

УДК 621.3.021

Исследование условий формирования и транспортировки пучков с учетом трехмерного распределения магнитного поля

А. А. Лещинская, В. П. Рыбачек

Рязанская государственная радиотехническая академия, г. Рязань, Россия

Описана методика учета всех составляющих магнитного поля в программе трехмерного траекторного анализа. На основе тестовых задач проведен выбор оптимальных значений параметров математической модели. Рассмотрены результаты численного расчета пучков в режиме сквозного анализа ЭОС с реально измеренными реверсным и однородным магнитными полями. Дана оценка предельных значений поперечной составляющей магнитного поля.

Особенности конструкций современных клистронов с уменьшенными габаритами и массой приводят к тому, что электрические и магнитные поля и, соответственно, движение электронов в них становятся существенно трехмерными, повышается опасность оседания электронов в пролетных трубах и зазорах резонаторов, возрастает влияние трехмерных эффектов на выходные параметры приборов. При использовании соленоидов причиной этого могут быть перекосы магнитной фокусирующей системы (МФС) и электронно-оптической системы (ЭОС), а в случае использования высокоэффективных магнитных периодических фокусирующих систем (МПФС) на основе постоянных магнитов из SmCo_5 — изменения по азимуту магнитных свойств и геометрических размеров брусков, наличие в них технологических отверстий, несоосности при сборке и др. Нарушение аксиальной симметрии магнитного поля приводит к поперечным деформациям и сносу пучка с оси и к нарушению токопрохождения.

Для пространственного моделирования пучков применялась программа трехмерного траекторного анализа 3D_ED, основанная на использовании конечно-разностных методов расчета электрических полей и модели потока из деформируемых элементов [1]. При этом реальное магнитное поле задается в виде таблицы осевых распределений продольной составляющей индукции $B_z(z)$, максимальной по углу поперечной компоненты $B_\perp(z)$ и угла ориентации вектора B_\perp — $\varphi_\perp(z)$ в точках измерения.

Эта информация снимается с помощью зонда с датчиками Холла на специализированной установке магнитных измерений типа "Медиана" [2]. Программный модуль рассчитывает составляющие индукции магнитного поля в базовой системе координат XYZ по формулам:

$$B_x(x, y, z) = B_r(r, z) \cos(\theta) + B_\perp(z^*) \cos(\varphi_\perp(z^+));$$

$$B_y(x, y, z) = B_r(r, z) \sin(\theta) + B_\perp(z^*) \sin(\varphi_\perp(z^+));$$

$$B_z(x, y, z) = B_z(r, z^*),$$

где B_r и B_z — компоненты аксиально-симметричного магнитного поля, определяемые из условия парааксиального приближения:

$$B_r(r, z) = - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!(n+1)!} B_z^{2n+1}(0, z^*) \left(\frac{r}{2}\right)^{2n+1},$$

$$B_z(r, z^*) = - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!^2} B_z^{2n}(0, z^*) \left(\frac{r}{2}\right)^{2n},$$

здесь r, θ, z^*, x, y, z — собственные цилиндрические и базовые координаты искомой точки. Необходимые значения $B_{\perp}(z)$ и $\phi_{\perp}(z)$ на оси в точке z^* находятся методом интерполяции.

Наличие собственной системы координат для магнитного поля позволяет моделировать несоосности и перекосы ЭОС и МФС. Проведение сквозного расчета допускается как с катода, так и с заданной плоскости. Во втором случае “закрутка” пучка в плоскости старта определяется по теореме Буша, а остальные составляющие начальной скорости рассчитываются с учетом закона сохранения энергии. Для сквозного анализа от катода до коллектора протяженных ЭОС используется методика расчета по областям с автоматическим сшиванием решения по полю и траекториям на границах областей.

