

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ОТКЛОНЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

В системах передачи и отображения информации, которые в настоящее время нашли широкое применение, неотъемлемым элементом является устройство индикации информации на экране. Обычно для этого используют электронно-лучевую трубку (ЭЛТ), в которой электронный поток фокусируется и перемещается в пространстве с помощью многоступенчатых отклоняющих систем (ОС). В идеальном случае при отклонении электронного пучка фокусировка его на экране сохраняется, а величина отклонения пропорциональна току в отклоняющих катушках при электромагнитном отклонении или приложенному напряжению — при электростатическом отклонении. С высокой степенью точности это

7*

99

выполняется при малых углах отклонения пучка для приосевых электронных траекторий. При больших углах отклонения возникают нарушения пропорциональности отклонения приложенному току (напряжению), а также искажения формы поперечного сечения луча в области мишени или экрана.

В ряде работ проводится исследование аберраций при электромагнитном отклонении электронных пучков. Авторами приводятся выражения для расчета аберраций, но результаты расчетов, как правило, не показаны. Очевидно, это связано с некоторыми трудностями в определении полей, траекторий движения и аберраций [1].

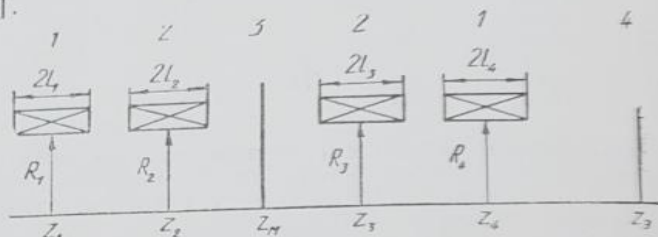


Рис. 1. Схема электромагнитной отклоняющей системы

В данной работе мы приводим вывод выражений для расчета коэффициентов аберраций, результаты численных расчетов геометрических аберраций двухступенчатой ОС, применяющейся в трубках со знаковой индикацией, анализ погрешностей передачи изображения и выбор оптимального варианта геометрии ОС.

Для расчета ошибок отклонения нескольких ОС, расположенных последовательно одна за другой вдоль оси, используем метод возмущений, лежащий в основе теории расчета ошибок отклонения, изложенной в [1]. Условиями нарушения фокусировки за счет фокусирующей системы и влияния пространственного заряда пренебрегаем, так как это — самостоятельная задача, и считаем, что искажения образуются только в отклоняющем поле.

Рассматриваемая система (рис. 1) состоит из горизонтальных отклоняющих катушек 1, вертикально отклоняющих катушек 2, маски 3 и экрана 4.

Решение аналогичной задачи для электростатической ОС подробно изложено в [2], поэтому некоторые промежуточные выкладки опускаем.

Смещение точки пересечения луча с экраном Δx_1 и Δy_1 [2]:

$$\Delta x_1 = -\frac{\partial W_4}{\partial x_1}, \quad \Delta y_1 = -\frac{\partial W_4}{\partial y_1}.$$

Функция W_4 определяется выражением

$$W_4(x_1, y_1, x'_1, y'_1) = \int_{z_0}^z F_4 dz, \quad (1)$$

где x_1, y_1 — координаты точки пересечения луча с плоскостью экранирования; x_1, y_1 — компоненты направления неотклоненного луча; F_4 — возмущающая функция.
Компоненты распределения магнитного потенциала в двухканальной ОС имеют вид

$$\begin{aligned} A_{x\xi} &= \frac{1}{2} B'_\xi y^2 + \dots; \quad A_{y\xi} = 0; \\ A_{z\xi} &= B_\xi x + \frac{1}{6} B_{2\xi} x^3 - \frac{1}{2} B_{2\xi} y^2 x + \dots; \quad A_{x\eta} = 0; \\ A_{y\eta} &= \frac{1}{2} B'_\eta x^2 + \dots; \quad A_{z\eta} = B_\eta y + \frac{1}{6} B_{2\eta} y^3 - \frac{1}{2} B_{2\eta} x^2 y + \dots \end{aligned}$$

где индексы ξ и η обозначают поле горизонтального отклонения и поле вертикального отклонения соответственно.

Составляющие потенциала каждого канала суммируются: $A_i = A_{i\xi} + A_{i\eta}$.

Полученные выражения подставляем в выражение для функции Лагранжа F [1] и выделяем из полученного абберационную составляющую:

$$\begin{aligned} F_4 &= -\frac{1}{2} k B'_\xi y'^2 x' - \frac{1}{2} k B'_\eta x'^2 y' + \frac{1}{2} B_{2\xi} y'^2 x' + \\ &+ \frac{1}{2} k B_{2\eta} x'^2 y' - \frac{1}{6} k B_{2\xi} x'^3 - \frac{1}{6} k B_{2\eta} y'^3 - \\ &- \frac{1}{8} [(x')^2 + (y')^2]^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя формулу (2) в (1) и учитывая, что

$$\begin{aligned} x &= x_s + x'_s (z - z_1) + e_\xi, \quad x' = x'_s + e'_\xi, \\ y &= y_s + y'_s (z - z_1) + e_\eta, \quad y' = y'_s + e'_\eta, \end{aligned}$$

где x_s, y_s — координаты точки пересечения луча с плоскостью мишени; x'_s, y'_s — компоненты направления неотклоненного луча; e_ξ, e_η — идеальное отклонение по осям x и y соответственно; e'_ξ, e'_η — изменение угла наклона по отношению к осям, получаем соотношение для W_4 :

$$\begin{aligned} -W_4 &= a_1 y'_s + a_2 x_s x'_s + a_3 y_s y'_s + \frac{1}{2} a_4 (x'_s)^2 + \frac{1}{2} a_5 (y'_s)^2 + \\ &+ a_6 x_s^2 y'_s + a_7 x_s y_s x'_s + a_8 (x'_s)^2 y_s + a_9 x_s x'_s y'_s + \\ &+ \frac{1}{2} a_{10} (x'_s)^2 y_s + a_{11} y_s^2 y'_s + \frac{1}{2} a_{12} y_s (y'_s)^2 + \frac{1}{3} a_{13} (y'_s)^3 + \\ &+ a_{14} (x'_s) + a_{15} x_s y'_s + a_{16} x'_s y'_s + a_{17} y_s x'_s + a_{18} y_s^2 x'_s + \\ &+ a_{19} x_s y_s y'_s + a_{20} (y'_s)^2 x'_s + a_{21} y_s x'_s y'_s + \frac{1}{2} a_{22} x_s (y'_s)^2 + \\ &+ a_{23} x_s^2 y'_s + \frac{1}{2} a_{24} x_s (x'_s)^2 + \frac{1}{3} a_{25} (x'_s)^3 + \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

где выражения для коэффициентов aberrаций $a_1 \dots, a_{25}$ приведены в приложении (уравнения П1).

В результате геометрические aberrации рассматриваемой системы можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta x = & a_{14} + a_{2x}s + a_{17}y_s + a_{16}y'_s + a_4x'_s + a_{18}y_s^2 + \\ & + a_{7x}s y_s + 2a_8x'_s y'_s + a_{9x}s y'_s + a_{10x}s y_s + \\ & + a_{20}(y'_s)^2 + a_{21}y_s y'_s + a_{23}x_s^2 + a_{24}x_s x'_s + a_{25}(x'_s)^2 + \dots, \\ \Delta y = & a_1 + a_3y_s + a_{15}x_s + a_{16}x'_s + a_5y'_s + a_6x_s^2 + \\ & + a_{19}x_s y_s + 2a_{20}x'_s y'_s + a_{21}x'_s y_s + a_{22}x_s y'_s + \\ & + a_8(x'_s)^2 + a_{9x}s x'_s + a_{11}y_s^2 + a_{12}y_s y'_s + a_{13}(y'_s)^2 + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Анализ погрешностей передачи изображения позволяет выделить различные виды aberrаций пучка: aberrации комы, астигматизм, радиальное расширение пучка и дисторсию. Выражения для них подобны приведенным в [2].

Для расчетов aberrаций системы магнитного отклонения составлена программа на языке FORTRAN для ЭВМ типа ЕС. Реализация программы обеспечивает определение идеальной траектории и коэффициентов aberrаций, а также общих искажений для луча $\Delta x, \Delta y$, комы канала x (C_x — расстояние до центра самого дальнего эллипса; R_{xx}, R_{yx} — полуоси эллипса по оси x и y соответственно), комы канала y (C_y, R_{yy}, R_{xy}), общей комы (C, R_x, R_y), астигматизма (R_x, R_y — полуоси эллипса), радиального расширения пучка (R).

