

В.Ю.Розов, чл.-корр. НАН Украины, Д.Е.Пелевин, С.Ю.Реуцкий, канд.техн.наук (НТИЦ магнетизма технических объектов НАН Украины, Харьков)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ

*Предложен метод оптимизации параметров простейших однокомпонентных систем компенсации биотропных искажений геомагнитного поля по критерию максимума эффективности компенсации в рабочем пространстве оперативного персонала, основанный на алгоритме Левенберга-Маркварда.*

*Запропоновано метод оптимізації параметрів найпростіших однокомпонентних систем компенсації біотропних спотворень геомагнітного поля за критерієм максимуму ефективності компенсації в робочому просторі оперативного персоналу, що ґрунтується на алгоритмі Левенберга-Маркварда.*

**Введение.** В настоящее время все более актуальной становится проблема защиты оперативного персонала от негативного действия биотропных искажений естественного геомагнитного поля (ГМП) [4,6], в том числе ослабления ГМП [3]. Решение этой проблемы может быть осуществлено путем нормализации ГМП в рабочем пространстве персонала за счет компенсации искажений ГМП с помощью специальных систем компенсации (СК) [3]. Однако, для общего случая такие СК являются достаточно сложными устройствами с мультикомпонентной пространственной структурой [2], что усложняет их практическое применение.

Упрощение СК при сохранении их эффективности может быть осуществлено в случае компенсации только отдельных составляющих искажений [1], являющихся главными для конкретного объекта. Как следует из результатов выполненных авторами экспериментальных исследований [3], главной составляющей искажений ГМП для большого количества помещений, в том числе помещений диспетчерских пунктов электростанций, является ослабление ГМП за счет его магнитоэкранирования размещенными вблизи помещения протяженными ферромагнитными строительными и технологическими конструкциями. Экспериментальные значения типичного распределения исходного уровня искажения ГМП на диспетчерском пункте тепловой электростанции (в % от ГМП) на высоте 1,5 м от пола показаны на рис. 1, а.

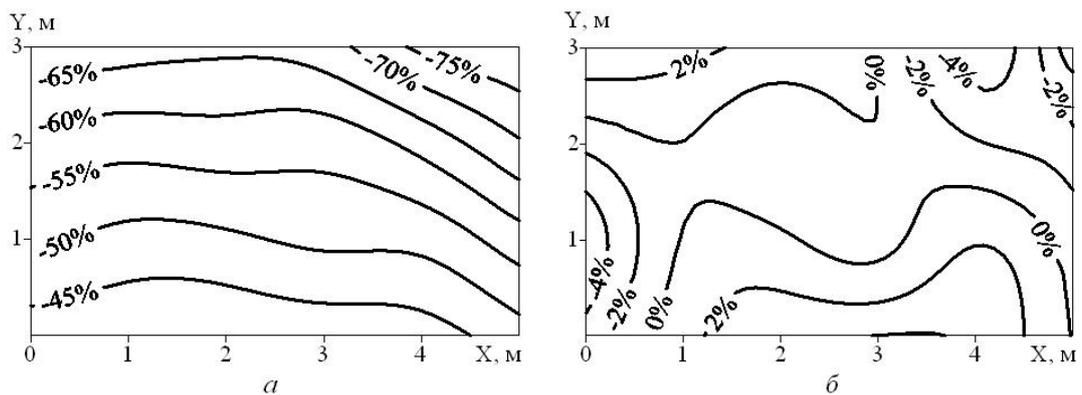


Рис. 1

Рассматриваемые искажения являются стационарными и имеют малоградиентный характер, что позволяет осуществлять их компенсацию простейшей однокомпонентной СК. Такая СК (рис. 2) содержит задающее устройство (ЗУ) формирования тока  $I_w$  компенсационной обмотки (КО), охватывающей рабочую зону помещения, а также источник питания (ИП) КО, выполняющий функцию усилителя-стабилизатора тока.

