

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В ПОМЕЩЕНИЯХ

Пелевин Д.Е.

Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины

Украина, 61106, Харьков, 106, ул. Индустриальная, 19

тел./факс +38(0572) 99-21-62, e-mail: magnetizm@kharkov.com

Розроблено метод визначення первинних даних для електромагнітних пристроїв керування магнітним полем у приміщеннях, заснований на прямих вимірюваннях напруженості магнітного поля у заданому об'ємі приміщення у вузлах просторової сітки. Для обробки первинного масиву даних використовується метод інтерполяції кубічною сплайн-функцією, а первинні дані наводяться кількісно – у вигляді матриць та графічно – у вигляді карт розподілу магнітного поля на паралельних та ортогональних площинах.

Разработан метод определения исходных данных для электромагнитных устройств управления магнитным полем в помещениях, основанный на прямых измерениях напряженности магнитного поля в заданном объеме помещения в узлах пространственной сетки. Для обработки первичного массива данных используется метод интерполяции кубической сплайн-функцией, а исходные данные представляются количественно – в виде матриц и графически – в виде карт распределения магнитного поля на параллельных и ортогональных плоскостях.

ВВЕДЕНИЕ

В основу технологии выбора параметров электромагнитных устройств управления магнитным полем положено, во-первых, знание исходных (до установки устройства) данных об искажениях напряженности геомагнитного поля в заданном локальном объеме V помещения и, во-вторых, - требуемая эффективность снижения этих искажений [1].

Цель работы – разработка методики определения исходных данных для электромагнитных устройств управления магнитным полем в заданном объеме помещения.

В малых объемах (единицы дм^3), именуемыми в дальнейшем микрообъемами, в качестве характеристики искажений геомагнитного поля используют чаще всего такой показатель, как отклонение индукции геомагнитного поля в геометрическом центре микрообъема.

Малые размеры объема позволяют свести задание искажений геомагнитного поля в заданном объеме к знанию разности между реальными значениями компонент напряженности H_{xj}^0 , H_{yj}^0 и H_{zj}^0 магнитного поля в его геометрическом центре и значениями геомагнитного поля:

$$\begin{aligned} \Delta H_{xj}^0 &= H_{xj}^0 - H_x^{\text{МПЗ}}; \\ \Delta H_{yj}^0 &= H_{yj}^0 - H_y^{\text{МПЗ}}; \\ \Delta H_{zj}^0 &= H_{zj}^0 - H_z^{\text{МПЗ}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где H_{ij}^0 - значение напряженности магнитного поля по i -тому направлению ($i - x, y, z$) в j -той точке объема с координатами ($j - x, y, z$). В данном случае $j = x_0, y_0, z_0$, т.е. речь идет о точке, совпадающей с геометрическим центром объема; $H_i^{\text{МПЗ}}$ - текущее значение напряженности геомагнитного поля по i -тому направлению ($i - x, y, z$). Значение этой напряженности определяется координатами расположения того или иного локального объема в географических координатах Земли; ΔH_{ij}^0 - значение напряженности искажений геомагнитного поля по i -тому направлению в j -той точке объема с координатами $j = x_0, y_0, z_0$.

Относительная погрешность δ_{ij}^0 такого пред-

ставления искажений геомагнитного поля по i -тому направлению в геометрическом центре объема будет определяться как:

$$\delta_{ij}^0 = \frac{\Delta H_{ij}^0 - \Delta H_i^{\text{МПЗ}}}{|H^{\text{МПЗ}}|}, \quad (2)$$

где $|H^{\text{МПЗ}}|$ - модуль напряженности геомагнитного поля для данной широтной зоны.

Абсолютная погрешность Δ_{ij} такого представления искажений геомагнитного поля в малых объемах определяется как разность между значением напряженности искажений в любой точке j с координатами x, y, z , принадлежащей микрообъему, и напряженностью искажений в геометрическом центре объема

$$\Delta_{ij} = \Delta H_{ij} - \Delta H_{ij}^0. \quad (3)$$

Из соотношения (3), а также из общих представлений о магнетизме технических объектов [2] абсолютно очевидно, что снижение погрешности Δ_{ij} тесно увязано как с размерами микрообъема, так и удаленностью от него источников магнитного поля. По существу, величина погрешности Δ_{ij} с уменьшением заданного объема будет снижаться, равно как и при удалении от него источников магнитного поля.

