

А. А. Шпилевой, В. Е. Пониматкин

**ПОСТРОЕНИЕ ОБЛУЧАЮЩЕГО КОНТУРА
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ
ВТОРИЧНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

Предложена методика построения системы магнитных катушек рабочей области, в которой возбуждается облучающее образец магнитное поле, используемое для изучения параметров системы вторичных излучателей. Теоретически рассчитана и практически реализована модель облучателя, обеспечивающая создание однородного магнитного поля в рабочей области. Выполненные измерения распределения магнитного поля в облучателе позволяет судить о целесообразности использования системы в экспериментальных методиках.

Suggest a method for constructing a system of magnetic coils, of the workspace in which excited облучающее sample magnetic field used to study the parameters of the system of secondary emitters. Theoretically formulated and practically implemented model of the feed, providing the creation of a uniform magnetic field on the stage. The measurements of the distribution of magnetic field in облучателе to judge the appropriateness of the use of the system in experimental techniques.



Ключевые слова: облучающий контур, вторичные излучатели, катушки Гельмгольца, градиент напряженности магнитного поля.

Key words: radiative circuit, secondary emitters, Helmholtz coils, gradient of the intensity of magnetic field.

Рассмотрение параметров вторичных излучателей (например, в методах ядерной спектроскопии [1]) возможно при создании в локальной области пространства мощных электромагнитных полей. В биологических целях, например, используются индукторы с цилиндрическим магнитопроводом, охватывающим рабочую полость для размещения изучаемого объекта [2]. В настоящее время выполнение исследований параметров вторичных излучателей является одним из проблемных вопросов разработки электронных приборов поиска и изучения различных кристаллических соединений, веществ и живых организмов.

В работе предлагается методика построения рабочей области, в которой возбуждаются мощные магнитные поля. Распространенным средством для создания однородного магнитного поля в локальной области служат катушки Гельмгольца [3]. Известно [4], что значение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля внутри системы колец Гельмгольца определяется выражением

$$H = 0,89918 \frac{I \cdot W}{R} \cdot \left[\begin{array}{l} 1 - \frac{b^2}{15R^2} - 0,042667 \left(2 \frac{x^2}{R^2} - \frac{y^2}{R^2} \right) \left(36 \frac{a^2}{R^2} - 31 \frac{b^2}{R^2} \right) - \\ - 0,144 \left(8 \cdot \frac{x^4}{R^4} - 24 \frac{x^2 y^2}{R^4} + 3 \frac{y^4}{R^4} \right) \end{array} \right], \quad (1)$$

где H — горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля, А/м; I — ток, протекающий по катушкам, А; W — число витков каждой катушки; R, d, a, b — линейные размеры системы, обозначения которых показаны на рисунке 1; x, y — координаты точек пространства.

Последнее справедливо при условии $R = 2d$.

Выражение (1) может быть упрощено, если размеры обмоток катушек связаны соотношением $a = 0,928 \cdot b$.

В этом случае напряженность магнитного поля вдоль горизонтальной оси системы $y = 0$ определится следующим образом:

$$H_{x,0} = 0,89918 \frac{I \cdot W}{R} \cdot \left[1 - \frac{b^2}{15R^2} - 0,144 \left(8 \cdot \frac{x^4}{R^4} \right) \right], \quad (2)$$

В центре рабочей области при $x = 0$ и $y = 0$ имеет место

$$H_{0,0} = 0,89918 \frac{I \cdot W}{R} \cdot \left[1 - \frac{b^2}{15R^2} \right]. \quad (3)$$

Абсолютное значение относительного отклонения напряженности магнитного поля в точке с координатами (x, y) от напряженности в центре $(x = 0, y = 0)$ на основании выражений (2) и (3) равно:

$$\delta \cdot H_{x,y} = \frac{|H_{x,y} - H_{0,0}|}{H_{0,0}} = 0,144 \cdot \left(\frac{x}{R} \right)^4 \cdot \frac{\left[8 - 24 \cdot \left(\frac{y}{x} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{y}{x} \right)^4 \right]}{1 - \frac{b^2}{15 \cdot R^2}}. \quad (4)$$



