

**Maria Graczyk**  
**BOBRME Komel, Katowice**

## **SILNIKI INDUKCYJNE KLATKOWE Z WIRNIKIEM ZALEWANYM MIEDZIĄ**

### **INDUCTION MOTORS WITH DIE-CASTING COOPER ROTORS**

**Abstract:** One of the ways to improve the efficiency of an induction motor without increasing of frame size is to change the rotor cage material from aluminum to copper. Thanks to such an operation, the rotor cage resistance is decreased by about 40% and rotor's resistance losses are also significantly decreased. In consequence the efficiency of induction motor is higher by 1 to a few percent (depending on motor size and power). The copper rotor cages have been manufactured for many years using prefabricated copper bars. Such a construction of rotor cage is relatively expensive in manufacturing, and this is the main reason why this construction is usually used only in high power induction motors. Low and middle power induction motors have, in more cases, the rotor cage manufactured as an aluminum casting because of simple and inexpensive manufacturing technology. Since a few years in foreign technical papers and books an increased interest in casting of rotor cages with copper can be observed. In this paper the advantages and benefits of using rotor cages with copper casting are presented and discussed on an example of 4 pole induction motor with frame size 132.

#### **1. Wstęp**

Ponad 60% wytwarzanej energii elektrycznej zużywane jest przez silniki indukcyjne, a szczególnie silniki klatkowe. Stąd duże znaczenie ich sprawności. Powszechnie w silnikach indukcyjnych klatkowych od wielu lat stosowana jest niezmiennie ta sama technologia, konstrukcja oraz materiały. Ogranicza to praktycznie możliwość zwiększania sprawności (bez nadmiernego zwiększania gabarytów). Jednym ze sposobów budowy silników energooszczędnych bez powiększania gabarytów, jest zastosowanie miedzianej klatki wirnika. Zastąpienie aluminium miedzią pozwala zmniejszyć oporność wirnika, a więc i jego straty o ok. 40%, co przekłada się na np. na wzrost współczynnika sprawności (zależnie od mocy silnika) o około 1% do kilku %. Stosowanie klatki miedzianej prętowanej nie jest opłacalne w silnikach o mocy poniżej kilkuset kW. W ostatnich latach (na przełomie minionego i obecnego stulecia) opracowano technologię zalewania pakietów wirników miedzią, uzyskując potrzebną czystość i jednolitość odlewów. Wysoka temperatura topnienia miedzi ok. 1100° C (temperatura topnienia aluminium – ok. 700° C), wymaga użycia specjalnych kokili o odpowiednio dużej trwałości (np. na bazie stopu niklu, wolframu i molibdenu. W literaturze podaje się np. liczbę 20 000 wirników zalanych z jednej kokili. Dla zwiększenia żywotności kokili wprowadzono jej wstępne podgrzewanie

celem zmniejszenia szoku termicznego działającego na kokilę w momencie wtrysku roztopionej miedzi.

Dopracowanie technologii odlewania umożliwia produkcję również małych energooszczędnych silników indukcyjnych z klatką wirnika odlewana z miedzi. Niestety jednak z uwagi, iż niewiele firm oferuje technologie zalewania wirników miedzią, silniki z takimi wirnikami są znacząco droższe, od silników z klatką aluminiową. Dlatego należy sprawdzić możliwość tzw. grawitacyjnego zalewania wirników. W BOBRME KOMEL podjęto w 2005 roku prace projektowe dotyczące takich silników. Do opracowania przyjęto 4 - biegunowy silnik wielkości mechanicznej 132.

#### **2. Zakres prowadzonych prac**

W ramach opracowania wykonano wielowariantowe obliczenia obwodów elektromagnetycznych silników z klatką miedzianą, o wzniosie osi wału  $H = 132$  mm, dla  $2p = 4$  o mocy  $P = 7,5$  kW.

Optymalizację przeprowadzono pod kątem:

- 1) zwiększenia sprawności
- 2) zmniejszenia gabarytów

Przy rozwiązywaniu obwodu elektromagnetycznego uwzględniono możliwość wykorzystania rozkrojów blach istniejących w INDUKCIE. Opierając się na kartach nawojowych silników serii Sg  $2p=4$  dostarczonych przez

INDUKTĘ wykonano (programem U144-PC stanowiącym własność BOBRME) obliczenia elektromagnetyczne silników w wykonaniu dotychczasowym (z wirnikami zalewanymi aluminium) i parametry uzyskane z tych obliczeń przyjęto jako punkt odniesienia do porównania z projektowanymi silnikami.

### 2.1. Optymalizacja pod kątem zwiększenia sprawności

Programem jw. wykonano wielowariantowe obliczenia elektromagnetyczne dla różnych kształtów żłobków stojana i wirnika oraz różnych danych nawojowych dla 3 grup średnic wewnętrznych stojana, a mianowicie:

- dla średnicy jak w silnikach Sg 2p = 4 (blachy stojana i wirnika jak w silniku Sg132 - 2p = 4)
- dla średnicy jak w silnikach Sg 2p = 2
- dla dowolnie dobranych średnic

W tabelicy 1 zestawiono wyniki obliczeń wykonanych dla powyższych kryteriów pod kątem zwiększenia sprawności.

Obliczenia wykonano dla długości żelaza oraz strat mechanicznych takich jak w silniku bazowym.

Porównując parametry projektowanych silników uzyskane z obliczeń z obliczonymi parametrami silnika „bazowego” – Sg132M-4 o mocy  $P = 7,5$  kW z wirnikiem zalewanym aluminium wybrano warianty optymalne.

Tablica 1.

Zestawienie wielowariantowych wyników obliczeń wykonanych pod kątem zwiększenia sprawności przy  $L_{Fe}$  i  $\Delta P_m$  jak w silniku bazowym,  $U = 380V$

War.	$\eta$	$\cos \varphi$	$I_N$	$i_r$	$m_r$	$m_k$	$\Delta P_{u1}$	$\Delta P_{u2}$	$\Delta P_{Fe}$	Uwagi
	%	-	A	-	-	-	W	W	W	
1	87.5	0.856	15.21	6.81	2.41	3.15	494.1	249.5	187.8	Silnik bazowy z wirnikiem Al
2	88.9	0.854	15.01	7.68	2.20	3.20	480.9	129.1	187.8	Silniki j.w. z wirnikiem Cu (dla różnych wariantów zwojowych)
3	88.6	0.868	14.82	7.25	2.02	2.96	504.1	138.4	177.8	
4	89.0	0.832	15.39	6.87	2.17	3.33	362.8	231.6	194.8	D1 i D2 - jak w Sg 132-M2; żłobki stojana i wirnika zmienione. Wirnik Cu
5	89.5	0.847	15.03	6.81	2.20	3.09	364.2	186.0	189.0	Zmiana rozkroju D1/D2 D2=128 mm żłobki stojana i wirnika zmienione. Wirnik Cu

Uwagi do tablicy 1:

#### 1. Objaśnienia:

$L_{Fe}$  – długość żelaza czynnego,

$\eta$  - sprawność [%],

$\cos \varphi$  - współczynnik mocy,

$I_N$  - prąd znamionowy (przewodowy) [A],

$i_r$  - krotność prądu rozruchowego ( $I_r/I_N$ ),

$m_r$  - krotność momentu rozruchowego ( $M_r/M_N$ ),

$m_k$  - krotność momentu maksymalnego ( $M_{max}/M_N$ ),

$\Delta P_{u1}$  - straty w uzwojeniu stojana,

$\Delta P_{u2}$  - straty w uzwojeniu wirnika,

$\Delta P_{Fe}$  - straty w żelazie,

$\Delta P_m$  - straty mechaniczne.

2. We wszystkich wariantach przyjęto straty mechaniczne takie jak w silnikach serii Sg. W silnikach z wirnikiem Cu całkowite straty będą mniejsze od ok. 140 do ok. 190 W (od strat w silnikach serii Sg). W związku z powyższym do ich odprowadzenia wystarczy przewietrznik taki jak w silnikach SEE, a więc do dalszych przeliczeń przyjęto  $\Delta P_m$  takie jak w analogicznych silnikach serii SEE.
3. Dla powierzchni przekroju żłobka ustalonej dla wariantów optymalnych (4 i 5), która jest ponad 40% większa od powierzchni żłobka silników se-

- rii Sg można przyjąć większy współczynnik zapełnienia taki jak w silnikach serii SEE.
4. Na podstawie wybranych wariantów optymalnych (z uwzględnieniem uwag podanych wyżej) wykonano następną partię obliczeń (poszerzoną o

wyкроje serii SEE) i ich wyniki zestawiono w tabelicy 2.

Wybrane warianty stanowiły podstawę do opracowania Kart Uzwojeń.

Tablica 2.

Zestawienie wyników obliczeń elektromagnetycznych silników indukcyjnych, z wirnikiem zalewanym miedzią  $U_N = 380 V$  optymalizowanych pod kątem zwiększenia sprawności, przy współczynniku zapełnienia i stratach mechanicznych jak w silnikach SEE.

War.	$\eta$	$\cos \varphi$	$I_N$	$i_r$	$m_r$	$m_k$	$\Delta P_{u1}$	$\Delta P_{u2}$	$\Delta P_{Fe}$	$\Delta P_m$	
-	%	-	A	-	-	-	W	W	W	W	
1	87.5	0.856	15.21	6.81	2.41	3.15	494.1	249.5	187.8	100.0	Sg wir.al. - bazowy
2	88.9	0.854	15.01	7.68	2.20	3.20	480.9	129.1	187.8	100.0	Sg wir.Cu.
3	90.2	0.830	15.22	7.03	2.10	3.15	347.5	191.1	167.6	70.0	SEE U=380 V wir.AL
4	91.3	0.829	15.07	7.90	1.90	3.18	339.8	99.7	167.6	70.0	jw. U=380 V wir.Cu
5	90.4	0.818	15.41	7.18	1.71	2.93	421.1	108.5	159.4	70	jw. Lfe jak w silniku bazowym
6	90.3	0.816	15.46	6.81	1.81	2.79	423.1	115.5	158.9	70	jw. zmieniony zł. wim.
7	90.1	0.842	15.02	6.52	1.90	2.76	399.3	153.1	157.8	70	jw. zł.wim.jak w silniku Sg
8	89.8	0.828	15.33	7.02	2.25	3.46	314.5	227.3	194.8	70.0	rozkr.jak w Sg 2p=2 Lfe jak w silniku bazowym
9	90.3	0.840	15.02	6.81	2.31	3.14	318.0	185.4	189.0	70	DW=128 Lfe jak w sil. bazowym

## 2.2. Optymalizacja pod kątem zmniejszenia gabarytu

Wykonano wielowariantowe obliczenia elektromagnetyczne dla różnych kształtów żłobków stojana i wirnika oraz różnych danych nawojowych dla 2 grup średnic wewnętrznych stojana, a mianowicie:

1. Dla średnicy D2 „istniejącej” (jak w silnikach Sg 2p=2)

2. Dla dowolnie dobranych średnic D2 = 122, 124, 125 i 128 mm

W tablicy 3 zestawiono wyniki obliczeń wykonanych dla powyższych kryteriów pod kątem zmniejszenia gabarytu. Obliczenia wykonano dla 3 długości żelaza:

$$L_{Fe1} = L_{Feg} - 25 \text{ mm}$$

$$L_{Fe2} = L_{Feg} - 30 \text{ mm}$$

$$L_{Fe3} = L_{Feg} - 35 \text{ mm}$$

gdzie:

$L_{Feg}$  – długość pakietu jak w serii Sg w silniku z wirnikiem Al dla P=7,5 kW

$L_{Fe3}$  – długość pakietu jak w serii Sg w silniku o stopień krótszym (tj. o mocy P=5,5 kW)

Porównując parametry projektowanych silników uzyskane z obliczeń z obliczonymi parametrami silnika „bazowego” – (Sg132M-4 o mocy P = 7,5 kW z wirnikiem zalewanym aluminium) wybrano warianty optymalne - dla minimalnej długości żelaza  $L_{Fe}$  i parametrów eksploatacyjnych zbliżonych do uzyskanych w silniku bazowym.

