

Моделирование электродинамических параметров двухззорного клистронного резонатора

А.Ю.Мирошниченко, В.А. Царев

Введение

В последнее время в конструкциях пролетных усилительных клистронов длинноволнового и средневолнового диапазонов частот находят все большее применение двухззорные цилиндрические резонаторы с противофазным возбуждением, которые позволяют расширить полосу усиления, а также увеличить коэффициент усиления и КПД этих приборов [1,2].

Однако такие электродинамические системы более трудоемки в разработке, по сравнению с обычными одноззорными резонаторами, поскольку они не имеют аксиальной симметрии, а для получения заданных электродинамических характеристик клистрона требуют подбора большего числа геометрических параметров. Оптимальные размеры этих резонаторов приходится подбирать либо экспериментально, либо расчетным путем.

Применение программ точного моделирования трехмерных электродинамических структур - это новый подход, который играет важную роль в процессе проектирования электронных приборов и устройств СВЧ [3-5]. Разработанные программы строгого трехмерного численного расчета резонаторов, такие как CST MICROWAVE STUDIO и HFSS вычисляют многомодовые S-параметры и электромагнитные поля для трехмерной электродинамической системы произвольной формы. Их применение заменяет традиционное макетирование резонаторов методом «проб и ошибок», улучшая качество проектирования. Однако процесс машинного проектирования, так же как и эксперимент, чрезвычайно трудоемкий. К тому же, не всегда удается найти связь между S-параметрами и основными

электродинамическими параметрами характеристиками резонаторов, такими, например, как емкость резонатора и характеристическое сопротивление $\rho = R_{\text{экв}} / Q_0$ (где $R_{\text{экв}}$ - эквивалентное сопротивление резонатора, Q_0 - собственная добротность). Одним из путей уменьшения времени при машинном проектировании резонаторов является использование простых аналитических соотношений, позволяющих с достаточной для практики точностью, оперативно определять основные электродинамические параметры. Эти соотношения в большинстве случаев состоят из аналитических зависимостей, дополненных аппроксимацией эмпирических кривых или эмпирических формул[6, 7].

Так как в настоящее время отсутствуют адекватные приближенные математические модели двухзазорного резонатора, то физическое и математическое моделирование этой электродинамической системы с целью построения удовлетворительной математической модели для расчета основных параметров двухзазорного резонатора является актуальной задачей.

1 Методика аналитического расчета резонансной частоты и характеристического сопротивления

В работе исследуется двухзазорный резонатор с возбуждением на противофазном виде колебаний. Конструктивная схема с указанием основных размеров и характер распределения ВЧ поля в зазорах резонатора показаны на рис.1.

Эквивалентная электрическая схема двухзазорного резонатора, возбуждаемого на π -виде колебаний может быть представлена в виде параллельного L_0C_0 контура, резонансную частоту ω_0 которого получим из условия равенства реактивных проводимостей B_C и B_L отрезка полосковой

