

**Mirosław Dąbrowski, Andrzej Rudeński**  
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

## OPROGRAMOWANIE DO PROJEKTOWANIA SILNIKÓW INDUKCYJNYCH WYSOKOOBROTOWYCH

### SOFTWARE FOR HIGH-SPEED INDUCTION MOTORS DESIGN

**Abstract:** In the introductory part of the paper a application review and achievements outline of high speed motors from the beginning of applying, i.e. from 40 years of XX century are presented. Then the attention was directed on issues concerning structure of high speed motors and additional phenomena connected with supplying from high frequency voltage source, i.e. mechanical stresses; skin effect; power losses and their increasing caused by non-sinusoidal shape of supplying voltage. The extends and supplements of calculation algorithm and computation program concerned: mechanical power losses calculations (friction and windage losses), calculations of winding resistances and reactances by increased frequency and air gap thickness are presented. Moreover are presented the general technological requirements connected with start of motors production in examined rated power and rotation speed range. The software presented in the paper enabled high speed motors calculations of rated power up to 100 kW. As an example the calculations are performed for five two-pole motors of synchronous rotating speed 18 000 rpm, i.e. of supply voltage frequency 300 Hz.

#### 1. Wstęp

Silniki wysokoobrotowe nie były w Polsce produkowane w warunkach przemysłowych. Pojedyncze ich egzemplarze, przystosowane do określonych celów, były wykonywane poza przemysłem maszyn elektrycznych, np. przez fabryki produkujące łożyska toczne. Silniki znajdowały zastosowanie do napędu wysokoobrotowych szlifierek obwiedniowych na liniach produkcyjnych bieżni pierścieni łożysk. Na potrzeby innych napędów, np. ultrawirówek, silniki były importowane. Rozwijające się szeroko technologie wysokoobrotowe skłaniają do przedprodukcyjnego przygotowania do wdrożenia własnej produkcji silników wysokoobrotowych w założonym zakresie mocy, prędkości obrotowych i zakresie jej regulacji.

#### 2. Zastosowanie silników wysokoobrotowych

Maszyny wysokoobrotowe znajdują zastosowanie w urządzeniach, w których wymagana jest duża gęstość mocy, tj.: do generowania energii elektrycznej w samolotach, statkach i pojazdach lądowych; przewoźnych elektrowniach; napędach elektrycznych urządzeń przenośnych albo zasilanych z ogniwo elektrochemicznych.

Silniki o dużej prędkości obrotowej są stosowane do napędu:

– obrabiarek skrawających bardzo twarde materiały, prędkości obrotowe do 150000 1/min oraz moce w przedziale 10 – 4000 W;

– szlifierek do łożysk tocznych, prędkości obrotowe do 200 000 1/min oraz moce do 2 kW;

– ultrawirówek do separacji zawiesin, używane w laboratoriach: biologicznych, medycznych, chemicznych i fizycznych; w przemyśle: farmaceutycznym, kosmetycznym, spożywczym, papierniczym, nuklearnym, moce do 200 kW;

– kompresorów oraz pomp odśrodkowych, np. pomp cieplnych;

– pomp próżniowych w technologiach dekompresyjnych i w przemyśle stosującym technologie próżniowe;

Światowy postęp w stosowaniu technologii wysokoobrotowych doprowadził do wytwarzania silników elektrycznych o maksymalnej prędkości obrotowej do 400 000 1/min. Duża moc jednostkowa silnika jest w wymienionych zastosowaniach również istotna, ale nie decydująca.

#### 3. Zarys osiągnięć

Podstawowym celem budowy silników indukcyjnych zasilanych ze źródła o częstotliwości większej niż 50 lub 60 Hz było osiągnięcie wyższego stosunku: moc/masa. Początkowo były to silniki stosunkowo małej mocy zastępujące turbiny powietrzne w napędzie ultrawirówek.

W latach 1939-1955 prace nad rozwojem szybkoobrotowych maszyn były utajnione w związku z ich zastosowaniem przy separacji izotopu

uranu  $U^{235}$ . Szczególnie duży postęp w tym zakresie osiągnęli Niemcy w latach 1940-1944, którzy uzyskiwali izotop uranu z gazowej fazy  $UF_6$ . Po drugiej wojnie światowej można było się dowiedzieć, że budowane były w tym czasie silniki indukcyjne trójfazowe o mocy do 200 kW i prędkości obrotowej 20000 – 30000 1/min. Przed rokiem 1950 stosowano w tych silnikach łożyska toczne lub ślizgowe, a czas pracy silnika nie przekraczał ok. 50 godzin. Dopiero po zastosowaniu ciśnieniowych gazowych łożysk, a po roku 1960 – łożysk elektromagnetycznych, trwałość silników uległa dużemu zwiększeniu. Seryjnie produkowane silniki wysokoobrotowe pierwsza wprowadziła na rynek firma AEG; były to silniki o mocy 5 kW i prędkości obrotowej 60000 1/min. Na początku lat 50-tych XX wieku wykonano w Technische Hochschule Stuttgart pracę badawczo-eksperymentalną na temat szybkoobrotowych silników indukcyjnych trójfazowych [3]. W dwóch modelach dwubiegunowych silników zastosowano wirniki masywne ze stali chromowo-niklowej (takiej, jak w wirnikach turbogeneratorów) o średnicy 48 mm. Klatkę wirnika odlano z aluminium o małej zawartości krzemu. Jeden z silników miał łożyska ślizgowe, drugi – toczne. Doświadczenia przeprowadzono przy prędkościach obrotowych do 70000 1/min, zwracając przede wszystkim uwagę na pracę łożysk i stabilność wyważenia. Wirnik masywny, a nie składany z wykrojów, wybrano ze względu na stabilność wyważenia podczas długotrwałej pracy. Z wcześniejszych doświadczeń wynikała bowiem utrata wyważenia podczas pracy silników o wirniku pakietowanym z wykrojów cienkiej blachy.

W 1994 r. Gilon doniósł o wykonaniu silnika indukcyjnego o mocy 2 MW i prędkości obrotowej 20000 1/min, a także silnika do transportu gazu naturalnego o mocy 5,7 MW i prędkości obrotowej 10000 1/min [2]. Obecnie kilka firm specjalizuje się w produkcji omawianych silników. Duże doświadczenie w projektowaniu i produkcji indukcyjnych silników wysokoobrotowych ma Finlandia. Prace badawcze nad tymi silnikami rozpoczęto w tym kraju już ok. dwadzieścia lat temu, a obecnie istnieje tam wyspecjalizowane przedsiębiorstwo High Speed Tech Ltd, powiązane personalnie z pracownikami uniwersytetów technologicznych w Helsinkach oraz w Lapperancie. W szerokim zakresie silniki wysokoobrotowe oferuje

szwajcarska firma E+A (Elektromaschinen und Antriebe). Są to silniki w wykonaniu do wbudowania; dwu-, cztero-, sześć- oraz ośmibiegunowe z klatką aluminiową lub miedzianą.

#### 4. Algorytm obliczeń projektowych

Strukturę obliczeń silników wysokoobrotowych przyjęto wg algorytmu stosowanego w Instytucie Elektrotechniki przy projektowaniu silników indukcyjnych ogólnego zastosowania. Algorytm ten został jednak uzupełniony m. in.:

- rozszerzonymi obliczeniami strat mocy;
- obliczeniami rezystancji oraz reaktancji uzwojenia stojana przy zwiększonych częstotliwościach;
- obliczeniami grubości szczeliny roboczej;
- zmienionymi obliczeniami strat mechanicznych.

Uwzględnienie wpływu wypierania prądu na zwiększenie rezystancji oraz zmniejszenie reaktancji uzwojenia stojana jest w silnikach wysokoobrotowych wyjątkowo złożone. Mają na to zjawisko wpływ cztery okoliczności:

- wypieranie prądu pod wpływem pola własnego pojedynczego przewodu – dotyczy całej długości wszystkich zwojów;
- wypieranie pod wpływem prądów zewnętrznych – tzw. efekt zbliżenia – dotyczy zarówno żłobkowej jak i czołowej części cewki;
- wypieranie wynikające z pola poprzecznego rozproszenia w żłobku – dotyczy żłobkowej części cewki;
- nierównomierność rozkładu prądu między druty równoległe – zależne od ich liczby i wzajemnego ułożenia względem ścianek żłobka.

Najpełniej może być uwzględniona okoliczność a). Należy przy tym rozróżnić słabe lub silne wypieranie w zależności od częstotliwości. Ponieważ dokładne rozwiązanie tego zagadnienia wiąże się z zastosowaniem funkcji Bessela, to zwykle poprzestaje się na rozwiązaniu przybliżonym stosując ich wielomianową aproksymację.

Przy słabym wypieraniu stosunek rezystancji przy uwzględnieniu wypierania  $R_{\infty}$  do rezystancji przy prądzie stałym  $R_0$  wyraża się zależnością:

$$\frac{R_{\infty}}{R_0} \cong 1 + \frac{1}{3} x_1^4; \quad x_1 = \frac{r_0}{2g} < 1 \quad (1)$$

przy czym:  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}}$  – głębokość wnikania

strumienia;  $\omega = 2\pi f$  – pulsacja prądu;  $\gamma$  – przewodność materiału przewodu;  $\mu$  – przenikalność magnetyczna materiału przewodu (przyjmuje się  $\mu = \mu_0$ ).

Stosunek reaktancji z uwzględnieniem wypierania do reaktancji przy równomiernym rozkładzie prądu wyraża się zależnością:

$$\frac{L_i}{L_{i0}} \cong x_1^2 \left(1 - \frac{1}{6} x_1^4\right) \quad (2)$$

Natomiast przy silnym wypieraniu, tj. dla  $x_1 > 1$  wzory (1) oraz (2) mają postać:

$$\frac{R_{\sim}}{R_0} \cong x_1 + \frac{1}{4} + \frac{3}{64 x_1} \quad (3)$$

$$\frac{L_i}{L_{i0}} \cong \frac{1}{x_1} - \frac{3}{64 x_1^3} \quad (4)$$

Uwzględnienie okoliczności b) oraz c) może być w przybliżeniu ujęte, jak w uzwojeniach transformatorów. W tym celu oblicza się współczynnik zwiększenia rezystancji  $k_r$ :

$$R_{\sim} = k_r R_0$$

$$k_r = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{15,25} \xi^4 \quad (5)$$

przy czym:  $m$  – liczba rzędów przewodników w żłobku na wysokości. Tę liczbę przy wspanych uzwojeniach trzeba oszacować. Występująca we wzorze (5) zredukowana wysokość wyraża się wzorem:

$$\xi = \alpha \cdot h ; \quad \alpha = \sqrt{\frac{n b \pi f \mu_0 \gamma}{a_z}} \quad (6)$$

przy czym:  $h$  – wysokość przewodu równa jego średnicy;  $n$  – liczba przewodów na szerokości żłobka – trzeba ją oszacować;  $b$  – szerokość przewodu równa jego średnicy;  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni;  $\gamma$  – konduktywność przewodu w stanie nagrzany;  $a_z$  – średnia szerokość żłobka.

Szczelina między stojanem a wirnikiem jest w programie obliczana na podstawie zależności (7) podanej przez Sumeca.

$$\delta = c \sqrt[3]{\frac{d_s^2 l_s f}{2 p 50}} \quad (7)$$

Obliczona z wzoru (7) wartość, z reguły większa niż wynikająca ze względów mechanicznych, jest w programie zaokrąglana w górę do najbliższej podzielnej przez 0,05 mm. W programie można także grubość tej szczeliny zadeklarować.

Straty tarcia wirnika o powietrze oblicza się wg wzoru:

$$P_{mf} = c \omega^3 d_r^5 \left(1 + 5 \frac{l_r}{d_r}\right) 10^3 \quad (8)$$

przy czym:  $\omega = \frac{2\pi n}{60}$  – prędkość kątowna wir-

nika;  $c$  – stała zależna od gładkości powierzchni wirnika, przyjęto  $c = 1,1 \cdot 10^{-6}$ ;  $l_r$ ,  $d_r$  – długość oraz średnica wirnika w m;  $n$  – prędkość obrotowa wirnika.

Straty w łożyskach tocznych oblicza się wg wzoru:

$$P_{mb} = 0,0025 \cdot F \cdot \frac{736 v_{tb}}{75} \quad (9)$$

przy czym:  $F$  – obciążenie łożyska (siła pro-

mieniowa);  $v_{tb} = \frac{\pi d_{av} n}{60}$  – prędkość obwo-

dowa na średnicy wieńca mocującego elementy toczne;  $d_{av}$  – średnica wieńca mocującego elementy toczne w m.

Straty wentylacyjne w silniku zależą od sposobu jego chłodzenia. Przy prędkości obrotowej do 30 000 1/min można oszacować je jako 50% strat tarcia wirnika o czynnik chłodzący.

W programie istnieje także możliwość zadeklarowania wartości strat mechanicznych.

