

Исследование возможности модернизации коллектора мощного многолучевого клистрона

А.С. Арефьев, С.Г. Асташов, В.И. Пугнин, Т.Н. Бурдина, С.А. Мельников, А.В. Федотов, А.Н. Юнаков

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в работе проведено исследование возможности снижения температуры внутренней токовоспринимающей поверхности коллектора. Рассмотрен опыт проектирования коллектора мощного многолучевого клистрона в программах SolidWorks и CST Studio, а также результаты практического применения разработанной конструкции.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, коллектор, электронный поток, плотность мощности, амплитуда импульсной температуры, электрический пробой

1. Введение

Мощные импульсные многолучевые клистроны (МЛК) широко применяются в отечественных радиолокационных станциях самого различного назначения. Клистроны для радиолокационных станций должны обладать рядом параметров [1]: широкой полосой рабочих частот, большой длительностью импульса, высоким уровнем выходной мощности, длительным сроком службы, а также высокой электрической прочностью. Практически в каждой радиолокационной системе требуется предусмотреть режим работы клистрона в статическом режиме.

Безотказная работа мощного импульсного МЛК в статическом режиме при подводимой средней мощности несколько десятков киловатт в основном зависит от стабильной работы коллектора. В связи с компактным расположением лучей в многолучевом клистроне, коллектор испытывает тепловые перегрузки, что приводит к локальным перегревам в местах попадания электронных лучей на токовоспринимающую поверхность коллектора. Это приводит к газовыделению из материала коллектора и отравлению катода, увеличению вероятности электрических пробоев, и снижению долговечности приборов.

Целью данной работы является повышение надежности работы мощного многолучевого клистрона путем оптимизации конструкции коллектора, при сохранении габаритных размеров МЛК.

2. Коллектор с конусной токовоспринимающей поверхностью и недостаток его использования в МЛК

Структура коллектора исследуемого прибора представлена на рисунке 1, состоящая из тела коллектора с развитой внешней зубчатой и внутренней поверхностью охлаждения, рубашки и распределительной крышки со штуцерами. Характерной особенностью является овальная форма коллектора, переходящая в конус, необходимая для вывода из соленоида ввода и вывода энергии.

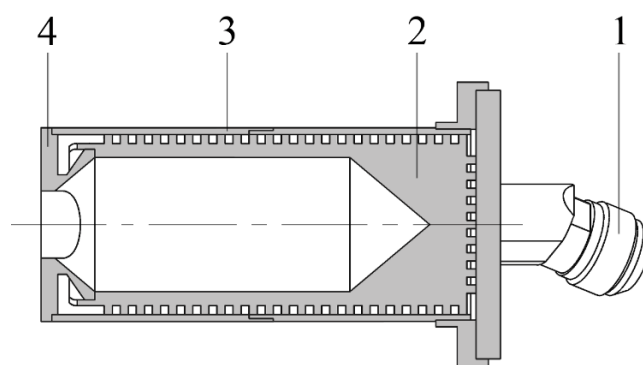


Рисунок 1. Базовая конструкция коллектора мощного многолучевого клистрона в разрезе: 1 – штуцера подвода охлаждающей жидкости; 2 – тело коллектора с внешней зубчатой поверхностью; 3 – стальная рубашка; 4 – дно коллектора.

Использование такой конфигурации коллектора в исследуемом МЛК приводило к частым электрическим пробоям и малому сроку службы прибора. После вскрытия коллектора было обнаружено, что на конусной части коллектора имеются следы оплавления, рисунок 2.

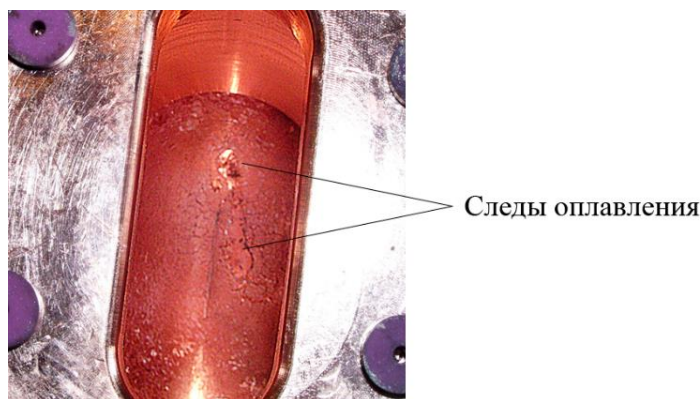


Рисунок 2. Фото внутренней поверхности базовой конструкции коллектора с оплавлением конусообразной поверхности.