При синтезе однокомпонентных СК (рис. 2) возникает задача оптимизации их параметров (величины ампер-витков компенсационной обмотки и ее пространственной ориентации относительно горизонтальной плоскости нормирования допустимого уровня искажений) по критерию максимума эффективности компенсации ( $E_{СК}$ ) [2]

$$E_{СК} = \max_{i=1, \dots, N} \frac{|\vec{B}_{Иi}|}{|\vec{B}_{Ki} + \vec{B}_{Иi}|} \approx \max_{i=1, \dots, N} \frac{|\vec{B}_{изми}| - |\vec{B}_{ГМП}|}{|\vec{B}_{Ki} + \vec{B}_{изми}| - |\vec{B}_{ГМП}|}, \quad (1)$$

где  $\vec{B}_{Иi}$  – индукция искажений ГМП;  $\vec{B}_{Ki}$  – индукция компенсационного магнитного поля;  $\vec{B}_{ГМП}$  – индукция ГМП;  $\vec{B}_{изми}$  – индукция измеренного магнитного поля;  $i$  – координаты точки  $(x, y, z)$  на горизонтальной плоскости нормирования;  $N$  – число точек измерения.

Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

**Метод оптимизации системы компенсации.** В данном разделе мы предложим метод оптимизации СК (рис. 2) на основе ее математической модели, содержащей несколько свободных параметров, наличие которых позволяет оптимизировать параметры СК. Будет также введена целевая функция, минимизация которой определяет оптимальные значения параметров СК, а также предложен алгоритм оптимизации. Анализ проводим при предположении об идеальности ИП.

Предположим, что точки, в которых производится измерение и нормирование магнитного поля, расположены в горизонтальной плоскости  $F$  рабочей зоны помещения (рис. 3). Тогда компоненты индукции магнитного поля КО, выполненной в виде прямоугольного витка с током  $I_w$ , расположенного параллельно плоскости  $XY$  ( $A'E'D'C'$ ), составят

$$\begin{aligned} B_x &= q_1 f_x(a, b, c, x, y, z), \\ B_y &= q_1 f_y(a, b, c, x, y, z), \\ B_z &= q_1 f_z(a, b, c, x, y, z), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f_x, f_y, f_z$  – функционалы, выражение которых можно определить на основе известных формул для расчета индукции магнитного поля тонкого прямоугольного проводника с током (например, приведенных в [5] на с.108);  $a, b$  – половина сторон прямоугольной КО;  $c$  – расстояние от КО до начала координат;  $x, y, z$  – координаты точки на горизонтальной плоскости нормирования  $F$ .

В формулах (2) для удобства, введен варьируемый параметр

$$q_1 = 0.25 \mu_0 I_w / \pi. \quad (3)$$

Еще один свободный параметр  $q_2$  можно ввести, если допустить варьирование расстояния плоскости КО от плоскости измерений  $F$  ( $z=0$ ). В этом случае заменяем в формулах (2) постоянную величину с неизвестным параметром  $q_2$

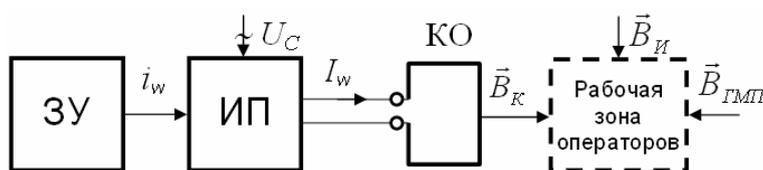


Рис. 2

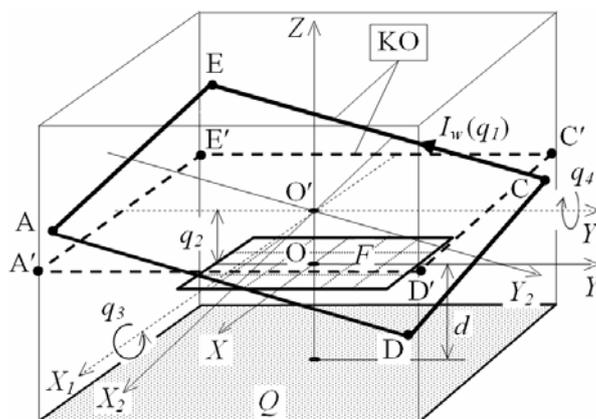


Рис. 3

$$\begin{aligned} B_x &= q_1 f_x(a, b, q_2, x, y, z), \\ B_y &= q_1 f_y(a, b, q_2, x, y, z), \\ B_z &= q_1 f_z(a, b, q_2, x, y, z). \end{aligned} \quad (4)$$

Два дополнительных свободных параметра для оптимизации параметров СК мы вводим, допуская возможность вращения КО вокруг двух, проходящих через центр  $O'(0,0,q_2)$  осей, параллельных осям  $OX$  и  $OY$  (рис. 3). Обозначим эти углы  $q_3$  и  $q_4$  соответственно и запишем в точке  $(x, y, z)$  компоненты вектора индукции магнитного поля  $(B_x, B_y, B_z)$  КО как функции четырех параметров  $q_1, q_2, q_3, q_4$ .

Переместим начало координат в центр КО  $O'$ . Новые координаты  $(x, y, z)$  будут

$$x_1 = x, \quad y_1 = y, \quad z_1 = z - q_2. \quad (5)$$

Перейдем к системе координат  $X_2Y_2Z_2$ , в которой виток с током ( $AECD$ ) лежит в плоскости  $z_2 = 0$ . Для этого систему координат следует повернуть на угол  $q_3$  вокруг оси  $OX_1$  и на угол  $q_4$  вокруг  $OY_1$ . Новые координаты точки запишутся в виде

$$(x_2, y_2, z_2)^T = \mathbf{S}(q_3, q_4)(x_1, y_1, z_1)^T, \quad (6)$$

где матрица поворота

$$\mathbf{S}(q_3, q_4) = \begin{pmatrix} \cos q_4 & 0 & \sin q_4 \\ -\sin q_3 \sin q_4 & \cos q_3 & \sin q_3 \cos q_4 \\ -\cos q_3 \sin q_4 & -\sin q_3 & \cos q_3 \cos q_4 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Поскольку в новой системе координат  $X_2Y_2Z_2$  виток с током ( $AECD$ ) лежит в плоскости  $z_2 = 0$ , то для расчета индукции магнитного поля можно использовать формулы (2), положив в них  $c = 0$ ,

$$\begin{aligned} B_{x,2}(q_1, q_2, q_3, q_4) &= q_1 f_x(a, b, 0, x_2, y_2, z_2), \\ B_{y,2}(q_1, q_2, q_3, q_4) &= q_1 f_y(a, b, 0, x_2, y_2, z_2), \\ B_{z,2}(q_1, q_2, q_3, q_4) &= q_1 f_z(a, b, 0, x_2, y_2, z_2). \end{aligned} \quad (8)$$

Заметим, что координаты  $x_2, y_2, z_2$  являются функциями свободных параметров системы  $q_2, q_3, q_4$ .

Преобразуем вектор индукции  $(B_{x,2}, B_{y,2}, B_{z,2})$  из системы координат  $X_2Y_2Z_2$  в  $X_1Y_1Z_1$ , совершив поворот осей в обратном направлении на углы  $q_3$  и  $q_4$ . Искомый вектор мы получим преобразованием

$$(B_{x,1}, B_{y,1}, B_{z,1})^T = \mathbf{S}(-q_3, -q_4)(B_{x,2}, B_{y,2}, B_{z,2})^T. \quad (9)$$

Поскольку система  $X_1Y_1Z_1$  отличается от исходной координатной системы  $XYZ$  только параллельным сдвигом начала координат, то вектор индукции  $\vec{B}_{Ki}(q_1, q_2, q_3, q_4, x, y, z) = (B_x, B_y, B_z)$  в исходной системе координат будет совпадать с найденным  $(B_{x,1}, B_{y,1}, B_{z,1})$ .

Таким образом, формулы (5–9) являются математической моделью СК как источника магнитного поля, индукция которого зависит от четырех произвольных параметров  $q_1, q_2, q_3, q_4$ , которые мы можем выбрать исходя из некоторого критерия оптимальности. Как уже отмечалось выше, в данной работе в качестве такого критерия принят критерий максимума эффективности компенсации (1). Однако, прямое использование  $E_{СК}$  в качестве целевой функции невозможно, поскольку (1) не является

аналитической функцией и для нее отсутствуют эффективные алгоритмы численной минимизации. Мы будем оптимизировать среднеквадратическое отклонение модуля индукции скомпенсированного поля  $|\vec{B}_{Ki} + \vec{B}_{измi}|$  от модуля индукции естественного магнитного поля Земли  $|\vec{B}_{ГМП}|$ . Однако, как показывает практика вычислений, для гладкой функции минимизация среднеквадратического отклонения приводит и к минимизации модуля отклонения.

Запишем целевую функцию, используемую для оптимизации СК. Пусть имеются данные измерения индукции магнитного поля  $\vec{B}_{измi}$  в некотором множестве точек  $(x_i, y_i, z_i), i = 1, \dots, N$ . Сумма индукции измеренного магнитного поля и магнитного поля компенсирующей магнитной системы  $\vec{B}_{Ki}$  равна

$$\vec{B}_i^\Sigma(q_1, q_2, q_3, q_4) = \vec{B}_{Ki}(q_1, q_2, q_3, q_4, x_i, y_i, z_i) + \vec{B}_{измi}.$$

Обозначим разность модулей индукции суммарного поля и ГМП для данной широты следующим образом:

$$r_i(q_1, q_2, q_3, q_4) = |\vec{B}_i^\Sigma(q_1, q_2, q_3, q_4)| - |\vec{B}_{ГМП}|. \quad (10)$$

В качестве целевой функции будем рассматривать сумму квадратов разностей модулей индукции, рассчитанную по всем точкам измерения,

$$f(q_1, q_2, q_3, q_4) = \sum_{i=1}^N [r_i(q_1, q_2, q_3, q_4)]^2. \quad (11)$$

Таким образом, мы будем оптимизировать параметры СК по критерию наименьшего среднеквадратического отклонения модуля индукции магнитного поля от модуля индукции естественного магнитного поля Земли. Минимум функции  $f(q_1, q_2, q_3, q_4)$  обеспечивает и минимальность  $\max_{i=1, \dots, N} |r_i(q_1, q_2, q_3, q_4)|$ , а, следовательно, максимум  $E_{СК}$ .

Для оптимизации параметров СК мы будем использовать численный расчет, основанный на алгоритме Левенберга-Маркварда (Levenberg-Marquardt, *LMA*) [8,9]. *LMA*-алгоритм состоит в итерационном поиске минимума функций нескольких переменных, представленных в виде задачи нелинейной минимизации методом наименьших квадратов. Это означает, что функция, которую необходимо минимизировать, выглядит следующим образом:

$$f(\vec{q}) = \sum_{j=1}^N r_j^2(\vec{q}),$$

где  $\vec{q} = (q_1, \dots, q_M)$  – вектор, а  $r_j(\vec{q})$  – гладкая, вещественная функция, называемая невязкой. Предполагается, что  $N > M$ . Таким образом, функция (11) имеет вид, допускающий применение *LMA*. Запишем вектор невязки:  $\vec{r}(\vec{q}) = (r_1(\vec{q}), \dots, r_N(\vec{q}))$ . Тогда целевую функцию можно представить в виде квадрата модуля  $N$ -вектора:  $f(\vec{q}) = \|\vec{r}(\vec{q})\|^2$ . Это канонический вид записи целевой функции *LMA*. Производные  $f(\vec{q})$  представляют с помощью матрицы Якоби  $\Psi = \partial r_j / \partial q_i$ .

Отличительной особенностью метода наименьших квадратов является то, что, имея матрицу Якоби  $\Psi$ , легко получить гессиан  $\Gamma = \nabla^2 f$ , если функции можно аппроксимировать линейными приближениями. Тогда гессиан, как и в линейном случае, будет равен

$$\Gamma = \nabla^2 f \approx \Psi^T(\vec{q})\Psi(\vec{q}).$$

Это уравнение выполняется точно для малых невязок  $r_j(\vec{q})$  и приближенно в общем нелинейном случае. Использование этого приближенного оценивания матрицы Гессе является отличительной особенностью *LMA*. Матрицы Якоби  $\Psi(\vec{q})$  могут быть заданы как аналитическим выражением, так и вычисляться численным дифференцированием. Поскольку в нашем случае невязки  $r_j(\vec{q})$  находятся

численным методом, матрица Якоби также вычислялась. С учетом вышесказанного, итерации в методе Левенберга-Маркварда производятся по следующему алгоритму:

$$\bar{q}_{i+1} = \bar{q}_i - (\mathbf{G} + \lambda \mathbf{G})^{-1} \nabla f(\bar{q}_i). \quad (12)$$

Здесь  $\mathbf{G}$  – гессиан, вычисляемый по приближенной формуле, приведенной выше, на каждом шаге итераций;  $\mathbf{G}$  – единичная матрица;  $\lambda$  – регуляризирующий параметр, который стабилизирует итерационный процесс в случае вырождения матрицы Гессе. Более подробные сведения о методе Левенберга-Маркварда можно найти в работах [7–9].

