

УДК 621.3

## ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ МУАРОВАЯ КАРТИНА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРЯМОГО ТОКА

© В.М. Иванов, С. Фофана, Е.Б. Винокуров, С.В. Васильева

*Ключевые слова:* муаровый узор; магнитное поле; электронно-оптическая система.

Установлена количественная связь между магнитным полем прямолинейного проводника и картиной муарового узора, полученной в электронно-оптической системе.

Радиоэлектронные устройства, работающие в магнитных полях малой протяженности, подвержены отрицательному влиянию локальной взаимной индукции, создающей широкий спектр помех. При расчете и моделировании этих полей возникают трудности, связанные с учетом геометрических и физических особенностей границ раздела в этих областях [1]. Многочисленность трудно учитываемых факторов требует прямых методов исследования магнитных полей рассеяния малой протяженности. К данным методам можно отнести электронно-оптические, оптические теневые и электронно-оптические. В работе применяется метод муаровых картин, позволяющий установить связь между величиной магнитного поля и объектом, создающим это поле. Эксперименты по получению муаровых картин от магнитных полей рассеяния проводились на электронном микроскопе ЭМВ-100А, схема наблюдения которых представлена на рис. 1. Муаровый узор возникает при совмещении эталонной и искаженной сеток. Искажение эталонной сетки с прямоугольными  $(0,1 \times 0,1) \cdot 10^{-3}$  м ячейками получается в результате теневой электронно-оптической проекции из точечного источника. Конус лучей оказывается разбитым на отдельные пучки, сечения которых определяются геометрией ячеек сетки и геометрией съемки. Данные условия съемки позволяют получить на экране четырехкратное увеличение сетки  $(0,4 \times 0,4) \cdot 10^{-3}$  м.

Если между сеткой и экраном электроны проходят через магнитное поле, то под влиянием силы Лоренца они изменяют первоначальное направление и, следовательно, изображение сетки исказится. Сравнение изображения сетки, получаемого после прохождения электронов через возмущающее поле, и изображения сетки в отсутствие поля могут служить характеристикой поля.

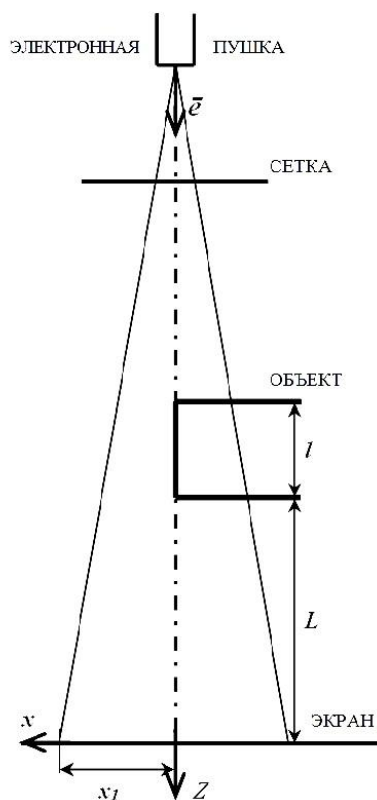
При анализе полученных экспериментальных данных будем считать, что равные по напряженности поля вызывают равные геометрические смещения искаженного изображения сетки.

На изображении муарового узора (рис. 2) наблюдаются три особенности: совпадение горизонтальных линий, совпадение вертикальных линий, а также узлы, в которых совпадают ячейки искаженного и неискаженного изображения сетки. Горизонтальные линии дают геометрическое место точек, в которых равны смещения по вертикальному направлению и, соответственно,

равны горизонтальные составляющие поля. Аналогично центры вертикальных штрихов дают геометрическое место точек, в которых равны вертикальные составляющие поля.

Для расчета смещения электронного пучка воспользуемся уравнением движения электрона в магнитном поле [2]:

$$\frac{dP}{dt} = -e[\mathbf{v}B], \quad (1)$$



**Рис. 1.** Схема получения муаровой картины магнитного поля прямого тока:  $\vec{e}$  – поток электронов;  $l$  – длина линейного проводника;  $L$  – расстояние от проводника до экрана;  $x_1$  – смещение пучка электронов

где  $P$  – импульс;  $e$  – заряд;  $v$  – скорость электрона.

Выразив ускорение релятивистского электрона через его скорость и индукцию магнитного поля, получим в общем случае:

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{e}{m} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} [vB], \quad (2)$$

где  $m$  – масса электрона.

В магнитном поле скорость электрона меняется только по направлению, поэтому, решая уравнение (1), получим:

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{e}{m} \sqrt{1 - \frac{v_{zo}^2}{c^2}} v_{zo} B_y; \quad (3)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{e}{m} \sqrt{1 - \frac{v_{zo}^2}{c^2}} v_{zo} B_x; \quad (4)$$

$$\frac{dv_z}{dt} = 0; \quad (5)$$

$$v_z = -v_{zo}. \quad (6)$$

Второй интеграл уравнений (3) и (4) и первый интеграл уравнения (6) дает с учетом начальных и граничных условий для нижней границы поля протяженностью  $l$  смещения по оси  $X$  в виде:

$$x - x_0 = -\frac{e}{m} \sqrt{1 - \frac{v_{zo}^2}{c^2}} B_y \frac{l^2}{2v_{zo}}. \quad (7)$$

Аналогичным образом запишется выражение для смещений по оси  $Y$ .

