

Marek Gała, Kazimierz Jagieła
Politechnika Częstochowska, Częstochowa

PRACA DWUBIEGOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO DMUCHAWY PIECA OPOROWEGO W SIECI NISKIEGO NAPIĘCIA

TWO-SPEED OPERATION OF AN INDUCTION MOTOR OF A RESISTANCE FURNACE BLOWER IN LOW VOLTAGE NETWORK

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań statycznych i dynamicznych indukcyjnego silnika dwubiegowego obciążonego dmuchawą azotu instalacji energetycznej oporowego pieca próżniowego. Silnik o przełączalnej liczbie par biegunów z uzwojeniami wewnętrznie połączonymi w układzie Dahlandera o grupie Y/YY chłodzony wodą zasilany jest poprzez układ pomocniczego transformatora obniżającego napięcie do wartości 3 x 230 V, 50 Hz lub bezpośrednio z sieci 3 x 400 V AC. Uzwojenia stojana silnika pozwalają na pracę w stanie szybkiego schładzania azotem pieca oporowego w ciągu 5 minut z przeciążeniem prądowym $I = 3 I_N$. W artykule przedstawiono przebiegi czasowe wielkości elektrycznych dla próby zmian prędkości obrotowej silnika dla nominalnego napięcia zasilania i różnych konfiguracji połączeń uzwojeń stojana.

Abstract: The subject of the paper is static and dynamic analysis of a two-speed induction motor loaded by a nitrogen blower working in the power installation of a vacuum resistance furnace. The motor with switched number of pole pairs has windings connected internally in the Dahlander Y/YY group pole-changing circuit. It is water-cooled and can be supplied from an auxiliary transformer lowering voltage to 3 x 230 V 50 Hz or directly from a 3 x 400 V AC network. The stator windings allow for 5 minute fast nitrogen cooling mode operation of the resistance furnace with current overload $I = 3 I_N$. The time waveforms of the electric quantities are presented in the paper for test changes of the motor angular velocity for the nominal supply voltage and different configurations of the stator windings connection.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny dwubiegowy, parametry sieci niskiego napięcia

Keywords: two-speed induction motor, parameters in low network voltage

1. Wstęp

Z teorii maszyn elektrycznych z zakresu silników indukcyjnych znana jest powszechnie zależność prędkości obrotowej od:

- częstotliwości zasilania;
- ilości par biegunów;
- oraz poślizgu.

Poślizg może być zmieniany w zasadzie w silnikach asynchronicznych pierścieniowych. Pierwsze dwa sposoby szczególnie odnoszą się do sterowania w układach napędowych z silnikami klatkowymi. Regulacja częstotliwościowa opisana została bardzo szczegółowo w literaturze, a dzięki jej zastosowaniu wdrożone zostały do produkcji przemienniki częstotliwości o różnych sposobach sterowania z wykorzystaniem adaptacyjnych modeli matematycznych zaimplementowanych w mikroprocesorowych układach polowo zorientowanych. Przemienniki częstotliwości stosowane są bardzo często do różnorodnych układów napędowych dużej i małej mocy dla wielu poziomów napięć zasilania. Dla układów napędowych małej mocy, takie firmy jak np.: SIEMENS,

ABB, SEW w swym wachlarzu produkcyjnym oferują kompaktowe zestawy elektromechaniczne wyposażone kompleksowo w zestaw falownik-silnik-reduktor. Właściwy dobór rodzaju układu napędowego z wybranym sposobem i zakresem regulacji zależy od technologii procesu. Zdarzają się procesy lub pojedyncze urządzenia, które nie wymagają ciągłej regulacji prędkości, a ich zakres i wartości dostosowane są np. do dwóch prędkości obrotowych bądź liniowych. Takie warunki pracy występują w kopalnianych napędach wentylatorów, pomp [5,10,11,12], dmuchaw [2,6] lub liniach wolnego, a następnie szybkiego transportu. Silniki o określonych dwóch lub trzech prędkościach obrotowych przeznaczone są do napędu wciągarek cumowniczych i kotwicznych oraz napędu portowych urządzeń ładunkowych. Silniki wielobiegowe o takim przeznaczeniu produkowane są w Gdańsku w firmie ELMOR [4] i wyposażone są dodatkowo w wbudowany hamulec tarczowy zwalniany elektromagnetycznie.

W układach napędowych, w których określone są dwie prędkości obrotowe należy stosować dwubiegowe silniki indukcyjne. Już dla trzech prędkości obrotowych, jako kryterium wyboru silnika wielobiegowego i rozbudowanego układu przełączającego, należy bardzo starannie rozważyć ze względów ekonomicznych, zasadność wyboru napędu przemiennikowego. Może się bowiem okazać, iż cena przemiennika wraz z typowym silnikiem przeznaczonym do zasilania częstotliwościowego będzie niższa niż układu z silnikiem wielobiegowym. Przedmiotem artykułu jest prezentacja parametrów statycznych oraz dynamicznych związanych z poborem energii elektrycznej w sieci niskiego napięcia przez silnik dwubiegowy produkcji AntriebsTechnik SSB, zastosowany jako dmuchawa rozprężonego azotu w próżniowym piecu oporowym do obróbki cieplnej elementów stalowych. Na fotografii (rys. 1) przedstawiono widok silnika dwubiegowego dmuchawy azotu na tle pieca oporowego z przyłączem kabli, chłodzeniem wodnym i widocznym na pierwszym planie doprowadzeniem azotu.



Rys. 1. Widok silnika typu H200-1537.202.00-B5

2. Parametry silnika i sposób jego zasilania

Silnik dmuchawy pieca oporowego został wykonany jako dwubiegowy o przełączalnej liczbie par biegunów posiadający uzwojenia wewnętrznie skojarzone, tworzące tzw. układ Dahlandera o połączeniu Y/YY. Dla takiego układu połączeń uzwojeń stosunek mocy wynosi $P_{YY}/P_Y \approx 4$ [1,9]. Jednak dla silnika dmuchawy produkcji niemieckiej firmy Antriebs-Technik SSB wskaźnik ten osiąga wartość 3,2 i różni się od wartości podanych w literaturze [9,13]. Podstawowe dane techniczne umieszczone na tabliczce znamionowej silnika typu

H200-1537.202.00-B5 o liczbie biegunów $2p=4/2$ zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1

Parametry silnika typu H200-1537.202.00-85

Parametr	Połączenie Y(p=4)	Połączenie YY(p=2)
Napięcie zasilania [V]	3 x 400; 50 Hz	
Moc [kW]	50	160
Prąd [A]	89	265
cos φ	0,87	0,89
Prędkość obrotowa [obr./min.]	1495	2992
Stopień ochrony	IP54	
Kategoria pracy	S1	
Chłodzenie wodne	Q=1800 l/h; p=2,5 bar	

Na podstawie wyników ekspertyzy [3] oraz analizy i wyników własnych badań pomiarowych [6], jak również dostępnej dokumentacji technicznej pieca próżniowego [2] określono parametry elektromagnetyczne badanego silnika dla układów połączeń uzwojeń Y/YY. Wartości parametrów schematu zastępczego zestawiono w tabeli 2.

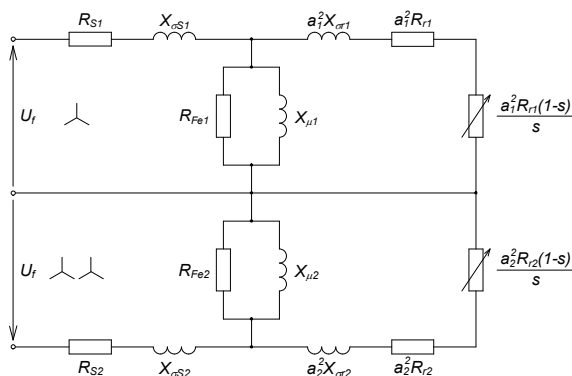
Tabela 2

Parametry schematu zastępczego silnika

Parametr	Połączenie Y (p=4)	Połączenie YY (p=2)
Moment elektromagnetyczny [Nm]	319,54	510,92
Poślizg nominalny [%]	0,33	0,27
Rezystancja stojana R_s [mΩ]	28,74	14,37
Reaktancja rozproszona stojana $X_{\sigma s}$ [Ω]	0,1576	0,064
Rezystancja wirnika sprowadzona do obwodu stojana $a^2 R_r$ [mΩ]	46,2	40,8

