

Wzorcowanie mierników indukcji pola magnetycznego

Katarzyna Falińska

Główny Urząd Miar – Zakład Elektryczny

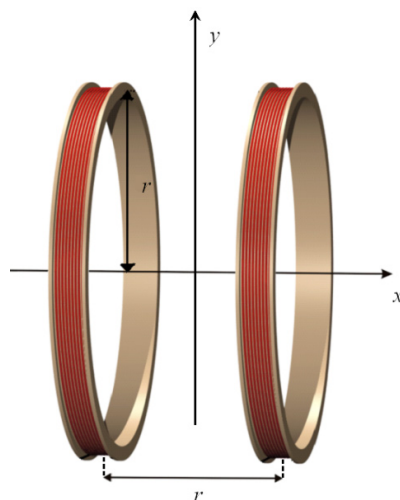
W artykule przedstawiono znajdujące się w GUM wzorce jednostki indukcji pola magnetycznego (cewki Helmholtza). Omówiono stanowisko do wzorcowania mierników pola magnetycznego. Przedstawiono również budżet niepewności i omówiono poszczególne jego składowe. Omówiono wpływ zewnętrznych pól magnetycznych na wyniki pomiarów.

Calibration of magnetic field meters

This paper presents measurement standards of magnetic field induction unit (Helmholtz coils) maintained in the Central Office of Measures. The facility for calibration of magnetic field meters is shown. The uncertainty budget and its particular components are described. The influence of external magnetic fields on calibration is also mentioned in this paper.

1. Wprowadzenie

Używanym w Głównym Urzędzie Miar wzorcem jednostki indukcji pola magnetycznego jest cewka 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 , to 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 % [1].



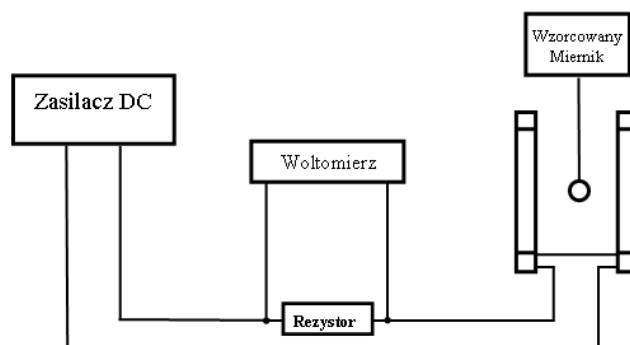
Rys. 1. Schemat cewki Helmholtza

W przypadku cewek wielowarstwowych ważne jest również zachowanie odpowiedniego stosunku szerokości do wysokości w przekroju poprzecznym uzwojeń cewki, który powinien wynosić ok. 0,93 [1].

W GUM dysponujemy trzema różnymi cewkami Helmholtza o średnicach odpowiednio: 0,2 m, 0,4 m i 0,6 m. Uzwojenia cewek zostały wykonane z (różniącego się średnicą) miedzianego drutu nawojowego, emaliowanego o symbolu fabrycznym DNE 180.

2. Stanowisko do wzorcowania mierników indukcji stałego pola magnetycznego

Układ do wzorcowania mierników indukcji stałego pola magnetycznego stanowią cewki Helmholtza zasilane prądem stałym z zasilacza mocy, niskoindukcyjny rezystor i woltomierz. Układ pomiarowy schematycznie przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu do wzorcowania hallotronowych sond mierników indukcji magnetycznej stałego pola magnetycznego

Cewki połączone są szeregowo tak, że pola magnetyczne każdej z nich dodają się. Napięcie mierzone na szeregowo podłączonym dokładnym, niskoindukcyjnym rezystorze jest proporcjonalne do natężenia prądu płynącego przez uzwojenia cewek. Wartość indukcji pola magnetycznego wytwarzanego przez cewki wyznacza się ze wzoru:

$$B = \mu_0 I K \quad (1)$$

gdzie: μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, I – natężenie prądu płynącego w uzwojeniach, K – stała cewki. Stała cewek Helmholtza zależy od wymiarów geometrycznych cewek, zgodnie z wyrażeniem:

