

Влияние азимутальной неоднородности электрических полей в выходном резонаторе на КПД многолучевого клистрона

Ю.Н. Парамонов, О.В. Яковлев, С.В. Сурков

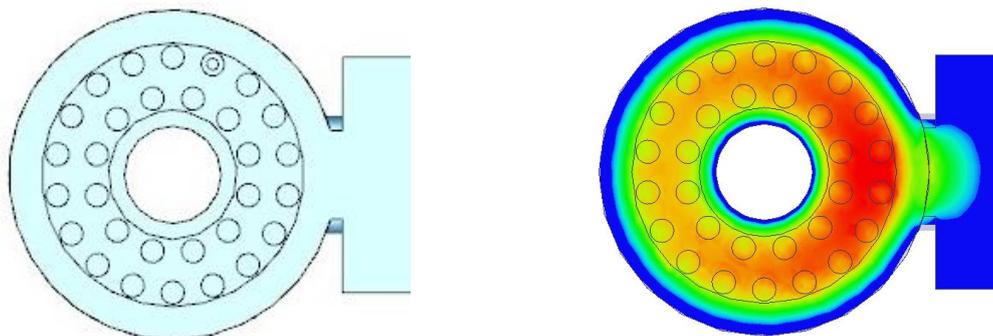
АО «НПП «Торий»

Аннотация: в настоящей работе представлены результаты расчетов и экспериментов по оптимизации выходного каскада мощного многолучевого клистрона. Представлен метод выравнивания электрических полей в многолучевых системах. Показаны экспериментальные результаты увеличения КПД прибора КИУ-271.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, мощная импульсная техника, моделирование

1. Введение

Характерной особенностью многолучевых клистронов является неравномерность волнового сопротивления в ВЧ зазоре выходного резонатора. Это связано с наличием неоднородности в виде щели связи, связывающей активный контур с выходным трактом. Таким образом, требуемое волновое сопротивление для идеального согласования можно получить только в нескольких пролетных каналах многолучевой системы, в остальных же каналах отбор энергии у электронного потока будет неэффективным. И как следствие, будут существенные потери КПД [1]. В качестве примера на рисунке 1 представлен выходной резонатор мощного многолучевого клистрона КИУ-271, разработанный и серийно выпускаемый на АО «НПП «Торий». Данный выходной каскад представляет собой кольцевой резонатор с 30 пролетными каналами, центральной втулкой, используемой в качестве настроечного элемента, и волноводным трансформатором, связанным с выходным резонатором щелью связи.



а) Выходной резонатор

б) Распределение электрического поля

Рисунок 1. Модель выходного резонатора

Распределение электрического поля на рабочей частоте 5712 МГц вдоль линии, проходящей через внешний ряд пролетных каналов, представлено на рисунке 2. Как видно, уровень тормозящего электрического поля в различных каналах отличается практически в 2 раза.

В [1] предложен метод, основанный на использовании различных длин высокочастотных зазоров, который позволяет выровнять уровень электрического поля. Результаты численного моделирования показали, что при увеличении величины

высокочастотного зазора на 0.7 мм в области щели связи (рисунок 3(а, б)), распределение поля существенно выравнивается. При этом частота и добротность резонансного контура изменится, и ее необходимо подстроить за счет изменения размеров центральной втулки и щели связи. Результаты расчета представлены на рисунке 4 (а, б).

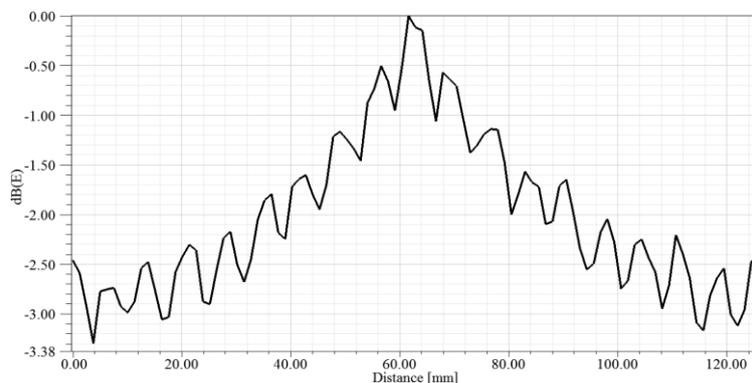
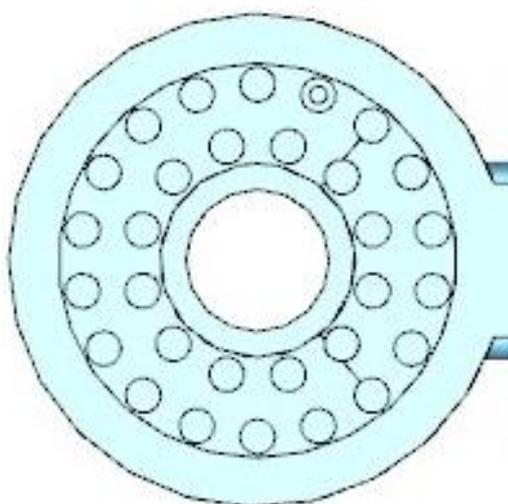


