

WYZNACZANIE PRĄDÓW GRANICZNYCH DLA MASZYN SYNCHRONICZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI UMIESZCZONYMI POWIERZCHNIOWO**

STRESZCZENIE

Ocena zagrożenia utraty własności magnetycznych przez magnesy trwałe w maszynach synchronicznych jest szczególnie ważna w stanach dynamicznych, przy stosunkowo znacznych wartościach prądów. Istnieje potrzeba wyznaczenia granicznych wartości prądów, przy których nie wystąpi jeszcze zagrożenie demagnetyzacji w żadnej części magnesów trwałych. W pracy przedstawiono sposób wyznaczania strefy bezpiecznej pracy maszyn synchronicznych z magnesami umieszczonymi powierzchniowo na wirniku, na podstawie bardzo uproszczonych analiz pola w obszarze magnesów trwałych. Pokazano także, że rozkład pola magnetycznego w maszynie może być efektywnie obliczany metodą całek brzegowych, co może stanowić istotne uzupełnienie metodyki obliczeń projektowych.

Słowa kluczowe: maszyny z magnesami trwałymi, efekt demagnetyzacji, graniczne wartości prądów, model całkowito-brzegowy

DETERMINATION OF LIMITING CURRENTS SYNCHRONOUS MACHINES WITH SURFACE MOUNTED PERMANENT MAGNETS

A risk of loss the magnetic feature of permanent magnets in synchronous machines should be evaluated. It is very important at dynamic state that is characterized by relatively important armature currents. It is need to determine the limiting currents for which the demagnetization does not occur at any part of magnet body. A method of delimiting the special safety zone is presented in the paper. The synchronous machines with permanent magnets being fixed externally upon a rotor yoke are concerned. The first attempt is performed on basis of rather simple one-directional field analysis. It is also shown that it may be improved by the boundary-integral approach to determine the magnetic field within an air-gap as well as in the magnet pieces.

Keywords: permanent magnet synchronous machines, demagnetization effect, limiting currents, boundary-integral approach

1. WSTĘP

Maszyny z magnesami trwałymi są obecnie w centrum zainteresowania wielu ośrodków zajmujących się maszynami elektrycznymi. Nowe materiały magnetyczne umożliwiają budowę maszyn o konkurencyjnych parametrach użytkowych, przy cenach porównywalnych do cen tradycyjnych maszyn prądu przemiennego. Jednym z najistotniejszych zagrożeń dla maszyn z magnesami trwałymi jest utrata własności magnetycznych przez magnesy trwałe w wyniku demagnesującego działania przepływu uzwojeń twornika. Pomimo że nowoczesne materiały magnetyczne stosowane w rdzeniach stojana mają bardzo korzystne charakterystyki, to ich relatywnie wysoka cena powoduje, że właściwie zaprojektowana maszyna nie powinna mieć zbyt dużych zapasów demagnesowania w normalnych warunkach eksploatacyjnych. Ocena zagrożenia utraty własności magnetycznych przez magnesy trwałe w maszynach synchronicznych jest szczególnie ważna w stanach dynamicznych, gdy prądy mogą przyjmować znaczne wartości, a położenie wirnika względem stojana ulega dynamicznym zmianom.

W analizie stanów dynamicznych, posługiwanie się modelami polowymi, umożliwiającymi dokładne określanie rozkładu pola w magnesach trwałych umieszczonych w obwo-

dzie magnetycznym realnej maszyny, wymaga specjalistycznego oprogramowania i jest zbyt czasochłonne. Istnieje zatem potrzeba określania stopnia zagrożenia demagnetyzacją na podstawie tradycyjnych modeli obwodowych maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi. W tym celu należy określić dla danej maszyny dopuszczalne wartości prądów niestwarzających takiego zagrożenia i porównywać je z wartościami prądów w stanach dynamicznych otrzymywanych z pomiarów czy z badań symulacyjnych. Taka strefa dopuszczalnych prądów może być wyznaczona dla konkretnej maszyny na podstawie znajomości jej danych konstrukcyjnych oraz charakterystyk użytych w niej magnesów trwałych. Można tu wykorzystać model magnetostrykcyjny, gdyż w maszynach z magnesami trwałymi wpływ magnetycznych ośrodków przewodzących prąd może być pomijany.

2. UPROSZCZONA ANALIZA ROZKŁADU POLA W MASZynie Z MAGNESAMI TRWAŁYMI UMIESZCZONYMI POWIERZCHNIOWO

Aby przybliżyć ideę strefy bezpiecznej pracy maszyny z magnesami trwałymi, posłużono się elementarnymi rozważaniami, zakładając, że pole w szczelinie powietrznej maszy-

* Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Zakład Maszyn Elektrycznych

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

ny oraz w magnesie trwałym jest promieniowe i zależy jedynie od kąтового położenia danego punktu na obwodzie maszyny, tak jak się to przyjmuje przy uproszczonych analizach pola szczelinowego w maszynach indukcyjnych. Na rysunku 1 przedstawiono symbolicznie usytuowanie magnesu względem zastępczych uzwojeń twornika w osiach „d” i „q” oraz podano przyjęte oznaczenia. Rozkład składowej promieniowej pola w szczelinie i magnesie wyznacza się z prawa przepływu w postaci całkowej

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Theta(x, \varphi, t) \quad (1)$$

dla konturu zaznaczonego linią przerywaną na rysunku 1 przy założeniu prostoliniowej charakterystyki magnesu

$$B_m = J + \mu_0 H_m = B_r + (1 + \chi) \mu_0 H_m \quad (2)$$

gdzie:

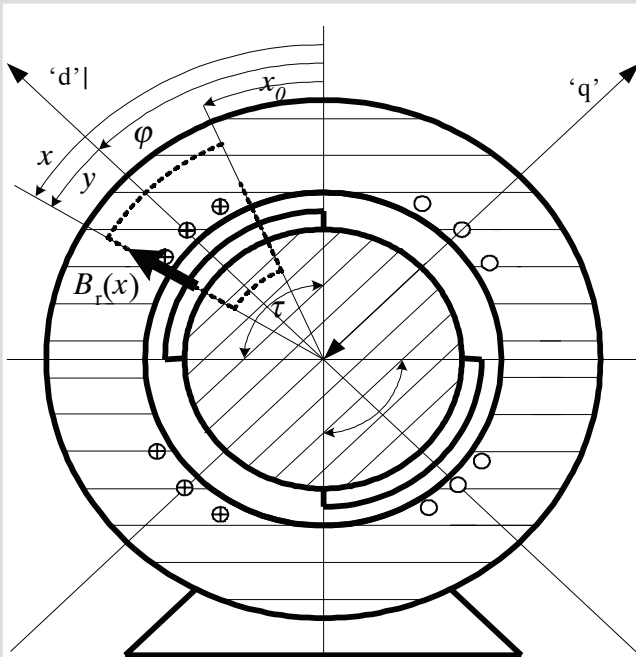
J – polaryzacja magnetyczna,

χ – podatność magnetyczna.

Podstawą dalszych analiz jest określenie rozkładu składowej promieniowej indukcji magnetycznej w stanie bezprądowym maszyny. Do obliczeń przybliżonych pominięto pole rozproszenia magnesu trwałego, zakładając, że obecność magnesu w obwodzie magnetycznym maszyny jest reprezentowana przez funkcję

$$B_m(y) = B_r \cdot \text{sgn}_{NS}(py) \quad (3)$$

w której $\text{sgn}_{NS}(py)$ przyjmuje odpowiednio wartości ± 1 w strefie magnesu i wynosi 0 poza nią, gdzie p oznacza liczbę



Rys. 1. Symboliczne przedstawienie usytuowania magnesu względem uzwojeń „d” i „q”

Fig. 1. Representation of magnet location with respect to ‘d’, ‘q’ windings

bę par biegunów. Wartość indukcji składowej promieniowej pola w strefie magnesu w stanie bezprądowym wynosi

$$B_{mo} = B_r \frac{d_m/(1+\chi)}{d_0 + d_m/(1+\chi)} \quad (4)$$

gdzie d_0 oznacza zastępczą grubość szczeliny powietrznej, a d_m grubość magnesu.

W celu określenia reakcji twornika przyjęto, że przepływy zastępczych uzwojeń w osiach „d” i „q” są monoharmoniczne i opisane zależnościami:

$$\Theta_d(y, t) = i_d(t) \frac{4}{\pi} \frac{w_s k_{s,p}}{2p} \cos(py) = \Theta_{d,max} \cos(py) \quad (5a)$$

$$\Theta_q(y, t) = i_q(t) \frac{4}{\pi} \frac{w_s k_{s,p}}{2p} \sin(py) = \Theta_{q,max} \sin(py) \quad (5b)$$

gdzie $w_s, k_{s,p}$ – odpowiednio liczba zwojów i współczynnik uzwojenia stojana. Składowa promieniowa indukcji magnetycznej w strefie magnesu, po uwzględnieniu reakcji twornika, wynosi

$$B_r(y, t) = B_{d,max} \cos(py) + B_{q,max} \sin(py) + B_{mo} \quad (6)$$

gdzie:

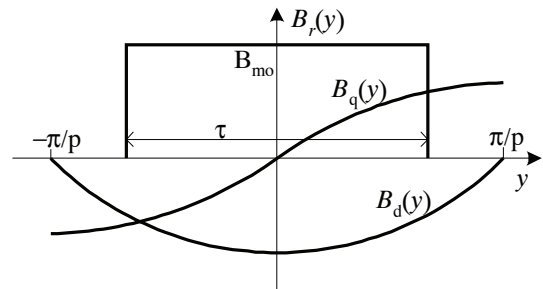
$$B_{d,max} = \frac{\mu_0}{d_0 + d_m/(1+\chi)} \Theta_{d,max},$$

$$B_{q,max} = \frac{\mu_0}{d_0 + d_m/(1+\chi)} \Theta_{q,max}.$$

Wyrażenie (5) zilustrowane na rysunku 2 może być podstawą do obliczania granicznych wartości prądów i_d oraz i_q , rozpatrywanych jako dwie niezależne zmienne.

Zakładając $i_q \equiv 0$, można z (6) wyznaczyć graniczną wartość prądu i_d , przy której składowa promieniowa indukcji osiąga wartość zero

$$0 = B_{d,max} + B_{mo} \quad (7)$$



Rys. 2. Rozkłady indukcji magnetycznej pochodzące od magnesu trwałego oraz od uzwojeń „d” i „q”

Fig. 2. Magnetic flux density distribution due to both a permanent magnet and ‘d’, ‘q’ windings

co daje

$$I_{d,\max} = -\frac{B_r}{\mu_0(1+\chi)} d_m \left(\frac{\pi}{4} \frac{2p}{w_s k_{s,p}} \right) \quad (8)$$

Dla prądów $i_q \neq 0$ należy wyznaczyć wartości prądów $i_{d,\text{gr}}$ oraz $i_{q,\text{gr}}$, przy których jest spełniony warunek

$$0 = B_{d,\max} \cos(py) + B_{q,\max} \sin(py) + B_{mo} \quad (9)$$

Wynika z niego, że jeżeli maksimum wypadkowego przepływu uzwojeń „d” i „q” leży w obrębie magnesu trwałego, czyli w przedziale $-\tau/2 \leq y \leq \tau/2$, to wartości prądów granicznych spełniają związek

$$(I_{d,\text{gr}})^2 + (I_{q,\text{gr}})^2 = (I_{d,\max})^2 \quad (10)$$

Gdy prąd i_q stanie się na tyle duży, że maksimum przepływu wypadkowego przesunie się poza podziałkę magnesu trwałego, czyli będzie w przedziale $\tau/2 \leq y \leq \pi/p$, wówczas wartości graniczne muszą spełniać warunek

$$0 = B_{d,\max} \cos(p \frac{\tau}{2}) - B_{q,\max} \sin(p \frac{\tau}{2}) + B_{mo} \quad (11)$$

który prowadzi do następującej zależności między wartościami prądów granicznych

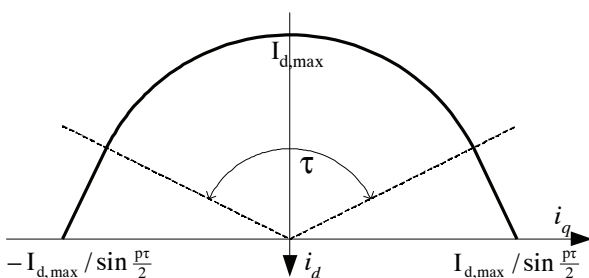
$$I_{d,\text{gr}} = \left(-I_{d,\max} + I_{q,\text{gr}} \sin(p \frac{\tau}{2}) \right) / \cos(p \frac{\tau}{2}) \quad (12)$$

Jest to związek liniowy, z którego wynika, że dla $i_d = 0$

$$I_{q,\max} = I_{d,\max} / \sin(p \frac{\tau}{2}) \quad (13)$$

Na rysunku 3 przedstawiono krzywą utworzoną z wartości granicznych dla prądów i_d oraz i_q , która wyznacza strefę dopuszczalnych wartości prądów i_d oraz i_q niepowodujących odmagnesowania żadnej części magnesu trwałego.