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

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

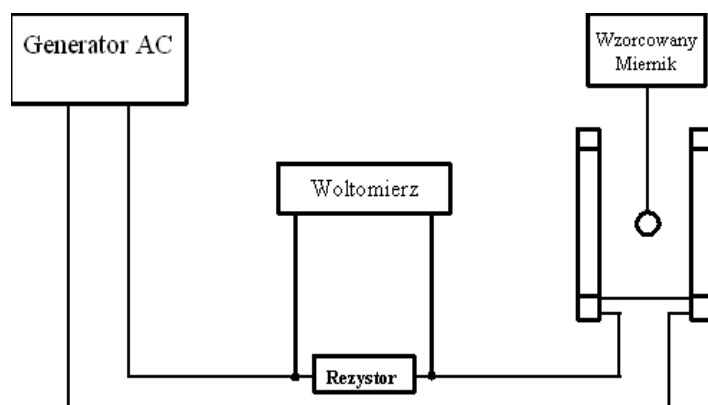
W celu weryfikacji wartości stałych cewek obliczonych ze wzoru (2), wyznaczono je na podstawie przeprowadzonych pomiarów wartości indukcji pola magnetycznego, przy zastosowaniu dokładnego magnetometru. Wartość niepewności względnej używanego miernika – typu Mag-01H [2] – wynosi 0,11 % (świadcstwo wzorcowania PTB 2009 r.).

Podczas wzorcowania sondę miernika indukcji pola magnetycznego umieszcza się w centralnym punkcie przestrzeni pomiędzy cewkami. Dzięki stosunkowo dużemu obszarowi o dużej jednorodności pola magnetycznego, ewentualne nieidealne wycentrowanie sondy miernika nie wpływa znacząco na wartość niepewności wyznaczania wartości indukcji pola magnetycznego.

W celu zminimalizowania wartości tła związanego ze stałym ziemskim polem magnetycznym, wzorcowe cewki Helmholtza ustawia się tak, by linie wytwarzanego przez nie pola magnetycznego były prostopadłe do linii zewnętrznego pola magnetycznego (wówczas jednoosiowa sonda miernika jest „nieczuła” na składową indukcji magnetycznej pola ziemskiego). Ponadto wzorcowanie mierników indukcji pola magnetycznego (zarówno stałego jak i przemiennego) wykonuje się w komorze bezodbiciowej, której ściany pokryte są ferrytowym absorbentem fal elektromagnetycznych, dzięki czemu wartość tła związana z zewnętrznymi polami magnetycznymi (stałym i przemiennym) zmniejsza się o kolejny rząd wielkości. 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 $6,7 \cdot r$. Ten wymiar może być również używany do określania, jak daleko od cewek Helmholtza mogą się znajdować duże metaliczne obiekty, aby nie zaburzały wzorcowego pola magnetycznego [3].

3. Stanowisko do wzorcowania mierników indukcji przemiennego pola magnetycznego

Stanowisko do wzorcowania mierników indukcji pola magnetycznego przemiennego jest analogiczne jak dla pola stałego. Inne jest oczywiście źródło zasilania cewki natomiast pozostałe elementy układu są takie same, co schematycznie przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat układu do wzorcowania sond hallotronowych i cewkowych mierników indukcji magnetycznej pola magnetycznego przemiennego

Wartość górnej granicy zakresu częstotliwości pola magnetycznego, w jakim są wzorcowane mierniki, oczywiście jest mniejsza od wartości częstotliwości rezonansu własnego cewek, które dla cewek znajdujących się w GUM są rzędu kilkudziesięciu kHz.

