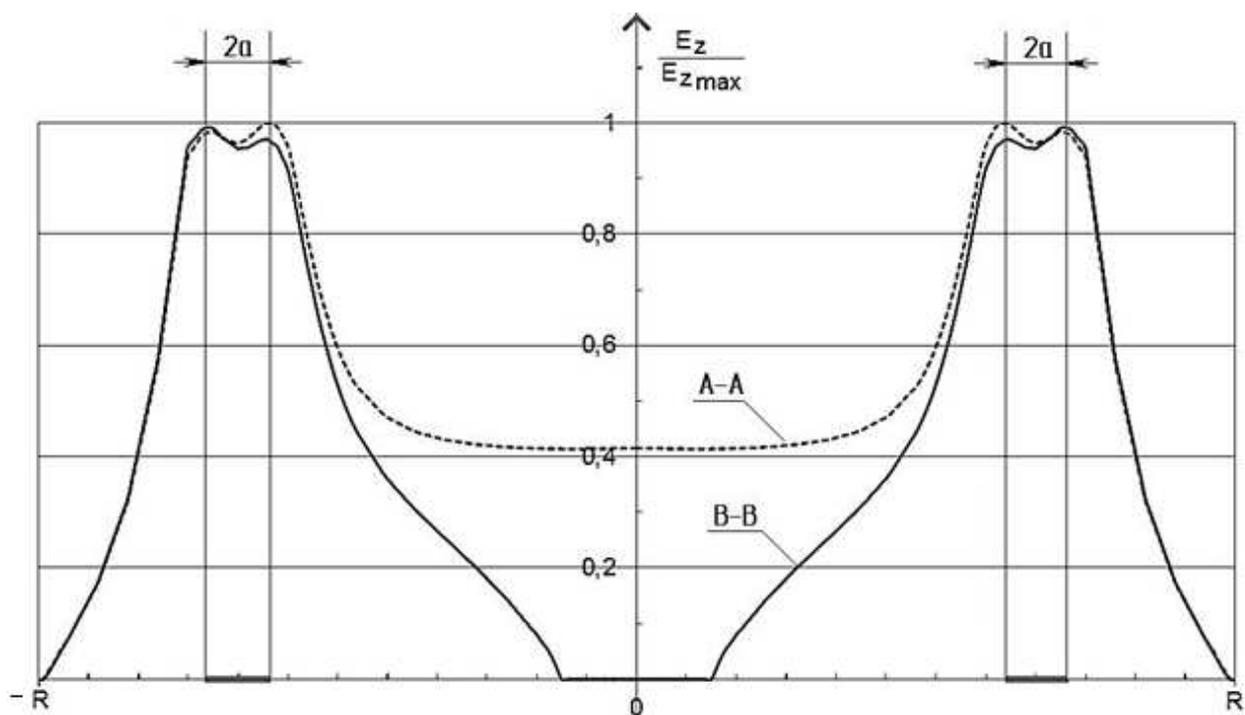


Рис. 7. Изменение нормированной амплитуды продольной компоненты ВЧ электрического поля по радиусу в сечениях А-А и В-В (рис. 2) для противофазного вида колебаний

