

# Моделирование и оптимизация мощного усилительного клистрона с распределённым взаимодействием W-диапазона

Н.А. Голованов, А.В. Галдецкий, М.С. Востров

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** на основе теоретического анализа и трёхмерного моделирования получены основные параметры многоззорных резонаторов клистрона с распределённым взаимодействием (КРВ) с зазорами неравной ширины. Показано, что в данной конструкции импеданс взаимодействия на противофазном типе выше, чем на синфазном. Представлены результаты электродинамического расчёта клистрона W-диапазона с выходной мощностью  $P_{out} = 2$  кВт, рабочей полосой частот  $\Delta f = 310$  МГц по уровню 2 дБ, ускоряющим напряжением  $U = 23$  кВ и коэффициентом усиления  $K_u = 41$  дБ.

**Ключевые слова:** клистрон с распределённым взаимодействием, миллиметровые волны, многоззорные резонаторы, характеристическое сопротивление, противофазный тип колебания.

## 1. Введение

СВЧ-электроника следует по пути повышения выходной мощности, частоты, уменьшения времени готовности, расширения рабочей полосы. При продвижении в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны, клистроны найдут широкое применение. Потребности сетей связи нового поколения (5G), радиолокации, спектроскопии, производственного контроля, материаловедения, биологические исследования, указывают на актуальность и необходимость исследования и разработки отечественного импульсного усилительного клистрона W-диапазона.

Повышение рабочей частоты клистрона приводит к уменьшению размеров его резонаторов, ужесточению требований к точности изготовления, снижению собственной добротности  $Q_0$  и характеристического сопротивления  $\rho$  [1]. Для уменьшения влияния этих факторов при разработке клистронов коротковолновой части миллиметрового диапазона используются резонаторы с распределённым взаимодействием, позволяющие в несколько раз увеличить  $\rho$  и расширить полосу рабочих частот. Малый вес, компактность всей конструкции, высокий КПД и большая мощность, всё это делает КРВ наиболее доступным электровакуумным прибором, обеспечивающим необходимую мощность в W-диапазоне.

При разработке клистрона миллиметрового диапазона важную роль играет конструкция резонаторов, которые должны быть технологичны, обеспечивать отвод тепла и высокие электрические характеристики.

В связи с малой рабочей длиной волны ( $\sim 3$  мм) выбор конструкции резонаторов КРВ основывается на возможностях технологии. Один из вариантов – в качестве пространства взаимодействия использовать резонаторы прямоугольной формы с бипериодической замедляющей системой лестничного или гребенчатого типа [2-5].

В настоящее время, промышленный выпуск клистронов с распределённым взаимодействием (генераторных и усилительных, импульсного и непрерывного действия) осуществляет CPI Canada Inc [6]. Разработана серия высокоэффективных усилителей и генераторов КРВ, работающих от 18 до 280 ГГц. На частоте 95 ГГц КРВ имеет рабочую полосу 2.25 ГГц по уровню 3дБ и выходную мощность 1 кВт, а на

частоте 218 ГГц – полосу пропускания 300 МГц по уровню 3 дБ и непрерывную выходную мощность 7 Вт [7,8].

В работе предложены и исследованы конструкции многозазорных резонаторов с зазорами неравной ширины, работающие на противофазном типе колебания. Проведён комплекс расчётов и исследований оценки их электродинамических характеристик, а также критериев их эффективного взаимодействия с электронным пучком.

## 2. Параметры проектируемого КРВ

Предварительно, зазоры резонаторов были подобраны чтобы обеспечить угол пролета  $\beta_e d = 90^\circ$ ,  $\beta_e = 2\pi/L_e$  – постоянная распространения электронного потока,  $L_e = v_e / f_0$  – электронная длина волны,  $v_e$  – скорость электронного потока. Радиус канала  $a$  выбирался равным 0.2 мм исходя из возможностей технологий. При этом параметр  $\gamma a = 1.3$ , где  $\gamma$  – поперечная постоянная распространения электронного потока, оказывается не совсем оптимальным, что приводит к понижению  $\rho$ .

Основные параметры исследуемого КРВ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры исследуемого КРВ

$f_0$ , ГГц	$P_{out}$ , кВт	$\Delta f$ (2 дБ), МГц	$U$ , кВ	$I$ , А	$K_u$ , дБ	КПД, %
$f_0$ (W-диапазон)	>1	>300	23	0.65	>40	>10

## 3. Проектирование резонаторов КРВ

В сантиметровом диапазоне, как правило, синфазный тип колебаний обладает преимуществом по сравнению с противофазным по эффективности взаимодействия [9], поскольку у синфазного амплитуда электрического поля вне области ВЧ-зазоров невелика (рисунок 1 а).

