

# Проектирование основных функциональных узлов компактного низковольтного многолучевого СВЧ усилителя Ку-диапазона

Н.А. Голованов, А.В. Галдецкий, С.П. Морев

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** в работе рассмотрены основные функциональные узлы многолучевого клистрона (МЛК) Ку-диапазона с радиальным расположением электронных потоков. Клистрон содержит компактную низковольтную электронно-оптическую систему (ЭОС) и магнитную фокусирующую систему (МФС) на кольцевых магнитах с аксиальной и азимутальной намагниченностью. Пространство взаимодействия МЛК построено на основе однолучевых многоззорных резонаторов. Показано, что в униполярном магнитном поле амплитудой 0.15 Тл при ускоряющем напряжении 2.7 кВ удаётся обеспечить транспортировку потоков с парциальным током 70 мА с заполнением в канале 0.5. Для 20-лучевого клистрона выходная мощность составила 600 Вт при КПД 16 % и ожидаемой долговечности 10 тыс. часов.

**Ключевые слова:** многолучевой клистрон, электронно-оптическая система, электронная пушка, магнитная фокусирующая система, многоззорные резонаторы, пространство взаимодействия

## 1. Введение

Многолучевые клистроны (МЛК) привлекательны для потребителей благодаря компактности, расширенной полосе частот, пониженному напряжению питания и ослабленным требованиям к его стабильности. Поэтому в настоящее время актуальным становится вопрос разработки новых компактных и низковольтных МЛК Ку-диапазона для применений в аппаратуре спутниковой связи, радиолокации и беспроводных сетях передачи данных [1-3]. Однако, МЛК сантиметрового диапазона, как правило, имеют небольшой срок службы, что связано с большим токоотбором из-за принципиальных особенностей конструкции. В силу этого достигнутые параметры МЛК традиционной конструкции близки к предельным, и дальнейшее их улучшение сталкивается с трудностями из-за ограничений по подводимой мощности, напряженности поля в пушке и плотности токоотбора.

В работе представлен один из возможных путей дальнейшего совершенствования МЛК в Ку-диапазоне за счёт увеличения тока и выходной мощности, обеспечиваемых радиальной ЭОС, при сохранении низковольтности, характерной для многолучевых приборов и низких плотности токоотбора и напряженности поля в пушке, характерных для однолучевых приборов. Радиальная (R-типа) многолучевая ЭОС характеризуется тем, что парциальные ЭП расположены в ней в одной плоскости и сходятся по радиусам окружности, на которой расположены центры катодов [4].

## 2. Постановка задачи

Параметры ЭОС и МФС типового клистрона-прототипа приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Параметры ЭОС [1]

Ток пучка, мА	Напряжение, кВ	Первеанс, мкА/В <sup>3/2</sup>	Диаметр катода, мм	Диаметр канала, мм	Плотность тока на катоде, А/см <sup>2</sup>
35	2.5	0.28	0.5	0.5	17.8

Таблица 2. Параметры МФС [1]

МП на оси, Гл	Бриллюэновский радиус пучка, мм	Заполнение канала пучком (с учётом поперечных скоростей)	Средний радиус пучка (с учётом поперечных скоростей), мм
0.2	0.11	0.5	0.125

Достоинством прототипа является низковольтность, улучшенные массогабаритные характеристики (масса МФС от 500 гр до 1.5 кг), высокая удельная мощность. Однако он имеет серьезный недостаток: малую долговечность из-за высокой плотности отбора тока с катода ( $15\text{--}25\text{ А/см}^2$  и более). Для снижения плотности токоотбора при сохранении тока парциального луча необходимо повышать площадь поверхности катода, что не всегда возможно при традиционной коллинеарной многолучевой компоновке пролётных каналов.

Чтобы преодолеть указанное ограничение в настоящей работе была рассмотрена 20-лучевая компактная ЭОС с радиальным расположением лучей, находящихся в одной плоскости, и сходящихся по радиусам, аналогичная [5]. Здесь каждый луч находится на пересечении двух плоскостей симметрии, что гарантирует отсутствие поперечных компонент магнитного поля на оси каждого пучка независимо от профиля продольной компоненты поля. Фокусирующая система для этой ЭОС была образована кольцевыми магнитами с аксиальной и радиальной намагниченностью и имеет униполярное распределение продольной (радиальной) компоненты индукции магнитного поля. Такая компоновка лучей позволяет за счёт их радиального расположения использовать индивидуальные катоды с значительно увеличенной площадью поверхности по сравнению с прототипом.

