

Пути повышения комплекса выходных параметров миниатюрного многолучевого клистрона *Ku*-диапазона

А.Д. Калачев, В.А. Царев

АО «НПП «Алмаз»

Аннотация: в данной работе исследовалась возможность создания миниатюрного многолучевого клистрона *Ku*-диапазона частот с высоким электронным коэффициентом полезного действия.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, электронный коэффициент полезного действия, группировка электронного потока.

1. Введение

Миниатюрные многолучевые клистроны (ММЛК) на протяжении многих лет используются для проектирования передатчиков радиолокационных систем, предназначенных для работы в *Ku*-диапазоне частот. ММЛК обладают следующим рядом достоинств: малые габариты и масса, низкие рабочие напряжения, широкая полоса рабочих частот и высокая удельная мощность [1], [2]. Сейчас большинство выпускающихся приборов этого класса имеет КПД не выше 30 %. Для создания ММЛК, работающих в *K*- и *Ka*-диапазонах частот, необходимо найти пути дальнейшего увеличения их выходной мощности и электронного коэффициента полезного действия (КПД) при неизменных массогабаритных показателях.

Одним из способов повышения коэффициента полезного действия в многорезонаторном клистроне является формирование слетающего сгустка с тем, чтобы электроны приходили в выходной резонатор с минимальным разбросом скоростей. Известен ВАС-метод улучшения группировки электронов («Bunching, Alignment, Collecting»), согласно которому плотность конечного сгустка увеличивается за счет специальных частотных расстроек резонаторов группирователя [3]. В результате взаимодействия электронов с электрическими полями этих резонаторов происходит первоначальная разгруппировка центральных электронов и последующий сбор крайних электронов сгустка. При этом электроны совершают колебательные движения, приближаясь к центру сгустка и удаляясь от него. По мере приближения электронов к выходному резонатору происходит сбор периферийных электронов.

Однако в известных работах отечественных и зарубежных авторов утверждается, что ВАС-метод не может быть использован в многолучевых клистроны, работающих в коротковолновой части СВЧ диапазона.

В работе представлены результаты исследования, подтверждающие возможность создания ММЛК *Ku*-диапазона частот с высоким КПД, резонаторная система которого спроектирована на основе ВАС-метода. Оптимизационные расчеты, проведенные по одномерной программе численного моделирования клистрона, основанной на дисковой модели клистрона (DISKLY), показали возможность получения электронного КПД около 58 %, что в 1,9 раза превышает КПД существующих приборов.

2. Проектирование резонаторной системы

Резонаторная система разрабатываемого прибора, конструкция которой приведена на рисунке 1, включает в себя 9 призматических резонаторов. Линейная часть группирователя состоит из трех однозачорных резонаторов. Нелинейная часть группирователя включает в себя кластерный двухзачорный резонатор и два следующих за ним однозачорных резонатора. Электромагнитная связь между резонаторами в кластере обеспечивается посредством щели, прорезанной в разделяющей их центральной перегородке [4], [5]. Выходной резонатор также представляет собой кластер, состоящий из двух однозачорных резонаторов. Во всех кластерных резонаторах в качестве рабочего был выбран синфазный вид колебаний.

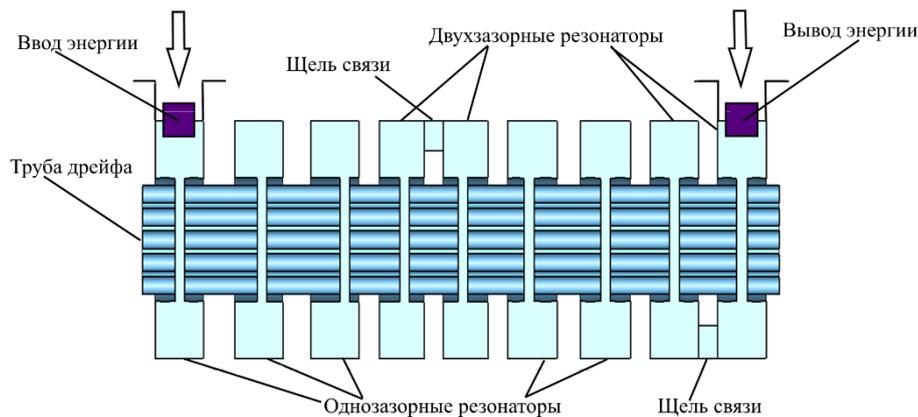


Рисунок 1. Конструкция резонаторной системы ММЛК.

