

# Wpływ konstrukcji wirnika na właściwości dwubiegunowego silnika indukcyjnego

Wojciech Poprawski, Tomasz Wolnik

## 1. Wprowadzenie

W dwubiegunowych silnikach indukcyjnych wał często pełni nie tylko rolę elementu przenoszącego moment, ale również ma znaczenie elektromagnetyczne – „przejmuje” część strumienia magnetycznego z jarzma wirnika. Z reguły gdy pakiet wirnika osadzony jest bezpośrednio na wale, obwód elektromagnetyczny wirnika projektowany jest tak, że indukcja w jarzmie wirnika (bez uwzględnienia wału) osiąga bardzo duże wartości. Podczas pracy silnika na biegu jałowym ( $s = 0$ ) częstotliwość strumienia w wirniku jest bliska zeru i główny strumień magnetyczny wnika głęboko do wału, powodując jednocześnie spadek wartości indukcji magnetycznej w jarzmie wirnika. Problem pojawia się wówczas, gdy wraz ze wzrostem obciążenia silnika wzrasta również poślizg, a tym samym wzrasta częstotliwość strumienia magnetycznego w wirniku. Powoduje to powstawanie w litym wale silnika prądów wirowych, które wypierają główny strumień magnetyczny i zmniejszają wnikanie strumienia do wału. Skutkiem tego jest wzrost indukcji magnetycznej w jarzmie wirnika, wzrost wartości prądu magnesującego oraz obniżenie współczynnika mocy. Z tego powodu w silnikach dwubiegunowych, z bardzo silnie nasyconym jarzmem wirnika, do właściwego obliczenia współczynnika mocy niezbędna jest znajomość prądu magnesującego przy obciążeniu znamionowym, obliczonego z uwzględnieniem odciążającego wpływu wału.

W artykule omówiono zagadnienie znaczenia rozwiązania konstrukcyjnego wału oraz pasowania względem wirnika w dwubiegunowych silnikach indukcyjnych. Zaproponowano metodę pomiaru i sposób obliczeń wartości prądu magnesującego w funkcji zmian obciążenia silnika. Przedstawiono również 3 modele wirnika w celu oceny wpływu wału na parametry eksploatacyjne silnika.

## 2. Modele wirnika

W ramach prac badawczych związanych z tematyką znaczenia elektromagnetycznego wału w silnikach indukcyjnych zaprojektowano i wykonano 3 różne rozwiązania konstrukcyjne wirnika dwubiegunowego silnika indukcyjnego. Konstrukcje te umożliwiają eksperymentalne określenie odciążającego wpływu wału na indukcję w jarzmie wirnika. Opracowano model wirnika z wałem bezpośrednio przylegającym do pakietu (rys. 1) – wariant 1, konstrukcję wirnika z wałem osadzonym na tulei niemagnetycznej (rys. 2) – wariant 2 oraz model wirnika z wałem żebrowanym (rys. 3) – wariant 3. Obwód elektromagnetyczny, tj. blacha stojana, blacha wirnika oraz dane nawojowe dla wszystkich opracowanych modeli wirnika, są takie same. Poszczególne rozwiązania różnią się jedynie sposobem osadzenia pakietu wirnika na wale.

**Streszczenie:** W artykule omówiono zagadnienie znaczenia rozwiązania konstrukcyjnego wału oraz pasowania względem wirnika w dwubiegunowych silnikach indukcyjnych. Zaproponowano metodę pomiaru i sposób obliczeń wartości prądu magnesującego w funkcji zmian obciążenia silnika. Przedstawiono również 3 modele wirnika w celu oceny wpływu wału na parametry eksploatacyjne silnika.

**Abstract:** This article presents the issue of “relieving” influence of the shaft in 2-pole induction motors. Method of measurement and calculation of the magnetizing current as a function of motor loads have been proposed. It also presents the rotor models to assess the impact of the shaft on the parameters of motors.



