

## WPŁYW KONSTRUKCJI WIRNIKA NA PARAMETRY SILNIKA INDUKCYJNEGO PRACUJĄCEGO W CIEKŁYCH GAZACH\*\*

### STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono analizę wpływu geometrii żłobków wirnika oraz materiału klatki na parametry elektromagnetyczne silnika indukcyjnego pracującego w ciekłych gazach, ze szczególnym uwzględnieniem pracy w gazie LNG o temperaturze  $-161^{\circ}\text{C}$ . Przewiduje się, że znaczna część urządzeń do przepompowywania i przesyłania gazu naturalnego będzie wyposażona w silniki indukcyjne pracujące w zanurzeniu. Rodzi to szereg problemów zarówno konstrukcyjnych, jak i technologicznych. Niezbędne jest określenie zmiany właściwości materiałów magnetycznych i przewodzących poddanych działaniu tak niskiej temperatury. Konieczny jest również dobór materiałów izolacyjnych oraz struktury izolacji uzwojeń, a także rozwiązań konstrukcyjnych wirnika klatkowego. Istotne zmniejszenie rezystywności materiałów przewodzących w niskich temperaturach niesie zarówno pozytywne, jak i negatywne skutki, do których zaliczyć należy mniejszy moment rozruchowy oraz wzrost prądu rozruchowego. Ponieważ istotny wpływ na powyższe parametry ma kształt, przekrój i materiał klatki wirnika, w artykule przedstawiono wybrane wyniki analizy wpływu tych wielkości na wartości i przebiegi momentu elektromagnetycznego i prądu silnika. Wykazano, że dobierając odpowiedni kształt pręta wirnika oraz materiał, z którego wykonana jest klatka, można wpływać na wartość i przebieg istotnych parametrów silnika. Na podstawie uzyskanych badań symulacyjnych, wskazano optymalny pod względem konstrukcyjnym i technologicznym kształt pręta klatki wirnika, który powinien być stosowany w silnikach pracujących w temperaturze niższej niż  $-150^{\circ}\text{C}$ .

**Słowa kluczowe:** kriogeniczne silniki indukcyjne, konstrukcja, symulacje komputerowe

### THE INFLUENCE OF ROTOR DESIGN ON PARAMETERS OF AN INDUCTION MOTOR WORKING IN LIQUID NATURAL GAS

The paper presents the influence of slot geometry and resistivity of squirrel cage materials on characteristics high power motor's. Changes of electromagnetic torque run and of electrical current run as they appear in the motor with given solutions were analyzed and compared. Simulational analyses were conducted using circuit-field method. On the basis of test results, it was found that although employment of typical squirrel bar and typical materials for this motor part gives positive results, it is not an optimal solution. The best start-up parameters were obtained for shape C stator slot presented in Figure 2. Application of this kind of slot shape results in increase of start-up torque and decrease of start-up current, as compared to typical design – shape A (Fig. 4). On the other hand, critical torque also decreases but this change is minor and it does not exceed 8%. The use of Cu or CuBe2 as squirrel cage material for motor, working in  $-150^{\circ}\text{C}$ , results in a 21% decrease of start-up torque and a 2.3% increase of start-up current (Fig. 9) when compared with squirrel cage made of Al. However, motor working in cryogenic conditions may, in some cases, work in higher temperatures. In such situations attention should be paid to the change of motor parameters occurring with the change of its operating temperature. The smallest change was noted for Cu squirrel cage and for a cage made of Cu with small amount of beryllium addition, what is illustrated in Figures 7–8. What should be underlined is that the manufacture of a Cu (or Cu alloy) squirrel cage is poses difficulties from technological point of view. Employment of this sort of solution may be governed by other factors, such as limitation of power loss in the motor.

**Keywords:** cryogenic induction motors, construction, computer simulation

### 1. WSTĘP

Kryzys paliwowy i wzrost cen ropy na rynku światowym stanowi silny bodziec do poszukiwania nowych źródeł energii, takich jak np. gaz naturalny. Gaz ten może być transportowany w formie ciekłej, w temperaturze  $-161^{\circ}\text{C}$ . Wzrost ogólnego zapotrzebowania na ciekłe gazy o bardzo niskich temperaturach wymusza opracowanie nowych rozwiązań urządzeń związanych z ich wytwarzaniem, transportowaniem i przetwarzaniem, w tym także silników elektrycznych.

Maszyny elektryczne stosowane we współczesnych układach pompowych ciekłych gazów pracują zwykle w zanurzeniu, a płynny gaz przepływa przez szczelinę pomiędzy wirnikiem a stojanem. Istotne zmniejszenie rezystancji uzwojeń oraz rezystywności żelaza czynnego, wynikające ze znacznego obniżenia temperatury, skutkuje zmianami w momencie i prądzie pobieranym przez silnik, szczególnie podczas rozruchu oraz w wartości jego strat elektrycznych.

Projektując silnik indukcyjny do pracy w bardzo niskich temperaturach, można wykorzystać zarówno klasyczne roz-

\* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

\*\* Artykuł uzyskał pozytywne recenzje i był prezentowany podczas Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2006 w Krakowie

wiązania techniczne i konstrukcje, jak i nietypowe rozwiązania, które mogą korzystnie wpływać na przebieg i wartość momentu elektromagnetycznego oraz prądu rozruchowego. Jednym z takich rozwiązań może być zastosowanie żłobków wirnika o innej geometrii niż w „klasycznych” konstrukcjach. Dodatkowo, rozpatrywać można zastosowanie na klatkę wirnika innych materiałów niż powszechnie stosowane aluminium.

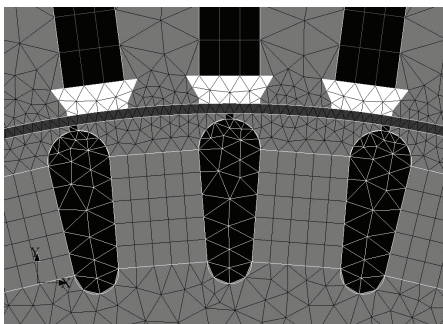
Obniżenie temperatury pracy maszyny elektrycznej ma znaczący wpływ na właściwości elektryczne i magnetyczne tworzących ją elementów przewodzących oraz magnetycznych [1]. Istotną zmianą właściwości blachy elektrotechnicznej jest wzrost jej stratności, indukcji nasycenia oraz maksymalnej przenikalności magnetycznej [2]. Ponadto wraz ze spadkiem temperatury spada rezystywność materiałów przewodzących. Mniejsza rezystywność materiału powoduje, że możliwe jest uwzględnienie w projekcie silnika większej gęstości prądu. Umożliwia to zastosowanie klatki wirnika o mniejszych przekrojach prętów. Zmniejszenie przekroju żłobków wirnika powinno dodatkowo skutkować mniejszą reluktancją całkowitą obwodu magnetycznego silnika i w związku z tym zmniejszeniem prądu magnesującego. Wynika z tego, że kształtowanie parametrów silnika możliwe jest przez dobór rodzaju materiału klatki, a właściwość jego rezystywności oraz kształtu żłobka wirnika.

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych skutków zastosowania w konstrukcji silnika „kriogenicznego” o mocy około 1 MW, różnego kształtu i przekroju żłobków wirnika oraz różnego rodzaju materiału na jego klatkę. Badania symulacyjne metodą polowo-obwodową wykonano przy wykorzystaniu programu Flux2D [3]. W szczególności analizie i porównaniu poddano zmiany przebiegu momentu elektromagnetycznego i prądu silnika. Zbadano także zmiany w rozkładzie gęstości prądu w przecie wirnika.

Analiza uzyskanych wyników ułatwi optymalizację konstrukcji silników przeznaczonych do pracy w bardzo niskich temperaturach.

## 2. SYMULACJE KOMPUTEROWE

Analizę parametrów silnika pracującego w ciekłym azocie przeprowadzono dla silnika, zawierającego 48 żłobków w stojanie i 40 żłobków w wirniku. Na rysunku 1 przedsta-



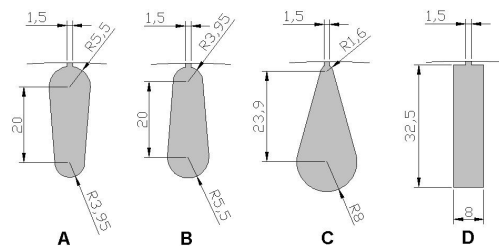
Rys. 1. Wycinek modelu silnika z wygenerowaną siatką obliczeniową w programie Flux2D

Fig. 1. The motor model segment with generated computational mesh in Flux2D computer program

wiono przykładowy wycinek badanego modelu silnika z klasyczną konstrukcją klatki zwartej wirnika z naniesioną siatką obliczeniową. Model obwodowy o wymuszeniu napięciowym uwzględnia parametry elektryczne układu zasilania oraz uzwojeń fazowych stojana o stałej rezystancji i indukcyjności połączeń czołowych.

### 2.1. Wpływ geometrii żłobka wirnika

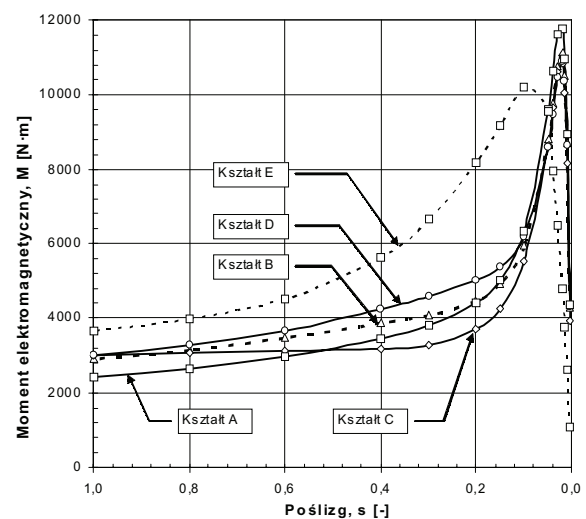
Na rysunku 2 przedstawiono, wybrane do badań, kształty żłobków wirnika badanego silnika. We wszystkich przedstawionych żłobkach zachowano takie samo pole przekroju poprzecznego.



Rys. 2. Kształty żłobka wirnika badanego silnika „kriogenicznego”  
Objaśnienia w tekście

Fig. 2. The shape of rotor slots the tested „cryogenic” motor

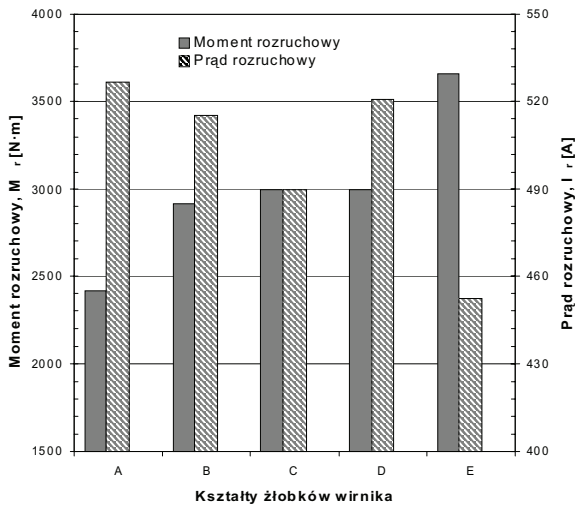
Kształt A żłobka wirnika jest typowym rozwiązaniem stosowanym w silnikach klatkowych. Kształt B jest rozwiązaniem „odwrotnym” do typowego kształtu żłobka, spotykanym np. w silnikach energooszczędnych. Rozwinięciem geometrii żłobka zaprezentowanym w kształcie B jest kształt C. Wyniki badań symulacyjnych przebiegu momentu elektromagnetycznego w funkcji poślizgu silnika „kriogenicznego” z wirnikiem o różnym kształcie żłobków przedstawiono na rysunku 3. W celach porównawczych, przedstawiono parametry otrzymane dla silnika o kształcie żłobków wirnika A, ale pracującego temperaturze pokojowej (kształt E).



Rys. 3. Przebiegi momentu elektromagnetycznego silnika „kriogenicznego” dla różnych kształtów żłobków wirnika

Fig. 3. Electromagnetically characteristics ( $M=f(s)$ ) of “cryogenic” motor for different rotor slot shapes

Na rysunku 4 przedstawiono wartości momentów i prądów rozruchowych badanych modeli silnika.

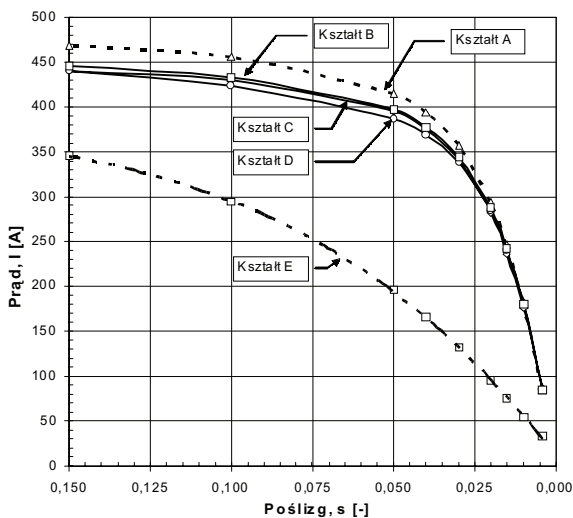


Rys. 4. Wartości momentu i prądu rozruchowego silnika „kriogenicznego” dla różnych kształtów żłobków wirnika

Fig. 4. The value of starting torque and current of “cryogenic” motor for different rotor slot shapes

Z przedstawionych wyników obliczeń, wynika, że dość powszechnie stosowany kształt żłobka wirnika silnika indukcyjnego (A), zastosowany w silniku pracującym w warunkach „kriogenicznych”, pozwala osiągnąć największy moment krytyczny, jednakże, dla silnika z tym kształtem żłobka otrzymano najmniejszy moment rozruchowy. Dla kształtów B, C i D (rys. 3), otrzymano porównywalne wartości momentu krytycznego oraz momentu rozruchowego.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność prądu silnika w funkcji poślizgu dla badanych modeli silnika. Najmniejszą wartość prądu rozruchowego uzyskano dla kształtu C żłobka wirnika.



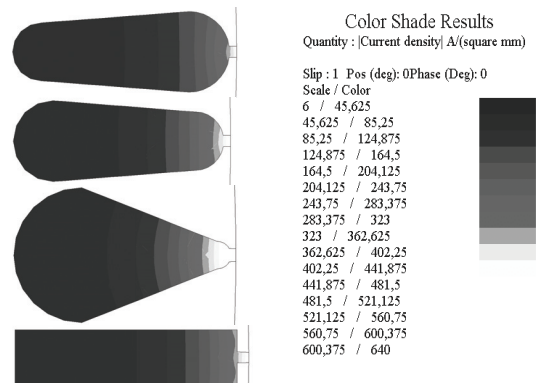
Rys. 5. Przebiegi prądu silnika w funkcji poślizgu dla różnych kształtów żłobków wirnika

Fig. 5.  $I=f(s)$  characteristics for different rotor slot shapes

Jak widać z rysunku 4, stosując żłobek wirnika o kształcie A w silniku pracującym w obniżonej temperaturze, otrzymuje się największe wartości prądu rozruchowego.

Za najbardziej odpowiedni kształt żłobka wirnika w silnikach powszechnego stosowania można zatem przyjąć kształt C. W odniesieniu do kształtu żłobka A uzyskano zmniejszenie prądu rozruchowego silnika o około 7% przy równoczesnym zmniejszeniu momentu krytycznego o około 8%. Równocześnie moment rozruchowy wirnika z tym kształtem żłobka zwiększył się o około 24%.

Na rysunku 6 przedstawiono rozkład gęstości prądu w żłobku wirnika dla badanych modeli dla  $s = 1$ .

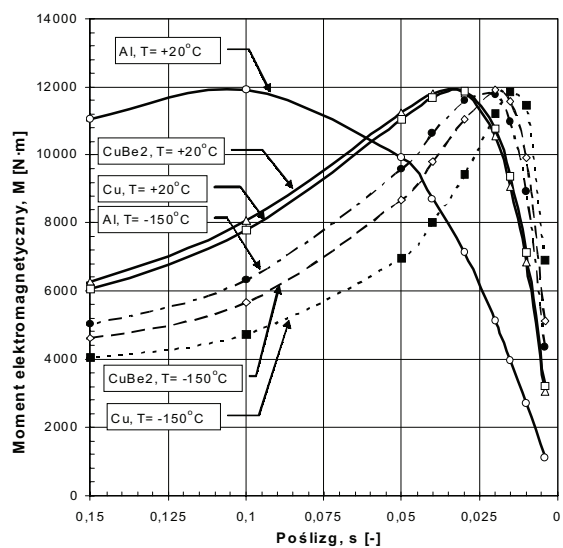


Rys. 6. Rozkład gęstości prądu silnika (dla  $s = 1$ ) dla różnych kształtów żłobków wirnika

Fig. 6. Distribution of current density (at  $s = 1$ ) for different rotor slot shapes

## 2.2. Wpływ rodzaju materiału klatki wirnika

Symulacje silnika „kriogenicznego” dla różnych materiałów klatki wirnika przeprowadzono dla pręta wirnika o kształcie A (rys. 2).



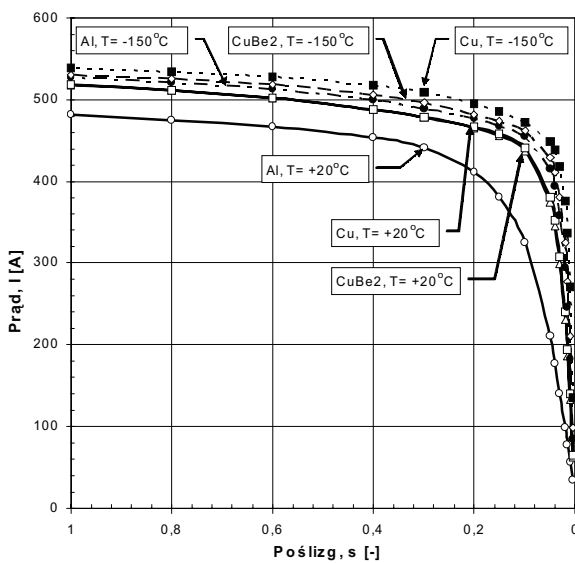
Rys. 7. Przebiegi momentu elektromagnetycznego silnika z klatką wykonaną z różnych materiałów

Fig. 7. Electromagnetically characteristics ( $M=f(s)$ ) for different squirrel-cage materials

W badaniach zastosowano następujące rodzaje materiału klatki wirnika:

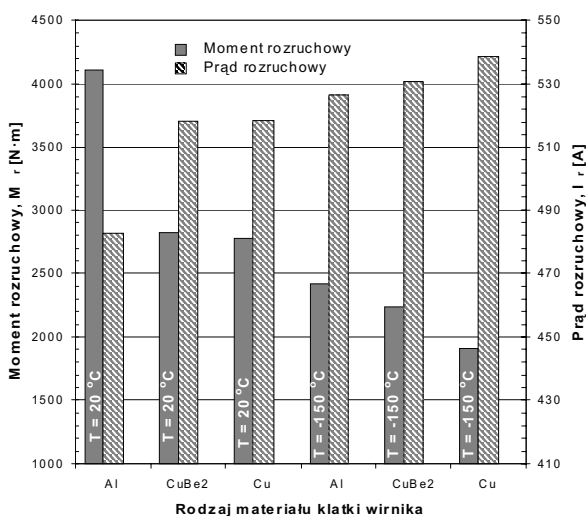
- aluminium odlewane na „gorąco”,
- brąz berylowy o niskiej zawartości berylu,
- miedź.

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi momentu elektromagnetycznego w funkcji poślizgu silnika z klatką wykonaną z ww. materiałów. Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi prądu silnika w funkcji poślizgu dla wirników z klatką z badanych materiałów. Na rysunku 9 przedstawiono wartości momentu i prądu rozruchowego silnika „kriogenicznego” z wirnikami o klatce z analizowanych materiałów.



Rys. 8. Przebieg prądu silnika w funkcji poślizgu dla różnych materiałów klatki wirnika

Fig. 8.  $I=f(s)$  characteristic for different squirrel-cage materials



Rys. 9. Wartości momentu i prądu rozruchowego silnika dla różnych materiałów klatki wirnika

Fig. 9. The values of starting torque and current for different squirrel-cage materials

Z przedstawionych wartości wynika, że silnik z klatką miedzianą, w porównaniu do silnika z klatką aluminiową, w temperaturze pracy ( $-150^{\circ}\text{C}$ ), charakteryzuje się mniejszym o około 21% momentem rozruchowym i większym o około 2,3% prądem rozruchowym.

### 3. WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwoliły określić wpływ zastosowanego kształtu pręta oraz materiału, z którego wykonana zostanie klatka wirnika, na wartość i przebieg prądu i momentu silnika indukcyjnego w funkcji poślizgu.

Na podstawie uzyskanych wyników symulacyjnych można stwierdzić, że z rozpatrywanych konstrukcji najlepsze parametry podczas rozruchu uzyskano dla wirnika z prętem o kształcie C. Silnik z takim wirnikiem, charakteryzuje się nieznacznie mniejszym momentem krytycznym. Może to mieć znaczenie np. w napędach pomp odśrodkowych zasilanych z regulowanych źródeł napięcia i częstotliwości przy realizacji pracy w zakresie częstotliwości większej od znamionowej.

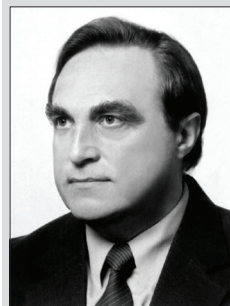
Zastosowanie klatki wirnika wykonanej z miedzi lub jej stopu o niskim dodatku np. berylu spowoduje, w porównaniu z silnikiem z klatką z aluminium, zmniejszenie momentu rozruchowego oraz zwiększenie prądu rozruchowego. Zmiana momentu i prądu rozruchowego, wynikająca z obniżenia temperatury pracy silników z klatką z miedzi lub brązu berylowego, jest mniejsza niż w przypadku silnika z klatką z aluminium. Wykonanie klatki wirnika z miedzi lub jej stopu jest jednak trudniejsze technologicznie, ze względu na wyższą temperaturę topnienia Cu. Jednakże zastosowanie tego rozwiązania może wynikać z innymi względów takich jak np. celowość ograniczenia strat w silniku.

### Literatura

- [1] Azarewicz S., Gaworska D., Węgliński B.: *Właściwości blach prądnicowych w ciekłych gazach*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Oficyna Wydaw. Pol. Wroc., 2005, 286–295
- [2] Buniowski A., Gaworska D.: *Zachowania materiałów przewodzących i magnetycznych w temperaturach kriogenicznych*. Problemy wytwarzania małych maszyn elektrycznych. 8 Forum Techniczne, MIKROMA, M2P Group (France). Ustroń, 24–26 maj 2004
- [3] CEDRAT, FLUX® 0.10 2D Application, User guide, vol. 4, Solving and results postprocessing, March 2005

Wpłynęło: 26.09.2006

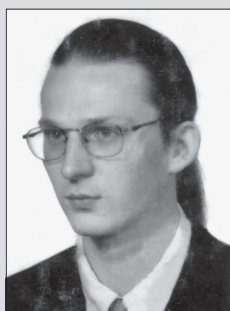
Stanisław AZAREWICZ



Ukończył w 1972 roku studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Od 1976 roku pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Zajmuje się teorią i zastosowaniami energoelektroniki

w napędzie elektrycznym a także nowymi konstrukcjami i nietypowym wykorzystaniem maszyn elektrycznych, czego przykładem jest między innymi opracowanie konstrukcji silników przeznaczonych do pracy w ciekłych gazach, zrealizowane w ramach VI Programu Unii Europejskiej. Za prowadzone prace został wyróżniony Nagrodą Prezesa Rady Ministrów.

e-mail: stanislaw.azarewicz@pwr.wroc.pl

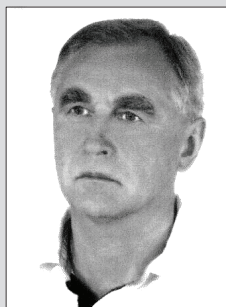


Jarosław KONIAREK

Ukończył w 1999 roku studia inżynierskie o kierunku technologia i diagnostyka maszyn elektrycznych, natomiast w roku 2001 ukończył studia magisterskie o kierunku aparaty i urządzenia elektryczne na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Od 2001 roku pra-

cuje na stanowisku specjalisty w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, biorąc udział w Projektach Unii Europejskiej. Jego zainteresowania naukowe związane są z magnetycznymi kompozytami proszkowymi, a w szczególności aplikacją tych materiałów w maszynach elektrycznych, co pociąga za sobą tworzenie nowych koncepcji konstrukcyjnych.

e-mail: jaroslaw.koniarek@pwr.wroc.pl



Bogumił WĘGLIŃSKI

Ukończył studia w Politechnice Wrocławskiej, gdzie uzyskał także tytuł profesora. Jest członkiem PTE-TiS, American Powder Metallurgy Institute, European Powder Metallurgy Association, Sekcji Elektrotechnologii PAN, Sekcji Metalurgii Proszków Komitetu Metalurgii PAN

2004. Jego zainteresowania naukowe związane są z inżynierią materiałową, a w szczególności magnetycznymi kompozytami proszkowymi. Głównym osiągnięciem było wykreowanie i wprowadzenie do nauki światowej takich magnetycznie miękkich kompozytów proszkowych jak dielektromagnetyki i magnetodielektryki. Dorobek publikacyjny i nieustanne kreowanie tych materiałów na różnorodnych konferencjach o zasięgu światowym sprawiły, że społeczność naukowa w świecie uznaje go za pioniera w zakresie tych materiałów. Badania nad dielektromagnetykami kontynuował w ramach projektu w 5 Programie Ramowym Unii Europejskiej (2001–2005). W 6 PR Unii Europejskiej uczestniczył w badaniach nowej generacji interfejsów statków do transportu ciekłego gazu naturalnego. Jest autorem lub współautorem ponad 120 publikacji naukowych, w tym dwóch monografii w języku polskim, trzech monografii w języku angielskim (wydane w Wielkiej Brytanii i USA) i siedmiu patentów.

e-mail: bogumil.weglinski@pwr.wroc.pl