Именно наличие этих факторов и обеспечивают на практике крайне малые значения погрешности Δ_{ij} применительно к малым объемам. В относительных единицах $\delta_{ij} = \Delta_{ij} / H^{\text{МПЗ}}$ величина этой погрешности находится в пределах десятых долей процента.

Перечисленные выше особенности искажений геомагнитного поля в микрообъеме определяют и методический подход к построению электромагнитных устройств для их снижения. Так, для снижения искажений геомагнитного поля в локальном объеме малых размеров используются чаще всего электромагнитные устройства, в которых исполнительным органом (источником компенсирующего магнитного поля) являются системы колец Гельмгольца, Браунбека, Рубенса и т.д. Такие системы, создавая в упомянутом микрообъеме близкое к равномерному магнитное поле, позволяют снизить общий уровень его искажений до значений абсолютной погрешности Δ_{ij} .

Для минимизации магнитного поля в микрообъ-

еме часто используются также и компенсирующие постоянные магниты или электромагниты [3]. Эти магниты устанавливаются вблизи микрообъема. При этом характеристики магнита (электромагнита) выбираются исходя из условий компенсации искажений геомагнитного поля в одной точке – геометрическом центре микрообъема:

$$\Delta H_{ij}^0 = H_{im}, \quad (4)$$

где H_{im} - напряженность магнитного поля в геометрическом центре микрообъема, которое создается одним или несколькими компенсирующими магнитами.

Данное представление искажений и геомагнитного поля является достаточным при решении ограниченного ряда технических задач. К ним в первую очередь относятся задачи по снижению искажений геомагнитного поля в месте установки компасов на судах, магнитометров в космических аппаратах и пр.

Однако такой подход является неприемлемым, когда дело касается представления искажений геомагнитного поля в макрообъемах (несколько кубических метров). Такая неприемлемость связана с существенным отличием в степени искажения Δ_{ij} напряженности геомагнитного поля в различных точках макрообъема. Именно наличие этого фактора вносит свои особенности в оценку искажений геомагнитного поля в макрообъемах.

Упомянутая выше неравномерность Δ_{ij} степени искажения напряженности геомагнитного поля в макрообъемах обусловлена как размерами этого объема, так и относительной близостью к нему источников магнитного поля. К таким источникам относятся ферромагнитные элементы конструкции здания (стен, потолка, пола), а также различные машины, механизмы и прочее оборудование расположенное вблизи локального макрообъема.

Из изложенного следует, что использование подходов, применяемых в отношении микрообъемов, является некорректным при решении задач снижения искажений геомагнитного поля. Сказанное справедливо и в отношении оценки уровня искажений геомагнитного поля применительно к макрообъемам.

Таким образом, для определения реального распределения искажений геомагнитного поля в макрообъемах и для создания методологии и выбора параметров электромагнитных устройств, адаптированных для снижения этих искажений требуется:

- способ измерения искажений геомагнитного поля;
- форма представления конечной информации о распределении магнитного поля в заданном объеме;
- методика пересчета магнитного поля в любую точку рабочего объема;

Знание перечисленных характеристик и методик их определения необходимо не только для проектирования и изготовления электромагнитных устройств, но и для их настройки и эксплуатации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МАКРООБЪЕМЕ

Практическое определение искажений геомагнитного поля в макрообъеме основано на проведении прямых измерений напряженности геомагнитного поля в ограниченном числе точек объема. Для проведения таких измерений предлагается в заданном объеме определить пространственную сетку, в узлах которой должны быть измерены значения напряженно-

сти магнитного поля (рис. 1). Геометрические размеры пространственной сетки выбираются в зависимости от размера объема. Шаг сетки измерения Δx , Δy , Δz выбирается из ряда соображений. Это в первую очередь, погрешность описания искажения геомагнитного поля и удаленность макрообъема от источников магнитного поля. На величину шага сетки измерений оказывают влияние и возможности измерительной аппаратуры, здравый смысл и пр.