Чтобы найти оптимальный вариант геометрии ОС, обеспечивающий получение изображения с минимальными искажениями, при расчетах изменяли размеры отклоняющих катушек, их взаимное расположение. Некоторые из исследованных вариантов приведены в таблице, где использованы буквенные обозначения: z_i — координаты центров отклоняющих катушек; L_i — длина отклоняющих катушек; z_m и z_9 — координаты центров маски и экрана соответственно; R_i — радиусы отклоняющих катушек. При этом индексы 1 и 2 соответствуют первой ступени ОС, 3 и 4 — второй.

Вариант	Размеры, мм							
	z_1, z_2	L_1, L_2	z_3, z_4	L_3, L_4	z_m	z_9	R_1, R_2	R_3, R_4
1	10	10	114	20	94	160	1÷15	5÷30
2	40	40	192	80	182	256	5	5÷30

Считаем, что ускоряющее напряжение $U = 14$ кВ, заряд электрона $Q = 1$ (в единицах заряда электрона); масса электрона $M = 1$ (в единицах массы электрона) половина угла схождения пучка $\omega = 5 \cdot 10^{-6}$. Параметры неотклоненного луча: координаты встречи неотклоненного луча с экраном $x_s = y_s = 0,01$ за счет несоосности луча и системы, а тангенсы углов наклона к оси проекций луча по плоскости $y = 0$ и $x = 0$ соответственно для неотклоненного

луча $x'_s = y'_s = 0,0001$. В обоих вариантах угол наливки для седлообразных отклоняющих катушек $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4 = 46^\circ$.

Расчет аберраций производим в местах расположения маски и экрана. Отклонение луча на маске $x_m = 5, y_m = 5$, а на экране $x_s = 2,5, y_s = 2,5$.

Результаты расчетов показывают, что наибольшие искажения оказывает дисторсия. Так, в рассматриваемых вариантах аберрации комы не превышают $0,2 \cdot 10^{-6}$ мм, а астигматизма и расширения пучка $0,3 \cdot 10^{-4}$ мм и $0,2 \cdot 10^{-3}$ мм соответственно. Зависимость изменения составляющих дисторсии при изменении параметров R_1, R_2, R_3 и R_4 (рис. 2, а) иллюстрирует важный вывод о том, что при увеличении радиусов отклоняющих катушек третьей и четвертой пар дисторсия значительно уменьшается и при некоторых значениях параметров может обратиться в 0. Зависимость искажений от радиусов катушек первой и второй пар обратная.

Учитывая изложенное выше, мы можем регулировать дисторсию на экране и на маске одновременно, обеспечивая ее минимизацию; например, используя систему с $R_3 = R_4 = 20$ мм и $R_1 = R_2 = 5$ (вариант 2), получаем искажение изображения за счет дисторсии на маске, не превышающее 0,7 % и на экране — 1,4 %.

Другие виды искажений изменяются незначительно в широком диапазоне изменения радиусов отклоняющих катушек.

Для оптимизации системы по уровню астигматизма и комы используем обобщенный коэффициент искажения формы сечения пучка.

Максимальное радиальное увеличение радиуса пучка не превышает отклонения пучка от идеальной траектории $R_2 = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$. Коэффициенты a_1 и a_{14} полагаем равными 0, учитывая, что искажения формы пучка определяются относительно его центра. Считаем, что неотклоненный луч движется строго по оси

