

количества основных и запасных модулей. Кривая, изображенная жирной линией, соответствует исходным данным 1-й задачи, тонкой — второй.

Ограничение (13) для обеих задач допускает максимальное количество модулей $m < 32$, а ограничение (2) допускает $m < 20$ для 1-й задачи и $m < 8$ для 2-й. Для наглядности кривые нанесены на рис. 2 построены и для случаев с количеством модулей, выходящим за зону ограничения.

В таблице приведены данные, полученные в процессе решения приведенных выше задач. Из таблицы видно, что для первой задачи оптимально разбиение блока на 10 модулей, а для второй — на пять. Оптимальное количество запасных модулей в первом случае — один, во втором — два. При толщине пластины $\Delta l = 0,01$ см высота модуля для первой задачи $l_1 = 2,5$ см, для второй — $l_2 = 4,9$ см.

Модульный принцип конструирования дает существенный экономический эффект. Так, для первой задачи необходимо иметь только один запасной модуль и суммарная стоимость составит 599,5 руб. При запасном целом блоке суммарная стоимость составляла бы 1000 руб. Экономический эффект $\Delta Z_1 = 400,5$ руб. Для второй задачи экономический эффект составляет $\Delta Z_2 = 772$ руб.

Список литературы: 1. Анисимов Б. В., Савельев А. Я. Основы конструирования и производства ЭВМ.—М.: Высш. школа, 1972.—278 с. 2. Сотсков Б. С. Основы теории расчета надежности элементов и устройств автоматки и вычислительной техники.—М.: Высш. школа, 1970.—230 с. 3. Кудыба Л. И. Основы расчета обеспечения электронной аппаратуры запасными элементами.—М.: Сов. радио, 1970.—215 с.

Поступила в редколлегию 26.11.80.

УДК 528.711.7

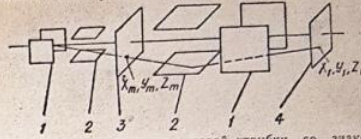
А. Б. ГАЛАТ, А. К. ГНАП,
канд. физ.-мат. наук,
Ю. В. ДУБРОВИН, А. Г. ШЕИН,
д-р физ.-мат. наук

ИСКАЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

В современной технике отображения информации в качестве индикаторов широко применяются электронно-лучевые трубки. Точность и достоверность воспроизведения информации существенно зависят от искажений, вносимых электронным лучом [1]. В электронно-лучевых трубках электронный поток фокусируется и перемещается в пространстве с помощью отклоняющих систем. В случае, когда при отклонении форма поперечного сечения пучка сохраняется, он переносит свою информацию, передаваемую ему внешним сигналом. С достаточной степенью

точности это выполняется в случае малых углов отклонения пучка. Если углы отклонения большие, возникают нарушения пропорциональности отклонения приложенному напряжению (либо току в катушках соленоида при электромагнитном отклонении), а также искажения формы поперечного сечения луча в области экрана или мишени.

Известны работы, посвященные теоретическим и экспериментальным исследованиям aberrаций второго и высших порядков электростатических и электромагнитных линз, применяющихся в электронно-лучевых приборах и устройствах [2, 3], поэтому мы не рассматриваем условия нарушения фокусировки линзами, а проводим анализ погрешностей изображения, возникающих при отклонении электронных пучков.



Отклоняющая система электронно-лучевой трубки со знаковой индикацией: 1 — пластины горизонтального отклонения; 2 — пластины вертикального отклонения; 3 — маска; 4 — мишень

Электронно-оптические основы теории отклонения пучков разработаны В. Глазером и Г. Вендтом. Ими получены выражения для коэффициентов aberrаций третьего порядка электромагнитных и комбинированных отклоняющих систем для случая отклонения луча в одном направлении.

В работе поставлена задача — получить выражения для коэффициентов aberrаций электростатической системы отклонения электронного луча в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а также определить конкретные виды искажений такой системой. Интересно оценить вклад каждой отклоняющей системы в общие aberrации в случае, если мы имеем несколько таких систем, расположенных последовательно одна за другой (например, в ЭЛТ со знаковой индикацией) [4].

Используем метод возмущений для расчета ошибок отклонения системы, состоящей из четырех пар отклоняющих пластин (рисунок, 1 — пластины горизонтального отклонения; 2 — вертикального; 3 — маска; 4 — мишень). 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.