Предложенный метод оптимизации СК был реализован в виде программы на алгоритмическом языке FORTRAN 90 для персонального компьютера.

**Примеры оптимизации параметров систем компенсации.** Приведем примеры оптимизации параметров СК с использованием предложенного выше метода оптимизации для помещения диспетчерского пункта тепловой электростанции с данными измерений, приведенными в таблице и на рис. 1, а.

$x_i$ , м	$y_i$ , м	$B_{измх}$ , мкТл	$B_{изму}$ , мкТл	$B_{измz}$ , мкТл
-2.5	-1.5	-10.25	7.18	26.28
-1.5	-1.5	-7.01	2.98	28.75
-0.5	-1.5	-4.69	3.94	29.16
0.5	-1.5	-4.29	5.07	28.59
1.5	-1.5	-5.33	2.92	28.00
2.5	-1.5	-6.46	1.55	25.17
-2.5	-0.5	-9.60	4.18	21.87
-1.5	-0.5	-6.92	3.66	24.53
-0.5	-0.5	-5.45	3.63	24.60
0.5	-0.5	-5.65	2.76	23.71
1.5	-0.5	-3.79	4.25	23.54
2.5	-0.5	-5.27	1.87	20.19
-2.5	0.5	-8.24	3.69	18.77
-1.5	0.5	-5.72	2.84	20.62
-0.5	0.5	-4.13	0.92	20.78
0.5	0.5	-4.34	1.07	21.00
1.5	0.5	-4.51	0.11	18.61
2.5	0.5	-4.15	0.23	14.67
-2.5	1.5	-7.05	4.33	13.27
-1.5	1.5	-3.95	1.07	15.90
-0.5	1.5	-3.19	-1.30	16.60
0.5	1.5	-3.28	-1.71	15.48
1.5	1.5	-4.05	-2.48	10.90
2.5	1.5	-4.44	-2.07	9.36

Измерения проводились на горизонтальной плоскости  $F$ , расположенной в центре помещения на расстоянии  $d=1.5$  м над полом  $Q$  (рис. 3), при индукции ГМП  $B_{ГМПx}=18.3$  мкТл,  $B_{ГМПy}=0$ ,  $B_{ГМПz}=46.6$  мкТл,  $|\vec{B}_{ГМП}|=50$  мкТл.

Начало координат  $O$  (рис. 3) расположено в геометрическом центре плоскости  $F$ . Площадь помещения  $8.82 \times 8.42$  м<sup>2</sup>. Размеры витка КО равны  $2a=8.8$  м,  $2b=8.4$  м.

**Пример 1.** Оптимизация СК с использованием двух свободных параметров – величины ампер-витков КО и ее расстояния от плоскости измерений  $F$ .

В этом случае компоненты индукции компенсирующего поля КО вычисляются по формулам (4), а целевая функция имеет вид (11), но зависит только от двух переменных  $q_1, q_2$ . В качестве начальных данных для итерационного процесса  $LMA$  (13) были взяты нулевые значения параметров  $q_1 = 0, q_2 = 0$ . Процесс оптимизации закончился после выполнения девяти итераций. Оптимальные значения параметров равны:

$q_1^{opt} = 22.6226$ ,  $q_2^{opt} = 1.355$ . Обращаясь к (3), находим, что  $q_1^{opt} = 22.6226$  соответствует полному току витка  $I_w^{opt} = 226.226$  ампер-витков. Таким образом, оптимальная компенсация магнитного поля, представленного в таблице, достигается КО с  $I_w^{opt} = 226.226$  ампер-витков, расположенной на расстоянии  $h^{opt} = 1.355$  м от плоскости измерения. При этом максимальное отклонение скомпенсированного магнитного поля от естественного ГМП составляет 18.3%, а минимальная эффективность компенсации –  $E_{СК}=4.3$ .