Таким образом, конструктивным недостатком коллектора с конусной токовоспринимающей поверхностью является её малая площадь рассеивания мощности в торце коллектора. Это приводит к локальному перегреву верхней части коллектора, где съём тепла недостаточен из-за небольшой площади теплоотвода в области крышек.

3. Методика исследования и расчет базовой конструкции коллектора

С целью теоретического исследования причин оплавления внутренней поверхности коллектора и возможности снижения температуры нагрева токовоспринимающей области была разработана следующая методика расчета коллектора (расчет производился для средней мощности электронного потока; дополнительно оценивался импульсный нагрев коллектора):

1) С помощью методов трехмерного моделирования в программе CST Particle Studio [2] для реального распределения магнитного поля в исследуемом клистроне и коллекторе рассчитывается распределение траекторий электронов, рисунок 3;

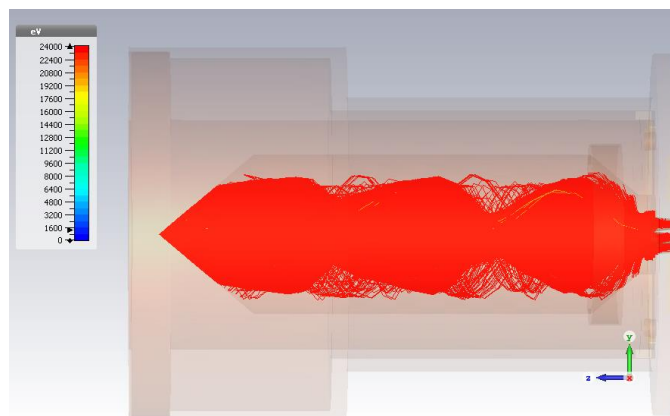


Рисунок 3. Распределение траекторий электронов в продольном сечении базовой конструкции коллектора с конусной токовоспринимающей поверхностью в исследуемом МЛК.

2) По результатам расчета оседания электронов в программе CST Multiphysics определяется плотность мощности на поверхности коллектора, рисунок 4;

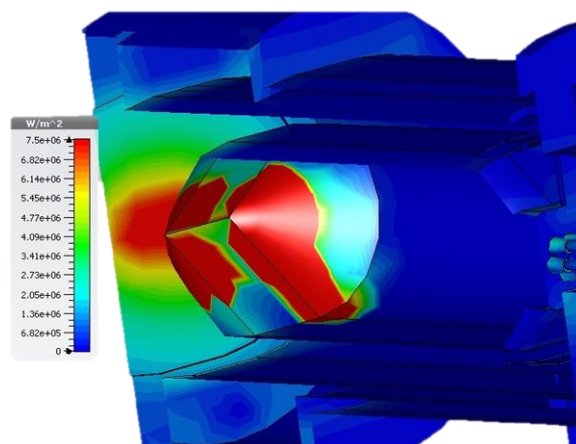


Рисунок 4. Распределение плотности мощности на внутренней поверхности коллектора с конусной токовоспринимающей поверхностью в исследуемом МЛК.

3) Используя значения полученной плотности мощности, расхода охлаждающей жидкости – 65 л/мин и температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения – 70°C с помощью теплового моделирования в программе SolidWorks Flow Simulation, определяется распределение внутренней температуры коллектора, рисунок 5.

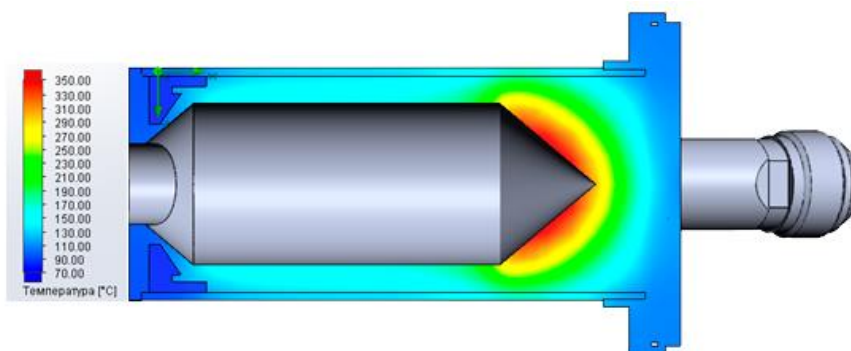


Рисунок 5. Распределение температуры в базовой конструкции коллектора, исследуемого МЛК.