Reaktancja rozproszona do obwodu stojana $a^2 X_{\sigma r} [\Omega]$	0,1576	0,064
Rezystancja $R_{Fe} [\Omega]$	196,16	24,07
Reaktancja magnetyczna $X_{\mu} [\Omega]$	7,45	2,67

Graficzną reprezentację obliczonych parametrów elektromagnetycznych silnika dwubiegowego stanowi schemat zastępczy z jednym uzwojeniem przełączalnym Y/YY przy wymaganym stosunku liczby par biegunów wynoszącym 2:1. Na rys. 2 zespolono dwa fazowe schematy zastępcze dla obu grup połączeń uzwojeń stojana.

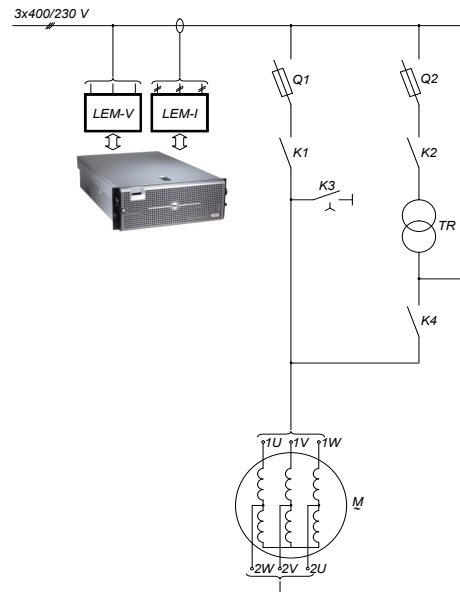


Rys. 2. Schemat zastępczy maszyny asynchronicznej dwubiekowej

Rozruch i praca silnika dwubiegowego dmuchawy azotu pieca oporowego próżniowego może występować dla dwóch różnych wariantów, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.

Wariant I – rozruchy bezpośrednie z sieci 3 x 400 V AC:

- rozruch przy połączeniu uzwojeń stojana w gwiazdę (Y), co realizowane jest podczas załączonego stycznika K1 (rys. 3); ustalona wówczas prędkość obrotowa wynosi 1495 obr./min.;
- przełączenie uzwojeń stojana do układu podwójnej gwiazdy (YY), co odpowiada załączeniu styczników K3 i K6, a odłączeniu stycznika K1 (rys. 3); ustalona w drugim etapie prędkość obrotowa wynosi 2992 obr./min.



Rys. 3. Schemat zasilania silnika indukcyjnego dwubiegowego wraz z komputerowym systemem pomiarowym

Wariant II – rozruchy pośrednie w pierwszym etapie z wykorzystaniem transformatora obniżającego napięcie do wartości 3 x 230 V AC ($S_{TR} = 485 \text{ kVA}$; Dy5) i połączenie bezpośrednie do sieci w drugim etapie rozruchu:

- rozruch przy połączeniu uzwojeń stojana w gwiazdę (Y), co realizowane jest podczas załączonych styczników K2 i K4 (rys. 3); ustalona prędkość obrotowa na tym etapie wynosi 1495 obr./min.;
- przełączenie uzwojeń stojana do układu podwójnej gwiazdy (YY), co odpowiada załączeniu styczników K3, K2 i K5, a odłączeniu stycznika K4 (rys. 3); ustalona prędkość obrotowa jest równa 2992 obr./min.;
- przełączenie uzwojeń stojana podwójnej gwiazdy (YY) do napięcia sieci 3 x 400 V AC poprzez odłączenie stycznika K5 i załączenie stycznika K6; prędkość obrotowa nadal wynosi 2992 obr./min.