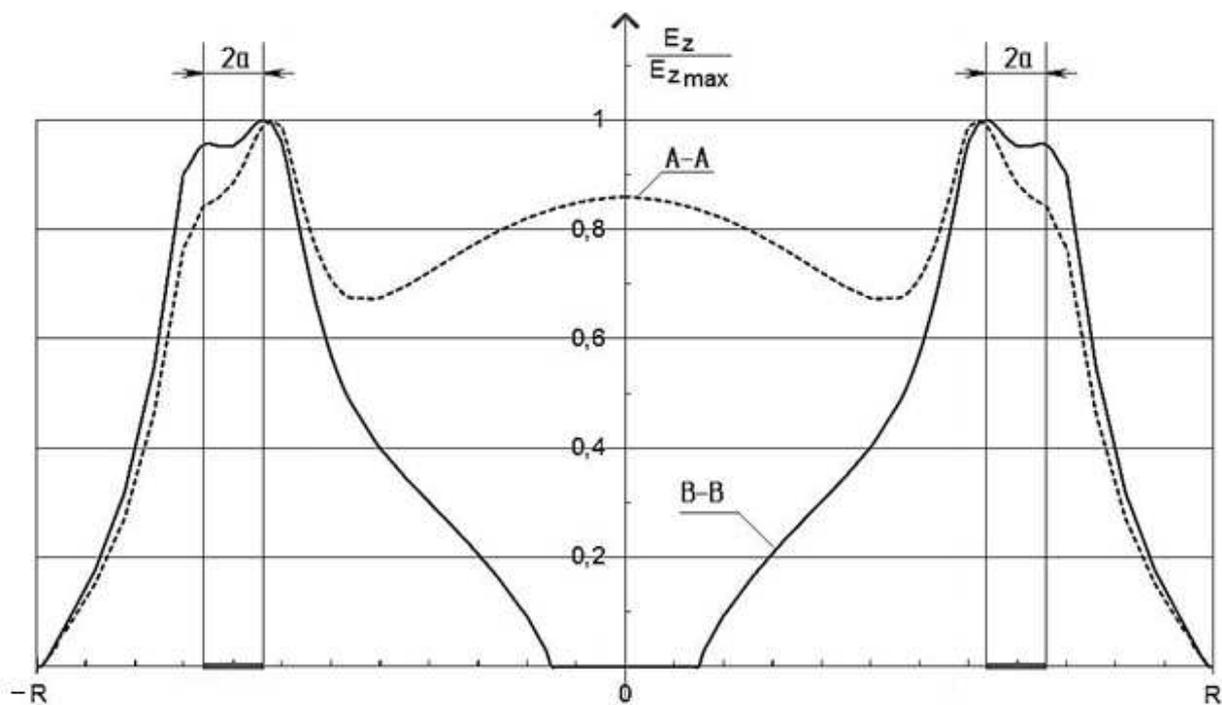


Рис. 8. Изменение нормированной амплитуды продольной компоненты ВЧ электрического поля по радиусу в сечениях А- А и В-В (рис. 2) для 2π -вида колебаний

На рис. 7, 8 показано, что неоднородность электрического поля в разных каналах на 2π -моде (синфазный вид) может превысить 20%, в то время как на π -моду (противофазный вид) она не превышает 10%. Способы уменьшения радиальной неоднородности поля хорошо известны. Исследования показали, что уменьшить степень неоднородности поля можно, например, за счет увеличения диаметра резонатора.

Из рис.9 следует, что максимум поля на синфазном виде в зазоре «В» превышает максимум поля в зазоре «А» на 32-35%, в то время как на противофазном виде – амплитуда поля в зазоре «А» превышает амплитуду поля в зазоре «В» на 20-23%.

