

УДК 621.385.833.2

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОПУСКОВ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ МАГНИТНЫХ ОТКЛОНЯЮЩИХ СИСТЕМ НА СИММЕТРИЮ ОТКЛОНЯЮЩИХ ПОЛЕЙ**

*Л. Б. Розенфельд*

Научно-исследовательский институт электронной и ионной оптики, Москва, Россия

*Б. Н. Васичев, М. О. Зотова*

Московский государственный институт электроники и математики  
(Технический университет), Москва, Россия

*Приводятся методика и программное обеспечение для расчета аберраций, обусловленных неточностью изготовления и юстировки полюсных накопителей магнитных электронных линз. Дана оценка влияния эллиптичности каналов и относительного сдвига осей каналов на коэффициенты аберраций и радиусы кружков рассеяния.*

В современном прецизионном электронно-лучевом оборудовании (например, в установках для электронной литографии) используются магнитные отклоняющие системы (ОС) без магнитопровода. Магнитные ОС используются как для отклонения электронного пучка, так и в качестве элементов систем коррекции аберраций (например, в системах с подвижной осью) [1, 2]. Для коррекции астигматизма такие системы обычно снабжаются быстродействующими динамическими стигматорами [1]. Для обеспечения быстродействия системы должны иметь малую индуктивность, что ограничивает число витков в отклоняющей системе несколькими десятками. Кроме того, для получения требуемой величины магнитного отклоняющего поля

необходимо существенно увеличивать ток (до 1 А и более), протекающий через катушки отклоняющей системы, и, следовательно, использовать для намотки катушек относительно толстый, трудно изгибаемый провод. Вследствие этого форма реальных витков, получаемых при намотке, может существенно отличаться от заданной, например, прямоугольной формы, причем отклонения от заданной геометрии являются, как правило, случайными. Из-за ограниченности числа витков в катушках ОС, вызванной изменением формы витка, нарушение симметрии отклоняющего поля не может быть скомпенсировано за счет случайных отклонений в других витках и усреднения вызванных ими ошибок. Поэтому представлялось интересным провести количественную оценку влияния изменения геометрических параметров витков ОС на отклонение магнитного поля от заданного.

Поле магнитных ОС и стигматоров рассчитывалось по закону Био-Савара, определяющему величину и направление вектора магнитной индукции  $dB$  в произвольной точке пространства  $O$ , создаваемого в вакууме элементом проводника  $dL$  с током  $I$  [3,4]:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^3} [dLr], \quad (1)$$

где  $dL$  — вектор элемента проводника, проведенный в направлении тока;

$r$  — радиус-вектор, проведенный из этого элемента в рассматриваемую точку пространства  $O$ .

$$r = |r|;$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

Для конечного отрезка прямолинейного проводника с током (рис. 1) модуль создаваемого в вакууме вектора магнитной индукции определяется выражением:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1), \quad (2)$$

где  $r_0$  — расстояние точки пространства, для которой вычисляется значение магнитной индукции, от оси проводника с током;

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — углы между направлением тока и радиусами-векторами  $r_1$  и  $r_2$ , проведенными в точку наблюдения  $O$  соответственно из начала и конца проводника. При этом направление вектора  $B$  ортогонально вектору  $r_0$  и вектору направления тока.

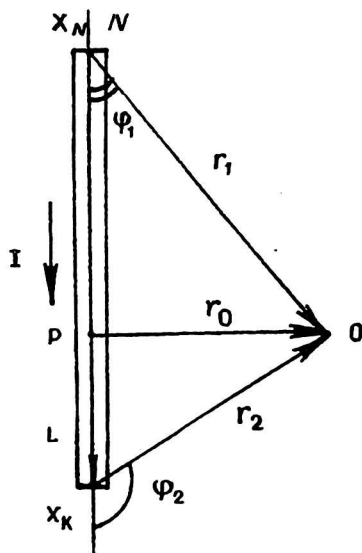


Рис. 1. Схема обозначений:  $x_N, x_K$  — проводник с током;  $O$  — точка, в которой вычисляется магнитная индукция

Для оценки влияния допусков изготовления ОС на параметры создаваемого магнитного поля необходимы формулы для расчета компонент магнитного поля, создаваемого проводником с током, произвольно ориентированным в пространстве. Введем в рассмотрение вектор  $L$ . Из определения скалярного произведения векторов следует, что косинус угла между векторами  $L$  и  $r_1$  может быть определен из выражения

$$\cos \varphi_1 = \frac{(Lr_1)}{|L||r_1|} = \frac{L_x r_{1x} + L_y r_{1y} + L_z r_{1z}}{|L||r_1|}, \quad (3)$$

где  $L_x, L_y, L_z$  и  $r_{1x}, r_{1y}, r_{1z}$  — соответственно проекции указанных векторов на координатные оси.