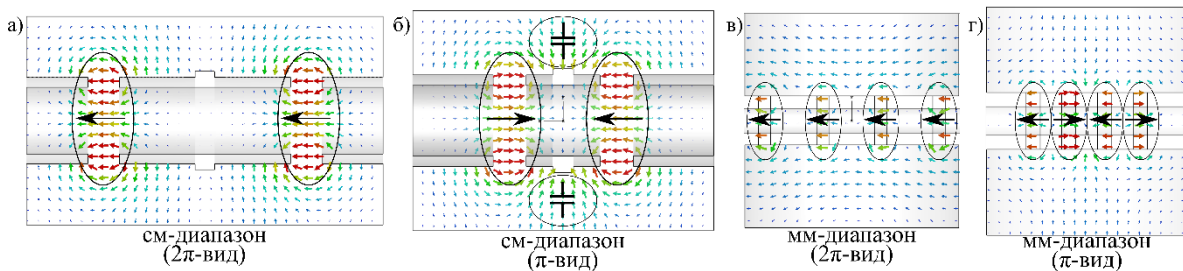
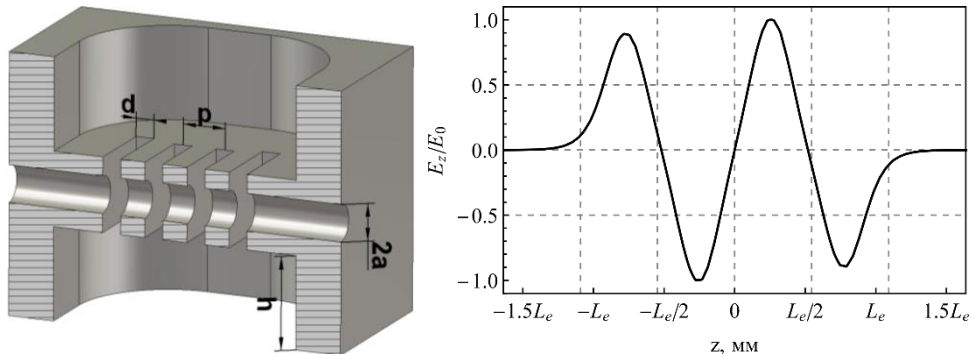


Рисунок 1. Синфазный и противофазный тип колебания для сантиметрового (а, б) и миллиметрового диапазона волн (в, г). Максимум амплитуды поля обозначен овалом.

Для противофазного типа в сантиметровом диапазоне характерно значительное поле в области щелей связи резонатора (рисунок 1 б), поэтому характеристическое сопротивление на этом типе понижено из-за влияния паразитной ёмкости щели связи.

В W-диапазоне ситуация обратная. Электродинамический расчёт полей резонаторов КРВ показал, что противофазный тип обеспечивает более высокое эффективное характеристическое сопротивление  $\rho M^2$ , где  $M$  – коэффициент эффективности взаимодействия, по сравнению с синфазным (рисунок 1 в, г). В этом случае расстояние до стенки резонатора становится гораздо больше ширины зазора, противофазность полей в щелях обуславливает уменьшение поля вне зазора, поэтому вклад паразитной ёмкости щели связи мал. Кроме того, плотность упаковки зазоров на синфазном типе ниже, чем на противофазном, поэтому последний позволит

разместить на заданной длине большее число каскадов взаимодействия электронного потока с электродинамической системой, что положительно скажется на группирователе. Поэтому далее в качестве рабочего выбран противофазный тип колебания (рисунок 2).



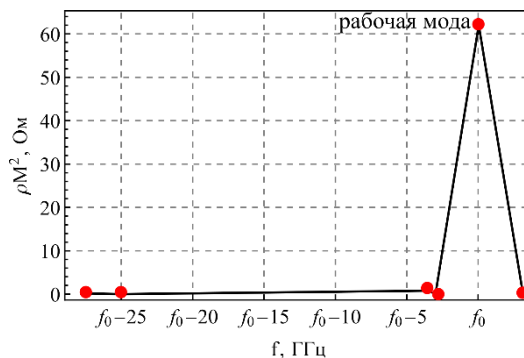
**Рисунок 2.** Эскиз резонатора КРВ вместе с относительной продольной компонентой электрического поля рабочего колебания на оси ( $\pi$ -тип),  $L_e$  – электронная длина волны.

