

УДК 303.732

DOI: 10.22213/2410-9304-2026-1-70-77

Исследование влияния одновременно двух геометрических параметров фокусирующей системы на зоны устойчивости электронного пучка

А. А. Швачко, кандидат технических наук, доцент, СГТУ имени Гагарина Ю. А.,
Саратов, Россия

Стремление к уменьшению габаритных параметров сверхвысокочастотных приборов, вызванное увеличением рабочей частоты и уменьшением массы авиационного оборудования, приводит к необходимости учета возможного отклонения от расчетных параметров элементов прибора. Подобные отклонения параметров могут быть вызваны технологическими особенностями производства, учитывать которые при конструировании становится все более необходимо. Статья посвящена поиску закономерностей влияния геометрических параметров постоянных магнитов на величины, определяющие качество фокусировки электронного потока, с точки зрения возникновения технологических отклонений. В статье анализируется распределение магнитного поля в кольцевых и призматических магнитах с различными параметрами геометрии с использованием численного моделирования для оптимизации условий транспорта интенсивных электронных потоков. В работе представлены графики полей для магнитов различных конфигураций, демонстрирующие переход от неравномерных профилей к гармоничным распределениям. Рассматривается важность учета технологических отклонений в процессе проектирования и изготовления магнитных систем, поскольку даже небольшие изменения геометрических параметров могут существенно повлиять на выходные характеристики устройства. Проведен анализ одновременно влияния ряда геометрических параметров на величины магнитного поля и магнитного коэффициента. В качестве инструмента анализа величины возможных последствий одновременных отклонений двух геометрических параметров предложено использовать трехмерные графики. Для анализируемой системы были найдены оптимальные области значений параметров. Методика позволяет находить неявные оптимальные сочетания параметров магнитов: толщина 25 мм, внутренний диаметр 20 мм, внешний диаметр 33 мм.

Ключевые слова: магнитное поле, постоянные магниты, геометрические параметры, магнитный коэффициент, электровакуумные приборы, фокусировка электронного пучка, технологические отклонения, устойчивость пучка, численное моделирование.

Введение

Требования, которые приходится учитывать при проектировании электровакуумных приборов усложняются из-за стремления увеличить рабочую частоту, что выливается в сокращение габаритных размеров. Кроме того, уменьшение геометрических размеров параметров сверхвысокочастотных приборов (СВЧ) обусловлено необходимостью снижения массы устройства из-за специфики их применения.

Технологические отклонения представляют собой расхождения с номинальными значениями геометрии кольцевого магнита, указанными в чертежах, и возникающие из-за недостатков в производственном процес-

се. Чем меньше размеры элементов прибора, тем тщательнее нужно анализировать влияние всех отклонений от эталонных параметров. В ситуации производства изделий с малыми габаритными размерами особую важность приобретает их точное соблюдение, поскольку любое отклонение неизбежно существенно скажется на общих выходных характеристиках системы.

Существует ряд работ [1, 2], в которых авторы анализируют процесс сохранения формы электронного пучка. При этом в качестве основного параметра является параметр магнитного поля α без привязки к геометрическим параметрам постоянных магнитов.

Коллектив исследователей из Китая работает над вопросом обеспечения стабильности фокусировки многолучевых систем. В частности, авторы рассматривают множество факторов: форма полюсных наконечников, возможности ошибок при сборке [3].

Оценивать параметры магнитных систем необходимо не только с точки зрения снижения факторов расфокусировки электронного пучка, но и с целью поиска оптимальных параметров магнитных систем. Так, существует работа, где авторы предлагают оптимизацию параметров системы относительно скорости флуктуации пучка [4].

Помимо аксиально симметричных электронных пучков, устойчивость исследуют и для ленточных и эллиптических электронных пучков, задача конструирования стабильных электровакуумных систем является не менее перспективной [5–7].

