

*magnetowody, materiały magnetycznie  
miękkie, materiały kompozytowe magnetycznie miękkie,  
dielektromagnetyki, izotropia, wirujące pole kołowe*

Tomasz JANTA\*

## **POMIAROWE POTWIERDZENIE IZOTROPII MAGNETYCZNEJ DIELEKTROMAGNETYKU**

Do wykonania magnetowodów elektroprzetworników małej mocy mogą być zastosowane materiały wykonane w technologii metalurgii proszków. Takimi materiałami są, między innymi, dielektromagnetyki. Są to elementy wykonane z komponentów proszków magnetycznie miękkich i dodatków, prasowane wysokimi ciśnieniami, rzędu 800 MPa, następnie utwardzane w trakcie obróbki cieplnej. W niektórych rozwiązaniach technicznych na korzyść dielektromagnetyków przemawiać będzie zakładana izotropowość magnetyczna wykonanego z nich magnetowodu. W innych istotna może być sztucznie wytworzona anizotropia.

Praca dotyczy pomiarowego potwierdzenia naturalnej izotropii dielektromagnetyku za pomocą pomiaru rozkładu indukcji magnetycznej dielektromagnetyku przemagnesowywanego kołowym wirującym polem magnetycznym.

### 1. WSTĘP

W niektórych elektroprzetwornikach do wykonania magnetycznie miękkiego magnetowodu korzystne może być wykorzystanie technologii metalurgii proszków. Wykonanie w całości lub też w jego części magnetowodu z magnetycznie miękkich kompozytów proszkowych znajduje swoje uzasadnienie głównie tam, gdzie ze względu na przebieg strumienia magnetycznego optymalne wykonanie magnetowodu pakietowanego z blach elektrotechnicznych może być bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Typowym przykładem jest magnetowód tubowego silnika liniowego [1]. Również w przypadku magnetowodów mikromaszyn czy maszyn małej mocy wykonanie magnetowodu blachowego może być technologicznie trudne [2] i ekonomicznie nieuzasadnione. Olbrzymią zaletą materiałów kompozytowych, obok

---

\* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: tomasz.janta@pwr.edu.pl

innych, są bowiem niskie koszty ich wytwarzania wynikające m.in. z bezodpadowości produkcji.

W zależności od zastosowanej technologii można otrzymać różne, z punktu widzenia właściwości magnetycznych i mechanicznych, rodzaje kompozytów proszkowych. Kompozyty proszkowe na magnetycznie miękkie magnetowody można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- spieki – kompozyty proszkowe obrabiane w wysokich temperaturach, rzędu 1200 °C, zwykle w atmosferach ochronnych, oraz
- dielektromagnetyki – kompozyty spajane izolatorem i utwardzane w temperaturach 180 °C do 500 °C.

Dielektromagnetyki, w porównaniu do spieków, są kompozytami proszkowymi charakteryzującymi się korzystniejszą, mniejszą, stratnością, zwłaszcza z prądów wirowych oraz o wiele prostszą technologią. Istotny jest także brak skurczy technologicznych dielektromagnetyków, mających miejsce w technologii spieków. Pozwala to na uniknięcie przeprowadzania dodatkowej, końcowej, obróbki mechanicznej, praktycznie niezbędnej w przypadku wykonywania magnetowodów spiekanych. Te cechy powodują, że dielektromagnetyki cieszą się szczególnym zainteresowaniem badaczy upatrujących w tych materiałach dużego potencjału aplikacyjnego.

Mniejsza stratność dielektromagnetyków związana z prądami wirowymi jest wynikiem izolowania poszczególnych cząstek żelaza przez pokrycie zastosowanym w ich technologii dielektrykiem, który pełni tu jednocześnie funkcję izolatora i spoiwa. Efektem tego jest zwiększenie rezystywności, a więc ograniczenie wartości prądów wirowych i strat z tym związanych [3].