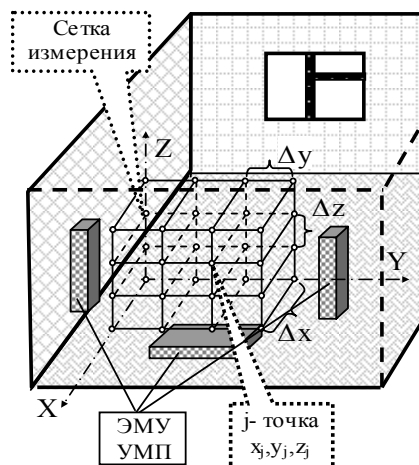


Рис. 1. Сетка измерения и электромагнитное устройство управления магнитным полем (ЭМУ УМП) в помещении

Методология определения искажений геомагнитного поля в заданном объеме основывается на прямых измерениях компонент напряженности H_{ij} магнитного поля в каждом из j узлов выбранной сетки по каждому i -тому направлению. Направления i , по которым проводится измерение компонент напряженности H_{xj} , H_{yj} , H_{zj} геомагнитного поля совпадают с осями сетки. Число узлов сетки определяется ее градацией по осям X , Y , Z . Обозначим число градаций по указанным осям X , Y , Z , соответственно равным K , L и M . При этом каждый из узлов сетки будет определяться координатами x_k, y_l, z_m :

$$k=0,1,\dots,K; \quad l=0,1,\dots,L; \quad m=0,1,\dots,M.$$

С учетом принятых обозначений, измеренное магнитометром значение напряженности магнитного поля в каждом из узлов сетки будет иметь представление $H_{i(x_k, y_l, z_m)}$.

Сама же величина искажений напряженности геомагнитного поля $\Delta H_{i(x_k, y_l, z_m)}$ в любой из точек сетки будет определяться как разность между измеренной величиной магнитного поля $H_{i(x_k, y_l, z_m)}$ и текущим значением напряженности геомагнитного поля Земли по i -тому направлению

$$\Delta H_{i(x_k, y_l, z_m)} = H_{i(x_k, y_l, z_m)} - H_i^{МПЗ}. \quad (5)$$

Величина напряженности $H_i^{МПЗ}$, как уже указывалось ранее, определяется расположением того или иного локального объема в географических координатах Земли.

Описаний подход к определению искажений геомагнитного поля может быть реализован в виде способа прямых измерений напряженности магнитного поля в каждом из узлов посредством магнитометра с одним трехкомпонентным датчиком. В этом случае трехкомпонентный датчик магнитометра располагают последовательно в каждый из узлов сетки (рис. 1). Оси магнитометра при этом ориентируют по выбран-

ным i -тым направлениям. Сама же относительная погрешность δ_{ij} определения искажений геомагнитного поля в j -том узле сетки с координатами x_k, y_l, z_m по i -тому направлению при этом будет определяться как

$$\delta_{ij} = \left| \frac{H_{i(x_k, y_l, z_m)} - H_i^{МПЗ}}{H^{МПЗ}} \right|. \quad (6)$$

Предлагается весь массив погрешностей δ_{ij} , определенных путем измерений, в каждом их узлов сетки, представлять в виде матриц сформированных для точек плоскостей (плоскость XY) при значениях $Z = 0, 1, \dots, m, \dots, M$. С учетом такого представления матрица относительных погрешностей в плоскости XY при $Z = m$ будет иметь вид:

$$\begin{pmatrix} \delta_i(x_0, y_0, z_m) & \dots & \delta_i(x_0, y_l, z_m) & \dots & \delta_i(x_0, y_L, z_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_i(x_k, y_0, z_m) & \dots & \delta_i(x_k, y_l, z_m) & \dots & \delta_i(x_k, y_L, z_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_i(x_K, y_0, z_m) & \dots & \delta_i(x_K, y_l, z_m) & \dots & \delta_i(x_K, y_L, z_m) \end{pmatrix}$$

Такие же матрицы можно получить посредством феррозондовых магнитометров с двумя датчиками – измерительным и компенсационным. Такие магнитометры освоены промышленностью и широко используются в геодезии.

В этом случае измерительный датчик устанавливается последовательно в узлы сетки, как и в случае с магнитометром с одним датчиком, а второй компенсационный датчик выносят за пределы локального объема и располагают в месте, где искажения геомагнитного поля отсутствуют (рис. 2).