Рисунок 2. Распределение тормозящего электрического поля в ВЧ зазоре

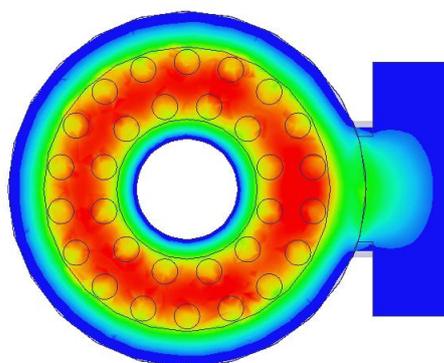


а) модель в программе

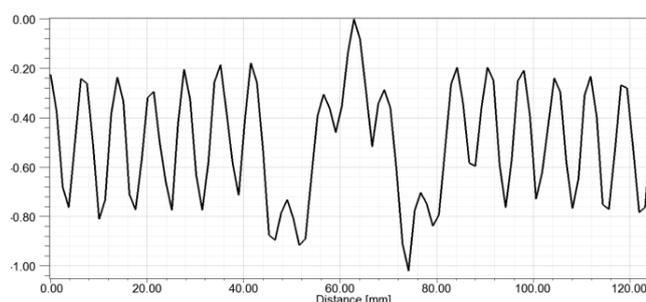


б) фрезеровка в реальном приборе

Рисунок 3. Выходной резонатор с фрезеровкой



а) в плоскости



б) вдоль линии, проходящей по внешним пролетным каналам

Рисунок 4. Распределение поля внутри резонатора

Для дальнейших расчетов КПД требуется подобрать параметры, соответствующие требуемой резонансной частоте и добротности. Произведен расчет зависимостей

параметра S_{12} от частоты по 15 пролетным каналам. Путем усреднения полученных кривых был выбран характерный пролетный канал, по которому в дальнейшем настраивался резонатор. Полученные параметры отображены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные параметры моделей

Модель	$R_{\text{вт}}$, мм	$f_{\text{рез}}$, ГГц	Q
Исходная	8.31	5.710	53
Модернизированная	8.07	5.711	53

2. Моделирование и результаты

Было произведено моделирование взаимодействия пучков электронов, движущихся в пролетных каналах, с электромагнитным полем, возбуждаемым в резонаторе, для моделей с фрезеровкой и без. Метод моделирования и расчет необходимых параметров описан в [2]. На рисунке 5, 6 изображены выходные характеристики исходной модели.

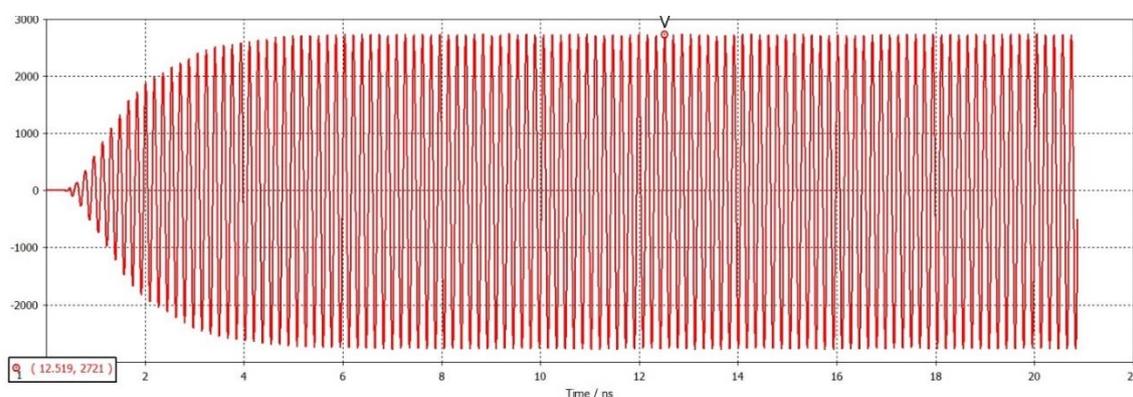


Рисунок 5. Зависимость амплитуды выходного сигнала от времени

Оценить выходную мощность сигнала можно по формуле:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{2721^2}{2} = 3.704 \text{ МВт} \quad (1)$$