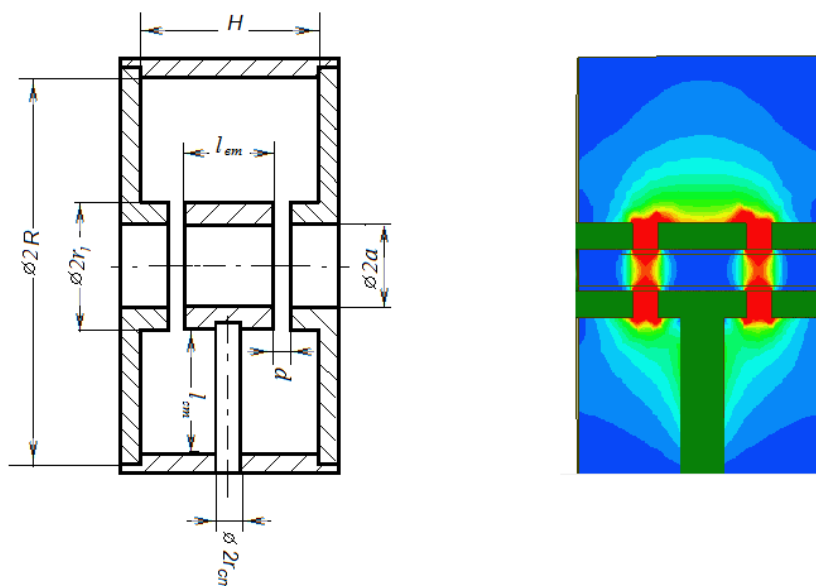


Рис. 1. - Схема исследуемого резонатора

линии, закороченной на одном конце и, нагруженной на емкость двойного зазора на другом конце [8]

$$B(\omega) = B_C + B_L = \omega C_0 - \left(\frac{1}{Z_0 c} \right) \operatorname{ctg} \left(\frac{\omega l}{c} \right) = 0, \quad (1)$$

где C_0 – сосредоточенная ёмкость на конце линии (ёмкость двойного зазора); l – длина полосковой линии, образованной боковыми крышками и центральным проводником; c – фазовая скорость волны типа ТЕМ в линии, равная, в случае вакуумного наполнения, скорости света; Z_0 – волновое сопротивление полосковой линии:

$$Z_0 = 60 \ln \left(0,635 \frac{H}{r_{cm}} \right), \quad (2)$$

где H – высота резонатора; r_{cm} – радиус центрального проводника (стержня) резонатора.

Характеристическое сопротивление резонатора ρ в значительной мере влияет на такие параметры клистрона как полный КПД, полоса и усиление. По этой причине при расчете и проектировании СВЧ приборов клистронного типа необходимо знать, по возможности, более точное значение ρ .

Приближенный аналитический расчет характеристического сопротивления двухзазорного резонатора в большинстве случаев производится по формуле [9]

$$\rho = \frac{2 N^2}{\omega_0 \left. \frac{\partial B(\omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0}} \quad (3)$$

Из уравнений (1) и (3) можно получить следующее выражение

$$\rho = \frac{\left(\frac{N^2}{\omega_0 C_0} \right)}{\left(0,5 + \frac{ml}{\sin(2ml)} \right)}, \quad (4)$$

где $m = \frac{\omega_0 l}{c}$ - приведенная длина резонансной линии, N – число зазоров.

Таким образом, зная точные значения емкости двойного зазора C_0 и параметры эквивалентной длинной линии l и z_0 можно аналитически рассчитать резонансную частоту $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ и величину характеристического сопротивления резонатора.

2 Аналитический метод расчета эквивалентной емкости двойного бессеточного зазора

Задача о нахождении емкости бессеточных зазоров клистронного резонатора решалась и ранее [10], но правильность применения предложенных приближенных формул для расчета двухзазорного резонатора не была подтверждена надежными экспериментальными данными или строгими электродинамическими расчетами.

Емкость одиночного бессеточного зазора C_l обычно рассчитывается как сумма торцевой емкости C_T и «внутренней емкости» $C_{вн}$, для расчета которой вводится γ_0 - коэффициент, учитывающий уменьшение торцевой емкости бессеточного зазора по сравнению с сеточным

$$C_i = \frac{a \left(\left(\frac{r_1}{a} \right)^2 - 1 + \gamma_0 \right)}{3,6 \frac{d_i}{a}},$$

Где d_i - длина зазора; i – номер зазора, $i=1,2$; r_1 - внешний радиус пролетных труб; a - радиус пролетного канала.