Аналогичное выражение можно написать и для вычисления  $\varphi_2$ .

Величина  $r_0$ , входящая в (2), может быть вычислена методами аналитической геометрии, однако это достаточно трудоемко. Проще вычислить ее значение из прямоугольного треугольника  $NPO$  (см. рис. 1) по известному углу  $\varphi_1$  и гипотенузе, равной модулю вектора  $r_1$ . Из этого же треугольника вычисляется длина отрезка  $NP$ , что позволяет рассчитать координаты точки  $P$  по координатам точки  $N$  и направляющим косинусам вектора  $L$ . В свою очередь это дает возможность определить вектор  $r_0$ , перпендикулярный вектору  $L$ . Из формулы (1) следует, что направляющие косинусы вектора  $B$  могут быть определены с помощью векторного произведения единичных векторов, направление одного из которых совпадает с вектором  $L$ , а другого — с вектором  $r_0$ . Знание направляющих косинусов позволяет рассчитать проекции вектора  $B$  на координатные оси.

Поле, создаваемое всеми проводниками ОС, вычисляется как сумма векторов магнитных полей, создаваемых отдельными проводниками. Поле криволинейных участков проводника аппроксимируется полем ломаной линии с числом отрезков ломаной, обеспечивающим требуемую точность расчетов.

В разработанную для решения поставленной задачи программу исходные данные вводятся в виде цилиндрических координат точек начала и конца отрезков проводов, что позволяет рассчитывать поля, образованные произвольными комбинациями прямолинейных и изогнутых проводников.

В численном эксперименте влияние несимметрии системы за счет допусков на изготовление оценивалось по двум критериям:

1. Сравнивалось поле несимметричной системы с полем системы с идеальным расположением проводников и оценивалось в процентах отклонение реального поля от идеального. Такая оценка интересна в тех случаях, когда ОС используется в качестве корректора (например, в системе линзы с подвижной осью) [1] и ее поле должно обеспечивать заданное с определенной точностью распределение магнитной индукции в пространстве.

2. В различных сечениях реальной системы вычислялись значения магнитной индукции в группах из четырех точек, симметричных относительно плоскостей симметрии идеальной системы. Значения индукции в точках, размещенных во 2—4-м квадрантах, сравнивалось со значением поля в 1-м квадранте. Ошибка оценивалась также в процентах. Такой способ контроля несимметрии поля полезен для последующей оценки влияния этой ошибки на абберрационные характеристики ОС.

В качестве примера рассмотрим результаты расчета влияния допусков изготовления на ОС, образованную двумя рамками 1-2-3-4-1, 5-6-7-8-5 (рис. 2, а). Для ОС расстояние концов отрезка от оси  $z$  равно  $R = 10$  мм, угол  $\varphi = 60^\circ$ , протяженность вдоль оси  $z = 60$  мм, допуск на изготовление ОС составлял величину  $d = 0,1$  мм.

Рассчитывалось поле для идеальной геометрии проводников и для случаев, учитывающих влияние следующих ошибок изготовления:

1. Изменение положения точки 1 (см. рис. 2, а) в направлении  $R$  на величину  $d$  (перекос по  $R$ ).
2. Изменение положения точек 1 и 5 (см. рис. 2, а) в направлении  $R$  на величину  $d$  в разные стороны (перекос по  $R$ ).
3. Изменение положения точки 1 или точек 1 и 5 (см. рис. 2, а) по дуге угла  $\varphi$  на угол  $\delta\varphi = d/R$  (перекос по  $\varphi$ ).
4. Изменение положения точки 1 или точек 1 и 5 (см. рис. 2, а) в направлении  $z$  на величину  $d$  в разные стороны (перекос по  $z$ ).
5. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении по  $R$  на величину  $d$  (смещение по  $R$ ).
6. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 5-6 в другом направлении по  $R$  на величину  $d$  (смещение по  $R$ ).
7. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении по  $\varphi$  на величину  $\delta\varphi$  (смещение по  $\varphi$ ).
8. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 5-6 в другом направлении по  $\varphi$  на величину  $\delta\varphi$  (смещение по  $\varphi$ ).
9. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении по  $z$  на величину  $d$  (смещение по  $z$ ).
10. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 5-6 в другом направлении по  $z$  на величину  $d$  (смещение по  $z$ ).
11. Изгиб провода со стрелой прогиба  $d$ .

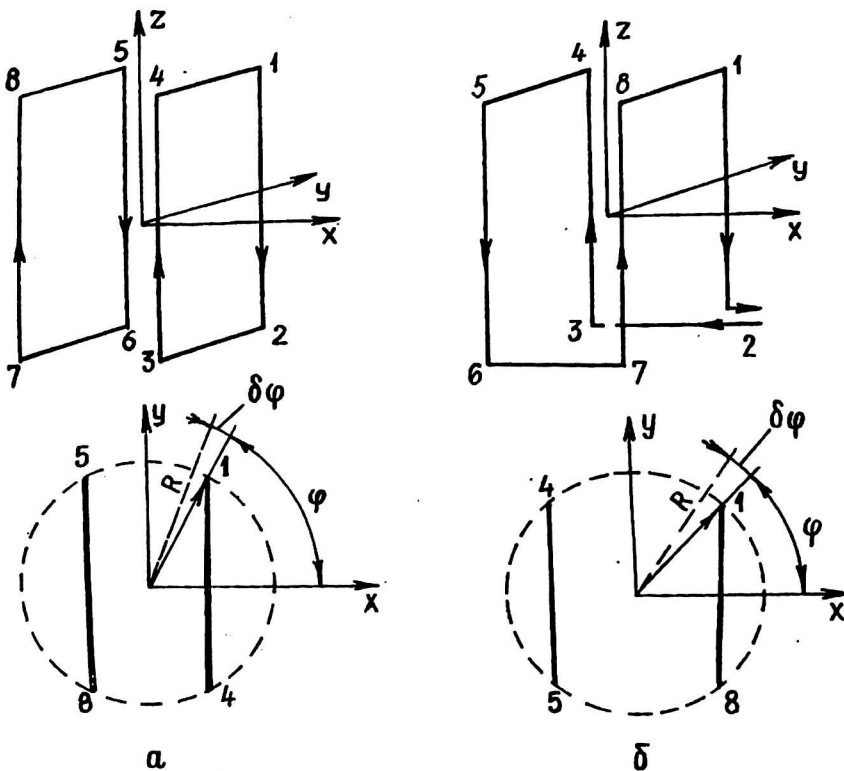


Рис. 2. Схема обозначений проводников:  
а — отклоняющей системы; б — стигматора

Отклонение поля рассчитывалось при изменении координаты  $x$  в пределах от  $-0,1$  до  $+0,1$  мм, координаты  $y$  — от  $-0,1$  до  $+0,1$  мм, и координаты  $z$  — от  $-30$  до  $+30$  мм.

Были получены семейства зависимостей ошибки от координаты в различных сечениях поля.

На рис. 3,а представлены наиболее характерные зависимости ошибки отклонения реального поля от идеального по координате  $z$ .

На рис. 3,б, в характер изменения ошибки определяется выбранным сечением, и ошибка изменяется в достаточно широких пределах.