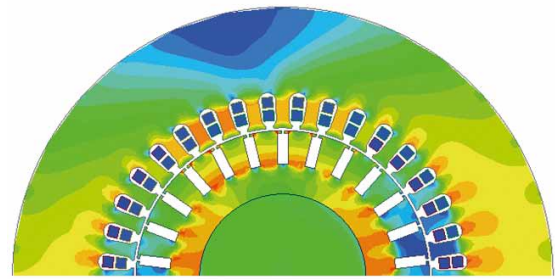
Rys. 1. Model wirnika z wałem bezpośrednio przylegającym do pakietu – wariant 1

## 3. Obliczenia MES

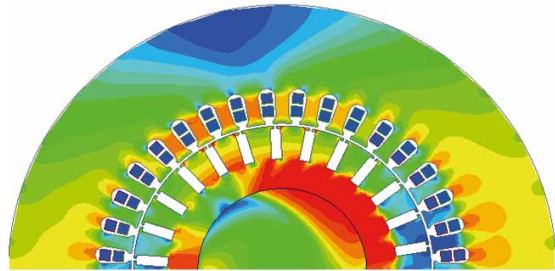
Korzystając z metody elementów skończonych (MES), można symulować dowolne stany pracy maszyny indukcyjnej. Tym samym, w oparciu o przedstawioną w rozdziale 1 teorię związaną ze znaczeniem elektromagnetycznym wału w dwubiegunowych silnikach indukcyjnych przygotowano model obliczeniowy tożsamy z wykonanymi modelami wirnika, dla



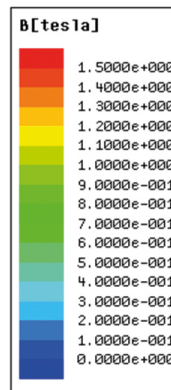
Rys. 2. Model wirnika z wałem osadzonym na tulei niemagnetycznej - wariant 2



a)



b)

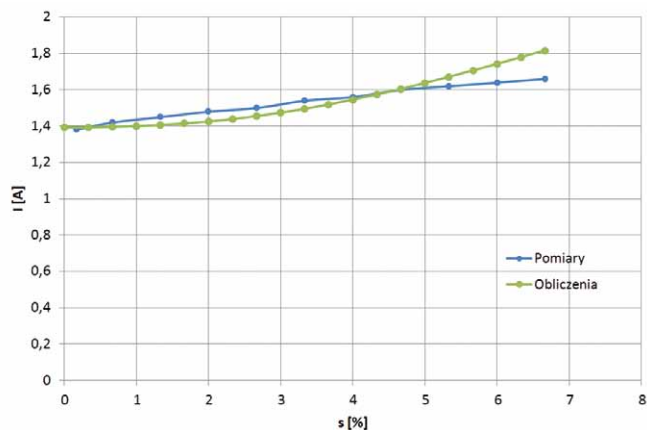


Rys. 4. Porównanie rozkładu indukcji magnetycznej w jarzmie wirnika dla poślizgu  $s = 0$  oraz  $s = 2,7\%$ . Zasilanie  $U = 400 \text{ V}$ ,  $50 \text{ Hz}$