Поле вертикального отклонения обозначим индексом η , поле горизонтального отклонения — ξ . В этом случае разложение потенциала отклоняющих полей в ряд

112

$$\varphi_{\text{от}}(x, y, z) = -E_{\eta}y - \frac{1}{2}E_{\eta 2}y^2 + \frac{1}{6}(E_{\eta 1} + E_{\eta 2})y^3 + \dots \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{ог}}(x, y, z) = -E_{\xi}x - \frac{1}{2}E_{\xi 2}x^2 + \frac{1}{6}(E_{\xi 1} + E_{\xi 2})x^3 + \dots$$

Учитывая ускоряющее напряжение U , записываем общий потенциал $\varphi = U + \varphi_{\text{ог}} + \varphi_{\text{от}}$ (2).
Функция Лагранжа, входящая в уравнение траекторий движения для электрического поля, после подстановки выражений (1), (2) имеет вид

$$F = \left(1 - \frac{E_{\eta}^2}{U^2}y - \frac{E_{\xi}^2}{U^2}x - \frac{1}{2}\frac{E_{\eta 2}}{U^2}y^2 - \frac{1}{2}\frac{E_{\xi 2}}{U^2}x^2 + \frac{1}{6}\frac{E_{\eta 1} + E_{\eta 2}}{U^2}y^3 + \frac{1}{6}\frac{E_{\xi 1} + E_{\xi 2}}{U^2}x^3 + \dots\right)^{\frac{1}{2}} [1 + (x')^2 + (y')^2]^{\frac{1}{2}}$$

Здесь и в дальнейшем штрихи означают производные по z . Полученное выражение разложим по восходящим степеням x , y и x' , y' , отбрасывая члены выше 3-го порядка:

$$F = 1 - \frac{E_{\eta}}{2U}y - \frac{E_{\xi}}{2U}x + \frac{1}{2}[(x')^2 + (y')^2] - \frac{1}{8}\frac{E_{\eta}^2}{U^2}y^2 - \frac{1}{8}\frac{E_{\xi}^2}{U^2}x^2 + \frac{1}{6}\frac{E_{\eta 1} + E_{\eta 2}}{2U}y^3 + \frac{1}{6}\frac{E_{\xi 1} + E_{\xi 2}}{2U}x^3 + \dots - \frac{1}{2}\frac{E_{\eta 2}}{U^2}y^2 - \frac{1}{2}\frac{E_{\xi 2}}{U^2}x^2 - \frac{1}{4}\frac{E_{\eta}}{U}[(x')^2 + (y')^2]y - \frac{1}{4}\frac{E_{\xi}}{U}[(x')^2 + (y')^2]x - \frac{1}{8}[(x')^2 + (y')^2]^2 = F_0 + F_2 + F_4,$$

где

$$F_0 = 1; F_2 = \frac{1}{2}[(x')^2 + (y')^2] - \frac{E_{\eta}}{2U}y - \frac{E_{\xi}}{2U}x, \\ F_4 = -\frac{1}{8}\frac{E_{\eta}^2}{U^2}y^2 - \frac{1}{8}\frac{E_{\xi}^2}{U^2}x^2 + \frac{1}{6}\frac{E_{\eta 1} + E_{\eta 2}}{2U}y^3 + \frac{1}{6}\frac{E_{\xi 1} + E_{\xi 2}}{2U}x^3 - \frac{1}{2}\frac{E_{\eta 2}}{U^2}y^2 - \frac{1}{2}\frac{E_{\xi 2}}{U^2}x^2 - \frac{1}{4}\frac{E_{\eta}}{U}[(x')^2 + (y')^2]y - \frac{1}{4}\frac{E_{\xi}}{U}[(x')^2 + (y')^2]x - \frac{1}{8}[(x')^2 + (y')^2]^2.$$

Идеальные приосевые траектории можно определить, подставляя в уравнения траекторий (2) значения $F = F_0 + F_2$:

$$\frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial F_2}{\partial x'} = \frac{\partial F_2}{\partial x}, \quad \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial F_2}{\partial y'} = \frac{\partial F_2}{\partial y}. \quad (3)$$