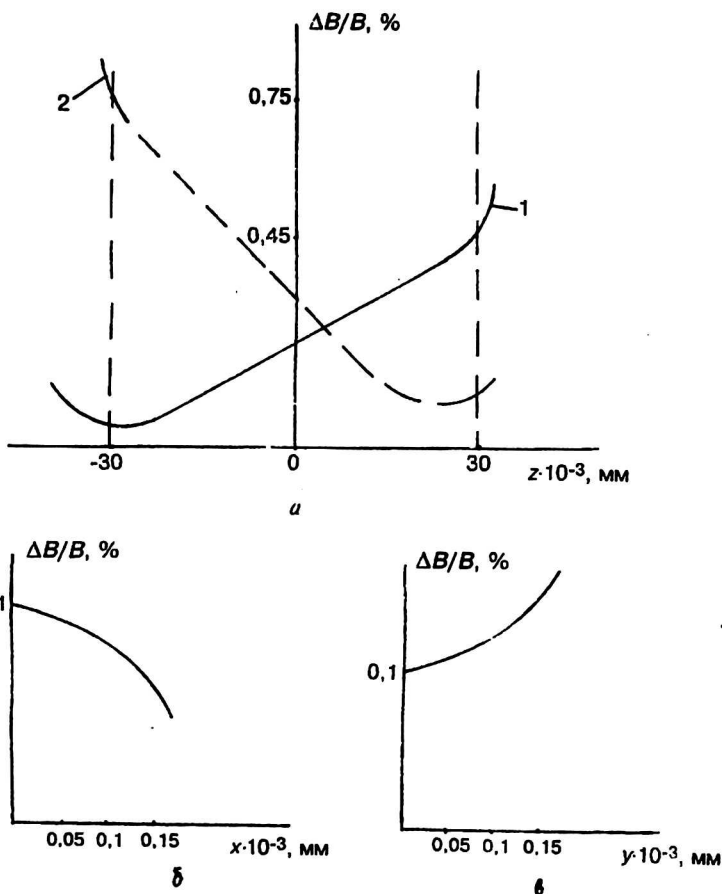


Рис. 3. Графики зависимости ошибки отклонения реального поля отклоняющей системы от идеального:

- а — по координате  $z$  при фиксированных значениях  $x$  и  $y$ : 1 — изменение положения точек 1 и 5 (см. рис. 2, а) в направлении  $R$  на величину  $d$  в разные стороны (перекос по  $R$ ); 2 — смещение угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 5-6 — в другом по  $z$  на величину  $d$  (смещение по  $z$ );
- б — по координате  $x$  при фиксированных значениях  $z$  и  $y$ ;
- в — по координате  $y$  при фиксированных значениях  $z$  и  $x$

Результаты расчетов ошибок отклонения реального поля ОС от поля идеальной ОС приведены в табл. 1.

Из анализа приведенных в табл. 1 данных видно, что максимальное значение ошибки отклонения реального поля от идеального достигает 1,72 % и имеет место при изменении положения точек 1 и 5 (см. рис. 2, а) в направлении  $z$  на величину  $d$  в разные стороны (перекос по  $z$ ) и аналогичном перекосе по координате  $R$  (0,75 %).

Таблица 1

## Ошибки отклонения реального поля от идеального

Анализируемые ошибки изготовления отклоняющей системы	Максимальное значение ошибки, %	Среднее значение ошибки, %	Среднее значение абсолютной величины ошибки, %	Среднеквадратичная ошибка, %
Перекос 1 или 2 проводников по оси $R$	0,15—0,61	0,07—0,17	0,09—0,17	0,15—0,2
Перекос 1 или 2 проводников по оси $\varphi$	0,22—0,75	0,13—0,17	0,15—0,21	0,28—0,36
Перекос 1 или 2 проводников по оси $z$	0,13—1,72	0,03—0,21	0,03—0,23	0,47—0,52
Смещение 1 или 2 проводников по оси $R$	0,28—0,41	0,11—0,18	0,17—0,19	0,19—0,23
Смещение 1 или 2 проводников по оси $\varphi$	0,17—0,20	0,04—0,06	0,07—0,12	0,09—0,12
Смещение 1 или 2 проводников по оси $z$	0,17—0,45	0,01—0,02	0,09—0,12	0,14—0,18
Изгиб 1 проводника по оси $R$ наружу	0,49	0,15	0,21	0,23

Примечание. Для уменьшения объема таблицы в каждой графе приводятся две цифры: первая — для смещения одной угловой точки ОС, а вторая — для двух соседних точек.

На этой же конфигурации отклоняющей системы оценивалось влияние различных деформаций на симметрию поля. Некоторые результаты расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 4, а. Наибольшая величина нарушения симметрии имеет место при изменении длины одного или двух проводов в направлении  $z$  на величину  $d$  (перекос по  $z$ ) — более 16 %.

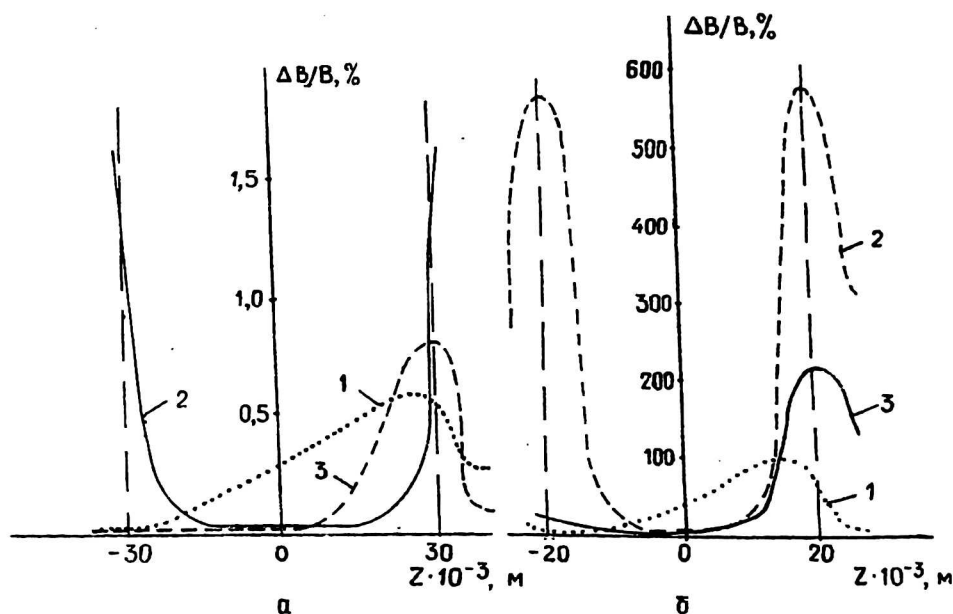


Рис. 4. Графики влияния различных деформаций на симметрию поля:  
 а — отклоняющей системы: 1 — изменение положения точки 1 (см. рис. 2, а) в направлении  $R$  на величину  $d$  (перекос по  $R$ ); 2 — смещение угловых точек 1 — 2 в одном направлении и точек 5 — 6 — в другом направлении по  $z$  на величину  $d$  (смещение по  $z$ ); 3 — изменение положения точки 1 или точек 1 и 5 (см. рис. 2, а) по дуге угла  $\varphi$  на угол  $\delta\varphi = d/R$  (перекос по  $\varphi$ );  
 б — стигматора: 1 — изменение положения точек 1 и 4 (см. рис. 2, б) в направлении  $R$  на величину  $d$  в разные стороны (перекос по  $R$ ); 2 — смещение угловых точек 1 — 2 в направлении  $z$  на величину  $d$ ; (смещение по  $z$ ); 3 — изменение положения точек 1 и 4 (см. рис. 2, б) в направлении  $z$  на величину  $d$  в разные стороны (перекос по  $z$ )

Т а б л и ц а 2

**Нарушение симметрии поля отклоняющей системы при отклонении ее геометрии от заданной**

Анализируемые ошибки изготовления отклоняющей системы	Максимальное значение ошибки, %	Среднее значение ошибки, %	Среднее значение абсолютной величины ошибки, %	Среднеквадратичная ошибка, %
Перекус 1 или 2 проводников по оси $R$	0,13—0,54	0,01—0,10	0,01—0,12	0,02—0,18
Перекус 1 или 2 проводников по оси $\varphi$	0,12—0,75	0,04—0,06	0,15—0,21	0,28—0,36
Перекус 1 или 2 проводников по оси $z$	0,01—16,8	0,01—0,08	0,01—0,11	0,06—0,29
Смещение 1 или 2 проводников по оси $R$	0,35—0,75	0,02—0,16	0,07—0,17	0,10—0,23
Смещение 1 или 2 проводников по оси $\varphi$	0,35—2,07	0,02—0,16	0,03—0,25	0,08—0,54
Смещение 1 или 2 проводников по оси $z$	0,12—1,48	0,01—0,08	0,01—0,10	0,03—0,31
Изгиб 1 проводника по оси $R$ наружу	0,04—0,58	0,01—0,11	0,01—0,13	0,02—0,21

П р и м е ч а н и е. Приводится диапазон изменения максимальных значений ошибки в точках, симметричных относительно заданной.

Аналогичные расчеты проводились и для стигматора, изображенного на рис. 2,б при следующих его геометрических размерах:  $R = 2$  мм,  $z = 40$  мм,  $\varphi = 45^\circ$ ; допуск на изготовление стигматора принимался равным  $d = 0,1$  мм.

Отклонение поля рассчитывалось при изменении координаты  $x$  в пределах от  $-0,1$  до  $+0,1$  мм, координаты  $y$  — от  $-0,1$  до  $+0,1$  мм, и координаты  $z$  — от  $-20$  до  $+20$  мм.

