

Tomasz JANTA<sup>1)</sup>

## DIELEKTROMAGNETYKI Fe-Cu I MOŻLIWOŚĆ ICH ZASTOSOWANIA NA MAGNETOWÓD WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO

**Streszczenie.** Celem pracy jest przedstawienie wyników badań właściwości dielektromagnetyków magnetyczno-przewodzących Fe-Cu oraz przeprowadzonej praktycznej weryfikacji możliwości ich zastosowania na magnetowody wirników silników indukcyjnych.

Właściwości dielektromagnetyków zmierzono na znormalizowanych próbkach pierścieniowych.

W celu zastosowania zbadanych dielektromagnetyków Fe-Cu na magnetowód wirnika trójfazowego silnika indukcyjnego małej mocy opracowano i przedstawiono jego technologię. Magnetowód wykonano jako dwuwarstwowy. Warstwa wewnętrzna to magnetycznie miękki walec z dielektromagnetyku Fe, natomiast warstwę zewnętrzną stanowi wyprasowany na tym walcu cylinder z dielektromagnetyku magnetyczno-przewodzącego Fe-Cu. Miedź wprowadzona do mieszanki nie przechodzi w dalszym procesie technologicznym w fazę ciekłą, co umożliwia wykonanie zewnętrznej warstwy Fe-Cu o praktycznie dowolnym udziale składników.

Przedstawiono wybrane charakterystyki silnika z wykonanymi wirnikami posiadającymi zewnętrzne pierścienie zwierające oraz bez tych pierścieni.

## DIELECTROMAGNETIC MATERIALS Fe-Cu AND THEIR POSSIBILITY TO BE USED FOR ROTOR CORES OF INDUCTION MOTORS

**Summary.** The aim of this paper is to present results of tests of magnetic properties of magnetoconductive dielectromagnetics Fe-Cu and practical verification of possibilities to use them for magnetic core of induction motor rotor.

Magnetic properties of the applied dielectromagnetics, including Fe-Cu dielectromagnetics, which were measured on normalized toroidal samples, are presented and described.

To apply measured dielectromagnetics for magnetic core of 3-phase small power induction motor rotor elaborated and presented its technology. The core, made as two layers assembly, was tested as a rotor of a small power 3 phase induction motor. An internal part of the core is made as soft magnetic cylinder. Its material is dielectromagnetic made of pure iron. An external layer, in form of sleeve, compacted on the internal part, is made of magnetic-conductive (Fe-Cu) dielectromagnetic. Copper applied in this part was not in liquid phase during any stage of processing, what enables manufacture of the external layers with not limited composition of its components.

Chosen parameters and performance characteristics of the motor with rotors of various configurations of short-circuited rings are presented and discussed in the paper as well.

**Key words:** electrotechnics, electrical machines, powder metallurgy, dielectromagnetics, magnetic – conductive composites, magnetic properties

### 1. WSTĘP

W ostatnim okresie zauważyć można zwiększone zainteresowanie wielu światowych badaczy pracami zmierzającymi do zastosowania magnetycznie miękkich kompozytów proszkowych na magnetowody różnego rodzaju urządzeń elektrycznych, a w tym i na magnetowody silników elektrycznych [1, 2, 5]. W prezentowanych rozwiązaniach stosowane są z reguły dielektromagnetyki (kompozyty proszkowe sklejane dielektrykiem) posiadające wprawdzie gorsze, w porównaniu do spieków, takie właściwości jak indukcja nasycenia czy przenikalność magnetyczna, lecz, ze względu na izolowanie cząstek żelaza zastosowanym dielektrykiem, niższe stratności, w szczególności z prądów wirowych. Zaletą ich jest również i to, że technologia dielektromagne-

<sup>1)</sup> Dr inż., Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej  
50-372 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 19,  
tel. 071 320 33 75, tel fax; 071 320 34 67, e-mail: tom@imne.pwr.wroc.pl

tyków jest, w porównaniu do spieków, prostsza, ponieważ nie wymaga stosowania obróbki w wysokich temperaturach (rzędu 1150°C).

Jedną z istotnych zalet magnetycznie miękkich kompozytów proszkowych jest możliwość wykonania magnetowodów o kształtach bardzo trudnych lub wręcz niemożliwych do wykonania z blach elektrotechnicznych. Zastosowanie kompozytów proszkowych pozwala więc na wprowadzanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, których rozwój, w przypadku stosowania blach elektrotechnicznych, został ograniczony możliwościami technologicznymi.

W optymalnie skonstruowanych maszynach elektrycznych celowości wymiany magnetowodów blachowych na magnetowody kompozytowe bez zmiany konstrukcji silnika (a w tym i kształtu magnetowodu) jest znacznie ograniczona, ponieważ w takich przypadkach kompozyty proszkowe pod względem magnetycznym nie będą stanowić dla blach poważnej konkurencji. Tym niemniej badania podejmowane w tym zakresie [5, 6] mają swoje uzasadnienie. Zastosowanie kompozytów proszkowych podyktowane może być bowiem np. względami ekonomicznymi czy też ekologicznymi. Istotne jest więc, co znajduje odzwierciedlenie w prezentowanej pracy, wnoszenie nowej wiedzy o właściwościach możliwych do wykonania kompozytów magnetycznie miękkich, a także badania technologii magnetowodów.

Praca dotyczy dielektromagnetyków magnetyczno-przewodzących wykonanych z mieszanki proszku żelaza i proszku miedzi (dielektromagnetyku Fe-Cu). Przeprowadzono pomiary wybranych właściwości tych dielektromagnetyków oraz wykonano magnetowody wirnika silnika indukcyjnego z zewnętrzną warstwą Fe-Cu. Zastąpiono blachowy magnetowód wirnika klatkowego wirnikiem kompozytowym bez zmiany jego kształtu i wymiarów. Praca w tym zakresie dotyczy więc głównie opracowania i opanowania technologii umożliwiającej wykonanie opisanych wcześniej teoretycznie [5, 7] magnetowodów i sprawdzenia jej rezultatów. Jest to praktyczny przykład zastosowania prostych technologii w wytwarzaniu maszyn elektrycznych.

## 2. DIELEKTROMAGNETYKI MAGNETYCZNO-PRZEWODZĄCE Fe-Cu

Dielektromagnetyki magnetyczno-przewodzące Fe-Cu są kompozytowymi materiałami magnetycznie miękkimi, których wprowadzenie do maszyn elektrycznych znacznie uprościłoby ich technologię.

Istotą wprowadzania kompozytów magnetyczno-przewodzących różnych typów, w tym również infiltrowanych [3, 4, 5], jest dążenie do jednoczesnego spełnienia, przez magnetowody z nich wykonane, funkcji magnetycznej magnetowodu blachowego oraz funkcji elektrycznej uzwojenia (klatki aluminiowej).

Kompozyty magnetyczno-przewodzące mogą być wykonane jako infiltrowane wewnątrz lub zewnętrznie [5], kiedy to w procesie technologicznym infiltrat przechodzi w fazę ciekłą, lub jako mieszanki proszków magnetycznych i przewodzących, w których materiał przewodzący pozostaje w czasie całego procesu technologicznego w fazie stałej.

Prezentowana praca dotyczy dielektromagnetyków Fe-Cu wykonanych z mieszanki proszku magnetycznego - żelaza i proszku przewodzącego - miedzi.

### 2.1. Technologia

Technologia magnetowodu polega na wprowadzeniu proszku przewodzącego na etapie wykonywania mieszanki (proszek żelaza, proszek przewodzący i dodatki wynikające z procesu technologicznego: dielektryk, środki poślizgowe itp.). W procesie utwardzania (temperatura 180°C) dielektromagnetyków Fe-Cu proszek przewodzący nie przechodzi w fazę ciekłą, co utrudnia wytworzenie ciągłego szkieletu konduktywnego, tak jak ma to miejsce przy zastosowaniu infiltracji.