Целью статьи является анализ возможных последствий технологических отклонений и поиск областей геометрических параметров с минимальным воздействием на параметры магнитной системы через анализ соответственного изменения индукции магнитного поля на оси магнита и магнитного коэффициента электровакуумного прибора.

Математическая модель

Магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС) представляет собой ряд последовательно установленных кольцевых магнитов с меняющимся, согласно заложенному периоду, магнитным полем. Между магнитами устанавливаются полюсные наконечники, задача которых обеспечивать необходимый период магнитного поля, а также концентрировать его величину в зазоре. Магнитное поле в геометрическом центре отдельного кольцевого магнита оценивается согласно формуле [8]:

$$B = \mu_0 ML \left(\frac{1}{\sqrt{L^2 + d^2}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + D^2}} \right), \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; M – величина намагниченности магнита; L – толщина магнита; d – внутренний диаметр магнита; D – внешний диаметр магнита.

Основной проблемой при попытке анализа с целью поиска наиболее оптимального

сочетания геометрии магнита к величине магнитного поля B является сложность функции, обусловленной одновременно тремя переменными (толщины L , внутреннего и внешнего диаметров d и D). Следовательно, на первом этапе необходимо сократить количество таких переменных. Введем переменную k , которая зафиксирует отношение внутреннего и внешнего диаметров как $k = d/D$. В результате новая переменная будет находиться в диапазоне от 0 до 1. Выразим внешний диаметр через внутренний как $D = d/k$.

В результате замены выражение (1) примет вид:

$$B = \mu_0 ML \left(\frac{1}{\sqrt{L^2 + d^2}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + \left(\frac{d}{k}\right)^2}} \right). \quad (2)$$

В качестве одного из базовых уравнений для конструирования приборов СВЧ-диапазона является уравнение граничной траектории электрона для ламинарного аксиального симметричного сплошного электронного пучка [9]:

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

где R – нормализованный радиус пучка, Z – нормализованная продольная координата; β_p – параметр пространственного заряда пучка в МПФС; K – параметр катодных условий; α – параметр магнитного поля.

Данное уравнение является частным случаем нелинейного дифференциального уравнения с периодическим коэффициентом уравнения Матье [10].

Помимо анализа зависимости величины магнитного поля от геометрических параметров для фокусирующих систем необходимо одновременно анализировать значения магнитного коэффициента α . Данный коэффициент численно показывает степень пульсаций электронного пучка, фокусируемого периодическим магнитным полем. Выражение для вычисления значения магнитного коэффициента имеет вид [11]:

$$\alpha = 2,810^8 \frac{B^2 T^2}{U}, \quad (3)$$

где B – величина магнитного поля магнита; T – период магнитного поля в магнитной системе; U – величина управляющего напряжения.

Этот параметр характеризует через свои значения зоны устойчивого пролета электронного пучка в электровакуумных приборах, области параметров системы, которые можно использовать для устойчивой и стабильной работы прибора. Существует несколько таких «зон пропускания», которые описываются значением $\alpha < 0,66$ для пер-

вой зоны пропускания и $1,72 < \alpha < 3,76$ для второй зоны пропускания [12]. Если не учитывать возможный выход параметра за указанные пределы, то электронный пучок может разрушиться в результате нарастающих пульсаций [13, 14].

Период магнитного поля в магнитной системе $T=2(L+t)$, где t – расстояние между магнитами в системе. Осуществим подстановку полученного выражения магнитного поля (2) в выражение (3), оно примет вид:

$$\alpha = 11,210^2 \mu_0^2 M^2 \left(\frac{1}{\sqrt{L^2 + d^2}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + \left(\frac{d}{k}\right)^2}} \right) \frac{(L^2 + tL)^2}{U}. \quad (4)$$

Ранее для анализа устойчивости электронного потока были выведены уравнения чувствительности магнитного поля к изменениям геометрических параметров постоянного магнита [15].

