

Увеличение зоны устойчивой фокусировки электронного потока в мощном многолучевом клистроне

Д.А. Комаров, И.С. Кузнецов, Р.А. Осин, Ю.Н. Парамонов, В.М. Саблин, Д.А. Терентьев

АО «НПП «Торий»

Аннотация: в данной работе исследовалась возможность увеличения зоны устойчивой фокусировки электронного потока мощного многолучевого клистрона. Предложена конструкция фокусирующей системы, расширяющей зону токопрохождения пучка электронов. Проведены расчеты и измерения предложенной конструкции, а также представлен сравнительный анализ их результатов.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, магнитная реверсивная фокусирующая система, электронно-оптическая система

1. Введение

Магнитные реверсивные фокусирующие системы (МРФС) нашли достаточно широкое применение в фокусировке высокопереванских электронных потоков. Являясь промежуточным классом между системами с однонаправленным магнитным полем и периодическими фокусирующими системами, они обладают как рядом важных преимуществ, так и недостатков. Зачастую, данный тип систем является единственным разумным способом фокусировки. Главным их недостатком является наличие зон пропускания и зон запирания электронного пучка. Однако в отличие от периодических фокусирующих систем, в МРФС достаточно обеспечить необходимое токопрохождение на относительно небольшом количестве полупериодов магнитного поля. Это означает, что стабильная работа изделия может обеспечиваться даже за пределами зоны пропускания, однако токопрохождение в таких условиях критично даже к малым возмущающим воздействиям.

Для повышения качества фокусировки применяются различные методы, такие как: уменьшение длин зон реверса, внесение специальных особенностей в распределение магнитного поля возле зон реверса, изменение условий согласования электронного потока с фокусирующей системой, корректировка длины полупериодов и уровня магнитного поля и т.д. Однако многие из этих способов сложно применить в реальных изделиях ввиду конструктивных или иных ограничений. В особенности это касается многолучевых приборов, где наличие радиальных магнитных полей накладывает дополнительные требования к конструкции магнитной системы и распределению поля на оси пролетного канала.

В настоящей работе представлены результаты расчетов и измерений, суть которых заключалась в расширении зоны устойчивой фокусировки электронного потока в мощном многолучевом клистроне.

2. Результаты расчетов и эксперимента

Основные параметры исследуемого многолучевого клистрона представлены в таблице 1. На рисунках 1 и 2 представлены геометрия магнитной фокусирующей системы и результаты расчета траекторий электронов в магнитном поле при номинальном режиме работы прибора. В качестве источника электронов используется пушка Пирса со сходящимся электронным потоком.