## 5. Program obliczeń

Na podstawie uzupełnionego algorytmu opracowano program obliczeń, którego kod jest napisany przy użyciu języka programowania Object Pascal w środowisku systemu Delphi 5 w wersji Professional firmy Inprise Corp. Program jest przewidziany do pracy pod kontrolą standartowych systemów operacyjnych Windows 95, 98, 2000, Me oraz XP.

Program umożliwia wykonanie obliczeń przy:

- pełnym zbiorze danych;
- zawężonym zbiorze danych. Wówczas

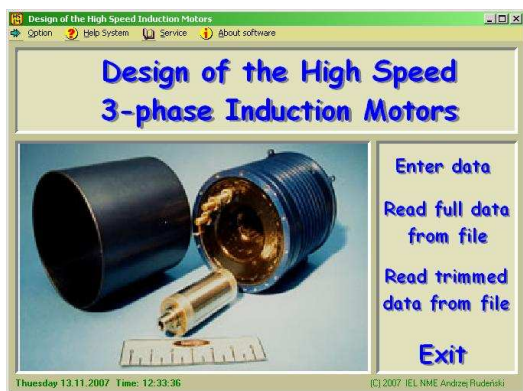
wprowadza się podstawowe dane znamionowe i konstrukcyjne silnika oraz 13 zmiennych niezależnych do syntezy silnika.

Druka z wymienionych opcji pozwala włączyć do programu także procedurę optymalizacyjną. Do bazy danych programu włączono w formie tabelarycznej charakterystyki magnesowania oraz charakterystyki stratności specjalnych blach magnetycznych o grubości 0,2 mm wg danych japońskiej firmy Nippon Steel Corporation. Na podstawie analizy danych katalogowych blach wyznaczono wykładniki potęgi w zależnościach ich stratności od częstotliwości.

W programie kolejno oblicza się:

- wymiary obwodu magnetycznego stojana i wirnika;
- rezystancje i reaktancje rozproszenia uzwojenia stojana oraz klatki wirnika;
- wielkości charakteryzujące pracę przy obciążeniu mocą znamionową  $P_N$  oraz przy biegu jałowym;
- wielkości charakteryzujące pracę przy obciążeniu:  $0,25 P_N$ ;  $0,5 P_N$ ;  $0,75 P_N$  oraz  $1,25 P_N$ ;
- moment i prąd przy zahamowanym wirniku;
- moment i poślizg krytyczny;
- koszt materiałów czynnych oraz energii podczas eksploatacji silnika w zadanym czasie.

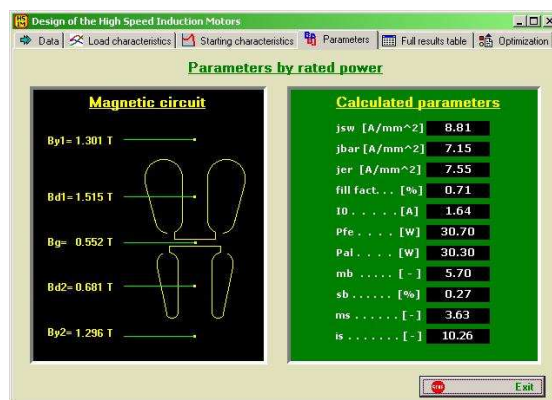
Wyniki obliczeń są przedstawione w postaci tabelarycznej w kolejnych oknach programu. Na rys. 1 pokazano okno tytułowe programu, na rys. 2 – okno z wynikami obliczeń charakterystyk obciążenia, na rys. 3 – okno z wynikami obliczeń parametrów silnika, a na rys. 4 – pełne wyniki obliczeń. Ponadto program umożliwia wizualizację oraz wydruk charakterystyk obciążenia (rys. 5) oraz charakterystyk rozruchowych silnika.



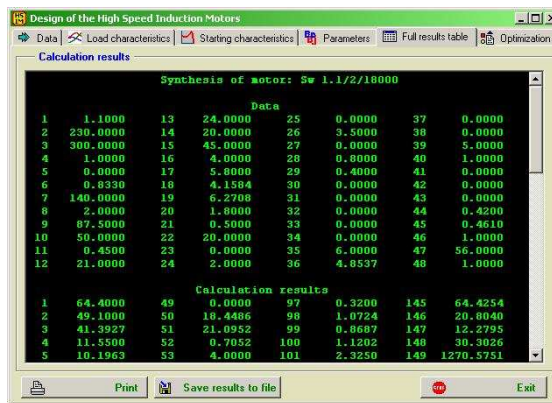
Rys. 1. Widok formularza tytułowego programu



