

УДК 621.385.624

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНОГО КАСКАДА МИНИАТЮРНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА СО СВЯЗАННЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

М. А. Манжосин<sup>1</sup>, И. О. Чигуров<sup>1</sup>, В. А. Царев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НПП «Алмаз», 410033, Саратов, ул. Панфилова, 1

<sup>2</sup> СГТУ имени Гагарина Ю.А., 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

Статья поступила в редакцию 31 июля 2018 г.

**Аннотация.** В работе представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования выходного каскада миниатюрного многолучевого импульсного клистрона, работающего в Ku-диапазоне частот с модифицированными конструкциями входной и выходной резонансных систем. Использование на входе и выходе прибора трехзвенных фильтровых систем, выполненных на основе двух одноззорных резонаторов, индуктивно связанных между собой через щель связи и пассивного резонатора, выполненного в выводе энергии, позволяет увеличить выходную мощность прибора и увеличить рабочую полосу в 2,4 раза по сравнению с обычными конструкциями входной и выходной резонансных систем многолучевого клистрона, выполненного на одноззорных резонаторах.

**Ключевые слова:** клистрон, резонатор, фильтровая система, полоса усиления.

**Abstract.** The paper presents the results of computer simulation and experimental study of a miniature multi-beam pulse klystron operating in the Ku-frequency range with modified designs of the input and output resonance systems. The use of three-link filter systems at the input and output of the device, made on the basis of two single-gap cavities, inductively interconnected through a connection slit and a passive cavity, made in the energy output, allows to increase the output power of the device and increase the working band by 2-3 times compared to conventional designs of input and output resonance systems of multi-beam klystron, made on single-gap

cavities. The parameters of the coupled resonator system were calculated using the Ansoft HFSS program. The distribution of the electric field on the working modes of oscillations is investigated. The main electrodynamic and electronic parameters of various modes are investigated (coupling coefficient  $M$ , relative active electron conductance  $G_e/G_0$ , quality  $Q$  and accelerating potential  $U_0 = 3$  kV). Found operating conditions, which provide effective interaction of multi-electron beam with a high-frequency electromagnetic field. The possibility of further enhancing the output parameters of low voltage miniature multi-beam Ku-band klystrons is shown.

**Key words:** klystron, filter system, cavity, bandwidth.

## 1. Введение

Одной из ключевых проблем современной вакуумной электроники является необходимость расширения рабочей полосы усиливаемых частот [1]. Эта проблема наиболее актуальна при разработке миниатюрных многолучевых клистронов (ММЛК), работающих в коротковолновой части микроволнового диапазона частот.

Одним из перспективных путей расширения полосы усиления и увеличения выходной мощности ММЛК является использование в выходной цепи связанных активных резонаторов [2]. При оптимально подобранной связи между активными и пассивными резонаторами, расположенными в выходном волноводе можно создать простую по конструкции многозвенную фильтровую систему. Однако расчет и проектирование таких систем вызывает большие затруднения из-за сложного характера электромагнитных связей между резонансными элементами, а также из-за эффекта «неквазистационарности», искажающих структуру ВЧ электрического поля в пространстве распределенного взаимодействия.

В статье [3] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований малогабаритного пакетированного многолучевого усилительного импульсного клистрона Ку-диапазона с модифицированной конструкцией выходной резонансной системы. Дальнейшее расширение рабочей полосы

усиления частот возможно при одновременном использовании трехзвенных фильтровых систем во входной и выходной цепях прибора.

## 2. Базовая конструкция резонансной системы миниатюрного многолучевого клистрона

В качестве аналога для разработки был выбран шестирезонаторный 19-ти лучевой импульсный пакетированный МЛК, работающий в Ku-диапазоне, разработанный в АО «НПП «Алмаз». Резонаторная система этого прибора, показанная на рисунке 1, состоит из шести, электромагнитно не связанных между собой однозачорных призматических резонаторов. Входной (1) и выходной (2) резонаторы имеют волноводные ввод и вывод энергии, в которых в качестве вакуумно-изолирующего элемента между резонатором и волноводом использовался стержень из алюмооксидной керамики. Между вводом, выводом энергии и резонансным блоком введены щели связи (3 и 4). Выходная импульсная ВЧ мощность такого прибора составляет 400-500 Вт в полосе 130 МГц, средний КПД -15-20%.