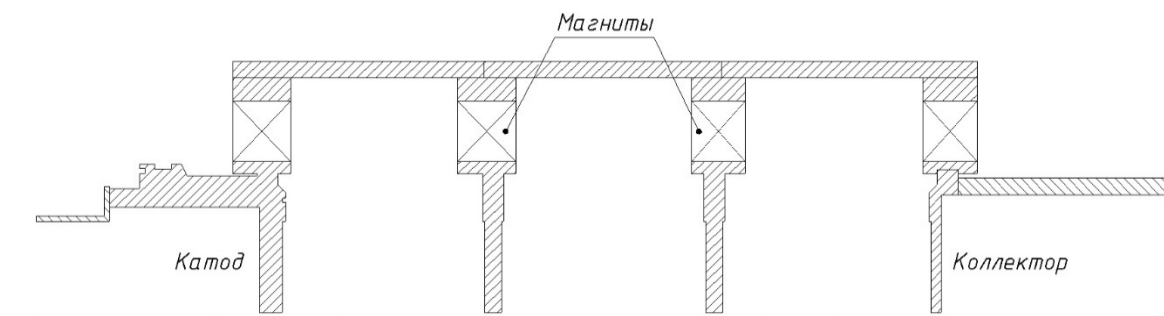


Рисунок 1. Эскиз геометрии МРФС

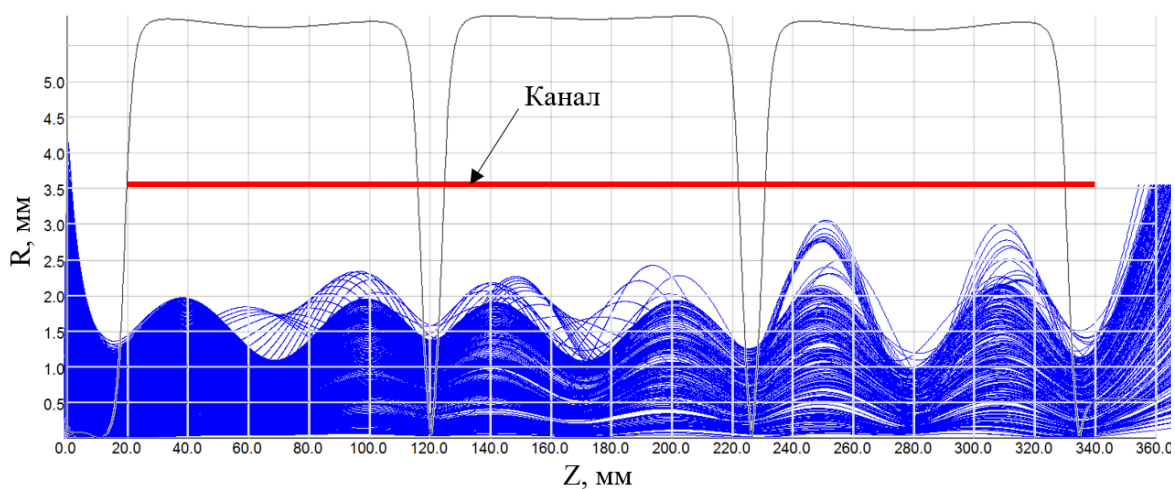


Рисунок 2. Траектории электронного потока и распределение продольной составляющей индукции магнитного поля на оси пролетного канала. Токопрохождение – 100 %.

Таблица 1. Параметры ЭОС

Ускоряющее напряжение U_a , кВ	55
Парциальный ток катода I_k , А	9
Количество лучей N	30
Бриллюэновское поле $B_{бр}$ (заполнение – 0,4), Гс	1140
Диаметр канала $D_{кан}$, мм	7

Проведенные динамические испытания изделий показали необходимость в увеличении токопрохождения на низких ускоряющих напряжениях для повышения стабильности работы. Причиной неудовлетворительного токопрохождения, как уже отмечалось выше, является наличие зон неустойчивой фокусировки МРФС. Для понимания природы возникновения неустойчивости можно представить фокусирующую систему как последовательность электронных линз, оптическая сила f которых определяется выражением:

$$f = \frac{\eta}{8U_a} \int_a^b B^2 dz, \quad (1)$$

где $\eta=e/m$ – отношение заряда электрона к его массе, B – индукция магнитного поля, ab – протяженность линзы (длина полупериода МРФС L). Тогда при уменьшении ускоряющего напряжения растет оптическая сила линзы, что приводит к «перефокусировке» электронного потока, увеличению амплитуды пульсаций электронного потока и, как следствие, снижению токопрохождения. При этом

происходит изменение длины волны пульсаций λ_n в соответствии с выражением:

$$\lambda_n = \frac{4\pi}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{U_a}}{B} \sqrt{\frac{2}{1+K}}. \quad (2)$$

Здесь K – параметр катодных условий, который определяется как:

$$K = \left(\frac{B_k}{B}\right)^2 \left(\frac{r_k}{r_0}\right)^4, \quad (3)$$

где B_k – индукция магнитного поля на катоде, r_k – радиус катода, r_0 – радиус равновесного электронного потока. Как видно из (2) изменение длины волны пульсаций пропорционально ускоряющему напряжению. Эти изменения приводят к образованию неблагоприятной фазы пучка на входе в реверс (или реверсы) поля. Возникающие пульсации вкупе с радиальным отклонением электронного потока приводят к значительному токооседанию на стенках пролетного канала. На рисунке 3 показаны результаты расчета траекторий электронов в магнитном поле при ускоряющем напряжении $U_a=42$ кВ.