Интегрирование уравнений (3) приводит к

$$x = x_0 + x_1(z - z_1) + e_{\xi}; \quad x' = x_1 + e_{\xi}', \quad (4)$$

$$y = y_0 + y_1(z - z_1) + e_{\eta}; \quad y' = y_1 + e_{\eta}'$$

где x_0, y_0 — координаты точки пересечения луча с плоскостью мишени; x_1, y_1 — компоненты направления неотклоненного луча

(этот выбор начальных условий необходим для дальнейшего хода рассуждений); e_{ξ}, e_{η} — изменение угла наклона луча по отношению к осям x, y ; e_{ξ}', e_{η}' — идеальное отклонение соответственно по осям x, y .

$$e_{\xi}(z) = \int_{z_0}^z \frac{E_{\xi}(t)}{2U}(t - z) dt, \quad e_{\eta}(z) = - \int_{z_0}^z \frac{E_{\eta}(t)}{2U} dt.$$

Для e_{η} имеем аналогичное выражение с заменой индекса ξ на η . Введем обозначения:

$$f_1 = \frac{1}{8}\frac{E_{\eta}^2}{U^2}, \quad f_2 = -\frac{1}{6}\frac{E_{\eta 1} + E_{\eta 2}}{2U}, \quad f_3 = \frac{1}{2}\frac{E_{\eta 2}}{U^2}, \quad f_5 = \frac{1}{4}\frac{E_{\eta}}{U}, \\ f_6 = \frac{1}{8}\frac{E_{\xi}^2}{U^2}, \quad f_7 = -\frac{1}{6}\frac{E_{\xi 1} + E_{\xi 2}}{2U}, \quad f_8 = \frac{1}{2}\frac{E_{\xi 2}}{U^2}, \quad f_{10} = \frac{1}{4}\frac{E_{\xi}}{U}. \quad (5)$$

В выражении для F сумма $F_0 + F_2$ дает функцию идеального отклонения. Тогда с учетом формулы (5) получаем

$$-F_4 = f_1 y^2 + f_6 x^2 + f_2 y^3 + f_7 x^3 + f_3 x^2 y + f_5 y^2 x + f_8 [(x')^2 + (y')^2] y + f_{10} [(x')^2 + (y')^2] x + \frac{1}{8} [(x')^2 + (y')^2]^2. \quad (6)$$

Смещения точки пересечения луча с экраном $\Delta x_1, \Delta y_1$, которые возникают с учетом F_4 [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

$$W_4(x_1, y_1, x_1', y_1') = \int_{z_0}^z F_4 dz. \quad (7)$$

Подставляя формулу (6) в (7) и заменяя x, y, x', y' в соответствии с выражением (4), можно получить соотношения для W_4 .

В выражении для F_4 необходимо опустить член $\frac{1}{8}[(x')^2 + (y')^2]^2$, который возникает также в случае отсутствия отклоняющего поля и не должен учитываться в возмущающей функции F_4 .

В результате aberrации системы, приведенной на рисунке,

$$\Delta x = a_{11} + a_{21}x_1 + a_{11}y_1 + a_{16}y_1' + a_{14}x_1' + a_{12}y_1'^2 + a_{13}x_1y_1' + \\ + 2a_{22}x_1y_1' + a_{20}x_1y_1 + a_{20}(y_1')^2 + a_{21}y_1y_1' + a_{23}x_1'^2 + \\ + a_{22}x_1x_1' + a_{25}(x_1')^2; \quad (8)$$

$$\Delta y = a_1 + a_{21}y_1 + a_{12}x_1 + a_{16}x_1' + a_{25}y_1' + a_{26}x_1'^2 + \\ + a_{19}x_1y_1' + 2a_{26}x_1y_1' + a_{21}y_1x_1' + a_{22}x_1y_1' + a_2(x_1')^2 + \\ + a_3x_1x_1' + a_{11}y_1'^2 + a_{12}y_1y_1' + a_{13}(y_1')^2,$$

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

115

Для выделения коэффициентов aberrаций на маске из суммарных aberrаций обозначим

$$E_{\xi} = E_{\xi 1} + E_{\xi 11}, \quad E_{\eta} = E_{\eta 1} + E_{\eta 11}, \quad e_{\eta} = e_{\eta 1} + e_{\eta 11} + \Delta e_{\eta};$$

$$e_{\xi} = e_{\xi 1} + e_{\xi 11}, \quad E_{\xi 2} = E_{\xi 21} + E_{\xi 211}, \quad E_{\xi 12} = E_{\xi 121} + E_{\xi 1211};$$

$$e_{\xi} = e_{\xi 1} + e_{\xi 11} + \Delta e_{\xi}, \quad e_{\xi} = e_{\xi 1} + e_{\xi 11} -$$

координата маски $z = z_m$.

