

**Дармаев А.Н.<sup>1</sup>, Ефремова М.В.<sup>2</sup>, Комаров Д.А.<sup>1,3</sup>,  
Кравченко М.А.<sup>1,3</sup>, Морев С.П.<sup>1,3</sup>, Муравьев Э.К.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>АО НПП «Торий»

<sup>2</sup>АО НПП «Плутон»

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## **Особенности проектирования электрооптической системы мощного вакуумного СВЧ прибора миллиметрового диапазона с периодической (МПФС, реверс) магнитной системой**

*Рассмотрены теоретические и практические вопросы разработки электронно-оптических систем мощных вакуумных СВЧ приборов О-типа с фокусировкой интенсивного электронного потока знакопеременным магнитным фокусирующим полем при продвижении в область миллиметрового диапазона. В приближении магнитостатического потенциала найдены аналитические выражения для продольной и радиальной компонент индукции магнитного поля в ячейках магнитной системы с кольцевой вставкой или полюсными наконечниками Т-образной формы при отношении внутренних диаметров полюсных наконечников и вставок, существенно отличающихся от единицы.*

**Ключевые слова:** Мощные вакуумные СВЧ приборы, клистроны, ЛБВ, реверсные магнитные фокусирующие системы, МПФС.

При создании мощного вакуумного СВЧ прибора в миллиметровом диапазоне из-за большой величины магнитного поля, требуемого для фокусировки интенсивного электронного потока, зачастую приходится применять знакопеременное с большим периодом распределение продольной компоненты индукции магнитного поля. Для обеспечения минимальных пульсаций электронного потока в области транспортировки к структуре магнитного поля, также, как и для обычной синусоидальной МПФС с малым периодом, предъявляются повышенные требования.

При всех достоинствах (по сравнению с системами фокусировки однородным полем) фокусировка с помощью знакопеременного магнитного поля обладает одним весьма неприятным свойством. При определенных значениях амплитуд магнитного поля, длин периодов МПФС и напряжений на замедляющей системе, составляющих так называемый параметр магнитного поля  $\alpha$ , амплитуда пульсаций пучка может неограниченно возрастать по мере его продвижения вдоль оси пролетного канала, что, в свою очередь, приводит к оседанию существенной части электронного потока на элементы замедляющей системы [1]. Для ЛБВ сантиметрового диапазона, использующих в качестве замедляющей системы (ЗС) цепочку связанных резонаторов (ЦСР), часто применяют совмещенные МПФС, в которых полюсные наконечники пространственно совмещены с элементами ЗС. В этом случае период МПФС определяется требуемыми электродинамическими характеристиками ЗС и, по сути, является заданным. При высоких значениях фокусирующего магнитного поля, необходимых для фокусировки интенсивных электронных потоков, в особенности при переходе в коротковолновую часть СВЧ диапазона, вследствие миниатюризации ЗС, период МПФС становится кратным периоду ЗС, и величина параметра  $\alpha$  может стать близкой к критическим значениям, при которых наблюдается неустойчивая фокусировка.

За счет ввода в распределение осевой компоненты индукции магнитного поля высших гармонических составляющих (ВГС) удается сдвинуть область параметрического резонанса в сторону более высоких значений параметров магнитного поля [2,3]. Однако конструкции МПФС с требуемым спектром гармоник в распределении магнитного поля, зачастую находятся в результате трудоемкого перебора (экспериментального или расчетного) геометрических размеров магнитов и наконечников.

Исследованное в [4] влияние гармонического состава распределения магнитного поля на устойчивость фокусировки пучка при повышенных значениях параметра магнитного поля  $\alpha$ , позволило сформулировать требования, накладываемые на амплитуды высших гармонических составляющих, при которых зоны устойчивой фокусировки смещаются в сторону больших значений параметра магнитного поля  $\alpha$ .

В работе [4,5] найдены приближенные аналитические выражения для гармоник магнитного поля, формируемого бесконечной МПФС с одинаково намагниченными магнитами для МПФС с магнитомягкими вставками, внутренний диаметр отверстий в которых равен диаметру отверстий в наконечниках. В качестве неоднородностей в реверсных фокусирующих системах могут быть применены, в частности, магнитомягкие кольца. Магнитомягкие кольца (или вставки) осуществляют необходимую коррекцию структуры магнитного поля, выравнивая исходный профиль магнитного поля или создавая требуемый спад поля на необходимой длине. За счет применения Т-образных полюсных наконечников, можно регулировать профиль нарастания или спада продольной компоненты индукции магнитного поля.