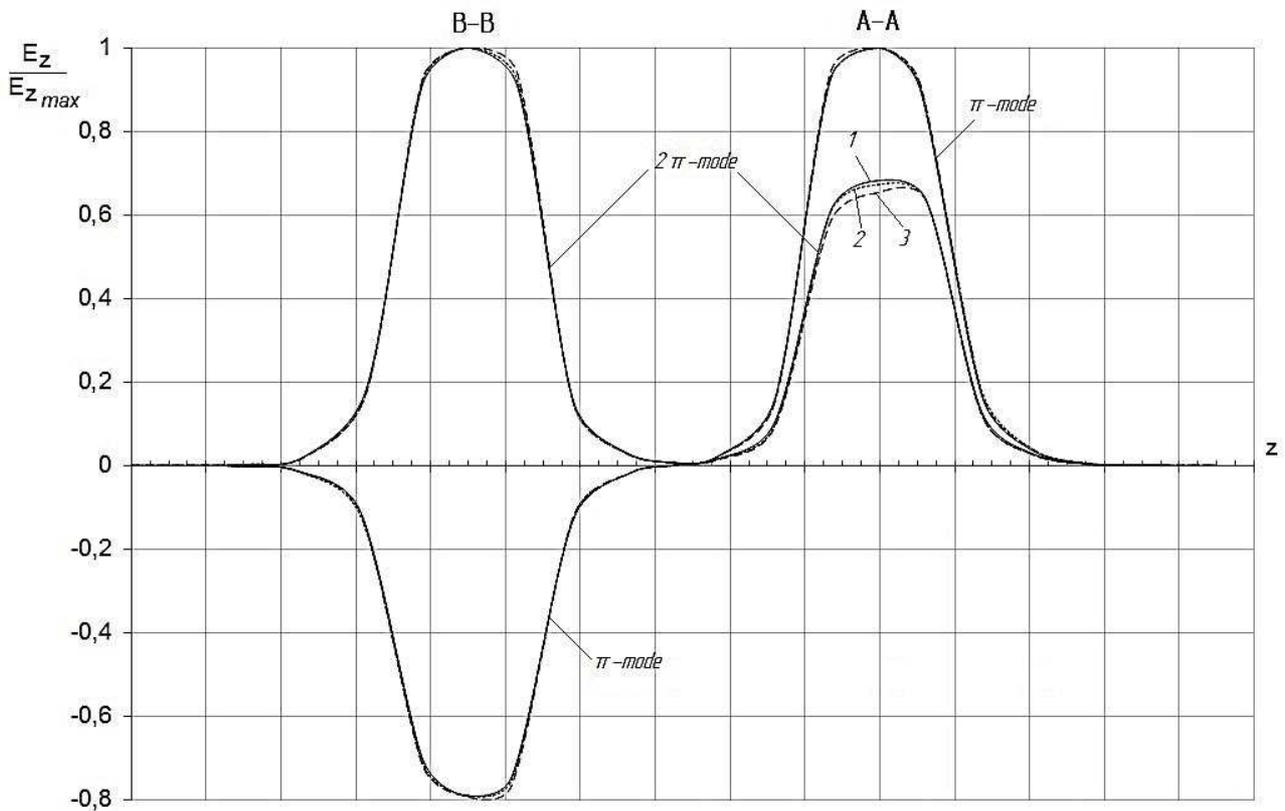


Рис. 9. Зависимость нормированной продольной компоненты электрического поля для двух видов колебаний в трех пролетных каналах вдоль пространства взаимодействия

Форму ВЧ напряжения на зазорах, измеренную с учетом реального распределения полей следует учитывать при расчете выходных характеристик клистрода, выходной резонатор которого настроен на основной

(противофазный) вид и на частоту третьей гармоники, соответствующей высшей (синфазной) моде выходного резонатора (рис. 10).

