

doi:10.15199/48.2016.04.47

Wirnik klatkowy z rozruchowymi zwojami zwartymi

Streszczenie. O trwałości silnika klatkowego dużej mocy, eksploatowanego w trudnych warunkach rozruchowych (rozruchy długotrwałe, lub często powtarzane) decyduje rozwiązanie wirnika, ponieważ właśnie wirnik narażony jest podczas rozruchu na największe obciążenia termiczne i dynamiczne. Najbardziej odpornym na destrukcyjne działanie prądu rozruchowego jest wirnik z tzw. prętami biernymi. Rozwiązanie to ma jednak swoje mankamenty: pręty bierne o dużej masie zajmują znaczną objętość w czynnej części silnika. W artykule opisano nowatorskie rozwiązanie, w którym rolę litych prętów biernych spełniają zwoje zwarte rozmieszczone pojedynczo, w każdym żłobku wirnika. Ich masa jest znacząco mniejsza od masy prętów litych. Ponadto reluktancja obwodu magnetycznego strumienia rozproszenia żłobkowego w wirniku z rozruchowymi zwojami zwartymi jest znacznie mniejsza, co skutkuje zmniejszeniem prądu rozruchowego silnika. Doświadczalny silnik klatkowy mocy 90 kW ze zwojami zwartymi w wirniku został wykonany i przebadany w Instytucie KOMEL w 2014 roku.

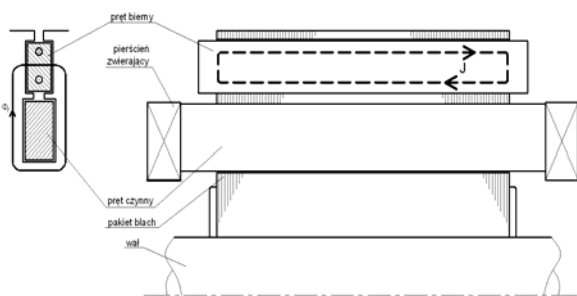
Abstract. Exploitation durability of the squirrel cage motor at heavy starting conditions depends on their rotor design. The most reliable induction motor for frequently repeated or long lasting starts is that with idle bars in the rotor. But idle bars design has their disadvantages as well. The idle bars should be massive, they take a pretty large volume of the active part of the rotor. In the paper a special (patented by Komel) rotor design, with short circuited turns in the rotor are given. The motor was designed, manufactured and tested at KOMEL Institute, Katowice, in 2014. (**Squirrel cage rotor with short circuited starting turns**).

Słowa kluczowe: silnik klatkowy, zwarte zwoje rozruchowe wirnika.

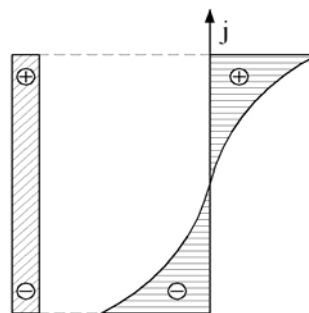
Keywords: squirrel cage motor, short circuited starting turns.

Wstęp, wirniki z prętami biernymi

Niezawodną pracę silników indukcyjnych dużej mocy przy rozruchach długotrwałych determinuje uzwojenie klatkowe wirnika, ponieważ w trakcie rozruchu właśnie to uzwojenie narażone jest na największe obciążenia termiczne i dynamiczne. Najbardziej odpornym na niszczące działania prądu rozruchowego jest wirnik klatkowy z tzw. prętami biernymi [1,2,3]. W rozwiązaniu tym, w żłobku wirnika znajdują się dwa pręty, zwykle o prostokątnym przekroju. Pręty dolne, zwarte pierścieniami tworzą klatkę pracy, pręty górne, nie połączone ze sobą, są prętami rozruchowymi (tzw. pręty bierne). Zasadę konstrukcji i działania wirników z prętami biernymi przedstawiono na rys. 1. W Kraju silniki klatkowe dużej mocy z prętami biernymi produkowane są od lat 90-tych w Zakładzie Maszyn Elektrycznych EMIT S.A. (seria Sf-E silników o napięciu 6000V, wznios osi wału $H = 355-560$ mm, zaprojektowana przez Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL). Silniki te zdają doskonale egzamin wysokiej trwałości eksploatacyjnej, szczególnie w napędach urządzeń potrzeb własnych energetyki. Rozwiązanie wirnika z prętami biernymi ma jednak również swoje mankamenty. Pręty bierne zajmują znaczną objętość w części czynnej, co ogranicza możliwość ich stosowania tylko do maszyn o odpowiednio dużej średnicy, a więc i dużej mocy. Prąd w prętach biernych płynie w górnej części pręta w jednym kierunku, a w dolnej części pręta w kierunku drugim (rys 2). Środkowa część pręta pozostaje praktycznie nie wykorzystana, choć zajmuje dużą objętość części czynnej.