Niewątpliwą zaletą zastosowanej technologii jest jej prostota. Pozwala ona na wykonywanie kompozytów magnetyczno-przewodzących o praktycznie dowolnym udziale składników i zastosowanie proszku przewodzącego o dowolnie wysokiej temperaturze topnienia. Pomija się więc ograniczenia występujące w procesie wytwarzania magnetowodów infiltrowanych, czyli np. wykonania samodzielnego, porowatego szkieletu magnetycznie miękkiego niezbędnego w procesie technologicznym infiltracji zewnętrznej, który, ze względu na wytrzymałość mechaniczną, istotnie ogranicza możliwą do wprowadzenia ilość infiltratu [3].

## 2.2. Właściwości

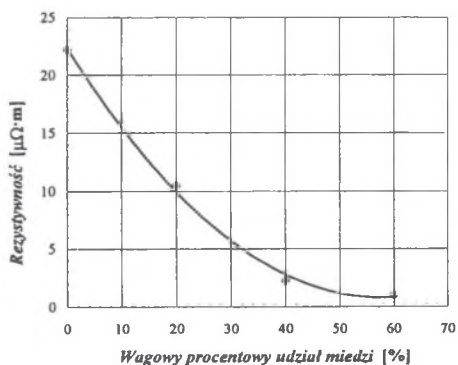
Pomiary właściwości dielektromagnetyków magnetyczno-przewodzących Fe-Cu przeprowadzono na standardowych do badań magnetycznych próbkach pierścieniowych o wymiarach  $\phi 50 \times \phi 60 \times 5$  mm. Do wykonania mieszanki wykorzystano proszek żelaza o wielkości cząstek powyżej  $75 \mu\text{m}$  oraz proszek miedzi o wielkości cząstek poniżej  $71 \mu\text{m}$ .

Proszek żelaza, w celu równomiernego rozłożenia warstwy dielektryku na cząsteczkach żelaza, mieszano z żywicą epoksydową (w ilości 0.1% wagowo) na mokro w mieszalniku typu T przez 1 godz., co zapewnia odparowanie rozpuszczalnika. Do tak przygotowanej mieszanki dodawano proszek miedzi i mieszano przez 5 minut. Krótki czas mieszania z miedzią, określony w dodatkowych badaniach, miał ograniczyć pokrycie cząstek miedzi dielektrykiem zapewniając jednocześnie możliwie równomierne rozłożenie miedzi w objętości mieszanki. Tak przygotowaną mieszankę prasowano pod ciśnieniem 800 MPa. Otrzymane wypraski utwardzono w temperaturze  $180^\circ\text{C}$  przez 1 godzinę.

Zbadano właściwości dielektromagnetyków niedomieszkowanych (0% Cu) oraz domieszkowanych miedzią (20%Cu, 40%Cu, 60%Cu). Ilość miedzi to wagowy udział procentowy; przedstawiony jest on każdorazowo w opisie próbek przy prezentowaniu wyników badań.

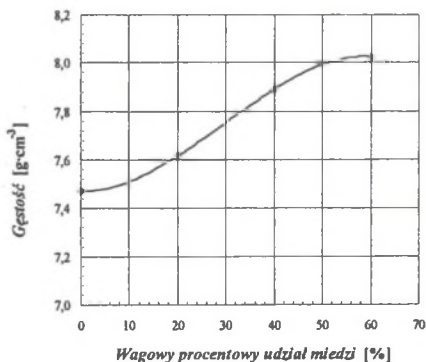
Przeprowadzono, między innymi, pomiary gęstości, rezystywności oraz, za pomocą komputerowego systemu pomiarowego, pomiary właściwości magnetycznych łącznie z rozdziałem strat. Zastosowany system pomiarowy pozwala na pomiar właściwości magnetycznych z błędem nie przekraczającym 1%.

Na rysunku 1 przedstawiono rezystywności wykonanych dielektromagnetyków w zależności od ilości zawartej w nich miedzi, natomiast na rysunku 2 ich gęstości.



Rys. 1. Zależność rezystywności dielektromagnetyków domieszkowanych miedzią w zależności od procentowego udziału miedzi

Fig. 1. Dependence of Fe-Cu dielectromagnetic resistivity on percentage content of copper

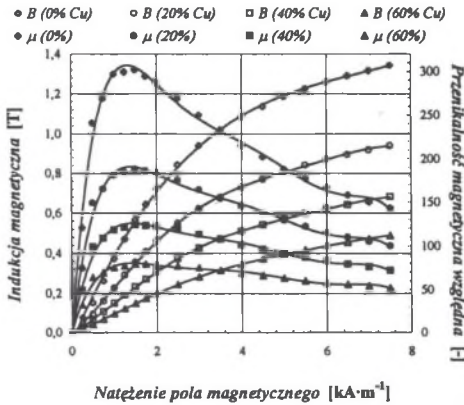


Rys. 2. Zależność gęstości dielektromagnetyków domieszkowanych miedzią w zależności od procentowego udziału miedzi

Fig. 2. Dependence of Fe-Cu dielectromagnetic density on percentage content of copper

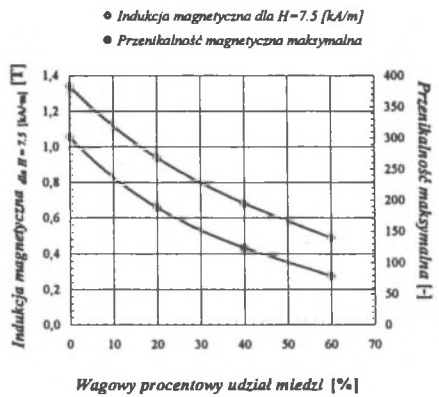
Zaobserwować można, spodziewane ze wzrostem dodatku miedzi, zmniejszenie rezystywności dielektromagnetyków (ponad dwudziestokrotne) oraz wzrost ich gęstości wynikający z większej gęstości miedzi.

Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi krzywej magnesowania dynamicznego oraz przebiegi względnej przenikalności magnetycznej w funkcji natężenia pola magnetycznego w próbkach pierścieniowych dla różnej, procentowej, zawartości miedzi. Rysunek 4 przedstawia zmiany indukcji odpowiadającej natężeniu pola magnetycznego wynoszącego  $7.5 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$  (górną wartość natężenia pola magnetycznego stosowaną podczas pomiarów) oraz maksymalnej magnetycznej przenikalności względnej od procentowego udziału miedzi.



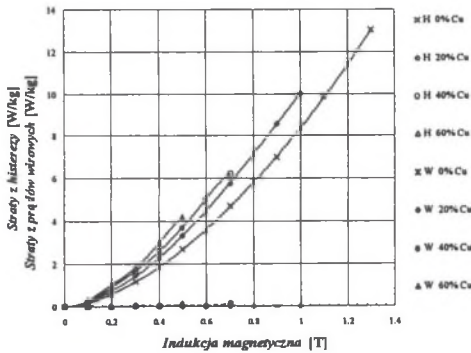
Rys. 3. Przebiegi krzywych magnesowania dynamicznego oraz względnej przenikalności magnetycznej dielektromagnetyków Fe-Cu przy różnych ilościach miedzi

Fig. 3. Dynamic magnetizing curves and relative magnetic permeability of Fe-Cu dielectromagnetics with different content of copper



Rys. 4. Zależność indukcji B(7.5 kA·m<sup>-1</sup>) oraz przenikalności maksymalnej w funkcji zawartości miedzi

Fig. 4. Dependence of magnetic induction B(7.5 kA·m<sup>-1</sup>) and maximum relative magnetic permeability on percentage content of copper



Rys. 5. Rozdział strat dielektromagnetyków o różnej ilości miedzi

Fig. 5. Division of losses of Fe-Cu dielectromagnetics with different content of copper

Zbadane dielektromagnetyki magnetyczno-przewodzące Fe-Cu wykorzystano do wykonania magnetowodów wirnika silnika indukcyjnego.