Полученные выражения (2) и (4) позволят осуществить графический анализ изменения магнитного поля и магнитного коэффициента через изменение всего двух параметров: толщины L и коэффициента k . Значение внутреннего диаметра в данном случае будет зафиксировано как константа.

Результаты

Существуют конструкции приборов СВЧ, в которых одним из главных определяющих параметров для фокусирующей системы является внутренний диаметр постоянных магнитов, который ограничивается геометрией замедляющей системы. В такой ситуации необходимую величину магнитного поля на оси системы приходится обеспечивать за счет внешнего диаметра и толщины магнитов.

Проанализируем влияние внешнего диаметра на величину магнитного поля на оси магнита через коэффициент k . В данном случае рассчитывалось изменение магнитного поля для кольцевого магнита с намагниченностью $M = 6,44 \cdot 10^5$ А/м², внутренним диаметром $d = 20$ мм и диапазоном толщины магнитов L от 0 до 30 мм. Величина внешнего диаметра изменялась через коэффициент k .

График зависимости магнитного поля от изменения коэффициента k приведен на рис. 1.

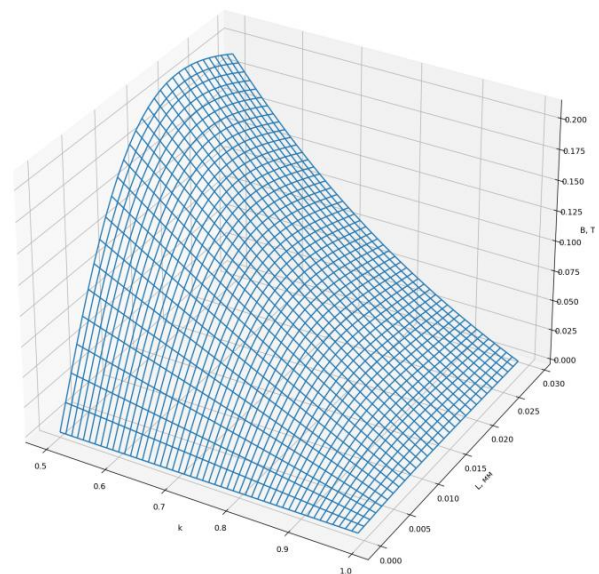


Рис. 1. Зависимость изменения магнитного поля B от коэффициента k и толщины L

Fig. 1. Dependence of the change in magnetic field B on the coefficient k and thickness L

Изменение величины магнитного поля от коэффициента k явно стремится к линейному характеру. Однако по мере изменения толщины магнита L меняется не только максимальная величина магнитного поля, но и сама зависимость B от k приобретает небольшую нелинейность в области $L = 30$ мм.

Изменение магнитного поля B от толщины имеет явно нелинейный, выпуклый характер, который очень сильно меняется в зависимости от коэффициента k . Так, в области малых толщин (5 мм) величина магнитного поля минимальна, а график имеет стремление к линейной зависимости. По мере увеличения толщины величина магнитного поля увеличивается, что прямо согласуется с теорией. Однако около значения $L=20$ мм график изменения магнитного поля приобретает явную точку перегиба и по мере увеличения толщины к 30 мм начинает снижаться. А сама зависимость получает стремление к формированию зоны «прогиба».

Так как зависимость имеет явную точку перегиба, то оптимальным будет работа со значениями геометрических параметров в области этого перегиба. С точки зрения «предсказуемости» изменения величины магнитного поля при технологических отклонениях наиболее удобной станут линейные участки зависимости, так как изменение геометрических параметров в обе стороны (увеличения или уменьшения) будут вызывать одинаковое изменение магнитного поля.

С точки зрения конструирования прибора необходимо оценить и соответствующее изменение величины магнитного коэффициента α , которое представлено на рис. 2.