Покинув поле протяженностью  $l$ , электрон движется далее по касательной траектории в точке  $(x, y)$ , лежащей на нижней границе поля. На расстоянии  $L$  от точки в плоскости  $XOY$  частица сместится по осям на расстояние  $x_1 - x = L \cdot \operatorname{tg} \alpha$ ,  $y_1 - y = L \cdot \operatorname{tg} \beta$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  – углы вылета электрона из поля:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{v_x}{v_{zo}}; \quad \operatorname{tg} \beta = -\frac{v_y}{v_{zo}}.$$

С учетом этого получаем выражение для смещений на расстояние  $L$  от нижней границы поля:

$$x_1 - x = -\frac{e}{m} \sqrt{1 - \frac{v_{zo}^2}{c^2}} B_y \frac{lL}{v_{zo}}. \quad (8)$$

Полное смещение электрона по осям  $X$  складывается из смещений, определяемых выражениями (7) и (8):

$$x_1 - x = -\frac{e}{m} \sqrt{1 - \frac{v_{zo}^2}{c^2}} B_y \frac{l}{v_{zo}} \left( \frac{l}{2} + L \right). \quad (9)$$

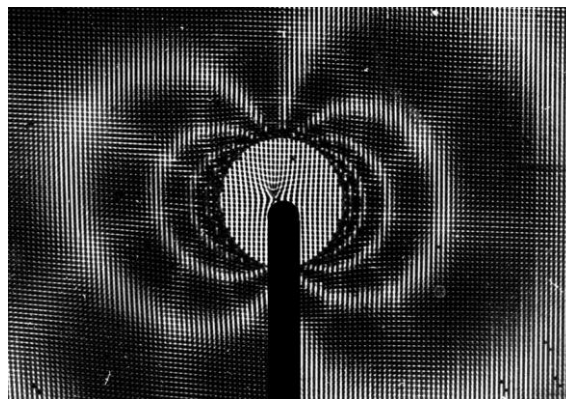


Рис. 2. Электронно-оптический муар магнитного поля прямого тока

Введение полярных координат для рассматриваемого нами осесимметричного случая приводит соотношения для полных смещений электрона к виду:

$$|H| = \frac{(r_1 - r) v_{zo}}{\frac{e}{m} \sqrt{1 - \frac{v_{zo}^2}{c^2}} l \cdot \left( \frac{l}{2} + L \right) \mu_0}, \dots \quad (10)$$

где  $r_0$  – радиус круга, по которому электроны входят в поле на верхней границе поля;  $r_1$  – радиус круга смещения на экране;  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  Гн/м; при ускоряющем напряжении  $U = 40$  кВ;  $e/m = 1,759 \cdot 10^{11}$  Кл/кг;  $l = 1 \cdot 10^{-2}$  м;  $L = 0,4$  м.

Для наших условий съемки получаем расчетную формулу:

$$|H| = 1,44 \cdot 10^5 (r_1 - r_0). \quad (11)$$

Отклонение пучка электронов в интересующем нас направлении может быть легко измерено по муаровой картине, т. к. оно равно произведению номера полосы (отсчитанному от некоторой фиксированной, называемой обычно нуль-полосой, где  $H_r = 0$ ) на размер ячейки в изображении неискаженной сетки [3].

Например, при токе 8 А (рис. 2) отклонение электронного пучка для полосы с напряженностью  $H = 170$  А/м составит:

$$r_1 - r_0 = n \cdot d = 3 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

где  $n = 3$  – третья по счету полоса;  $d = 0,4 \cdot 10^{-3}$  м – увеличенное изображение сетки.

Таким образом, предложенная методика наблюдения магнитных полей рассеяния с помощью электронно-оптической муаровой картины позволяет видеть искажения полей на проводящих объектах под током и облегчает задачу их расчета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.М., Плужникова Т.Н., Лановая А.В., Лозенков А.А., Винокуров Е.Б. Механизмы электромагнитного разрушения элементов электрооборудования и электроники // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2009. № 9. С. 114-120.

2. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика. Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1963. 362 с.
3. Дюрелли А., Паркс В. Анализ деформаций с использованием муара. М.: Мир, 1974. 356 с.

Поступила в редакцию 21 ноября 2013 г.

Ivanov V.M., Fofana S., Vinokurov Y.B., Vasilyeva S.V.  
ELECTRONIC OPTICAL MOIRE PATTERN OF DIRECT  
LINEAR CONDUCTOR MAGNETIC FIELD

The quantitative relation between magnetic field of direct linear conductor and moire pattern produced in electronic optical system is calculated.

*Key words:* moire pattern; magnetic field; electronic optical system.

Иванов Владимир Михайлович, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования и автоматизации, e-mail: ivanov.tstu.@.ru

Ivanov Vladimir Mikhailovich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Electric Equipment and Automation Department, e-mail: ivanov.tstu.@.ru

Фофана Синду, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, аспирант, кафедра электрооборудования и автоматизации, e-mail: fofana sindou.@.hotmail.com

Fofana Sindou, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Post-graduate Student, Electric Equipment and Automation Department, e-mail: fofana sindou.@.hotmail.com

Винокуров Евгений Борисович, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры электрооборудования и автоматизации, e-mail: evg.vinokurov@yandex.ru

Vinokurov Yevgeniy Borisovich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Candidate of Education, Senior Lecturer of Electric Equipment and Automation Department, e-mail: evg.vinokurov@yandex.ru

Васильева Светлана Васильевна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, зав. лабораториями кафедры общей физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Vasilyeva Svetlana Vasilyevna, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Head of Laboratories of General Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru