



URZĄD
PATENTOWY
PRL

OPIS PATENTOWY

57259

Patent dodatkowy
do patentu 56 309

Zgłoszono: 03.XI.1966 (P 117 198)

Pierwszeństwo: 04.II.1966 Francja

Opublikowano: 30.VI.1969

Kl. ~~21 e, 12~~

21e 33/08

MKP G 01 r 33/08

UKD

Współtwórcy wynalazku: Antoine Salvi, Rene Besson

Właściciel patentu: Commissariat a l'Energie Atomique, Paryż (Francja)

Magnetometr z rezonansem magnetycznym

1

Przedmiotem wynalazku jest magnetometr z rezonansem magnetycznym przeznaczony do pomiaru natężenia pól magnetycznych, zwłaszcza bardzo słabych pól magnetycznych (poniżej 1 gaussa), oraz zmiany tych natężeń, przy czym pomiary dokonuje się z ruchomego pojazdu (samolot, balon, sputnik itp.).

Znanych jest kilka rodzajów magnetometrów, których działanie oparte jest na zjawisku rezonansu magnetycznego (w szczególności na pomiarze częstotliwości precesji, zwanej dalej częstotliwością Larmora), cząsteczki podatomowej na ogół jądrowej, na przykład jądra atomowego lub w szczególności protonu w badanym polu magnetycznym, przy czym częstotliwość ta proporcjonalna jest do natężenia pola magnetycznego w którym umieszczona jest wyżej wymieniona cząsteczka podatomowa.

Jeżeli przez H określimy natężenie w gausach badanego pola magnetycznego, w którym umieszczona jest cząsteczka podatomowa, przez γ stosunek żyromagnetyczny cząsteczki (fakt istnienia określonego stosunku γ oznacza, że moment kinetyczny lub spina więc i moment magnetyczny cząsteczki są różne od zera) a przez F_0 częstotliwość precesji lub Larmora (w hercach), uzyskujemy równanie:

$$2\pi F_0 = \gamma H \quad (1)$$

Stosunek żyromagnetyczny γ (w gausach na sekundę) dla wielu jąder atomowych jest znany

2

z bardzo dużą dokładnością na przykład z dokładnością 10^{-6} w szczególności jednak znany jest stosunek żyromagnetyczny protonu w wodzie od-tlenionej, który wynosi 26751,3 gausów/sekundę.

5 Promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości F spolaryzowane jest kołowo, przy czym rezonans pojawia się jako ruch obrotowy całkowitego momentu magnetycznego dookoła kierunku pola magnetycznego.

10 Wirujące pole promieniowania elektromagnetycznego wykrywane jest przy pomocy co najmniej jednej cewki, usytuowanej wokół cząsteczek podatomowych w której wirujące pole wywołuje zmienne napięcie elektryczne.

15 Z powyższego wynika, że gdy cewka znajduje się na pokładzie ruchomego pojazdu poruszającego się z pewną chwilową obrotową prędkością kątową ω dookoła kierunku pola magnetycznego, to cewka również przesuwana się z tą prędkością kątową tak, że częstotliwość zmiennego napięcia, wywołanego w cewce wskutek rezonansu magnetycznego, nie będzie już określona wyżej wymienionym wzorem (1), który odpowiadał absolutnemu obrotowi całkowitego momentu magnetycznego w stosunku do stałego układu odniesienia, lecz odpowiadać będzie względnemu ruchowi obrotowemu tego momentu w odniesieniu do pojazdu a zatem i do cewki. Inaczej mówiąc zgodnie z prawem składowych prędkości kątowych, uzyskuje się, określając przez f częstotliwość w przypadku

ruchu obrotowego przy chwilowej prędkości kątowej ω :

$$2\Pi f = \gamma H - \omega \quad (2)$$

W szczególności, gdy pragnie się mierzyć z dużą dokładnością, słabe pole magnetyczne na przykład ziemskie pole magnetyczne oraz jego zmiany magnetometrem z rezonansem magnetycznym znanego typu, to wynik pomiaru będzie obarczony błędem, ponieważ pominięto tu wpływ ω przy zastosowaniu wzoru (1); Wiadomo, że ω może uzyskać stosunkowo znaczne i zmienne wartości, gdy pomiary dokonuje się z samolotu, balonu lub sputnika obracającego się dookoła osi pola magnetycznego. Dokonanie korekty ω , jest trudne z uwagi na zmienność tej wartości ω . Z tego faktu wynikają więc niekorzystne błędy pomiaru wartości H , a przede wszystkim jego zmian.

Badanie magnetyzmu oraz poszukiwania geofizyczne mineralnych substancji oparte na zmianach H mogą zatem być obciążone błędami, w przypadku nieuwzględniania wpływu ω .

W patencie głównym opisano magnetometr, który zapobiega wyżej wymienionym niedogodnościom, przy czym magnetometr ten zawiera: cząsteczki podatomowe o momentach magnetycznych i kinetycznych różnych od zera; układy do zdalnego pobudzenia i wykrywania rezonansu magnetycznego oraz układy do pomiaru częstotliwości tak wykrytego sygnału. Poza tym magnetometr wyróżnia się tym, że cząsteczki, których rezonans wykrywa się są dwojakiego rodzaju i posiadają różne wartości stosunku momentów oraz, że magnetometr zawiera elementy przeznaczone do pomiaru różnicy algebraicznej dwóch odpowiadających im częstotliwości magnetycznych, przy czym każda z częstotliwości posiada znak odpowiadający wyżej wymienionym stosunkom momentów.

Określając przez f' i f'' , oraz przez γ' i γ'' wartości f i γ dla obu rodzajów cząsteczek, które złożone są na przykład z protonów dla których γ' jest dodatnie, oraz z jąder fluoru dla których γ'' jest również dodatnie lecz mniejsze od γ' , równanie (2) dla obu jąder będzie następujące:

$$2\Pi f' = \gamma' H - \omega \quad (3)$$

$$2\Pi f'' = \gamma'' H - \omega \quad (4)$$

Określając przez f''' różnicę częstotliwości f' i f'' uzyskuje się równanie:

$$2\Pi f''' = 2\Pi f' - 2\Pi f'' = (\gamma' - \gamma'')H = GH \quad (5)$$

gdzie G — różnica $\gamma' - \gamma''$ zakładając że $\gamma' > \gamma''$. Ponieważ z dużą dokładnością znane są wartości γ' i γ'' , tak więc G jest również znane.

W konsekwencji równanie (5) zastępuje równanie (1) z tą korzyścią, że częstotliwość f''' jest ściśle proporcjonalna do H , nawet jeżeli magnetometr obraca się dookoła kierunku H z prędkością ω .

W przypadku gdy γ' i γ'' mają różne znaki, na przykład γ' jest dodatnie a γ'' ujemne, równanie (3) pozostaje prawdziwe, natomiast zależności (4)

i (5) zastąpione są następującymi równościami:

$$2\Pi f'' = \omega - \gamma'' H \quad (4a)$$

$$2\Pi(f' + f'') = (\gamma' - \gamma'')H = GH \quad (5a)$$

gdzie w każdym przypadku przez G określamy różnicę algebraiczną stosunków żyromagnetycznych.

Jako pary cząsteczek podatomowych odpowiednich do stosowania wynalazku według patentu głównego należy wymienić: — protony i jądra fluoru, — protony i jądra fosforu, protony i jądra helu 3 przy czym wszystkie jądra mają dodatnie stosunki żyromagnetyczne za wyjątkiem helu 3 posiadającego ujemny stosunek żyromagnetyczny.

Jak to już opisano w patencie głównym, w korzystnym przykładzie wykonania (jest to prawdziwe zwłaszcza dla obu pierwszych par) stosuje się dynamiczną polaryzację przez tak zwane pompowanie elektronowe według patentu francuskiego nr 1.174.136 zgłoszonego 6 kwietnia 1957 r. to znaczy, że stosuje się próbki płynu zawierające rozpuszczony, (w rozpuszczalniku zawierającym wyżej wymienione jądra — protony, jądra fluoru, jądra fosforu), rodnik paramagnetyczny zawierający nieparowane elektrony, przy czym nasycenie prądką elektronowego rezonansu zwiększa natężenie sygnału jądrowego. Każdy czujnik magnetometru wykonuje się najkorzystniej według patentu głównego w postaci spinowego generatora drgań, typu opisanego we francuskim patencie nr 1.351.587 z dnia 28 grudnia 1962 r.

W patencie głównym oba czujniki lub głowice pomiarowe magnetometru ustawione były obok siebie i były ze sobą sztywno połączone.

Stwierdzono tymczasem, że ustawiając oba czujniki, już nie jeden przy drugim, lecz w pewnej odległości od siebie, zwłaszcza jeden za drugim w płaszczyźnie symetrii pionowej pojazdu, na przykład samolotu, który je wiezie, można kompensować zakłócenia pomiaru natężenia ziemskiego pola magnetycznego, przy czym zakłócenia spowodowane były nie tylko zjawiskiem żyroskopowym spowodowanym obrotem samolotu, lecz również „stałym” zakłóceniovym polem magnetycznym wywołanym ciągłymi namagnesowaniami oraz prądami zasilającymi urządzenia pokładowe samolotu, przy czym wartości natężeń zakłócających pole zmieniają się w zależności od miejsca w samolocie.

Wynalazek polega na takim usytuowaniu położenia dwóch czujników, (których czynne substancje zawierają cząsteczki podatomowe o różnych stosunkach żyromagnetycznych), że uzyskuje się w tych obu położeniach mniej więcej tę samą wartość iloczynu natężenia w jednym położeniu ciągłego zakłócającego pola magnetycznego, przez stosunek żyromagnetyczny cząsteczek czujnika umieszczonego w tym położeniu.

Wynalazek dotyczy w szczególności magnetometru magnetowariometru przeznaczonego zwłaszcza do pomiaru zmian ziemskiego pola magnetycznego na pokładzie samolotu.

Wynalazek zostanie obecnie bliżej omówiony z powołaniem się na rysunek, na którym fig. 1 przedstawia schematycznie w bocznym przekroju pionowym samolot, w którym umieszczony jest magnetometr będący przedmiotem wynalazku, a fig. 2 przedstawia schemat blokowy odmiany magnetometru według wynalazku.

Na fig. 1 oznaczono jako **N** dziób samolotu, **F** — jego kadłub, **L** — skrzydła, **G** — stery usterzenia **E** i **Q** — ogon. Wiadomo, że większość urządzeń pokładowych (silniki, wyposażenie elektryczne i elektroniczne, ładownice, zbiorniki i tak dalej) wymagających ciągłej kompensacji magnetycznej, znajdują się w mniej więcej kulistej strefie umieszczonej na przodzie samolotu, przy czym środek tej strefy jest utożsamiany ze środkiem ciężkości **M** mas magnetycznych samolotu. Urządzenia tej strefy bardziej oddziałują na czujnik położony w punkcie **B** w odległości **d** od środka ciężkości **M**, niż na czujnik położony w punkcie **A** w dodatkowej odległości **a** od środka ciężkości **M**.

Na rysunku uwidoczniono, że położenie **A** znajduje się w ogonie **Q** samolotu, natomiast **B** znajduje się pomiędzy ogonem a strefą **R**, przy czym położenia **A** i **B** są położeniami korzystnymi dla obu czujników.

Dla położenia **A** i **B** czujników, według wzoru (5), otrzymujemy:

$$2\Pi f''' = (\gamma' - \gamma'')H$$

gdzie **H** jest takie samo jak w położeniach **A** i **B**. Przyjmując że natężenie pola magnetycznego w miejscach **A** i **B** zawiera dwie składowe, to jest pierwszą wspólną **H₀** równą badanemu „ziemskiemu” polu magnetycznemu, które mało zmienia się pomiędzy miejscami **A** i **B** oraz drugą **h_A** dla punktu **A** i **h_B** dla punktu **B**, powodowaną ciągłymi zakłóceniami magnetycznymi wywołanymi w samolocie, głównie przez obwody i inne wyposażenia strefy **R**, tak że wzór (5) zamienia się na

$$2\Pi f''' = \gamma'(H_0 + \varepsilon h_A) - \gamma''(H_0 + \varepsilon h_B) \quad (6)$$

zakładając, że $\varepsilon = \pm 1$ oraz że γ' stanowi stosunek żyromagnetyczny jąder atomowych czujnika w miejscu **A** oraz γ'' stosunek żyromagnetyczny jąder atomowych czujnika w miejscu **B**, przekształcając wzór otrzymamy

$$2\Pi f''' = (\gamma' - \gamma'')H_0 + \varepsilon(\gamma'h_A - \gamma''h_B) \quad (7)$$