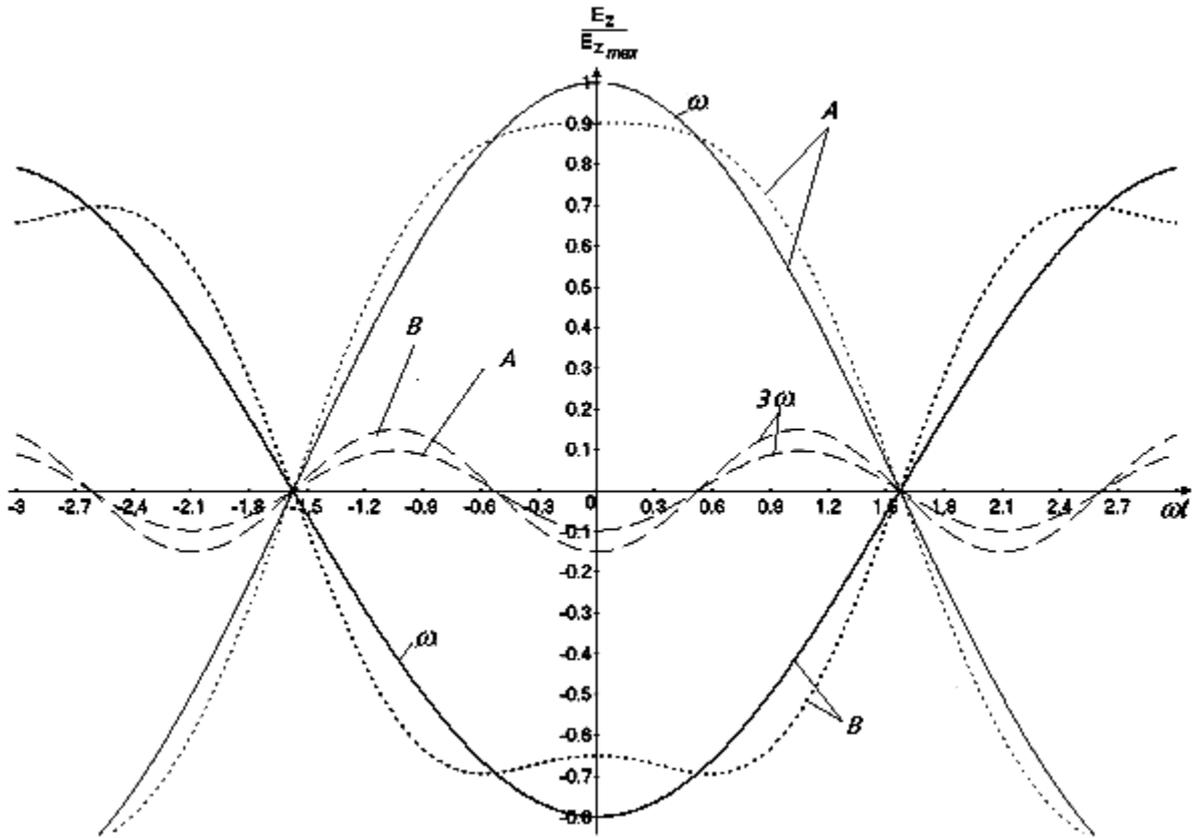


Рис. 10. Форма ВЧ напряжения в зазорах А и В в резонаторе, настроенном на первую и третью гармоники сигнала

Эффект сложения амплитуд поля первой и третьей гармоник, показанный на рис. 10, подтверждает возможность повышения электронного КПД за счет приближения форма поля в зазорах к меандру.

4. Оценка эффективности взаимодействия с электронным потоком

Зависимости, показанные на рис. 10, позволяют выбрать величину ускоряющего напряжения для конкретной конструкции прибора, рассчитанной на заданную выходную мощность.

Например, используя масштабное моделирование, можно определить размеры аналогичного резонатора для миниатюрного клистрода, работающего

на частоте 2450 МГц. При ускоряющем напряжении $U_0 = 3.8$ кВ и суммарном микропервееансе пучка, равном 4.5 мкА/В^{3/2}, выходная непрерывная мощность клистрода с исследуемым резонатором может быть около 2.5 – 3 кВт с КПД порядка 70%.

