

Wytwarzanie i metody pomiarów wzorcowych pól magnetycznych

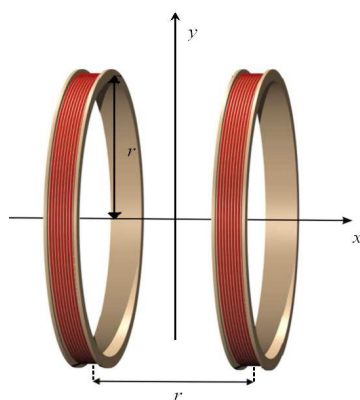
Katarzyna Falińska

1. Wytwarzanie wzorcowego pola magnetycznego

W wielu sytuacjach istotne jest określanie wartości natężeń pól przemiennych, bądź stałych pól magnetycznych. Przykład mogą stanowić pomiary magnetyzacji szczątkowej (np. obiektów będącymi elementami składowymi części wykorzystywanych do budowy samolotów). Dlatego parametry pól powinny być określane i kontrolowane a narzędzia wykorzystywane do ich pomiarów – wzorcowane, co wymaga wytworzenia wzorcowego pola magnetycznego.

1.1. Cewki Helmholtza

Najpowszechniej używanym wzorcem wartości indukcji pola magnetycznego stałego i przemiennego do 10 MHz [1] są cewki Helmholtza. Jest to układ dwóch jednakowych cewek cylindrycznych, osadzonych współosiowo w ściśle określonej odległości, co schematycznie przedstawia rys. 1. Cewki znajdują się w odległości równej promieniowi cewki r , co pozwala uzyskać jednorodne pole magnetyczne w stosunkowo dużej objętości, np. w punkcie odległym o $\frac{1}{4} r$ od środka układu wzdłuż osi x odchylenie od jednorodności w stosunku do wartości natężenia pola magnetycznego w środkowym punkcie układu jest mniejsze od 0,5 %, natomiast wzdłuż osi y jest mniejsze od 0,75 % [2].



Rys. 1. Schemat cewki Helmholtza

W przypadku cewek wielowarstwowych ważne jest również zachowanie odpowiedniego stosunku szerokości do wysokości w przekroju poprzecznym uzwojeń cewki, który powinien wynosić ok. 0,93 [2].

Cewki połączone są szeregowo tak, że pola magnetyczne każdej z nich dodają się. Napięcie mierzone na szeregowo podłączonym dokładnym,iskoindukcyjnym rezystorze

jest proporcjonalne do natężenia prądu płynącego przez uzwojenia cewek. Wartość indukcji pola magnetycznego wytwarzanego przez cewki wyznacza się ze wzoru:

$$B = \mu_0 IK \quad (1)$$

gdzie: μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, I – natężenie prądu płynącego w uzwojeniach cewek ($I = U/R$, U – napięcie na rezystorze wzorcowym, R – rezystancja rezystora), K – stała cewki. Stała cewek Helmholtza zależy od wymiarów geometrycznych cewek, zgodnie z wyrażeniem:

$$K = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{z}{r} \quad (2)$$

gdzie: z – liczba zwojów cewki, r – promień cewki.

Dokładność pola magnetycznego wytwarzanego przez cewki Helmholtza jest przede wszystkim zależna od dokładności z jaką zostały one skonstruowane oraz od stabilności prądu płynącego w poszczególnych cewkach.

1.2. Górne ograniczenie częstotliwości

Zgodnie z równaniami Maxwella przemienne pole magnetyczne (wytwarzane przez cewki Helmholtza) generuje kolejno pole elektryczne, magnetyczne itd., w tej samej przestrzeni gdzie pożądana jest jednorodność pola magnetycznego, w którym są wzorcowane mierniki. Wielkość tych efektów wzrasta przy wzroście częstotliwości. Jednakże wartość częstotliwości, przy której te indukowane pola nie mogą być zaniedbywane, jest wyższa od częstotliwości rezonansu własnego cewek (która stanowi ograniczenie maksymalnej częstotliwości wytwarzanego przez cewki pola).

Częstotliwość rezonansu własnego cewek określona jest równaniem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

gdzie: L – indukcyjność cewki, C – pojemność własna cewki.

W praktyce, dopuszczalna maksymalna częstotliwość jest niższa niż częstotliwość, przy której zachodzi rezonans własny cewek. Dla częstotliwości około dwa rzędy wielkości mniejszej od częstotliwości rezonansu własnego, przy danej mocy generatora, natężenie prądu płynącego przez cewki zaczyna się zmniejszać (gdyż wraz ze wzrostem częstotliwości dostarczanego prądu rośnie impedancja cewek). Częstotliwość, przy której moc generatora musi być podwojona, aby utrzymać zadane natężenie prądu, często nazywana jest częstotliwością graniczną.

Wartość górnej granicy częstotliwości pola magnetycznego wytwarzanego w cewkach Helmholtza może być zwiększona czterokrotnie poprzez połączenie równoległe cewek. Wówczas w obydwu cewkach prądy muszą być sobie równe co do wartości i zgodne w fazie. W celu spełnienia tego warunku potrzebny jest generator z dwoma niezależnymi wyjściami umożliwiającymi dopasowywanie wartości i fazy prądu.

