

**Р.А. Косарев, М.А. Мартыненко, Б.В. Прокофьев,  
И.А. Фрейдович  
ФГУП «НПП «Торий»**

## **Особенности электродинамической системы мощного импульсного клистрона с резонаторами на виде колебаний $E_{020}$**

*Рассмотрены особенности проектирования электродинамической системы мощного многолучевого клистрона с кольцевыми резонаторами на виде колебаний  $E_{020}$ . Описана методика выбора конфигурации и размеров резонаторов, позволившая добиться максимального удаления паразитных видов колебаний от рабочей частоты прибора и выровнять характеристические сопротивления в зазорах пролетных каналов. Представлено решение проблемы сохранения азимутальной симметрии полей во входном и выходном резонаторах, нагруженных на волноводы ввода/вывода энергии. Для вывода энергии прибора спроектировано простое волноводное окно, обладающее повышенной устойчивостью к пробоям по поверхности вакуумноплотной керамической перегородки.*

**Ключевые слова:** многолучевой клистрон, кольцевой резонатор, вид колебаний  $E_{020}$ , волноводное окно «на смешанных модах»

Целью работы было проектирование электродинамической системы компактного низковольтного импульсного клистрона, предназначенного для работы в ускорителях, с импульсной выходной мощностью 3 МВт и средней мощностью 10 кВт на частоте 5,712 ГГц при напряжении катода 43 кВ и импульсном токе 130 А. Реализация этих параметров требует применения многолучевой конструкции с количеством лучей не менее 25, позволяющим обеспечить приемлемую плотность тока с катода. При таком количестве лучей использование тороидальных резонаторов оказывается нежелательным, так как из-за большой площади емкостного выступа, на котором в два ряда расположены отверстия пролетных каналов, значительный перепад характеристического сопротивления по радиусу выступа приводит к снижению КПД клистрона. По этой причине в подобных случаях принято отдавать предпочтение кольцевым резонаторам с однорядным расположением пролетных каналов, работающим на осесимметричном виде колебаний  $E_{010}$  [1]. Недостатком такого решения является чрезмерный диаметр резонатора и приближение паразитных видов колебаний к рабочему виду, если на окружности резонатора приходится размещать большое число пролетных каналов. Улучшения характеристик прибора можно добиться, применив резонаторы, работающие на виде колебаний  $E_{020}$ . Ниже описаны методики выбора конфигурации и основных размеров резонаторов на виде  $E_{020}$ , а также особенности конструкции входного и выходного резонаторов и волноводного окна вывода энергии.

Резонатор, работающий на виде колебаний  $E_{020}$ , содержит две пары кольцевых выступов, причем обе пары расположены соосно друг другу на расстояниях от оси, соответствующих максимумам электрического поля вида  $E_{020}$ . Пролетные каналы проходят через каждую пару противоположных выступов на равном расстоянии друг от друга. Всего кольцевой резонатор содержит 26 каналов, из которых 8 расположены по окружности выступов меньшего радиуса, и 18 каналов – вдоль большей окружности.

Размеры и взаимное расположение зазоров взаимодействия выбраны с учетом конструкции катода, количества пролетных каналов и требуемого характеристического сопротивления резонаторов. Остальные размеры резонатора, отмеченные на рис. 1, являются свободными при подборе его формы.

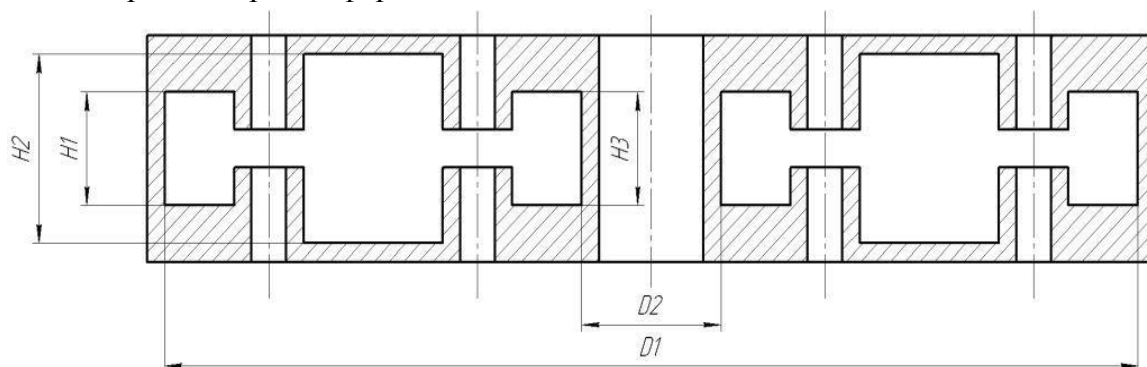


Рисунок 1.

Высота центральной индуктивной области, занимающей наибольший объем, определяет взаимное расположение частот видов колебаний  $E_{n10}$  и  $E_{n20}$ . Частоты паразитных видов  $E_{n10}$  от высоты практически не зависят, тогда как частоты видов  $E_{n20}$ , включая рабочий вид, уменьшаются с ростом индуктивности центральной области. Таким образом, изменяя высоту центральной области, можно добиться равного удаления паразитных видов от рабочего вида  $E_{020}$  (рис. 2).

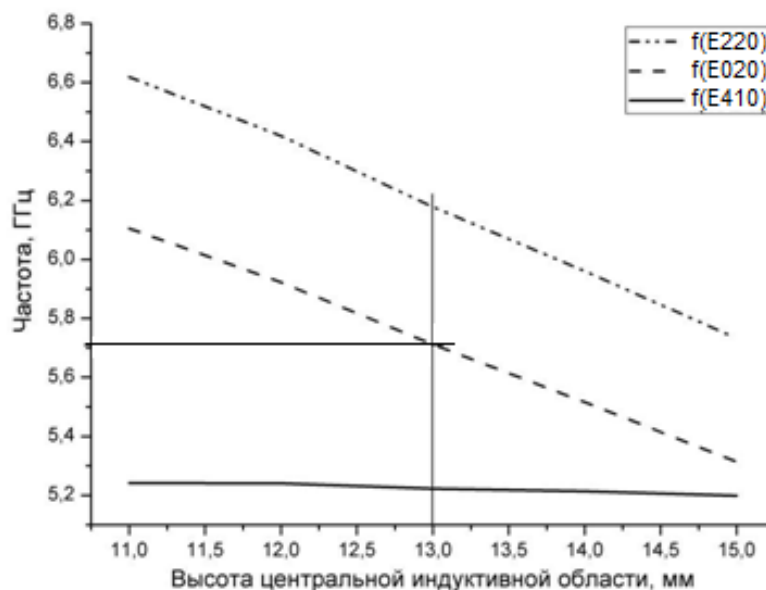


Рисунок 2.

Резонансные частоты видов  $E_{n10}$  и  $E_{n20}$  понижаются с увеличением ширины кольцевого резонатора, определяемой его внутренним и внешним диаметрами, изменяя которые резонатор можно настроить на рабочую частоту 5,712 ГГц.

Высота крайних индуктивных областей может быть найдена из условия равенства друг другу характеристических сопротивлений в области внутреннего и внешнего кольцевых рядов и соответствует точке пересечения кривых, показанных на рис. 3.



Рисунок 3.

Особенности взаимного положения резонаторов и магнитных полюсов реверсной фокусирующей системы прибора потребовали нарушения симметрии резонатора таким образом, чтобы торцевые стенки центральной и крайних индуктивных областей с одной из сторон резонатора располагались в одной плоскости. В результате этого изменения, а также за счет введения дополнительного кольцевого выступа в область нулевого электрического поля вида  $E_{020}$  (рис. 4), высоту резонатора удалось уменьшить в 2 раза по сравнению с исходным вариантом, показанным на рис. 1, заодно максимально удалив от рабочего вида паразитные виды колебаний  $E_{n10}$ .

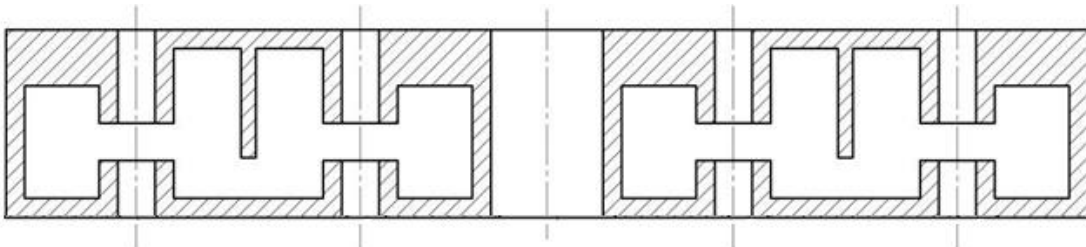


Рисунок 4.