Jak wynika z tablicy 3 parametry eksploatacyjne porównywalne z parametrami silnika bazowego, przy rozkroju „istniejącym” (D2 jak w Sg, 2p=2) udało się uzyskać przy  $L_{Fe2}$  czyli dla pakietu skróconego o 30 mm.

Dla D2= 124 mm pakiet żelaza udało się skrócić do  $L_{Fe3}$  (skrócenie o 35 mm) czyli do długości odpowiadającej silnikowi o mocy P=5,5 kW.

Tablica 3.  
Zestawienie wielowariantowych wyników obliczeń wykonanych pod kątem zmniejszenia gabarytu  
 $\Delta P_m = 100 \text{ W}$ ,  $U = 380 \text{ V}$

war.	L <sub>Fe</sub>	eta	cos fi	I <sub>N</sub>	i <sub>r</sub>	m <sub>r</sub>	m <sub>k</sub>	ΔP <sub>u1</sub>	ΔP <sub>u2</sub>	ΔP <sub>Fe</sub>	
-	-	%	-	A	-	-	-	W	W	W	
<b>0</b>	<b>L<sub>Fe3</sub></b>	<b>87.5</b>	<b>0.856</b>	<b>15.21</b>	<b>6.81</b>	<b>2.41</b>	<b>3.15</b>	<b>494.1</b>	<b>249.5</b>	<b>187.8</b>	<b>Silnik bazowy z wirnikiem Al.</b>
1	L <sub>Fe1</sub>	87.6	0.834	15.60	6.87	2.30	3.34	475.0	268.5	177.2	D1 i D2 – jak w Sg 132-M2; żłobki stojana i wirnika zmienione.
<b>2</b>	<b>L<sub>Fe2</sub></b>	<b>87.5</b>	<b>0.832</b>	<b>15.65</b>	<b>6.74</b>	<b>2.27</b>	<b>3.30</b>	<b>483.7</b>	<b>274.2</b>	<b>174.3</b>	
3	L <sub>Fe3</sub>	87.2	0.785	16.65	6.96	2.47	3.59	522.6	250.4	188.3	
<b>4</b>	<b>L<sub>Fe1</sub></b>	<b>88.0</b>	<b>0.851</b>	<b>15.22</b>	<b>6.75</b>	<b>2.18</b>	<b>3.21</b>	<b>441.2</b>	<b>258.9</b>	<b>181.0</b>	D2=122 mm
5	L <sub>Fe2</sub>	87.9	0.834	15.54	6.87	2.27	3.33	452.3	249.5	186.7	
6	L <sub>Fe3</sub>	87.7	0.809	16.06	6.91	2.35	3.46	474.9	241.2	192.8	
7	L <sub>Fe1</sub>	87.9	0.861	15.06	6.55	2.12	3.08	443.8	274.7	173.6	D2=124 mm
8	L <sub>Fe2</sub>	87.8	0.846	15.34	6.69	2.21	3.20	451.7	264.5	179.3	
<b>9</b>	<b>L<sub>Fe3</sub></b>	<b>87.7</b>	<b>0.826</b>	<b>15.73</b>	<b>6.78</b>	<b>2.29</b>	<b>3.33</b>	<b>467.7</b>	<b>254.9</b>	<b>185.2</b>	
10	L <sub>Fe1</sub>	87.9	0.860	15.07	6.58	2.15	3.10	444.7	274.7	173.6	D2=125 mm
11	L <sub>Fe3</sub>	87.7	0.823	15.79	6.80	2.31	3.35	471.1	255.3	185.3	
12	L <sub>Fe1</sub>	88.0	0.862	15.02	6.31	1.97	2.89	452.5	260.1	168.0	D2=128 mm
13	L <sub>Fe2</sub>	87.8	0.826	15.71	6.55	2.14	3.13	478.3	241.9	179.5	

