

# Анализ электродинамических параметров двухззорного клистронного резонатора с включением дополнительного элемента из метаматериала

И.А. Емелин, А.Ю. Мирошниченко, В.А. Царев, Н.А. Акафьева

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

**Аннотация:** исследован двухззорный многоканальный клистронный резонатор, содержащий в своем составе дополнительный элемент в виде кольцевого разрезного резонатора электрического типа (КРР). Представлены результаты расчета электродинамических параметров такого резонатора. Показано, что применение КРР позволяет уменьшить поперечный размер резонатора в 3,3 раза по сравнению с классическим одноззорным при сохранении высоких значений электродинамических параметров.

**Ключевые слова:** клистрон, двухззорный резонатор, метаматериал, кольцевой разрезной резонатор, многолучевой клистрон, электродинамические параметры.

## 1. Введение

В настоящее время клистроны находят достаточно широкое применение в различных технологических установках, ускорителях заряженных частиц, средствах телекоммуникации и связи так как имеют большую мощность, высокий КПД и коэффициент усиления, а также длительный срок службы, при этом разработкой клистронов занимаются научные группы в разных странах. Среди разнообразия клистронов известны также низковольтные миниатюрные клистроны, которые в ряде случаев могут составить конкуренцию усилителям на полупроводниковых приборах, в силу большей эффективности, температурной и радиационной стойкости и могут работать самостоятельно или в качестве комплексированных устройств [1].

Одним из ключевых узлов клистроны является его резонансная система, во многом определяющая выходные параметры прибора. Если рассматривать клистроны для бортовой радиопередающей аппаратуры, то здесь немаловажным фактором будут являться также массогабаритные параметры прибора, которые также существенно зависят от размеров резонансной системы. Поэтому разработка компактного клистроны со сниженной массой имеет большое значение, особенно в длинноволновом диапазоне частот. В настоящее время одним из решений для преодоления этого ограничения является разработка многолучевого клистроны. Это позволяет уменьшить объем и вес конструкции прибора и источника питания клистроны [2]. В клистроны в настоящее время используются как одноззорные, так и двухззорные резонаторы [3]. Для приборов миллиметрового диапазона перспективны также многоззорные резонаторы [4].

Наряду с этим большое внимание исследователей в последние годы привлекают метаматериалы (МТМ) именно для использования в приборах вакуумной СВЧ электроники. Метаматериалы — это искусственно созданные субволновые структуры, обладающие новыми свойствами [5], а их электромагнитные характеристики можно регулировать, изменяя размеры, структуру и расположение МТМ.

В части применения МТМ в приборах вакуумной электроники, исследователей и разработчиков электронной аппаратуры привлекают возможности получить

компактный прибор с высокой эффективностью [6]. В частности, использование полых металлических волноводов, нагруженных элементами МТМ, позволяют устройству работать ниже своей первоначальной частоты отсечки. Таким образом, разрабатываемые устройства обладают очевидным преимуществом в миниатюризации [7]. Кроме того, высокое сопротивление связи устройств даёт устройству с встроенным МТМ высокую эффективность преобразования энергии [8]. Кроме приборов с распределенным взаимодействием, МТМ находит применение также в клистронах. Например, в [9] представлен клистрон с выходной мощностью 2.28 МВт, работающий на частоте 714 МГц при ускоряющем напряжении 100 кВ. Характерная особенность такого клистрона - применение в резонаторах в качестве МТМ дополнительного КРР. Еще одна интересная конструкция клистронных резонаторов с включением МТМ описана в статье [10]. В ней представлена конструкция клистрона выходной мощностью 2.97 МВт, работающего на частоте 324 МГц с ускоряющим напряжением 110 кВ. Однозачорный резонатор такого клистрона выполнен нагруженным на элемент МТМ в виде КРР. В этих двух конструкциях клистронов применением элементов из метаматериала в резонансных системах удалось существенно снизить массогабаритные параметры резонаторов, а, следовательно, и всего прибора, при этом эти клистроны обладают большой выходной мощностью и высоким коэффициентом усиления.

Целью настоящей статьи является исследование с помощью численных методов электродинамических характеристик двухзачорного многоканального клистронного резонатора, содержащего в своем составе дополнительный элемент из метаматериала - КРР по типу, представленному в [9].