4. Niepewność pomiaru

Jakość wyniku pomiaru charakteryzowana jest przez niepewność pomiaru, która może być opisana przedziałem rozszerzenia. Granice tego przedziału określają obszar, w którym z określonym prawdopodobieństwem mieści się wartość wielkości. Wynik pomiaru (podczas wzorcowania) wartości indukcji pola magnetycznego podajemy zgodnie z wyrażeniem:

$$B_p = \mu_0 \frac{V_p K}{R} \pm U \quad (3)$$

gdzie: V_p – wartość zmierzonego napięcia, R – rezystancja, U – niepewność rozszerzona dla prawdopodobieństwa 95 %. Niepewność rozszerzona spełnia równanie [5, 6]:

$$U = k \cdot u(B_p) \quad (4)$$

gdzie: k – współczynnik rozszerzenia, $u(B_p)$ – złożona niepewność standardowa.

Wśród składowych złożonej niepewności standardowej wyróżniamy niepewności tzw. typu A i B. Wartość niepewności standardowej typu A (w danym przypadku związanej z pomiarem napięcia), wywołanej efektami losowymi, obliczamy na podstawie zaobserwowanego rozrzutu wyników serii pomiarów, jako odchylenie standardowe eksperymentalne wartości średniej wielkości mierzonej, zgodnie z równaniem:

$$u(V_p) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V_{pi} - \bar{V}_p)^2} \quad (5)$$

gdzie: V_{pi} – wartość napięcia odczytanego na woltomierzu, n – ilość wykonanych pomiarów.

Składowych niepewności typu B, wywołanych efektami systematycznymi, nie można ocenić na podstawie otrzymanego rozrzutu wyników. Będą to niepewności wynikające z niedoskonałości aparatury pomiarowej. Wyznacza się je na podstawie informacji o możliwym zakresie zmienności danej wielkości, biorąc pod uwagę takie czynniki jak: wcześniejsze wyniki pomiarów, zachowanie i właściwości stosowanych materiałów i przyrządów, specyfikacje producentów, dane wynikające z wzorcowania i innych certyfikatów [8]. Wartości składowych niepewności typu B oblicza się również za pomocą odchyłeń standardowych. Zatem przy wzorcowaniu sond mierników indukcji pola magnetycznego będą to składowe związane z wzorcową cewką Helmholtza, woltomierzem i rezystorem. Przy przyjętym założeniu, że błędy stosowanej aparatury pomiarowej mają rozkład prostokątny w granicach $\pm \Delta_g$, niepewność typu B opisana jest zależnością:

$$u = \frac{\Delta_g}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Równanie określające złożoną niepewność standardową dla wartości poprawnej wskazania wzorcowanego miernika indukcji pola magnetycznego, zgodnie z powyższym oraz z wzorem (5) przyjmuje postać:

$$u(B_p) = \sqrt{c_1^2 u^2(\delta h_F) + c_2^2 u^2(V_p) + c_3^2 u^2(\delta V_R) + c_4^2 u^2(\delta V_W) + c_5^2 u^2(\delta K) + c_6^2 u^2(\delta R)} \quad (7)$$

gdzie: $u(\delta h_F)$ – niepewność standardowa wynikająca z wartości granicznej błędu niejednorodności pola wzorcowego, $u(\delta V_R)$ – niepewność standardowa wynikająca z rozdzielczości wskazań woltomierza, $u(\delta V_W)$ – niepewność standardowa wynikająca z wartości granicznej błędu woltomierza, $u(\delta K)$ – niepewność standardowa wynikająca z wartości granicznej błędu wyznaczania stałej cewki K , $u(\delta R)$ – niepewność standardowa wynikająca z wartości granicznej błędu wzorcowania opornika.