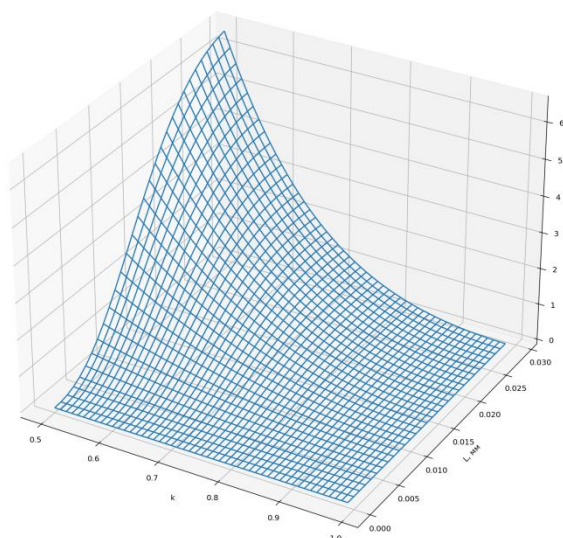


Рис. 2. Зависимость изменения магнитного поля α от коэффициента k и толщины L

Fig. 2. Dependence of the change in magnetic field α on the coefficient k and thickness L

Зависимость изменения коэффициента α также не линейна и имеет явный пик в области большого объема постоянного магнита: области толщины $L = 30$ мм и коэффициента $k = 0,5$. Данная область графика имеет высокую крутизну, что затрудняет ее использование, так как предсказуемость изменения параметров сильно пострадает ввиду большого изменения магнитного коэффициента α при изменении любого из геометрических параметров магнита. При этом необходимо отметить, что явной точки перегиба или максимума, в отличие от графика для магнитного поля, тут нет.

Наблюдается две явные области с минимальными значениями магнитного коэффициента α и крутизны графика: толщина магнита L до 5 мм и вся область значений коэффициента k ; значения коэффициента k от 0,8 до 1 и вся область значений толщины L . Работа в данных областях – одна из благоприятных зон устойчивой фокусировки, так как не происходит явного изменения магнитного параметра при изменении любого из геометрических параметров. Однако точный вывод о целесообразности работы в этих областях необходимо делать, совмещая данные с соответствующим графиком величины магнитного поля, так как вопрос: имеет ли достаточную величину магнитное поле для обеспечения фокусировки электронного пучка?

Если привязываться к значениям так называемых зон устойчивости, то первая зона устойчивости пролегает до значения магнитного коэффициента в 0,66. Так, в область, ограниченную этим значением, попадают все значения коэффициента k при толщине до 10 мм, а также все значения толщины магнита при значении коэффициента k от 0,75.

Область параметров, соответствующая второй зоне устойчивости (от 1,72 до 3,76), пролегает в нелинейном участке графика при одновременно значительной крутизне. Осуществление производства приборов для работы в этой области требует большой строгости и осуществления высокой, так называемой культуры производства.

Построение и анализ трехмерных графиков позволяет гораздо быстрее найти инте-

ресующие области параметров. При этом для полноты анализа имеет смысл построить несколько уже двухмерных графиков изменения магнитного коэффициента от одного из геометрических параметров.

Для $L = 10$ мм и диапазона k от 0 до 1 график зависимости магнитного коэффициента α представлен на рис. 3.

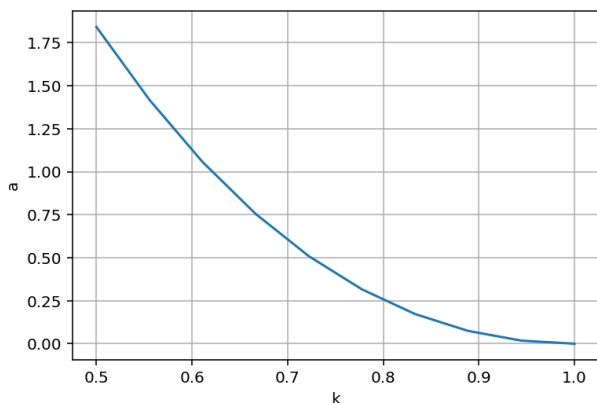


Рис. 3. График зависимости магнитного коэффициента α для $L = 10$ мм

Fig. 3. Graph of the magnetic coefficient α for $L = 10$ mm

Зона устойчивости для этого сочетания параметров находится для значения коэффициента α до 0,66. Это соответствует значениям коэффициента k от 0,7, что означает очень тонкий магнит, так как соотношение внутреннего диаметра к внешнему равно от 0,7. Такие соотношения означают очень хрупкий магнит.