Тестирование программы проводилось решением задачи о транспортировке цилиндрического пучка в аксиально-симметричном бриллюэновском магнитном поле через длинный пролетный канал. Учитывая существенное превышение продольных размеров канала над поперечными (соотношение 100:1), канал равномерно разбивался на 20 расчетных областей. Расчет проводился в режиме инжекции пучка с параллельным выстрелом и заданием начальной “закрутки”. Анализ результатов показал, что аксиальная симметрия и соосность пучка с пролетным каналом по всей длине обеспечивается при числе узлов сетки в поперечном сечении 45×45 и параметре окончания итерационного процесса не менее $10^{-5} \div 10^{-4}$. Для сшивания решения зона перекрытия соседних областей должна быть не меньше диаметра канала.

Анализ результатов тестирования второй задачи, где на двумерное однородное поле величиной $B_z = 830$ Гс накладывалась постоянная поперечная составляющая $B_{\perp} = 10$ Гс, показал, что при транспортировке в таком поле поперечное сечение пучка остается круглым, а центр пучка вращается вокруг результирующего вектора $\vec{B} = \vec{B}_{\perp} + \vec{B}_z$. Проекция центра пучка на плоскость XOY имеет вид циклоиды и смещается по направлению результирующего вектора \vec{B} от центра канала (рис. 1).

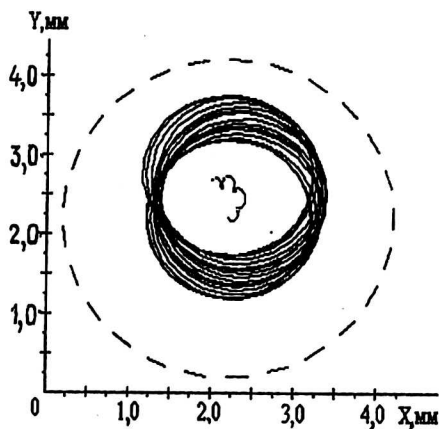


Рис. 1. Проекция пучка на плоскость XOY
 ---- — поперечное сечение канала

По разработанной программе проводился трехмерный анализ многолучевых ЭОС с различными типами магнитных систем. На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости, описывающие трехмерное распределение магнитных полей.

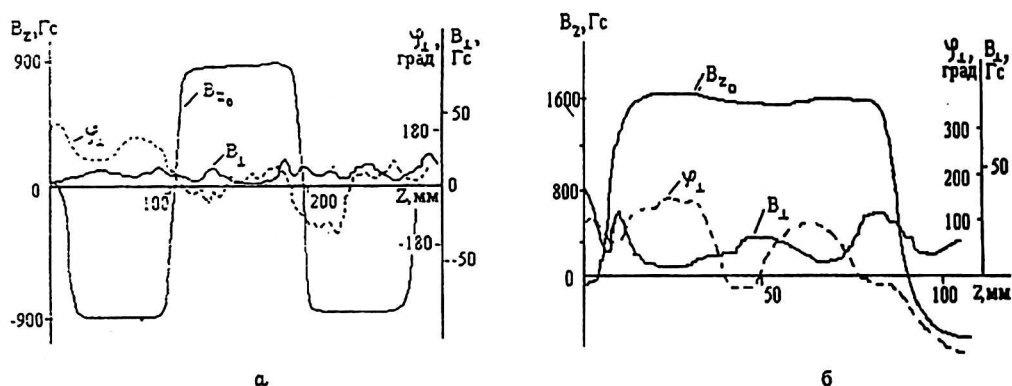


Рис. 2. Распределение продольной (B_{z0}) и поперечной (B_1) составляющих магнитного поля и угла ориентации поперечной составляющей φ_1 вдоль оси Z :
а — реверсное поле; б — однородное поле

В первом случае сквозной расчет проводился для парциального пучка ЭОС с реверсным магнитным полем величиной $B_{z\max} = 960$ Гс (рис. 2, а). В области реверсов поля поперечная составляющая B_1 возрастала до 2 % от $B_{z\max}$ (20 Гс). Пушка имела прямоосную конструкцию и формировала пучок с первеансом $0,43$ мкА/ $V^{3/2}$ и коэффициентом заполнения $0,5$. Ускоряющее напряжение составляло 10 кВ, длина пролетного канала 400 мм, а диаметр — $5,5$ мм. Для расчета использовалась однослойная модель пучка и разбиение ЭОС на 20 областей. Из результатов трехмерного анализа (рис. 3) видно, что при используемом распределении B_1 снос пучка с оси происходит в различных направлениях по азимуту. Расчеты показывают, что нарушение токопрохождения наблюдается при величине $B_1 = 3,5$ %.