## 2. Конструкция резонатора

Конструкция резонатора представлена на рисунке 1. Он представляет собой цилиндрический объемный резонатор 1 с боковыми многоканальными втулками 2, содержащими пролетные каналы для прохождения электронного потока 3, закрепленными на боковых крышках 4. В центре резонатора размещен дополнительный резонансный элемент из метаматериала - кольцевой щелевой резонатор электрического типа 5, который обычно выполняется также, как и основной корпус из меди. Он состоит из внешнего кольца 6, внутреннего кольца 7 и щелевой линии кольцевого типа 8. В центре внутреннего кольца размещен центральный электрод 9 с каналами для пролета электронного потока 10. Внутреннее кольцо метаматериала соединяется с внешним кольцом посредством перемычки. Центральный электрод резонатора совместно с боковыми втулками образует два высокочастотных емкостных зазора резонатора. Перемычка и внутренний диск образуют индуктивную часть резонатора.

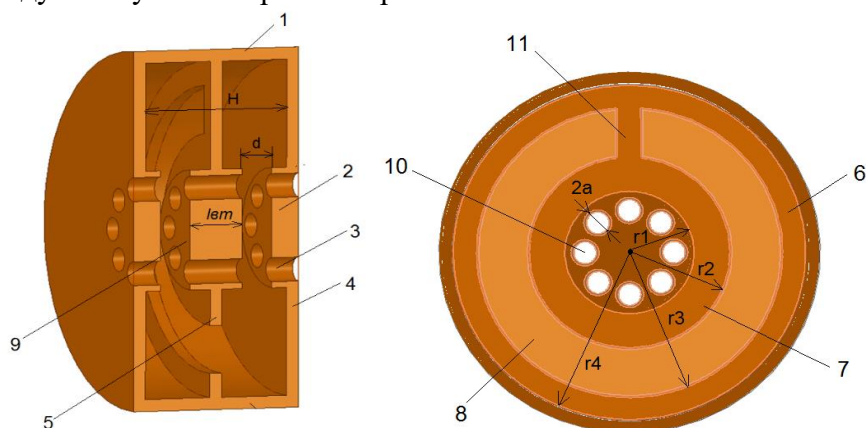


Рисунок 1. Конструкция двухзачорного резонатора с метаматериалом

Основные геометрические параметры резонатора в мм для одного варианта элемента из метаматериала приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Основные геометрические размеры резонатора в мм

H	d	L <sub>em</sub>	a	r1	r2	r3	r4
12	2.5	4.4	1	5	12	14	15

## 2. Результаты моделирования

При электродинамическом анализе резонатора использован численный метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в трехмерной частотной области, при этом исследование резонатора проводилось в частотном диапазоне до 15 ГГц. В этой полосе частот в зависимости от параметров КРР располагается от 6 до 8 мод. В клистроне резонаторы обычно работают либо на основной моде, либо на ближайших высших модах. На основании проведенного исследования было выяснено, что в резонаторе основная мода колебаний  $\pi$ , противофазная, следующая мода -  $2\pi$ , синфазная. Вышеуказанные моды среди всех резонансных частот имеют наибольшее характеристическое сопротивление. В таблице 2 приведены электродинамические параметры именно для этих резонансных частот при различных радиусах  $r_2$  ( $r_2=0$  соответствует полному отсутствию этого диска).

**Таблица 2.** Основные электродинамические параметры для двух первых мод резонатора

Диаметр внутреннего диска КРР $r_2$ , мм	Вид колебаний	Частота, ГГц	Собственная добротность, $Q_0$	Характеристическое сопротивление, $\rho$ , Ом
0	$\pi$	2,433	1603	250
	$2\pi$	6,543	5697	114
6	$\pi$	2,394	1579	246
	$2\pi$	6,577	5486	118
8	$\pi$	2,266	1493	193
	$2\pi$	6,599	5066	106
10	$\pi$	2,186	1263	164
	$2\pi$	6,649	4638	117

Результаты электромагнитного анализа, представленные в таблице 2 показывают, что частота  $\pi$  моды при увеличении радиуса диска  $r_2$  уменьшается, в тоже время частота синфазной  $2\pi$  моды увеличивается. Собственная добротность при увеличении параметра  $r_2$  от 0 до 10 мм на  $\pi$  моде уменьшается на 21%, в это же время на  $2\pi$  моде - уменьшается на 19%. Характеристическое сопротивление при увеличении радиуса диска  $r_2$  с 0 до 10 мм на  $\pi$  моде уменьшается на 35%. На  $2\pi$  моде изменение характеристического сопротивления неоднородно при увеличении параметра  $r_2$  и составляет около 7%.