Все резонаторы выполнены в виде призм с размерами A , B , h (рисунок 2). Величина бессеточного зазора d определяется расстоянием между торцами пролетных труб, имеющих относительный внешний диаметр $D_i/\lambda_0 = 0,198$.

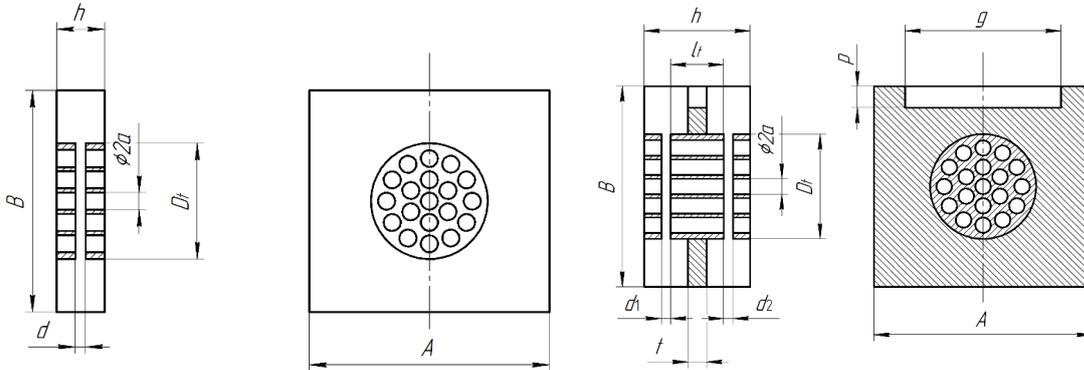


Рисунок 2. Конструкция резонаторов: 1 – однозачорного резонатора; 2 – двухзачорного резонатора.

В пролетных трубах было выполнено 19 пролетных каналов с относительным радиусом $a/\lambda_0 = 0,014$, где $\lambda_0 = c/f_0$ – длина волны, соответствующая середине рабочего диапазона частот, м; c – скорость света, м/с; f_0 – центральная частота полосы усиления, Гц.

В процессе выполненных электродинамических расчетов были определены размеры прямоугольных корпусов, щелей связи и длины зазоров резонаторов для настройки их на заданные рабочие частоты.

3. Расчет выходных параметров ММЛК

Расчет взаимодействия электронного потока с полем резонаторов был выполнен в программе DISKLY, основанной на дисковой модели клистрона [6]. Моделирование проводилось при ускоряющем напряжении $U_0 = 3$ кВ и катодном токе $I_{кат} = 800$ мА. Расстройки частот резонаторов и длины труб дрейфа, при которых достигается максимальный КПД прибора, были получены после выполнения нескольких оптимизационных расчетов. Электронные и электродинамические параметры резонаторов, найденные в процессе оптимизации, представлены в таблице 1, где: N – количество пролетных каналов в трубах дрейфа; I_1/I_0 – нормированная амплитуда первой гармоники конвекционного тока; \check{U} – амплитуда высокочастотного напряжения в зазоре резонатора.

Таблица 1.

n	M	G_e/G_0	$\rho \cdot N, \text{ Ом}$	Q_0	I_1/I_0	$\check{U}, \text{ кВ}$
1	0,835	0,12	570	1200	0	0
2	0,834	0,121	570	1200	0,01	0,1
3	0,837	0,12	570	1200	0,11	0,2
4	0,82	0,084	1200	1200	0,07	0,1
5	0,829	0,123	570	1200	0,39	0,2
6	0,833	0,122	570	1200	0,75	0,7
7	0,835	0,084	1700	1200	1,5	3,1

Результаты расчета фазовых траекторий и нормированной скорости дисков электронного потока, а также нормированных амплитуд гармоник конвекционного тока на центральной частоте рабочего диапазона представлены на рисунке 3.