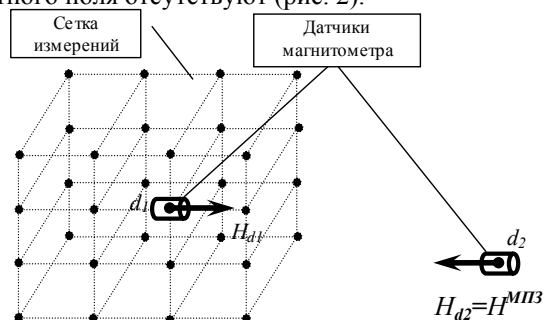


Рис. 2. Схема расположения датчиков магнитометра

При этом искажение геомагнитного поля в месте установки компенсационного датчика может быть обеспечено, как за счет удаленности датчика от источников магнитного поля, так и за счет использования различного рода компенсаторов для устранения искажения геомагнитного поля в микрообъемах.

В этом случае показания прибора будут непосредственно регистрировать абсолютную величину искажений $\Delta H_{i(x_k, y_l, z_m)}$ геомагнитного поля в j -том узле сетки.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНОГО МАССИВА ДАННЫХ

Точки измерения располагаются в узлах пространственной сетки, образованной взаимно перпендикулярными сечениями плоскостей. Это позволяет сгруппировать их по сечениям и рассматривать далее распределение магнитного поля на плоскости. Полученное в результате измерений распределение напряженности магнитного поля на плоскости представляет собой дискретную функцию, значения которой иска-

жены "шумом" (случайными ошибками). Для определения значений функции в точках между узлами сетки измерения в математике используют методы интерполяции. Из всего многообразия существующих математических решений выбор наиболее приемлемого является сложной задачей. Для интерполяции напряженности магнитного поля в данной работе использован метод интерполяции кубической сплайн-функцией [4]. Это связано с тем, что этот метод обладает хорошими аппроксимативными свойствами, простотой реализации на вычислительной технике, мало чувствителен к случайным ошибкам и позволяет определять значение производной аппроксимируемой функции, знание которых необходимо для определения параметров электромагнитных устройств управления магнитным полем в помещениях [1].

Рассмотрим механизм реализации метода интерполяции для построения изодинам напряженности магнитного поля на плоскости XY при $Z = m$. Для области $\Omega = [a, b] \times [c, d]$ в которой введена сетка $\Delta = \Delta_x \times \Delta_y$, где $\Delta_x \in a = x_0 < \dots < x_k < \dots < x_K = b$, $\Delta_y \in c = y_0 < \dots < y_l < \dots < y_L = d$, а в узлах сетки (x_k, y_l) заданы значения напряженности магнитного поля $H_{i(x_k, y_l, z_m)}$ кубическая сплайн-функция определяется по соотношению [5]. Далее для простоты записи z_m опущено. Тогда

$$S(x, y) = \varphi(t) \cdot F \cdot \varphi(u), \quad (7)$$

где $\varphi(t) = [\varphi(t_1) \ \varphi(t_2) \ h_i \cdot \varphi(t_3) \ h_i \cdot \varphi(t_4)]$;

$$F = \begin{bmatrix} H_{i(x_k, y_l)} & H_{i(x_k, y_{l+1})} & H_{i(x_k, y_l)}^{1,0} & H_{i(x_k, y_{l+1})}^{1,0} \\ H_{i(x_{k+1}, y_l)} & H_{i(x_{k+1}, y_{l+1})} & H_{i(x_{k+1}, y_l)}^{1,0} & H_{i(x_{k+1}, y_{l+1})}^{1,0} \\ H_{i(x_k, y_l)}^{0,1} & H_{i(x_k, y_{l+1})}^{0,1} & H_{i(x_k, y_l)}^{1,1} & H_{i(x_k, y_{l+1})}^{1,1} \\ H_{i(x_{k+1}, y_l)}^{0,1} & H_{i(x_{k+1}, y_{l+1})}^{0,1} & H_{i(x_{k+1}, y_l)}^{1,1} & H_{i(x_{k+1}, y_{l+1})}^{1,1} \end{bmatrix}$$

$$\varphi(u) = \begin{bmatrix} \varphi(u_1) \\ \varphi(u_2) \\ l_i \cdot \varphi(u_3) \\ l_i \cdot \varphi(u_4) \end{bmatrix};$$

$$\varphi(t_1) = (1-t)^2(1+2t); \quad \varphi(t_2) = t^2(3-2t); \quad \varphi(t_3) = t(1-t)^2;$$

$$\varphi(t_4) = -t^2(1-t); \quad \varphi(u_1) = (1-u)^2(1+2u);$$

$$\varphi(u_2) = u^2(3-2u); \quad \varphi(u_3) = u(1-u)^2;$$

$$\varphi(u_4) = -u^2(1-u); \quad h_k = x_{k+1} - x_k; \quad t = \frac{(x - x_k)}{h_k};$$

$$\tau_l = y_{l+1} - y_l; \quad u = \frac{(y - y_l)}{\tau_l};$$

$$H_{i(x_k, y_l)}^{1,0} = \frac{\partial}{\partial x} H_{i(x_k, y_l)},$$

$$H_{i(x_k, y_l)}^{0,1} = \frac{\partial}{\partial y} H_{i(x_k, y_l)},$$

$$H_{i(x_k, y_l)}^{1,1} = \frac{\partial}{\partial x \partial y} H_{i(x_k, y_l)}.$$

