

Anna PIASKOWY, Artur SKÓRKOWSKI

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI
ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

Badanie korelacji właściwości elektrycznych i magnetycznych wybranych materiałów paramagnetycznych

Dr inż. Anna PIASKOWY

Ukończyła studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w 2006 roku. W 2012 roku obroniła z wyróżnieniem pracę doktorską uzyskując stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika. Obecnie pracuje jako adiunkt w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Jej zainteresowania naukowe dotyczą precyzyjnych pomiarów wielkości fizycznych, systemów pomiarowych oraz sieci Smart Grid.



e-mail: anna.piaskowy@polsl.pl

Dr inż. Artur SKÓRKOWSKI

Studia ukończył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej w 1995 roku. W 2004 roku obronił pracę doktorską uzyskując stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Główne kierunki działalności naukowo-badawczej to: obróbka danych pomiarowych, systemy pomiarowe, interfejsy bezprzewodowe, przyrządy wirtualne (oprogramowanie w środowisku LabVIEW).



e-mail: artur.skorkowski@polsl.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości elektrycznych oraz magnetycznych materiałów charakteryzujących się niewielką podatnością magnetyczną. Opisano układy oraz metody pomiaru zarówno przenikalności magnetycznej jak również konduktywności takich materiałów. W podsumowaniu zawarto wnioski wyciągnięte z badania korelacji właściwości elektrycznych i magnetycznych.

Słowa kluczowe: paramagnetyki, przenikalność magnetyczna, konduktywność.

Checking of the correlation of electrical and magnetic properties of selected paramagnetic materials

Abstract

The characteristic feature of paramagnetic materials is very small value of the magnetic permeability, very close to unity, so a reliable measurement is not a typical issue. Measurement circuit, presented in the article, allows measure both active and reactive components of the induced voltage in the winding of the detection coil, wherein the sample material is placed. The measurement procedure is two-step, first the reactive component of induced voltage is measured at the terminals of the detection coil with the sample, and second without the sample, and based on the determined values the permeability is calculated. The article presents results of several samples of selected paramagnetic materials. Studies include both permeability and conductivity of those materials. Attempted to correlate occurred magnetic permeability of tested material with its conductivity. The summary contains conclusions based on tested properties. Further research will involve an correlation attempt of the active component of the voltage induced in the detection coil of the present measuring system (Fig. 1) with the electrical properties of the sample.

Keywords: paramagnetic, magnetic permeability, conductivity.

1. Wstęp

Każdy materiał umieszczony w polu magnetycznym magnesuje się w określony sposób, a miarą namagnesowania jest magnetyzacja. Jednakże materiały reagują różnie w obecności zewnętrznego pola magnetycznego. Reakcja ta zależy między innymi od atomowej i molekularnej struktury danego materiału. Materiały zaliczane do paramagnetyków cechują się małą podatnością na zewnętrzne pole magnetyczne, są one w bardzo niewielkim stopniu przyciągane przez pole magnetyczne i zachowują swoje własności po usunięciu zewnętrznego pola magnetycznego. Materiały te są często wykorzystywane w produkcji urządzeń elektrycznych takich jak generatory oraz silniki elektryczne dużej mocy, które wykonuje się z różnego rodzaju stali stopowych.

Cechą charakterystyczną paramagnetyków jest wartość ich przenikalności magnetycznej bardzo bliska jedności, przez co jej pomiar z dużą rozdzielczością nie należy do zagadnień typowych. Ponadto, zaletą tych materiałów jest to, że dla bardzo wysokich wartości pola magnetycznego funkcja przenikalności magnetycznej pozostaje stała, co umożliwi uzyskanie bardzo dużych indukcji sięgających nawet 100T [1]. Teoretycznie duże indukcje można uzyskać również dla ferromagnetyków, jednak należy być świadomym występujących strat mocy przy przemagnesowaniu przemiennym, które nie mają miejsca podczas przemagnesowywania materiałów paramagnetycznych, jeśli nie są one oczywiście dobrymi przewodnikami.

2. Pomiar względnej przenikalności magnetycznej

Jedną z metod pomiaru przenikalności magnetycznej jest metoda indukcyjna prądu przemiennego [2], która polega na porównaniu wartości indukcji magnetycznej czujnika zawierającego cewkę solenoidalną o rdzeniu wykonanym z badanego materiału, z wartością indukcji magnetycznej w tej samej cewce bez rdzenia. Czujnik indukcyjny posiada dwa uzwojenia: magnesujące (oznaczone indeksem m) i detekcyjne (oznaczone indeksem d). Uzwojenie magnesujące wymusza jednorodne pole magnetyczne w badanej próbce, natomiast w uzwojeniu detekcyjnym mierzy się siłę elektromotoryczną proporcjonalną do pochodnej strumienia magnetycznego przenikającego badany rdzeń. Całkowity strumień magnetyczny w czujniku będzie sumą strumienia przenikającego przez uzwojenie detekcyjne oraz strumienia pasożytniczego środowiska, co w przypadku badania materiałów ferromagnetycznych nie było by problemem, gdyż strumień ten jest znacznie mniejszy od strumienia roboczego i jego wpływ można by pominąć. W przypadku badania materiałów paramagnetycznych strumień pasożytniczy może być nawet kilkakrotnie większy od strumienia roboczego próbki, dlatego nie można pominąć jego wpływu [3]. Taki pomiar przeprowadza się dwukrotnie, mierząc siłę elektromotoryczną wyindukowaną w sytuacji:

- gdy uzwojenia nie obejmują próbki i sprzęgają się przez strumień pasożytniczy i strumień roboczy próbki powietrznej,
- gdy uzwojenia obejmują próbkę i sprzęgają się przez strumień pasożytniczy i strumień roboczy próbki badanej.

Nie można pominąć wpływu strumienia pasożytniczego w przypadku badanych materiałów, ponieważ może on być znacznie większy niż strumień główny. Dlatego dla paramagnetyków pomiar wykonuje się dwukrotnie. Badane próbki mają kształt walca co umożliwia ich łatwe wsunięcie oraz wysunięcie z uzwojeń czujnika indukcyjnego i stanowi dodatkową zaletę w trakcie pomiaru, gdyż strumień pasożytniczy pozostaje niezmienny.

Składowe bierne napięć wyindukowane w uzwojeniu detekcyjnym w obu etapach pomiaru można opisać następującymi zależnościami,

$$U_p = 4,44 f z_d B_p (S_s + S_p), \quad (1)$$

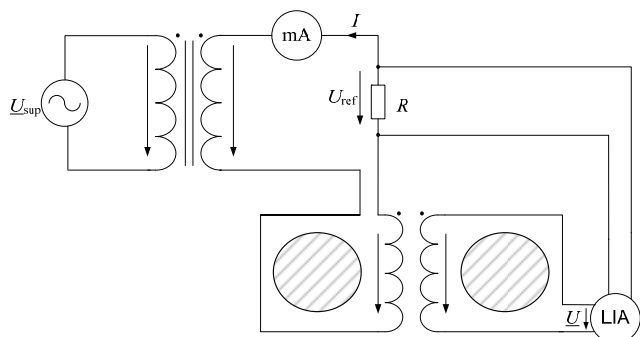
$$\begin{aligned} U_p &= 4,44 f z_d B_p (S_s + S_p) \\ U_s &= 4,44 f z_d (S_s B_s + S_p B_p) \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: B_p jest indukcją magnetyczną w przekroju S_p zajmowanym przez powietrze, natomiast, B_s jest indukcją magnetyczną w przekroju S_s badanej próbki. U_p jest napięciem indukowanym w uzwojeniu detekcyjnym, w sytuacji gdy w czujniku nie ma próbki, natomiast U_s jest napięciem indukowanym w czujniku z badaną próbką.

Uwzględniając zależności występujące w polu magnetycznym oraz korzystając z równań (1) i (2) można wyprowadzić zależność, która pozwoli określić przenikalność magnetyczną badanej próbki

$$\mu_r = 1 + \frac{S_p (U_s - U_p)}{S_s U_p}, \quad (3)$$

Z przedstawionej zależności wynika, że problem pomiaru przenikalności magnetycznej względnej można sprowadzić do dokładnego pomiaru składowych biernych napięć wyindukowanych w uzwojeniu detekcyjnym. Pomiar składowych biernych napięć wykonano w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego
Fig. 1. Diagram of measuring circuit

Pomiar składowej biernej małego napięcia U wyindukowanego na uzwojeniu detekcyjnym zrealizowano przy pomocy nanowoltomierza wektorowego Stanford Lock In Amplifier. Napięcie referencyjne, względem którego mierzona była faza napięcia U pobrane jest z bezindukcyjnego rezystora o wartości rezystancji $R = 1 \Omega$. Faza napięcia referencyjnego jest zgodna z fazą prądu magnesującego w związku z tym mierzony kąt pomiędzy prądem magnesującym a wyindukowanym napięciem jest proporcjonalny do kąta pomiędzy wektorami B i H . Pomiarzy przeprowadzono przy wybranych częstotliwościach oraz wartościach prądu magnesującego.

W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiarów wykonanych w temperaturze 22°C dla częstotliwości $f = 1 \text{ kHz}$ oraz natężenia prądu magnesującego $I = 80 \text{ mA}$.

Wyniki badań wykonanych dla innych parametrów wykazały, że różnice w przenikalności magnetycznej są bardzo niewielkie, w miarę zwiększania częstotliwości względna przenikalność magnetyczna materiału maleje bardzo nieznacznie, natomiast im większe natężenie pola magnetycznego tym przenikalność materiału jest większa.