Szybkie schłodzenie materiału poddanego obróbce cieplnej do temperatury ok. 60°C wymaga intensywnej pracy dmuchawy azotu o ciśnieniu $p = 10 \text{ atm}$. i przy prędkości obrotowej silnika równej 2992 obr./min. Etap schładzania charakteryzuje się maksymalnym obciążeniem silnika i wówczas prąd stojana osiąga wartości $3 \times I_{N \text{ tj}}$. ok. 800 A w czasie ok. 5 minut.

Z punktu widzenia oddziaływania silnika na sieć zasilającą niskiego napięcia najbardziej niekorzystny przypadek występuje w czasie jego rozruchów zakwalifikowanych do pierwszego wariantu.

3. Badania oddziaływania silnika dwubiegowego na sieć zasilającą

Do badań jakości energii elektrycznej pobieranej przez silnik dwubiegowy dmuchawy zgodnie z rys. 3 użyto komputerowego zestawu pomiarowego PQM-610, w skład którego wchodzi przetworniki napięciowe i prądowe LEM, cęgi pomiarowe LEM typu PR-30 (rys. 3) wraz z oprogramowaniem narzędziowym DASYLab. Parametry metrologiczne zestawu pomiarowego PQM-610 zapewniają uzyskanie dokładności do 0,1% w odniesieniu do wartości wskaźników zawartości wyższych harmonicznych THD napięć i prądów.

Silnik indukcyjny dwubiegowy napędzający dmuchawę azotu wchodzi w skład pieca oporowego typu VUTK524, który podłączony jest do rozdzielni niskiego napięcia zasilanej z transformatora o mocy 1MVA (15kV/0,4 kV). Moc zwarcia na poziomie niskiego napięcia wynosi ok. $S_{zw} \approx 14$ MVA. W przypadku rozruchu silnika dwubiegowego, przy niewielkim obciążeniu innymi urządzeniami pieca oporowego, stosunek mocy zwarcia do mocy pozornej silnika wynosi:

$$\frac{S_{zw}}{S_{S-2B}} \approx 51 \quad (1)$$

gdzie: S_{S-2B} – moc pozorna pobierana przez silnik dwubiegowy przedstawiona jest na rys. 5.

Wskaźnik ten ulega pogorszeniu, jeśli występuje etap maksymalnego grzania o poborze mocy czynnej wynoszącej $P_g = 150$ kW [6]. Wówczas wartość wskaźnika mocy zwarcia do mocy pozornej pieca maleje zgodnie z zależnością (2).

$$\frac{S_{zw}}{S_{pieca}} \approx 36 \quad (2)$$

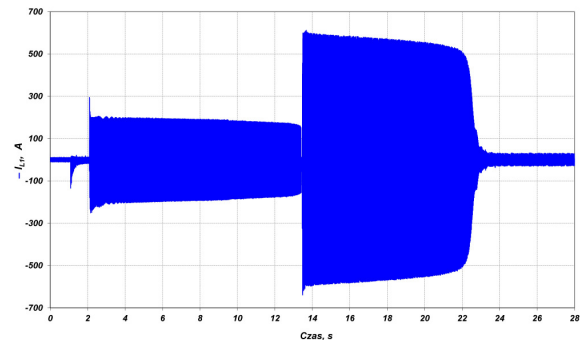
gdzie: $S_{pieca} = \sqrt{(P_g + P_{S-2B})^2 + Q_{S-2B}^2}$;

wartości mocy czynnej P_{S-2B} i biernej Q_{S-2B} silnika odczytano z przebiegów przedstawionych na rys. 5.

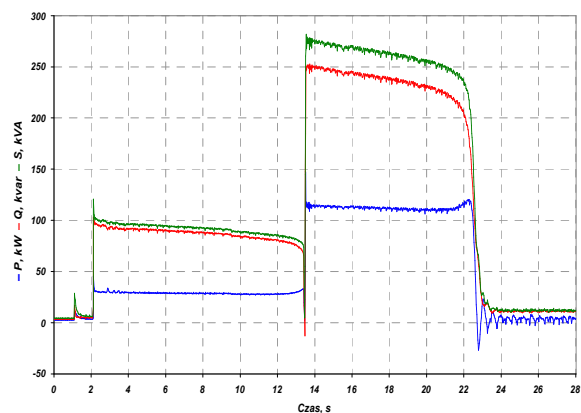
Dla przeprowadzonego rozruchu bezpośredniego według zasad wariantu pierwszego, oscylogram prądu pobieranego przez silnik z sieci niskiego napięcia przedstawiono na rys. 4.