Для построения кубического сплайна (7) необходимо знать в узлах сетки Δ значение измеряемой напряженности магнитного поля. Для определения производных напряженности магнитного поля применим приближенные формулы на основе разделенных разностей. Положим;

$$H_{i(x_k, y_l)}^{1,0} = \lambda_k \frac{H_{i(x_k, y_l)} - H_{i(x_{k-1}, y_l)}}{h_{k-1}} + \mu_k \frac{H_{i(x_{k+1}, y_l)} - H_{i(x_k, y_l)}}{h_k}, \quad (8)$$

где $k = 1, \dots, K-1$;

$$H_{i(x_0, y_l)}^{1,0} = (1 + \mu_1) \frac{H_{i(x_1, y_l)} - H_{i(x_0, y_l)}}{h_0} - \mu_1 \frac{H_{i(x_2, y_l)} - H_{i(x_1, y_l)}}{h_1}, \quad (9)$$

$$H_{i(x_K, y_l)}^{1,0} = -\lambda_{K-1} \frac{H_{i(x_{K-1}, y_l)} - H_{i(x_{K-2}, y_l)}}{h_{K-2}} + (1 + \lambda_{K-1}) \frac{H_{i(x_K, y_l)} - H_{i(x_{K-1}, y_l)}}{h_{K-1}}, \quad (10)$$

$$\mu_k = h_{k-1}(h_k + h_{k-1})^{-1}, \lambda_k = 1 - \mu_k;$$

$$H_{i(x_k, y_l)}^{0,1} = \alpha_l \frac{H_{i(x_k, y_l)} - H_{i(x_k, y_{l-1})}}{\tau_{l-1}} + \beta_l \frac{H_{i(x_k, y_{l+1})} - H_{i(x_k, y_l)}}{\tau_l}, \quad (11)$$

$l = 1, \dots, L-1$;

$$H_{i(x_k, y_0)}^{0,1} = (1 + \beta_1) \frac{H_{i(x_k, y_1)} - H_{i(x_k, y_0)}}{\tau_0} - \beta_1 \frac{H_{i(x_k, y_2)} - H_{i(x_k, y_1)}}{\tau_1}, \quad (12)$$

$$H_{i(x_k, y_L)}^{0,1} = -\alpha_{L-1} \frac{H_{i(x_k, y_{L-1})} - H_{i(x_k, y_{L-2})}}{\tau_{L-2}} + (1 + \alpha_{L-1}) \frac{H_{i(x_k, y_L)} - H_{i(x_k, y_{L-1})}}{\tau_{L-1}}, \quad (13)$$

$$\beta_l = \tau_{l-1}(\tau_l + \tau_{l-1})^{-1}; \alpha_l = 1 - \beta_l;$$

$$H_{i(x_k, y_l)}^{1,1} = \lambda_k \frac{H_{i(x_k, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_{k-1}, y_l)}^{0,1}}{h_{k-1}} + \mu_k \frac{H_{i(x_{k+1}, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_k, y_l)}^{0,1}}{h_k}, \quad (14)$$

$$H_{i(x_0, y_l)}^{1,1} = (1 + \mu_1) \frac{H_{i(x_1, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_0, y_l)}^{0,1}}{h_0} - \mu_1 \frac{H_{i(x_2, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_1, y_l)}^{0,1}}{h_1}, \quad (15)$$

$$H_{i(x_K, y_l)}^{1,1} = -\lambda_{K-1} \frac{H_{i(x_{K-1}, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_{K-2}, y_l)}^{0,1}}{h_{K-2}} + (1 + \lambda_{K-1}) \frac{H_{i(x_K, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_{K-1}, y_l)}^{0,1}}{h_{K-1}}. \quad (16)$$

Соотношений (8)–(16) позволяют определять по данным измерения напряженность магнитного поля и ее производной в пределах сетки измерения Δ .