Подставляя эти значения в выражения П1—1... 25, находим развернутые значения коэффициентов aberrаций, которые здесь не приводим из-за их громоздкости. Поскольку при анализе не накладывали никаких ограничений на форму отклоняющих пластин, полученные соотношения и коэффициенты aberrаций могут быть использованы для расчета систем разной конфигурации.

Рассмотрим влияние угла схождения пучка на искажения. Для упрощения предположим, что неотклоненный луч движется строго по оси системы, поэтому $x_s = y_s = 0$. Обозначим половину угла раскрытия пучка через θ .

Пусть в некоторой плоскости $z = z_0$ радиус пучка равен r . Переходя в этой плоскости к полярным координатам $x_0 = r \cos \theta$, $y_0 = r \sin \theta$, получаем выражения для x_s и y_s : $x_s = -\omega \cos \theta$, $y_s = -\omega \sin \theta$. С учетом того, что луч движется по оси системы, перепишем уравнение (8) в виде

$$\Delta x = a_{14} - a_{16} \omega \sin \theta - a_{20} \omega \cos \theta + a_{20} \omega^2 \sin^2 \theta + a_{25} \omega^2 \cos^2 \theta; \quad \Delta y = a_1 - a_{16} \omega \cos \theta - a_{25} \omega \sin \theta + a_{20} \omega^2 \sin^2 \theta + a_{25} \omega^2 \cos^2 \theta + a_{13} \omega^2 \sin^2 \theta. \quad (9)$$

Поскольку угол идеального отклонения $\alpha_{\xi} = |e_{\xi}| (z_{\xi} = |e_{\xi}|)$ пропорционален соответствующей напряженности поля, можно записать

$$a_8 = a_7 b_8, \quad a_{13} = a_7 b_{13}, \quad a_{20} = a_7 b_{20}, \quad a_{25} = a_7 b_{25}, \quad a_{16} = a_7 a_{\xi} b_{16}.$$

Представим коэффициенты a_4 , a_5 в виде сумм $a_4 = a_{4\eta} + a_{4\xi}$, $a_5 = a_{5\eta} + a_{5\xi}$, где индексы η , ξ означают зависимость коэффициента только от параметров с данным индексом; b_i — коэффициент, определяемый формой отклоняющего поля; $\alpha_i(z_i)$ — угол идеального отклонения.

Аналогично $a_1 = a_{1\eta} + a_{1\xi}$, $a_{14} = a_{14\eta} + a_{14\xi}$, тогда

$$a_1 = a_{\eta}^2 b_{1\eta} + a_{\xi}^2 b_{1\xi}, \quad a_{14} = a_{\eta}^2 b_{14\eta} + a_{\xi}^2 b_{14\xi},$$

$$a_4 = a_{\eta}^2 b_{4\eta} + a_{\xi}^2 b_{4\xi}, \quad a_5 = a_{\eta}^2 b_{5\eta} + a_{\xi}^2 b_{5\xi}. \quad (10)$$

Подставляя уравнение (10) в (9), получаем

$$\Delta x = a_{\eta}^2 b_{14\eta} + a_{\xi}^2 a_{\eta}^2 b_{14\xi} - a_{\eta} a_{\xi}^2 b_{16} \omega \sin \theta - a_{\xi}^2 b_{16} \omega \cos \theta - a_{\eta}^2 b_{4\eta} \omega \cos \theta + a_{\xi}^2 b_{4\xi} \omega \sin \theta + a_{20} b_{20} \omega^2 \sin^2 \theta + a_{25} b_{25} \omega^2 \cos^2 \theta;$$

116

$$\Delta y = a_{\eta}^2 b_{1\eta} + a_{\xi}^2 a_{\eta}^2 b_{1\xi} - a_{\eta} a_{\xi}^2 b_{16} \omega \cos \theta - a_{\xi}^2 b_{16} \omega \sin \theta - a_{\eta}^2 b_{5\eta} \omega \sin \theta + a_{\xi}^2 b_{5\xi} \omega \sin \theta + a_{\eta} b_{20} \omega^2 \sin^2 \theta + a_{\xi} b_{25} \omega^2 \cos^2 \theta + a_{\eta} b_{13} \omega^2 \sin^2 \theta.$$