Для противофазного типа величина  $\rho$ , согласно определению, равна нулю, поэтому для оценки эффективности взаимодействия необходимо учитывать конечное время пролёта электронного потока через систему зазоров резонатора – вычислять  $\rho M^2$ :

$$\rho M^2 = \frac{\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (E_z) e^{j\beta_e z} dz \right\}^2}{2\omega W} \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая циклическая частота,  $W$  – запасённая в резонаторе энергия.

В резонаторах КРВ присутствует густой спектр собственных типов колебаний. Важно отстроить по частоте соседние паразитные колебания от рабочего за границу полосы, поэтому размеры резонатора оптимизировались, чтобы максимизировать  $\rho M^2$  рабочего типа, а также максимально разнести ближайшие соседние колебания (рисунок 3).

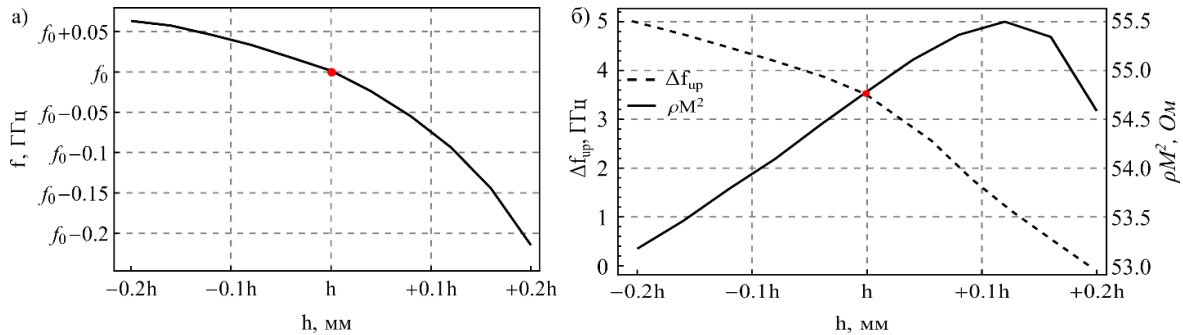


**Рисунок 3.** Эффективное характеристическое сопротивление ( $\rho M^2$ ) первых 6 мод.

В результате показано, что для исследуемой конструкции была обеспечена наибольшая эффективность электронно-волнового взаимодействия  $\rho M^2$  для противофазного типа (под номером 5), причем расстояние до ближайшего паразитного колебания на низкочастотном и высокочастотном краю рабочей полосы составляет

3 ГГц.

Кроме того, было проведено исследование возможности механической настройки резонатора на требуемую частоту, например, путём деформации одной из его стенок, которая выполнена достаточно тонкой и снабжена специальным механизмом. Анализ настройки резонатора путём изменения высоты  $h$  представлен на рисунке 4.

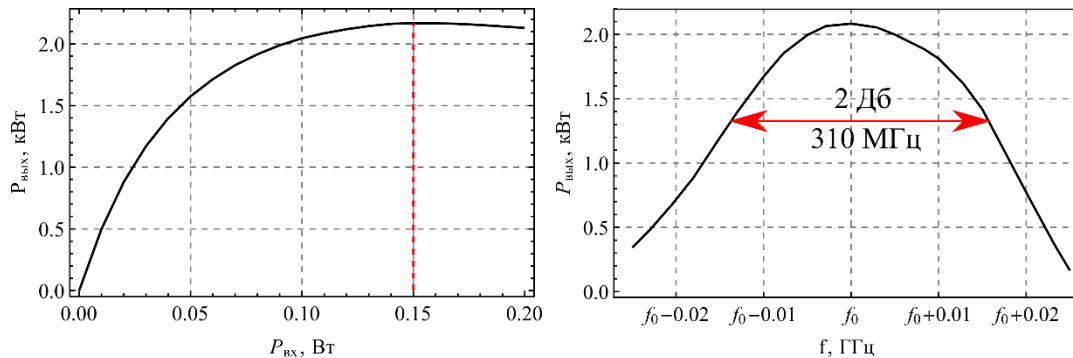


**Рисунок 4.** Зависимости: а) перестройки частоты; б) расстояния по частоте до соседнего типа колебания и эффективного характеристического сопротивления, от высоты резонатора.

При настройке резонатора эффективный характеристический импеданс меняется слабо благодаря тому, что геометрия является оптимальной по размерам, а соседний тип колебания далеко отстоит от рабочего.