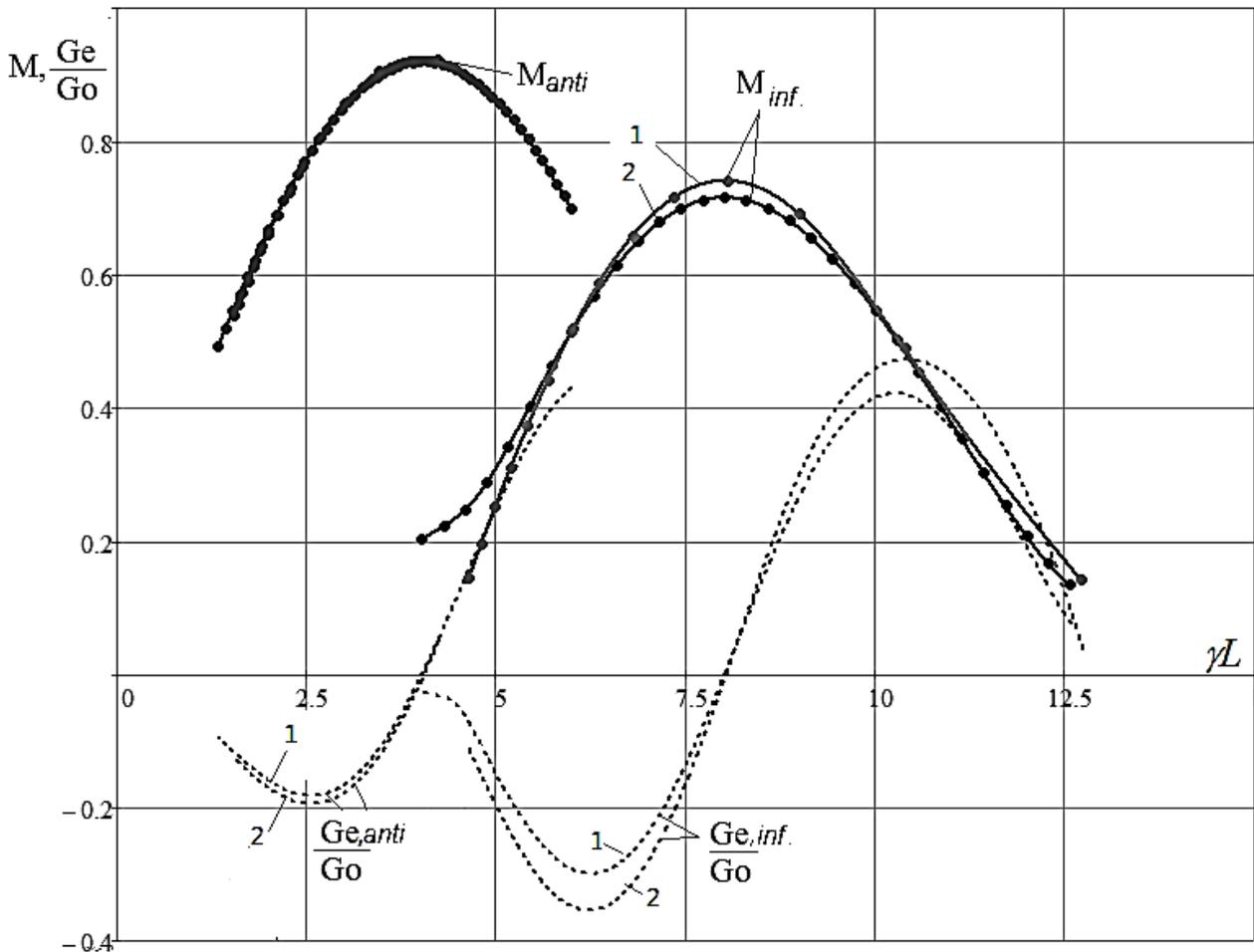


Рис. 11. Зависимости коэффициента эффективности взаимодействия M и относительной активной составляющей шунтирующей электронной проводимости G_e/G_0 от угла двойного зазора γL на π -моде и 2π -модах:

- 1 - расчет, сделанный с учетом неоднородного распределения поля в зазорах,
- 2- расчет при однородном распределении поля

Необходимые для оптимального взаимодействия величины эффективного характеристического сопротивления ρM^2 и нагруженной добротности можно регулировать, исходя из графиков, приведенных на рис. 12.

