

УДК 621.385.833.22

Исследование величины паразитных аберраций, возникающих вследствие погрешности изготовления тороидальных магнитных отклоняющих систем

М. О. Зотова, Л. Б. Розенфельд, Б. Н. Васичев
ФГУДП НИИ ЭИО «ГУП НПО «Орион»», Москва, Россия

Дано описание методики траекторного контроля влияния дефектов изготовления на электронно-оптические характеристики тороидальных отклоняющих систем (ТОС), основанной на законе Био-Саварра и суммировании полей, создаваемых отдельными, произвольно ориентированными проводниками ТОС. Приведены результаты численных экспериментов по количественной оценке влияния различных дефектов изготовления отклоняющих систем на возникающие вследствие этого паразитные аберрации. Выявлены наиболее влияющие дефекты. Оценены аберрационные характеристики ТОС, используемых в технологическом электронно-лучевом оборудовании, и показано, что при допуске 0,2 мм размер формируемого на изделии пятна может возрасти при отклонении пучка в несколько раз по сравнению с идеально изготовленной системой.

В технологическом зондовом оборудовании необходимо обеспечивать сканирование пучка заданной формы и размера по максимально возможной площади обрабатываемого изделия. Аберрации прецизионных отклоняющих систем, используемых в таком оборудовании, зачастую

сильно зависят от точности изготовления указанных систем. На основе методики* количественной оценки влияния погрешности изготовле-

* Розенфельд Л. Б., Васичев Б. Н., Зотова М. О. // Известия РАН. Сер. физ., 1999. Т. 63. № 7. С. 1283.

ния на электронно-оптические характеристики тороидальных магнитных отклоняющих систем количественно оценивалось влияние различных дефектов изготовления, вызванных смещением и перекосом одного или нескольких пазов, в которые закладывается обмотка, по отношению к заданному положению. При расчетах предполагалось, что пучок электронов движется вдоль оси тороидальной системы (вдоль оси Z).

Известно, что действие любого электронно-оптического элемента (ЭОЭ) на электроны в первую очередь сводится к изменению углов наклона (α_x и α_y) проекций траектории к оси Z , соответственно, на плоскости XOZ и YOZ . Поэтому мерой дополнительной абберации могут служить либо разность между углами отклонения $\Delta\alpha_x$, $\Delta\alpha_y$ траекторий в идеальном и деформированном ЭОЭ, либо разность координат Δx , Δy точек пересечения указанных траекторий с заданной плоскостью, перпендикулярной оси Z . Здесь $\Delta\alpha_x$, $\Delta\alpha_y$ — соответственно, ошибки по углам отклонения пучка в направлениях осей X и Y . Очевидно, что ошибка по полному углу отклонения вычисляется по формуле $\Delta\alpha = \sqrt{\Delta\alpha_x^2 + \Delta\alpha_y^2}$, а смещение реальной траектории от идеальной — по формуле $\Delta R = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$. Величины $\Delta\alpha_x$, $\Delta\alpha_y$, Δx , Δy должны зависеть от координат x_0 , y_0 точки входа электронов в ЭОЭ, поэтому для получения количественной оценки, позволяющей сравнивать влияние дефектов изготовления на величину дополнительных аббераций различных по конструкции ЭОЭ, было предложено оценивать среднеквадратичные ошибки для цилиндрического пучка электронов, движущихся на входе в ЭОЭ параллельно оси Z и равномерно распределенных в пределах круга, радиус которого выбирался равным 10 % от радиуса ЭОЭ.

В качестве примера рассмотрим результаты расчета влияния допусков изготовления на два варианта ТОС, используемых в установках для размерной обработки электронным пучком и микросварки. Основные геометрические размеры исследованных ТОС следующие: наружный радиус

обмотки 34,5 мм, внутренний радиус — 21,5 мм, осевая протяженность намотки (два варианта) — 24,4 и 38,4 мм. Обычно намотка ТОС выполняется секционированной с распределением ампервитков, приближающимся к косинусоидальному закону.

В численном эксперименте исследовалась ТОС с 16 пазами и 170 витками. Допуск на изготовление пазов для обмотки принимался равным $d = 0,2$ мм. Очевидно, наиболее сильно на распределение магнитного поля в области прохождения пучка должны влиять участки обмотки, ближайшие к оси ТОС. Поэтому оценивалось влияние допусков изготовления только на внутренние пазы ТОС.

Рассчитывались траектории для идеальной геометрии проводников и для случаев, учитывающих влияние следующих ошибок изготовления в наиболее критичных участках в пазе с наибольшим числом витков:

изменение положения одной угловой точки паза в направлении R на величину d (перекос по R);
смещение внутреннего паза по радиусу на величину d (смещение по R);

изменение положения одной угловой точки паза по дуге угла φ на угол $\delta\varphi = d/R$ (перекос по φ);
смещение внутреннего паза по φ на величину $\delta\varphi$;
смещение одной из угловых точек паза по Z на величину d (удлинение по Z).

Моделирование проводилось при различных коэффициентах возбуждения ТОС ($K_{ex} = IN/U^{0,5}$, где IN — ампервитки возбуждения ОС; U — ускоряющее напряжение). Магнитное поле от каждого проводника ТОС рассчитывалось точно по закону Био-Савара, определяющему величину и направление вектора магнитной индукции в произвольной точке пространства. При расчете (с относительной ошибкой 10^{-12}) траекторий использовался метод Мерсона.