### 3. Электронная пушка

С учетом влияния разброса начальных поперечных скоростей ЭП смоделирована низковольтная однолучевая электронная пушка, формирующая ЭП с параметрами, приведёнными в таблице 3. Траектории частиц при транспортировке пучка в области катод – анод приведены на рисунке 1.

Таблица 3. Параметры спроектированной электронной пушки

Ток пучка, мА	Напряжение, кВ	Первичная плотность тока, мкА/В <sup>3/2</sup>	Диаметр катода, мм	Диаметр канала, мм	Плотность тока на катоде, А/см <sup>2</sup>	Компрессия пучка по площади
70.0	2.7	0.025	2.0	1.0	2.23	16

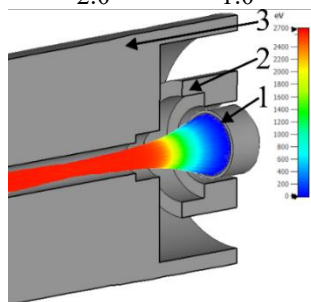


Рисунок 1. Траектории ЭП в ЭОС с МФС. Цифрами обозначены: 1 – катод ( $U_1=0\text{ В}$ ), 2 – фокусирующий электрод ( $U_2=0\text{ В}$ ), 3 – анод ( $U_3=2.7\text{ кВ}$ ).

### 4. Магнитная фокусирующая система

МФС для рассматриваемой многолучевой ЭОС представлена на рисунке 2. Она образована кольцевыми магнитами с аксиальной и азимутальной намагниченностью, расположенными так, что их оси совпадают и перпендикулярны плоскости, в которой расположены оси парциальных пучков. Параметры МФС представлены в таблице 4.

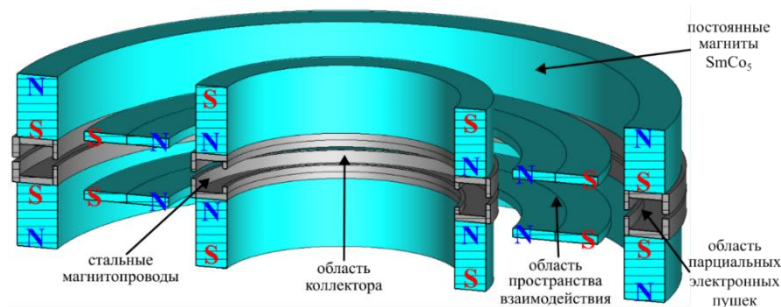


Рисунок 2. МФС для многолучевой ЭОС.

Таблица 4. Параметры спроектированной МФС

Магнитное поле на оси ЭП, Тл	Бриллюэновский радиус пучка, мм	Заполнение канала пучком	Средний радиус пучка, мм
0.15	0.2	0.5	0.25

Хотя поперечные компоненты магнитного поля на оси парциального пучка равны нулю, но поле не является аксиальносимметричным относительно этой оси. Поэтому выполнен предварительный расчет огибающей пучка в аксиальносимметричном парааксиальном приближении, который затем уточнен трехмерным расчетом оптики. Распределение осевой компоненты индукции магнитного поля на оси пролётного канала для парциальной ЭОС вместе с полученной по парааксиальному уравнению огибающей ЭП в сформированном МФС поле в области пространства взаимодействия представлены на рисунке 3.

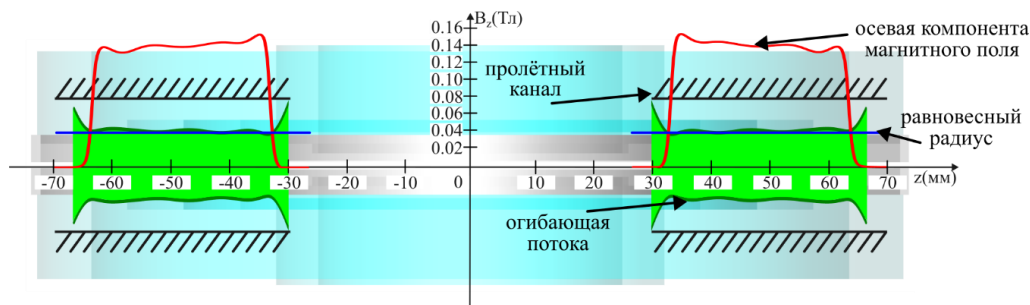


Рисунок 3. Распределение магнитного поля вдоль оси парциальной ЭОС вместе с огibaющими парциального ЭП в области пространства взаимодействия.