Если $(y/x)^2 = \eta$, то $A(\eta) = 0,144 \cdot |(8 - 24\eta + 3\eta^2)|$ и, соответственно,

$$|\delta \cdot H_{x,y}| = \left(\frac{x}{R}\right)^4 \cdot \frac{A(\eta)}{1 - \frac{b^2}{15 \cdot R^2}}. \quad (5)$$

Относительное отклонение напряженности поля в точках с координатами $(x, 0)$ и $(0, y)$ от напряженности $H_{0,0}$ на основании выражения (5) равно:

$$|\delta \cdot H_{x,0}| = \frac{|H_{x,0} - H_{0,0}|}{H_{0,0}} = \left(\frac{x}{R}\right)^4 \cdot \frac{1,152}{1 - \frac{b^2}{15 \cdot R^2}}; \quad (6)$$

$$|\delta \cdot H_{0,y}| = \frac{|H_{0,y} - H_{0,0}|}{H_{0,0}} = \left(\frac{y}{R}\right)^4 \cdot \frac{0,432}{1 - \frac{b^2}{15 \cdot R^2}}. \quad (7)$$

Используя (5), (6) и (7), получим

$$\frac{\delta \cdot H_{x,y}}{\delta \cdot H_{x,0}} = \frac{A(\eta)}{1,152} = 1 - 3\eta - \frac{3}{8} \cdot \eta^2; \quad (8)$$

$$\frac{\delta \cdot H_{0,y}}{\delta \cdot H_{x,0}} = \frac{A(\eta)}{1,152} = 0,375 \cdot \eta^2. \quad (9)$$

Из выражения (8) следует, что относительное отклонение напряженности магнитного поля в точке с координатами (x, y) больше относительного отклонения в точке с координатами $(x, 0)$, если

$$\eta > 0,733. \quad (10)$$

Из равенства (9) видим, что градиент изменения напряженности поля по вертикали оси Y системы катушек Гельмгольца меньше, чем по ее горизонтальной оси X (рис. 1).

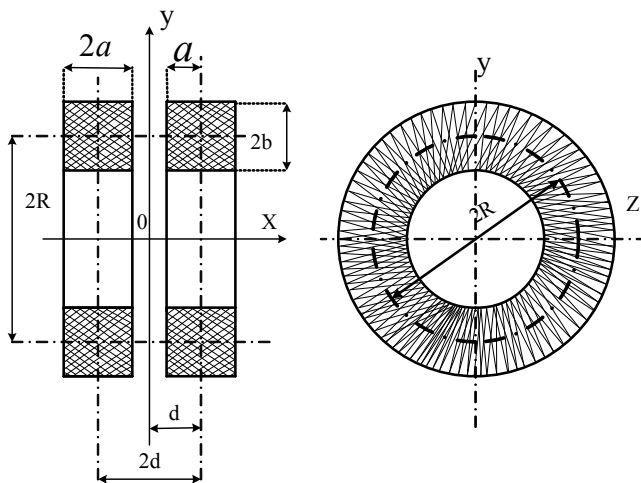


Рис. 1. Система катушек Гельмгольца с характерными геометрическими параметрами



Условие (10) означает, что в случае выполнения для области пространства внутри катушек Гельмгольца $y < 0,855 \cdot x$ (характерно для большинства случаев) при расчете их геометрии можно ограничиться лишь учетом величины $\delta \cdot H_{x,0}$. Воспользуемся данным приближением для дальнейших расчетов.

Из сравнения выражений (2) и (3) следует, что уменьшение напряженности поля вдоль X от центра системы к ее периферии зависит как от расстояния от точки 0, так и от соотношения размеров b и R .