### 3. Wykonanie modeli

BOBRME Komel wspólnie z Instytutem Odlewnictwa w Krakowie opracował metodę zastępczą odlewania miedzianych klatek wirników umożliwiającą wykonanie kilku sztuk wirników w celu wykonania modeli i sprawdzenia wniosków z obliczeń. Ze względów ekonomicznych do wykonania modeli wytypowano warianty 4 i 7 z tablicy 2 (istniejące oprzyrządowanie, wykroje blach - stojan z SEE, wirnik z Sg lub SEE, długość pakietu jak w Sg). Modele te są obecnie wykonywane w Zakładzie Doświadczalnym BOBRME. Dla uruchomienia opłacalnej, seryjnej produkcji silników z miedzianą klatką, należy wdrożyć odpowiednią technologię jej odlewania. W dostępnej literaturze omówione są szeroko opracowane i stosowane sposoby zalewania pakietów wirnika miedzią, uwzględniające jej specyficzne właściwości. Są to m.in.: odlewanie ciśnieniowe, ze wstępnym wypełnieniem, z dogrzewaniem itp. Zapewniają one zmniejszoną porowatość (dochodzącą przy odlewaniu grawitacyjnym do 40%) oraz możliwość wielokrotnego użycia kokili.

### 4. Wnioski

- w rozpatrywanej wielkości zastąpienie wirników zalewanych aluminium wirnikami zalewanymi miedzią w pozwoli na osiągnięcie sprawności w klasie EEF1 przy długości żelaza takiej jak w silnikach serii Sg,
- dla zminimalizowania kosztów wykonania modeli oparto się na istniejącym rozkroju blach stosowanych w silnikach serii SEE,
- w celu polepszenia parametrów rozruchowych konieczna jest zmiana kształtu żłobka wirnika przy niezmienionej blasze stojana
- aby zminimalizować koszty i polepszyć parametry rozruchowe zastosowano żłobek wirnika z serii Sg zachowując niezmienioną blachę stojana z serii SEE,
- dla dalszego polepszenia parametrów rozruchowych przy zachowanej wysokiej sprawności wskazana byłaby zmiana rozkroju blach np. Dw =128 (patrz warianty 9 tab.2),
- zastosowanie wirnika z klatką odlewaną z miedzi pozwoli na skrócenie pakietu silnika w granicach 25 do 30% przy zachowanych podstawowych parametrach eksploatacyjnych.

- ze względów ekonomicznych dla wykonania modeli i sprawdzenia wniosków z obliczeń zastosowano metodę zastępczą odlewania klatek wirników umożliwiającą wykonanie kilku sztuk silników.

### Literatura

- [1]. Zapaśnik R.: Silniki indukcyjne z miedzianą odlewana klatką wirnika. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 71/2005*.
- [2]. Kirtley J.L.: Designing Squirrel Cage Rotor Slots with High Conductivity. *Massachusetts Institute of Technology*.
- [3]. Doppelbauer M.: Kompaktere Energiesparmotoren dank Kupfertechnologie. *P&A Produkte & Lösungen – Antriebstechnik*.
- [4]. Brush E.F. i inni: Recent Advances in Development of the Die-cast Copper Rotor Motor. *Copper Development Association Inc. and Internat. Copper Association Ltd. NY-April 2004*
- [5]. Chiricozzi E. i inni: New Materials and Innovative Technologies to Improve the Efficiency of Three-phase Induction Motors. A Case Study. *University of L'Aquila*.
- [6]. Covie J.G.: Application of High Temperature Molds Materials to Die Cast the Copper Motor Rotor. *Copper Applications in Innovative Technology. Febr. 1998*
- [7]. Technology Transfer Report – The Die-Cast Copper Motor Rotor. *Copper Development Association Inc. and Internat. Copper Association Ltd. NY-April 2004*
- [8]. Covie J.G. i inni : United States Patent Nr 6,786,272 B2. Sep. 7, 2004: APPARATUS AND METHOD FOR DI

### Autor

Inż. Maria Graczyk  
BOBRME Komel tel. (032) 2582041  
e-meil: info@komel.katowice.pl