Rys.1. Zasada budowy i działania wirnika z prętami biernymi



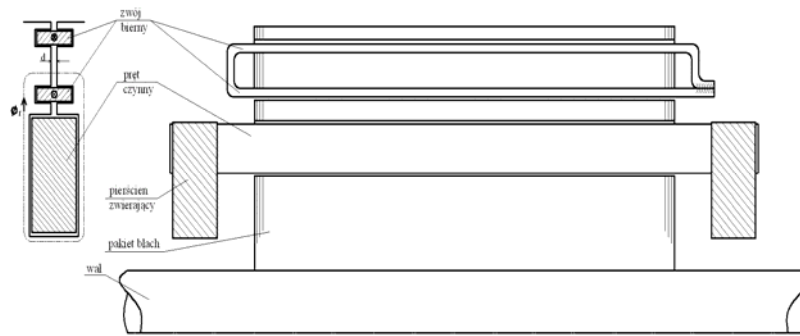
Rys.2. Rozkład gęstości prądu j na wysokości pręta biernego

Wirnik klatkowy z rozruchowymi zwojami zwartymi

Mankamenty rozwiązania z rozruchowymi prętami biernymi zostały wyeliminowane przez zastąpienie litych prętów biernych zwojami zwartymi rozmieszczonymi pojedynczo w żłobkach wirnika. Strumień rozproszenia żłobkowego prętów dolnych (czynnych) zamyka się poprzez zwoje zwarte.

Rozwiązanie wirnika ze zwartymi zwojami biernymi, (czyli zwojami rozruchowymi), przedstawiono na rys. 3. Przekrój poprzeczny przewodu tworzącego zwoj zwarty jest znacznie mniejszy od przekroju litego pręta biernego. Gęstość prądu w górnym i dolnym przewodzie tworzącym zwoj jest praktycznie jednorodna.

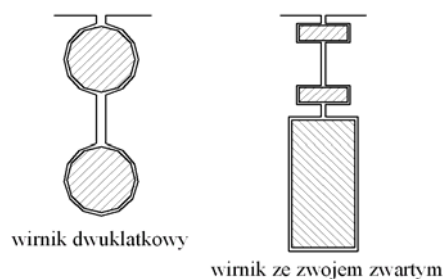
Natomiast reluktancja w obwodzie magnetycznym Φ_r strumienia rozproszenia żłobkowego prętów czynnych (o jej wielkości decyduje grubość szczeliny powietrznej – wymiar „d” na rys 3) jest znacząco mniejsza niż w przypadku rozwiązania z litymi prętami biernymi. Przy wykrawaniu blach wirnika techniką laserową wymiar „d” może być bardzo mały. Zwiększa to efekt działania zwoju biernego i dodatkowo skutkuje wzrostem reaktancji zwarcia silnika, a więc zmniejszeniem jego prądu rozruchowego. Masa miedzi tworzącej zwoje zwarte jest znacząco niższa od masy litych prętów biernych (jest również znacznie mniejsza od masy klatki rozruchowej silnika dwuklatkowego). Zwarte zwoje nie wymagają żadnego zabezpieczenia od osiowego wysuwania się z pakietu blach, co przy prętach biernych stanowi zwykle pewien problem.