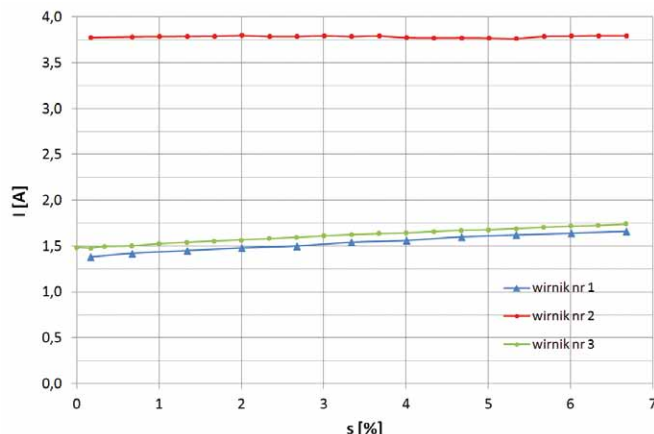


Rys. 3. Model wirnika z wałem żebrowanym - wariant 3

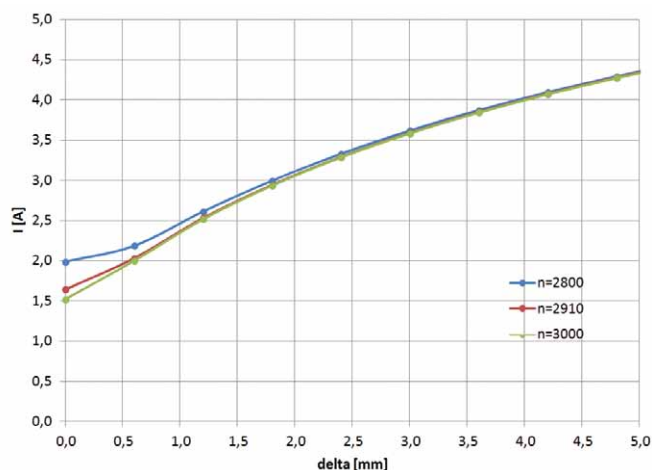
którego przeprowadzono obliczenia i analizę odciążającego wpływu wału. Dla opracowanych konstrukcji modelowych wirnika przeprowadzono obliczenia MES, a następnie wyniki te zweryfikowano z wynikami przeprowadzonych badań laboratoryjnych. Głównym celem przeprowadzanych obliczeń było wyznaczenie rozkładu indukcji magnetycznej w jarzmie nieuzwojonego wirnika, dla różnych wartości prędkości obrotowej, przy zasilaniu uzwojenia stojana napięciem i częstotliwością



Rys. 5. Zależność prądu magnesującego silnika w funkcji poślizgu dla rozwiązania konstrukcyjnego wirnika 1 ( $U = 400$  V, 50 Hz)



Rys. 7. Zmierzona zależność prądu magnesującego silnika w funkcji poślizgu dla 3 rozwiązań konstrukcyjnych wirnika ( $U = 400$  V, 50 Hz)



Rys. 6. Zależność prądu magnesującego silnika w funkcji zmian szczeliny pomiędzy wałem a pakietem wirnika dla różnych wartości prędkości obrotowych wirnika ( $U = 400$  V, 50 Hz)

sieciową. Na rysunku 4 przedstawiono porównanie rozkładu indukcji magnetycznej w silniku z wariantem wirnika nr 1, dla poślizgu  $s = 0$  ( $n = 3000$  obr/min, rys. 4 a) oraz  $s = 2,7\%$  ( $n = 2920$  obr/min, rys. 4 b) przy zasilaniu napięciem znamionowym  $U = 400$  V i częstotliwością 50 Hz.

Wyniki przedstawione na rysunku 4 obrazują wzrost wartości indukcji magnetycznej w jarzmie wirnika wraz ze wzrostem poślizgu. Jest to spowodowane przez pojawiające się w wale prądy wirowe (ze względu na lity materiał wału), które wypierają strumień magnetyczny i znacznie zmniejszają jego wnikanie do wału. Wraz ze wzrostem indukcji magnetycznej w jarzmie wzrasta również wartość prądu magnesującego. Wielkość tych zmian obrazuje wykres przedstawiony na rysunku 5.

W celu zamodelowania tulei niemagnetycznej (wirnik nr 2) przeprowadzono obliczenia zależności wartości prądu magnesującego silnika w funkcji wysokości szczeliny pomiędzy wałem silnika a pakietem blach wirnika. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 6.

### Metoda pomiaru i badania laboratoryjne

W celu weryfikacji przyjętych założeń oraz wyników obliczeń przeprowadzono badania laboratoryjne dla wykonanych modelowych konstrukcji wirnika. Z przeprowadzanych klasycznie pomiarów silnika indukcyjnego nie jest możliwe wydzielenie wartości prądu magnesującego z wartości zmierzonego prądu fazowego, a tym samym nie jest możliwe określenie wzrostu wartości prądu magnesującego wraz ze wzrostem obciążenia silnika. Możliwość taką stwarzają jedynie wykonane nieuzwojone modelowe wirniki. Brak uzwojenia w wirniku powoduje, że praktycznie cały prąd stojana jest prądem magnesującym obwód elektromagnetyczny.

Badania laboratoryjne przeprowadzane były w ten sposób, że badany silnik zasilany był z regulowanego źródła napięcia o częstotliwości 50 Hz, natomiast wirnik napędzany był maszyną zewnętrzną z prędkościami obrotowymi z zakresu 2800–2995 obr/min (pomiar co 20 obr/min). W ten sposób odwzorowano różne wartości poślizgu i zmianę częstotliwości strumienia w wirniku. Dla każdej prędkości obrotowej zdjęto charakterystykę biegu jałowego dla napięć 60–520 V (0,15–1,3  $U_n$ ).

Szczegółowe wyniki pomiarów i porównanie z wynikami obliczeń dla omawianych konstrukcji wirnika przedstawiono w tabelach 1–3 oraz na rysunku 7.