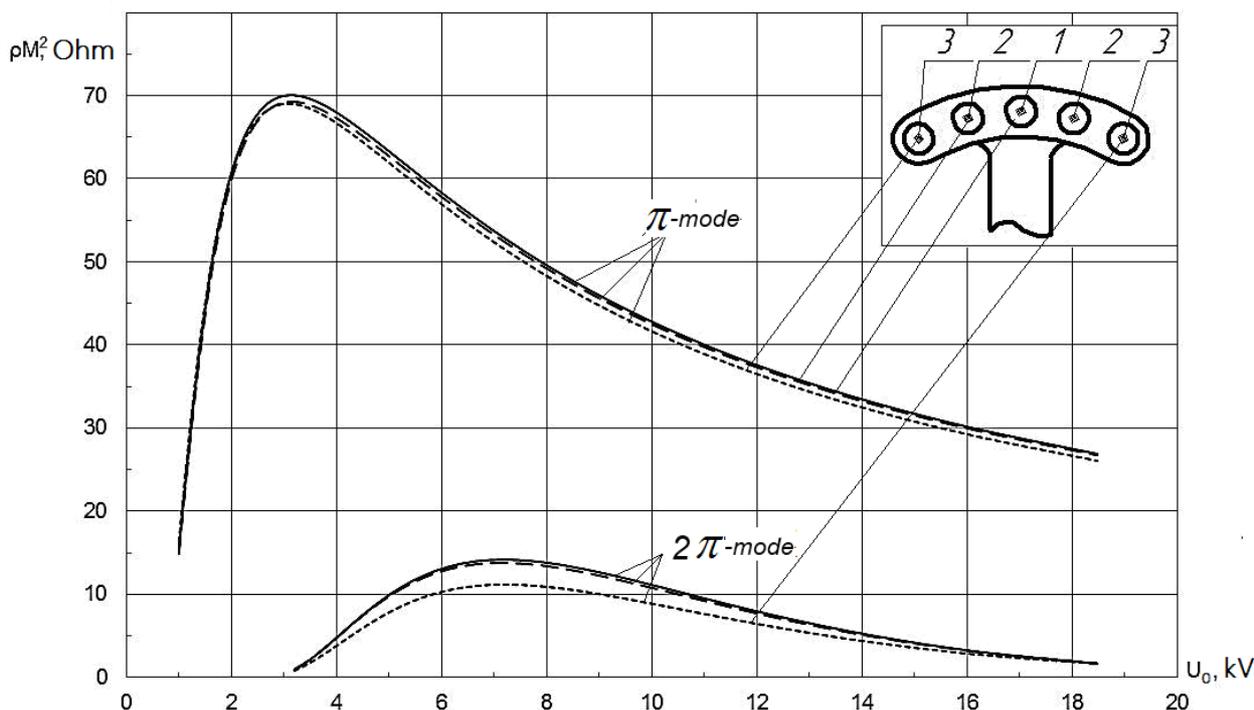


Рис. 12. Зависимость $\rho M^2(U_0)$ для синфазного и противофазного видов колебаний

Достоинствами нового прибора, по сравнению с магнетронами, при применении его в СВЧ энергетике, будут в 2-3 раза более высокая долговечность и возможность управления уровнем выходной мощности в широких пределах при одинаковых энергетических и массогабаритных параметрах.

Литература

1. О проектировании фрактальных радиосистем. Численный анализ электродинамических свойств фрактальной антенны Серпинского / Ю. В. Гуляев [и др.] // Радиотехника и электроника. - 2005. - Т. 50, N 9. - С.1070-1076.
2. Патент № 2084042. Клистрод / В. А. Царев, А. Ю. Мирошниченко. Приоритет от 29.06.1994, опубл. 10.07.1997.

3. Мирошниченко А.Ю. Двухззорные резонаторы фрактального типа / А. Ю. Мирошниченко, В. А. Царев, А. И. Корчагин // Журнал «Антенны». №11. – Москва: изд. «Радиотехника», 2011. С.63-67
4. Мучкаев В. Ю. REZON / В. Ю. Мучкаев, В. А. Царев // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011611748 от 24.02.2011.
5. Galdetskiy A. V., Korolev A. N. TV IOTs: achievements and prospects. // Int. Crimean Conf. on Microwave Technology and Telecommunications. Conf. proceedings. Sevastopol. 2006. P. 37-40.
6. Тихоплавов В.Ю., Тихоплавов Т.С. Гармония хаоса, или Фрактальная реальность. СПб.: Весь, 2003. 340 с.