Сравнение результатов трёхмерного расчёта транспортировки ЭП в аксиально-симметричном магнитном поле и в парааксиальном приближении представлены на рисунке 4. Следует отметить, что учёт влияния разброса начальных поперечных составляющих скоростей электронов привёл к увеличению заполнения пучком пролётного канала с 0.4 до 0.5 из-за малой величины ускоряющего напряжения и низкого парциального микропервеанса.

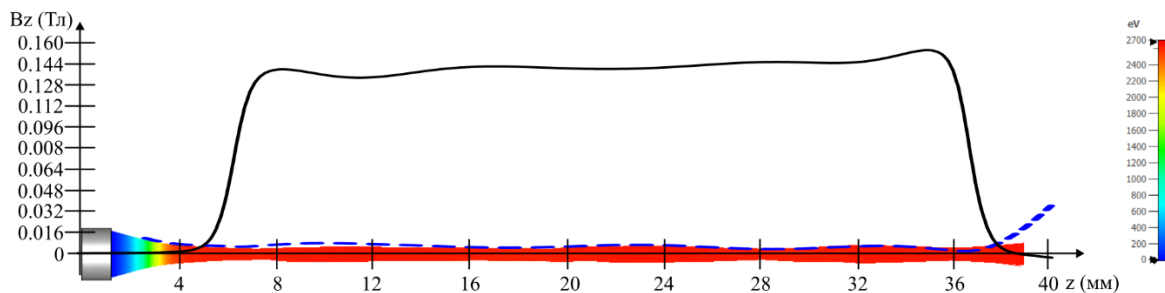
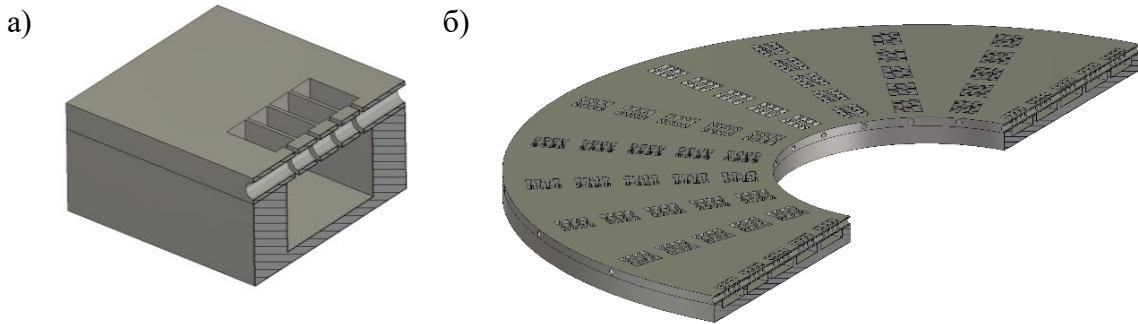


Рисунок 4. 3D расчёт траекторий ЭП в поле спроектированной МФС вместе с огibaющей (пунктир), полученной в парааксиальном приближении с учётом фазового объёма ЭП.

## 5. Резонаторная система

Резонаторный блок МЛК с радиальным расположением ЭП представлен на рисунке 5 и состоит из верхней и нижней крышек с пятью фрезерованными кольцевыми канавками, а также центральной пластины с выполненными в ней с помощью электроэрозии двадцатью каналами для пучков и вырезанными лазером четырёхзачорными резонаторами (по пять на каждый луч). Рабочий тип колебания для каждого резонатора – синфазный, расстояние до ближайшей паразитной моды более 5 ГГц, характеристическое сопротивление  $\rho=240$  Ом, а коэффициент взаимодействия резонатора  $M=0.5$ .



**Рисунок 5.** а) пролётный канал вместе с полостью индивидуального многозачорного резонатора МЛК (без верхней части); б) кольцевой резонаторный блок (без верхней части).