Во входном и выходном резонаторах, асимметрично нагруженных на волноводный ввод/вывод энергии, введение кольцевого выступа, а также индуктивного штыря, расположенного напротив отверстия связи с волноводами как показано на рис. 5, решило проблему чистоты рабочего вида колебаний  $E_{020}$ , позволив выровнять электрические поля в зазорах всех пролетных каналов.

При проектировании вывода энергии клистрона повышенное внимание было уделено разработке вакуумноплотного волноводного окна, способного обеспечить максимальную электрическую прочность при передаче импульсной мощности, равной 3МВт. Основной причиной разрушения волноводных окон при высоких уровнях импульсной мощности является пробой с невакуумной стороны керамической перегородки, инициируемый эмиссией электронов с выходящих на поверхность керамики микроострий припоя в области спая металл-диэлектрик. Для предотвращения автоэлектронной эмиссии из спая можно ослабить электрическое поле на периферии диска практически до нуля, используя

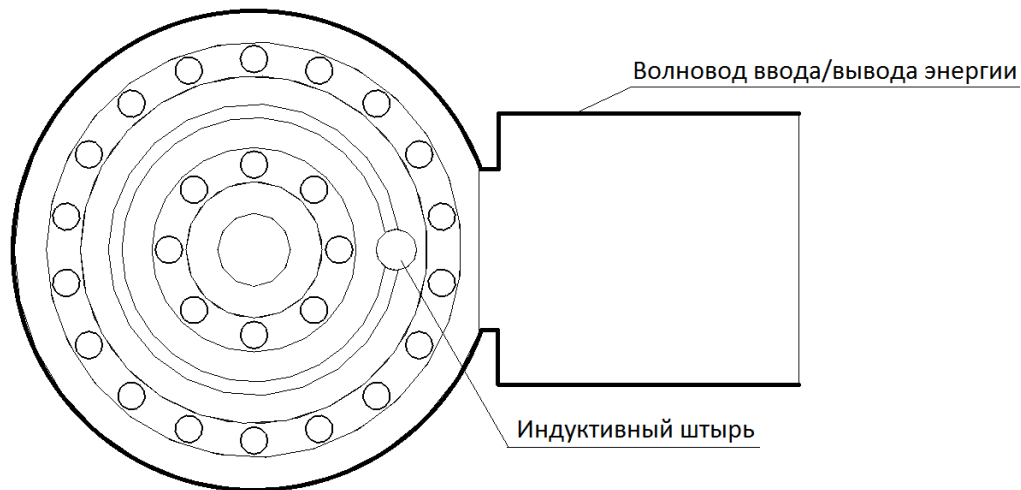


Рисунок 5.

для передачи энергии СВЧ волну  $H_{01}$  круглого волновода [2]. Однако устройства для преобразования волны  $H_{10}$  прямоугольного волновода в волну  $H_{01}$  круглого волновода весьма сложны и их применение оправдано только при передаче уровней мощности измеряемых десятками МВт в X-диапазоне длин волн.

Аналогичный эффект дает использование окон, работающих на смеси волн  $H_{11}$  и  $E_{11}$  круглого волновода. Сложив поля этих волн в противофазе на поверхностях керамического диска и подобрав соотношение их амплитуд, можно резко ослабить электрическое поле в области спае. При этом магнитное поле также «отрывается» от стенок волновода, так что вся энергия передается через центральную часть диска, и токи в спае, которые могут вызывать искрения, также инициирующие пробой, оказываются заметно ослабленными. Окна «на смешанных модах» позволяют пропускать примерно столь же высокие уровни мощности, но проблема сложения полей указанных типов волн с требуемыми фазами и амплитудами до сих пор решалась за счет существенного усложнения конструкции [3]. Исследования с помощью программы N-WINDOW показали, что такого же эффекта можно добиться и в обычной конструкции баночного окна, должным образом подобрав его размеры – диаметр и толщину керамического диска и расстояния до стыков круглого волновода с прямоугольными. Вблизи резонанса окна на волне  $E_{11}$  круглого волновода фаза и амплитуда этой волны вблизи керамики резко изменяются, что позволяет удовлетворить условиям получения минимального электрического поля в области металлокерамического спае. Схематический вид такого баночного окна с диском из керамики 22ХС толщиной 6,2 мм и диаметром 52 мм представлен на рис. 6, а его характеристика согласования и распределения полей у поверхности диска в E- и H-плоскостях круглого волновода – на рис. 7а,б. Расчеты проводились с использованием 3D программы MEMFIS. Полученное поле в E-плоскости на краю диска в 15 раз меньше поля в его центре, тогда как в обычных баночных окнах типичное соотношение полей в центре и на краю диска равно  $1,5 \div 2$ .