Результаты численного моделирования влияния различных дефектов для двух значений коэффициента возбуждения, соответствующих работе ТОС в различных классах технологического оборудования, для двух вариантов осевой протяженности ТОС возбуждения приведены в таблице.

№ варианта дефекта	Средняя квадратичная ошибка по углу $\Delta\alpha \cdot 10^{-4}$ (рад)			
	Вариант ТОС с длиной 24,4 мм		Вариант ТОС с длиной 38,4 мм	
	$\alpha^* = 2,78 \cdot 10^{-4}$, рад	$\alpha^{**} = 7,31 \cdot 10^{-2}$, рад	$\alpha^* = 4,36 \cdot 10^{-3}$, рад	$\alpha^{**} = 1,15 \cdot 10^{-1}$, рад
1	0,053	14	0,08	20
2	0,11	29	0,17	40
3	0,0004	0,0065	0,0071	0,008
4	0,0016	0,043	0,017	0,064
5	0,0018	0,44	0,018	0,39

α^* — угол отклонения при токе 0,1 А ($K_{ex} = 0,076 \text{ А} \cdot \text{В} / \sqrt{U}$);

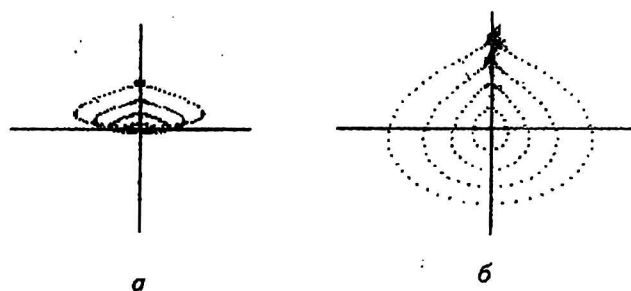
α^{**} — угол отклонения при токе 3 А ($K_{ex} = 2,28 \text{ А} \cdot \text{В} / \sqrt{U}$).

Из таблицы видно, что в обоих вариантах конструкции наиболее существенно влияют на величину дополнительных (паразитных) aberrаций дефекты изготовления, приводящие к смещению паза по радиусу (наклону паза или изменению его глубины). При увеличении осевой протяженности ТОС в 1,5 раза влияние этого дефекта ослабляется на 0,5 %, влияние остальных ошибок изготовления при рассмотренной геометрии ТОС — на несколько порядков меньше.

Моделирование показало, что при допуске на намотку проводников всего 200 мкм и весьма малом угле отклонения относительная ошибка (по углу) отклонения расчетной траектории от идеальной может достигать 4 % для короткой и длинной ОС. В частности, при расстоянии плоскости фокусировки от ОС, равном 200 мм, и поле отклонения 0,112×0,112 мм ошибка позиционирования может достигать 2 мкм, а при большом поле отклонения (46×46 мм) — 1 мм. Паразитные aberrации реальной ТОС могут быть значительно больше, если все пазы для обмотки изготовлены неточно.

Характер искажения формы сходящегося конического пучка, прошедшего через ТОС (длинный вариант конструкции с дефектом № 2), в плоскости минимального сечения при апертурном угле сходящегося электронного пучка $1 \cdot 10^{-2}$ радиана (разбитом на четыре элементарных конуса с постоянным шагом по углу при вершине), при токе 3 А и энергии электронов 60 кэВ приведен на рисунке, б. Для сравнения на рисунке, а

приведена форма того же пучка (в плоскости минимального сечения), обусловленная только геометрическими aberrациями идеально изготовленной ТОС.



Искажение формы сходящегося конического пучка в минимальном сечении ($K_{ex} = 2,28 A \cdot B / \sqrt{U}$):

а — прошедшего через идеально изготовленную ТОС;
б — прошедшего через ТОС, имеющую смещение по радиусу одного паза обмотки на 0,2 мм (дефект № 2)

Сравнение этих сечений показывает, что для реальных тороидальных магнитных отклоняющих систем, используемых в установках для размерной обработки электронным пучком и микросварки, ошибка при изготовлении только одного паза для обмотки приводит к увеличению ширины минимального сечения пучка более чем в три раза, а высоты — примерно в четыре раза. Это может существенно ухудшать технологические характеристики электронно-лучевого облучения, в котором используются быстродействующие магнитные ТОС.

Analysis of quantity of the parasitic aberrations arising as a result of manufacturing defects toroidal magnetic deflecting systems

M. O. Zotova, L. B. Rozenfel'd, B. N. Vasichev
Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

The analysis of influence of manufacturing defects at electron-optical characteristics of the toroidal deflect systems (TDS) was realized by trajectory calculation method. The method based at summation of the fields, created by separate conductor. The calculation of conductors field was based on law Bio-Savara. The quantitative evaluation of various defects influence on arising thereof parasitic aberrations are discussed. The most influencing defects are revealed. It is shown, that at the tolerance of 0,2 mm the size of a beam section, formed on a object, may grow at several times in comparison with ideally made system.