Analizy i obliczenia wartości prądów granicznych przedstawione powyżej mają jedynie szacunkowy charakter, lecz pozwoliły w prosty sposób zaprezentować ideę określenia strefy prądów dopuszczalnych dla powszechnie



Rys. 3. Krzywa określająca wartości prądów granicznych

Fig. 3. Curve of limiting currents

stosowanego modelu dwuosowego maszyn z magnesami trwałymi. Prądy i_d oraz i_q , stanowiące rozwiązania modelu dwuosowego dla dowolnych stanów pracy, mogą być przedstawione w postaci trajektorii na płaszczyźnie (i_d, i_q) , która powinna mieścić się w strefie prądów dopuszczalnych.

Obliczenia ilościowe wykonano dla generatora synchronicznego o danych: $P_N = 2,5$ kW, $U_N = 230$ V, $I_N = 7,67$ A, $\cos\phi_N = 0,8$, $n_N = 1500$ obr./min, $p = 3$, $f_N = 75$ Hz. Generator ten jest wzbudzany magnesami trwałymi Ne-Fe-Bo o liniowej charakterystyce, dla których $B_r = 1,06$ T, $H_c = 720$ kA/m, a wynikająca z nich podatność magnetyczna $\chi = 0,172^{1)}$. Magnesy te, o grubości $d_m = 11$ mm, umieszczone są na powierzchni wirnika o promieniu $r_w = 520$ mm; grubość szczeliny powietrznej nad magnesami wynosi $d_0 = 3$ mm. Magnesy zajmują 0,733 podziałki biegunowej. Liczba zwojów uzwojenia stojana generatora wynosi $w = 90$, a współczynnik uzwojenia $k_s = 0,86$. Według obliczeń projektowych składowa promieniowa indukcji magnetycznej w magnesie wynosi przy biegu jałowym $B_{mo} = 0,79$ T. Odpowiada temu polaryzacja magnetyczna $J = 1,02$ T, oraz $H_m = -183$ kA/m.

Dane te są wystarczające do określenia strefy dopuszczalnych wartości prądów. Wartość prądu granicznego w osi „d” obliczonego według wzoru (8) wynosi $I_{d,\max} = 970$ A, czyli około $75 \cdot I_N$, a wartość prądu granicznego w osi „q” – według (12) – wynosi $I_{q,\max} = 1300$ A, czyli około $100 \cdot I_N$. Są to wartości bardzo duże, gdyż generator był zaprojektowany jako obiekt badań laboratoryjnych o zwiększonej masie magnesów trwałych.

Jednowymiarowa analiza rozkładu składowej promieniowej indukcji w magnesie trwałym może nie zapewniać wystarczającej dokładności. W pracy przedstawiono także zarys metody obliczeń rozkładu pola magnetycznego maszyny metodą całek brzegowych, która może istotnie wzbogacić zaprezentowany tu problem

3. POLE MAGNETYCZNE

OBLICZONE METODĄ CAŁEK BRZEGOWYCH

Tradycyjnie, obliczenia projektowe maszyn elektrycznych nie opierają się na modelach polowych. Dotyczy to także obliczeń magnetycznych, dla których obowiązuje tzw. model obwodowy zakładający jednowymiarowe (częściowo promieniowe, częściowo obwodowe) pole magnetyczne. Obliczenia odzwierciedlające trójwymiarowość struktury pola magnetycznego nie są na ogół włączane do programów projektujących maszyny elektryczne. Podejmowane próby dokooptowania profesjonalnych programów metody elementów skończonych do klasycznych programów obliczeniowych maszyn elektrycznych nie są zbyt zachęcające. Wynika to zarówno ze stosunkowo skomplikowanej geo-

¹⁾ Przy temperaturze pracy magnesu w maszynie elektrycznej, liniowość charakterystyki magniesowania magnesów Ne-Fe-Bo nie dotyczy całego przedziału $(0, H_c)$. Wartość wyznaczona dla całego przedziału jest nieco większa, niż rzeczywista wartość podatności magnetycznej charakteryzująca magnes w stanie bezprądowym.

metrii wewnętrznej maszyny, jak i z faktu, że metoda elementów skończonych jest ze swojej natury przystosowana do struktur bez części ruchomych. Metoda całek brzegowych [1] wydaje się łatwiej adaptowalna do programów obliczeniowych maszyn elektrycznych [2].

W podejściu całkowo-brzegowym przyjmuje się, że źródłem pola magnetycznego magnesu trwałego jest fikcyjna wielkość fizyczna na powierzchniach biegunowych, **gęstość powierzchniowa ładunku magnetycznego**, zdefiniowana jako różnica polaryzacji magnetycznej po obydwu stronach tej powierzchni, $\sigma_m = J_1 - J_2$. W przypadku magnesu przylegającego z jednej strony do jarzma, a z drugiej otwartego na szczelinę powietrzną, mamy dwie takie gęstości źródłowe

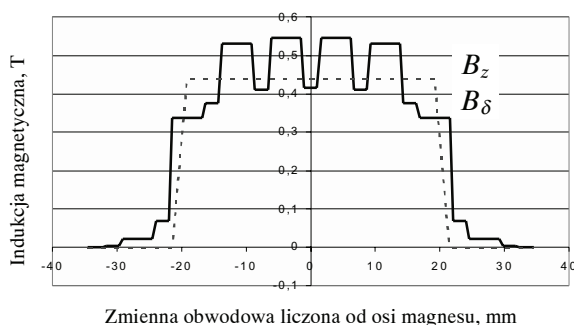
$$\sigma_N = -J; \quad \sigma_S = J - B_j (1 - 1/\mu_{rj}) \quad (14)$$

gdzie B_j i μ_{rj} oznaczają odpowiednio indukcję magnetyczną i przenikalność magnetyczną względną w jarzmie tuż przy biegunie magnesu. Tak określone wielkości powierzchniowe, i również przepływ uzwojenia twornika, interpretuje się jako źródła pierwotne.

Wpływ rdzenia ferromagnetycznego twornika na pole magnetyczne szczeliny i magnesu wyraża się przez zdefiniowanie tzw. źródeł wtórnych. Są to fikcyjne gęstości powierzchniowe ładunku magnetycznego wytworzone przez źródła pierwotne na odpowiednich powierzchniach rdzenia: na główkach zębów i dnach żłobków. Indukcję magnetyczną w wybranych punktach szczeliny i magnesu oblicza się przez całkowanie ładunków magnetycznych po wszystkich powierzchniach, na których one występują. W przypadku wąskich szczelin użyteczność praktyczna metod całkowo-brzegowych jest uwarunkowana analitycznymi metodami całkowania.

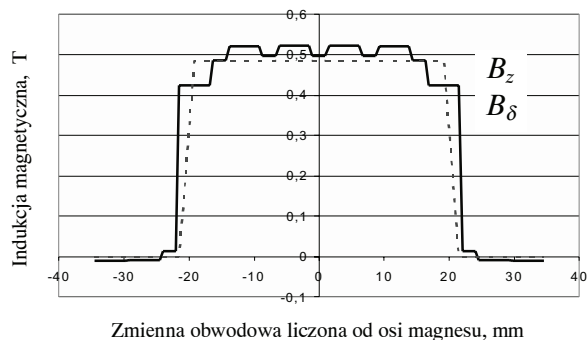
Poniżej pokazano wyniki obliczeń pola magnetycznego wykonane dla tej samej prądnicy z magnesami trwałymi, która w pierwszej części niniejszego artykułu posłużyła do ilustracji pojęcia prądów granicznych. Zaprezentowane rozkłady dotyczą prądnicy w stanie biegu jałowego.

Pokazano rozkład składowej promieniowej indukcji magnetycznej B_z i jej wartość średnią B_δ liczoną dla obszaru magnesu. Porównując rozkłady z rysunków 4 i 5, można



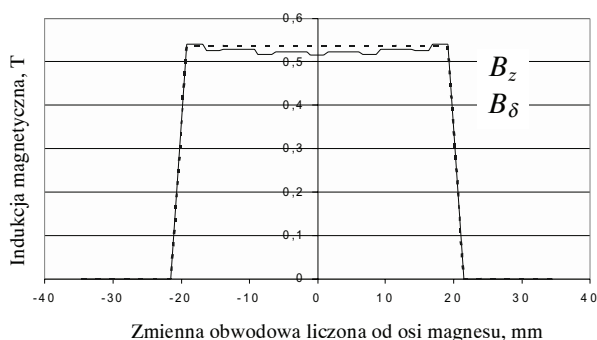
Rys. 4. Rozkład indukcji magnetycznej na poziomie 5/6 szerokości szczeliny

Fig. 4. Distribution of the magnetic flux density at level of 5/6 of the air-gap thickness



Rys. 5. Rozkład indukcji magnetycznej na poziomie 1/6 szerokości szczeliny

Fig. 5. Distribution of the magnetic flux density at level of 1/6 of the air-gap thickness



Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej w magnecie na poziomie 0,5 mm od powierzchni biegunowej przy szczelinie powietrznej

Fig. 6. Distribution of the magnetic flux density within the magnet at level of 0,5 mm the air-gap surface apart

stwierdzić, że metoda całkowo-brzegowa umożliwia analizowanie indukcji magnetycznej w szczelinie, zarówno co do wartości średniej, jak i jej rozkładu obwodowego. Obliczony rozkład składowej promieniowej indukcji w magnecie (rys. 6), wykazuje jeszcze śladowy wpływ uzębienia twornika. Powiększone wartości indukcji na skraju magnesów, to skutek strumienia rozproszenia miedzymagnesowego, który, stosownie do założeń metody, jest związany z narożami magnesu.

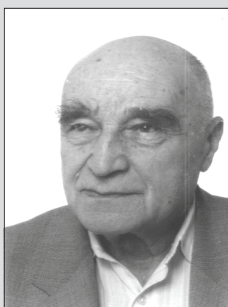
Warto przytoczyć tu jeszcze następujące dane: Dla poziomu 5/6 szczeliny, tj. tuż przy zębach twornika (rys. 4), obliczona wartość B_δ wynosi 0,436 T, wobec 0,438 T z obliczenia projektowego, a odpowiednie wartości strumienia magnetycznego w szczelinie to 5,457 mWb i 5,477 mWb.

Zaprezentowane tu wyniki obliczenia pola magnetycznego w maszynie synchronicznej z magnesami trwałymi są na tyle interesujące, że można wnioskować kontynuowanie prac w kierunku włączenia metod całkowo-polowych do programów obliczeniowych tego typu maszyn. Powyższe dotyczy również problemu prądów granicznych, który w oparciu o metody całkowo-brzegowe może być jeszcze pogłębiony i udokładniony.

Literatura

- [1] Pawluk K.: *Algorithms based on integrals of Lipschitz-Hankel type for modelling permanent magnet field*. Bull. of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 49, No. 4, 2001, 567–579
- [2] Pawluk K., Życki Z.: *Permanent magnet within a ferromagnetic structure – boundary-integral model and its experimental verification*. Archives of Electrical Engineering, vol. LV, No. 3–4, 2006, 273–288
- [3] Węgiel T.: *Modelowanie maszyn synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi*. Pol. Śląska, 1997 (praca doktorska)
- [4] Sobczyk T.J., Węgiel T.: *Investigation of the steady-state performance of a brushless DC motor with permanent magnets*. Proc. of ICEM'98, Vol. 2, 1196–1201