**Пример 2.** Оптимизация СК с использованием четырех свободных параметров – величины ампер-витков КО, ее расстоянием от плоскости измерений и двумя углами поворота. В этом случае компоненты индукции компенсирующего поля вычисляются по формулам (3–9), а минимизируемая функция имеет вид

(11), и зависит от полного набора переменных  $q_1, q_2, q_3, q_4$ . В качестве начальных данных для итерационного процесса *LMA* (12) были взяты значения параметров  $q_1 = 22.6226, q_2 = 1.355, q_3 = 0, q_4 = 0$ , т.е. для первых двух параметров мы взяли начальные значения, полученные при двухпараметрической оптимизации, а начальные значения углов поворота приняли равными нулю. Процесс оптимизации закончился после выполнения 9-ти итераций. Оптимальные значения параметров равны:  $q_1^{opt} = 23.8685, q_2^{opt} = 1.7397, q_3^{opt} = -0.4463, q_4^{opt} = -0.0406$ . Таким образом, при использовании четырех свободных параметров оптимальная компенсация магнитного поля, представленного в таблице, достигается расположением витка с током  $I_w^{opt} = 238.685$  ампер-витков, поднятого над плоскостью измерения на высоту  $h^{opt} = 1.7397$  м и повернутого на углы 25.57 и 2.32 градусов по часовой стрелке (знак минус) вокруг осей *OX* и *OY* соответственно. При этом максимальное отклонение скомпенсированного магнитного поля от естественного ГМП равно 5.6% (рис.1, б), а минимальная эффективность компенсации –  $E_{СК} = 14$ . Таким образом, при оптимизации системы компенсации по двум параметрам искажения ГМП в помещении не превышает уровень санитарных норм ослабления ГМП 50% [6], а при оптимизации по четырем параметрам – не превышают уровня комфортности 10% [3].

**Заключение.** 1. Предложен метод оптимизации параметров однокомпонентных систем компенсации по критерию максимума эффективности компенсации искажений геомагнитного поля в помещении оперативного персонала, основанный на алгоритме Левенберга-Маркварда и использующий в качестве свободных параметров ампер-витки компенсационной обмотки, ее расстояние до плоскости нормирования, а также углы наклона компенсационной обмотки относительно горизонтальной плоскости.

2. Показано, что применение предложенного метода оптимизации при синтезе простейших однокомпонентных СК, позволяет реализовать компенсацию искажений, вызывающих ослабление геомагнитного поля в помещениях диспетчерских пунктов тепловых электростанций, с эффективностью не менее 4 при горизонтальном исполнении КО и не менее 10 при наклонном исполнении КО, что позволяет обеспечить достижение требований санитарных норм и улучшение условий труда оперативного персонала, принимающего ответственные решения.

3. Дальнейшее развитие метода оптимизации параметров систем компенсации целесообразно проводить по критерию максимума эффективности компенсации внутри рабочего объема помещения при введении ограничений на пространственные координаты вершин прямоугольной компенсационной обмотки, исходя из технической возможности ее монтажа в конкретном помещении, а также ограничений на величину ампер-витков компенсационной обмотки с учетом неидеальности источника питания КО.

1. Розов В.Ю. Методы снижения внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов // Техн. електродинаміка. – 2001. – №1. – С. 16–20.

2. Розов В. Ю., Ассуиров Д.А., Пелевин Д.Е. Принципы построения систем автоматической компенсации биотропных искажений геомагнитного поля на рабочих местах оперативного персонала // Техн. електродинаміка. Тем. вип. “Силова електроніка та енергоефективність”. – 2009. – Ч. 1. – С. 51–54.

3. Розов В.Ю., Резинкина М.М., Думанский Ю.Д., Гвозденко Л.А. Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня // Техн. електродинаміка. Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 2. – С. 3–8.

4. Розов В.Ю., Резинкина М.М., Пелевин Д.Е., Думанский Ю.Д. Пути нормализации техногенных искажений геомагнитного поля в среде длительного пребывания людей // Гігієна населених місць: Зб. наук. пр. – К.: ДУ «ІГМЕ АМНУ», 2007. – Вип. 50. – С. 232–242.

5. Штамберг Г.А. Устройства для создания слабых постоянных магнитных полей. – Новосибирск: Наука, 1972. – 176 с.

6. *Электромагнитные поля* в производственных условиях. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.4.1191–03: Утв. Гл. гос. санитарным врачом РФ 01.05.03. – М., 2003.

7. Golub G.H., Van Loan C.F. Matrix Computations. – Johns Hopkins University Press, 1996. – 446 p.

8. Marquardt D. A method for the solution of certain problems in least squares // Quart. Appl. Math. – 1944. – Vol. 2. – Pp. 164–168.

9. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // SIAM J. Appl. Math. – 1963. – Vol. 11. – Pp. 431–441.

Надійшла 15.07.09