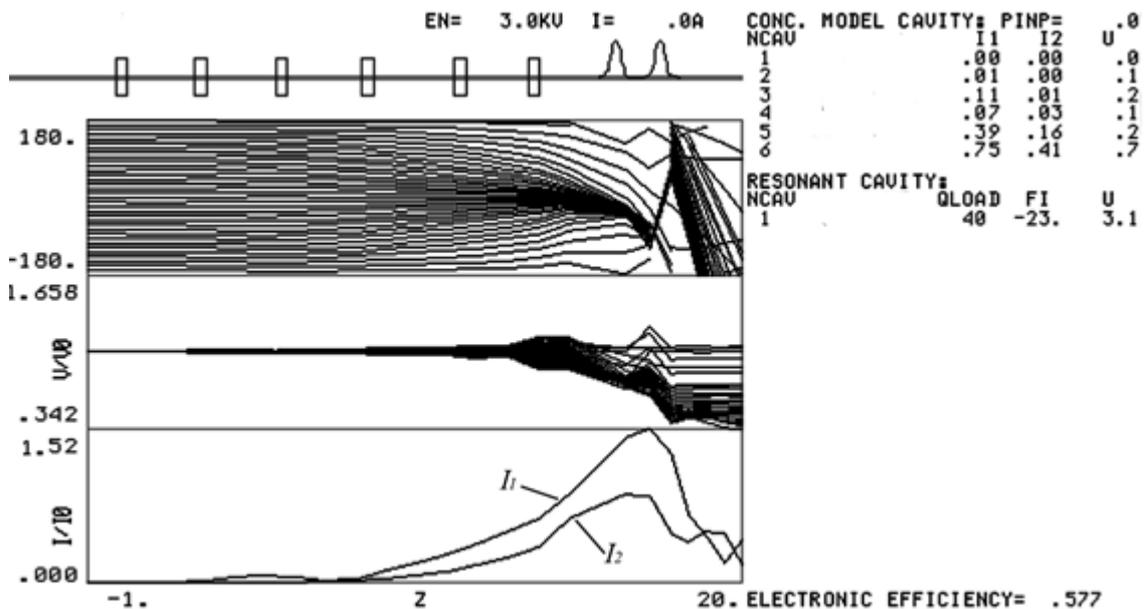


Рисунок 3.: Фазовая диаграмма группирования и графики зависимостей нормированных амплитуд гармоник конвекционного тока и нормированной скорости электронного потока от продольной координаты

Выходная импульсная мощность клистрона составила 1,3 кВт при максимальном электронном коэффициенте полезного действия 57,7 %.

4. Заключение

Разработан ВАС-метод группировки электронного потока для миниатюрных многолучевых клистронов *Ku*-диапазона частот, позволяющий при неизменных массогабаритных параметрах приборов получать высокий КПД вплоть до 58-60 %.

Список литературы

1. Закурдаев А. Д. Мощные малогабаритные и миниатюрные многолучевые клистроны для бортовых РЛС // Радиотехника. – 2006. – №3. – С. 31–33.
2. Царев В. А. и др. Улучшение выходных параметров многолучевого усилительного импульсного малогабаритного клистрона *Ku*-диапазона длин волн // Радиотехника. – 2015. – №7. – С. 41–44.
3. Guzilov I. VAC Method of Increasing the Efficiency in Klystrons // IEEE Vacuum Electron Sources Conference (IVESC2014), Russia, Saint Petersburg, June 29-July 4, 2014.
4. Symons R. S. The linear theory of the Clustered-Cavity Klystron // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1994. – vol. 22. – №5. – PP. 713–718.
5. Калачев А. Д., Царев В. А. Исследование влияния формы и размеров щели связи на электродинамические характеристики двухззорного щелевого резонатора миниатюрного многолучевого клистрона *K*-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3 (546). – С. 51-57.
6. Teryaev V. E. DISKLY code for calculation and optimization of klystrons // Proceedings of the Int. Workshop on Pulsed RF Power Sources for Linear Colliders (RF-93). July 1993. Dubna. Russia. 1993. P. 161–166.