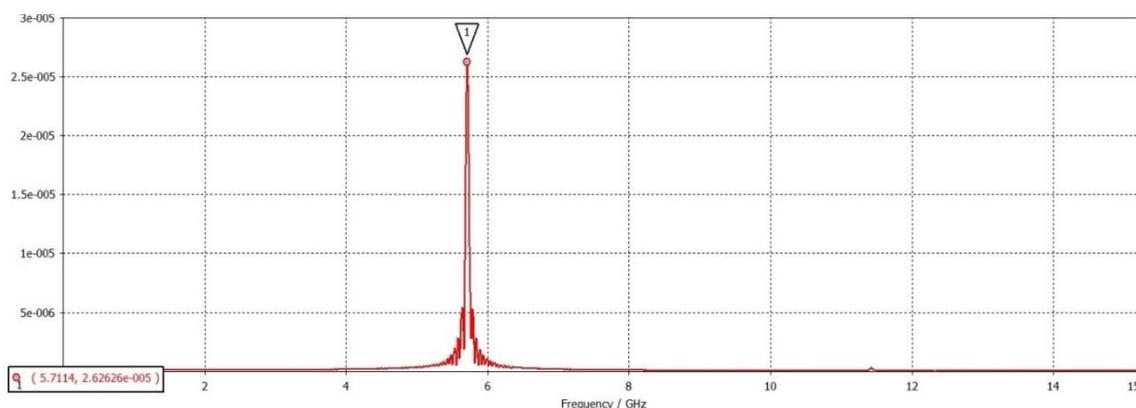


Рисунок 6. Спектральная характеристика выходного сигнала

Частота получаемого на выходе электромагнитного поля составила $f_{\text{рез}} = 5.714$ ГГц. КПД составляет $\eta = 54.8$ %.

Также были проведены расчеты выходных характеристик на модели с

фрезеровкой на стенке резонатора.

$$P_{\text{Вых}} = \frac{2856^2}{2} = 4.081 \text{ МВт} \quad (2)$$

Частота получаемого на выходе электромагнитного поля составила $f_{\text{рез}} = 5.713$ ГГц. КПД увеличилось до $\eta=60.5$ % (увеличилось на 5.5 %).

Данные конструктивные изменения были реализованы на экспериментальном макете (рисунок 3б). Результаты электродинамических измерений экспериментального макета показали хорошее соответствие с результатами расчета. Был испытан прибор с измененной конструкцией выходного резонатора. Данные конструктивные изменения позволили увеличить КПД прибора с 53 до 59 %.

Также были проведены расчеты амплитуды выходного сигнала для разной добротности первоначальной конструкции резонатора, результаты представлены в таблице 2. Исходя из этих данных можно судить о том, что значение добротности, выбранное для реализации в приборе, является близким к оптимальному.

Таблица 2. Зависимость выходной мощности от добротности резонатора

Q	f, ГГц	P _{out} , МВт	η, %
53	5.710	3.704	54.8
63	5.711	3.372	49.9
73	5.711	3.202	47.4

Далее была исследована зависимость КПД прибора от азимутальной равномерности распределения поля в выходном резонаторе. Для этого проводились расчеты мощности выходного сигнала для моделей с фрезеровками различной глубины. На рисунке 7 изображено сравнение распределений амплитуды напряженности электрического поля по внешним пролетным каналам для исходной модели и с глубиной фрезеровки 0.7 мм.