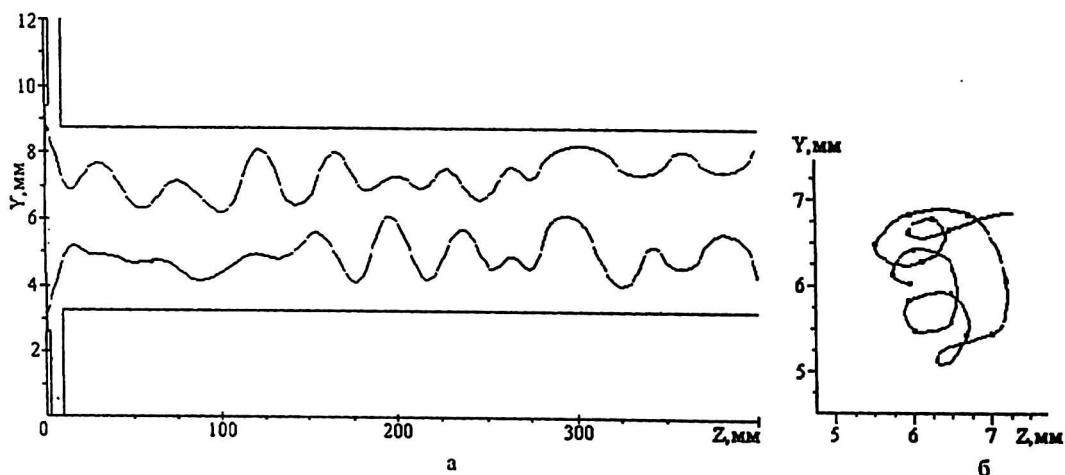


Рис. 3. Результаты трехмерного анализа ЭОС с реверсным магнитным полем:
а — проекция огибающей пучка на плоскость YOZ ; б — проекция движения центрального электрона на плоскость XOY

Во второй ЭОС для фокусировки пучка использовалось однородное магнитное поле величиной $B_{z_{max}} = 1652$ Гс (см. рис. 2, б). Максимальные значения поперечной составляющей поля B_{\perp} приходились на области эмиттера и полюсных наконечников и составляли около 23 Гс или 1,4 % от $B_{z_{max}}$. Длина всей ЭОС равнялась 107 мм, а пролетного канала — 83 мм, диаметр канала — 2 мм. Результаты трехмерного моделирования ЭОС в сквозном режиме от катода до коллектора включительно приведены на рис. 4. При ускоряющем напряжении 13 кВ пушка формирует пучок с первеансом $0,44$ мкА/ $V^{3/2}$ и коэффициентом заполнения 0,35. Анализ продольной огибающей и поперечных сечений пучка свидетельствует о сохранении его круглого профиля по всему пролетному каналу и смещении под действием поперечного магнитного поля в процессе дрейфа к верхней стенке канала. Движение проекции центрального электрона по циклической кривой (рис. 4, б) объясняется преобладающей ориентацией вектора B_{\perp} в основном в первой и второй четвертях. В области коллектора поперечное поле сносит пучок к его правой стенке, что приводит к неравномерному оседанию электронов по азимуту. При отсутствии поперечного магнитного поля результаты трехмерного анализа (см. рис. 3, а) совпадают с результатами расчета по программе двухмерного анализа. Различия в амплитуде и периоде пульсаций пучка не превышают 5 %. Результаты расчетов показывают, что отсутствие поперечного поля в области пушки улучшает соосность пучка в конце пролетного канала на 10 %. С другой стороны, увеличение относительной величины B_{\perp} до 2 % приводит к нарушению токопрохождения, которое снижается в 3 раза при возрастании B_{\perp} до 3 %.