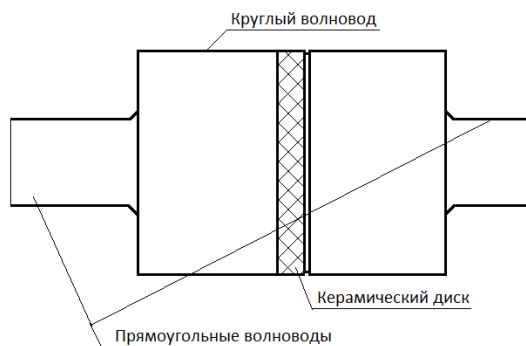
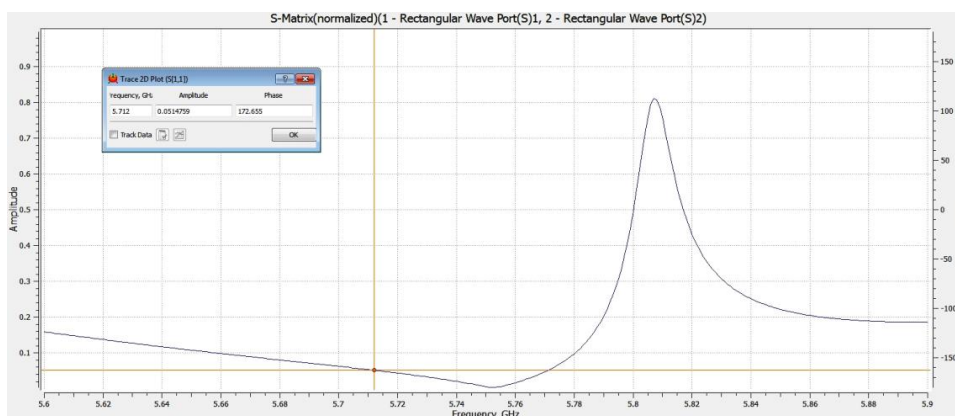
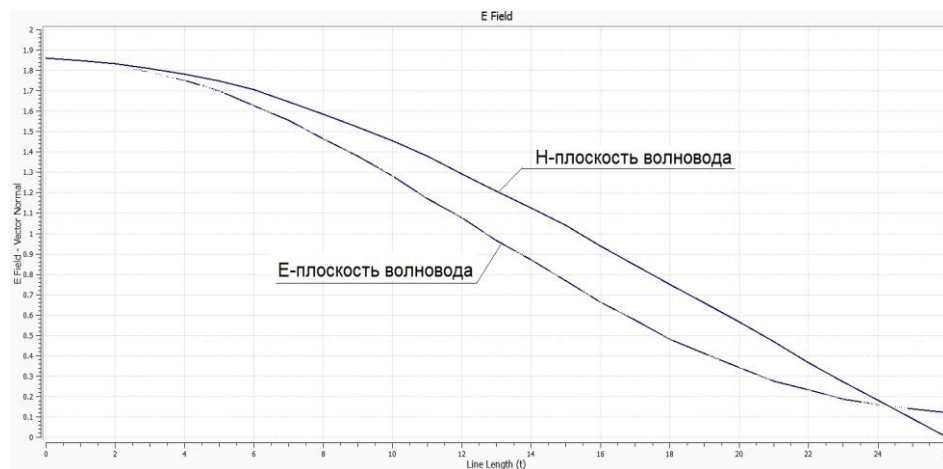


Рисунок 6.



(а)



(б)

Рисунок 7.

#### Библиографический список

1. Фрейдович И.А. Воробьев М.Ю. Особенности характеристик кольцевых резонаторов многолучевых клистронов, «ЭЛЕКТРОНИКА, Наука, Технология, Бизнес», 2/98.
2. Fowkes, W.R., Callin, R.S., Jongewaard, E.N., Tantawi, S.G. Large Diameter Reduced Field TE<sub>01</sub> Traveling Wave Window For X-Band. Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conf., New York, 1999. P. 783-785.
3. Michizono, S., Matsumoto, T., Nakao K., Takenaka N., Fukuda S., Yoshida K. Development of C-Band High-Power Mix-Mode RF Window. Proc. of LINAC 2004. Lübeck, Germany. P. 745-747.