### Podsumowanie

W silnikach z bardzo silnie nasyconym jarzmem wirnika, zwłaszcza w silnikach dwubiegunowych, do właściwego obliczenia współczynnika mocy, prądu znamionowego i współczynnika sprawności niezbędna jest znajomość prądu magnesującego przy obciążeniu znamionowym, obliczonego z uwzględnieniem odciażającego wpływu wału na wartość indukcji w jarzmie wirnika. W artykule przedstawiono wykonane i przebadane silniki z 3 konstrukcjami wirnika. Analizując wyniki przedstawione na rysunku 7, można zauważyć znaczący wpływ rozwiązania konstrukcyjnego wirnika na wartość prądu biegu jałowego. Dodatkowo dla wirników nr 1 i 3 stwierdzono wyraźną zależność wartości prądu magnesującego od poślizgu –

**Tabela 1.** Porównanie wyników badań laboratoryjnych oraz obliczeń MES dla wirnika 1

n [obr/min]	$U_{LL}$ [V]	$I_0$ [A] pomiar	$I_0$ [A] obliczenia
2800	520	2,83	2,94
	400	1,68	1,83
	200	0,65	0,72
2920	520	2,48	2,47
	400	1,50	1,54
	200	0,63	0,69
3000	520	2,31	2,20
	400	1,35	1,38
	200	0,62	0,68

**Tabela 2.** Porównanie wyników badań laboratoryjnych oraz obliczeń MES dla wirnika 2

n [obr/min]	$U_{LL}$ [V]	$I_0$ [A] pomiar	$I_0$ [A] obliczenia
2800	520	6,80	8,05
	400	3,75	4,48
	200	0,73	0,77
2920	520	6,80	8,02
	400	3,75	4,46
	200	0,73	0,77
3000	520	6,80	8,01
	400	3,75	4,45
	200	0,73	0,77

wraz ze wzrostem poślizgu wzrasta wartość prądu magnesującego. W wirniku nr 2, w którym jarzmo wirnika było oddzielone od wału tuleją niemagnetyczną, nie stwierdzono wpływu poślizgu na prąd magnesujący. Można wnioskować, że wartość prądu magnesującego silnika indukcyjnego wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia tym bardziej, im większy jest „odciążający” wpływ wału na indukcję w jarzmie wirnika. Jeżeli silnik zostanie zaprojektowany ze stosunkowo dużymi wartościami indukcji magnetycznej w jarzmie wirnika, to wraz ze wzrostem poślizgu wzrośnie wartość prądu magnesującego, powodująca obniżenie współczynnika mocy  $\cos \phi$ . Przy czym wzrost prądu magnesującego jest uzależniony od rodzaju pasowania pakietu na wale oraz wartości indukcji magnetycznej w jarzmie wirnika.

Badania laboratoryjne potwierdziły dobrą zgodność wyników obliczeń prądu magnesującego metodą MES z wynikami pomiarów. Pozwala to na dokładniejsze obliczanie parametrów znamionowych w silnikach z bardzo silnie nasyconym jarzmem wirnika.

### Literatura

- [1] SCHUISKY W.: *Induktionmaschinen*. Springer-Verlag, Wien 1957.
- [2] DĄBROWSKI M.: *Pola i obwody magnetyczne maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1971.
- [3] ŚLIWIŃSKI T.: *Metody obliczania silników indukcyjnych. T. 1. Analiza*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.

**Tabela 3.** Porównanie wyników badań laboratoryjnych oraz obliczeń MES dla wirnika 3

n [obr/min]	$U_{LL}$ [V]	$I_0$ [A] pomiar	$I_0$ [A] obliczenia
2800	520	3,19	3,25
	400	1,74	1,81
	200	0,67	0,74
2920	520	2,94	2,99
	400	1,61	1,58
	200	0,65	0,70
3000	520	2,86	2,92
	400	1,50	1,47
	200	0,65	0,69

- [4] GAWRON S.: *Silnik klatkowy z wałem drążonym przeznaczony do zabudowy w maszynie technologicznej*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 86/2010, s. 299–302.

**mgr inż. Wojciech Poprawski** – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, e-mail: w.poprawski@komel.katowice.pl;  
**mgr inż. Tomasz Wolnik** – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, e-mail: t.wolnik@komel.katowice.pl

artykuł recenzowany

reklama