Для $L = 20$ мм и диапазона k от 0 до 1 график зависимости магнитного коэффициента α представлен на рис. 4.

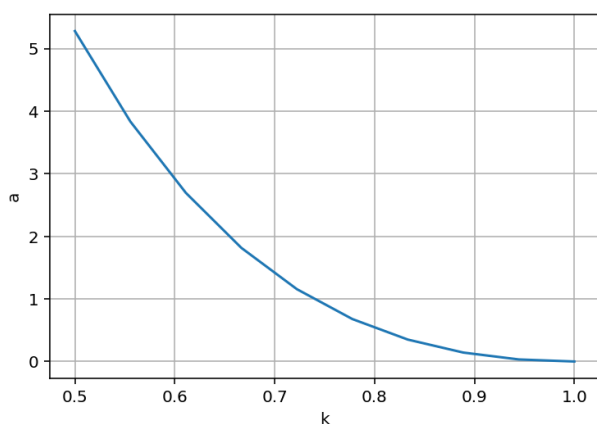


Рис. 4. График зависимости магнитного коэффициента α для $L = 20$ мм

Fig. 4. Graph of the magnetic coefficient α for $L = 20$ mm

Зона устойчивости для этого сочетания параметров находится для значения коэффициента α до 0,66, тут еще более узкая, чем в предыдущем случае, и начинается от $k = 0,8$. Вторая зона устойчивости коэффициента α от 1,72 до 3,76 дает полоску значений коэффициента k от 0,57 до 0,68. Крутизна графика тут еще не носит отвесного характера. Зафиксируем значение коэффициента $k = 0,6$ и посмотрим, как в этом случае меняется величина коэффициента α при изменении толщины.

Для L в диапазоне от 0 до 30 мм и $k = 0,6$ график зависимости магнитного коэффициента α представлен на рис. 5.

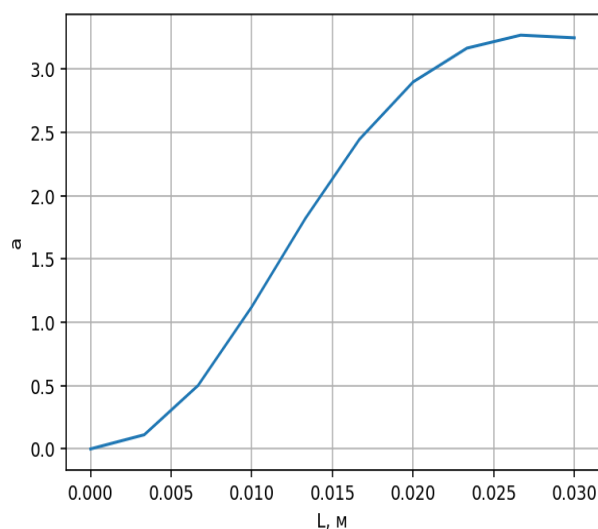


Рис. 5. График зависимости магнитного коэффициента α для $k=0,6$

Fig. 5. Graph of the dependence of the magnetic coefficient α for $k=0,6$

Характеристика имеет явную точку экстремума или перегиба, использование которой и будет наиболее оптимальным значением толщины. Однако при таком значении толщины необходимо будет пересчитать величину периода магнитного поля, что может внести поправки в рассчитанные данные и потребовать их уточнения. Тогда необходимо будет провести вторую итерацию проделанной выше расчетно-аналитической работы.