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ

Аппроксимация измеренного магнитного поля в узлах сетки выбранной на плоскости XY при $Z = m$ с помощью кубических сплайнов осуществляется с погрешностью. Эта погрешность зависит в основном от

двух факторов, шага сетки измерения и гладкости аппроксимируемой функции внутри промежутков $[x_k, x_{k+1}] \times [y_l, y_{l+1}]$. Распределение магнитного поля $H(x, y)$ это функция, не имеющая разрывов, ее первая производная также не имеет разрывов. Это значит, что пространственное распределение напряженности магнитного поля и ее производных являются гладкими функциями. Поэтому для выбора сетки измерения нет необходимости определять точки разрыва аппроксимируемой функции ввиду их отсутствия.

Шаг сетки измерения является основным фактором возникновения погрешности аппроксимации распределения напряженности магнитного поля. На погрешность аппроксимации влияет поведение функции внутри промежутков $[x_k, x_{k+1}] \times [y_l, y_{l+1}]$: монотонность, точки перегиба и число пиков функции. При монотонном поведении функции внутри промежутков $[x_k, x_{k+1}] \times [y_l, y_{l+1}]$ погрешность будет меньше чем в тех случаях, когда в этих промежутках функция имеет точки перегиба и пиковые значения. Напряженность магнитного поля от локальных источников на плоскости имеет свои характерные черты. Она имеет потенциальный характер распространения в пространстве и при удалении от источника уменьшается. Следовательно, на плоскости имеется область с пиковыми значениями и область с монотонным убыванием (рис. 3).

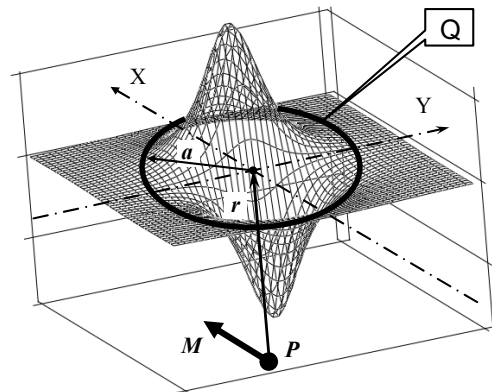


Рис. 3. Распределение напряженности магнитного поля дипольного источника P с магнитным моментом M на плоскости

Для оценки погрешности важное значение имеет поведение функции внутри области Q , где имеются пиковые значения и точки перегиба, так как здесь находится промежуток $[x_k, x_{k+1}] \times [y_l, y_{l+1}]$ с максимумом погрешности (рис. 4).

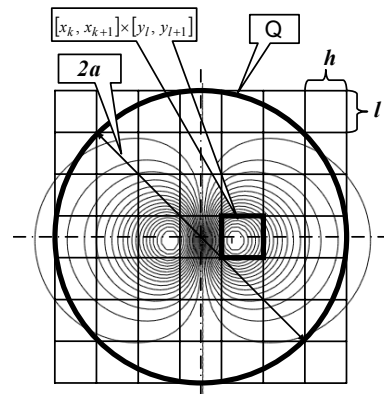


Рис. 4. Сетка измерений в области Q

Внутри области Q погрешность описания сплайн-функцией зависит от числа промежутков

$[x_k, x_{k+1}] \times [y_l, y_{l+1}]$. Чем больше промежутков, тем меньше погрешность.

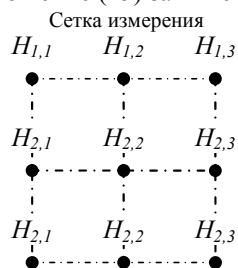
Размер a области Q зависит от расстояния r плоскости измерения до источника магнитного поля P , и изменяется пропорционально ему. При этом поведение функции внутри область не изменяется. Это дает возможность, оценив погрешности при одном расстоянии $r=r_1$ для заданного числа ячеек сетки измерения $N=K \cdot L$, имеющих шаг $h_1=2 \cdot a_1/K$ и $\tau_1=2 \cdot a_1/L$, определить шаг сетки измерения с такой же погрешностью на любом другом расстоянии $r=r_2$, который будет равен $h_2=2 \cdot a_2/K$ и $\tau_2=2 \cdot a_2/L$.