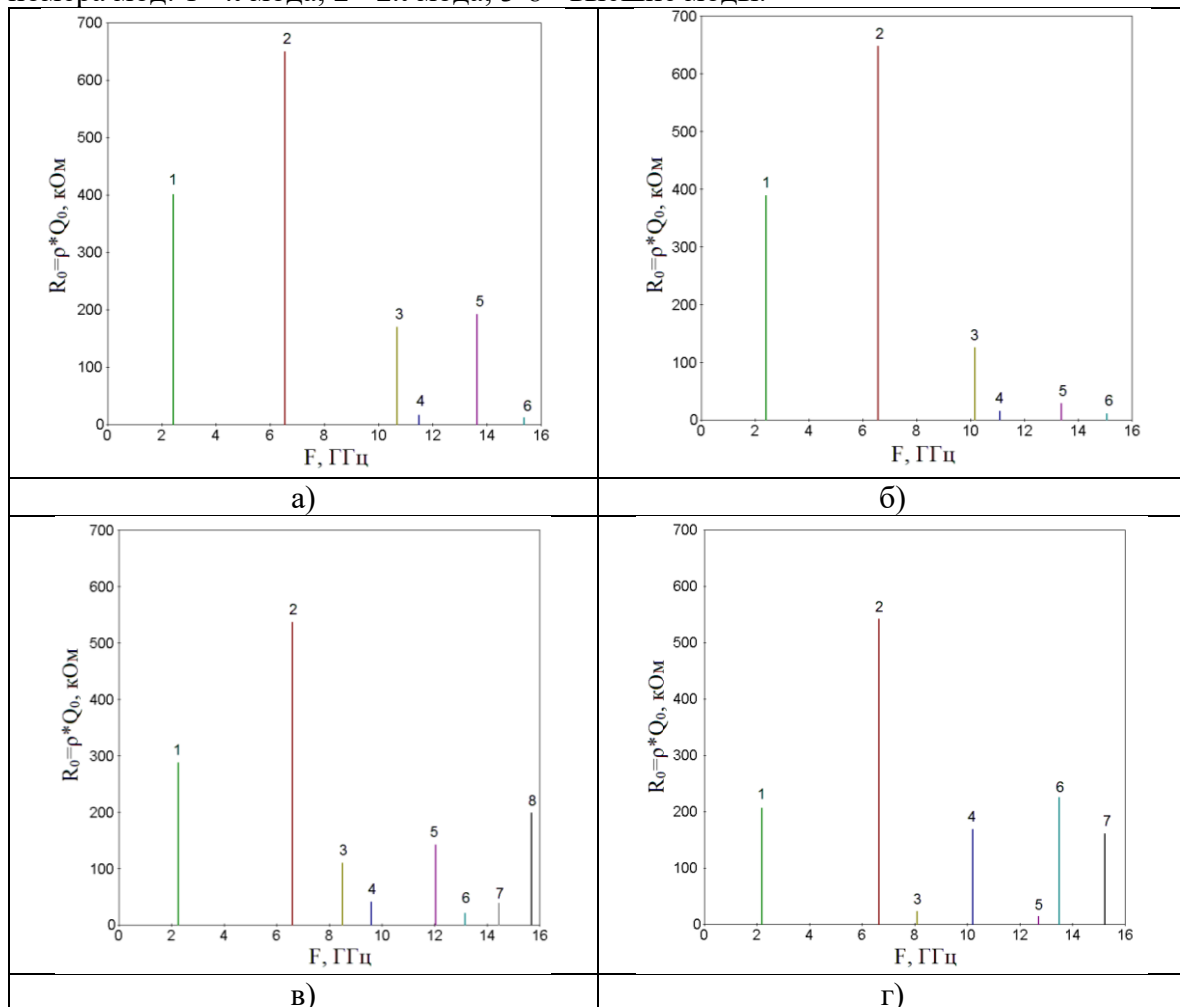
Для сравнения степени уменьшения габаритов резонатора при включении в конструкцию КРР было проведено также моделирование одноззорного резонатора настроенного на одну частоту с исследованным двухззорным резонатором. При этом резонаторы имели одну и ту же высоту  $H$  и длину пространства взаимодействия. При этом одноззорный резонатор, настроенный на основную моду, имел диаметр в 3,3 раза больше двухззорного резонатора с КРР. На рисунке 2 представлены картины электрического поля исследуемого резонатора для двух случаев, двухззорный резонатор с КРР на  $\pi$  моде (рис. 2,а), двухззорный резонатор с КРР на  $2\pi$  моде

(рис. 2,б).