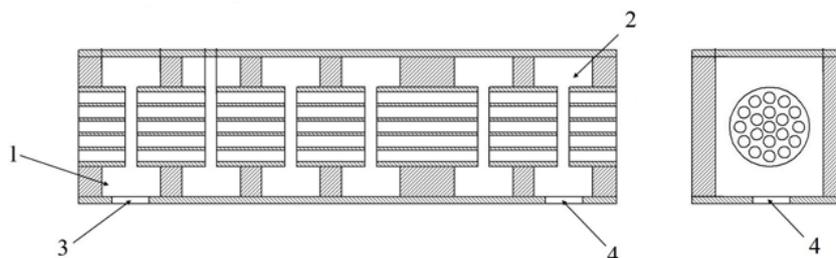


Рис.1. Резонансная система базовой конструкции МЛК.

## 3. Конструктивные особенности модернизированного прибора

Для улучшения выходных параметров этого прибора без изменения габаритов, предложено использовать на входе и выходе прибора трехзвенные фильтровые системы, выполненные на основе двух однозачорных резонаторов (1 и 2), индуктивно связанных между собой через щель связи (3) и электромагнитно объединенных с помощью метало-керамического перехода (4) с пассивным резонатором (5), выполненным в выводе энергии. Подстройка

частоты пассивного резонатора осуществляется с помощью винта (6).  
Изображение трехзвенной фильтровой системы представлено на рисунке 2.

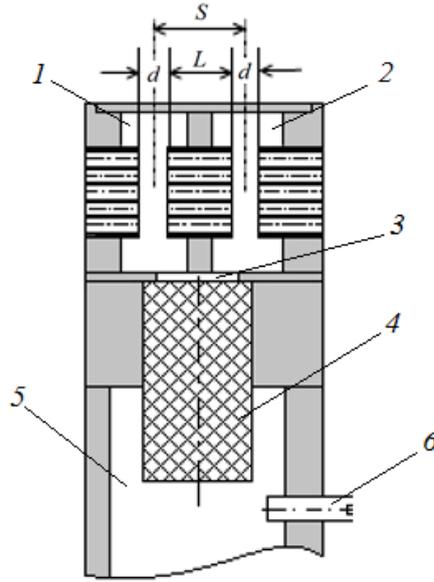


Рис.2. Трехзвенная фильтровая система.

#### 4. Результаты компьютерного моделирования

На рисунке 3 представлена зависимость КСВ исследуемого выходного каскада ММЛК с системой из двух связанных через щель связи резонаторов от частоты, рассчитанная в программе HFSS [4]. Как видно из рисунка, резонансные частоты возбуждаемые в резонаторах имеют низкое значение КСВ, близкое к единице, что означает согласованность вывода энергии с системой двух связанных через щель резонаторов.

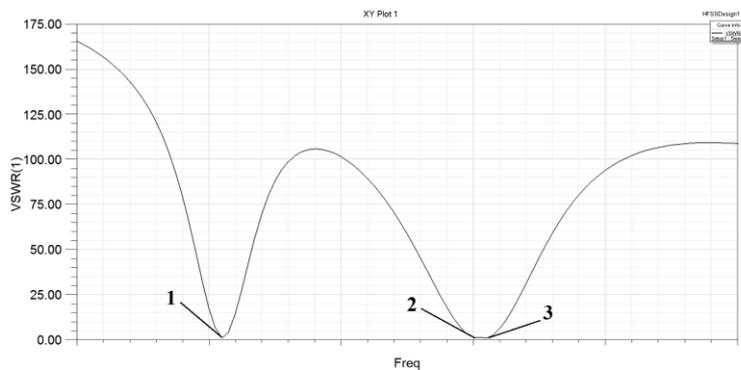


Рис. 3. Расчетная зависимость КСВ выходного тракта ММЛК от частоты. 1 – резонанс керамического пассивного резонатора, 2 – выходной резонатор, 3 – предвыходной резонатор.

