

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ АППРОКСИМАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕВОГО ПОЛЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛИНЗ ПРИ ПОМОЩИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ НА РАСЧЕТ АБЕРРАЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛИНЗ

Б. Н. Васичев, М. О. Зотова

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

*Анализируются различные алгоритмы и способы реализации программы расчета распределения поперечной компоненты вектора индукции магнитного поля линзы на оси для полосных наконечников с различными диаметрами и канала и величинами немагнитного зазора, а также полосные наконечники, выполненные из разных магнитомягких материалов. Проверялся метод решения прямой задачи моделирования электронно-оптических систем с использованием этих распределений по нескольким программам. Полученные результаты позволили оценить точность моделирования электронно-оптических систем современными методами и дать рекомендации по учету ошибок машинного моделирования.*

При расчете и моделировании магнитных электронных линз используются распределения продольной и поперечной компонент вектора индукции магнитного поля линзы на оси, полученные, как правило, расчетным методом с использованием известных аналитических функций. Эти функции позволяют определять поперечную магнитную индукцию магнитного поля вдоль электронно-оптической оси электронной линзы, задавая параметры ненасыщенного полюсного наконечника — диаметр внутреннего канала и ширину щели немагнитного зазора:

$$B_0 = \frac{\mu_0 N I}{s} t h \frac{a s}{2b}; \quad (1)$$

$$B_0 = \frac{\mu_0 N I}{\sqrt{s^2 + 0,45 \left(\frac{b_1 + b_2}{2}\right)^2}}, \quad (2)$$

где  $B_0$  — максимальная магнитная индукция магнитного поля на оси;

$\mu_0$  — магнитная постоянная;

$s$  и  $b$  — соответственно, ширина щели немагнитного зазора и диаметра внутреннего канала полюсного наконечника;

$(N I)$  — ампер-витки возбуждения линзы;

$b_1$  и  $b_2$  — диаметры внутренних каналов асимметричных полюсных наконечников;

$a$  — функция Бесселя нулевого порядка ( $a = 2,4048$ ).

Ошибки, возникающие при экспериментальных измерениях распределения магнитной индукции, зависят как от квалификации экспериментатора, так и от используемых средств измерения. Отклонение расчетных значений  $B_0$ , полученных по (1) и (2), от экспериментальных измерений, например полученных с помощью датчика Холла, не превышает 3—5 % на уровне  $B_0$  для значений параметров формы полюсных наконечников  $p = s/b$  или  $p = 2s/(b_1 + b_2)$  от 0,43 до 1,0. Основная паспортная погрешность измерений датчика Холла составляет: на пределах 300, 750, 3000, 7500 Гс — не более 1,5 %, на пределах 15 000 Гс —

2,5 %; погрешность фиксации измерительного зонда на оси составляла 0,1 мм при размерах самого датчика 1,5 x 1,0 мм.

Известно, что применение аналитических функций (1) и (2) для разных магнитномягких материалов, которые используются при изготовлении полюсных наконечников технологического и аналитического электронно-лучевого оборудования — пермендюр К50Ф2, пермаллоевые сплавы 50Н и 79НМ, низкоуглеродистая электротехническая сталь — железо “армко”, имеют свои пределы, зависящие от хода кривой намагничивания этих материалов. Точность их измерения также оказывает влияние на вычисляемые величины  $B_0$ . Величина  $NI/s$  отражает степень концентрации магнитного поля в щели полюсного наконечника, а следовательно, и величину  $B_0$ . И еще одна ошибка возникает при расчете распределения поля в линзе, если воспользоваться экспериментальной зависимостью максимальной магнитной индукции  $B_0$  на оси линзы от параметра формы  $p$  при различных возбуждениях линзы  $NI/s$ .

Магнитное насыщение для разных материалов начинает оказывать влияние при разных значениях магнитного потока, зависящего от значения  $NI/s$ : для железа “армко” при  $B \sim 1,1$  Т; для пермаллоя 50Н при  $B \sim 0,8$  Т; для пермаллоя 79НМ при  $B \sim 0,45$  Т, т. е. значение  $NI/s$ , при котором начинает сказываться насыщение материала, соответственно равно: для железа “армко” — при  $\sim 870$  (А · вит)/мм, для пермаллоя 50Н — при  $\sim 640$  (А · вит)/мм, а для пермаллоя 79НМ — при  $\sim 360$  А · вит/мм. Полюсные наконечники, имеющие один и тот же параметр формы, но различные значения диаметров и щелей, а также материал полюсного наконечника, до начала насыщения имеют одну и ту же кривую зависимость  $B_0 = f(NI/s)$ , а при насыщении эти кривые расходятся. Максимальное значение индукции  $B_0$  на оси линзы ограничивается насыщением материала полюсных наконечников, которое определяется значением индукции  $B_H$  в щели  $s$  между башмаками. Известно, что  $B_0$  и  $B_H$  связаны следующим соотношением:

$$B_H = B_0 / (1 - e^{-1,7p}). \quad (3)$$

Из этого соотношения следует, что величина  $B_H$ , кроме всего прочего, зависит от параметра формы полюсного наконечника.