Zmianom prądu rozruchu dla niższych prędkości (połączenie uzwojeń stojana w Y) i wyższych prędkości obrotowych (połączenie uzwojeń stojana w YY) towarzyszy pobór mocy

czynnej, biernej i pozornej, który zilustrowany został na rys. 5.

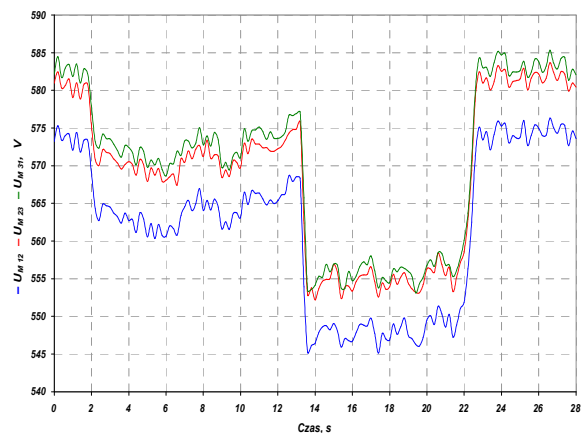


Rys. 4. Oscylogram prądu rozruchu bezpośredniego silnika dwubiegowego w stanie jałowym



Rys. 5. Wykres zmian mocy czynnej, biernej i pozornej w czasie rozruchu silnika

Znaczny pobór mocy biernej w czasie rozruchu silnika dwubiegowego dmuchawy skutkuje występowaniem zapadów napięcia zasilającego. Na rysunku 6 zaprezentowano wartości szczytowe napięć międzyfazowych w poszczególnych przedziałach czasowych etapu rozruchu i stanu ustalonego.



Rys. 6. Wykres zmian wartości szczytowych napięć międzyfazowych w czasie rozruchu silnika

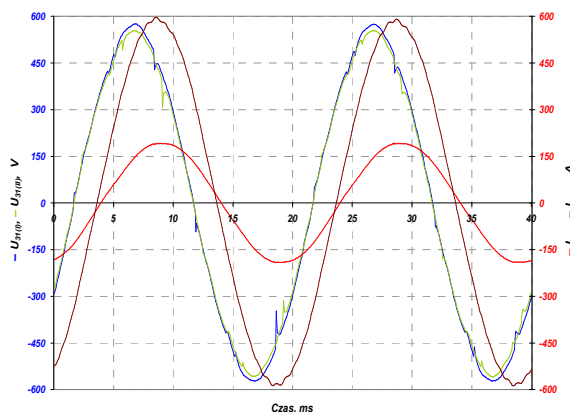
Na podstawie danych przedstawionych na rys. 6 określono względne procentowe wartości zapadów napięć i zestawiono je w tabeli 3.

Tabela 3

Procentowe wartości zapadów napięć

Przedział czasowy	Zmiana, %		
	U_{m12}	U_{m23}	U_{m31}
I (0 – 2 s)	0,00	0,00	0,00
II (2 – 12,5 s)	-1,65	-1,66	-1,70
III (12,5 -22 s)	-4,45	-4,46	-4,60
IV (22 -28 s)	0,15	0,17	0,11

Procentowe wartości zapadów napięć międzyfazowych są mniejsze niż wartości dopuszczalne określone w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki [8] i normie [7], które wynoszą 10%. O połowę mniejsze od dopuszczalnych odchylenia napięć wynikają ze stosunkowo dużej mocy zwarcia i odpowiednio wysokiego wskaźnika określonego wzorami (1) i (2). Uzupełniającymi parametrami ilustrującymi stopień degradacji jakości energii elektrycznej spowodowany rozruchem badanego silnika dwubiegowego są sygnały chwilowe napięcia i prądu odpowiadające pierwszej (I_p) i drugiej (II_p) prędkości obrotowej silnika w czasie jego bezpośredniego rozruchu. Przebiegi chwilowe napięć i prądów przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Chwilowe przebiegi napięć i prądów dla dwóch prędkości w stanie rozruchu silnika