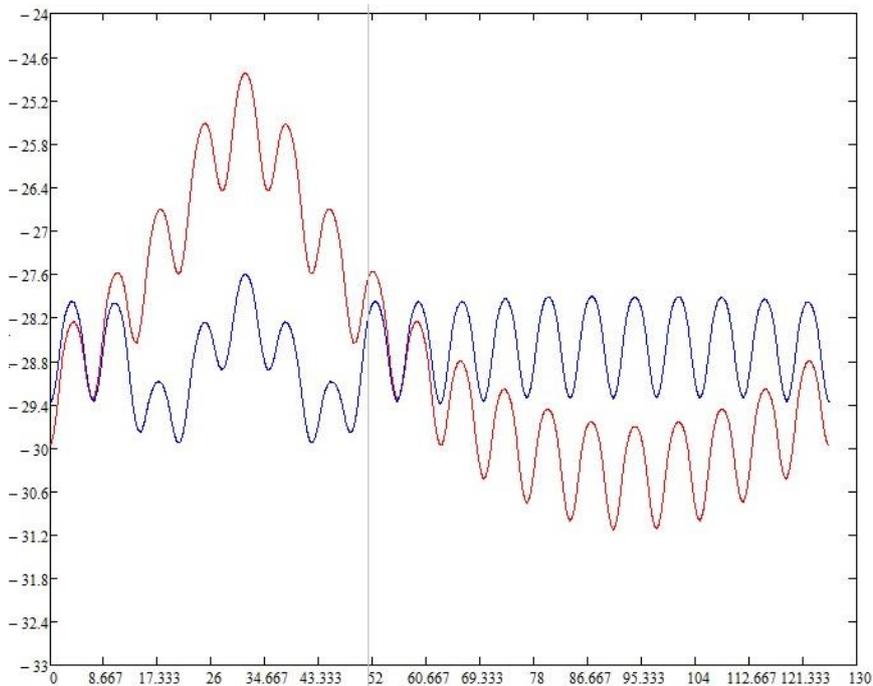


Рисунок 7. Распределения полей в исходной модели (красный) и с модернизацией (синий)

Ключевыми значениями являются амплитуды локальных минимумов, изображенных на рисунках, т. к. в пролетных каналах образуются именно минимумы амплитуды напряженности электромагнитного поля. Результаты выполненных расчетов отображены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты моделирования

d, мм	$\Delta E_{\text{сумм}}$, дВ	P_{out} , МВт	КПД, %
0	1,32	3.704	54.8
0.1	1,04	3.726	55.2
0.2	0,83	3.853	57.1
0.3	0,63	3.922	58.1
0.4	0,45	3.962	58.7
0.5	0,27	4.030	59.7
0.6	0,20	4.060	60.1
0.7	0,17	4.081	60.5

Для оценки равномерности распределения поля была выбрана величина, численно равная среднему отклонению амплитуды поля по всем пролетным каналам от средней амплитуды. Далее по полученным результатам было вычислено среднее отклонение для каждой модели по формуле (3) и построена графическая зависимость (рисунок 9).

$$\Delta E_{\text{ср}} = \frac{\sum(E_i - \frac{\sum E_i}{18})}{18} \quad (3)$$

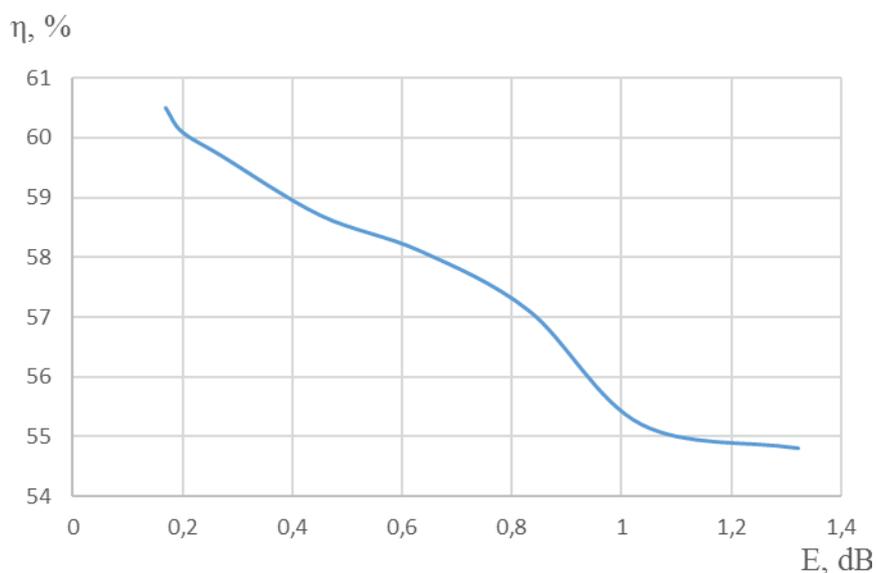


Рисунок 8. Зависимость максимального КПД прибора от неоднородности поля

3. Заключение

В данной статье предложен метод повышения КПД мощных импульсных многолучевых клистронов на основе выравнивания распределения электрического поля в выходном резонаторе. Метод рассмотрен на примере изделия КИУ-271, серийно производимом на АО «НПП «Торий». По результатам моделирования получен прирост КПД на 5.7 %. Также предложенная модификация была применена в приборе и обеспечила рост КПД на 6%. Была выявлена зависимость КПД прибора от среднего отклонения амплитуды электрического поля в выходном резонаторе.

Список литературы

1. D. A. Komarov, E. P. Yakushkin, Y. N. Paramonov, S. E. Sharkov. Increased efficiency of high-power multiple-beam klystrons based on optimization of the output cavity. IVEC 2018;
2. Yu. N. Paramonov, O.V. Yakovlev, S.V. Surkov, 3D modeling of interaction of modulated electron beams with electromagnetic field in output cavity of the multiple-beam klystron. MTSE 2019.