

(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2021 00161

(22) Data de depozit: 08/04/2021

(41) Data publicării cererii:  
28/10/2022 BOPI nr. 10/2022

(71) Solicitant:  
• BALTAG OCTAVIAN IOAN,  
STR. GHIBĂNESCU NR. 5A, IAȘI, IS, RO

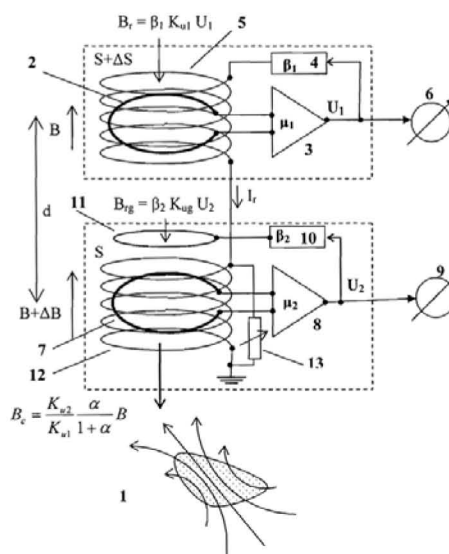
(72) Inventatori:  
• BALTAG OCTAVIAN IOAN,  
STR. GHIBĂNESCU NR. 5A, IAȘI, IS, RO

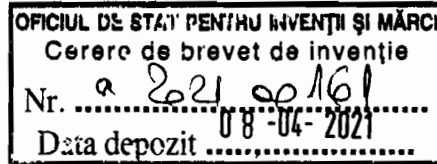
(54) MAGNETOMETRU DE GRADIENT

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un magnetometru destinat măsurării gradientului de ordinul întâi al câmpului magnetic. Magnetometrul, conform invenției, este compus din traductori de câmp dispuși coaxial la o distanță ( $d$ ) în două canale magnetometrice (I, II), primul canal (I) fiind amplasat la o distanță mai mare, iar al doilea canal (II), la o distanță mai mică față de o sursă (1) de câmp magnetic, primul canal (I) fiind dedicat măsurării câmpului ambiental ( $B$ ) și având în structura sa un senzor (2) conectat la un modul electronic de amplificare și detecție (3), care furnizează la ieșire o tensiune continuă, care, aplicată printr-un circuit de reacție negativă (4) generează într-o bobină de reacție negativă (5) un câmp de reacție opus ca sens câmpului ambiental ( $B$ ), un instrument indicator (6) furnizând informații privind valoarea inducției  $B$  a câmpului.

Revendicări: 2  
Figuri: 1





## MAGNETOMETRU DE GRADIENT

Invenția de față se referă la un aparat destinat măsurării gradientului de ordinul întâi al câmpului magnetic.

Gradientul de ordinul întâi al câmpului magnetic reprezintă derivata de ordinul întâi a câmpului magnetic raportată la o distanță numită bază. Fizic, această mărime este determinată prin diferența valorii câmpului magnetic în două puncte diferite, raportată la distanță. Gradiometrele de câmp magnetic sunt aparate, de tipul magnetometrelor, destinate măsurării gradientului câmpului magnetic generat de diferite fenomene, obiecte fizice sau structuri biologice. Ele sunt folosite în diferite domenii: geofizică pentru detectarea structurilor geologice, explorare arheologică pentru detectarea și cartografierea magnetică a unor situri, biomagnetism pentru detectarea activității magnetice a diferitor organe, caracterizarea magnetică și evaluarea amprenteii magnetice a navelor militare etc.

Pentru măsurarea gradientului de ordinul întâi al câmpului magnetic se folosesc doi traductori de câmp magnetic (în cazuri particulare SQUID - Superconducting Quantum Interference Device sau ferosonde saturabile), aliniați pe o aceeași axă de măsurare, situați la o distanță fixă, numită bază de măsurare. Gradientul magnetic se determină prin raportarea diferenței celor două câmpuri  $B$  și  $B+\Delta B$  la baza de măsurare de lungime  $d$ , unde  $B$  este componenta comună iar  $\Delta B$  reprezintă diferența inducției dintre punctele de măsurare:

$$G = \frac{B + \Delta B - B}{d} = \frac{\Delta B}{d} \quad (1)$$

Sunt cunoscute mai multe tipuri de gradiometre, cele mai folosite sunt următoarele:

- cea mai simplă structură de gradiometru este formată din doi senzori magnetici conectați în opoziție, astfel încât semnalul electric de la ieșirea acestora să fie proporțional cu diferența inducției magnetice măsurate de cei doi senzori, patente US 24855847 – *Combination magnetometer and gradiometer*, O.H. Schmitt, US 3064185 – *Magnetic gradiometer system*, J.G. Ferguson;
- o a doua structură este compusă din două magnetometre identice ca sensibilitate care furnizează la ieșire câte un semnal proporțional cu valoarea inducției magnetice în dreptul senzorilor; determinarea valorii gradientului inducției magnetice rezultă din scăderea tensiunilor de ieșire și raportarea acestora la baza de măsurare, patente US 4439732 – *Electrically balanced fluxgate gradiometers*, V.W. Hesterman et al., și US 3775674 – *Fluxgate gradiometer using a pulse generator to drive the energizing windings*, P.H. van Sloun et al.;

Mai sunt cunoscute de asemenea, o serie de soluții tehnice brevetate care se referă la măsurarea gradientului câmpului magnetic cu aplicații în detecția magnetică sau investigații biomagnetice:

- M.N. Keene, *Magnetic gradiometer incorporating global feedback*, US 6,339,328 B1, cu referire la un sistem de gradiometru SQUID compus din două canale de

*M.N.*

măsurare independente conectate la un sumator și o buclă de reacție negativă globală de gradient.

- N.M. Keene, *Magnetic gradiometer*, WO 98/40757, care folosește de asemenea canale magnetometrice SQUID independente conectate la dispozitive de sumare și determinare prin scădere a gradientului magnetic.
- R.H. Koch, *Gradiometer having a magnetometer which cancels background magnetic field from other magnetometer*, destinat unor aplicații biomedicale și care folosește o pluralitate de senzori magnetometrici independenți.

**Dezavantajele principale** ale acestor sisteme constau în faptul că sunt sensibile la diferența de sensibilitate a senzorilor magnetici sau a canalelor magnetometrice, ceea ce determină apariția unor erori în evaluarea gradientului. Un alt dezavantaj este determinat de faptul că mărimea erorii de măsurare este determinată de prezența componentei comune a câmpului magnetic, este proporțională cu aceasta și neidentitatea sensibilității canalelor magnetometrice, în sensul că rejecția componentei comune a câmpului magnetic este determinată de neidentitatea răspunsului canalelor magnetometrice.

**Problemele pe care le rezolvă invenția** se referă la:

- Inbunătățirea rejecției componentei comune  $B$  a câmpului magnetic;
- reducerea efectului determinat de neidentitatea funcției de transfer (sensibilității) a celor două canale magnetometrice;
- creșterea preciziei de măsurare a gradientului în condițiile existenței unei diferențe între cele două canale de măsurare.

Invenția de față **elimină dezavantajele** soluțiilor anterioare prin faptul că reduce efectul neidentității canalelor magnetometrice prin reducerea valorii componentei comune a câmpului magnetic în care se află cei doi traductori magnetici.

Invenția de față **prezintă avantajele** următoare:

- permite măsurarea gradientului câmpului magnetic în prezența unei componente comune având valori mai ridicate;
- reduce eroarea de măsurare a gradientului până la o valoare prestabilită determinată atât de diferența de sensibilitate a canalelor de măsurare cât și de valoarea componentei comune a câmpului ambiental;
- soluția tehnică poate fi folosită pentru majoritatea sistemelor magnetometrice care folosesc ca traductori de câmp magnetic ferose saturabile, traductori magnetorezistivi sau SQUID.

În continuare se prezintă un exemplu de realizare a invenției cu referire la figura care prezintă schema bloc în care s-au făcut notațiile:

$S+\Delta S$  : sensibilitatea traductorului canalului magnetometric  $I$  distal (situat mai departe de sursa de câmp);

$S$  : sensibilitatea traductorului canalului magnetometric  $II$  proximal (situat în apropierea sursei de câmp);

$U_1$  : tensiunea de ieșire a canalului magnetometric  $I$  distal;

$U_2$  : tensiunea de ieșire a canalului magnetometric  $II$  proximal;

$B$  : inducția magnetică, componenta comună, aplicată canalului magnetometric  $I$  distal;

$B+\Delta B$  : inducția magnetică, componenta comună și gradientul, aplicată canalului magnetometric  $II$  proximal;

*Netis*

- $K_{u1}$  : constanta de tensiune a bobinei de reacție a canalului I;  
 $K_{u2}$  : constanta de tensiune a bobinei de compensare a canalului 2;  
 $R_{r1}$  : rezistența bobinei de reacție a canalului I;  
 $K_{ug}$  : constanta de tensiune a bobinei de reacție negativă de gradient pentru canalul II;  
 $B_r$  : inducția magnetică de reacție negativă de câmp și compensare aplicată canalelor magnetometrice I și II;  
 $B_{rg}$  : inducția magnetică corespunzătoare reacției negative de gradient magnetic;  
 $\beta_1, \beta_2$  : coeficientul de reacție negativă corespunzător canalului magnetometric I respectiv II;  
 $I_r$  : intensitatea curentului de reacție negativă și compensare generat de canalul I;  
 $B_c$  : inducția magnetică a câmpului de compensare produsă de bobina de compensare a canalului II.

Conform exemplului de realizare a invenției prezentat în figură - care nu conține etajele specifice unui magnetometru referitoare la circuitele bine cunoscute de excitare, detecție sincronă și integrare - magnetometrul de gradient este compus din două canale magnetometrice I și II, având traductorii de câmp dispuși coaxial la o distanță  $d$  numită bază de măsurare a gradientului, canalul I fiind așezat la o distanță mai mare, iar canalul II la o distanță mai mică față de o sursă I de câmp magnetic. În cazul unui magnetometru SQUID (de exemplu), canalul I dedicat măsurării câmpului ambiental  $B$ , are în structura sa un senzor 2 având sensibilitatea  $S + \Delta S$  conectat la un modul electronic de amplificare și detecție 3 cu factorul de amplificare  $\mu_1$  care furnizează la ieșire o tensiune continuă  $U_1$  care aplicată printr-un circuit de reacție negativă 4 generează într-o bobină de reacție negativă 5, realizată peste senzorul 2, un câmp de reacție  $B_r$ , opus ca sens câmpului ambiental  $B$ . Un instrument indicator 6, analogic sau digital, furnizează informații privind valoarea inducției  $B$  a câmpului.

Canalul de măsurare II are în alcătuirea sa un senzor 7, aflat într-un câmp magnetic  $B + \Delta B$ , având sensibilitatea  $S$  conectat la un modul electronic de amplificare și detecție 8 cu factorul de amplificare  $\mu_2$  care furnizează la ieșire o tensiune continuă  $U_2$  măsurată printr-un instrument indicator 9 al valorii gradientului, analogic sau digital, care tensiune fiind aplicată printr-un circuit de reacție negativă 10 generează într-o bobină de reacție negativă 11, realizată peste senzorul 7, un câmp de reacție  $B_{rg}$  opus ca sens câmpului rezidual  $B + \Delta B - B_r$ , rămas ca urmare a acțiunii curentului de reacție negativă produs de modulul magnetometric I într-o bobină de compensare 12, conectată în paralel cu un rezistor reglabil 13, și inseriată cu bobina 5 de reacție negativă a canalului magnetometric I, concentrică cu senzorul 7 și bobina de reacție de gradient II.