Рассмотрим при этом отдельно изменение величины магнитного поля для указанного ранее диапазона значений параметров L в диапазоне от 0 до 30 мм и $k = 0,6$, полученная зависимость приведена на рис. 6.

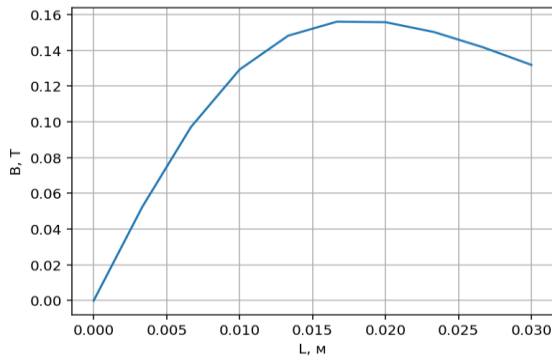


Рис. 6. График зависимости величины магнитного поля B для $k = 0,6$

Fig. 6. Graph of the dependence of the magnetic field B for $k = 0,6$

Точка экстремума тут соответствует значению толщины $L = 16$ мм, что не совпадает с точкой экстремума для величины магнитного коэффициента. Значения для экстремума для магнитного коэффициента тут находятся в ниспадающей части графика, что не оптимально с точки зрения величины магнитного поля, однако величина снижения магнитного поля тут не так существенна, что делает эту точку возможной для выбора.

Местный экстремум, если обратиться к рис. 4, попадает во вторую зону устойчивости ($\alpha = 2,2$), что также делает ее возможной для выбора, однако так как это значение близко к нижней границе зоны, то любое значимое технологическое отклонение обладает риском выхода значения коэффициента за пределы зоны.

Заключение

Учет влияния технологических отклонений важен для процесса проектировки электровакуумных приборов, работающих на сверхвысоких частотах. Анализ влияния изменения каждого отдельного геометрического параметра важен в частных случаях, но весьма громоздкий для всеобъемлющего анализа. Вариантом упрощения может стать построение трехмерных графиков влияния изменения геометрических параметров магнита на величину магнитного поля, а также на величину магнитного коэффициента α . Трехмерный график изменения величины магнитного поля или магнитного коэффициента от геометрических параметров позволит достаточно быстро и просто пред-

ставить общую картину возможных для использования в конструируемом приборе вариантов параметров фокусирующей системы.

В результате анализа были найдены оптимальные области геометрических параметров магнитов (по оптимальному значению магнитного коэффициента): $L = 25$ мм, $d = 20$ мм, $D = 33$ мм. Также были найдены значения параметров оптимальных лишь по второстепенному параметру (в данном случае индукции магнитного поля): $L = 16$ мм, $d = 20$ мм, $D = 33$ мм. В итоге оба варианта сочетания геометрических параметров можно использовать при конструировании фокусирующих систем.

В целом результаты данной работы являются необходимым этапом перед решением задачи поиска оптимального сочетания геометрических параметров магнита, которая потребует дальнейшего развития представленной математической модели.

Библиографические ссылки

1. Численное моделирование формирования электронных пучков в источниках двух типов с плазменным катодом и их транспортировки в магнитном поле / В. Т. Астрелин, М. С. Воробьев, И. В. Кандауров, В. В. Куркучков // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83, № 11. С. 1529–1533.
2. Ограничения токов при транспортировке сплошного аксиально-симметричного электронного пучка в пролетных каналах электровакуумных устройств миллиметрового диапазона / В. Е. Родякин, В. М. Пикунов, В. Н. Аксенов, Н. Е. Овсянников // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т. 84, № 1. С. 132–136.
3. Wang P. et al. Planar distributed three-beam electron optics system with narrow beam separation for fundamental-mode TWT in W-band // IEEE Transactions on Electron Devices. 2021. Т. 68. №. 10. С. 5215-5219.
4. Wang Y. et al. An optimization method for klystron magnetic focusing system // Radiation Detection Technology and Methods. – 2025. – С. 1-10.
5. G. Shu et al. Study of a Terahertz-Band Integrated Dual-Sheet Beam Weak Pole Offset Periodic Cusped Magnetic Focusing Structure // IEEE Electron Device Letters. 2024. Т. 45, № 12. Pp. 2546-2549.