В представленной работе предложено приближенное аналитическое решение задачи о нахождении знакопеременного распределения магнитного поля с магнитомягкими вставками, внутренний диаметр отверстий в которых существенно отличается от диаметра отверстий в наконечниках. Проведено исследование устойчивости фокусировки электронного потока при повышенных значениях параметра магнитного поля в предложенной конструкции МПФС.

Для бесконечной МПФС с симметричным расположении относительно полюсных наконечников магнитомягкой вставки схематическое изображение ячейки представлено на рис.1. Решение задачи о нахождении (в приближениях [5]) распределения продольной и радиальной компоненты индукции магнитного поля  $B_z(r,z)$ , сводится к решению уравнения Лапласа для магнитного скалярного потенциала в приосевой области, ограниченной полюсными наконечниками МПФС и магнитомягкой вставкой.

Распределение продольной и радиальной компоненты индукции магнитного поля  $B_z(r,z)$  и  $B_r(r,z)$  имеет следующий вид

$$B_z(r, z) = B_0 \sum_k \frac{k(1 - (-1)^k)}{1 - (k\xi)^2} \cos\left(\frac{k\pi\xi}{2}\right) \frac{I_0\left(\frac{2\pi kr}{L}\right)}{I_0\left(\frac{2\pi kr_{\text{вст}}}{L}\right)} \sin\left(\frac{2\pi kz}{L}\right)$$

$$B_r(r, z) = B_0 \sum_k \frac{k(-1)^k}{1 - (k\xi)^2} \cos\left(\frac{k\pi\xi}{2}\right) \frac{I_1\left(\frac{2\pi kr}{L}\right)}{I_0\left(\frac{2\pi kr_{\text{вст}}}{L}\right)} \cos\left(\frac{2\pi kz}{L}\right)$$

где  $\xi = (1 - 4b/L)$ ;  $2b$  – толщина вставки;  $L$  – период МПФС;  $I_0(x)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода.