Funcția de transfer a canalului I este reprezentată prin relația care descrie răspunsul unui magnetometru (tensiunea de ieșire  $U_1$  în funcție de inducția magnetică aplicată  $B$ ) prevăzut cu buclă de reacție negativă:

$$U_1 = \frac{(S + \Delta S)\mu_1}{1 + (S + \Delta S)\mu_1\beta_1K_{u1}} B \quad (2)$$

Câmpul de reacție negativă, având inducția  $B_r$ , este determinat de constanta de tensiune  $K_{u1}$  a bobinei de reacție negativă 5 și tensiunea aplicată  $\beta_1 U_1$ , prin rețeaua de reacție negativă 4, care este o fracțiune din tensiunea de ieșire  $U_1$  a canalului magnetometric I:

$$B_r = U_1\beta_1K_{u1} = \frac{(S + \Delta S)\mu_1\beta_1K_{u1}}{1 + (S + \Delta S)\mu_1\beta_1K_{u1}} B = \frac{\alpha}{1 + \alpha} B \quad (3)$$

*Acu*

unde factorul  $\alpha$  este definit prin relația

$$\alpha = (S + \Delta S)\mu_1\beta_1K_{u1}. \quad (4)$$

Trebuie remarcat că valoarea inducției magnetice de reacție negativă  $B_r$  este mai mică decât valoarea inducției  $B$ , astfel încât nu va putea compensa inducția din volumul traductorului II. Aceasta duce la apariția unor erori de măsurare a gradientului astfel încât apare necesitatea măririi constantei bobinei (sau a modificării intensității curentului de compensare) de compensare a canalului II.

Pentru canalul de măsurare II, care măsoară diferența necompensată  $\Delta B$  (care reprezintă gradientul), funcția de transfer este următoarea:

$$U_2 = \frac{S\mu_2}{1 + S\mu_2\beta_2K_{ug}}(B + \Delta B - B_c) = S_2(B + \Delta B - \frac{K_{u2}}{K_{u1}}\frac{\alpha}{1 + \alpha}B) = S_2(\Delta B + \varepsilon) \quad (5)$$

unde:

$$- B_c \text{ este inducția produsă de bobina de compensare definită prin relația } B_c = \frac{K_{u2}}{K_{u1}}\frac{\alpha}{1 + \alpha}B$$

iar

-  $\varepsilon$  este eroarea de măsurare dată de relația:

$$\varepsilon = B - B_c = \left(1 - \frac{K_{u2}}{K_{u1}}\frac{\alpha}{1 + \alpha}\right)B \quad (6)$$

În funcție de precizia măsurătorilor, termenul de eroare  $\varepsilon$  poate fi redus în funcție de factorul  $\alpha$  care reprezintă profunzimea reacției negative a canalului I de măsurare a componentei comune a câmpului ambiental  $B$ , împreună cu raportul constantelor de tensiune ale celor două bobine  $K_{u2}/K_{u1}$ . Factorul  $\alpha$  poate avea valori cuprinse între 1 și 10.000 în funcție de performanțele cerute canalului magnetometric.

În măsurători este de dorit ca eroarea  $\varepsilon$  de măsurare a gradientului să fie mai mică decât valoarea  $\Delta B$  a gradientului:

$$\varepsilon \ll \Delta B \quad \text{sau} \quad \left(1 - \frac{K_{u2}}{K_{u1}}\frac{\alpha}{1 + \alpha}\right)B \ll \Delta B \quad (7)$$

Aceste două relații permit să se calculeze valoarea admisă pentru componenta comună a câmpului ambiental  $B$  pentru o eroare  $\varepsilon$  prestabilită, în condițiile în care cele două canale magnetometrice nu sunt identice, atât în ceea ce privește sensibilitatea cât și constantele bobinelor de reacție / compensare. Pentru o construcție fizică ideală,  $\varepsilon=0$ , trebuie îndeplinită condiția:

$$\left(1 - \frac{K_{u2}}{K_{u1}}\frac{\alpha}{1 + \alpha}\right) = 0, \text{ sau } \frac{K_{u1}}{K_{u2}} = \frac{\alpha}{1 + \alpha}.$$