6. Jiang S. et al. Experimental investigation of an electron-optical system for terahertz traveling-wave tubes //IEEE Transactions on Electron Devices. 2021. Т. 68, № 12. С. 6498-6504.

7. Рафиков Р. А., Глебова Т. А. Ленточный пучок эллиптического поперечного сечения с эквипотенциальной поверхностью // Актуальные проблемы современной науки и производства. 2019. С. 62–67.

8. Гуртовой В. И. Расчет магнитного поля на оси намагниченных тел с осевой симметрией // Вопросы радиоэлектроники. Сер I, Электроника СВЧ. 1965. № 11. С. 108–131.

9. Mendel J.T. Electron beam focusing with periodic permanent magnet fields / J.T. Mendel, C.F. Quate, W.H. Yocom. Proceedings of the IRE. 1954. Vol. 42. № 5. P. 800-810.

10. Mendel J. T. Magnetic focusing of electron beams // Proceedings of the IRE. 1955. Vol. 43, №. 3. С. 327-331.

11. Clogston A.M., Heffner H. Focusing of an electron beam by periodic fields. Journal of Applied Physics. 1954. Vol. 25, № 4. P. 436-447.

12. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. М. : Сов. радио, 1966. 456 с.

13. Данилов В. Н. Разрушение однородной структуры плотного электронного пучка при пульсациях // Радиотехника и электроника. 1973. Т. 18. С. 21–42.

14. Тараненко В. П., Шевченко В. И. О допустимых пульсациях пучка в ЛБВ в режиме максимального усиления // Вестник ведущих учебных заведений. Радиоэлектроника. 1967. Т. 10, № 11. С. 1044–1048.

15. Shvachko A.A., A.A. Potapov Investigation of the Sensitivity of the Annular Magnet Magnetic Field to Changes in Its Thickness for Magnetic Focusing Systems // 2024 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). IEEE, 2024. Т. 1. С. 239-241.

References

1. Asterin, V. T. [Numerical simulation of the formation of electron beams in two types of sources with a plasma cathode and their transportation in a magnetic field]. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya. 2019. Vol. 83, no. 11, pp. 1529-1533 (in Russ.).

2. Rodyakin V.E., Pikunov V.M., Aksenov V.N., Ovsyannikov N.E. [Current limitations during transportation of a continuous axially symmetric electron beam in flight channels of millimeter-wave vacuum devices]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical Series. 2020. Vol. 84, no. 1. P. 132-136 (in Russ.).

3. Wang P. et al. Planar distributed three-beam electron optics system with narrow beam separation for fundamental-mode TWT in W-band //IEEE Transactions on Electron Devices. 2021. Vol. 68, no. 10. Pp. 5215-5219.

4. Wang Y. et al. An optimization method for klystron magnetic focusing system // Radiation Detection Technology and Methods. 2025. Pp. 1-10.

5. ShuG. et al. Study of a Terahertz-Band Integrated Dual-Sheet Beam Weak Pole Offset Periodic Cusped Magnetic Focusing Structure // IEEE Electron Device Letters. Vol. 45&- no. 12. Pp. 2546-2549.

6. Jiang S. et al. Experimental investigation of an electron-optical system for terahertz traveling-wave tubes //IEEE Transactions on Electron Devices. 2021. Vol. 68, no. 12. Pp. 6498-6504.

7. Rafikov R.A. Glebova T.A. *Lentochnyy puchok ellipticheskogo poperechnogo secheniya s ekvipotentsial'noy poverkhnost'yu* [Ribbon beam of elliptical cross-section with an equipotential surface]. *Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki I proizvodstva* [Proc. Actual problems of modern science and production]. 2019. Pp. 62-67 (in Russ.).