Из рисунка 3 видно, что в базовой конструкции коллектора основная часть электронного потока осаждается на конусообразную часть коллектора, при этом удельная максимальная мощность на ней составила 750 Вт/см^2 (рисунок 4). Тепловой расчет базовой конструкции коллектора показал, что максимальная температура нагрева конусной части с учетом только средней мощности достигает $350 \text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 5), что значительно меньше температуры плавления меди.

4. Расчет оптимизированной конструкции коллектора

Поверхностный слой коллектора мощного МЛК во время каждого импульса нагревается, а в промежутках между импульсами остывает. Тепло, выделившееся на нагреваемой поверхности металла, не успевает за время импульса дойти до охлаждаемой поверхности. Расширение и сжатие поверхностного слоя вызывает внутреннее напряжение, образуя микротрещины в металле коллектора. Неоднородности затрудняют передачу тепла, что приводит к резкому возрастанию температуры поверхностного слоя. При этом температуру осаждаемой поверхности ни уменьшением толщины металла, ни снижением температуры охлаждаемой поверхности снизить невозможно. Разрушение поверхностного слоя происходит не сразу, а через некоторое количество импульсов. Количество импульсов, необходимое для разрушения металла, зависит от амплитуды импульсной температуры – разности между наибольшей и наименьшей температурой нагрева поверхности [3].

Для определения амплитуды импульсной температуры, применили формулу:

$$\Delta T = \frac{0,27 \cdot P \cdot \sqrt{\tau}}{\sqrt{\rho \lambda c}} \quad (1)$$

где ΔT – амплитуда импульсной температуры, $^\circ\text{C}$; P – импульсная удельная мощность электронного потока, $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$; τ – длительность импульса, с; λ – удельная теплопроводность вещества, $\text{кал}/(\text{с} \cdot \text{см})$; c – удельная теплоемкость вещества, $\text{кал}/(\text{г} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ – плотность вещества, $\text{г}/\text{см}^3$.

По формуле (1) для максимальной длительности импульса была рассчитана амплитуда импульсной температуры базовой конструкции коллектора $\Delta T \approx 110^\circ\text{C}$. Безопасная амплитуда импульсной температуры для меди $\Delta T_6 < 110 \text{ }^\circ\text{C}$. На основании этого расчета был сделан вывод, что температура токовоспринимающей поверхности коллектора с базовой конструкцией в импульсном режиме является предельной.

Для решения данной проблемы было рассмотрено несколько вариантов новой внутренней конструкции тела коллектора. Идея состояла в увеличении площади оседания электронного потока на проводящую поверхность, а также смещении максимального нагрева в среднюю часть коллектора, для обеспечения оптимального съема тепла жидкостью. Конструкция и размеры каналов охлаждения остаются неизменными.

Поставленная задача была достигнута введением в коллектор клинообразной внутренней полости, представленная на рисунке 6, где основная осаждаемая поверхность расположена под углом α относительно электронного потока.

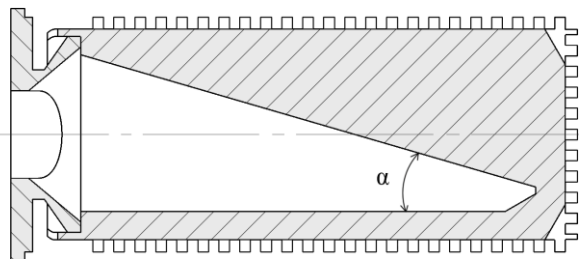


Рисунок 6. Тело коллектора с клинообразной внутренней полостью в разрезе.

Применяя выше описанную методику расчета для исследуемого клистрона, была рассчитана модернизированная конфигурация внутренней полости коллектора, определен оптимальный угол токовоспринимающей поверхности, который составил 16° относительно электронного потока, рисунок 7.