Для двухзазорного резонатора ($N=2$) в случае несимметричных зазоров ($d_1 \neq d_2$) полную емкость зазора C_0 можно представить как сумму двух торцевых емкостей C_1 , C_2 и боковой емкости C_δ с отдушки на корпус резонатора

$$C_0 = C_1 + C_2 + C_\delta. \quad (5)$$

Торцевые емкости $C_1=C_2$ можно определить следующим образом:

$$C_i = \frac{a \left(\left(\frac{r_1}{a} \right)^2 - 1 + \gamma_{0i} \right)}{3,6 \frac{d_i}{a}}, \quad (6)$$

При подстановке в эту формулу размеров резонатора *всм*, емкость C_i получается *внФ*. Однако эта методика усложняет процесс проектирования резонатора и увеличивает его трудоемкость. Для вычисления коэффициента можно использовать в диапазоне отношений $\frac{d}{a} = 0,4 \div 2$ следующие приближенные аналитические соотношения:

$$\gamma_0 \approx K_r K_z, \quad (7)$$

$$\text{где } K_r = -0,31 \left(\frac{a}{r_1} \right)^2 - 0,01 \left(\frac{a}{r_1} \right) + 0,982;$$

$$K_z = 0,0714 \left(\frac{d}{a} \right)^5 - 0,484 \left(\frac{d}{a} \right)^4 + 1,33 \left(\frac{d}{a} \right)^3 - 2,03 \left(\frac{d}{a} \right)^2 + 1,97 \left(\frac{d}{a} \right).$$

Боковую емкость C_δ , входящую в выражение (5), можно рассчитать как емкость отрезка коаксиальной линии, образованной втулкой с длиной $l_{от}$ и внешним радиусом r_1 и корпусом резонатора с радиусом R

$$C_{\sigma} = \frac{0,556 \cdot l_{em}}{\ln\left(\frac{R}{r_1}\right)} \left(1 - \frac{0,5 \cdot r_s^2}{r_1 \cdot l}\right) \quad (8)$$

В формуле (8) учтена поправка $\left(1 - \frac{0,5 \cdot r_s^2}{r_1 \cdot l}\right)$, связанная с уменьшением боковой емкости втулки за счет экранировки ее стержнем с радиусом r_s . Недостатком описанной выше методики является то, что аппроксимация коэффициента γ_0 проведена по данным аналитического расчета.

Однако проверка правильности этих приближенных формул должна быть поддержана надежными экспериментальными данными или строгими электродинамическими расчетами.

3 Определение эквивалентной емкости двойногобессеточного зазора с помощью метода планируемого эксперимента

Методика построения приближенной математической модели в этом случае сводилась к определению опорной аналитической функции, и последующей аппроксимации невязки между экспериментальными и расчетными данными с помощью метода планируемого эксперимента.

Для проведения исследований по методике планируемого эксперимента необходимо было, согласно центральному композиционному плану [11] для трех безразмерных факторов ($X_1 = r_1 / a$, $X_2 = l_{em} / a$, $X_3 = d / a$) провести 15 опытов с резонаторами, размеры зазоров которых должны варьироваться в соответствии с планом эксперимента. С этой целью был изготовлен специальный разборный макетрезонатора, позволяющий путем механической перестройки изменять соотношения между его основными геометрическими размерами. Для повышения точности измерений резонансных частот макет резонатора был выполнен в увеличенном размере, так что его резонансные частоты (при изменении размеров зазоров) находились в диапазоне 400-600 МГц.

В качестве опорной аналитической функции, описывающей емкость C_1 была выбрана функция, описывающая емкость C_{10} между двумя коаксиальными круговыми кольцами [12]

$$C_{10} \approx \frac{\pi \varepsilon \cdot r_1^2}{d} + 4r_1 \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - 0,03 \cdot \frac{a}{r_1}\right) \cdot \left(1 - 0,08 \cdot \left(\frac{a}{r_1}\right)^3\right) \quad (9)$$

Полная емкость двойного зазора C_{20} (опорная функция) при этом определяется по уравнению

$$C_{20} = 2C_{10} + C_{\sigma} \quad (10)$$

Для невязки между экспериментальными и расчетными данными с помощью метода планируемого эксперимента получено следующее выражение

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + B_4 X_1 X_2 + B_5 X_1 X_3 + B_6 X_2 X_3 + B_7 X_1^2 + B_8 X_2^2 + B_9 X_3^2,$$

где $B_0 = 0,8704$; $B_1 = -0,2358$; $B_2 = 0,2913$; $B_3 = -0,2451 \cdot 10^{-2}$; $B_4 = -0,02331$;

$B_5 = -0,02976$; $B_6 = 0,9675 \cdot 10^{-2}$; $B_7 = 0,09497$; $B_8 = 0,3298 \cdot 10^{-2}$; $B_9 = -0,6195 \cdot 10^{-3}$.