8. Gurtovoy V.I. [Calculation of the magnetic field on the axis of magnetized bodies with axial symmetry]. *Voprosy radioelektroniki. Ser I, Elektronika SVCH*. 1965. No. 11. Pp. 108-131 (in Russ.).

9. Mendel, J.T. Electron beam focusing with periodic permanent magnet fields / J.T. Mendel, C.F. Quate, W.H. Yocom. // Proceedings of the IRE. 1954. Vol. 42, no. 5. P. 800-810.

10. Mendel J.T. Magnetic focusing of electron beams // Proceedings of the IRE. 1955. Vol. 43, no. 3. Pp. 327-331.

11. Clogston A.M., Heffner H. Focusing of an electron beam by periodic fields // Journal of Applied Physics. 1954. Vol. 25, no. 4. P. 436-447.

12. Alyamovsky I.V. *Elektronnye puchki i elektronnye pushki* [Electron beams and electron guns]. Moscow: Soviet Radio, 1966. 456 p. (in Russ.).

13. Danilov V. N. [Destruction of the homogeneous structure of a dense electron beam under pulsations]. *Radiotekhnika I elektronika*. 1973. Vol. 18. Pp. 21-42 (in Russ.).

14. Taranenko V.P., Shevchenko V.I. [On permissible beam pulsations in TWT in the maximum gain mode]. *Vestnik vedushchikh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika*. 1967. Vol. 10, no. 11. Pp. 1044-1048 (in Russ.).

15. Shvachko, A.A. Investigation of the Sensitivity of the Annular Magnet Magnetic Field to Changes in Its Thickness for Magnetic Focusing Systems/ A.A. Shvachko, A.A. Potapov // 2024 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). IEEE, 2024. Vol. 1. Pp. 239-241.

* * *

Study of the Influence of Technological Deviations on the Characteristics of an Electron Beam with a Constant Inner Diameter

A. A. Shvachko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

The desire to reduce the overall dimensions of microwave devices, caused by increasing operating frequencies and decreasing the weight of aviation equipment, leads to the need to account for possible deviations from the calculated parameters of device elements. Such parameter deviations can be caused by technological features of production, which are becoming increasingly necessary to take into account during design. This article is devoted to searching for patterns in the influence of the geometric parameters of permanent magnets on the quantities determining the quality of electron beam focusing, from the standpoint of the occurrence of technological deviations. The article analyzes the distribution of the magnetic field in ring and prismatic magnets with various geometric parameters using numerical modeling to optimize the transport conditions of intense electron beams. The paper presents field graphs for magnets of various configurations, demonstrating the transition from non-uniform profiles to harmonic distributions. The importance of accounting for technological deviations in the design and manufacture of magnetic systems is discussed, since even small changes in geometric parameters can significantly affect the output characteristics of the device. An analysis is simultaneously conducted of the influence of several geometric parameters on the magnetic field and magnetic coefficient. Three-dimensional graphs were proposed as a tool for analyzing the magnitude of potential consequences of simultaneous deviations in two geometric parameters. The technique allows finding implicit optimal combinations of magnet parameters: thickness 25 mm, internal diameter 20 mm, external diameter 33 mm.

Keywords: magnetic field, permanent magnets, geometric parameters, magnetic coefficient, vacuum tubes, electron beam focusing, technological deviations, beam stability, numerical modeling.

Получено: 26.01.26

Образец цитирования

Швачко А. А. Исследование влияния одновременно двух геометрических параметров фокусирующей системы на зоны устойчивости электронного пучка // Интеллектуальные системы в производстве. 2026. Т. 24, № 1. С. 70–77. DOI: 10.22213/2410-9304-2026-1-70-77.

For Citation

Shvachko A.A. [Study of the Influence of Technological Deviations on the Characteristics of an Electron Beam with a Constant Inner Diameter]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 70-77. DOI: 10.22213/2410-9304-2026-1-70-77.