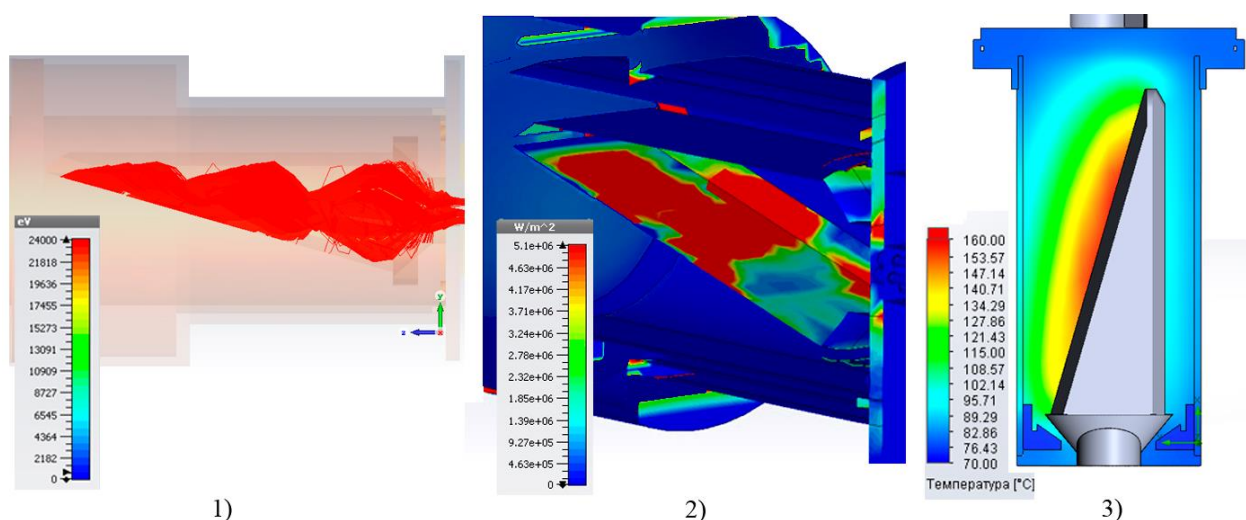


Рисунок 7. Расчет модернизированного коллектора с клинообразной внутренней полостью методом трехмерного моделирования: 1 – распределение траекторий электронов; 2 – распределение плотности мощности осаждаемой поверхности; 3 – распределение температуры в коллекторе в разрезе.

Благодаря данной конструкции удалось увеличить площадь, непосредственно воспринимающей электронный поток, как видно из рисунка 7. При этом максимальная удельная мощность на поверхности коллектора достигает 510 Вт/см^2 , а максимальная температура нагрева в рабочем режиме составила 160°C .

По формуле (1) была рассчитана амплитуда импульсной температуры для данной конфигурации коллектора, которая составила $\Delta T = 75^\circ\text{C}$, что практически в 1,5 раз меньше безопасной амплитуды импульсной температуры, исключая возможность оплавления поверхностного слоя.

5. Заключение

Таким образом, использование клинообразной внутренней полости коллектора для мощных многолучевых клистронов, позволило существенно уменьшить импульсную тепловую нагрузку на токовоспринимающую поверхность. Кроме того, модернизированная конструкция тела коллектора позволило сократить температуру внутренней поверхности в 2 раза.

В настоящее время изготовлен модернизированный коллектор, который успешно прошел испытания в мощном многолучевом клистроне. Значительно уменьшилась вероятность возникновения электрических пробоев, тем самым удалось повысить надежность работы приборов в течение всего срока службы.

Список литературы

1. Gelvich, Edward A. The new generation of high-power multiple-beam klystrons / Edward A. Gelvich, Ludvik M. Borisov, Yevgeny V. Zhary, Anatoli D. Zakurdayev, Alexandr S. Pobedonostsev and Victor I. Poognin // IEEE. – January 1993. – Vol. 41, No 1.
2. Евремова М.В., Иванов И.М., Курушин А.А. Моделирование СВЧ приборов с помощью программы CST Particle Studio. – М., СОЛОН-Пресс, 2019, – 332 с.
3. Коваленко В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. – М., «Сов. Радио». 1975. с.169-184.