Równanie (7) zawiera, w porównaniu z równaniem (5) człon korekcyjny równy

$$\varepsilon(\gamma'h_A - \gamma''h_B)$$

Zgodnie z wynalazkiem wybiera się punkty miejsc **A** i **B** w taki sposób, aby człon korekcyjny był równy zero, to znaczy

$$\gamma'h_A = \gamma''h_B \quad (8)$$

czyli wybiera się położenia obu czujników zawierających czynne substancje cząstek podatomowych (zwłaszcza jąder atomowych) o różnych stosunkach

żyromagnetycznych tak, aby w obu tych położeniach uzyskać mniej więcej tę samą wartość iloczynu natężenia ciągłego zakłócającego pola magnetycznego w danym położeniu przez stosunek żyromagnetyczny cząstek (lub jąder) czujnika umieszczonego w tym położeniu.

Należy zaznaczyć, że najpierw w miejscu **A**, gdzie natężenie zakłócającego pola magnetycznego jest najsłabsze, umieszcza się czujnik którego jądra atomowe posiadają najwyższy stosunek żyromagnetyczny.

Najkorzystniej jest, choć nie jest to konieczne, umieścić czujnik o wyższym stosunku żyromagnetycznym w ogonie (punkt **A**), a drugi czujnik w sąsiedztwie **B** w odległości **a** mniejszej od **d**, w taki sposób, że **H₀** będzie rzeczywiście takie samo w tych dwóch punktach.

Poza tym zakładamy, że poprawne działanie magnetometru jest wtedy gdy stosunek h_A/h_B (który musi pozostać równy stosunkowi γ''/γ') pozostaje niezmienny, to znaczy, że środek ciężkości magnetycznej **M** (bliski środka strefy **R**) pozostaje niezmienny. Stwierdzono rzeczywiście, że na zwykłych samolotach ten środek ciężkości przemieszcza się bardzo mało.

Na fig. 2 przedstawiono przykład wykonywania magnetometru według patentu głównego, gdzie stosuje się pompowanie elektronowe według wyżej wymienionego francuskiego patentu nr 1.174.136.

Magnetometr przedstawiony na fig. 2 zawiera dwa generatory z rezonansem magnetycznym **1a** usytuowany w punkcie **A** i **1b** umieszczony w punkcie **B** wywołujące dwa napięcia o częstotliwościach **f'** i **f''** równe częstotliwościom Larmora dla dwóch cząstek podatomowych, zwłaszcza jąder atomowych o różnych stosunkach żyromagnetycznych γ' i γ'' .

Każdy z generatorów **1a**, **1b** z rezonansem magnetycznym zawiera naczynia **2a** i **2b** zawierające roztwory **3a** i **3b** składające się z rozpuszczalników zawierających jądra atomowe (różne dla obu naczyń) z momentami magnetycznymi i kinetycznymi różnymi od zera, a tym samym posiadające określone stosunki żyromagnetyczne oraz rozpuszczony w tych rozpuszczalnikach wolny rodnik paramagnetyczny posiadający odchyłkę nadsubtelną (to znaczy posiadający częstotliwość rezonansową w zerowym polu magnetycznym) stosunkowo wysoką i sprzężenie bipolarne pomiędzy spinami elektronów niesparowanych wolnego rodnika a spinami jąder atomowych rozpuszczalnika. Nasylenie prążka rezonansu elektronowego takiego rodnika zwiększa skutek zjawiska Overhausera — Abragama, natężenie sygnału, przy częstotliwości Larmora jąder atomowych.

Tutulem przykładu naczynie **2a** zawiera roztwór **3a** składający się z 200 cm³ wody w której rozpuszczono 0,5 g soli Fremy — K₂NO(SO₃)₂ o częstotliwości rezonansu w polu zerowym rzędu 56 MHz, podczas gdy naczynie **2b** zawiera roztwór **3b** w ilości 200 cm³ C₆H₄(CF₃)₂ w postaci meta, nasycony solą Fremy K₂NO(SO₃)₂.

Do pomiaru takiej małej częstotliwości najkorzystniej jest gdy zostanie zastosowany częstościomierz niskich częstotliwości opisany w patencie dodatkowym do zgłoszenia PV 14.224 z dnia 22 kwietnia 1965 r.