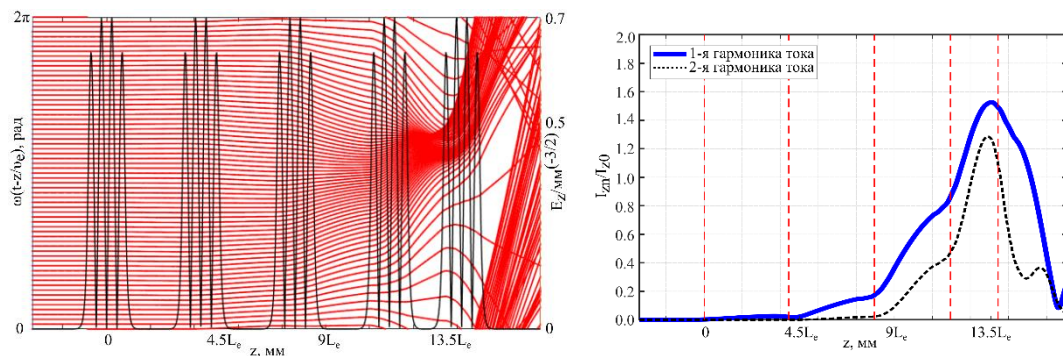
#### 4. Расчёт пространства взаимодействия КРВ

В работе рассмотрен КРВ W-диапазона с пятью 4-зазорными резонаторами с заполнением пучком в канале 50%. В результате оптимизационных расчётов взаимодействия электронного потока с полями резонаторов были получены передаточные характеристики на центральной частоте рабочей, а также рассчитана частотная характеристика выходной мощности КРВ (рисунок 5).



**Рисунок 5.** Передаточная и частотная характеристики клистрона.

Ширина рабочей полосы по уровню 2 дБ составила 310 МГц.



**Рисунок 6.** Фазовая диаграмма группировки электронов в системе взаимодействия КРВ, а также продольные распределения амплитуд первой и второй гармоник тока.

На рисунке 6 иллюстрируется характер группировки электронного потока, а также представлены продольные распределения первой и второй гармоник тока, возбуждаемых в электронном потоке при группировке. Заметно некоторое раздвоение электронного сгустка после выхода из группирователя, вызванное как пространственным зарядом электронов, так и нелинейным характером поведения электронного потока.

## 5. Заключение

В результате проведённых теоретических расчётов и трёхмерного моделирования электромагнитных полей резонаторов КРВ, нами установлено, что в  $W$ -диапазоне противофазный рабочий тип колебания эффективнее синфазного, что является нетипичным для более длинноволновых диапазонов, например, сантиметрового.

Спроектированная конструкция резонаторов позволяет обеспечить в КРВ  $W$ -диапазона СВЧ мощность не менее 2 кВт на рабочей частоте в  $W$ -диапазона и 1.68 кВт в полосе 310 МГц. При этом электронное КПД составляет 14%, а коэффициент усиления более 40 дБ в требуемой полосе при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе пучка 0,65 А. Стоит отметить, что полученные результаты являются промежуточными, поскольку имеется возможность дальнейшего расширения рабочей полосы путём улучшения группирователя, а также выходного резонатора клистрона.

### Список литературы

1. Хайков А. З. Клистронные усилители. М., Связь, 1974. — 392 с.
2. Касаткин Л.В., Рукин В.П., Ерёмка В. Д., Науменко В. Д., Рапопорт Г. Н., Мирошниченко В. С. Электровакuumные приборы диапазона миллиметровых волн. Севастополь: Вебер, 2007. — 252 с.
3. Григорьев А.Д. Проектирование усилительного клистрона  $W$ -диапазона / Григорьев А.Д., Морозов С.Н. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 2015. Т. 4(527). С. 22-27
4. Zhiwei Chang, Lin Meng, Yong Yin, Bin Wang, Hailong Li, Abdur Rauf, Safi Ullah, Liangjie Bi, and Ruibin Peng. Circuit Design of a Compact 5-kV  $W$ -Band Extended Interaction Klystron. IEEE Transactions on Electron Devices. Vol.: 65, Issue: 3, March 2018.
5. Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н. Система взаимодействия мощного клистрона с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №6.
6. Сайт [www.cpii.com](http://www.cpii.com) фирмы Communication & Power Technologies (CPI), США.
7. P. Horoyski, D. Berry, and B. Steer, in Proceedings of the IEEE International Vacuum Electronics Conference, 15–17 May (Kitakyushu, Japan, 2007), pp. 1–2
8. M. Hyttinen, A. Roitman, P. Horoyski, R. Dobbs, E. Sokol, D. Berr, and B. Steer, in Proceedings of the IEEE International Vacuum Electronics Conference, 22–24 April (Monterey, California, USA, 2008), pp. 297–297
9. Тореев А.И., Фёдоров В.К., Патрушева Е.В. // Радиотехника и электроника. 2009. Т.54. №8. С. 1001.