Проанализируем погрешности передачи изображения. Используя члены, зависящие от $a_{\xi} \omega^2$, и исключая из уравнений угол θ , для различных значений ω находим семейство кривых:

$$\frac{\Delta x^2}{(b_8 a_{\xi} \omega^2)^2} + \frac{\left[\Delta y - \frac{1}{2} (b_8 + b_{13}) a_{\xi} \omega^2 \right]^2}{\left[\frac{1}{2} (b_8 - b_{13}) a_{\xi} \omega^2 \right]^2} = 1. \quad (11)$$

Используем члены, зависящие от $a_{\eta} \omega^2$:

$$\frac{\left[\Delta x - \frac{1}{2} (b_{25} + b_{20}) a_{\eta} \omega^2 \right]^2}{\left[\frac{1}{2} (b_{25} - b_{20}) a_{\eta} \omega^2 \right]^2} + \frac{\Delta y}{(b_{20} a_{\eta} \omega^2)^2} = 1. \quad (12)$$

Уравнения (11), (12) описывают семейства эллипсов, которые при $b_{13} > 0$ и соответственно $b_{20} > 0$ имеют вид ком. При одновременном отклонении по обоим направлениям общая фигура также имеет вид комы, но центры эллипсов располагаются на прямой, наклоненной под некоторым углом к оси координат, а сами эллипсы также наклонены к осям координат. Приведем выражения для семейства эллипсов общей комы:

$$\Delta x - C_x = \sqrt{R_{xx}^2 + R_{yy}^2} \sin \left(2\theta + \arcsin \frac{R_{xx}}{\sqrt{R_{xx}^2 + R_{yy}^2}} \right);$$

$$\Delta y - C_y = \sqrt{R_{xx}^2 + R_{yy}^2} \sin \left(2\theta + \arcsin \frac{R_{yy}}{\sqrt{R_{xx}^2 + R_{yy}^2}} \right), \quad (13)$$

где

$$C_x = \frac{1}{2} (b_{25} + b_{20}) a_{\eta} \omega^2; \quad C_y = \frac{1}{2} (b_8 + b_{13}) a_{\xi} \omega^2;$$

$$R_{xx} = \frac{1}{2} (b_{25} - b_{20}) a_{\eta} \omega^2; \quad R_{yy} = \frac{1}{2} (b_8 - b_{13}) a_{\xi} \omega^2;$$

$$R_{yx} = b_{20} a_{\eta} \omega^2; \quad R_{xy} = b_8 a_{\xi} \omega^2.$$

Если

$$\left| \arcsin \left(\frac{R_{xx}}{\sqrt{R_{xx}^2 + R_{yy}^2}} \right) - \arcsin \left(\frac{R_{yy}}{\sqrt{R_{xx}^2 + R_{yy}^2}} \right) \right| = \frac{\pi}{2},$$

то уравнения (13) описывают семейство эллипсов с полуосями $\sqrt{R_{xx}^2 + R_{yy}^2}$, $\sqrt{R_{xx}^2 + R_{yy}^2}$ и с координатами центров, отстоящими от точки идеального отклонения на C_x , C_y .

При изменении разности углов от $\frac{\pi}{2}$ до 0 эллипсы, поворачиваясь, вырождаются в отрезок прямой

$$\Delta y = C_y + \sqrt{\frac{R_{xx}^2 + R_{yy}^2}{R_{xx}^2 + R_{yy}^2}} (\Delta x - C_x).$$

117

Анализируя члены, зависящие от $a_{\xi}^2 \omega$, $a_{\eta}^2 \omega$, для различных значений ω получаем семейство эллипсов:

$$\frac{\Delta x^2}{(a_{\eta}^2 b_{4\eta} + a_{\xi}^2 b_{4\xi})^2 \omega^2} + \frac{\Delta y^2}{(a_{\eta}^2 b_{5\eta} + a_{\xi}^2 b_{5\xi})^2 \omega^2} = 1.$$

Эта aberrационная фигура (астигматизм отклонения) особенно существенна при больших углах отклонения.

Члены, зависящие от $a_{\eta} a_{\xi} \omega$, дают кривые

$$\Delta x^2 + \Delta y^2 = (a_{\eta} a_{\xi} b_{16} \omega)^2 -$$

окружности, центры которых совпадают с осью пучка. Данная фигура появляется только при одновременном отклонении в обоих направлениях и представляет собой радиальное расширение диаметра пучка.