Tab. 1. Procentowy udział poszczególnych składowych niepewności standardowych w złożonej niepewności standardowej

Typ miernika (rodzaj sondy)	Udziały niepewności					
	$c_1 u(\delta h_F)$ (%)	$c_2 u(V_p)$ (%)	$c_3 u(\delta V_R)$ (%)	$c_4 u(\delta V_W)$ (%)	$c_5 u(\delta K)$ (%)	$c_6 u(\delta R)$ (%)
WKDA (cewkowa)	91,3	0,0	0,0	0,0	4,9	3,8
Unitest (cewkowa)	90,8	0,2	0,2	0,7	4,8	3,3
MFM (halotronowa)	92,6	0,8	0,1	2,1	4,3	0,1
MP100 (halotronowa)	92,3	0,6	2,1	0,5	4,4	0,1

W tabeli 1 przedstawiono przykładowe, względne udziały poszczególnych składowych niepewności standardowych w złożonej niepewności standardowej dla różnych typów mierników indukcji pola magnetycznego z sondami halotronowymi i cewkowymi. Analizując otrzymane wartości zauważamy, iż zdecydowanie dominuje składowa niepewności związana z niejednorodnością pola magnetycznego wytwarzanego przez cewki Helmholtza, która stanowi około 90 % złożonej niepewności standardowej. Pozostałe składowe wnoszą wkład rzędu pojedynczych procentów bądź nawet poniżej 1 %.

Zatem w celu zmniejszenia wartości końcowej niepewności całkowitej należałoby podczas wzorcowania korzystać nie z cewek Helmholtza, a z innego wzorca jednostki indukcji pola magnetycznego. Mniejszą niepewność (dla dużych wartości indukcji pola magnetycznego, powyżej 30 mT) możemy uzyskać wzorcując sondy halotronowe w polu wytwarzanym przez elektromagnes, z teslomierzem NMR jako wzorcem odniesienia. Natomiast dla małych wartości indukcji pola magnetycznego rośnie znaczenie tła (na zakłócenie pola magnetycznego wytwarzanego przez cewki Helmholtza). Pola magnetyczne wolnozmiennie i przemienne, ze względu na ich całkowicie przypadkowy charakter (co do wartości, częstotliwości i fazy), są trudne do całkowitego wyeliminowania. Można jednak zastosować odpowiedniej konstrukcji i grubości ekrany magnetyczne, wykonane np. z mumetalu lub żelaza Armco z umieszczoną wewnątrz cewką solenoidalną, w której wytworzymy wzorcowe pole magnetyczne [9].

5. Podsumowanie

Względna niepewność rozszerzona wzorcowania sond mierników indukcji pola magnetycznego (zarówno stałego jak i przemienne) wynosi: $(1 \div 2,5)$ %. Wartości przedziału można przyjąć za zadowalające, gdyż dokładność wzorcowanych przez nas przyrządów podawana w specyfikacji producenta znajduje się w zakresie $(2 \div 5)$ %.

Osiągnięcie większej dokładności wymagałoby rozbudowy dotychczasowego stanowiska pomiarowego, m.in. zakupu magnetometru NMR i wzorcowych cewek Helmholtza oraz elektromagnesu wytwarzających silniejsze pola magnetyczne. Zakupy te jednocześnie zwiększyłyby kilkukrotnie zakres wykonywanych usług.

Literatura

- [1] M. Nałęcz, J. Jaworski: *Miernictwo magnetyczne*, WNT 1968.
- [2] Bartington Instruments Ltd Operation Manual for Mag-01 and Mag-01H, OMO382, Witney Oxford.
- [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] W. Widłaszewski: *Dokument Główny Stanowisko pomiarowe do wzorcowania mierników natężenia pola magnetycznego poniżej 100 kHz*, GUM 2008.
- [5] *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik*. GUM, Warszawa, 1999.
- [6] T. Skubis: *Podstawy metrologicznej interpretacji wyników pomiarów*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2004.
- [7] Dokument EA-4/02. *Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu*. Tłumaczenie GUM, Warszawa, 2001.
- [8] J. Arendarski: *Niepewność Pomiarów*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2003.
- [9] G. K. Yagola, D. I. Cheburkov, A. S. Zaika: *Device for calibrating and testing commercial meters of weak magnetic fields*. Translated for Izmeritel'naya Tekhnika, No 11, 1968.