Tab. 1. Zestawienie wyników pomiaru przenikalności magnetycznej badanych próbek ($f = 1 \text{ kHz}$, $I = 80 \text{ mA}$)

Tab. 1. Specification of magnetic permeability measurement results of test samples ($f = 1 \text{ kHz}$, $I = 80 \text{ mA}$)

lp.	d , mm	$\text{Im}\{U_p\}$, μV	$\text{Im}\{U_s\}$, μV	μ_r
1	6,0	2516	2523	1,008
2	6,0	2516	2520	1,004
3	5,9	2516	2518	1,002
4	5,9	2516	2518	1,002
5	5,9	2516	2518	1,002
6	5,8	2516	3117	1,705

W tabeli 2 zestawiono wyniki pomiarów wykonanych w temperaturze 22°C dla częstotliwości $f = 1 \text{ kHz}$ oraz natężenia prądu magnesującego $I = 100 \text{ mA}$.

Tab. 2. Zestawienie wyników pomiaru przenikalności magnetycznej badanych próbek ($f = 1 \text{ kHz}$, $I = 100 \text{ mA}$)

Tab. 2. Specification of magnetic permeability measurement results of test samples ($f = 1 \text{ kHz}$, $I = 100 \text{ mA}$)

lp.	d , mm	$\text{Im}\{U_p\}$, μV	$\text{Im}\{U_s\}$, μV	μ_r
1	6,0	-3139	-3151	1,011
2	6,0	-3139	-3143	1,004
3	5,9	-3139	-3143	1,004
4	5,9	-3139	-3143	1,004
5	5,9	-3139	-3143	1,004
6	5,8	-3139	-3891	1,707

W tabeli 3 zestawiono wyniki pomiarów wykonanych w temperaturze 22°C dla częstotliwości $f = 800 \text{ Hz}$ oraz natężenia prądu magnesującego $I = 80 \text{ mA}$.

Tab. 3. Zestawienie wyników pomiaru przenikalności magnetycznej badanych próbek ($f = 800 \text{ Hz}$, $I = 80 \text{ mA}$)

Tab. 3. Specification of magnetic permeability measurement results of test samples ($f = 800 \text{ Hz}$, $I = 80 \text{ mA}$)

lp.	d , mm	$\text{Im}\{U_p\}$, μV	$\text{Im}\{U_s\}$, μV	μ_r
1	6,0	-2024	-2029	1,007
2	6,0	-2024	-2024	1,000
3	5,9	-2024	-2024	1,000
4	5,9	-2024	-2024	1,000
5	5,9	-2024	-2024	1,000
6	5,8	-2024	-2506	1,703

3. Pomiar konduktywności

Badanie konduktywności próbek paramagnetycznych przeprowadzono metodą techniczną pomiaru rezystancji w układzie czterozaciskowym przedstawionym na rysunku 2.

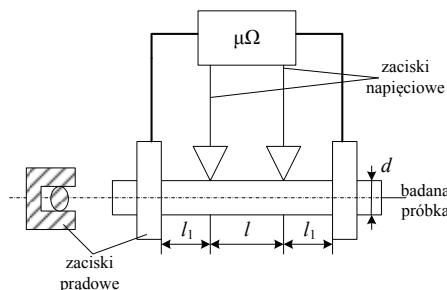
Konduktywność próbki w przedstawionym układzie można wyznaczyć z zależności

$$\gamma = \frac{4l}{\pi d^2 R}, \quad (4)$$

gdzie: l jest długością pomiędzy zaciskami napięciowymi, d jest średnicą badanej próbki, natomiast R jest mierzoną rezystancją próbki.

Odcinki l_1 zawarte pomiędzy zaciskami prądowymi i napięciowymi muszą być odpowiednio długie, aby na odcinku l otrzymać jednorodną gęstość prądu w przekroju badanej próbki.

W tabeli 4 zestawiono wyniki pomiarów konduktywności wykonanych w temperaturze 22°C dla wszystkich badanych próbek.