Члены, не зависящие от ω , определяют дисторсию

$$\Delta x = a_{\eta}^2 b_{14\eta} + a_{\xi}^2 a_{\eta}^2 b_{14\xi} = a_{14};$$

$$\Delta y = a_{\eta}^2 b_{1\eta} + a_{\xi}^2 a_{\eta}^2 b_{1\xi} = a_1.$$

Если $a_1 > 0$, $a_{14} > 0$, то получаем положительную дисторсию (фигура подушкообразная), если $a_1 < 0$, $a_{14} < 0$ — отрицательную (фигура бочкообразная).

Анализ полученных выражений позволяет определить погрешности передачи изображения системой. Кроме того, изменяя геометрию отклоняющих пластин, линейные размеры, можно регулировать значения коэффициентов aberrаций. Aberrации отклоняющей системы зависят от различных факторов, поэтому мы не приводим в работе результаты расчетов погрешностей изображения реальных систем на основе полученных выражений.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Выражения для коэффициентов aberrаций (уравнения П1)

$$a_1 = \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{4} \frac{E_{\eta}^2}{U^2} e_{\eta} (z-z_1) - \frac{1}{2} \left(\frac{E_{\eta}^* + E_{\eta 2}}{2U} \right) e_{\eta}^2 (z-z_1) + \frac{1}{2} \frac{E_{\eta 2}}{2U} e_{\eta}^2 (z-z_1) + \frac{E_{\eta 2}}{2U} e_{\eta} e_{\xi} (z-z_1) + \frac{1}{4} \frac{E_{\eta}^2}{U} [2e_{\eta} e_{\xi} + (e_{\xi}')^2 (z-z_1) + (e_{\xi}')^2 (z-z_1)] + \frac{1}{2} \frac{E_{\xi}}{U} e_{\xi} e_{\eta} + \frac{1}{2} (e_{\xi}')^3 + \frac{1}{2} e_{\xi}' (e_{\xi}')^2 \right] dz;$$

$$a_2 = \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{4} \frac{E_{\xi}^2}{U^2} e_{\xi} (z-z_1) + \frac{E_{\xi 2}}{2U} e_{\xi} (z-z_1) - \left(\frac{E_{\xi}^* + E_{\xi 2}}{2U} \right) e_{\xi}^2 (z-z_1) + \frac{1}{2} \frac{E_{\xi 2}}{U} e_{\xi}^2 (z-z_1) + \frac{E_{\xi 2}}{2U} e_{\eta} e_{\xi} (z-z_1) + \frac{1}{4} \frac{E_{\xi}^2}{U} [2e_{\eta} e_{\xi} + (e_{\eta}')^2 (z-z_1) + (e_{\eta}')^2 (z-z_1)] + \frac{1}{2} \frac{E_{\eta}}{U} e_{\eta} e_{\xi} + \frac{1}{2} (e_{\eta}')^3 + \frac{1}{2} e_{\eta}' (e_{\eta}')^2 \right] dz;$$

$$a_3 = \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{4} \frac{E_{\eta}^2}{U^2} (z-z_1) - \left(\frac{E_{\eta}^* + E_{\eta 2}}{2U} \right) e_{\eta} (z-z_1) + \frac{E_{\eta 2}}{2U} e_{\eta}^2 (z-z_1) + \frac{1}{2} \frac{E_{\eta 2}}{U} e_{\eta}^2 (z-z_1) \right] dz;$$

$$a_4 = \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{4} \frac{E_{\xi}^2}{U^2} (z-z_1)^2 - \left(\frac{E_{\xi}^* + E_{\xi 2}}{2U} \right) e_{\xi} (z-z_1)^2 + \frac{E_{\xi 2}}{2U} e_{\xi} (z-z_1)^2 + \frac{1}{2} \frac{E_{\eta}}{U} e_{\eta} + \frac{E_{\xi}}{U} \left[e_{\xi}' (z-z_1) + \frac{1}{2} e_{\xi}' \right] + \frac{3}{2} (e_{\xi}')^2 + \frac{1}{2} (e_{\eta}')^2 \right] dz;$$