**Рисунок 2.** Картины поля в исследуемом резонаторе. а- $\pi$  мода; б-  $2\pi$  мода.

Несмотря на то, что в клистронных резонаторах для работы используются в основном низшие моды, высшие типы также могут оказывать влияние на работу прибора. Поэтому был проанализирован спектр частот резонатора в диапазоне от 1 до 15 ГГц. В качестве критерия оценки выбран параметр резонансного сопротивления,  $R_0 = \rho \cdot Q_0$ . Результаты представлены на рисунке 3. Цифрами на графиках помечены номера мод: 1 -  $\pi$  мода; 2 -  $2\pi$  мода; 3-8 - высшие моды.



**Рисунок 3.** Спектры резонатора в зависимости от радиуса  $r_2$ : а - диск отсутствует; б -  $r_2=6$  мм; в -  $r_2= 8$  мм; г -  $r_2= 10$  мм.

Из рисунка 3 видно, что кроме основных первых мод  $\pi$  и  $2\pi$ , резонатор возбуждается и на других частотах, высших типах колебаний. Причем при различных параметрах  $r_2$  спектр высших типов колебаний ведет себя по-разному. При  $r_2=6$  мм происходит существенное подавление высших мод в диапазоне выше 10 ГГц. Частота в районе 10 ГГц подавляется на 26%, частота около 11 ГГц - на 11%, частота 13 ГГц - на 85%. При этом параметры двух первых мод  $\pi$  и  $2\pi$  меняются не существенно. При дальнейшем увеличении параметра  $r_2$  резонансное сопротивление  $R_0$  на  $\pi$  и  $2\pi$  модах уменьшается. Исходя из результатов моделирования, наиболее оптимальным вариантом расчета можно считать конструкцию при  $r_2=6$  мм, при котором сохраняются высокие электродинамические параметры на первых двух модах  $\pi$  и  $2\pi$  и есть подавление высших мод в диапазоне 10-15 ГГц.

### 3. Заключение

Исследован двухззорный многоканальный резонатор для пролетного клистрона. Особенностью конструкции данного резонатора является включение в конструкцию классического двухззорного резонатора элемента метаматериала в виде дополнительного кольцевого разрезного резонатора электрического типа. Полученные результаты показали возможность существенного уменьшения габаритных размеров резонансной системы, а также, следовательно, и его массы по сравнению с классическим одноззорным резонатором. При этом его электродинамические параметры остаются достаточно высокими, сравнимыми с параметрами классических двухззорных резонаторов. Интересным свойством КРР является подавление высших типов колебаний при определенных размерах КРР.

Резонатор данного типа может найти применение в пролетных многолучевых клистролах, в том числе низковольтных, например, для работы в устройствах связи и телекоммуникации.

#### Список литературы

1. Kotov A. S., Gelvich E. A., Zakurdayev A. D. Small-size complex microwave devices (CMD) for onboard applications // IEEE transactions on electron devices. – 2007. – Т. 54. – №. 5. – С. 1049-1053.
2. Ding Y. et al. The design and calculation of P-band 1.2 MW multi-beam Klystron // 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2017. – С. 1-2.
3. Царев В.А., Онищенко А.П. Учредители: Российская академия наук, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН // Радиотехника и Электроника. – 2022. – Т. 67. – №. 10. – С. 987-992.
4. Григорьев А. Д. Многоззорные резонаторы для мощных усилительных клистронов миллиметрового диапазона длин волн // Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – 2014. – С. 131-135.
5. Veselago V.G., The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . Sov. Phys. Uspekhi. – 1967. – Т. 10. – № 4. – С. 509–514.
6. Shiffler D. et al. Study of split-ring resonators as a metamaterial for high-power microwave power transmission and the role of defects // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Т. 41. – №. 6. – С. 1679-1685.
7. Bartolic J. Waveguide miniaturization using uniaxial negative permeability metamaterial // IEEE transactions on antennas and propagation. – 2005.
8. Dai O. et al. A novel L-band metamaterial relativistic Cherenkov oscillator with high conversion efficiency // Physics of Plasmas. – 2019. – Т. 26. – №. 2.
9. Zhang X. et al. Metamaterial-inspired interaction structure for MW-level klystron at 714 MHz // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2022. – Т. 69. – №. 11. – С. 6336-6341.
10. Zhang X. et al. Miniaturized P-band MW-level klystron with CeSRRs for CSNS linac application // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2023. – Т. 70. – №. 9. – С. 4878-4884.