



УКРАЇНА

(19) UA (11) 47792 (13) U  
(51) МПК (2009)  
G01R 33/02МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

## (54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ОДНОРІДНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

1

2

(21) u200908720

(22) 19.08.2009

(24) 25.02.2010

(46) 25.02.2010, Бюл.№ 4, 2010 р.

(72) ТЕРЕЩЕНКО МИКОЛА ФЕДОРОВИЧ, РУДИК  
ВАЛЕНТИН ЮРІЙОВИЧ(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИ-  
ТУТ"(57) Пристрій для створення однорідного магнітно-  
го поля, що містить  $n$  послідовно включених кон-  
турів, симетрично розташованих відносно центру  
та встановлених на каркасі, причому твірна карка-  
са, на якій укладені витки кожного контуру в розрізіплощини, що проходить через  $n$  контурів, нахиле-  
на під кутом, що визначається кількістю контурів і  
їх геометричними розмірами, який **відрізняється**  
тим, що він додатково містить  $n$  резонансних кон-  
турів, створених індуктивністю витка  $L_i$ , його акти-  
вним опором  $R_i$  та міжвитковою ємністю  $C_i$ , які ук-  
ладені по спіралі на каркасі, причому їх  
міжвитковий інтервал складає половину діаметра  
проводу  $d/2$  на початку каркаса і зменшується по  
формулі  $d/2 - (i/n)(d/2)$ ,

де

 $i$  - порядковий номер витка, $d$  - діаметр проводу, $n$  - кількість витків в пристрої.

Корисна модель належить до медичного при-  
ладобудування і може бути використана для ство-  
рення мір та зразкових засобів метрологічного  
забезпечення нормованих значень параметрів  
індукції однорідних магнітних полів.

Найбільш близьким технічним рішенням до то-  
го, що заявляється, є пристрій для створення од-  
норідного магнітного поля (Авторське свідоцтво  
СССР SU 1057897 5 G 01 R 33/02, 1973). Пристрій  
для створення однорідного магнітного поля міс-  
тить  $n$  контурів, послідовно включених, симетрич-  
но розташованих відносно центру та встановлених  
на каркасі, при цьому твірна каркасу, на якому ук-  
ладені витки кожного контуру, в перерізі площини,  
яка проходить через вісь  $n$  контурів, нахилена  
під кутом, який визначається кількістю контурів та  
їх геометричними розмірами. Недоліком цього  
пристрою є недостатня точність створення норма-  
ваних значень індукції магнітного поля.

В основу корисної моделі поставлена задача  
значно підвищити точність формування нормова-  
них значень індукції однорідного магнітного поля в  
широкому динамічному та частотному діапазоні.

Поставлена задача вирішується тим, що в  
пристрої для створення однорідного магнітного  
поля, що містить  $n$  послідовно включених контурів,  
симетрично розташованих відносно центру та  
встановлених на каркасі, причому твірна каркасу,  
на якій укладені витки кожного контуру в розрізі  
площини, що проходить через  $n$  контурів нахилена

під кутом, що визначається кількістю контурів і їх  
геометричними розмірами, згідно корисної моделі,  
він додатково містить  $n$  резонансних контурів, які  
укладені по спіралі на каркасі, причому їх міжвит-  
ковий інтервал складає половину діаметра прово-  
ду  $d/2$  на початку каркасу і зменшується по фор-  
мулі  $d/2 - (i/n)(d/2)$ ,

де

 $i$  - порядковий номер витка, $d$  - діаметр проводу, $n$  - кількість витків в пристрої.

В результаті даного технічного рішення ре-  
зультуюча складова намотки котушки джерела  
виконана так, що сумарна міжвиткова ємність пра-  
гне до нуля  $\sum C_i \rightarrow 0$ .

В приладі  $n$  резонансні контури утворюють се-  
кційні джерела з послідовно-паралельним вклю-  
ченням.

На Фіг.1 представлена принципова схема при-  
строю для створення однорідного магнітного поля.  
На Фіг.2 представлена структурна схема для роз-  
рахунку параметрів пристрою для створення од-  
норідного магнітного поля на базі котушки Гельм-  
гольца.