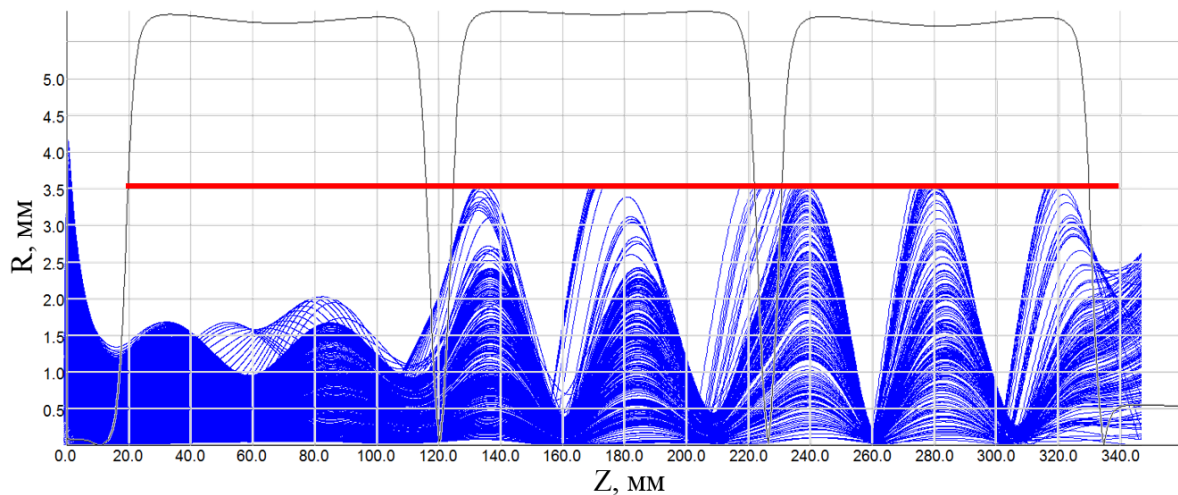


Рисунок 3. Траектории электронного потока и распределение продольной составляющей индукции магнитного поля на оси пролетного канала. $U_a=42$ кВ. Токопрохождение – 60 %.

Неблагоприятные условия «встрела» пучка во второй и третий реверсы поля привело к снижению расчетного токопрохождения со 100 % до 60 %. Данные обстоятельства снижают рабочий диапазон перестройки клистрона по напряжению, осложняют тренировку изделия во время динамических испытаний из-за высокой тепловой нагрузки на резонаторный блок, а также может являться причиной нестабильной работы изделия в импульсном режиме.

Как было сказано ранее, в случае с многолучевыми электронно-оптическими системами применение способов по расширению зон устойчивой фокусировки сильно ограничено. Создание различных особенностей распределения магнитного поля помимо сложности их конструктивной реализации неизбежно приводит к возникновению радиальных полей, отклоняющих электронный поток. То же касается и длины полупериодов, которые в большинстве случаев ограничены положением резонаторов и системы охлаждения прибора. Поэтому наиболее разумным и относительно легко реализуемым методом является изменение уровней магнитного поля в полупериодах системы с помощью специальных корректоров из магнитопроводящего материала. Данный метод позволяет нарушить периодичность магнитного поля без значительного вмешательства в конструкцию магнитной системы и изделия в целом.

Было рассмотрено несколько вариантов корректоров поля. Эскиз итоговой

конструкции корректоров поля представлен на рисунке 4.

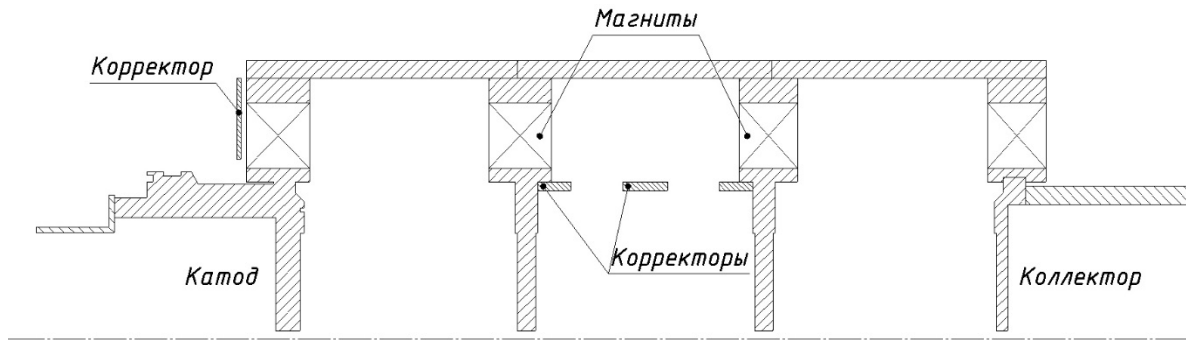


Рисунок 4. Эскиз геометрии МРФС с корректорами поля

Распределения продольной и радиальной компонент магнитного поля до применения корректор и после представлены на рисунке 5, исходя из которого видно, что внесенные изменения нарушают периодичность поля без значительных «всплесков» радиального поля.