Оценим влияние соотношения b/R , положив $x = d$. Тогда

$$H_{d,0} = 0,89918 \cdot \frac{I \cdot W}{R} \cdot \left[\left(1 - \frac{b^2}{15R^2} \right) - 0,072 \right] \quad (11)$$

$$\text{и } \delta \cdot H_{d,0} = \frac{|H_{d,0} - H_{0,0}|}{H_{0,0}} = \frac{0,072}{1 - \frac{b^2}{15R^2}}. \quad (12)$$

На основании выражений (11), (12) следует, что при $b/R = 2/5$ влияние данного условия лежит в пределах 1% от величины изменения поля. Поэтому при расчете геометрии катушек следует исходить из соотношения, что $b/R \leq 2/5$.

Для анализа изменений поля вдоль горизонтальной оси системы воспользуемся выражением (4). При этом расстояние вдоль оси выразим через геометрические параметры системы катушек d и a (рис. 1). Результаты расчета относительного ослабления поля вдоль оси X приведены в таблице и на рисунке 2.

Таблица 1

Относительное ослабление напряженности магнитного поля по горизонтальной оси катушек Гельмгольца

Высота обмотки, b	Относительное ослабление поля (%) при расстоянии от центра системы							
	0	$d - a$	$d - a/2$	$d - a/3$	d	$d + a/3$	$d + a/2$	$d + a$
$R/2$	0	0,008	0,6	1,7	7,8	21,5	33,6	100
$R/4$	0	0,6	2,5	3,7	7,2	9,7	16,6	33,6
$R/8$	0	2,5	4,4	5,2	7,2	8,4	11,2	16,6

На рисунке 2 показано относительное ослабление напряженности магнитного поля катушек Гельмгольца вдоль горизонтальной оси X при различной высоте обмоток b : график 1 – при $b = R/2$; график 2 – при $b = R/4$; график 3 – при $b = R/8$.

Представленные результаты дают возможность оценить связь между геометрическими размерами системы катушек Гельмгольца и размерами



рабочей области для выполнения натуральных исследований вторичного излучения [1]. При этом исследуемый объект вторичного излучения должен располагаться внутри системы, симметрично относительно центра так, что его наибольшая длина совпадает с направлением оси X.

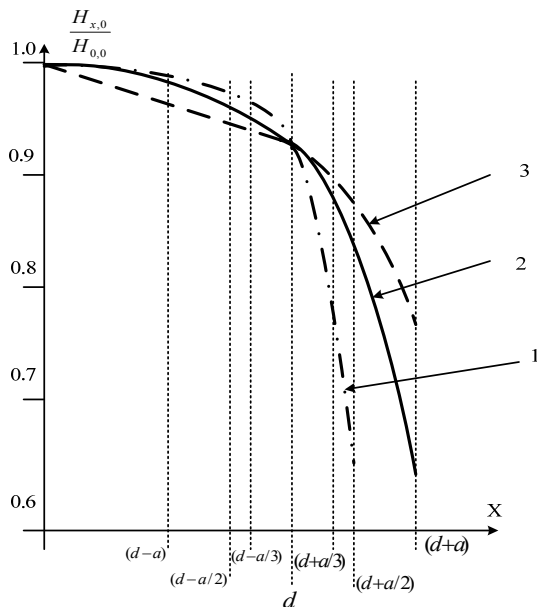


Рис. 2. Относительное ослабление поля катушек Гельмгольца вдоль оси X

Обозначив горизонтальный линейный размер объекта исследования через 2ℓ и приняв $R = nb$, можно записать систему уравнений

$$\begin{cases} \ell = d + ka, \\ b = \frac{1}{n} \cdot R = \frac{a}{0,928} = 2d / n' \end{cases} \quad (13)$$

где k – произвольное число от -1 до +1.