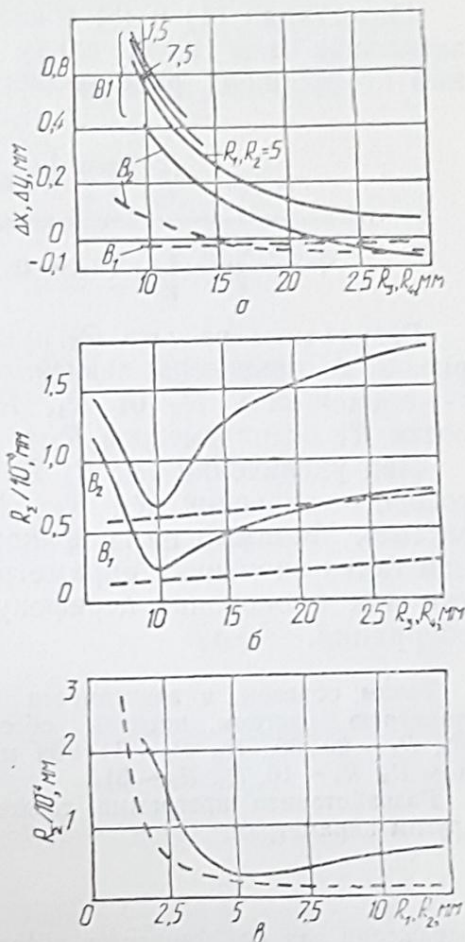


Рис. 2. Зависимость аберраций электронного пучка от характерных размеров отклоняющей системы:

а — зависимость изменения составляющих дисторсии от величины радиусов отклоняющих катушек третьей и четвертой пар; б — зависимость обобщенного коэффициента расширения пучка от величины радиусов отклоняющих катушек третьей и четвертой пар; в — зависимость обобщенного коэффициента расширения пучка от величины радиусов отклоняющих катушек первой и второй пар: — на экране; — — на маске

его центра. Считаем, что неотклоненный луч движется строго по оси

системы, поэтому $x_s = y_s = 0$. Переходя к полярным координатам r, θ в плоскости поперечного сечения пучка, получаем

$$x'_s = -\omega \cos \theta, \quad y'_s = -\omega \sin \theta. \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в выражение для R_z и отбрасывая члены, зависящие от ω^3 и ω^4 , ввиду их малости, получаем, что обобщенный коэффициент расширения пучка

$$R_z \approx \omega \sqrt{a_{16}^2 + \frac{a_4^2 + a_5^2}{2} + \dots} \\ + \frac{a_4 + a_5}{2} \sqrt{(a_4 - a_5)^2 + 4a_{16}^2 \sin \left(2\theta + \arctg \frac{a_4 - a_5}{2a_{16}} \right)}.$$

Результаты расчета R_z приведены в виде графиков (рис. 2). На рис. 2, б приведена зависимость R_z от R_3, R_4 при $R_1 = R_2 = 5$, а — зависимость R_z от R_1, R_2 при $R_3, R_4 = 10$. График зависимости R_z от параметров R_3 и R_4 имеет ярко выраженный минимум.

При увеличении R_1, R_2 R_z вначале уменьшается, а после некоторого значения R_1, R_2 , R_z на экране снова начинает возрастать. Минимум на графиках зависимостей R_z связан с тем, что при таких значениях параметров коэффициент a_{16} обращается в 0, так как происходит перефокусировка пучка за счет этого вида aberrаций.

Таким образом, в зависимости от конкретной задачи мы можем выбрать геометрию системы, которая обеспечит получение минимальной дисторсии ($R_3, R_4 \sim 20 \dots 30, R_1, R_2 \sim 1$) или минимальных искажений формы пучка (при этом $R_3, R_4 \sim 10, R_1, R_2 \sim 5$).

Разработанная программа также позволяет проводить оптимизацию и по другим параметрам.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Выражения для коэффициентов aberrаций (уравнения ПП)

$$a_1 = \int_{z_0}^{z_1} \left\{ k \left(\left(\frac{1}{2} B_{2\eta} e_\eta^2 - \frac{1}{2} B_{2\eta} e_\xi^2 - B_{2\xi} e_\eta e_\xi + B'_\xi e'_\xi e_\eta \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (z - z_1) + \frac{1}{2} B'_\eta e_\xi^2 \right) + \frac{1}{2} B'_\eta (e'_\xi)^2 e'_\eta + \frac{1}{2} (e'_\eta)^3 \right\} dz; \\ a_2 = \int_{z_0}^{z_1} k (B_{2\xi} e_\xi - B_{2\eta} e_\eta + B'_\eta e'_\eta) dz; \\ a_3 = \int_{z_0}^{z_1} k (B_{2\eta} e_\eta - B_{2\xi} e_\xi + B'_\xi e'_\xi) dz; \\ a_4 = \int_{z_0}^{z_1} \left[k (B_{2\xi} e_\xi - B_{2\eta} e_\eta + B'_\eta e'_\eta) (z - z_1)^2 + \frac{3}{2} (e'_\xi)^2 + \frac{1}{2} (e'_\eta)^2 \right] dz; \\ a_5 = \int_{z_0}^{z_1} \left[k (B_{2\eta} e_\eta - B_{2\xi} e_\xi + B'_\xi e'_\xi) (z - z_1)^2 + \frac{3}{2} (e'_\eta)^2 + \frac{1}{2} (e'_\xi)^2 \right] dz;$$