Наиболее характерные зависимости ошибки отклонения реального поля от идеального для стигматора по координате  $z$  при фиксированных значениях  $x$  и  $y$  представлены на рис. 5,а.

Некоторые результаты расчетов представлены в табл. 3 в виде интервалов колебания значений ошибок отклонения реального поля от идеального.

Т а б л и ц а 3

**Ошибки отклонения реального поля от идеального для стигматора.**

Анализируемые ошибки изготовления стигматора	Максимальное значение ошибки, %	Среднее значение ошибки, %	Среднее значение абсолютной величины ошибки, %	Среднеквадратичная ошибка, %
Перекус 1 или 2 проводников по оси $R$	27—33	0,05—0,12	2,62—3,01	4,24—5,12
Перекус 1 или 2 проводников по оси $\varphi$	8—10	0,1—0,13	0,21—0,45	0,61—0,95
Перекус 1 или 2 проводников по оси $z$	11—15	0,07—0,10	0,12—0,52	0,83—1,54
Смещение 1 или 2 проводников по оси $R$	21—25	0,54—1,92	1,87—3,06	2,15—4,83
Смещение 1 или 2 проводников по оси $\varphi$	9—12	0,15—0,21	0,43—0,78	1,45—2,16
Смещение 1 или 2 проводников по оси $z$	61—65	0,9—1,39	1,35—2,99	7,18—5,25
Изгиб 1 проводника по оси $R$ наружу	159—198	6,9—12,9	13,9—21,2	23,8—34,6

В численных экспериментах оценивалось влияние ошибок изготовления, связанных с изменением длины, угловой ориентации, расстоянием от оптической оси, наклоном и изгибом отдельных проводников стигматора. Показано, что при допуске на намотку проводников 0,1 мм отклонение реального поля от расчетного (и, соответственно, нарушение симметрии магнитного поля) достигает 200 % для случая изгиба провода со стрелой прогиба  $d$ , и 65 % — для случая смещения угловых точек 1-2 (см. рис. 2, б) в одном направлении и точек 5-6 в другом направлении по  $z$  на величину  $d$  (смещение по  $z$ ).

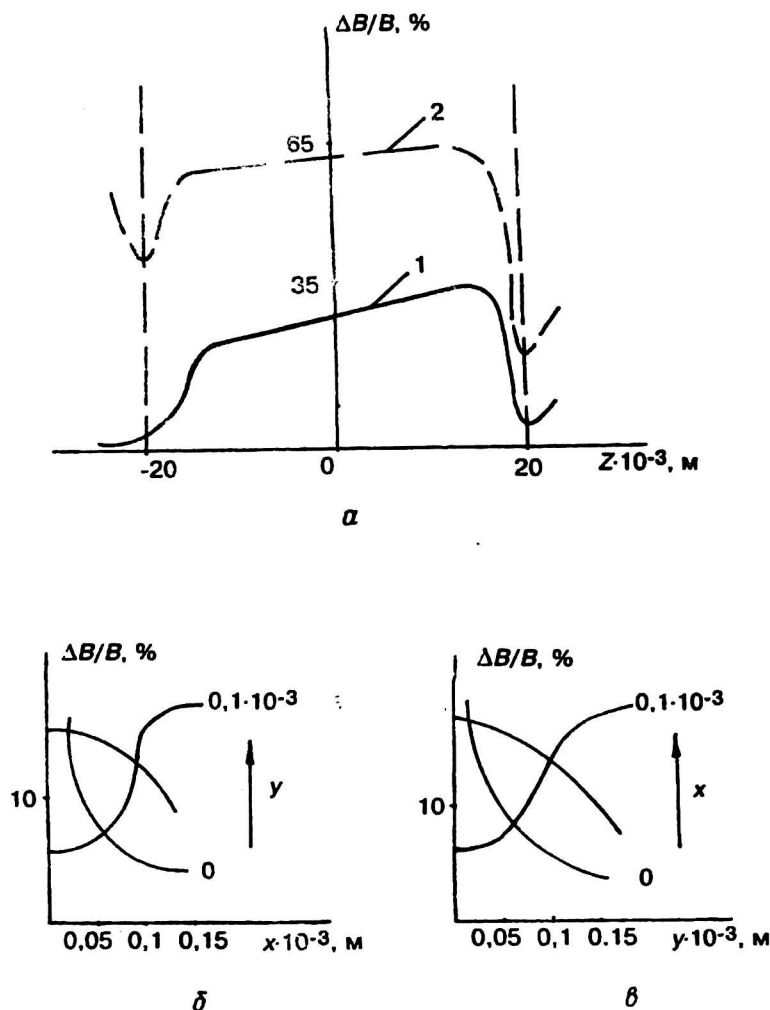


Рис. 5. Графики зависимости ошибки отклонения реального поля стигматора от идеального:

а — по координате  $z$  при фиксированных значениях  $x$  и  $y$ : 1 — изменение положения точек 1 и 4 (см. рис. 2, б) в направлении  $R$  на величину  $d$  в разные стороны (перекос по  $R$ ); 2 — смещение угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 4-5 в другом направлении по  $z$  на величину  $d$  (смещение по  $z$ ); 3 — изменение положения точек 1 и 5 (см. рис. 2, б) по дуге угла  $\varphi$  на угол  $\delta\varphi = d/R$  (перекос по  $\varphi$ );

б — по координате  $x$  при фиксированных значениях  $z$  и  $y$ ;

в — по координате  $y$  при фиксированных значениях  $z$  и  $x$

Для стигматора результаты оценки влияния различных деформаций на симметрию поля выведены в табл. 4 и на графиках рис. 4,б.

Наибольшие нарушения симметрии для стигматора наблюдаются при смещении угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 4-5 (см. 2, б) в другом направлении по  $z$  на величину  $d$  (смещение по  $z$ ) до 690 %, и при изгибе провода со стелой прогиба  $d$  около 1040 %.

Т а б л и ц а 4

Нарушение симметрии поля стигматора при отклонении его геометрии от заданной

Анализируемые ошибки изготовления стигматора	Максимальное значение ошибки, %	Среднее значение ошибки, %	Среднее значение абсолютной величины ошибки, %	Средне-квадратичная ошибка, %
Перекос 1 или 2 проводников по оси $R$	81—90	6—7	9,9—15,3	20,7—26,5
Перекос 1 или 2 проводников по оси $\phi$	8	3—5	0,9—1	2,02—2,07
Перекос 1 или 2 проводников по оси $z$	200—231	6—9	7—9	12—16
Смещение 1 или 2 проводников по оси $R$	81—90	6—7	9—15	20,4—27,1
Смещение 1 или 2 проводников по оси $\phi$	17	1,5—2,3	2,1—2,3	4,3—4,64
Смещение 1 или 2 проводников по оси $z$	551—687	11,8—16,5	16—21	59—94
Изгиб 1 проводника по оси $R$ наружу	840—1041	83—89	161—210	452—458

Как видим, любые нарушения симметрии гораздо резче сказываются для стигматора (в десятки раз), что объясняется тем, что поле рабочей области стигматора определяется разностью двух полей катушек с током, а для ОС поля вблизи оси — суммируются.

Приведенные данные показывают, что при использовании в прецизионной электронной оптике оборудования быстродействующих магнитных маловитковых ОС и стигматоров необходимо особое внимание уделять их конструкции и технологии изготовления с целью обеспечения минимального отклонения поля от заданного.

### Л и т е р а т у р а

1. Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов/Под ред. Дж. Р. Брюэра. — М.: Радио и связь, 1984. С. 332.
2. Хокс П., Каспер Э. // Основы электронной оптики. — М., 1993. Т. 2. С. 476.
3. Шиллер Э., Гайзиг У., Панцер Э. Электронно-лучевая технология. — М.: Энергия, 1980. С. 87.
4. Яворский Б. М., Детлаф А. А.: Справочник по физике. — М.: Наука, 1990. С. 622.

## FABRICATION ACCURACY INFLUENCE UPON THE FIELD SYMMETRY OF HIGH-SPEED MAGNETIC DEFLECTING SYSTEM

*L. B. Rozenfeld*

Research institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

*B. N. Vasichev, M. O. Zotova*

Moscow institute for Electronics and Mathematics (Technical University), Moscow, Russia

*The methods and program product for the calculation of magnetic electronic lenses aderration, caused by the unprectison of fabrctation and allgnment of pole pieces are presented. The channels ellipticty and the relative shift of channels in pole pieces influence on aberration coefficients and radluses of aberration circle dispersion are estimated.*