### 3. BADANIA NA MODELU RZECZYWISTYM

Do badań wykorzystano trójfazowy silnik indukcyjny małej mocy, w którym warstwa zewnętrzna magnetowodu wirnika wykonana została z powyżej przedstawionych dielektromagnetyków Fe-Cu. Zastosowanie dielektromagnetyków miało na celu nie tylko uproszczenie technologii, ale i ograniczenie w magnetowodzie wirnika prądów wirowych występujących w magnetowodach wykonanych z infiltrowanych spieków magnetycznie miękkich [3, 4]. Wprowadzie moment

Rozdział strat mocy w dielektromagnetykach niedomieszkowanych (0% Cu) oraz domieszkowanych miedzią w ilości 20%, 40% i 60% przedstawiono na rysunku 5. Zauważyć można, że podstawowymi stratami występującymi w badanych dielektromagnetykach są straty histerezy (oznaczenie H). Straty z prądów wirowych (oznaczenie W) praktycznie równe są zero. Wynika stąd, że technologia (brak przejścia w fazę ciekłą), zastosowany dielektryk i powstałe pory spowodowały, iż cząsteczki żelaza są zaizolowane, co nie pozwoliło na przepływ w dielektromagnetykach prądów wirowych.

rozruchowy w takim rozwiązaniu musiał zmaleć, ale liczone na korzyści wynikające ze zmniejszenia strat w rdzeniu wirnika a więc i zmniejszenie jego nagrzewania.

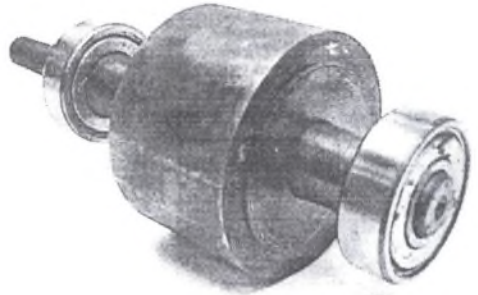
### 3.1. Magnetowód wirnika

Magnetowód wirnika, przedstawiony na rysunku 6, wykonano jako dwuwarstwowy. Obydwie warstwy to dielektromagnetyki prasowane pod ciśnieniem 800 MPa. Warstwę wewnętrzną stanowi walec z tradycyjnego dielektromagnetyku Fe, a druga, zewnętrzna warstwa to wyprasowany na tym walcu cylinder z dielektromagnetyku Fe-Cu. Zastosowanie mieszanki magnetyczno-przewodzącej pozwoliło na uproszczenie technologii cylindra zewnętrznego. Grubość tego cylindra dobrano tak, że stanowi on połowę wysokości aluminiowej klatki wirnika silnika fabrycznego. Zachowano wymiary zewnętrzne fabrycznego magnetowodu blachowego (a więc i grubość szczeliny powietrznej).

Do wykonania cylindrów magnetyczno-przewodzących zastosowano dielektromagnetyki z dodatkiem miedzi w ilości 40%Cu (co ilościowo odpowiada procentowemu udziałowi powierzchni żłobków w powierzchni strefy zębowej wirnika fabrycznego) oraz 60%Cu.

Wyprasowanie magnetowodu wirnika wymagało zastosowania specjalnej, wieloczęściowej formy. Mimo złożonej technologii, ze względu na niewystarczające doświadczenie, na magnetowodzie nie wyprasowano zewnętrznych pierścieni przewodzących, które przylutowano do czół magnetowodu po osadzeniu go na wale.

W prezentowanym rozwiązaniu magnetowodu funkcję magnetyczną pełni rdzeń magnetycznie miękki oraz kwaziciągła siatka przestrzenna cząsteczek magnetycznie miękkiego proszku żelaza cylindra zewnętrznego, natomiast funkcję elektryczną przewodząca siatka przestrzenna proszku miedzi. Optymalne wykonanie magnetowodu magnetyczno-przewodzącego wirnika powinno doprowadzić nie tylko do przejścia przez przewodzącą siatkę przestrzenną funkcji elektrycznej klatki aluminiowej, ale również do tego, aby możliwe było zlikwidowanie pierścieni zewnętrznych. Pozwoliłoby to na skrócenie magnetowodu wirnika, a więc w konsekwencji na zmniejszenie wymiarów silnika.



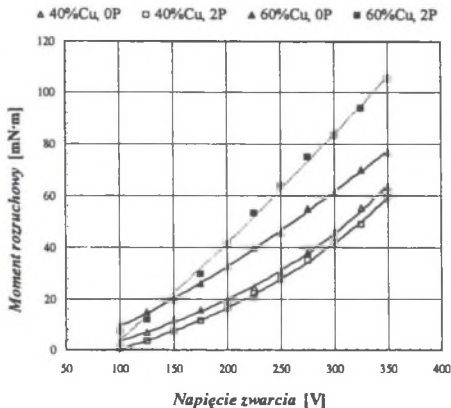
Rys. 6. Magnetowód wirnika z warstwą Fe-Cu  
Fig. 6. Magnetic core of the rotor with Fe-Cu layer

### 3.2. Wyniki badań

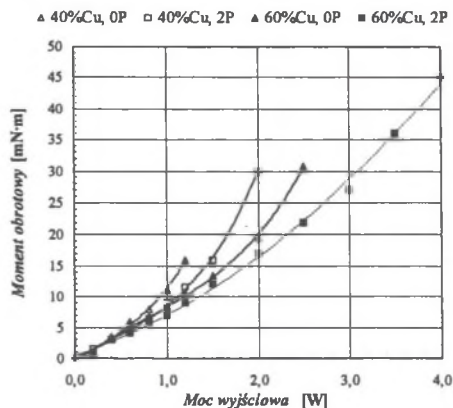
Wykonane wirniki, po osadzeniu ich na wale, montowano do tego samego stojana silnika indukcyjnego ogólnego zastosowania typu Sg 56-4A. Silnik w wykonaniu fabrycznym (wirnik blachowy z klatką aluminiową) posiada następujące parametry znamionowe:  $n=1400$  obr/min,  $P=0.06$  kW,  $U=220/380$  V,  $I=0.43/0.25$  A. Silnik badano na hamownicy indukcyjnej.

Zmierzone charakterystyki biegu jałowego, obciążenia i stanu zwarcia silnika z zamontowanymi wirnikami z zewnętrznymi warstwami Fe-Cu. Dla obu zastosowanych ilości miedzi wykonano badania silnika z dwoma wariantami wirników: wirnika bez pierścieni zwierających (w oznaczeniu indeks „0P”) oraz z dwoma pierścieniami (indeks „2P”). Powodem przeprowadzenia badań silnika z wirnikami bez pierścieni było określenie wpływu pierścieni na właściwości silnika. W przypadku wytworzenia w części magnetowodu domieszkowanego miedzią (siatce przewodzącej) wystarczającej liczby kwaziciągłych pierścieni przewodzących brak pierścieni zwierających powinien być niezauważalny.

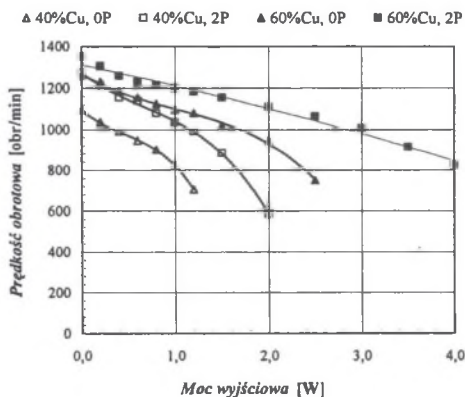
Na rysunkach 7-9 przedstawiono wybrane charakterystyki silników z wirnikami wykonanymi z dielektromagnetyków.



Rys. 7. Charakterystyki momentu rozruchowego  
Fig. 7. Characteristics of starting torque



Rys. 8. Charakterystyki momentu obrotowego  
Fig. 8. Characteristics of output torque



Rys. 9. Charakterystyki prędkości obrotowej  
Fig. 9. Rotational speed characteristics

#### 4. PODSUMOWANIE

Próbę zastosowania dielektromagnetyków magnetyczno-przewodzących do wykonania wirników silnika indukcyjnego małej mocy uzasadniało, między innymi, znaczne zmniejszenie rezystywności dielektromagnetyków Fe-Cu w porównaniu do rezystywności dielektromagnetyku niedomieszkowanego.

Wyniki badań silnika z wykonanymi wirnikami z dielektromagnetyku z warstwą Fe-Cu wykazały, że jego parametry, w tym zarówno moment rozruchowy, jak i moc silnika, są bardzo małe. Wzrost ilości miedzi w zewnętrznym cylindrze Fe-Cu korzystniej wpływa na jego parametry niż zwierające pierścienie zewnętrzne, co dowodzi, że przewodność tej warstwy jest wciąż zbyt mała.

W magnetowodzie na bazie zastosowanego proszku miedzi nie wytworzono przestrzennej siatki o wystarczającej przewodności mogącej zastąpić klatkę aluminiową wirnika fabrycznego. Mimo że rezystancja dielektromagnetyku domieszkowanego miedzią zmalała istotnie, to zastosowana technologia nie sprawdziła się. Zawarty w mieszance dielektryk oraz powstałe w procesie

Parametry silnika z magnetowodami wykonanymi z przedstawionych dielektromagnetyków magnetyczno-przewodzących Fe-Cu są znacznie gorsze niż silnika indukcyjnego z klatkowym wirnikiem biachowym [3] oraz silnika z wirnikiem ze spieku infiltrowanego zewnątrz [3, 4].

Porównanie wyników badań silnika z wirnikami bez pierścieni zwierających oraz z dwoma pierścieniami wykazują, że przewodność uzyskana w magnetyczno-przewodzącej części magnetowodu (siatce przewodzącej) jest za mała i nie może, na obecnym etapie badań, zastąpić nie tylko pierścieni zwierających, ale i aluminiowej klatki silnika fabrycznego.

technologicznym pory (brak przejścia materiału przewodzącego w fazę ciekłą) spowodowały wzajemne odizolowanie zarówno cząsteczek żelaza, jak i miedzi zmniejszając tym samym przewodność elektryczną zewnętrznego cylindra Fe-Cu. Potwierdza to przeprowadzony rozdział strat w dielektromagnetykach Fe-Cu. Podstawowymi stratami występującymi w badanych dielektromagnetykach są straty z histerezy, natomiast straty z prądów wirowych są praktycznie równe zeru, co w tym przypadku nie jest korzystne.

Dalsze prace zmierzające do zastosowania dielektromagnetyków magnetyczno-przewodzących na magnetowody wirnika silnika indukcyjnego wymagają poprawy technologii. Należy zastosować technologię zapewniającą wytworzenie dielektromagnetyku o znacznie większej przewodności. Zastosowanie infiltracji wewnętrznej, w trakcie której przewodzący infiltrat w procesie utwardzania przechodziłby w fazę ciekłą, powinno doprowadzić do wytworzenia ciągłej siatki przewodzącej. Wymaga to jednak zastosowania infiltratu o odpowiednio niskiej temperaturze topnienia czy też opracowania dielektryku wytrzymującego wyższe temperatury występujące podczas infiltracji. Prace nad takim dielektrykiem są prowadzone w różnych ośrodkach światowych [2]. Obróbka cieplna dielektromagnetyków nieinfiltrowanych w temperaturach w okolicy 600°C powinna prowadzić do korzystnego zmniejszenia strat z histerezy przy zachowaniu małych wartości strat z prądów wirowych.