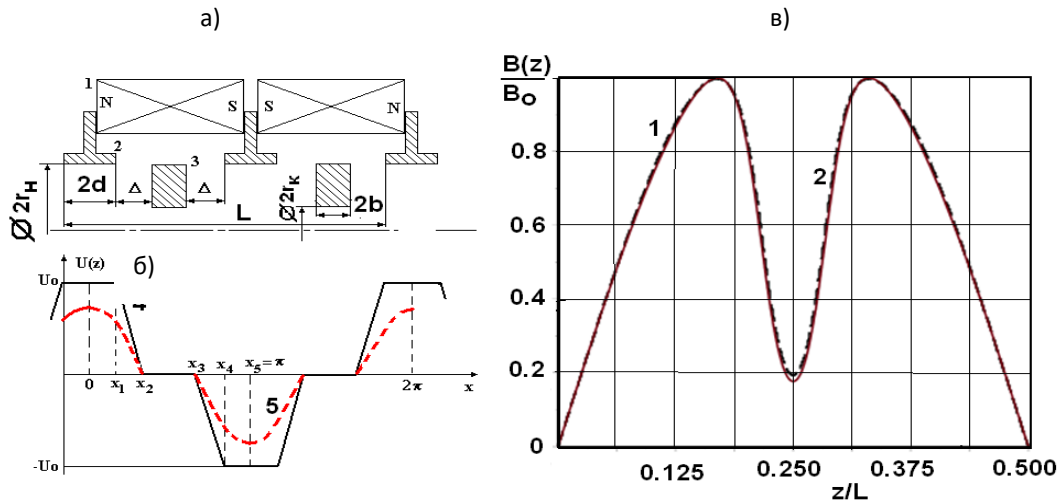


Рис.1. а – ячейка МПФС (а), б – распределения скалярного магнитного потенциала  $U(x)$  на границе области, ограниченной внутренним радиусом наконечника  $r_{\text{нак}}$  (4) и радиусом канала  $r_{\text{кан}}$  (5) соответственно, в – распределение продольной компоненты индукции магнитного поля на оси МПФС (1- аналитическое решение, 2 – численный расчет по строгой модели):  $x_1=\pi/2-2\pi b/L-2\pi\Delta/L$ ,  $x_2=\pi/2-2\pi b/L$ ,  $x_3=\pi/2+2\pi b/L$ ,  $x_4=\pi/2+2\pi b/L+2\pi\Delta/L$ ,  $x_5=\pi$ ; 1 – магниты, 2 – полюсные наконечники, 3 – магнитомягкая вставка

Результаты сопоставления аналитического и численного расчета, полученного на основании строгих моделей распределений продольной компоненты индукции магнитного поля на оси МПФС, представлены на рис. 1в для следующих параметров  $2d=1,9$  мм;  $2b=0,85$  мм;  $\Delta=1,725$  мм;  $L=12,4$  мм;  $r_{\text{нак}}=2,0$  мм;  $r_{\text{кан}}=0,45$  мм.

Амплитуды первых семи пространственных гармоник спектрального состава полученного распределения имели следующие величины:  $b_1=0,886$ ;  $b_3=0,303$ ;  $b_5=-0,198$ ;  $b_7=0,121$ ;  $b_9=-0,064$ ;  $b_{11}=0,028$ ;  $b_{13}=-0,008$ .

На рис. 2 представлены результаты расчетов ближайшей зоны неустойчивой фокусировки пучка в зависимости от величины параметра магнитного поля  $\alpha$ . Следует отметить, что при значениях  $\alpha > 3.2$  начинается «зона непропускания» для любого электрона пучка.

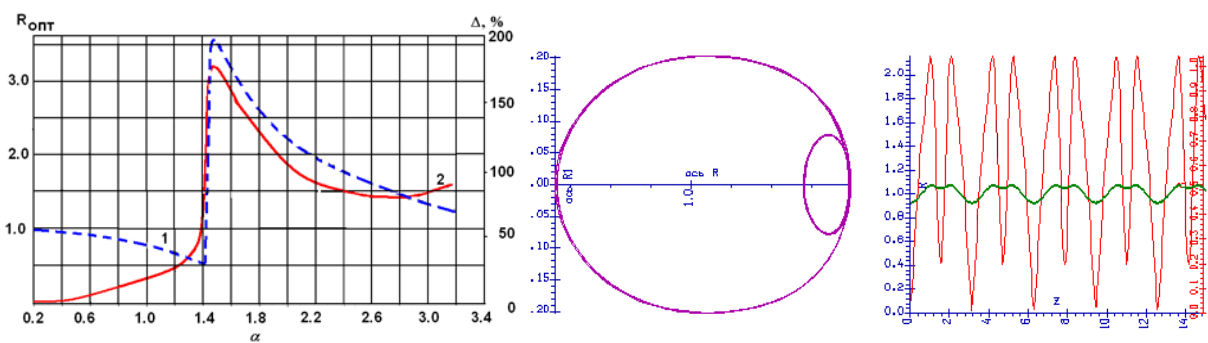


Рис.2. Фокусировка электронного потока в МПФС с магнитомягкой вставкой а) – зависимость оптимального входного радиуса пучка  $R$  (1) и относительной амплитуды пульсаций  $\Delta$  (2) от параметра магнитного поля  $\alpha$ , б) – фазовый портрет и контур пучка в МПФС  $\alpha=\beta r=0,5$ ;  $R_{\text{опт}}=0,932$

Как следует из анализа результатов, представленных на рис. 2, выбранная структура ВГС в распределении магнитного поля смещает зону неустойчивой фокусировки в сторону более высоких значений параметра магнитного поля, хотя и в меньшей степени, чем при оптимальном соотношении ВГС для МПФС со вставкой [4].

В качестве примера использования рассмотренной МПФС был проведен тестовый расчет ЭОС.