Пристрій для створення однорідного магнітно-  
го поля містить каркас 1 кільцевої системи (к. с.),  
котушки 2, які створюють однорідне магнітне поле,  
резонансні витки 3. Радіус кільця  $R$ , відстань від  
площини витка до площини симетрії 1, розрахун-

(13) U

(11) 47792

(19) UA

ковий кут нахилу, при якому виникає максимальна однорідність значень магнітної індукції в центрі котушки  $\theta$ , кут між віссю системи та радіусом вектором, який з'єднує початок координат з точкою, в якій розраховується поле  $\theta_1$ , позначені цифрами 4,5,6,7 відповідно.

Кільцева система складається наступним чином.

Внутрішні витки котушок 2 розташовуються так, щоб дотримувалось умова формування магнітного поля, тобто дотримувалось теоретичне відношення  $1/R$ .

Наступні витки 3 намотуються по спіралі на каркас 1, який представляє поверхню конуса з кутом при вершині, який дорівнює  $2\pi$ , причому міжвитковий інтервал  $n$  резонансних контурів складає половину діаметра проводу  $d/2$  на початку каркасу і зменшується по формулі  $d/2 \cdot (i/n)(d/2)$ .

На структурній схемі для розрахунку параметрів пристрою для створення однорідного магнітного поля на базі котушки Гельмгольца зображені початок координат 8, вісі  $x$  та  $y$ , відповідно 9 та 10, центри котушок 11 та 12, відстань 13 від місця, в якому обчислюється магнітна індукція до проекції середини обмотки на вісь  $x$ , радіус-вектор 14, роз-

рахунковий кут нахилу, при якому виникає максимальна однорідність значень магнітної індукції в центрі котушки 6.

Кільцева система, виготовлена таким чином, є сумою всіх кільцевих систем, з яких можна отримати ідеальну систему формування однорідного магнітного поля.

Розглянемо роботу пристрою для створення однорідного магнітного поля.

Котушки 2 створюють магнітне поле з високою однорідністю. Це доведено приведеними розрахунками.

Позначаємо відстань від місця, в якому обчислюється магнітна індукція до проекції середини обмотки на вісь  $x$  через  $\alpha$ , радіус-вектор, який дорівнює кроку намотування, позначаємо через  $\rho$ .

Магнітна індукція кругового контуру буде симетричною щодо осі, отже, індукція його характеризується тільки двома складовими: аксіальною  $B_{0x}$  і радіальною  $B_{0y}$ . Взявши похідні по  $x$  і  $y$  ( $x=r \cos\theta$ ,  $y=r \sin\theta$ ) від виразу  $B_m = (-\mu_0/4\pi) I \theta$  (1) та поклавши  $\alpha = 0$  (або  $\cos \psi = 0$ ), що відповідає вибору початку координат в центрі, отримаємо

$$B_{0x} = (\mu_0 I / 2R) [1 - (3/4) ((2x^2 - y^2)/R^2) + (15/64 R^2) (8x^4 - 24x^2y^2 + 3y^4 + \dots)] \quad (2)$$

$$B_{0y} = (3/4)(\mu_0 I)(xy/R^3) [1 + (5/8) (3y^2 - 4x^2/R^2 + \dots)] \quad (3)$$

Як видно з отриманих виразів, при значеннях  $x$  та  $y$ , рівних нулю, аксіальна складова приймає максимальне значення, рівне  $R/2$ , а радіальна складова дорівнює нулю. Основу поля контуру з струмом, таким чином, становить аксіальна складова магнітної індукції.

Значення аксіальної складової  $B_{0x}$  швидше за все змінюється вздовж осі  $x$ . Так, при значеннях  $x=0,1 R$  і  $y=0$  вона менша, ніж у центрі контуру на 1,5%. Радіальна ж складова  $B_{0y}$  при значеннях  $x$  та  $y$ , набагато менших значення радіуса  $R$ , не вносить суттєвих змін в повний вектор напруженості

$$B_{0x} = ((\mu_0 I R^2) / (\alpha^2 + R^2)^{3/2}) [1 + (3/4) ((4\alpha^2 - R^2)/\rho^4) (2x^2 - y^2) + (15/64) ((8\alpha^4 - 12\alpha^2 R^2 + R^4)/\rho^8) (8x^4 - 24x^2y^2 + 3y^4 + \dots)] \quad (4)$$

$$B_{0y} = ((\mu_0 I R^2) / (\rho^5)) xy [(3/4) ((R^2 - 4\alpha^2)/\rho^2) + (15/16) ((8\alpha^4 - 12\alpha^2 R^2 + R^4)/\rho^8) (3y^2 - 4x^2) + \dots] \quad (5)$$

Якщо підібрати відстань  $\alpha$  таким чином, щоб коефіцієнт, що стоїть при другому ступені координат  $x$  і  $y$ , дорівнював нулю, то однорідність магнітного поля в розглянутій системі підвищиться, так як розкладання розпочнеться тільки зі ступенів четвертого порядку  $x$  та  $y$ .

$$B_{0x} = ((1.6 / \sqrt{5}) (\mu_0 I / R)) [1 - (0.144 / R^4) (8x^4 - 24x^2y^2 + 3y^4 + \dots)]; \quad (6)$$

$$B_{0y} = ((0.9216 / \sqrt{5}) (\mu_0 I / R^5)) xy (4x^3 - 3y^2 + 3y^4) + \dots \quad (7)$$

Однорідність магнітного поля кілець Гельмгольца значно вища за однорідність поля, що створюється окремим провідником, або контуром зі струмом. Вважаючи  $y=0$  і  $x=0,1R$ , отримаємо зміну магнітної індукції по відношенню до центру кілець

магнітного поля контуру з струмом. Дійсно, з співвідношень (2) і (3) маємо  $B_{0y}/B_{0x} = 0,75 xy/R^2$ . У той же час модуль вектора напруженості магнітного поля  $B = \sqrt{(B_{0x}^2 + B_{0y}^2)} \approx (1 + 0,5H^2_y/H^2_x) B_{0x}$ , що, наприклад, при значеннях  $x=y=0,1 R$  дає  $B = B_{0x}(1 + 5 \cdot 10^{-5}) \approx B_{0x}$ .

Вираз для магнітної індукції пари контурів, розташованих на відстані  $2\alpha$  один від одного, може бути отримано з виразу (1) з урахуванням (2) і (3) шляхом додавання напруженості магнітного поля, створюваного в даній точці кожним з контурів

Прирівняв нулю коефіцієнт при члені другого порядку координат  $x$  і  $y$ , отримаємо  $\alpha = 0,5 R$ . Котушки з таким співвідношенням параметрів називаються котушками (або кільцями) Гельмгольца.

Складові магнітної індукції для кілець Гельмгольца виражаються рівняннями (2)

на 0,01%, а відхилення аксіальної складової від повного вектора на  $1,6 \cdot 10^{-7} \%$ .

Котушки Гельмгольца можуть бути як багат шарові, так і одношарові. Багат шарові котушки застосовуються в тих випадках, коли потрібна ви-

сока точність розрахунку її поля, але досить сильне однорідне магнітне поле. Точність розрахунку багатшарової котушки виходить низькою через значну похибку визначення діаметра котушки і відстані між її обмотками (секціями).

Коли потрібна вища точність розрахунку постійної котушки, то її обмотка виготовляється з мідного дроту, що укладається в гвинтові нарізки, зроблені на циліндровій основі. Як основа береться кварц, який має низький температурний коефіцієнт розширення. Намотування котушки проводиться під деяким натягненням дроту і при температурі декілька вище за робочу температуру котушки, що забезпечує щільне укладання обмотки і малу залежність її геометричних розмірів від температури.

Одношарові котушки Гельмгольца використовуються, як правило, в якості еталонів магнітної індукції і зразкових мір вищих розрядів. Внаслідок малого числа витків магнітна індукція, що створюється такими котушками, зазвичай не перевищує  $50 \cdot 10^{-4}$  Тл. Оскільки кільця Гельмгольца складаються з двох котушок, то розрахунок магнітної індукції поля таких котушок по формулам (6) і (7)

$$B_{0x} = ((\mu_0 I R^2) / (\rho^3)) + \{1 + (2\eta^2 (4 \alpha^2 R^2) / \rho^4) + (3/4) ((4\alpha^2 R^2) / \rho^4) + (15/8) ((8\alpha^4 - 12\alpha^2 R^2 + R^2) / \rho^8) \} (2x^2 - y^2) + (P'_5/5) (\eta^4/\rho^4) (8x^4 - 24x^2y^2 + 3y^4) + \dots \quad (8)$$

де  $P'_5$  - похідна від поліному Лежандру по  $\cos \varphi$ , рівна  $(15/8\rho^4) (8\alpha^4 - 12\alpha^2 R^2 + R^4)$ .

Із зіставлених формул (4) і (8) очевидний вплив кінцевої ширини обмотки як на магнітну ін-

$$B_{0x} = ((1.6 / \sqrt{5}) (\mu_0 I / R)) [1 - 0,6 (\Delta/R) + 0,16 (\Delta^3/R^3) - 0,05 (c^2/R_{cp}^2) - 0,23 (\eta^4/R^4) + (0,96(\Delta/R^3) - 1,152 (\eta^2/R^4)) (2x^2 - y^2) - (0,144/R^4) (8x^4 - 24x^2y^2 + 3y^4) + \dots], \quad (9)$$

де  $\Delta = L - R$ , а  $L = 2\alpha$

Умовою однорідності, тобто рівності нулю коефіцієнта при другому порядку координат, в цьому випадку буде  $0,96 (\Delta/R^3) - 1,152 (\eta^2/R^4) = 0$  чи  $L = R(1 + 1,2(\eta^2/R^2))$

Отже, найкраща однорідність магнітного поля одношарової котушки, що складаються з двох секцій з кінцевою шириною, виходить, коли відстань між серединами секцій дещо більше, ніж для кільця Гельмгольца.

Одношарова котушка з голого мідного дроту завжди має деяку спіралевидну гвинтоподібність обмотки. Формула ж (9) виведена для суцільної обмотки, тобто для обмотки з нескінченно малим

$$B_x = (1/4\rho) [((\alpha + \rho\omega) / \sqrt{(R^2 + (\alpha + \rho\omega)^2}) - (\alpha - \rho\omega) / \sqrt{(R^2 - (\alpha - \rho\omega)^2}))] \quad (10)$$

Оскільки для котушки Гельмгольца з неширокими обмотками величина  $\rho\omega < R$ , а різниця  $2\alpha - R = \Delta$  зазвичай мала, то останнє вираження можна розк-

$$B_x = ((1.6 I \omega / (\sqrt{5} R)) [1 - 0,6 (\Delta/R) + 0,16 (\Delta^3/R^3) + 0,64 ((\rho\omega)^2 \Delta/R^3) - 0,23 ((\rho\omega)^4/R^4) + \dots] \quad (11)$$

Оскільки множення  $\rho\omega$  напівширина обмотки, формула (11) виражає величину магнітної індукції в центрі котушки, то очевидний її збіг з формулою (10), якщо в останній покласти  $x=y=0$ . Отже, спіралевидна гвинтоподібність намотування не вносить змін у вираження для розрахунку аксіальної скла-

тягне за собою появу ряду похибок, зумовлених кінцевим перетином обмотки, гвинтоподібністю намотки та деякими іншими факторами.

У ряді випадків вплив того або іншого чинника може бути врахований при розрахунку і тим самим набагато підвищена точність у визначенні постійної кільця Гельмгольца.

Розглянемо спочатку методику обліку кінцевої ширини одношарової обмотки кільця Гельмгольца.

Дві елементарні ділянки щільної обмотки котушки, зміщених на однакову відстань від середин секцій в один бік, мають величини  $R$  і  $\alpha$  такі ж, як і центральні витки секцій, але початок координат, зміщений відносно центру котушки на величину  $z$ . Тому для обчислення магнітної індукції, що створюється двома елементарними ділянками обмотки в трчці М-коду, необхідно у вирази (4) і (5) підставити замість  $x$  величину  $x-z$ , а замість струму  $I$  - значення струму в елементарній ділянці обмотки, тобто  $I\omega dz/2\eta$ ,

де

$\omega$  - кількість витків в секції обмотки.

Проінтегрувавши вираз (4) в межах ширини обмотки, тобто від  $+\eta$  до  $-\eta$ , отримаємо:

дукцію в центрі котушки, так і на розподіл магнітного поля котушки. При значеннях  $\eta < \rho$  і  $2\alpha$ , близьких до  $R$ , вираз (8) можна привести до зручного для розрахунків вигляду

кроком гвинтової спіральної лінії. Тому необхідно для точних розрахунків визначати вплив спіралевидної гвинтоподібності обмотки на постійну котушки. Цей вплив можна обчислити, спираючись на закон Біо-Савара-Лапласа..

Складова магнітної індукції  $dB_0$  уздовж осі циліндра (аксіальна), на якій намотана спіралевидна гвинтова обмотка, рівна

$$dB_{0x} = (\mu_0 I / 4\pi) ((zdl_y - ydl_z) / r^3)$$

або в циліндровій системі координат

$$dB_{0x} = (\mu_0 I / 4\pi) ((R_2 d\theta) / r^3)$$

Потім отримаємо

ласти в ряд по мірах  $\Delta/R$  та  $\rho\omega/R$ , що для двох секцій дає

дової магнітного поля котушки, якщо за ширину обмотки приймати відстань від початку до кінця гвинтової спіральної секції.

Остаточний вираз для визначення магнітної індукції одношарової котушки з врахуванням поправок прийме вигляд

$$B_{0x} = ((1.6 / \sqrt{5}) (\mu_0 I \omega / R_{cp})) [1 - 0,6 (\Delta / R_{cp}) + 0,16 (\Delta^3 / R_{cp}^3) - 0,05 (c^2 / R_{cp}^2) - 0,1 (\mu^2 / R_{cp}^2) + 0,64 (\Delta \eta^2 / R_{cp}^3) - 0,23 (\eta^4 / R_{cp}^4) + (0,96 (\Delta / R_{cp}^3) - 1,152 (\eta^2 / R_{cp}^4)) (2x^2 - y^2) - (0,144 / R_{cp}^4) (8x^4 - 24x^2y^2 + 3y^4 + \dots)] \quad (12)$$

У практиці магнітних вимірів найчастіше застосовуються багат шарові котушки Гельмгольца. Якщо котушка Гельмгольца має в своїх секціях декілька шарів, то необхідно в розрахункову формулу (8) ввести поправки, пов'язані з кінцевою то-

вщиною обмотки. Для цього необхідно рівняння (8) розкласти в ряд Тейлора по мірах приросту радіусу  $R$  і проінтегрувати по цьому приросту в межах товщини обмотки. Провівши цю операцію, отримаємо

$$B_{0x} = ((1.6 / \sqrt{5}) (\mu_0 I \omega / R_{cp})) [1 - 0,6 (\Delta / R_{cp}) + 0,16 (\Delta^3 / R_{cp}^3) - (\xi^2 / 15 R_{cp}^2 + 0,64 (\Delta \eta^2 / R_{cp}^3) - 0,23 (\eta^4 / R_{cp}^4) + 0,256 (\eta^2 \xi^2 / R_{cp}^4) + 0,032 (30 (\Delta / R_{cp}^3) - 36 (\eta^2 / R_{cp}^4) + 31 (\xi^2 / R_{cp}^4)) (2x^2 - y^2) - (0,144 / R_{cp}^4) (8x^4 - 24x^2y^2 + 3y^4) + \dots],$$

де  $2\xi$  - товщина обмотки,

$R_{cp}$  - середній радіус обмотки,

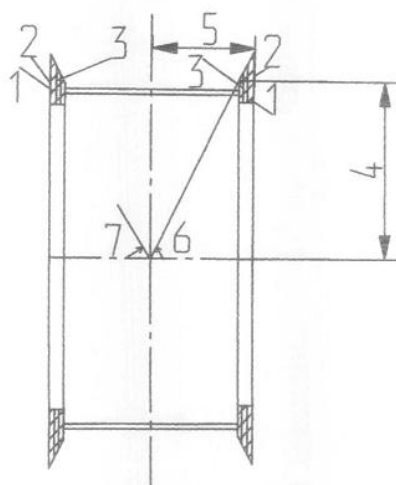
Умовою однорідності в цьому випадку буде  $30 (\Delta / R_{cp}) - 36 (\eta^2 / R_{cp}^2) + 31 (\xi^2 / R_{cp}^2) = 0$  (14)

Рівняння (14) дозволяє по заданих параметрах  $\xi$ ,  $\eta$ , і  $R_{cp}$  розрахувати відстань між серединами секцій обмотки  $L = R_{cp} + \Delta$ , яке забезпечить найкращу однорідність магнітного поля в центральній області багат шарової котушки Гельмгольца, причому пристрій додатково містить  $n$  резонансних контурів, які укладені по спіралі на каркас, та їх міжвитковий інтервал складає половину діаметра проводу  $d/2$  на початку каркасу і зменшується по формулі  $d/2 - (i/n)(d/2)$ .

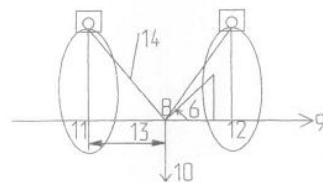
Умова однорідності розраховується співвідношенням  $\xi/\eta = \sqrt{36/31}$ , що має місце при значенні  $\Delta=0$ , тобто при відстані між серединами секції, рівному середньому радіусу котушки. Товщина обмотки при цьому має бути завжди більше її ширини. Товсті обмотки менш вигідні, ніж тонкі, оскільки чим більше шарів, тим більше похибка виміру середнього радіусу котушки. Умова (14) дозволяє вибирати обмотки з малою товщиною і тим самим забезпечує можливість вищої точності.

У пристрої для створення однорідного магнітного поля є можливість реалізувати той ступінь однорідності поля, який визначається вибором кільцевої системи. Це особливо важливо, коли габарити кільцевої системи обмежені, а ступінь однорідності створюваного поля повинен бути високим. Такі вимоги виникають при проведенні компонентних вимірювань на підставі, що коливається

ся, коли кільцева система встановлюється на гіроскопічному стабілізаторі. При створенні малогабаритних переносних метрологічних приладів важливе значення мають вимоги до габаритів пристрою для створення однорідного магнітного поля. Крім того, вартість створення кільцевих систем більшою мірою залежить від їх габаритів, оскільки збільшення розмірів кілець веде до значного ускладнення всієї системи. Створення магнітного поля однієї і тієї ж однорідності за допомогою кільцевої системи менших розмірів набагато знижує і енергетичні витрати. З використанням складніших кільцевих систем збільшується область простору, в якій створюється поле необхідної однорідності. У багатьох випадках не бажано ускладнювати кільцеву систему і збільшувати використовувану нормовану область значень індукції в просторі. Такі рішення часто відкидалися через неможливість забезпечити необхідну однорідність поля при даних габаритах кільцевої системи. Пристрій для створення однорідного магнітного поля дає можливість використовувати малогабаритні кільцеві системи, не порушуючи умов формування магнітного поля. Це значно розширює можливості кільцевих систем, особливо у випадках застосування їх в обмежених об'ємах, причому пристрій для створення однорідного магнітного поля додатково містить  $n$  резонансних контурів, які укладені по спіралі на каркасі, та їх міжвитковий інтервал складає половину діаметра проводу  $d/2$  на початку каркасу і зменшується по формулі  $d/2 - (i/n)(d/2)$ .



Фиг. 1



Фиг. 2