## LITERATURA

1. Jack A. G.: Experience with the Use of Soft Magnetic Composites in Electrical Machines, International Conference on Electrical Machines, September, 1998, Istanbul, Turkey, pp. 1441-1448.
2. Hodgson S. N. B., Atafirat S., Mascia L., Janta T., Wegliński B.: Dielectromagnetic Composites Based on Organic Polymer-SiO<sub>2</sub> Hybrids, Conference PRA Coatings Technology, Organic - Inorganic Hybrids, University of Surrey, Guildford, UK, 2000, Paper 12, p. 1+10.
3. Janta T.: Wpływ przewodności warstwy infiltrowanej wirnika na właściwości ruchowe silnika asynchronicznego, International XII Symposium on Micromachines and Servodrives, MIS'2000, Kamień Śląski, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 2000, Tom I, Vol. I, s. 184+192.
4. Janta T.: Asynchronous Motors with Cage and Composite Rotors, 34<sup>th</sup> International Symposium on Electrical Machines SME'98, Lodz, Poland, Zeszyty Naukowe, Elektryka No 92, Politechnika Łódzka, 1998, pp. 97-102.
5. Janta T., Kordecki A., Węgliński B.: Idea of Magnetic-Conductive Elements for Electrical Machines made of Powder Composites, Third International Scientific and Technical Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems 3<sup>rd</sup> ISTC UEES'97, Alushta, The Crimea, Ukraine, 1997, pp. 1125+1130.
6. Janta T., Węgliński B.: Properties of Magnetic - Conductive PM Composites, 1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, Granada, Spain, 1998, Vol. 5, pp. 550+555.
7. Węgliński B.: Magnetycznie miękkie kompozyty proszkowe na osnowie żelaza, Prace Naukowe Instytutu Układów Elektromaszynowych Politechniki Wrocławskiej, nr 24, seria: monografie nr 5, Wrocław 1981.

Recenzent: Dr hab. inż. Zdzisław Życki  
Profesor Instytutu Elektrotechniki, Warszawa

Wpłynęło do Redakcji dnia 28 lutego 2001 r.

## Abstract

Soft magnetic composites are more and more widely used as materials for magnetic cores of electrical machines [1, 3+6]. More attention is paid to dielectromagnetics. They show worse magnetic properties, e.g. magnetic induction or permeability, than soft magnetic sinters, but their losses are more attractive for application to alternating fields.

The presented work concerns magnetic-conductive (Fe-Cu) dielectromagnetics made of mixture of iron and copper powders.

The properties of dielectromagnetics without copper (0%Cu), and with admixture of copper (20%Cu, 40%Cu, 60%Cu) were tested. The amount of copper (by weight) is given at description of samples.

The tests of dielectromagnetics were carried out on the standard toroidal samples. The test results are presented in the following figures: density (Fig. 1), resistivity (Fig. 2), and magnetic properties (Figs. 3+6). All the samples were compacted at pressure 800 MPa and cured at temperature 180°C during 1 hour.

Rotors made of the tested Fe-Cu dielectromagnetics replaced the original (sheeted) rotor of an induction motor. They have the same shape and dimensions as the original rotor. Thus, the work concerns mainly elaboration of technology which enables manufacture of the previously presented solutions of such magnetic cores [5, 7].

The cores of the rotors were made as a two layer one (Fig. 6). An internal part of the core was a soft magnetic cylinder. Its material was dielectromagnetic made of pure iron. An external layer, in form of a sleeve, compacted on the internal part, was made of magnetic-conductive (Fe-Cu) dielectromagnetic. Its thickness was equal a half of the height of the original rotor aluminium cage.

The rotors were tested in 3-phase small power induction motor which nominal parameters for sheeted rotor are:  $n=1400$  rpm,  $P=0.06$  kW,  $U=220/380$  V,  $I=0.43/0.25$  A.

No load, full load, and start characteristics of the motor with various rotors were tested. For the applied copper amounts of 40% and 60 % the rotors without short-circuited rings (index "0P"), and with two rings (index "2P") were used. The aim of these tests was to find out their influence on the motor properties. The chosen characteristics of the tested motor are presented in Figs. 7+9.

The expected decrease in the dielectromagnetic resistivity and increase in their density, due to increase in the copper amount were observed. This justified the presented work on these rotors.

Both the starting torque and output power of the motor are not satisfactory. This was caused by the method of the copper introduction. In fact the used copper was not in liquid phase during any stage of processing. Thus, it was not possible to create a spatial net with satisfactory conductance, able to replace the original rotor aluminium cage. Division of dielectromagnetics losses, in which the eddy current loss is practically equal zero, confirmed it.

Further works the concerning presented materials require improvement of their technology. Making an outer Fe-Cu sleeve requires infiltration copper in liquid phase. As a result the conductive spatial net would be created. This requires application of conductive materials with a suitable low melting point, and dielectric, that would be able to withstand temperature of such a melting point. Works on such a dielectric are being performed in various research centers [2].