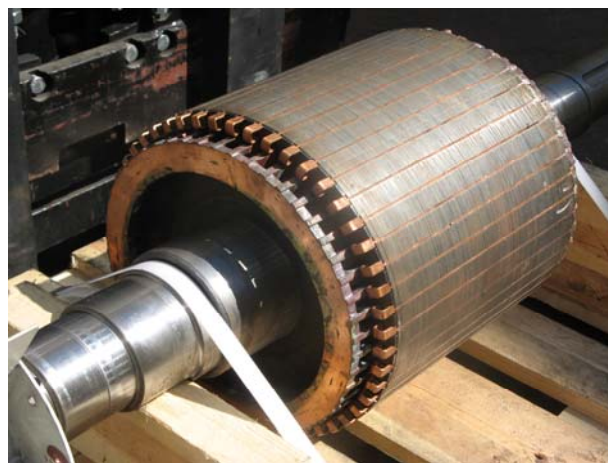
Rys.3. Zasada budowy i działania wirnika ze zwartym zwojem rozruchowym

Wykonanie silnika eksperymentalnego

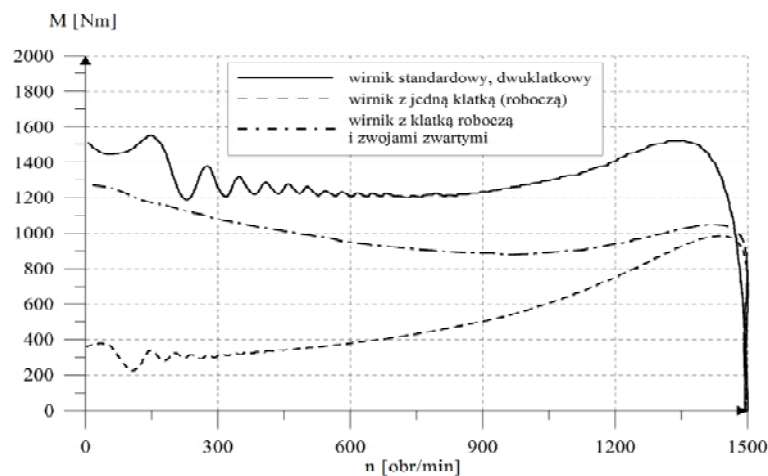
W Instytucie KOMEL wykonano dwa dodatkowe wirniki dla typowego, seryjnego silnika klatkowego Sg 280 M-4 mocy 90 kW (wznios osi wału $H=280$ mm, zewnętrzna średnica blach stojana $D_z = 470$ mm). Pierwszy, to wirnik klasyczny dwuklatkowy (prętowany), obydwie klatki z prętów o przekroju kołowym; klatka rozruchowa - pręty mosiężne. Drugi wirnik z biernymi zwojami rozruchowymi i klatką pracy o prętach prostokątnych (miedź). Kształt żłobków obydwu dodatkowych wirników pokazano na rysunku 4; widok wykonanego wirnika na rys. 5.



Rys.4. Kształt żłobków wirników dodatkowych silnika Sg 280



Rys.5. Wykonany wirnik ze zwojami zwartymi dla silnika Sg 280 M-4



Rys.6. Pomierzone przebiegi momentu $M=f(n)$ silnika eksperymentalnego Sg 280 M-4, z różnymi wirnikami, przeliczone na napięcie $U=400V$

Wyniki badań silnika eksperymentalnego

W Laboratorium Maszyn Elektrycznych Instytutu KOMEL przeprowadzono badania silnika Sg 280 z nowymi wirnikami. Ze względu na ograniczenia mocy zasilającej w Laboratorium, pomiary prądu i momentu rozruchowego wykonano przy obniżonym napięciu (172-175 V; napięcie znamionowe silnika wynosi 400V). Rozwiązanie ze zwojami zwartymi badano dwukrotnie: najpierw wirnik z samą klatką pracy, następnie z klatką pracy i założonymi zwojami zwartymi. (Pełne wyniki badań zawarte są w Sprawozdaniu KOMEL Nr TL/013/O13, [4]). Na Rys. 5. podano pomierzone przebiegi prądu i momentu obrotowego silnika eksperymentalnego typ Sg 280 M-4, z trzema wersjami wirnika, przeliczone na napięcie 400 V:

- wirnika dwuklatkowego,
- wirnika jednoklatkowego bez zwoju zwartego,
- wirnika ze zwojem zwartym.