Результаты расчетов электронных параметров исследуемой конструкции резонаторов при ускоряющем напряжении  $U_0= 3$  кВ, при микропервееансе одного луча  $p_{\mu 1}= 0.3$  мкА/В<sup>3/2</sup> и коэффициенте заполнения пролетного канала равном  $b/a=0.7$ , приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Электронные параметры резонатора

Резонатор		М	$G_e/G_0$	$B_e/G_0$	
Конструкция	Базовая	Входной	0,86	0,104	-0,027
		Выходной	0,86	0,104	-0,027
	Модернизи- рованная	Входной	0,70	0,90	0,637
		Входной	0,33	-0,78	-0,61
		Выходной	0,77	0,02	0,98
		Выходной	0,23	0,12	-0,95

На рисунках 4-5 представлены картины распределения электрических полей в связанных выходном и предвыходном резонаторах, и в пассивном керамическом резонаторе, выполненном в выводе энергии, полученные в программе HFSS.

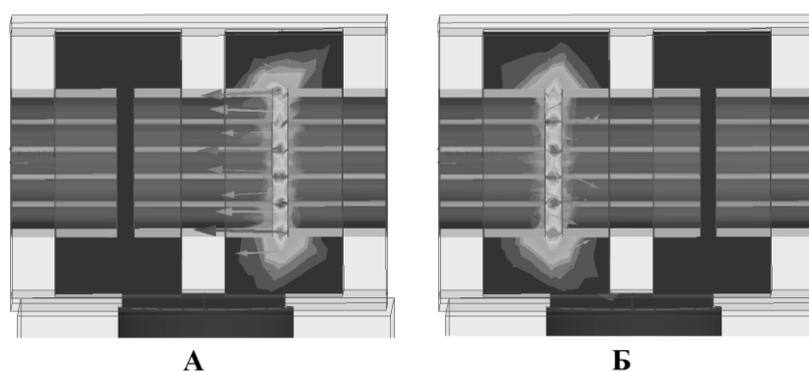


Рис.4. Распределение поля в связанных резонаторах: А – выходном, Б – предвыходном.

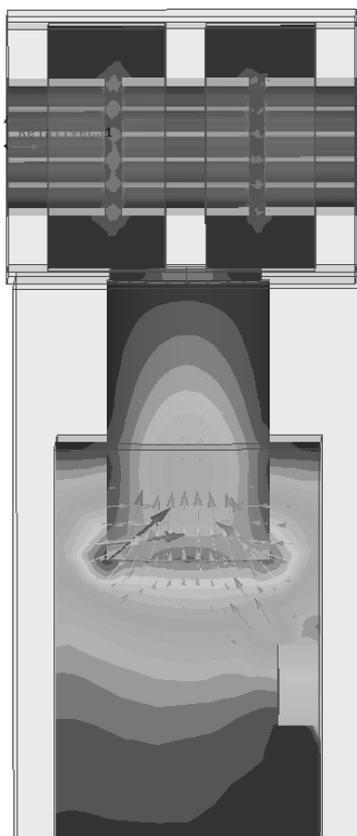


Рис.5. Распределение поля в пассивном резонаторе, выполненном в выводе энергии.

## 5. Результаты экспериментального исследования

Результаты «холодных» измерений КСВН клистрона с исследуемой трехзвенной фильтровой системой на входе и выходе прибора изображены на рисунке 6.