Kształt napięć zasilających z drugiego i trzeciego przedziału czasowego w trakcie rozruchu silnika dwubiegowego niewiele różni się od sinusoidalnego. Zauważalne są w obrębie szczytów nieznaczne zniekształcenia, szczególnie dla napięcia z III przedziału czasowego, lecz ich

znikomy stopień nie wpływa w sposób istotny na wzrost wartości współczynnika zawartości wyższych harmonicznych THD_U . Przebiegi prądów rozruchowych dla obu przedziałów czasowych są prawie sinusoidalne.

4. Podsumowanie

Opisany układ napędowy dmuchawy azotu z silnikiem dwubiegowym jest ciekawym obiektem z punktu widzenia eksploatacyjnego. Silnik pracuje w atmosferze azotu, chłodzony jest wodą o dużym przepływie, w związku z tym jego wymiary są stosunkowo niewielkie. Sposób uzwojenia stojana o przelączalnej liczbie biegunów z możliwością rozruchu bezpośredniego i pośredniego charakteryzuje się możliwością pracy przy trzykrotnym przeciążeniu prądowym trwającym około 5 minut podczas gwałtownego schładzania hartowanych detali stalowych. Uzyskanie tak dużego przeciążenia prądowego w obwodzie stojana wymagało zaprojektowania wirnika o odpowiedniej konstrukcji oraz zastosowania prętów klatki wykonanych ze specjalnego stopu miedzi. Bliskość rozdzielni średniego napięcia wyposażonej w transformator SN/nn pozwala na skuteczne ograniczenie niepożądanych zaburzeń elektromagnetycznych wprowadzanych do sieci zasilającej w węzle wspólnego przyłączenia. Wyniki przeprowadzonej analizy jakości energii elektrycznej wskazują, iż praca pieca oporowego wyposażonego w silnik dwubiegowy nie powoduje degradacji jakości energii elektrycznej w stopniu przekraczającym wartości dopuszczalne określone w obowiązujących przepisach i normach [7,8].

5. Literatura

- [1]. Cantoni Group. Trójfazowe silniki indukcyjne wielobiegowe. Katalog.
- [2]. Dokumentacja pieca oporowego próżniowego VUTK 524.
- [3]. Ekspertyza Nr TL/029/O-E/12 z dn.18.09.2012 r. BOBRME KOMEL. Ocena stanu technicznego silnika typu H200-1537 2020.00 B-5 o numerze fabrycznym 9945 197 2 0001 stanowiący napęd dmuchawy pieca próżniowego. Autor: Artur Polak.
- [4]. ELMOR Gdańsk. Maszyny elektryczne prądu stałego, prądu przemiennego, hamulce elektromagnetyczne. Katalog.
- [5]. Glinka T., Jakubiec M.: Napędy elektryczne wielobiegowe. Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe BOBRME KOMEL. Nr 71, 2005 r. ISSN 0239-3646, str. 135 - 142.

- [6]. Jagieła K., Gała M.: Pomiar i analiza parametrów jakości energii elektrycznej pobieranej przez urządzenia elektrotechnologiczne do obróbki cieplnej. Raport nie publikowany. Częstochowa, 10.2012 r.
- [7]. Norma PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
- [8]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektro-energetycznego. Dz. U. Nr 93/2007 poz. 623.
- [9]. Sidorowicz J.: Napęd elektryczny i jego sterowanie. Wyd. Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 1994.
- [10]. Zawilak J.: Dwubiegowe silniki prądu przemiennego. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Nr 58. Studia i Materiały, Nr 25/2005, s. 25-36
- [11]. Zawilak J., Zawilak T.: Silniki elektryczne w napędach górniczych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 85/2010, s. 7- 12.
- [12]. Zawilak T., Antal L.: Polowo-obwodowy model dwubiegowego silnika indukcyjnego. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 56, Studia i Materiały, Nr 24/2004.
- [13]. Zembrzuski J.: Atlas uzwojeń silników indukcyjnych. WNT Warszawa 1991.