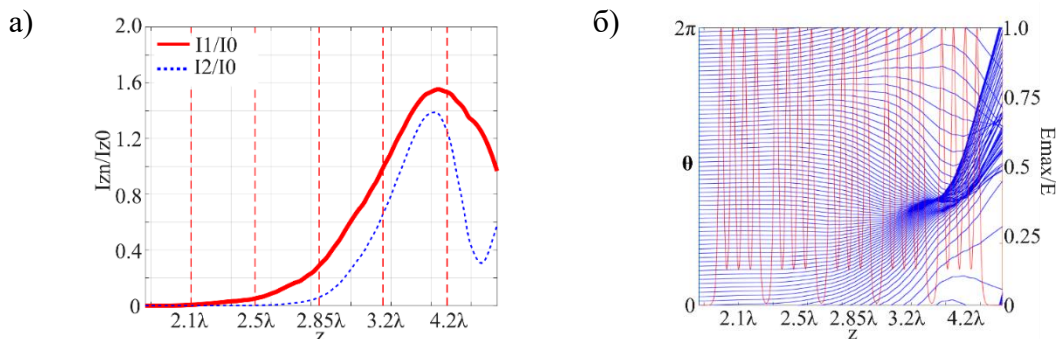
## 6. Расчёт пространства взаимодействия

С помощью метода крупных частиц в одномерном однолучевом приближении проведён расчёт электронно-волнового взаимодействия МЛК  $K_u$ -диапазона. Основные параметры исследуемого клистрона представлены в таблице 5.

**Таблица 5.** Основные параметры исследуемого МЛК

$f_0$	Число лучей	$P_{out}$ , Вт	U, кВ	I, мА	G, дБ	КПД, %
$K_u$	20	600	2.7	70	40	16

На рисунке 6 представлены зависимости распределения первых двух гармоник тока и фазовые траектории сгруппированного ЭП вдоль пространства взаимодействия.



**Рисунок 6.** а) распределение первой и второй гармоник сгруппированного тока вдоль пространства взаимодействия; б) распределение ВЧ полей в зазорах и фазовые траектории сгруппированного потока. По оси абсцисс - координата в направлении к выходному резонатору в электронных длинах волн на рабочей частоте.

## 7. Заключение

В работе рассмотрена конструкция ЭОС и МФС на постоянных кольцевых магнитах для фокусировки радиально расположенных ЭП в МЛК К<sub>u</sub>-диапазона. Показано, что в предложенной МФС с амплитудой 0.15 Тл при ускоряющем напряжении 2.7 кВ и парциальном токе 70 мА (суммарный 1.4 А для 20 лучей) обеспечивается транспортировка пучка в канале диаметром 1 мм с заполнением, не превышающим 0.5. При этом плотность тока с катода составляет менее 2.5 А/см<sup>2</sup>, а вес МФС с кольцевыми магнитами из материала SmCo<sub>5</sub> вместе со стальными магнитопроводами 1.6 кг. Расчёт пространства взаимодействия клистрона показал, что при заданных параметрах ЭП и входной мощности 50 мВт удаётся обеспечить выходную мощность на уровне 600 Вт при КПД 16 % и долговечности около 10 тыс. часов.

Фактически, рассмотрена возможность суммирования мощности от парциальных однолучевых клистронов, находящихся в едином корпусе и МФС с квази-аксиальносимметричным магнитном поле, и имеющих возможность значительной компрессии пучка

Как показали расчёты и трёхмерное моделирование, ЭОС обеспечивает отсутствие токооседания и значительную компрессию в пушке. Конструкция имеет запас по дальнейшему увеличению выходной мощности клистрона за счёт роста числа электронных пучков, который определяется технологическими возможностями изготовления большего числа парциальных пушек.

### Список литературы

1. Закурдаев А.Д. Мощные малогабаритные и миниатюрные клистроны для бортовых РЛС. Этапы развития. Электронная техника. СВЧ техника. – 2003. – Вып. 2 (482). – С. 40-47.
2. Д.Н. Золотых, Л.В. Кузнецова, М.А. Манжосин и др. Разработка 19-лучевого клистрона Ku-диапазона // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. Труды юбилейной научно-технической конференции, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «Исток»» «СВЧ-электроника. 70 лет развития» – 2013. – Вып. 3 (518). – С. 107-109.
3. X. Guo, Z. Zhang, H. Gu. Experiment of an electron gun for Ku band continuous wave klystron. Proceedings of the IVEC, 2024, p. 690 – 693.
4. Голованов Н.А., Галдецкий А.В. Об электронно-волновом взаимодействии в мощном многолучевом клистроне с радиальным расположением лучей // Сборник трудов XI Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. № 1, с. 145 – 149.
5. Голованов Н.А., Галдецкий А.В. Моделирование и оптимизация сверхмощного многолучевого клистрона S-диапазона с радиальным расположением лучей // Сборник трудов конференции «33-я международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Крымико'2023)». Севастополь, Россия, 2023. Том 5, 2023, с. 1 – 2.