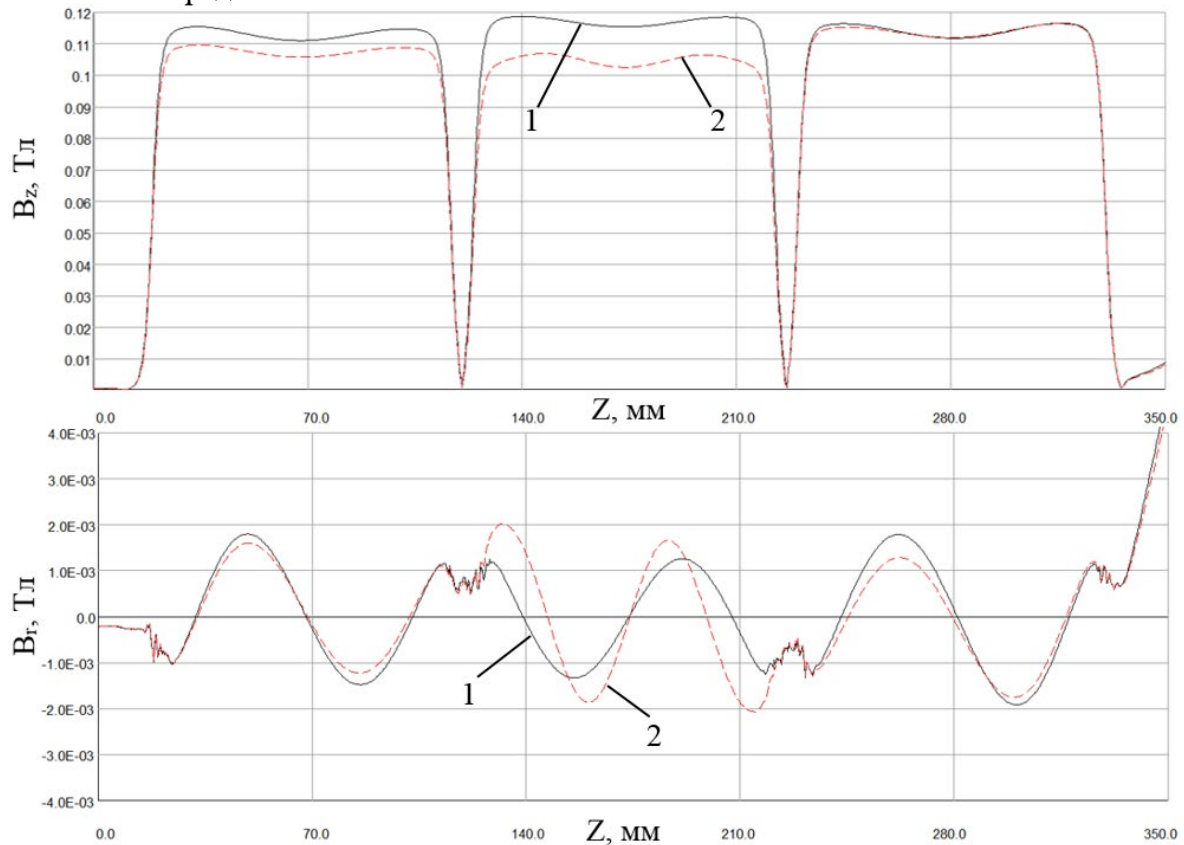


Рисунок 5. Распределения продольной составляющей индукции магнитного поля (сверху) и радиальной составляющей (снизу): 1 – базовая конструкция, 2 – конструкция с корректорами поля.

На рисунке 6 приведены графики зависимости токопрохождения от ускоряющего напряжения, которые были получены в результате расчета (1) и эксперимента (2). Исходя из представленных результатов можно сделать вывод о том, что минимум токопрохождения фокусировки сместился с 42 кВ на 35 кВ, при этом зона устойчивой фокусировки расширилась почти на 50 % (20 кВ против 13 кВ).

