

Модернизация магнитной периодической фокусирующей системы многолучевого клистрона с целью увеличения зоны устойчивой фокусировки

В.М. Саблин¹, Р.А. Осин^{1,2}, В.И. Оконенко¹

¹АО «НПП «Торий», г. Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва

Аннотация: в работе представлены результаты моделирования магнитной периодической фокусирующей системы многолучевого клистрона. Предложена модернизированная конструкция фокусирующей системы, позволяющая получить необходимое токопрохождение электронного потока на коллектор в более широком диапазоне ускоряющих напряжений.

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

1. Введение

Магнитные реверсивные фокусирующие системы (МРФС) широко применяются в многолучевых клистронах для обеспечения транспортировки электронных потоков. Основным недостатком таких систем является наличие зон устойчивой и неустойчивой фокусировки. Данный факт снижает диапазон допустимых ускоряющих напряжений, при которых возможна стабильная работа изделия без необходимости юстировки магнитной системы. При этом чем выше первеанс электронного потока, тем значительнее проявляются зоны с низким токопрохождением. Существуют разные способы увеличения зон устойчивой фокусировки (см., например, [1]), наиболее эффективным из которых оказывается изменение конструкции магнитной системы с целью уменьшения параметра магнитного поля.

В данной работе представлены результаты модернизации магнитной фокусирующей системы, обеспечивающей работу клистрона в более широком диапазоне напряжений, а также результаты расчета огибающих электронного потока.

2. Постановка задачи

Рассмотрим траекторию движения крайнего электрона в периодическом магнитном поле, которая может быть вычислена с помощью уравнения [2]

$$\frac{d^2R}{dZ^2} + \alpha(1 + \cos 2Z)R - \frac{\alpha K}{R^3} - \frac{\beta_p}{R} = 0, \quad (1)$$

где R – нормализованный радиус пучка, Z – нормализованная продольная координата, α – параметр магнитного поля, β_p – параметр пространственного заряда пучка, K – параметр катодных условий. Параметры α и β_p определяются следующим образом

$$\alpha = \frac{\eta B^2 L^2}{64\pi^2 U}, \quad (2)$$

$$\beta_p = \frac{PL^2}{16\pi^3 \varepsilon_0 r_p \sqrt{2\eta}} \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) η – отношение заряда к массе электрона, B – амплитуда

продольной составляющей индукции магнитного поля, L – период магнитного поля, U – ускоряющее напряжение, P – первеанс электронного потока, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, r_p – средний радиус пучка.

Уравнение (1) является нелинейным дифференциальным уравнением с периодическим коэффициентом типа уравнения Матье, решение которого может быть получено в виде рядов. Каноническая форма уравнения Матье имеет вид

$$\frac{d^2y}{dx^2} + (a + 2q \cos 2x) y = 0$$

Плоскость с координатами a и q называется диаграммой устойчивости Матье. На ней выделяют области устойчивых и неустойчивых решений уравнения (1).

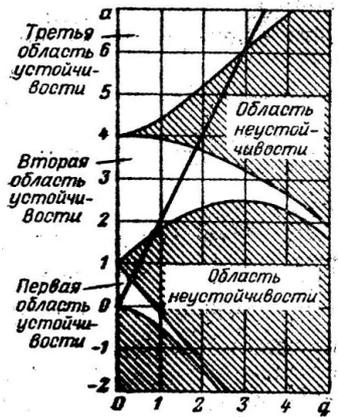


Рисунок 1. Диаграмма устойчивости Матье [2].

Из рисунка 1 видно, что устойчивые решения уравнения (1), равно как и возможность фокусировать электронные потоки, существуют лишь при определенных комбинациях параметров электронного потока и магнитного поля. Этот факт накладывает значительные ограничения на рабочие режимы клистрона. Наибольший практический интерес представляет первая зона, где параметр магнитного поля не превышает значения $\alpha_{кр} = 0,66$, поскольку для согласования в остальных областях требуются большие уровни магнитного поля. Представленные выводы актуальны не только для магнитных периодических фокусирующих систем (МПФС), но и для МРФС, в особенности, для систем с большим количеством реверсов поля. Однако в таком случае параметр магнитного поля может значительно превышать указанное значение. Обеспечение как можно широкой зоны устойчивой фокусировки позволяет увеличить диапазон рабочих напряжений клистрона, облегчить его настройку во время динамических испытаний, а также снизить влияние геометрических отклонений на выходные параметры прибора.

3. Результаты моделирования

Параметры модернизируемого клистрона представлены в таблице 1. Соответствующая схема МРФС показана на рисунке 2.

Таблица 1. Основные параметры исследуемого клистрона

Параметр, единица измерения	Численное значение параметра
Ускоряющее напряжение, кВ	9 – 11
Ток суммарный/парциальный, А	28/0,93
Количество лучей, шт.	30
Диаметр канала, мм	4
Бриллюэновское поле, Гс	900

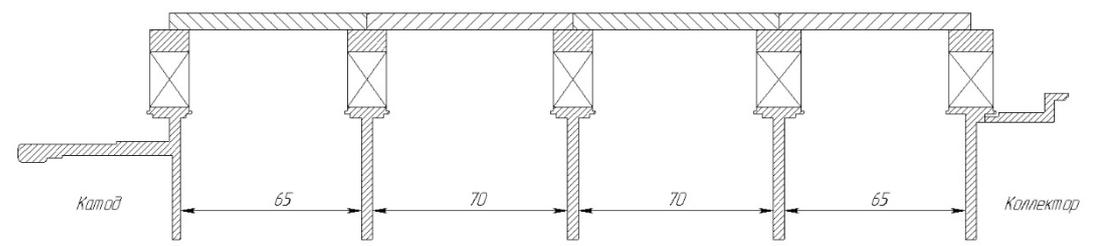


Рисунок 2. Схема исходной МРФС клистрона.

Параметр магнитного поля α исходной МРФС, рассчитанный по формуле (2), составил 4,9, что говорит о транспортировке электронного потока в условиях неустойчивой фокусировки. Результаты расчета огибающих электронного пучка в магнитном поле данной МРФС при разных ускоряющих напряжениях представлены на рисунке 3.

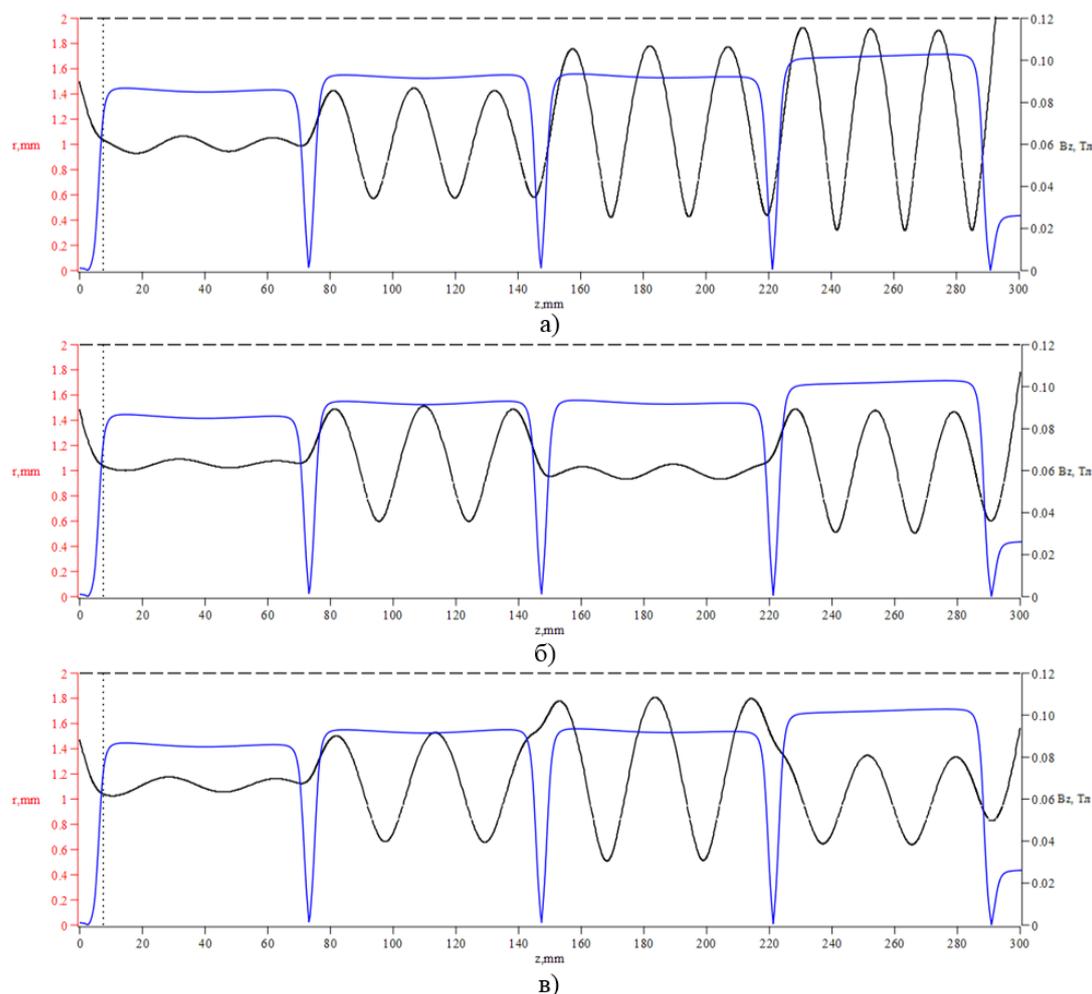


Рисунок 3. Огибающие электронного потока в магнитном поле исходной МРФС: а) – $U=8,5$ кВ, б) – $U=10$ кВ (номинальное напряжение), в) – $U=11,7$ кВ.

Из рисунка 3 видно, что при напряжениях 8,5 и 11,7 кВ заполнение пучком канала становится близким к 100 %, что в реальном приборе с высокой вероятностью приведет к оседанию электронного потока на стенки пролетного канала. При этом коэффициент относительных пульсации электронного потока в диапазоне рабочих

напряжений 9 – 11 кВ составил не менее 43 %. В связи с этим возникла необходимость улучшения качества фокусировки электронов.

Одним из возможных вариантов является корректировка уровней полей и параметров согласования электронного потока. Однако данная идея не принесла значительного эффекта, поэтому было принято решение изменить геометрию магнитной системы с целью уменьшения пульсаций электронного потока и расширения зоны устойчивой фокусировки. Основная проблема такого подхода – необходимость внесения правок в электродинамическую систему. В результате была спроектирована конструкция магнитной системы, изображенная на рисунке 4. Соответствующие огибающие электронного потока представлены на рисунке 5.

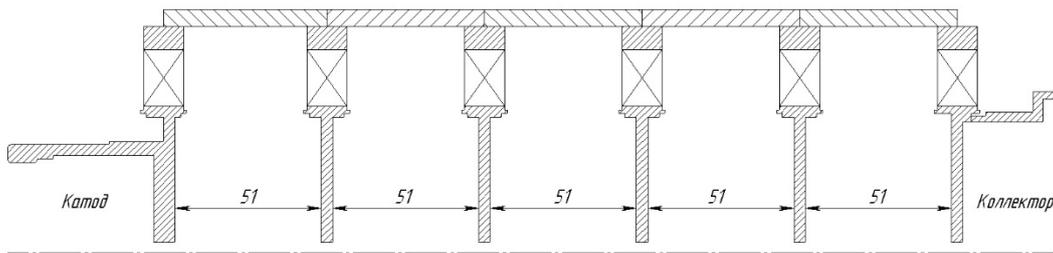


Рисунок 4. Схема модернизированной МРФС клистрона.

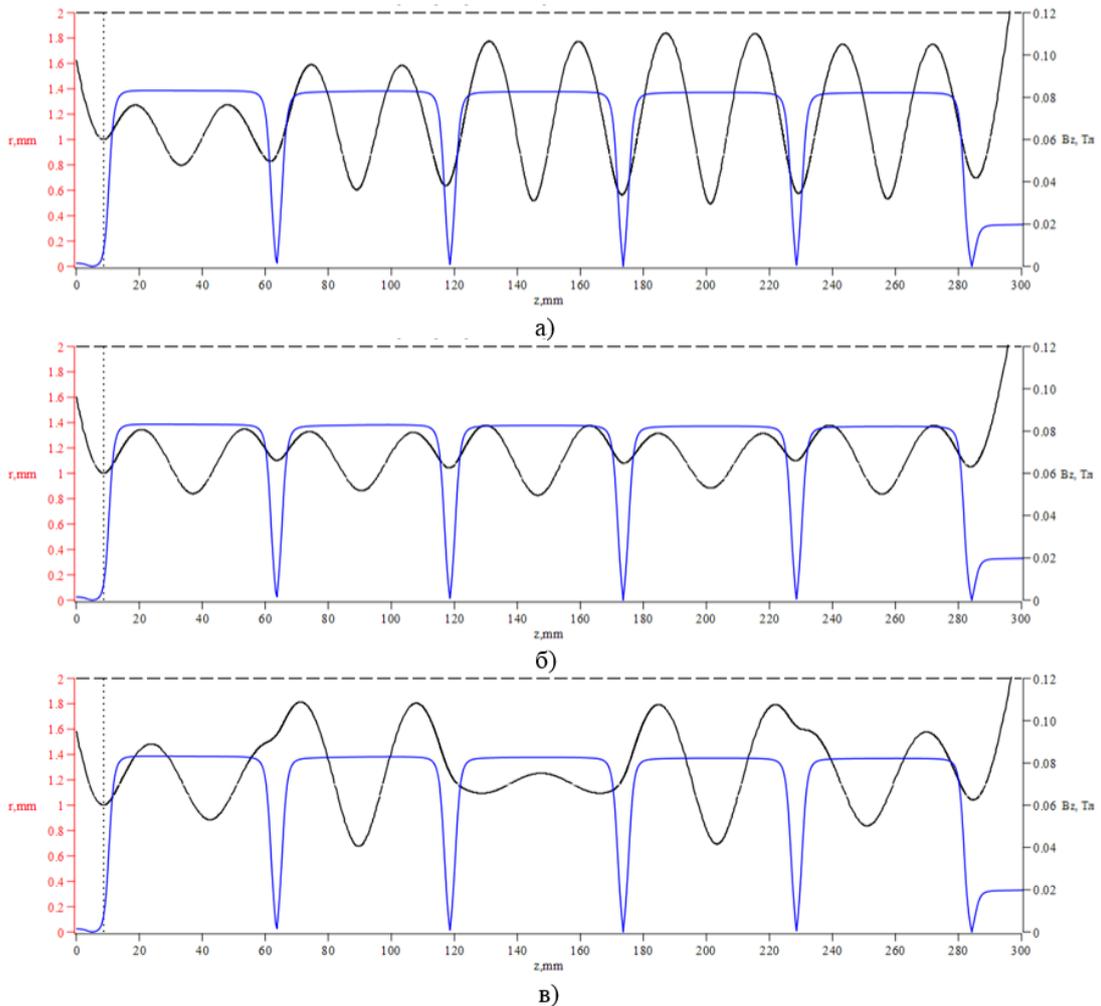


Рисунок 5. Огибающие электронного потока в магнитном поле модернизированной МРФС: а) – $U=8,4$ кВ, б) – $U=10$ кВ (номинальное напряжение), в) – $U=12,5$ кВ.

Параметр магнитного поля для модернизированной МРФС составил 2,3, при этом зона прохождения электронного потока увеличилась на 28 % по сравнению с изначальной системой. В то же время уровень пульсаций электронного потока в рабочем диапазоне напряжений 9 – 11 кВ не превысил 30 %.

4. Заключение

Предложена модернизация магнитной системы многолучевого клистрона, обеспечивающая более качественную транспортировку электронного потока при минимальных изменениях электродинамической системы изделия. Получено увеличение рабочего диапазона напряжений на 28 %, а также достигнуто уменьшение уровня пульсаций электронного потока на 30 % по сравнению с оригинальной системой.

Список литературы

1. Д.А. Комаров и др. Увеличение зоны устойчивой фокусировки электронного потока в мощном многолучевом клистроне //Электроника и микроэлектроника СВЧ. Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – 2023. –С. 286 -290.
2. И.В. Алямовский Электронные пучки и электронные пушки. – Сов. радио, 1965.