Представлено также приближенное аналитическое решение уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала  $U(r,z)$  в аксиально-симметричной области [1-3] реверсной МФС ( $0 < r < r_0$ ), из радиально намагниченных магнитов, полюсных наконечников в виде дисков с отверстиями диаметром  $2r_0$  и кольцевых вставки, внутренний диаметр  $2R$  которых больше внутреннего диаметра полюсных наконечников ( $R > r_0$ ). Кроме того, рассмотрено также аналогичное решение для МФС, в которой полюсные наконечники выполнены в виде Т-образной формы (рис.3).

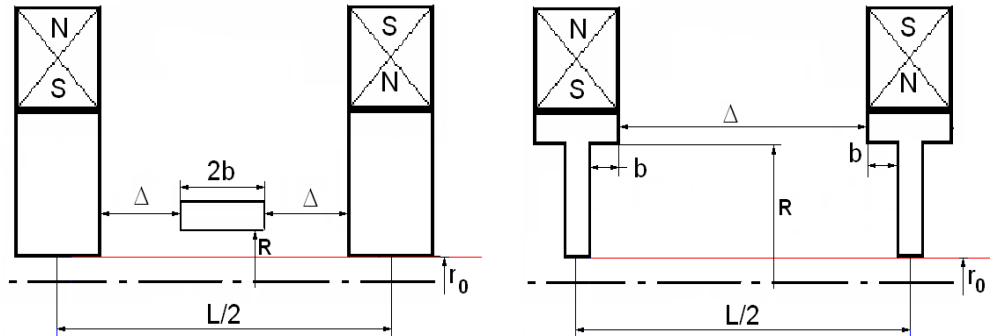


Рис. 3. МФС с кольцевой вставкой (а) и с Т-образными полюсными наконечниками

Для МФС с кольцевой вставкой получено приближенное аналитическое выражение для продольной и радиальной компонент индукции магнитного поля  $B_z(r,z)$  в виде:

$$B_z(r,z) = -\frac{16U_0}{L} \sum_k \frac{\sin \frac{k\pi}{2}}{k} \left[ \frac{1-U_2}{\alpha} \sin \frac{k\alpha}{2} \cos \frac{k(\alpha+2\beta)}{2} + \frac{U_2}{2\beta} \sin k\beta \right] \frac{I_0\left(\frac{2\pi k}{L}r\right)}{I_0\left(\frac{2\pi k}{L}r_0\right)} \sin\left(\frac{2\pi k}{L}z\right),$$

$$B_r(r,z) = -\frac{16U_0}{L} \sum_k \frac{\sin \frac{k\pi}{2}}{k} \left[ \frac{1-U_2}{\alpha} \sin \frac{k\alpha}{2} \cos \frac{k(\alpha+2\beta)}{2} + \frac{U_2}{2\beta} \sin k\beta \right] \frac{I_1\left(\frac{2\pi k}{L}r\right)}{I_0\left(\frac{2\pi k}{L}r_0\right)} \cos\left(\frac{2\pi k}{L}z\right),$$

где  $I_0(x)$ ,  $K_0(x)$ ,  $I_1(x)$ ,  $K_1(x)$  – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого и первого порядка. При  $r_0=R$  формула (1) переходит в известное выражение для распределения магнитного поля в МПФС с полюсными наконечниками и кольцевой вставкой.

Для МФС с Т-образными наконечниками соответствующие формулы имеют следующий вид:

$$B_z(r,z) = -\frac{16U_0}{L} \sum_k \frac{\sin \frac{k\pi}{2}}{k} \left[ \frac{1-U_2}{\beta} \sin \frac{k\beta}{2} \cos \frac{k(\alpha+2\beta)}{2} + \frac{U_2}{\alpha} \sin \frac{k\alpha}{2} \right] \frac{I_0\left(\frac{2\pi k}{L}r\right)}{I_0\left(\frac{2\pi k}{L}r_0\right)} \sin\left(\frac{2\pi k}{L}z\right),$$

$$B_r(r,z) = -\frac{16U_0}{L} \sum_k \frac{\sin \frac{k\pi}{2}}{k} \left[ \frac{1-U_2}{\beta} \sin \frac{k\beta}{2} \cos \frac{k(\alpha+2\beta)}{2} + \frac{U_2}{\alpha} \sin \frac{k\alpha}{2} \right] \frac{I_1\left(\frac{2\pi k}{L}r\right)}{I_0\left(\frac{2\pi k}{L}r_0\right)} \cos\left(\frac{2\pi k}{L}z\right)$$

$$U_2 = U_0 \frac{\beta(1-\varphi(r_0,R))}{\alpha+\beta}, \quad \varphi(r_0,R) \Rightarrow \begin{cases} 0, R \rightarrow \infty \\ 1, r_0 = R \end{cases}$$