$$a_5 = \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{4} \frac{E_{\eta}^2}{U^2} (z-z_1)^2 - \left(\frac{E_{\eta}^* + E_{\eta 2}}{2U} \right) e_{\eta} (z-z_1)^2 + \frac{E_{\eta 2}}{2U} e_{\eta} (z-z_1)^2 + \frac{E_{\eta}}{U} e_{\eta}' (z-z_1) + \frac{1}{2} \frac{E_{\eta}}{U} e_{\eta} + \frac{1}{2} \frac{E_{\xi}}{U} e_{\xi} + \frac{1}{2} (e_{\eta}')^2 + \frac{3}{2} (e_{\eta}')^2 \right] dz;$$

$$a_6 = \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{2} \frac{E_{\eta 2}}{2U} (z-z_1) dz;$$

$$a_7 = \int_{z_0}^{z_1} \frac{E_{\eta 2}}{2U} (z-z_1) dz;$$

$$a_8 = \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{4} \frac{E_{\eta 2}}{2U} (z-z_1)^3 + \frac{1}{4} \frac{E_{\eta}}{U} (z-z_1) + \frac{1}{2} e_{\eta}' \right] dz;$$

$$a_9 = \int_{z_0}^{z_1} \frac{E_{\eta 2}}{2U} (z-z_1)^2 dz; \quad a_{10} = \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{E_{\eta 2}}{2U} (z-z_1)^2 + \frac{1}{2} \frac{E_{\eta}}{U} \right] dz;$$

$$a_{11} = - \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{E_{\eta}^* + E_{\eta 2}}{2U} \right) (z-z_1) \right] dz;$$

$$a_{12} = \int_{z_0}^{z_1} \left[- \left(\frac{E_{\eta}^* + E_{\eta 2}}{2U} \right) (z-z_1)^2 + \frac{1}{2} \frac{E_{\eta}}{U} \right] dz;$$

$$a_{13} = \int_{z_0}^{z_1} \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{E_{\eta}^* + E_{\eta 2}}{2U} \right) (z-z_1)^3 + \frac{3}{4} \frac{E_{\eta}}{U} (z-z_1) + \frac{3}{2} e_{\eta}' \right] dz;$$

$$a_{14} = \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{4} \frac{E_{\xi}^2}{U^2} e_{\xi} (z-z_1) - \frac{1}{2} \left(\frac{E_{\xi}^* + E_{\xi 2}}{2U} \right) e_{\xi}^2 (z-z_1) + \frac{1}{2} \frac{E_{\xi 2}}{2U} e_{\xi}^2 (z-z_1) + \frac{E_{\xi 2}}{2U} e_{\eta} e_{\xi} (z-z_1) + \frac{1}{4} \frac{E_{\xi}^2}{U} [2e_{\eta} e_{\xi} + (e_{\eta}')^2 (z-z_1) + (e_{\eta}')^2 (z-z_1)] + \frac{1}{2} \frac{E_{\eta}}{U} e_{\eta} e_{\xi} + \frac{1}{2} (e_{\eta}')^3 + \frac{1}{2} e_{\eta}' (e_{\eta}')^2 \right] dz;$$

118

119

И. М. МАЯКО, канд. техн. наук,
А. М. СИНЮТИН, канд. техн. наук,
А. А. ЧЕРНЫШЕНКО, канд. техн. наук

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ
ПРИБОРОВ АСУ С НЕРАВНОМЕРНЫМ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ МОЩНОСТИ**

При расчете и проектировании теплонагруженных приборов автоматизированных систем управления возникает необходимость учета их тепловых режимов. Из-за неравномерной концентрации тепловыделяющих элементов, либо вследствие применения в электрических схемах элементов с различной рассеиваемой мощностью по объему прибора создается неоднородное тепловыделение. Поэтому наряду с другими параметрами [1] необходимо учитывать параметр неравномерности распределения удельной мощности (W Вт/м³) источников тепла β_w .

Аналогичное выражение для β_w можно получить из общего решения уравнения теплопроводности для квазиздородного, анизотропного по теплопроводности тела (нагретая зона РЭА с плотным монтажом [1]) в форме параллелепипеда $2l_x \times 2l_y \times 2l_z$ с неравномерным симметричным распределением мощности источников тепла. На границе тела происходит теплообмен по закону Ньютона (граничные условия 3-го рода) при нулевых начальных условиях.