Pomimo, że opisano przykładowe rozwiązanie z parą spinowych generatorów drgań zwłaszcza z parą protonów i jąder fosforu lub fluoru według wynalazku można zastosować te same pary cząstek z innymi rodzajami generatorów z rezonansem magnetycznym na przykład z generatorami typu laserowego opisane w patencie francuskim nr 1.177.112 zgłoszonym 1 czerwca 1957 r. lub też z generatorami z precesją swobodną opisanemu w francuskim patencie nr 1.221.637 zgłoszonym 23 grudnia 1958 r. przy czym oba rodzaje generatorów najkorzystniej wykorzystują zjawisko Overhausera — Abragama.

Poza tym tytułem przykładu opisano roztwór z wolnym rodnikiem paramagnetycznym (to znaczy z elektronami niesparowanymi) zastosowanym w naczyniach 2a i 2b to jest roztwór $K_2NO(SO_3)_2$. Zamiast tego roztworu można zastosować roztwór dwufenylopirokrylohydrazylu lub wolny rodnik zawierający skupienia rodników tlenu azotu, którego atom azotu połączony jest wyłącznie do dwóch atomów węgla połączonych do trzech innych atomów węgla według belgijskiego patentu nr 514.472. Oczywiście, że częstotliwość nasycenia prążka rezonansu elektronowego, który wynosi 56 MHz w przypadku $K_2NO(SO_3)_2$ zmienia się w zależności od rodzaju wolnego rodnika paramagnetycznego.

Wreszcie, w przypadku gdy jeden z zespołów cząstek podatomowych stanowi zespół jąder helu 3, to generator częstotliwości Lamora odpowiadający tym jądrom najkorzystniej składa się z generatora z optycznym pompowaniem.

Z powyższego wynika, że w zastosowanym magnetometrze z rezonansem magnetycznym w stosunku do znanych uprzednio uzyskuje się wiele korzyści. Przede wszystkim jego pomiary są niezależne od obrotu magnetometru w stosunku do kierunku badanego pola magnetycznego jak również niezależne od ciągłych zakłócających pól magnetycznych wywołanych przez ciągłe magnesowanie lub przez prądy zasilające wyposażenie pokładowe samolotu a ponadto są bezwzględne. Jeżeli

kompensuje się również inne zakłócenia na pokładzie samolotu (pola indukowane ziemskim polem magnetycznym, w materiałach ferromagnetycznych, pola przejściowe powodowane włączeniem i wyłączeniem obwodów urządzeń pokładowych oraz pola indukowane prądami w żelazie) przy pomocy znanych środków.

Niezależnie od powyższego należy podkreślić że magnetometr dokonuje samoczynnej rejestracji zmian bezwzględnej wartości ziemskiego pola magnetycznego.

Zastrzeżenia patentowe

1. Magnetometr z rezonansem magnetycznym, z kompensacją efektu żyroskopowego wywołanego obrotem samolotu lub ruchomego pojazdu, na którym znajduje się magnetometr oraz również z kompensacją stałego pola magnetycznego wywołanego ciągłymi namagnesowaniami i prądami zasilającymi urządzenia pokładowe, posiadający dwa czujniki z których każdy zawiera jeden rodzaj cząstek podatomowych z momentami magnetycznymi i kinetycznymi różnymi od zera, przy czym oba rodzaje cząstek mają różne stosunki żyromagnetyczne, oraz układ powodujący pobudzenie i wykrycie rezonansu magnetycznego tych cząstek, układ do pomiaru dwóch częstotliwości rezonansu magnetycznego tych dwóch rodzajów cząstek i układ do pomiaru algebraicznej różnicy obu częstotliwości rezonansu magnetycznego według patentu nr 56309, **znamienny tym**, że jego oba czujniki znajdują się w dwóch miejscach, w których uzyskuje się dla obu czujników mniej więcej tę samą wartość iloczynu natężenia stałego magnetycznego pola zakłócającego przez stosunek żyromagnetyczny cząstek czujnika umieszczonego w tym miejscu.
2. Magnetometr według zastrz. 1, usytuowany na samolocie, **znamienny tym**, że czujnik z cząstkami o stosunku żyromagnetycznym wyższym jest umieszczony w ogonie samolotu podczas gdy drugi czujnik umieszczony jest w małej odległości od pierwszego czujnika, pomiędzy tym czujnikiem a środkiem ciężkości magnetycznej samolotu.