$$\begin{aligned}
a_6 &= \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{2} k [-B_{2\eta} (z - z_1) + B'_\eta] dz; \quad a_7 = -2a_{11}; \\
a_8 &= \int_{z_0}^{z_1} \left[-\frac{1}{2} k B_{2\eta} (z - z_1)^3 + \frac{1}{2} k B'_\eta (z - z_1)^2 + \frac{1}{2} e'_\eta \right] dz; \\
a_9 &= \int_{z_0}^{z_1} [-k [B_{2\eta} (z - z_1) - B'_\eta] (z - z_1) dz, \quad a_{10} = -a_{12}; \\
a_{11} &= \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{2} k B_{2\eta} (z - z_1) dz; \quad a_{12} = \int_{z_0}^{z_1} k B_{2\eta} (z - z_1)^2 dz; \\
a_{13} &= \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{2} k B_{2\eta} (z - z_1)^3 + \frac{3}{2} e'_\eta \right] dz; \\
a_{14} &= \int_{z_0}^{z_1} \left\{ k \left[\left(\frac{1}{2} B_{2\xi} e_\xi^2 - \frac{1}{2} B_{2\xi} e_\eta^2 - B_{2\eta} e_\eta e_\xi + \right. \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + B'_\eta e'_\eta e_\xi \right) (z - z_1) + \frac{1}{2} B'_\xi e_\eta^2 \right] + \frac{1}{2} (e'_\eta)^2 e'_\xi + \frac{1}{2} (e'_\eta)^3 \left. \right\} dz; \\
a_{15} &= \int_{z_0}^{z_1} K [(-B_{2\eta} e_\xi - B_{2\xi} e_\eta) (z - z_1) + B'_\eta e_\xi] dz; \\
a_{16} &= \int_{z_0}^{z_1} \left\{ k [(-B_{2\eta} e_\xi - B_{2\xi} e_\eta) (z - z_1) + B'_\eta e_\xi + B'_\xi e_\eta] (z - z_1) + \right. \\
&\quad \left. + e'_\xi e'_\eta \right\} dz; \quad a_{17} = \int_{z_0}^{z_1} k (-B_{2\xi} e_\eta - B_{2\eta} e_\xi) (z - z_1) + B'_\xi e_\eta] dz; \\
a_{18} &= \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{2} k (B'_\xi - B_{2\xi} (z - z_1)) dz, \quad a_{19} = -2a_{23}; \\
a_{20} &= \int_{z_0}^{z_1} \left\{ -\frac{1}{2} k B_{2\xi} (z - z_1)^3 + \frac{1}{2} k B'_\xi (z - z_1)^2 + \frac{1}{2} e'_\xi \right\} dz; \\
a_{21} &= \int_{z_0}^{z_1} k [B'_\xi - B_{2\xi} (z - z_1)] (z - z_1) dz; \quad a_{22} = -a_{24}; \\
a_{23} &= \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{2} k B_{2\xi} (z - z_1) dz; \quad a_{24} = \int_{z_0}^{z_1} k B_{2\xi} (z - z_1) dz; \\
a_{25} &= \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{2} k B_{2\xi} (z - z_1)^3 + \frac{3}{2} e'_\xi \right] dz.
\end{aligned}$$

Список литературы: 1. Глазер В. Основы электронной оптики.— М.: Гостехтеоретиздат, 1957.— 763 с. 2. Искажения при отклонении электронных пучков / А. Б. Галат, А. К. Гнап, Ю. В. Дубровин, А. Г. Шейн // АСУ и приборы автоматики.— 1984.— Вып. 69.— С. 112—120.

Поступила в редколлегию 18.06.85