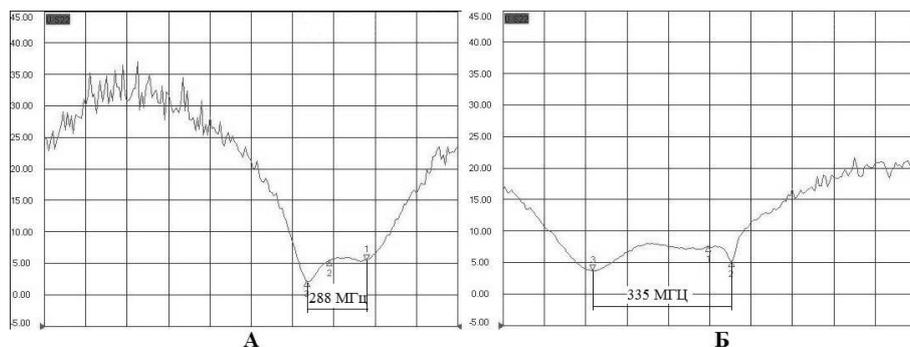


Рис. 6. Зависимость КСВ входной и выходной систем от частоты модернизированной конструкции клистрона. А – вход, Б – выход.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в номинальном режиме ( $U_0=3\text{кВ}$ ,  $I_0=0,7-0,8\text{А}$ ) разработанный прибор имеет рабочую полосу усиления шириной в 310 МГц, что в 2,4 раза больше, чем у прибора аналога (130 МГц). Результаты эксперимента приведены на рис.7. При измерениях в каждой точке АЧХ проводился подбор оптимальной входной мощности, при которой выходная мощность была максимальной.

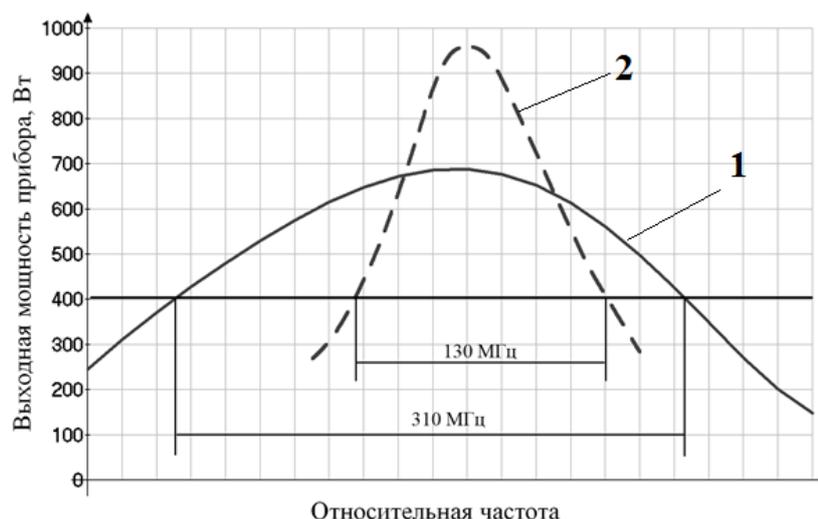


Рис.7. Зависимость выходной мощности модернизированной конструкции клистрона (1) и базовой конструкции клистрона (2) от частоты.

Исследование выполнено при поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям), соглашение №12714ГУ/2017 от 25.04.2018 «Разработка фильтровой системы для миниатюрного многолучевого клистрона Ку-диапазона с целью расширения рабочей полосы усиления».

### Литература

1. Мощные малогабаритные и миниатюрные многолучевые клистроны для бортовых РЛС: материал технической информации / А.Д. Закурдаев // Радиотехника. - 2006. - №3. - С. 31-33.

2. Царев В.А. Улучшение выходных параметров многолучевого усилительного импульсного малогабаритного клистрона Ku-диапазона длин волн / В.А. Царев, И.О. Чигуров, П.Д. Шалаев // Радиотехника. 2015. №7. С. 41 - 44.
3. Palmer R. Introduction to Cluster Klystrons / R. Palmer // Proceedings of the International Workshop on Pulsed RF Power Sources For Linear Colliders, RF93, Dubna, Protvino, Russia, 1993. P.69-73.
4. ANSYS HFSS [Электронный ресурс] // High Frequency Electromagnetic Field Simulation Software [Официальный сайт]. URL: <https://www.ansys.com/products/electronics/ANSYS-HFSS> (дата обращения 30.07.18).

**Для цитирования:**

М. А. Манжосин, И. О. Чигуров, В. А. Царев. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование выходного каскада миниатюрного многолучевого клистрона со связанными резонаторами. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/13/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.13