На рис. 4а представлены распределения структуры индукции магнитного поля для продольной и радиальной компоненты в МФС с кольцевой вставкой, а на рис 4б

соответствующие распределения для МФС с Т-образными полюсными наконечниками. При  $r_0=R$  формула (2) переходит в известное выражение для распределения магнитного поля в МПФС с полюсными наконечниками и кольцевой вставкой.

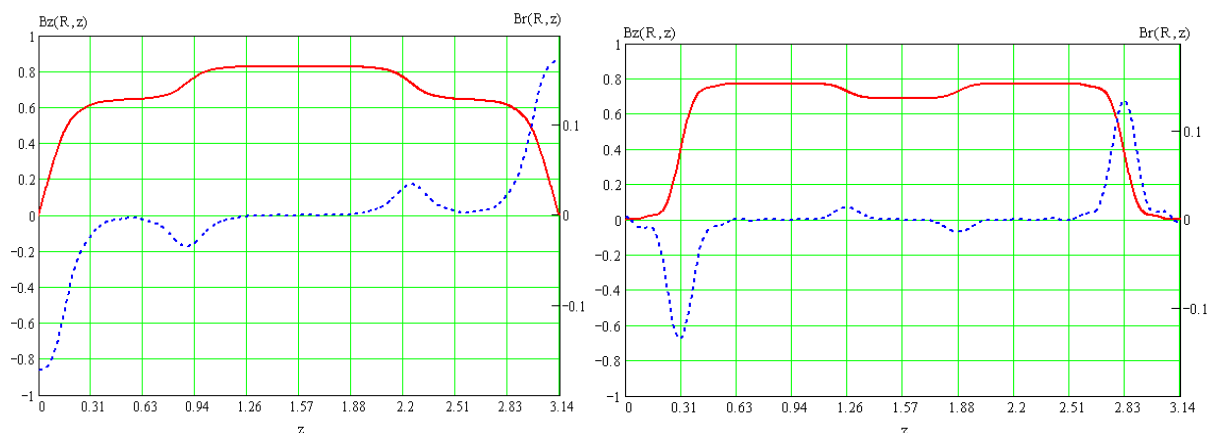


Рис. 4. Структура распределений продольной (1) и радиальной (2) компонент индукции магнитного поля в ячейке реверсной МФС с размера а)  $L/2= 58$  мм,  $\Delta=25$  мм,  $2b= 30$  мм,  $r_0=4$  мм,  $R=50$  мм; б)  $L/2= 100$  мм,  $\Delta=30$  мм,  $2b= 20$  мм,  $r_0=4$  мм,  $R=65$  мм.

В качестве примера использования реверсной МФС со вставками был проведен тестовый расчет ЭОС.

#### Библиографический список

1. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М., 1966.-456с.
2. Данович И.А. Анализ фокусировки и устойчивости интенсивных электронных пучков в периодических магнитных полях /Изв. Вузов. Сер. Радиофизика, 1966, т.9, вып. 2, с. 351-361.
3. Кивокурцев А.Ю., Морев С.П., Юдин Г.Ю. Транспортировка многоскоростных электронных потоков в высших полосах пропускания МПФС, как один из способов подавления динамической расфокусировки в ЭВП О – типа/ Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-98/ Материалы международной научно-технической конференции, 1998, т.3, с.84
4. Дармаев А. Н., Морев С. П. Повышение параметра магнитного поля в фокусирующих системах с негармоническим распределением магнитного поля/Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006. Материалы международной научно-технической конференции, Саратов, 2006, С. 382-389.
5. Дармаев А. Н., Морев С. П. Приближенная оценка величин высших гармонических составляющих распределения магнитного поля в МПФС с магнитомягкими вставками/ Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006/ Материалы международной научно-технической конференции, Саратов, 2006, С. 375-381