В зависимости от алгоритма и способа реализации программы расчета зависит величина ошибки построения распределения индукции в зазоре линзы, и как следствие этого, ошибки расчета траекторий и величин геометрических ошибок изображения (аббераций). Особенно важной задачей оценки точности получения осевого распределения индукции магнитного поля является при моделировании электронно-оптических систем электронно-лучевого оборудования с синтезированными полями, которые применяются как в растровой электронной микроскопии, так и в установках для электронной литографии.

В связи с этим была поставлена задача по анализу влияния погрешностей моделирования распределения магнитной индукции в щели полюсных наконечников электронных линз при расчете и моделировании многолинзовых систем электронно-лучевого оборудования.

Для оценки возможных ошибок экспериментально полученные распределения индукции в немагнитном зазоре полюсных наконечников для разных магнитных электронных линз аппроксимировали известными аналитическими функциями.

Результаты аппроксимации компонент осевого магнитного поля для полюсных наконечников, “работающих” без насыщения и с насыщением, вычисленного по формулам:

$$B = B_0 e^{-(z/d)^2} \ln 2 \text{ — колоколообразное поле Гаусса;}$$

$$B = B_0 / [1 + (z/a_1)^2] \text{ — расширенное колоколообразное поле;}$$

$B = B_0/ch (z/a_2)$  — закон гиперболического косинуса;

$B = B_0/[1 + (z/a_3)^2]^{3/2}$  — поле кругового тока;

$B = B_0/[1 + (z/d)^2]$  — колоколообразное поле,

где  $d$  — полуширина распределения магнитной индукции  $B$ ;

$a_1$  — функция геометрических параметров;

$a_2 = d/1,315, a_3 = 1,307d$

и полученного экспериментально с помощью датчика Холла, представлены на рис. 1.

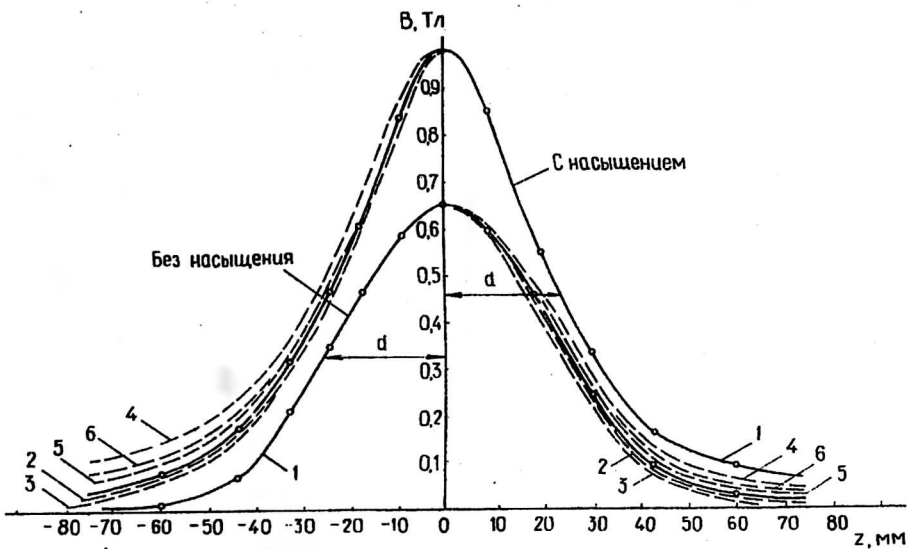


Рис. 1. Результаты аппроксимации компонент осевого магнитного поля для полюсных наконечников, "работающих" без насыщения и с насыщением, вычисленного по формулам:

1 — экспериментальная кривая; 2 — кривая, полученная по программе "Lens" - 2;

3 —  $B = B_0 e^{-(z/d)^2} \ln 2$ ; 4 —  $B = B_0/[1 + (z/a_1)^2]$ ; 5 —  $B = B_0/ch (z/a_2)$ ;

6 —  $B = B_0/[1 + (z/a_3)^2]^{3/2}$

Исследовались полюсные наконечники с различными диаметрами канала и величинами немагнитного зазора (параметра формы полюсного наконечника), а также полюсные наконечники, выполненные из разных магнитомягких материалов. Все они сравнивались с экспериментально измеренными значениями, которые предварительно сглаживались.

Анализ показал, что ошибка аппроксимации на входе и выходе из линзы может составлять от 1 до 100 %. На рис. 2 приведены определения компонент магнитного поля  $\Delta B$  для среднего значения относительных ошибок  $\Delta B = (B_i - B_{\text{экс}})/B_{\text{экс}}$  в зависимости от расстояния точки наблюдения от центра немагнитного зазора.

Из графиков видно, что для ненасыщенных полюсных наконечников в диапазоне значений  $z$  от 0 до 30 мм, т. е. при  $d/z < 1$  максимальная относительная ошибка  $\Delta B$  не превышает 10%; от 30 до 60 мм, т. е.  $d/z > 1$  — превышает 100%. Для полюсных наконечников с насыщением в диапазоне значений  $z$  от 0 до 30 мм, т. е. при  $d/z < 1$ , максимальная относительная ошибка  $\Delta B$  не превышает 16%; от 30 до 60 мм, т. е. при  $d/z > 1$  — превышает 50%. Такие величины несоответствия истинного распределения магнитной индукции в рабочей области магнитной линзы приводят к большим ошибкам при вычислении основных параметров линз. Причем с ростом порядка производной ошибка увеличивается.

На рис. 3, а, б в качестве примера приведены зависимости для производных первого, второго и третьего порядков, а также результат вычисления производной при некорректно заданных значениях распределения магнитной индукции, обусловленных в основном геометрическими размерами датчика Холла, без предварительного сглаживания экспериментальных значений. Относительные значения амплитуды производных первого, второго и третьего порядков отличаются от таких же значений для распределения индукции, полученного экспериментально, более чем на 50%, а в некоторых случаях величина ошибки столь велика, что ее невозможно определить.

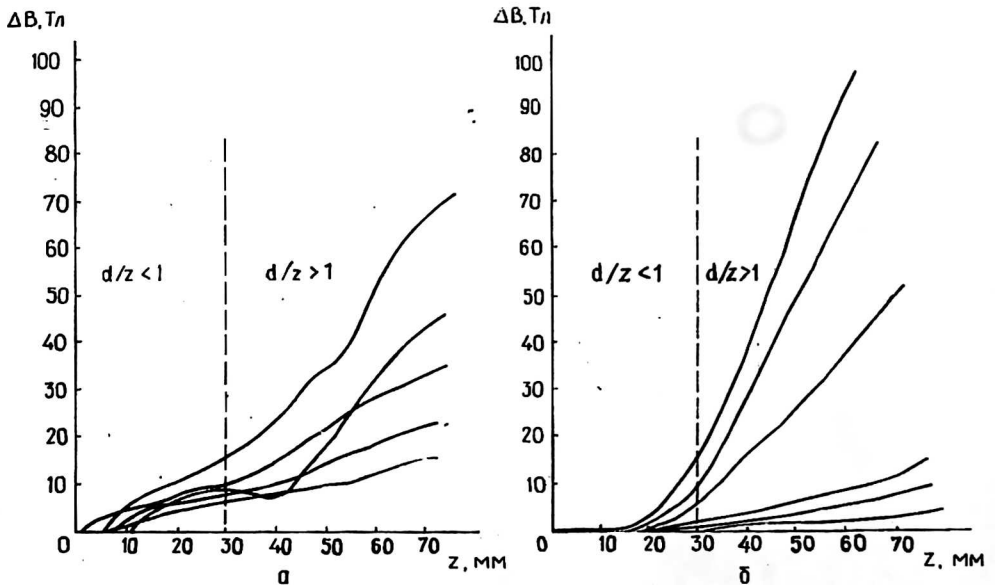
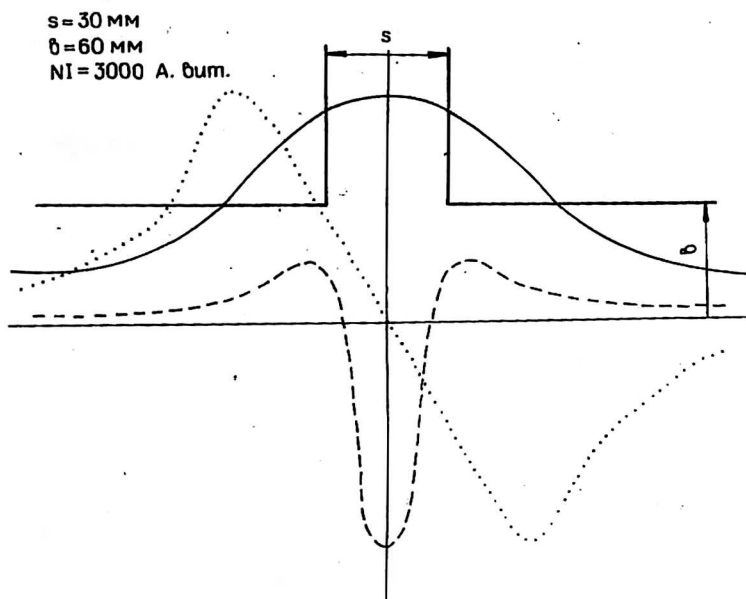


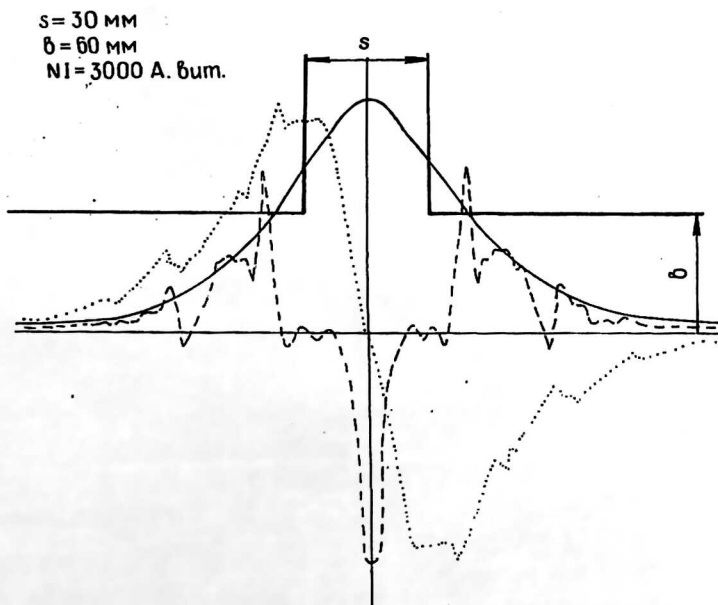
Рис. 2. Относительные ошибки распределения компонент магнитного поля  $\Delta B = (B_i - B_{\text{экс}}) / B_{\text{экс}}$  в зависимости от расстояния точки наблюдения от центра немагнитного зазора: а — для линз с насыщением; б — для линз без насыщения

Проверялся метод решения прямой задачи моделирования электронно-оптических систем с использованием этих распределений по нескольким программам. В таблице представлены некоторые результаты расчетов электронно-оптических систем. Полученные результаты позволяют оценить точность моделирования электронно-оптических систем с использованием современных методов и некоторых пакетов прикладных программ и сделать выводы, позволяющие уменьшить ошибки при машинном моделировании.

Это свидетельствует о том, что для получения достоверных результатов расчета и моделирования элементов электронно-лучевого оборудования очень важно использовать исходные распределения магнитной индукции в зазоре магнитных линз, полученные с минимальными ошибками. Величина этих ошибок не должна превышать 10% до получения расчетных данных с погрешностью не более 4–5%.



а



б

Рис. 3. Производные первого и второго порядков для простого колоколообразного поля (а); результат вычисления производной при некорректно заданных значениях распределения магнитной индукции, обусловленных в основном геометрическими размерами датчика Холла, без предварительного сглаживания экспериментальных значений (б)

Результаты расчета электронно-оптической системы

Метод/ программа	Рассчитываемые параметры		
	$F$	$C_{сф}$	$C_{хр}$
"Lens"	- 0,011	0,171	0,010
Эксперимент	- 0,011	0,091	0,010
Дюрандо	- 0,011	0,124	0,009
Гаусс	- 0,011	0,025	0,010
Лаплас	- 0,011	0,104	0,010

**ANALYSIS OF ACTING ERRORS OF APPROXIMATION OF DISTRIBUTION OF AXIS FIELD OF THE MAGNETIC ELECTRONIC LENSES WITH THE HELP OF ANALITICAL FUNCTION ON CALCULATION OF ELECTRONIC LENS ABERRATION**

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

Moskow Institut Electronics and Mathematics (Technical University), Moscow, Russia

*Various algorithms and methods of realization of the programme of calculation of distribution of the transversal component of vector to inductions of the magnetic field of lenses on the axis for pole extensions with different diameters of the channel and the sizes of the non-magnetic slit, and also pole extensions made of different magnetosoft materials are analysed. The method of doing the straight task of modelling electro-optic systems with the use of these distributions for various programmes was checked up. The achieved results gave the opportunity of assessing the exactness of modelling of electro-optic systems with the help of modern methods and giving recommendations for finding and taking into account errors of computer modelling.*