Все выше сказанное позволяет установить зависимость шага сетки измерения при заданной погрешности измерения от расстояния до источника, которая определяется при $\varepsilon = const$ по соотношению

$$\begin{cases} h_k = n_1 r \\ \tau_l = n_2 r \end{cases}, \quad (15)$$

где h_k, τ_l - шаг сетки измерения соответственно по осям X и Y , r - расстояние от источника магнитного поля до центра области с пиковыми значениями, n_1, n_2 - постоянные коэффициенты, ε - погрешность аппроксимации.

Для квадратной сетки $n_1 = n_2 = n$ и $h_k = \tau_l = v_k$, а соотношение (15) запишется в виде

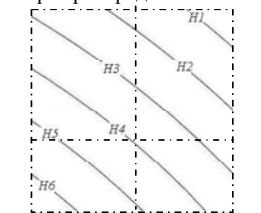


Матрица результатов измерения

$$\begin{pmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} \end{pmatrix}$$

Рис. 5

Карта распределения поля



Элементы матрицы соответствуют узлам сетки измерения. Измеренное значение магнитного поля в узле сетки записывается в соответствующий элемент матрицы. Каждый элемент матрицы имеет соответствующее местоположение на карте, в котором изображается его значение. На карте строятся кривые, представляющие собой линии равной напряженности. Построение линий равной напряженности осуществляется при помощи соотношений (7) – (16).

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика экспериментального определения распределения магнитного поля в заданном объеме помещения. Методика основана на прямых измерениях напряженности магнитного поля в заданном объеме помещения в узлах пространственной сетки. Измеренные данные представляются численно – в виде матриц и графически – в виде карт распределения магнитного поля на параллельных и ортогональных плоскостях. Для обработки первичного массива данных используется метод интерполяции кубической сплайн-функцией, обладающий малой чувствительностью к случайным ошибкам, что позволяет описывать магнитное поле в заданном объеме помещения с высокой точностью.

2. Установлена зависимость, увязывающая погрешность аппроксимации напряженности магнитно-

$$v_k = n \cdot r \text{ при } \varepsilon = const. \quad (16)$$

Например, аппроксимация распределения магнитного поля на плоскости сплайн – функцией (7) с погрешностью 1% будет осуществляться для квадратной сетки при $n=0.2$, а шаг измерения будет определяется по соотношению

$$v_k = 0.2 \cdot r \text{ при } \varepsilon \leq 1\%. \quad (17)$$

В табл. 1 представлены значения коэффициентов n при заданной погрешности аппроксимации.

Таблица 1

$\varepsilon\%$	1	2	3	4	5	6	7	8
n	0.2	0.25	0.28	0.3	0.32	0.41	0.5	0.53

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Полученную в результате измерений информацию о распределении напряженности магнитного поля в заданном объеме помещения удобно представлять на ортогональных и параллельных плоскостях, образованных на базе сетки измерения Δ . На таких плоскостях информация представляется численно – в виде матриц и графически – в виде карт распределения магнитного поля по аналогии с картами, принятыми в геодезии.

На рис. 5 изображена сетка измерения, образованная в результате пересечения плоскостью объемной сетки измерения представленной на рис. 1 и соответствующие ей матрица чисел и карта распределения.

го поля с шагом сетки измерения и расстоянием плоскости измерения до источника поля, что позволяет при заданной погрешности описания поля определять необходимый шаг сетки измерения на любом расстоянии плоскости измерения до источника поля.

3. Предложенная методика рекомендована для решения задач управления магнитным полем в помещениях

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пелевин Д.Е., Рудас Ю.Д. Коррекция искаженного магнитного поля внутри помещений // Электротехника і електромеханіка НТУ "ХП", 2002 №1 С. 57-60.
- [2] Розов В.Ю., Волохов С.А., Лукиков В.С., Кильдишев А.В., Ерисов А.В. Технология снижения внешних магнитных полей судового электрооборудования // Труды Второй международной конференции по судостроению (ISC'98). – Том 2. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1998. – С. 22-27
- [3] Розов В.Ю., Волохов С.А., Ерисов А.В. Электромагнитный компенсатор магнитных полей технических объектов // Вісник Національного технічного університету "ХП". – 2001. – №15. – С. 191-197.
- [4] Корн Г. Корн Т. Справочник по математике для научных работников - М: Наука, 1973. - 832 с.
- [5] Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. - М: Наука, 1980 – 202 с.

Поступила 07.08.2006