Применяя для решения дифференциального уравнения теплопроводности метод двойного разделения переменных [2] и ограничиваясь первым членом ряда общего решения, приходим к следующему выражению для β_w в стационарном режиме:

$$\beta_w = \frac{\int_0^l \int_0^l \int_0^l \frac{W(x, y, z)}{W} U_x U_y U_z dx dy dz}{\int_0^l \int_0^l \int_0^l U_x U_y U_z dx dy dz}; \quad (1)$$

$$U_i = \cos \mu_i \frac{i}{l_i}; \quad i = x, y, z; \quad (2)$$

$$\mu_i \operatorname{tg} \mu_i = Bi_i; \quad Bi_i = \frac{k_i l_i}{\alpha_i}; \quad (3)$$

$$W = \frac{P}{8l_x l_y l_z}; \quad (4)$$

где P — мощность всех источников тепла $\sum_{i=1}^n P_i$, Вт; K_i — коэффициент теплопередачи от i -й грани к окружающей среде, Вт/(м²·К); λ_i — коэффициент теплопроводности вдоль оси симметрии параллелепипеда $I = X, Y, Z$, Вт/(м·К).

$$\begin{aligned} & + \frac{1}{2} \frac{E_1}{U} e_1^2 e_1 + \frac{1}{2} (e_1^3) + \frac{1}{2} e_1^2 (e_1^2) dz; \\ a_{15} = & \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{E_{12}}{2U} e_1 (z-z_1) + \frac{E_{12}}{2U} e_1 (z-z_1) + \frac{1}{2} \frac{E_1}{U} e_1^2 \right] dz; \\ a_{16} = & \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{E_{12}}{2U} e_1 (z-z_1)^2 + \frac{E_{12}}{2U} e_1 (z-z_1)^2 + \frac{1}{2} \frac{E_1}{U} e_1^2 (z-z_1) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \frac{E_1}{U} e_1^2 (z-z_1) + e_1^2 e_1^2 \right] dz; \\ a_{17} = & \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{E_{12}}{2U} e_1 (z-z_1) + \frac{E_{12}}{2U} e_1 (z-z_1) + \frac{1}{2} \frac{E_1}{U} e_1^2 \right] dz; \quad a_{18} = \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{4} \frac{E_{12}}{U} \times \\ & \times (z-z_1) dz; \quad a_{19} = \int_{z_0}^{z_1} \frac{E_{12}}{2U} (z-z_1) dz; \quad a_{20} = \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{1}{4} \frac{E_{12}}{U} (z-z_1)^3 + \frac{1}{4} \times \right. \\ & \times \frac{E_1}{U} (z-z_1) + \frac{1}{2} e_1^2 \left. \right] dz; \quad a_{21} = \int_{z_0}^{z_1} \frac{E_{12}}{2U} (z-z_1)^2 dz; \quad a_{22} = \int_{z_0}^{z_1} \left[\frac{E_{12}}{2U} (z-z_1)^2 + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \frac{E_1}{U} \right] dz; \quad a_{23} = \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{2} \left(\frac{E_1^2 + E_{12}}{2U} \right) (z-z_1) dz; \quad a_{24} = \int_{z_0}^{z_1} \left[- \left(\frac{E_1^2 + E_{12}}{2U} \right) \times \right. \\ & \times (z-z_1)^2 + \frac{1}{2} \frac{E_1}{U} \left. \right] dz; \quad a_{25} = \int_{z_0}^{z_1} \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{E_1^2 + E_{12}}{2U} \right) (z-z_1)^3 + \frac{3}{4} \frac{E_1}{U} (z-z_1) + \right. \\ & \left. + \frac{3}{2} e_1^2 \right] dz. \end{aligned}$$

Список литературы: 1. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображения / Под ред. Б. Кейзана.— М.: Мир, 1978.—Т. 1.—338 с. 2. Глазер В. Основы электронной оптики.— М.: ГИТТЛ, 1957.—763 с. 3. Ячменев С. И. Оптимальные электронно-проецирующие системы с уменьшенными до субмикронных размеров элементами изображения маски. Ч. 1. Ошибки оптического изображения.— Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1979, вып. 6, с. 52—62. 4. Дубровин Ю. В. Проектирование и исследование отклоняющих устройств систем передачи изображения.— Гибридные вычисл. машины.— К.: Наук. думка, 1979, с. 157—164.

Поступила в редколлегию 12.02.82.