Wpłynęło: 26.09.2006

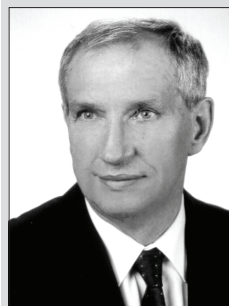


Krystyn PAWLUK

Urodził się 26 września 1926 roku w Mielnicy Podolskiej, w ówczesnym województwie tarnopolskim. Studiował na Wydziale Elektromechanicznym Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, dyplom magistra inżyniera elektryka otrzymał w listopadzie 1951 roku, po czym został zaangażowany w charakterze nauczyciela akademickiego w Katedrze Maszyn i Pomiarów Elektrycznych AGH, gdzie pracował do roku 1963. W 1959 uzyskał tamże stopień naukowy doktora nauk technicznych. W roku 1963 zaangażował się do pracy w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. W tych latach prowadził gościnnie wykłady specjalistyczne na Wydziałach Elektrycznych Politechniki Warszawskiej i Poznańskiej. W roku 1978 przeniósł się do Zakładu Badań Podstawowych Elektrotechniki PAN przy Instytucie Elektrotechniki, a po likwidacji tego zakładu w roku 2004 powrócił do Zakładu Maszyn Elektrycznych. Stopień naukowy doktora habilitowanego nadała dr. Pawlukowi Rada Naukowa Instytutu Elektrotechniki w roku 1975 za rozprawę pt. *Metody bezpośrednie obliczania pola magnetycznego w maszynach elektrycznych*, a tytuł naukowy profesora otrzymał w roku 1979. W latach 1980–83 pracował jako nauczyciel akademicki w Maroku. Jest współautorem trzech monografii naukowych: *Rozruch i stany asynchroniczne silników synchronicznych*, (WNT, 1968, tłumaczenie rosyjskie Energia, 1971), *Silniki elektryczne liniowe* (WNT, 1974, tłumaczenie węgierskie Műszaki Könyvkiadó, 1977), *Analiza i synteza pól elektromagnetycznych* (Ossolineum, 1990, edyt. J. Turowski) i *Computational magnetism* (Chapman & Hall, 1992, Edyt. J. Sylkalski). Prof. Pawluk jest także autorem wielu publikacji naukowych w czasopismach krajowych i zagranicznych (w tym w Biuletynie PAN, w IEEE Transactions i w brytyj-

skim Compel), poświęconych całkowo-brzegowym technikom obliczania pola magnetycznego ze szczególnym uwzględnieniem układów z magnesami trwałymi. Jest wieloletnim członkiem Komitetu Elektrotechniki PAN i członkiem SEP, gdzie pełni funkcję przewodniczącego Polskiego Komitetu Terminologii Elektryki. Jest aktywnie zaangażowany w normalizacji, zarówno krajowej jak i międzynarodowej. Jest przewodniczącym Komitetu Technicznego nr 8 w PKN (Terminologia, oznaczenia i jednostki), jest stałym członkiem Grup Roboczych IEC redagujących normy terminologiczne i normy dotyczące symboli wielkości fizycznych i jednostek w elektrotechnice. Za aktywną działalność w IEC prof. Pawluk został odznaczony wyróżnieniem stulecia IEC Award 1906.

e-mail: pawluk@iel.waw.pl



Tadeusz J. SOBCZYK

Urodził się w 1944 roku, ukończył Wydział Elektrotechniki Górniczej i Hutniczej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (1967) i na tym Wydziale uzyskał stopień naukowy doktora n.t. (1974) oraz doktora habilitowanego nt. (1977) w zakresie elektrotechniki. Tytuł naukowy profesora n.t. otrzymał w roku 1991. W roku 2000 otrzymał tytuł doktora Honoris Causa Rosyjskiej Akademii Nauk. Od 1991 jest członkiem Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk. W latach 1967–1989 pracował na macierzystym Wydziale, przemianowanym na Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki. Od 1989 roku jest zatrudniony na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej, od roku 1996 na stanowisku profesora zwyczajnego. W latach 1993–1999 był Dziekanem tego Wydziału, a obecnie pełni funkcję dyrektora Instytutu Elektromechanicznych Przemian Energii oraz kieruje Katedrą Maszyn Elektrycznych. Od roku 2000 jest także zatrudniony w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie-Międzyzlesiu, aktualnie w Zakładzie Maszyn Elektrycznych. W działalności naukowo-badawczej koncentruje się na problemach maszyn elektrycznych i układów z nimi współpracujących, a także na problemach przetwarzania i przemian energii elektrycznej przez układy elektromechaniczne oraz układy energoelektroniczne. Jest autorem książki *Metodyczne aspekty matematycznego modelowania maszyn indukcyjnych* (WNT, 2004) oraz ponad 170 prac w międzynarodowych i krajowych czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych.

e-mail: pesobczy@cyf-kr.edu.pl