Решение системы относительно a и d позволит определить:

$$d = \frac{0,54 \cdot n}{0,54 \cdot n + k} \cdot \ell; \quad a = \frac{1}{0,54n + k} \cdot \ell. \quad (14)$$

Таким образом, принимая значения 2ℓ равное наибольшему линейному размеру исследуемого объекта, несложно обосновать геометрические размеры и построить модель облучателя для исследования параметров вторичных излучений. При этом коэффициенты n и k выбираются в зависимости от заданного уровня допустимого ослабления поля по графикам рисунка 2 и таблицы.

Данная модель использована для расчета и построения облучателя в качестве испытательной установки для выполнения исследований в равномерном магнитном поле напряженностью 350 эрстед и размерами установки $600 \times 600 \times 700$ мм при отклонениях напряженности поля в рабочей зоне, не превышающих $\pm 1\%$.



Исходя из приведенных расчетов, выбираем коэффициенты: $k = 1/3$ и $n = 4$. В этом случае выполнены расчеты параметров: $\ell = 350$ мм; $a = 0,2 \ell = 302$ мм, $d = 0,2 \ell = 140$ мм, а следовательно, $R = 600$ мм и $b = 150$ мм. По расчетным параметрам создана экспериментальная установка. Результаты измерений напряженности магнитного поля экспериментальной установки, выполненные вдоль осей X и Y приведены на рисунках 3 и 4.

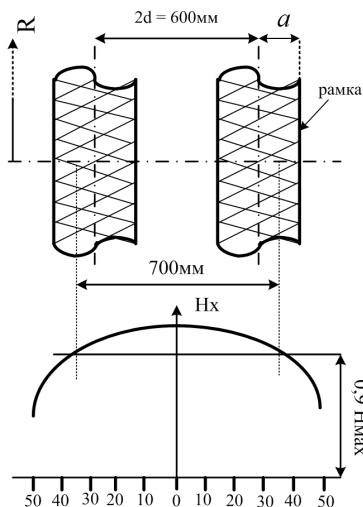


Рис. 3. График относительного изменения поля катушек Гельмгольца в рабочей области вдоль оси X при $H_{0,0} = 28$ кА/м

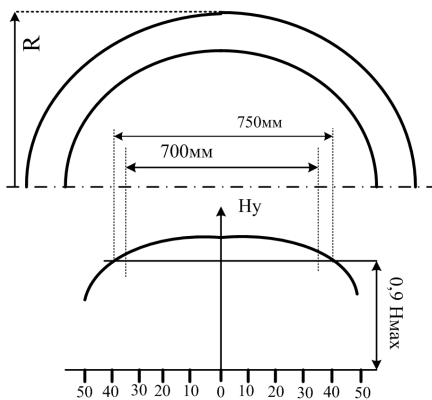


Рис. 4. График относительного изменения поля катушек Гельмгольца в рабочей области вдоль оси Y при $H_{0,0} = 28$ кА/м

Как следует из графиков распределения магнитного поля в рабочей области, изменение его величины не превышает 1%, что свидетельствует о целесообразности использования предлагаемой конструкции для проведения исследований параметров вторичных излучателей.



Список литературы

1. *Suits B.H., Garroway A.N., Miller J.B., Sauer K.L.* 14 N magnetic resonance for materials detection in the field // *Solid State Nucl. Magn. Reson.* 2003. №24, P. 123–136.
2. *Синявский Н.Я., Шпилевой А.А.* Особенности косвенной регистрации сигналов ядерного квадрупольного резонанса взрывчатых веществ // *Радиотехника.* 2009. №2. С. 131–134.
3. *Grechishkin V.S., Shpilevoi A.A., Dykin V.A.* Special features of remote observations of weak signals from ^{14}N nuclear quadrupole resonance // *Russian Physics Journal.* 2008. Vol. 51, iss. 8. P. 778–782.
4. *Карасик В.Р.* Физика и техника сильных магнитных полей. М., 1964.

Об авторах

Андрей Алексеевич Шпилевой — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Виктор Ефимович Пониматкин — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

About the authors

Andrey A. Shpilevoy — PhD, Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Viktor E. Ponimatkin — PhD, Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru