

## **Фокусировка электронных потоков в МПФС с внутренним диаметром отверстий полюсных наконечников больше диаметра отверстия магнитомягких вставок**

*Рассмотрены теоретические и практические вопросы разработки электронно-оптических систем мощных вакуумных приборов О-типа миллиметровый диапазон с МПФС. Найдены аналитические выражения для продольной и радиальной компонент индукции магнитного поля в ячейках МПФС с магнитомягкими вставками, внутренний диаметр отверстий которых меньше диаметра отверстий в полюсных наконечниках. Исследована устойчивость фокусировки электронного потока в рассмотренных МПФС с одной, двумя и тремя вставками. Приведен пример расчета согласования электронного потока в мощной ЛБВ миллиметрового диапазона с МПФС, концевая ячейка которой содержит магнитомягкую вставку.*

**Ключевые слова:** Мощные вакуумные СВЧ приборы, ЛБВ, МПФС, устойчивость фокусировки.

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 распределение продольной компоненты индукции магнитного поля с большим периодом. 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 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, 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, полюсные наконечники вблизи оси МПФС могут насыщаться и фронты нарастания магнитного поля становятся пологими. Вследствие этого, 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) при отношении внутренних диаметров отверстий в полюсных наконечниках и вставках, равных

единице удастся сдвинуть область параметрического резонанса в сторону более высоких значений параметров магнитного поля [2]. 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.

В работе [3] 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 представленной работе предложено приближенное аналитическое решение задачи о нахождении знакопеременного распределения магнитного поля с магнитомягкими вставками, внутренний диаметр отверстий в которых существенно меньше диаметра отверстий в наконечниках.

Проведено исследование устойчивости фокусировки электронного потока при повышенных значениях параметра магнитного поля в предложенной конструкции МПФС.

### 1. Распределение магнитного поля в регулярной части МПФС с произвольным количеством магнитомягких вставок

Была рассмотрена бесконечная МПФС, схематическое изображение которой представлено на рис.1

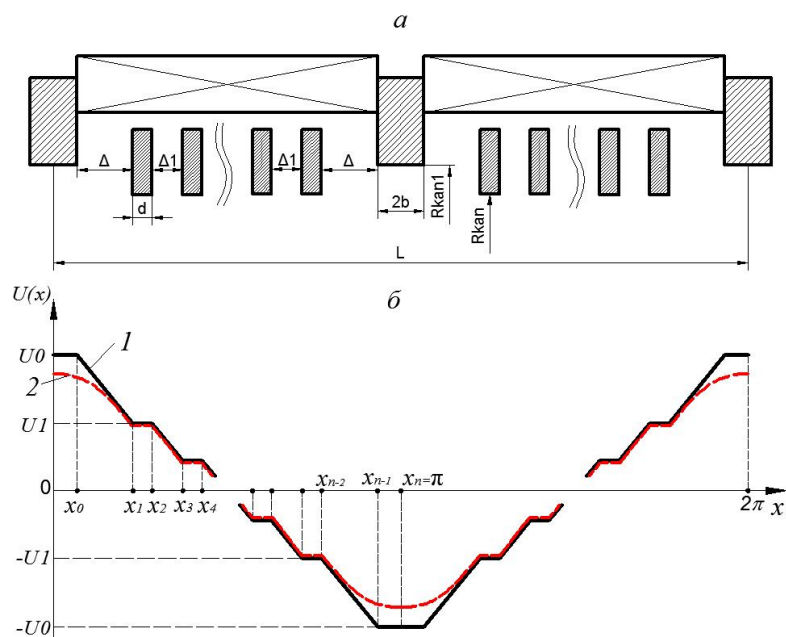


Рис.1. Ячейка МПФС с произвольным количеством вставок (а) и распределение магнитостатического потенциала  $U(x)$  на границе области (б).