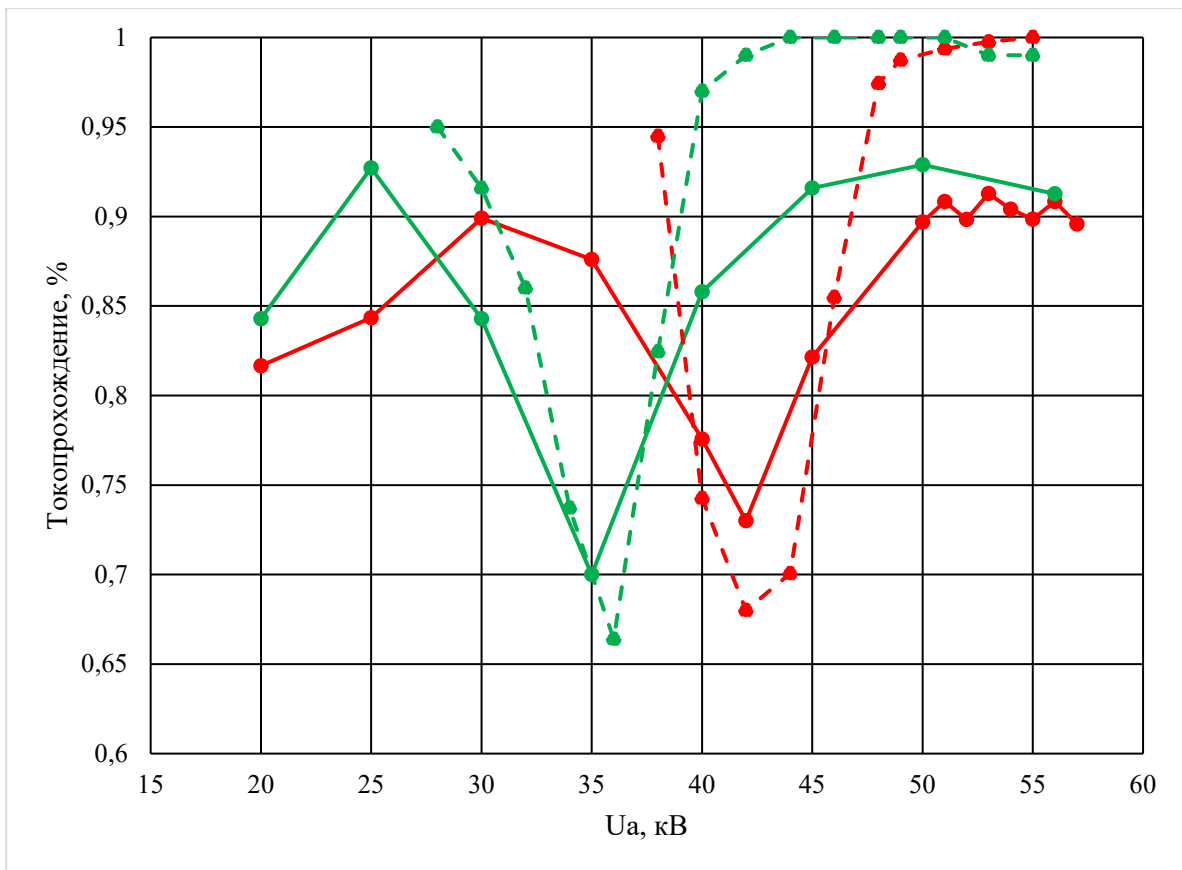


Рисунок 6. Сравнение графиков зависимости токопрохождения от ускоряющего напряжения для базовой МРФС (1) и для МРФС с корректорами поля (2). Сплошной линией приведены экспериментальные данные, пунктиром – расчетные.

3. Заключение

Рассчитанная геометрия МРФС с корректорами поля позволила значительно расширить зону устойчивой фокусировки, а также несколько улучшить токопрохождение при номинальных напряжениях клистрона. Полученная МРФС также обеспечивает более стабильную работу изделия во время динамических испытаний.

Список литературы

1. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. – Сов. радио, 1965.
2. Царев В.А., Спиридонов Р.В. Магнитные фокусирующие системы электровакуумных микроволновых приборов О-типа. Учебное пособие. – Новый ветер, 2010.