1.3. Wpływ zewnętrznych pól magnetycznych

W celu zminimalizowania wartości tła związanego ze stałym ziemskim polem magnetycznym, wzorcowe cewki Helmholtza ustawia się tak, by linie pola magnetycznego wytwa-

rganego przez nie były prostopadłe do linii zewnętrznego pola magnetycznego (wówczas jednoosiowa sonda miernika jest znacznie mniej podatna na składową indukcji magnetycznej pola ziemskiego).

Ponadto wzorcowanie mierników indukcji pola magnetycznego (zarówno stałego jak i przemiennego) można wykonywać w komorze bezodbiciowej – której ściany pokryte są ferrytowym absorbentem fal elektromagnetycznych – dzięki czemu zmniejszy się wartość tła związana z zewnętrznymi polami magnetycznymi (stałym i przemiennym). Wykonywanie pomiarów magnetycznych w komorze bezodbiciowej wymaga spełnienia warunku zachowania odpowiedniej odległości cewek Helmholtza od ścian, sufitu oraz podłogi komory, które zbudowane są z materiałów ferromagnetycznych. Zalecany najmniejszy wymiar takiej ekranowanej komory powinien być większy niż $6,7r$. Ten wymiar może być również używany do określania, jak daleko od cewek Helmholtza mogą się znajdować duże metalowe obiekty, aby nie zaburzały wzorcowego pola magnetycznego [3].

Inną metodą zmniejszania wpływu ziemskiego pola magnetycznego (w obszarze wytworzonego wzorcowego pola magnetycznego) jest zastosowanie tzw. cewki Braunbeck'a. Jest to układ trzech trójosiowych par cewek Helmholtza wzajemnie prostopadłych. Natężenie prądu dostarczanego do poszczególnych cewek jest dobierane tak, by wypadkowe pole magnetyczne skompensowało wartość ziemskiego pola magnetycznego. Wewnątrz danego układu umieszcza się cewki Helmholtza wytwarzające wzorcowe pole magnetyczne. Z takiego układu korzystają m.in. w PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) i NPL (*National Physical Laboratory*).

1.4. Cewka Garrett'a

Do wytwarzania wzorcowych pól magnetycznych może również być wykorzystywana cewka Garrett'a. Stanowią ją dwie pary cewek Helmholtza, na ogół o różnej liczbie zwojów nawinięte na karkas. Cewka Garrett'a, jaką dysponują w ČMI (*Czech Metrology Institute*), nawinięta na ceramiczny karkas, pokazana jest na rys. 2.



Rys. 2. Cewka Garrett'a

Cewka ta, może wytwarzać pola magnetyczne do wartości indukcji magnetycznej rzędu kilkuset mT, zarówno stałe jak i przemiennie (do wartości częstotliwości rzędu kilkudziesięciu kHz).

2. Pomiar pola magnetycznego

Do badania pól magnetycznych używane są magnetometry – mierniki wszelkiego rodzaju służące do pomiaru natężenia (indukcji) pola magnetycznego i/lub jego kierunku. Jednym z najbardziej popularnych mierników jest magnetometr z czujnikiem Halla. Powszechnie używane są również mierniki cewkowe oraz miernik oparty na zjawisku NMR. Magnetometry NMR mogą mierzyć wartości indukcji pola magnetycznego w bardzo szerokim zakresie, od nT do kilkunastu T, w zależności od sondy w jaką są wyposażone [4, 5]. W ostatnich latach pojawiły się atomowe magnetometry np. typu SERF (ang. *Spin-Exchange-Relaxation-Free*) oparte również na zjawisku NMR. Kolejne przykłady mierników stanowią: magnetometry transduktorowe (typu fluxgate) czy SQUID (*superconducting quantum interference device*).

Inną odmianę czujników pola magnetycznego stanowią czujniki magnetorezystancyjne, np. oparte na anizotropowym zjawisku magnetorezystancyjnym AMR (ang. *Anisotropy Magnetoresistance*) lub czujniki magnetorezystancyjne GMR (ang. *Gigant Magnetoresistance*). Kolejny rodzaj to czujniki magnetoptyczne. Umożliwiają one pomiar indukcji pola magnetycznego w zakresie zbliżonym do najczulszych metod SQUID-owych, jednakże bez konieczności stosowania kriostatów.

3. Podsumowanie

Cewki Helmholtza stanowią powszechnie używany, w wielu NMI (*National Metrology Institute*), wzorzec pola magnetycznego pozwalający wytworzyć stosunkowo jednorodne pole magnetyczne. Ich modyfikacja – cewki Braunbeck'a – są jednym z efektywniejszych sposobów kompensowania pola ziemskiego w przestrzeni wytwarzanego wzorcowego pola.

Literatura

1. Savukov I. M. and Romalis M. V.: *NMR detection with an atomic magnetometer*, Physical Review Letters, PRL 94, 123001 (2005).
2. Nałęcz M., Jaworski J.: *Miernictwo magnetyczne*, WNT 1968.
3. IEEE Electromagnetic Compatibility Society IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz, New York 2005.
4. Boero G., Schlaefli D.: *Modelling an NMR probe for magnetometry*, Swiss Federal Institute of Technology.