Podsumowanie, wnioski

Przeprowadzony eksperyment potwierdził, iż wirnik klatkowy ze zwojami zwartymi może być korzystną alternatywą zarówno dla rozwiązania z prętami biernymi, jak i dla wirnika dwuklatkowego. Przy znacznie mniejszej wartości prądu rozruchowego, moment rozruchowy wirnika ze zwartym zwojem jest na poziomie wirnika dwuklatkowego. Przy zwartym zwoju uzyskujemy wyraźnie większy wskaźnik dobroci rozruchu d_R określany jako stosunek momentu do prądu rozruchowego, $d_R = M_R / J_R$, przy $n = 0$. Wyznaczone pomiarowo (przy $U = 174$ V) wartości d_R dla badanego silnika Sg 280 wynosiły:

- $d_R = 0.669$ [Nm/A] - dla wirnika dwuklatkowego,
- $d_R = 0.795$ [Nm/A] – dla wirnika ze zwojami zwartymi.

Dla wykonania zwojów zwartych wystarcza znacznie mniejsza ilość materiału, niż to konieczne dla prętów biernych, czy dla klatki rozruchowej. W omawianym silniku masa klatki rozruchowej wirnika wynosiła:

- 7.7 kg mosiądz + 8.3 kg miedź (wirnik dwuklatkowy),
- 4,5 kg miedź (wirnik ze zwojami zwartymi).

Technologia wykonawstwa zwojów zwartych jest znacznie prostsza niż całej klatki rozruchowej.

Według naszej opinii, trwałość eksploatacyjna wirnika ze zwojami zwartymi przy trudnych warunkach rozruchowych będzie podobna, a raczej wyższa niż trwałość wirnika z prętami biernymi (zwarte zwoje nie wysuwają się osiowo z pakietu). Jak pokazały wyniki badań (Rys.), zwoje zwarte w wirniku skutecznie tłumią drgania i pulsacje momentu silnika występujące w pierwszej fazie rozruchu. Silnik rusza gładko, bez uderzenia hałasu i wibracji charakterystycznych dla załączenia i rozruchu silnika standardowego. Może to mieć szczególne znaczenie przy zasilaniu przemiennikowym.

Instytut KOMEL uzyskał w r. 2015 patent na rozwiązanie wirnika klatkowego ze zwartymi zwojami rozruchowymi.

Autorzy: dr hab. inż. Jakub Bernatt, prof. KOMEL, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, E-mail: dyrekcja@komel.katowice.pl; mgr inż. Maciej Bernatt, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, E-mail: m.bernatt@komel.katowice.pl.

LITERATURA

- [1] Alger Ph. *Induction Machines, Their Behavior and Uses*. Gordon and Breach, N. York 1970, pp.: 272, 283.
- [2] Śliwa Br. Optymalizacja obwodu elektromagnetycznego silników indukcyjnych dużej mocy z wirnikiem wyposażonym w pręty bierne. *Praca doktorska*. Politechnika Śląska Wydział Elektryczny, Gliwice, 1979.
- [3] Bernatt J. Squirrel Cage Induction Motors with Idle Bars. *Archives of Electrical Engineering (Archiwum Elektrotechniki)* Vol 59 (2010) s 1-8.
- [4] Wyniki badań silnika klatkowego Sg 280 M-4, 90 kW, 400V, 1500 obr/min. *Sprawozdanie Instytutu KOMEL nr TL/013/O13*.
- [5] Polak A., Rasz Z. Diagnostyka maszyn elektrycznych w górnictwie. *Maszyny Problemowe - Zeszyty Problemowe*, KOMEL, 2003, nr 66 s. 77.
- [6] Uzwojenie wirnika silnika indukcyjnego klatkowego. Zgłoszenia Instytutu KOMEL w Urzędzie Patentowym RP, nr: P.398511, P.406012.
- [7] Bernatt M., Rut R., Mróz J. Bezpośredni rozruch zagrożeniem dla silników klatkowych dużej mocy. *Przegląd Elektrotechniczny* 2012 nr 1a s.207 – 212.