Dielektromagnetyki są coraz powszechniej wykorzystywane, o czym świadczy fakt, że światowi producenci proszków żelaza mają w swojej ofercie różne, specjalnie domieszkowane, komponenty proszkowe do bezpośredniego wykonywania dielektromagnetyków magnetycznie miękkich. Zawierają one odpowiednio dobrane frakcje proszku żelaza, środki poślizgowe ułatwiające proces prasowania oraz bardzo ważny składnik odpowiadający za izolowanie i sklejanie komponentów w procesie ich utwardzania – lepiszcze. Najczęściej jest to żywica epoksydowa. Od zastosowanego izolatora zależy bezpośrednio wysokość możliwej do zastosowania temperatury utwardzania dielektromagnetyku.

Warunkiem optymalnego wykonania magnetowodów jest znajomość i możliwość modyfikacji właściwości otrzymanych materiałów magnetycznie miękkich, w tym również dielektromagnetyków, najlepiej w początkowym etapie ich wytwarzania.

Właściwości mechaniczne obecnie wykonywanych dielektromagnetyków są praktycznie wystarczające do wykonywania małych magnetowodów lub części magnetowodów większych. Ograniczenia w szerszym zastosowaniu dielektromagnetyków związane są z ich właściwościami magnetycznymi, szczególnie w zmiennym (przemienным) polu magnetycznym. Obecnie są one istotnie gorsze od właściwości blach elektrotechnicznych [4]. W niektórych rozwiązaniach technicznych na korzyść dielektromagnety-

ków przemawiać będzie zakładana izotropowość magnetyczna wykonanego z nich magnetowodu. W innych, kluczowa w zastosowaniu może się okazać sztucznie wytworzona, odpowiednio ukierunkowana, anizotropia magnetowodu kompozytowego.

Izotropowość magnetyczna dielektromagnetyku nie została do tej pory potwierdzona pomiarowo, a wynikała z zakładanej, jednorodnej objętościowo, struktury materiału.

W wynikach pomiarów przeprowadzanych w przemiennym polu magnetycznym na próbkach toroidalnych [4], [5] nie stwierdzono żadnych istotnych różnic we właściwościach materiału mogących podważać to założenie.

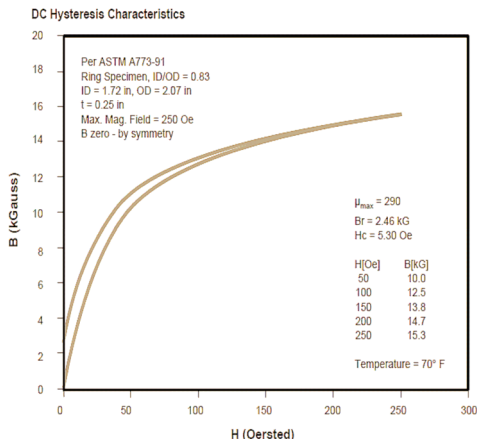
Posiadana aktualnie aparatura badawcza pozwala na przeprowadzenie pomiaru indukcji magnetycznej w dielektromagnetyku w procesie przemagnesowywania wirującym polem magnetycznym. Jeżeli pole to będzie kołowe, to możemy pomiarowo zweryfikować izotropię materiału. Można również w ten sposób wyznaczyć sztucznie wytworzoną anizotropię dielektromagnetyku, np. wprowadzając, w procesie zasypywania proszku do formy, komponenty o różnych właściwościach magnetycznych.

Praca dotyczy sprawdzenia izotropowości magnetycznej dielektromagnetyku przemagnesowywanego kołowym wirującym polem magnetycznym.

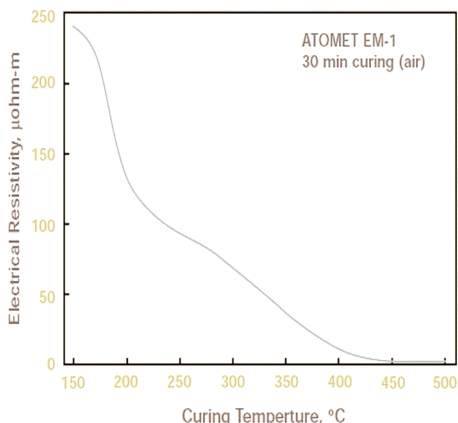
## 2. PRÓBKA DIELEKTROMAGNETYKU

Próbkę dielektromagnetyku wykonano z ferromagnetycznego kompozytowego proszku ATOMET EM-1 produkowanego specjalnie do wykonywania magnetycznie miękkich magnetowodów (dielektromagnetyków) przez Kanadyjską firmę Quebec Metal Powders Limited.

Na rysunku 1 przedstawiono charakterystykę pierwotnego magnesowania oraz przebieg pętli histerezy w I ćwiartce, a na rysunku 2 zależność rezystywności dielektromagnetyku od temperatury obróbki, podane przez producenta proszku [6]. Podana na rysunku 2 zależność rezystywności dowodzi zastosowania żywicy epoksydowej jako izolatora i lepiszcza. Wyraźnie widać, dlaczego temperatura utwardzania dielektromagnetyku jest tak istotna i dlaczego nie może być, w przypadku konkretnego izolatora, zbyt wysoka. Oczywiście, im wyższa temperatura obróbki, tym wytrzymałość mechaniczna dielektromagnetyku większa. Przy zastosowaniu żywicy epoksydowej (jak to ma miejsce w tym przypadku) za optymalną temperaturę utwardzania przyjmuje się 180 °C. Wytrzymałość mechaniczna dielektromagnetyku jest już wystarczająca, a jego rezystywność, wpływająca bezpośrednio na ograniczenie wartości prądów wirowych, jest jeszcze stosunkowo duża. Wzrost temperatury utwardzania tylko o około 20 °C prowadzi do blisko dwukrotnego zmniejszenia rezystywności. Wynika to z faktu degradacji żywicy ze wzrostem temperatury utwardzania i pogorszeniem jej właściwości izolujących, a więc zmniejszania się rezystywności materiału. Zwiększenie wytrzymałości mechanicznej odbywa się więc kosztem istotnego zwiększenia stratności związanej z prądami wirowymi.

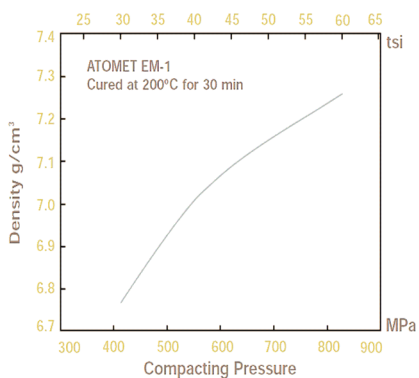


Rys. 1. Charakterystyka pierwotnego magnesowania pogarszania oraz przebieg pętli histerezy w I ćwiartce [6]

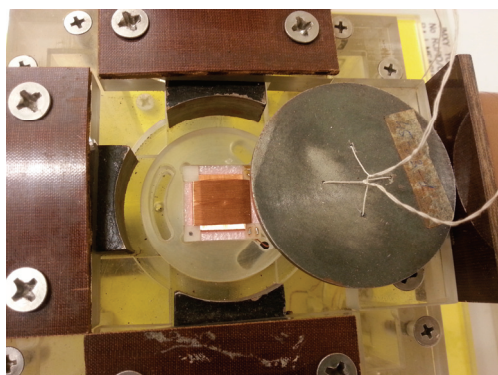


Rys. 2. Zależność rezystywności dielektrycznej od temperatury obróbki [6]

Próbka do pomiaru anizotropii wykonana została w kształcie okrągłego plastra o średnicy 60 mm. Ze względu na małą wytrzymałość mechaniczną wypraski przed jej utwardzeniem, grubość próbki jest stosunkowo duża i wynosi około 4 mm. Ciśnienie prasowania wynosiło 800 MPa. Jest to najwyższe ciśnienie praktycznie stosowane w produkcji dielektromagnetyków (rys. 3). Wartość ta wynika z wytrzymałości mechanicznej form, które w procesie prasowania wyższymi ciśnieniami ulegają zbyty szybkiemu zużyciu. Utwardzanie żywicy przeprowadzono w temperaturze 180 °C przez 0,5 godziny. Temperatura ta pozwoliła na uzyskanie oczekiwanej rezystywności wykonanego dielektromagnetyku.



Rys. 3. Zależność gęstości dielektromagnetyku od ciśnienia prasowania [6]

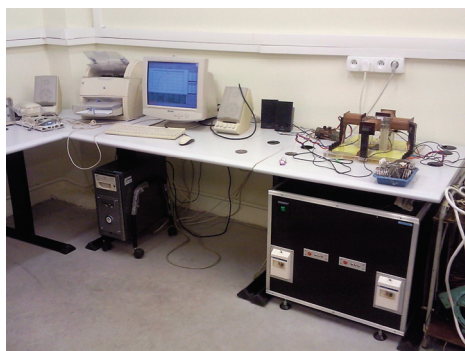


Rys. 4. Jarzmo magnetyczne, próbka i cewka do pomiaru natężenia pola magnetycznego

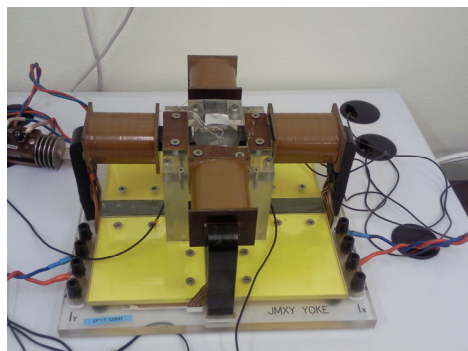
Pomiar indukcji magnetycznej przeprowadzono w środkowym obszarze badanej próbki, gdzie jej magnesowanie jest najbardziej jednorodne. W tym celu, w odległości 10 mm od środka próbki, wykonano cztery, równomiernie rozmieszczone otwory o średnicy 0,7 mm. Przez te otwory nawinięto dwie jednozwojowe cewki pomiarowe w przyjętych, ortogonalnych względem siebie, osiach  $B_x$  i  $B_y$  (rys. 4).

### 3. STANOWISKO BADAWCZE I WYNIKI POMIARÓW

Do pomiaru właściwości magnetycznych wykorzystano komputerowy system pomiarowy do badania dynamicznych właściwości magnetycznych kompozytów proszkowych w polach przemiennych i wirujących MAG-TD200 [7] (rys. 5).



Rys. 5. Widok stanowiska pomiarowego



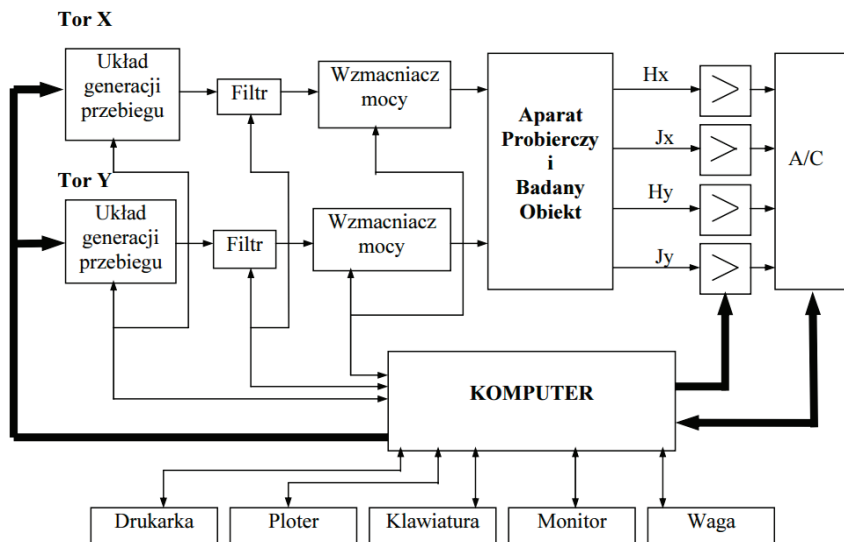
Rys. 6. Jazmo magnetyczne z badaną próbką

Badana próbka magnesowana jest przez odpowiednio zorganizowane jazmo w kształcie litery U (rys. 6) wyposażone w regulator permeancji obu torów magnesujących. Pomiar przyłożonego natężenia pola magnetycznego  $H$  realizowany jest metodą pomiaru bezpośredniego za pomocą płaskiej cewki umieszczonej pod powierzchnią badanej próbki (rys. 4).

System umożliwia przeprowadzanie pomiarów w polach przemiennych, w zakresie częstotliwości od 3 do 1000 Hz oraz w polach wirujących, w zakresie od 20 do 400 Hz. Przed właściwymi pomiarami możliwe jest programowane rozmagnesowanie próbki.

Wykorzystane w pomiarach wirujące kołowe pole magnetyczne wytworzone zostało z wykorzystaniem liniowych wzmacniaczy zasilających odpowiednie magnety wody pola magnetycznego. Cały proces pomiarowy wraz z procedurą kalibracji jest w pełni zautomatyzowany.

Schemat strukturalny systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat strukturalny systemu pomiarowego [7]

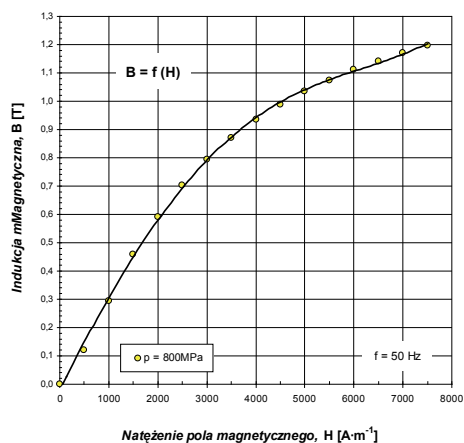
Namagnesowanie badanej próbki realizowane jest za pomocą bloku generacji i wzmacniacza mocy. W procesie pomiarowym odpowiednie sygnały z obiektu badanego podawane są na wzmacniacze wejściowe, dopasowujące je do poziomów wymaganych przez układy cyfrowe. Następnie sygnały te są próbkowane w przetwornikach próbkująco-pamiętających (S/H) i kwantowane w przetworniku A/C przełączanym na kolejne kanały pomiarowe przez multiplekser. W komputerze przebiegi poddawane są odpowiednim procedurom obliczeniowym i w tej postaci są wyświetlane i zapisywane.

Możliwości pomiarowe systemu oraz dokładność pomiaru zapewniają pełną wiarygodność otrzymanych wyników badań.

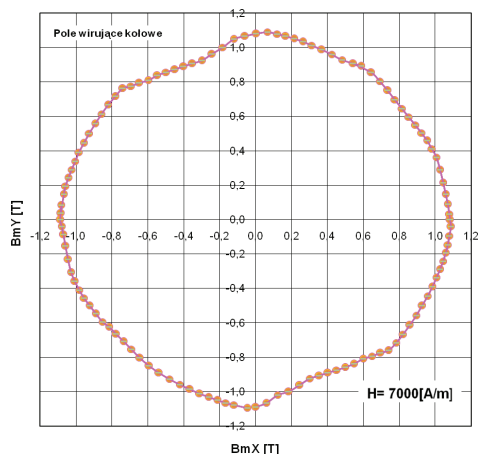
W celu określenia anizotropii dielektromagnetyku, wykonaną próbkę umieszczono w wirującym kołowym polu magnetycznym. Przeprowadzono pomiary indukcji w osiach prostopadłych  $B_x$  i  $B_y$  z wykorzystaniem przygotowanych jednozwojnych cewek.

Wszystkie parametry w polach przemiennych wyznaczone zostały dla obu kierunków jednocześnie.

Pomiary indukcji magnetycznej przeprowadzono przy standardowej częstotliwości 50 [Hz] oraz przy stałej wartości natężenia wirującego pola magnetycznego  $H = 7,0$  kA/m. Wartość natężenia pola dobrano tak, aby mierzone wartości indukcji znajdowały się jeszcze na prostoliniowej części rzeczywistej krzywej magnesowania badanego dielektromagnetyku (rys. 8). Wartości indukcji wytworzonej przez kołowe wirujące pole magnetyczne przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 8. Rzeczywista krzywa magnesowania dielektromagnetyku ATOMET EM-1 w polu przemiennym



Rys. 9. Rozkład indukcji magnetycznej B dla wirującego kołowo pola magnetycznego

Na podstawie wykonanych pomiarów stwierdzono, że różnica wartości indukcji w ustanowionych ortogonalnych osiach nie przekracza 3% (rys. 9). Maksymalna różnica wynosi natomiast około 8% i występuje symetrycznie między wartościami przesuniętymi w stosunku do obranych osi o około  $30^\circ$ .

Zaburzenia przestrzennej jednorodności materiału znajdują swoje odzwierciedlenie we właściwościach mierzonych w kołowym, wirującym polu magnetycznym. Przedstawiona metoda pomiarowa pozwala więc nie tylko na potwierdzenie izotropii materiału ale również na kontrolowanie procesu technologicznego z punktu widzenia równomierności struktury. Pozwala też na stwierdzenie i pomiar celowo wytworzonej, sztucznej anizotropii magnetycznej.

#### 4. PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych pomiarów potwierdzają zakładaną do tej pory teoretycznie izotropię dielektromagnetyku.

W wirującym kołowym polu magnetycznym anizotropia magnetyczna, liczona jako wyrażony w procentach iloraz różnicy maksymalnej i minimalnej wartości indukcji do ich sumy, jest mniejsza od 5%.

Podczas wykonywania dielektromagnetyków nie popełniono istotnych błędów technologicznych. Izotropia trzech zbadanych próbek o tym samym składzie i sposobie wytworzenia, lecz wykonywanych w różnym czasie, była taka sama.

## LITERATURA

- [1] JANTA T., HOŁOWNIA J., *Kompozyty proszkowe w cylindrycznych indukcyjnych silnikach liniowych*, VI Sympozjum Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki, Gliwice–Ustroń, 1995, 177–182.
- [2] JANTA T., WEGLINSKI B., *DC Micromotor with Dielectromagnetic Rotor*, International Conference on Electrical Machines ICEM '98, Istanbul, Turkey, 1998, 1267–1270.
- [3] JANTA T., *Możliwości zastąpienia blachowego wirnika mikrosilnika prądu stałego wirnikiem kompozytowym*, Międzynarodowe XI Sympozjum Mikromaszyny i Serwonapędy – International XI Symposium on Micromachines and Servodrives, MiS'98, Malbork, Polska, 1998, 186–191.
- [4] JANTA T., KORDECKI A., WĘGLIŃSKI B., *PM Soft Magnetic Composites versus Electrical Sheets*, EURO PM2000, Workshop on 'Production and Applications of Soft Magnetic Materials for Electric Motors', Munich, Germany, 2000, Proceedings, 15–29.
- [5] JANTA T., WEGLINSKI B., *Comparative Tests of Dielectromagnetics*, XV Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits, XV EPNC'98, Liege, Belgium, 1998, 130–133.
- [6] Quebec Metal Powders Limited, *Karta informacyjna proszku ATOMET EM-I*, Montreal, Quebec H3A 1G1, Canada.
- [7] Zakład Aparatury Elektronicznej i Systemów Komputerowych „R&J MEASUREMENT”, *Komputerowy system pomiarowy do badania dynamicznych właściwości magnetycznych kompozytów proszkowych w polach przemiennych i wirujących MAG-TD200*; instrukcja obsługi.

MEASUREMENT CONFIRMATION OF MAGNETIC ISOTROPY  
OF DIELECTROMAGNETICS

To make magnetic core of low power electroconverter can be used materials made in the technology of powder metallurgy. Such materials are dielectromagnetics. These elements are made of soft magnetic powders and additives, pressed under high pressures in the range of 800 [MPa], and then hardened by heat treatment. Some technical solutions expect dielectromagnetics due to isotropy of the magnetic core.

The paper deals with confirmation of natural dielectromagnetics isotropy by magnetic flux density distribution of the circular rotating magnetic field.