Rys. 2. Okno programu z wynikami obliczeń charakterystyk obciążenia



Rys. 3. Okno programu z wynikami obliczeń parametrów silnika



Rys. 4. Okno programu z pełnymi wynikami obliczeń

Struktury programowe służące do rysowania na ekranie i drukowania wykresów w postaci kilku krzywych na jednym rysunku, są tzw. obiektami. Po wprowadzeniu do obiektu tablic zawierających wyniki obliczeń, dokonuje on ich analizy w celu odpowiedniego doboru skal i wykreśla na ekranie lub drukuje przebiegi charakterystyk. Obiekt jest tworzony w pamięci komputera dopiero po jego wywołaniu, a po

wykonaniu zadania jest usuwany, nie zajmując miejsca w pamięci operacyjnej.



Rys. 5. Przykładowe charakterystyki obciążenia silnika

## 6. Wyniki obliczeń

W tabelicy 1 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń wybranych parametrów pięciu silników o mocy od 0,2 do 3,2 kW przy takiej samej prędkości obrotowej 18000 1/min.

Tablica 1. Dane znamionowe, główne wymiary oraz obliczone parametry wybranych silników wysokoobrotowych

Silnik Wielkość	SW 0,2/18	SW 0,4/18	SW 1,0/18	SW 2,0/18	SW 3,2/18
$P_N$ [W]	180	400	1000	2000	3200
$U_{fN}$ [V]	230	230	230	230	230
$I_{fN}$ [A]	1,07	1,31	2,23	4,71	6,56
$f$ [Hz]	300	300	300	300	300
$D$ [mm]	40	45	50	55	60
$D_{es}$ [mm]	70	80	87,5	95	105
$D_{sh}$ [mm]	18	19	21	25	28
$l$ [mm]	40	50	40	55	65
$z_f$ [-]	192	152	152	100	80
$d_w$ [mm]	0,4	0,45	0,42	0,42	0,50
$a_p \cdot a_g$ [-]	1	1	2	4	4
$\eta_N$ [%]	74,0	81,6	86,2	87,2	88,9
$\cos \varphi_N$ [-]	0,367	0,545	0,753	0,707	0,796
$M_N$ [Nm]	0,108	0,216	0,540	1,08	1,72
$s_N$ [-]	0,011	0,016	0,018	0,015	0,014
$m_s$ [-]	13,86	9,98	3,63	3,39	2,60
$i_s$ [-]	10,91	12,54	10,18	10,11	10,53
$m_b$ [-]	15,90	11,33	5,74	5,98	5,37
$s_b$ [-]	0,48	0,49	0,27	0,22	0,17

## 7. Możliwości realizacyjne

Podjęcie produkcji silników wysokoobrotowych jest możliwe tylko w odpowiednio technologicznie wyposażonym zakładzie produkcyjnym. Do podstawowych wymagań technologicznych należą:

- możliwości obróbki mechanicznej zwiększonej dokładności;
- możliwości wykrawania cienkich blach magnetycznych o grubości 0,15 ÷ 0,25 mm;
- możliwość dokładnego wyważania dynamicznego;
- sprawdzenie łańcucha pasowań i dobór odchylek wymiarowych zapewniające równomierność szczeliny powietrznej.

Ponadto należy zapewnić precyzyjny montaż łożysk tocznych o zwiększonej klasie dokładności albo stosowanie ułożyskowania elektromagnetycznego aktywnego.

## Literatura

- [1]. Dąbrowski M.: *Induction Motors for High-Speed Technology*. Proceedings of the Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems, Szczecin, Międzyzdroje December 15-17, 1996.
- [2]. Gilon D.C.: *Cooling solutions for high-speed induction motors*. Int. Conf. on Electrical Machines, 1994 Paris, Vol. 3, pp. 516-521.
- [3]. Moser H.: *Schnelllaufende Drehstromasynchronmotoren*. Technische Rundschau, Schweiz, 1958, Nr.: 1; 44; 47; 48.

## Autorzy

Prof. dr hab. inż. Mirosław Dąbrowski, Instytut Elektrotechniki, Zakład Maszyn Elektrycznych. 04-703 Warszawa, ul Pożaryskiego 28.

e-mail: miroslaw.dabrowski@put.poznan.pl

Dr inż. Andrzej Rudeński, Instytut Elektrotechniki, Zakład Maszyn Elektrycznych. 04-703 Warszawa, ul Pożaryskiego 28.

e-mail: a.rudenski@iel.waw.pl