Acest deziderat este realizabil prin mărirea constantei bobinei canalului II față de bobina canalului I astfel încât câmpul de compensare în canalul II să fie cât mai apropiat de câmpul ambiental  $B$ , minimizând astfel eroarea  $\varepsilon$  de măsurare a gradientului. Soluția cea mai practică este de a se folosi o bobină având constanta  $K_{u2}$  mai ridicată, iar reglajele pentru minimizarea erorii  $\varepsilon$  să se facă prin modificarea intensității curentului de compensare prin bobină folosind rezistența reglabilă 13 montată ca un șunt în paralel cu această bobină.

Magnetometrul de gradient prezintă următoarele avantaje față de soluțiile anterioare:

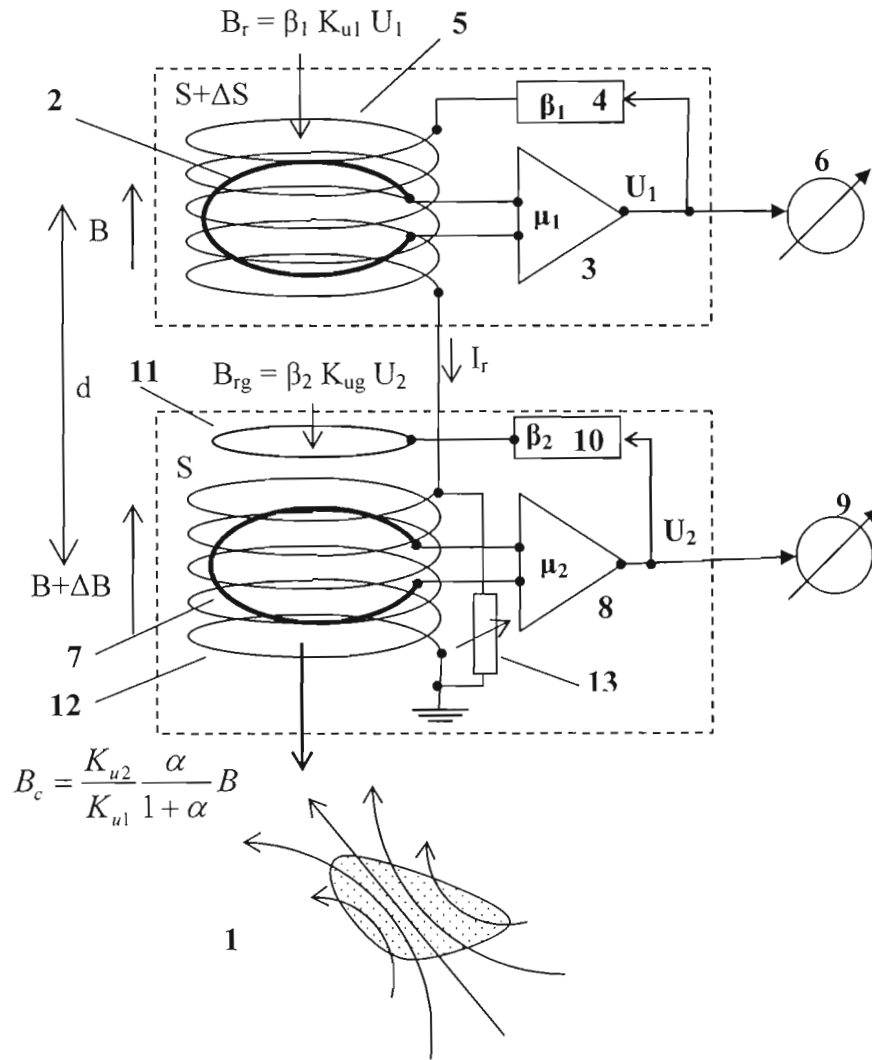
- Structura magnetometrului poate fi aplicată pentru toate magnetometrele care folosesc senzori și traductori magnetici având diferite tipuri: feromane saturabile, SQUID; magnetorezistență, efect Hall, pompaj optic, precesie nucleară.
- Permite o rejecție superioară a componentei comune a câmpului magnetic aplicat celor doi traductori de câmp magnetic.
- Asigură reducerea erorilor de măsurare a gradientului câmpului magnetic datorate prezenței componentei comune a câmpului reflectate în semnalul de ieșire ca efect al neidentității sensibilității canalelor de măsurare.
- Permite determinarea componentei comune a câmpului magnetic în funcție de eroarea admisibilă de măsurare a gradientului pentru o valoare prestabilită a gradientului magnetic.