Окончательно величина емкости рассчитывалась по формуле

$$C_{0(расч)} \approx C_{20} \cdot Y \quad (11)$$

4 Методика экспериментального определения характеристического сопротивления

Перейдем теперь к методике экспериментального определения характеристического сопротивления ρ . В инженерной практике широко используется метод возмущения [13], согласно которому в канал помещают тонкую диэлектрическую ленту и прижимают ее к краю высокочастотного зазора, перекрывая его. Определение ρ далее ведется по формуле:

$$\rho = \frac{\Delta f \cdot N \cdot d}{f_0 \cdot S \cdot (\varepsilon - 1)} \quad (12)$$

где f_0 - резонансная частота резонатора, ГГц; d - длина одного зазора в мм; N - число зазоров; ε - относительная диэлектрическая проницаемость

диэлектрика; S - площадь поперечного сечения диэлектрика, мм^2 ; Δf - смещение частоты от внесения диэлектрика, МГц.

Приемлемая точность измерения ρ получается в том случае, если диэлектрическая лента тонкая ($t < 0,06a$), а зазор между трубами большой ($d/a > 1$). Однако, при проведении экспериментов практически невозможно плотно прижать ленту по всей ширине к краю зазора, что приводит к разбросу Δf при повторении измерения и появлению ошибок.

В работе [14] приведена уточненная формула для расчета характеристического сопротивления многолучевого однозазорного резонатора, позволяющей рассчитывать ρ произвольных возмущениях.

Для двухзазорного резонатора ($N = 2$) эта формула может быть переписана в виде

$$\rho = 18 \cdot \frac{2 \cdot \Delta f \cdot (d + 2d_s)}{f_0 \cdot S \cdot (\varepsilon - 1)} \cdot \frac{2 - \frac{\Delta f}{f_0} \cdot 10^{-3}}{\left(1 - \frac{\Delta f}{f_0} \cdot 10^{-3}\right)^2}, \quad (13)$$

где коэффициент $d_s = 0,092d$ учитывает провисание поля в канал.

5 Оценка точности полученных результатов

Результаты расчетов и измерений для одной точки плана, соответствующей параметрам $l_{em}/a = 2,33$, $r_1/a = 2,44$ сведены в табл.1 и 2 и показаны на рис. 2 -4.

Таблица №1

Экспериментальные и расчетные значения резонансной частоты f , статической емкости C , двойного бессеточного зазора для параметров

$$l_{em}/a = 2,33, \quad r_1/a = 2,44$$

d/a	0,697	1,395	2,092	2,789
$f_{экс}$, МГц	397,78	466,43	502,57	523,96
$f_{расч}$, МГц по программе HFSS	389,12	463,87	501,65	523,78

Продолжение таблицы №1

$f_{расч}$, МГц по формуле (1)	406,3	470,9	503,0	524,07
$C, пФ$ по формуле (5)	5,008	3,654	3,116	2,893
$C, пФ$ по формуле (11)	5,096	3,629	3,101	2,805
$C, пФ$ по формуле (4)	5,523	3,607	3,105	2,858

Таблица №2

Экспериментальные и расчетные значения характеристического
сопротивления двухззорного резонатора для параметров

$$l_{эм} / a = 2,33, r_1 / a = 2,44$$

d/a	0,697	1,395	2,092	2,789
ρ , Ом (по формуле (4), C по формуле (5))	310,46	373,354	406,3	419,74
ρ , Ом (по формуле (13))	297,13	381,56	409,84	426,44
ρ , Ом (по формуле (4), S по формуле (11))	320,1	377,95	408,95	432,97
$\Delta\rho$, %	4,5	2,2	0,9	1,6