1 –  $R=R_{kan1}$ , 2 –  $R=R_{kan}$

Для нахождения распределения магнитного поля в приосевой области МПФС, так же как и для случая МПФС с одной вставкой [4], рассматриваются три связанные области, а именно: две кольцевые с периодом  $L_1=2(2b+2\Delta_1)$  в промежутках от 0 до  $x_1$  и от  $x_{n-2}$  до  $x_n$  и цилиндрическая область с периодом  $L=2(2b+2\Delta_1+Nd+(N-1)\Delta)$ .

Распределение магнитного скалярного потенциала на границе цилиндрической области радиусом  $R_k$  (кривая 2 на рис.1б):

$$f(x) = \begin{cases} U_k(x) & 0 < x < x_1 \\ U_1 & x_1 < x < x_2 \\ U_1 - \Delta U_1 \frac{x - x_2}{x_3 - x_2} & x_2 < x < x_3 \\ U_1 - \Delta U_1 & x_3 < x < x_4 \\ U_1 - (k-2)\Delta U_1 - \Delta U_1 \frac{x - x_{2k-2}}{x_{2k-1} - x_{2k-2}} & x_{2k-2} < x < x_{2k-1} \\ U_1 - (k-1)\Delta U_1 & x_{2k-1} < x < x_{2k} \\ \dots & \dots \\ -U_1 & x_{n-3} < x < x_{n-2} \\ U_k^*(x) & x_{n-2} < x < x_n \end{cases}$$

где  $\Delta U_1 = 2U_1/(N-1)$  – разность потенциалов между вставками,  $N$  – количество вставок,  $k$  – порядковый номер вставки.

Разность потенциалов между полюсным наконечником и вставкой можно определить по формуле  $\Delta U_0 = (\Delta U_1 \cdot \Delta)/\Delta_1$ , тогда  $U_0 = U_1 + \Delta U_0$ .

Распределения продольной и радиальной компоненты индукции магнитного поля имеют следующий вид:

$$B_z(r, z) = \sum_n \left\{ A_n + \sin\left(\frac{n\pi(Nd + (N-1)\Delta_1)}{L}\right) \sum_k A_k \left( \frac{\cos\left(\frac{\pi[k-n]}{2}\right)}{\gamma_1 k - \gamma} + \frac{-\cos\left(\frac{\pi[k+n]}{2}\right)}{\gamma_1 k + \gamma} \right) \right\} \sin(\gamma z) \frac{I_0(\gamma r)}{I_0(\gamma R_k)}$$

$$B_r(r, z) = \sum_n \left\{ A_n + \sin\left(\frac{n\pi(Nd + (N-1)\Delta_1)}{L}\right) \sum_k A_k \left( \frac{\cos\left(\frac{\pi[k-n]}{2}\right)}{\gamma_1 k - \gamma} + \frac{-\cos\left(\frac{\pi[k+n]}{2}\right)}{\gamma_1 k + \gamma} \right) \right\} \cos(\gamma z) \frac{I_1(\gamma r)}{I_0(\gamma R_k)}$$

$$A_n = \frac{8U_1}{\Delta_1 \cdot \pi(N-1)} \sin\left(\frac{\pi n \Delta_1}{L}\right) \sum_{m=2}^N \sin\left(\frac{\pi m}{L} (b + 2\Delta + (2m-2)d + (2m-3)\Delta_1)\right)$$

$$A_k = \frac{64n \cdot \Delta U_0 (b/2 + \Delta)}{L^2 k^2 \Delta \pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) \sin(\gamma_1 k \Delta) \frac{C1 \cdot I_0(\gamma_1 k R_k) + C2 \cdot K_0(\gamma_1 k R_k)}{C1 \cdot I_0(\gamma_1 k R_{k1}) + C2 \cdot K_0(\gamma_1 k R_{k1})}$$

На рис. 2 представлены структуры осевых компонент индукции магнитного поля для случаев с одной, двумя и тремя вставками для случаев, когда расстояния между вставкой и полюсным наконечником  $\Delta$  и между вставками  $\Delta_1$  одинаково, а параметры  $2d=1.9$  мм,  $2b=0.85$  мм,  $\Delta=1.725$  мм,  $R_{нак1}=2.0$  мм,  $R_{кан}=0.45$  мм. При расположении между полюсными наконечниками одной вставки период МПФС оказывается равным  $L=12.4$  мм, двух вставок –  $L=17.55$  мм, и трех вставок –  $L=22.7$  мм.

Для случая с одной вставкой амплитуды первых семи пространственных гармоник спектрального состава полученного распределения имели следующие величины:  $b_1=0,871$ ;  $b_3=0,292$ ;  $b_5=-0,201$ ;  $b_7=0$ ;  $b_9=-0,063$ ;  $b_{11}=0,027$ ;  $b_{13}=-0,008$ .

Для двух вставок амплитуды первых семи пространственных гармоник спектрального состава полученного распределения имели следующие величины:  $b_1=0,749$ ;  $b_3=0,133$ ;  $b_5=0,201$ ;  $b_7=-0,226$ ;  $b_9=0,083$ ;  $b_{11}=0,037$ ;  $b_{13}=-0,065$ .

Для трех вставок амплитуды первых семи пространственных гармоник спектрального состава полученного распределения имели следующие величины:  $b_1=0,795$ ;  $b_3=0,154$ ;  $b_5=0,107$ ;  $b_7=0,178$ ;  $b_9=-0,269$ ;  $b_{11}=0,071$ ;  $b_{13}=-0,046$ .

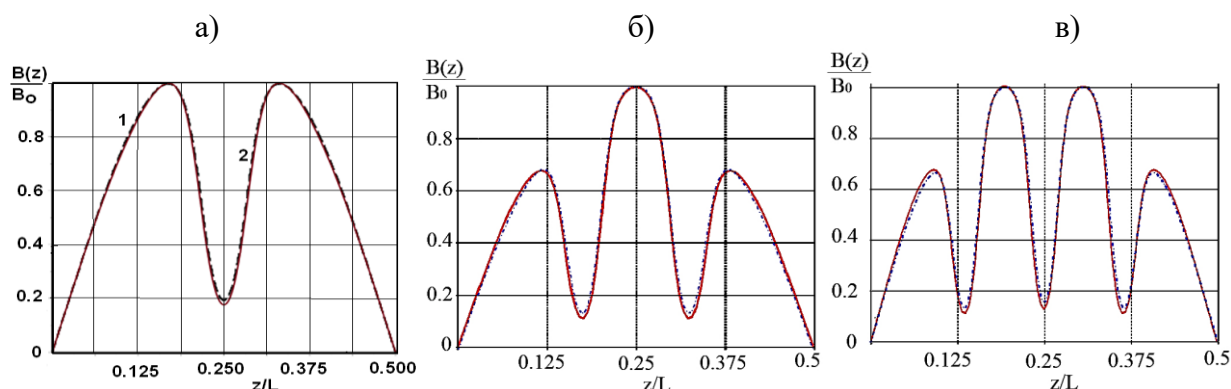


Рис.2. Распределения продольной компоненты индукции магнитного поля на оси МПФС с одной (а), двумя (б) и тремя (в) магнитомягкими вставками (1- аналитическое решение, 2 – численный расчет по строгой модели).

## 2. Устойчивость транспортировки интенсивного электронного потока в регулярной части МПФС с произвольным количеством магнитомягких вставок

Устойчивость фокусировки электронного потока, как и в [3], проводилась на основе параксиального уравнения для граничного электрона.

На рис. 3 представлены результаты расчетов ближайших зон неустойчивой фокусировки пучка в зависимости от величины параметра магнитного поля  $\alpha$  для выбранных структур магнитного поля с одной, двумя и тремя вставками.

Следует отметить, что для случая с одной вставкой, при значениях  $\alpha > 3.2$  начинается «зона непропускания» для любого электрона пучка.

Как следует из анализа результатов, представленных на рис. 3, 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 [3].