Величина поперечного магнитного поля ($B_{\perp} / B_{z_{max}} \cdot 100$ %)	Токопрохождение, %
1,4.....	100
1,68.....	100
1,96.....	88
2,24.....	77
2,52.....	54
2,9.....	31

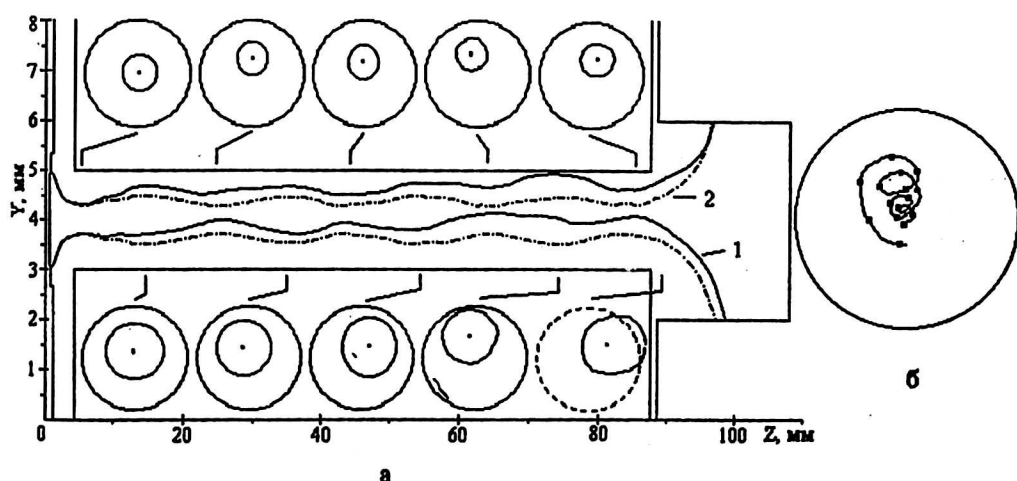


Рис. 4. Результаты трехмерного анализа ЭОС с однородным магнитным полем: а — фотографии пучка в продольном и поперечных сечениях: 1 — огибающая пучка в трехмерном магнитном поле; 2 — огибающая пучка в двухмерном магнитном поле; б — проекция движения центрального электрона на плоскость XOY (масштаб 2:1)

Приведенные расчеты тестовых задач и реальных ЭОС показывают, что разработанная программа может быть использована для определения научно обоснованных допусков на величину поперечной составляющей магнитного поля, а также проектирования многолучевых приборов с различными типами МФС.

Программа разработана на MS FPS 4.0 и функционирует в среде семейства ОС Windows. Время расчета одной области на сетке из 250 000 узлов на компьютере Pentium II-300 составляет 2 мин, а всего пролетного канала — 15—20 мин. С помощью модуля графической визуализации результаты траекторного анализа оперативно отображаются в виде фотографий продольных и поперечных сечений пучка, а также в виде проекции движения центра пучка в плоскости XOY.

Л и т е р а т у р а

1. Федяев В. К., Рыбачек В. П. Расчет трехмерных многоэмиттерных электронно-оптических систем//Радиотехника и электроника. 1987. № 2. Т. 32. С. 57—61.
2. Данилов В. Н., Дроздов С. С., Лаврентьев Ю. В., Лобанов А. П., Невский П. В. К расчету электронного пучка от коллектора, формируемого пространственно неоднородным магнитным полем//Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1977. № 8. С. 70—80.

Работа выполнена по гранту Минобразования РФ (раздел 8.4 "Методы формирования и фокусировки электронных и ионных пучков").

Research of conditions forming and transportations of beams discount three-dimensional magnetic field

A. A. Lechtchinskaia, V. P. Rybachek
Rayzan State Radiotechnical Academy, Rayzan, Russia

Described strategy of account all forming magnetic field in the program of three-dimensional trajectories analysis. On the base of test problems is conduct choice of optimum parameters mathematical models. Considered results numerical calculation of beams in the mode of end-to-end analysis EOS with the real measured reverse and uniform magnetic fields. Given evaluation of limiting values of transverse form magnetic field.