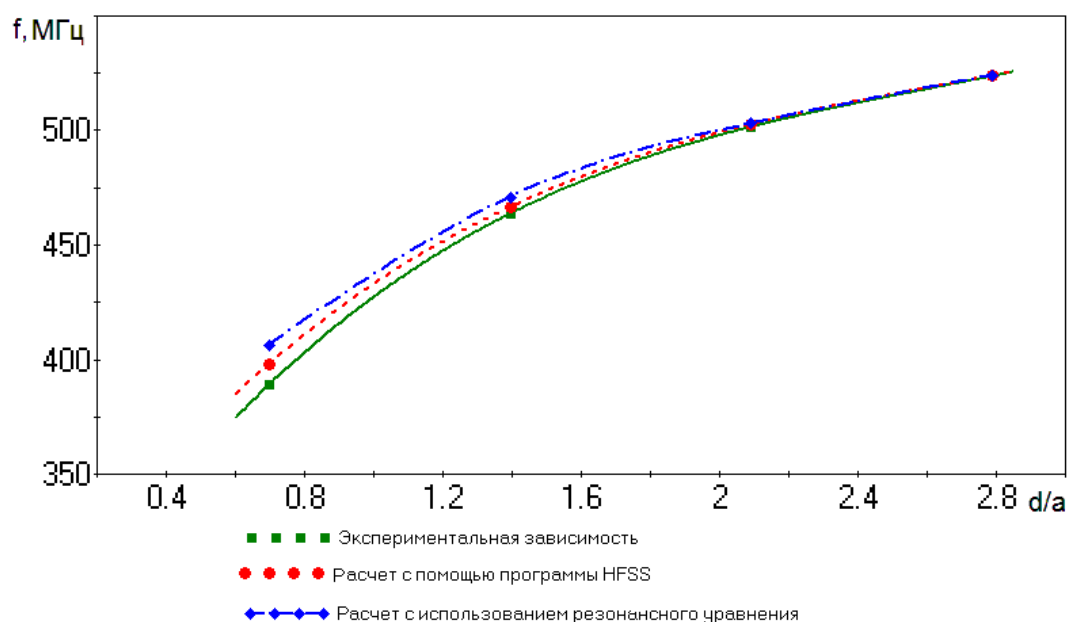


Рис. 2. - Зависимости частот резонатора от относительной длины зазора

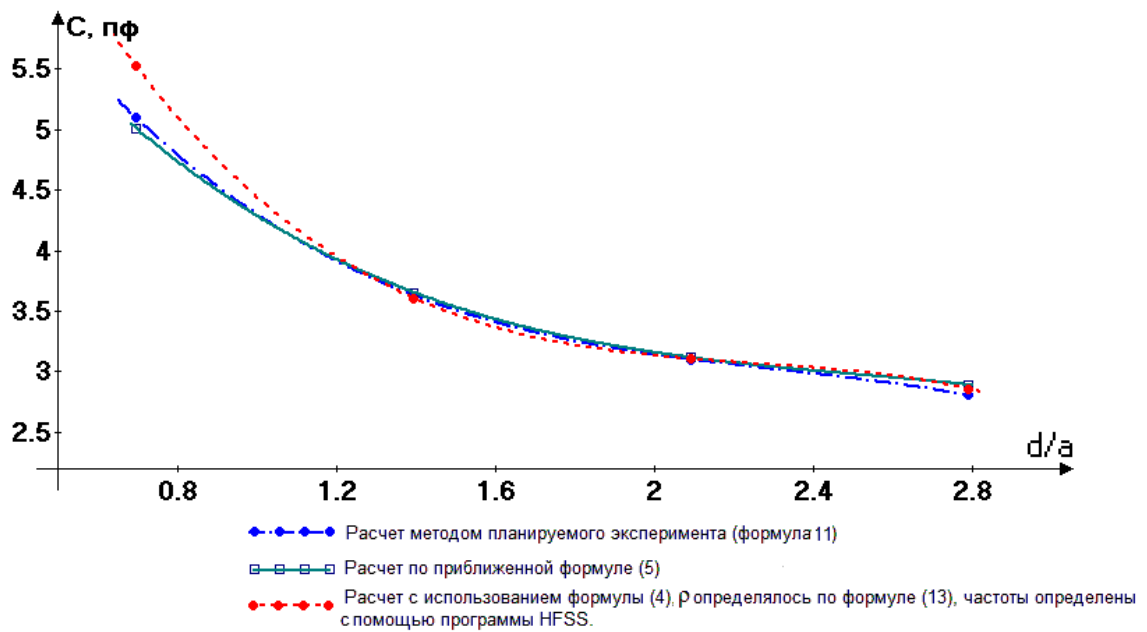


Рис.3. - Зависимости емкости резонатора от относительной длины зазора

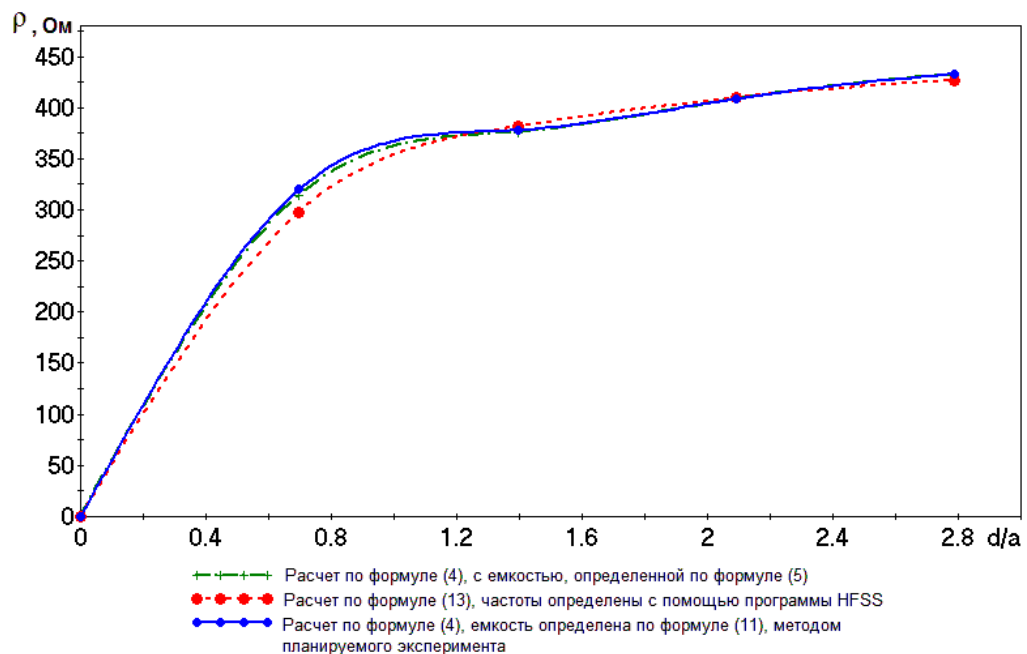


Рис. 3. - Зависимости характеристического сопротивления резонатора от относительной длины зазора

Анализ полученных результатов показывает, что погрешность определения резонансной частоты по уточненной формуле(11) (с корректирующим полиномом Y) меньше 1% в диапазоне изменения влияющих факторов: $2 < l_{em} / a < 5$; $1 < d / a < 2,5$; $1,1 < r_1 / a < 2$.

Погрешность определения характеристического сопротивления по формуле (4) не превышает 5 % в диапазоне изменения влияющих факторов.

Однако, следует учесть, что экспериментальным путем, даже при большом наборе статистики, трудно определить ρ с погрешностью менее 5%. К сожалению, более строгие методы измерения ρ в настоящее время отсутствуют.