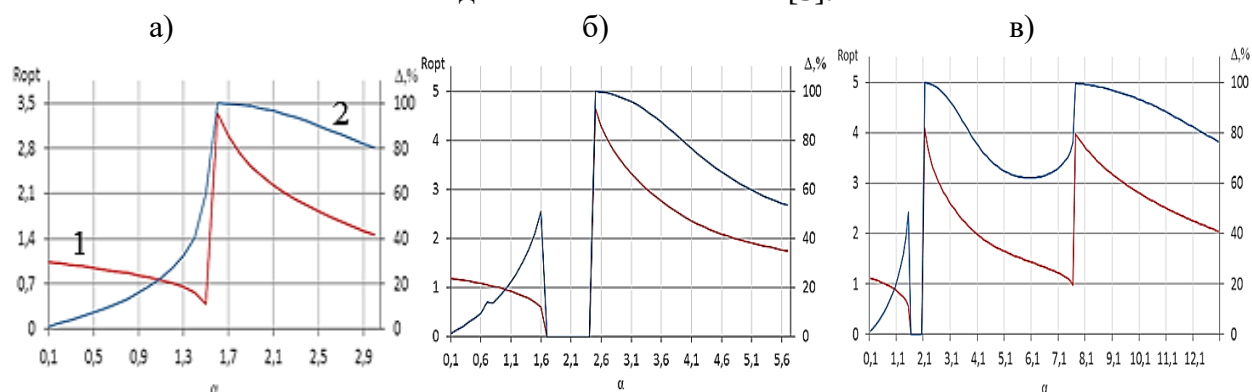


Рис.3. Зависимость оптимального входного радиуса пучка R (1) и относительной амплитуды пульсаций  $\Delta$  (2) от параметра магнитного поля  $\alpha$  для одной (а), двух (б) и трех вставок

В качестве примера использования МПФС с одной вставкой (рис.4) был проведен тестовый расчет ЭОС в параксиальном приближении, причем конечная ячейка МПФС,

формирующая переходную область магнитного поля, содержала магнитомягкую вставку [4], а также численный расчет в двумерном приближении на основе метода крупных частиц.

Параметры ЭОС

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| Ток пучка, мА                       | 570,0 |
| Ускоряющее напряжение, В            | 18000 |
| Микропервеанс, мкА/В <sup>3/2</sup> | 0,236 |
| Диаметр катода, мм                  | 3,75  |
| Диаметр канала, мм                  | 0,9   |

Параметры МФС

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| Амплитуда поля на оси, Гс | 4500  |
| Период МПФС, мм           | 12,4  |
| Параметр магнитного поля  | 0,482 |

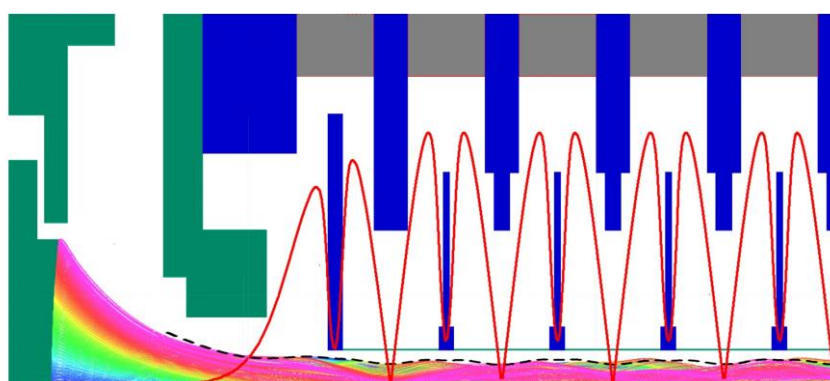


Рис.4. Распределение магнитного поля в МПФС с магнитомягкой вставкой и траектории потока в пролетном канале ЭОС:  
----- параксиальное приближение

#### Библиографический список

1. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М., 1966.-456с.
2. 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
3. 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.
4. Ефремова М.В., Морев С.П. Приближенное решение уравнения Лапласа для нахождения распределения магнитного поля в концевых ячейках МПФС с магнитомягкими вставками/Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы СВЧ электроники им. В.А.Солнцева», Москва, 2017 г. с. 34-35