## MAGNETOMETRU DE GRADIENT

### REVENDICĂRI

1. Magnetometru de gradient destinat măsurării gradientului de ordinul întâi al câmpului magnetic compus din două canale magnetometrice, primul numit canal distal **I** aflat la distanță față de sursa de câmp și al doilea numit proximal **II** aflat mai aproape de sursa de câmp magnetic, ambele canale având funcții de transfer diferite care reduc factorul de rejecție al modului comun, primul canal constituind un magnetometru de referință întrucât măsoară componenta comună a câmpului magnetic, iar al doilea canal destinat măsurării diferenței valorilor câmpurilor în cele două puncte de măsurare distal și proximal, componenta comună a câmpului din zona proximală fiind controlată și anulată de primul canal de referință în zona de măsurare a gradientului, **caracterizat prin aceea că** rejecția modului comun corespunzător componentei comune a câmpului magnetic al celor două canale magnetometrice este asigurată prin curentul care generează câmpul magnetic de reacție negativă generat de canalul distal, care curent electric este aplicat și unei bobine de compensare care cuprinde senzorul canalului magnetometric proximal, componenta câmpului care generează gradientul rezultând din diferența rămasă necompensată în canalul proximal al magnetometrului **II**.
2. Magnetometru de gradient conform revendicării 1 care conține în structura sa două canale magnetometrice cu rol diferit, din care canalul proximal **II** pentru măsurarea gradientului câmpului magnetic realizat în structura unui magnetometru cu reacție negativă, având sensibilitatea ridicată corespunzător componentei de gradient are în alcătuirea sa un senzor **7**, aflat într-un câmp magnetic  $B + \Delta B$ , având sensibilitatea  $S$  conectat la un modul electronic de amplificare și detecție **8** cu factorul de amplificare  $\mu_2$  care furnizează la ieșire o tensiune continuă  $U_2$  măsurată printr-un instrument indicator **9** al valorii gradientului, analogic sau digital, care tensiune fiind aplicată printr-un circuit de reacție negativă **10** generează într-o bobină de reacție negativă **11**, realizată peste senzorul **7**, un câmp de reacție  $B_{rg}$  opus ca sens câmpului rezidual  $B + \Delta B - B_c$  rămas ca urmare a acțiunii curentului de reacție negativă produs de modulul magnetometric **I** într-o bobină de compensare **12**, identică conectată în paralel cu un rezistor reglabil **13**, având aceeași constantă de câmp, și inseriată cu bobina **5** de reacție negativă a canalului magnetometric **I**, concentrică cu senzorul **7** și bobina de reacție de gradient **11** **caracterizat prin aceea că** rejecția componentei comune a câmpului magnetic este realizată în volumul senzorului **7** de către curentul de reacție negativă generat de circuitul de reacție al canalului magnetometric **I**, care curent circulă prin bobina de compensare **12** conectată în paralel cu rezistorul reglabil **13** prin care se reglează intensitatea curentului de compensare astfel încât eroarea de compensare să fie minimă, la ieșirea canalului magnetometric **II** rezultând numai valoarea componentei câmpului care determină gradientul magnetic, care valoare este apoi raportată la distanța dintre cei doi senzori magnetici **2**, respectiv **7**, pentru a se obține gradientul în unități de inducție magnetică raportate la unități de lungime.

MAGNETOMETRU DE GRADIENT



*mu*