Выводы

1. Проведено физическое и математическое моделирование двухззорного резонатора, используемого в конструкциях пролетных усилительных клистронов.

2. Предложены уточненные математические модели этой электродинамической системы, которые могут найти применение в программах оперативной оптимизации СВЧ приборов клистронного типа.

3. Проведенный анализ адекватности полученных моделей показал, что в выбранных диапазонах изменения влияющих факторов погрешности расчета не превышают следующих значений: резонансной частоты противофазного вида колебаний - 1%, характеристического сопротивления - 5%. Полученные аналитические соотношения позволяют оперативно провести расчет параметров резонатора, не прибегая к трудоемким и дорогостоящим экспериментам и расчетам.

Исследование 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»

Литература:

1. Shin, Ki R. Double-gap rebuncher cavity design of SNS MEBT / Ki R. Shin, Yoon W. Kang, Aly E. Fathy // Proceedings of International Particle Accelerator Conference and Exhibition. - New Orleans, USA – 2012. – P. 3898-3900.
2. Lin, Fu-Min. Analysis of the optimal gap width and gap-to-gap distance in $\frac{1}{4}$ -mode double-gap cavities for broadband klystrons / Fu-Min Lin // Proceedings of Progress in electromagnetics research symposium. - Hangzhou, China. – 2008. – P. 1353-1356.
3. Банков, С.Е. Расчет антенны СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft [Текст] / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. - 256 с.
4. Шурховецкий, А.Н. Многоканальная частотно-избирательная система СВЧ диапазона на основе направленных фильтров бегущей волны [Электронный ресурс] / А.Н. Шурховецкий // Инженерный вестник Дона. – 2010. - №4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/292> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. Самарский, С.Г. Широкополосный печатный излучатель для фар различного назначения [Электронный ресурс] / С.Г. Самарский // Инженерный вестник Дона. – 2010. - №4. - Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/291> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
6. Шатилов, В.С. Приближенный расчет параметров тороидальных резонаторов [Текст] / В.С. Шатилов // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ.-1981.- Вып.3.- С. 34-38.
7. Оценка точности аналитических соотношений для расчета характеристик тороидальных резонаторов [Текст] / А.Н. Варнавский, Р.Ф. Дроздов, С.В. Королев, В.С. Шатилов // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ.-1981.- Вып.11.- С. 28-30.

8. Орлов, С.И. Расчет и конструирование коаксиальных резонаторов [Текст] / С.И. Орлов. - М.: Сов.радио, 1970.- 256 с.

9. Голубев, С.Н. Многорезонаторный пролетный усилительный клистрон [Текст] / С.Н. Голубев, И.И. Лошакова, В.А. Царев. – Саратов:Сарат. политехн. ин-т, 1984.- 59 с.

10. Петров, Д.М. О «внутренней» емкости между торцами одинаковых труб [Текст] / Д.М. Петров, М.И. Соловьева // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1961. - №5. – С. 39-47.

11. Байбурин, В.Б. Модели и методы планируемого эксперимента: Учеб. пособие по курсу «Мат. моделирование в науч. исслед. и инж. задачах» для студентов спец. 2202, 2204 / В. Б. Байбурин, Р. П. Кутенков. – Саратов:СГТУ, 1994. - 49 с.

12. Иоссель, Ю. Расчет электрической емкости: 2-е изд., перераб. и дополн / Ю. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. - Л: Энергоиздат, Ленингр. отд., 1981.- 228 с.

13. Хаби, В.С. Измерение характеристического сопротивления резонатора с бессеточным зазором [Текст] / В.С. Хаби // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ.- 1971.- Вып. 3.- С. 138 – 140.

14. Прокофьев, Б.В. К расчету характеристического сопротивления резонаторов многолучевых вакуумных приборов СВЧ [Электронный ресурс] / Б.В. Прокофьев, А.В. Коннов, В.Л. Саввин // Журнал радиоэлектроники. – 2011. - №12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec11/1/text.html> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз.рус.