Rys. 2. Sposób zamontowania próbki badanego materiału
Fig. 2. The way of montage the material sample

Tab. 4. Zestawienie wyników pomiaru konduktywności badanych próbek
Tab. 4. Specification of conductivity measurement results of test samples

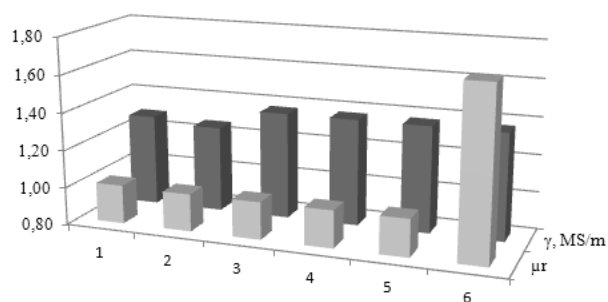
lp.	d , mm	R , mΩ	γ , MS/m
1	6,0	0,641	1,29
2	6,0	0,656	1,26
3	5,9	0,619	1,37
4	5,9	0,631	1,37
5	5,9	0,632	1,37
6	5,8	0,645	1,37

4. Korelacja właściwości elektrycznych i magnetycznych

Sprawdzenie korelacji właściwości elektrycznych i magnetycznych badanych próbek materiałów paramagnetycznych polegało na wyznaczeniu współczynnika korelacji Pearsona według następującej zależności:

$$r_{\gamma\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \bar{\gamma})(\mu_i - \bar{\mu})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \bar{\gamma})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_i - \bar{\mu})^2}}, \quad (5)$$

gdzie: γ_i - konduktywność badanej próbki, μ_i - przenikalność magnetyczna badanej próbki, $\bar{\gamma}$ - wartość średnia konduktywności badanych próbek, $\bar{\mu}$ - wartość średnia przenikalności magnetycznej badanych próbek, i - numer próbki.



Rys. 3. Przenikalność magnetyczna oraz konduktywność badanych próbek
Fig. 3. Magnetic permeability and conductivity of test samples

Współczynnik korelacji jest ilorazem kowariancji i iloczynu odchyleń standardowych konduktywności oraz przenikalności magnetycznej badanych próbek materiału paramagnetycznego. Wspomniane właściwości elektryczne i magnetyczne dla badanych próbek przedstawiono na rys. 3 oraz w tab. 5.

Tab. 5. Zestawienie wyników pomiaru przenikalności magnetycznej i konduktywności badanych próbek
Tab. 5. Specification of magnetic permeability and conductivity measurement results of test samples

lp.	γ , MS/m	μ_r ($f=1$ kHz, $I=80$ mA)	μ_r ($f=1$ kHz, $I=100$ mA)	μ_r ($f=800$ Hz, $I=80$ mA)
1	1,29	1,008	1,011	1,007
2	1,26	1,004	1,004	1,000
3	1,37	1,002	1,004	1,000
4	1,37	1,002	1,004	1,000
5	1,37	1,002	1,004	1,000
6	1,37	1,705	1,707	1,703
współczynnik korelacji $r_{\gamma\mu}$		0,305	0,306	0,306

Korelacje można interpretować jako silne, słabe, ujemne. Podział taki nie jest jednak zbyt ścisły, dlatego przy ocenie korelacji powinno się analizować wartość współczynnika korelacji oraz jego zmienność w zależności od warunków w jakich były przeprowadzane badania.

Dla wybranych próbek materiałów paramagnetycznych współczynnik korelacji analizowanych właściwości magnetycznych i elektrycznych wyniósł ok. 0,3 co może być interpretowane jako korelacja słaba.

5. Podsumowanie

Wyniki przenikalności magnetycznej oraz konduktywności zestawione w tabelach 1, 2, 3 i 4, materiałów o przenikalnościach magnetycznych zbliżonych do jedności, nie są skorelowane. Analizując otrzymane wyniki badań właściwości elektrycznych oraz magnetycznych wybranej grupy materiałów, nie stwierdzono, że materiał, który posiada większą zdolność w gromadzeniu pola magnetycznego jest również lepszym przewodnikiem. Układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 1 pozwala mierzyć obie składowe czynną oraz bierną napięcia indukowanego w uzwojeniu detekcyjnym. Składowa bierna mierzona w obu etapach procedury pomiarowej, kiedy w czujniku jest badana próbka i kiedy jej nie ma, pozwala wyznaczyć przenikalność magnetyczną, natomiast składowa czynna może posłużyć do wyznaczenia konduktywności [4]. Dalsze prace badawcze będą obejmowały próbę korelacji składowej czynnej napięcia indukowanego w uzwojeniu detekcyjnym prezentowanego układu pomiarowego (rys. 1) z właściwościami elektrycznymi badanej próbki.

6. Literatura

- [1] Brailsford F.: Materiały Magnetyczne, Wydawnictwo PWN, Warszawa 1964.
- [2] Lisowski M.: Metoda indukcyjna pomiaru podatności magnetycznej nadprzewodników. Normalizacja, nr 8, 1993.
- [3] Skubis T.: Metoda i układ do pomiarów przenikalności magnetycznej stali paramagnetycznych, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej Elektryka 31, Kielce 1994.
- [4] Augustyn J, Kuśmierz J.: Sposoby realizacji pomiarów konduktywności elektrycznej materiałów za pomocą przetworników indukcyjnych jednocewkowych, PAK 2013 nr 04, s. 326-329.