

Jakub Bernatt, Maciej Bernatt
BOBRME KOMEL, Katowice

SILNIKI KLATKOWE DUŻEJ MOCY DO CZĘSTO POWTARZANYCH LUB DŁUGO TRWAJĄCYCH ROZRUCHÓW

BIG CAPACITY SQUIRREL CAGE MOTORS FOR FREQUENTLY REPEATED OR LONG LASTING STARTS

Abstract: High capacity induction squirrel cage motors used at different industrial drives are usually started by switching direct on line. Starting current, several times higher than nominal load current, causes thermal and mechanical, dynamic stresses dangerous for motor's structure. Both, stator and rotor windings are endangered at starting period, but stresses in rotor cages are usually considerable higher, therefore rotor design (and its manufacturing process) is of high importance for motor's durability.

Wstęp

Większość silników klatkowych średniej i dużej mocy, o napięciu znamionowym 6 kV i większym, eksploatowanych obecnie w napędach przemysłowych odbywa rozruch poprzez bezpośrednie załączenie na pełne napięcie sieci. Współczesne zakłady przemysłowe mają sieci o wystarczająco dużej mocy zwarciowej, na taki rozruch pozwalające. Rozruch bezpośredni jest regułą we wszystkich urządzeniach potrzeb własnych energetyki, nawet w napędach największych mocy. Rozruch bezpośredni jest okresem największych narażeń silnika klatkowego. Narażenia te występują przede wszystkim w wirniku. Z przepływem prądu rozruchowego, którego natężenie w stanie elektromagnetycznie ustalonym jest kilkakrotnie większe od natężenia przy obciążeniu znamionowym, związane są efekty termiczne i dynamiczne, działające niszcząco na strukturę silnika [1,2] przede wszystkim jednak na uzwojenie klatkowe wirnika.

Termiczne efekty przepływu prądu rozruchowego

Przepływ prądu rozruchowego powoduje szybkie nagrzewanie się uzwojeń. Czas trwania rozruchu jest znacząco krótszy od cieplnych stałych czasowych uzwojeń, stąd proces nagrzewania uzwojenia (stojana lub klatek wirnika) podczas rozruchu z dobrym przybliżeniem traktować można jako proces adiabatyczny; dla uzwojenia stojana zostało to potwierdzone doświadczalnie [3].

Ilość ciepła dQ wydzielająca się wskutek przepływu prądu I w uzwojeniu o rezystancji R w czasie dt wynosi:

$$dQ = I^2 R dt \quad (1)$$

Po prostych przekształceniach otrzymujemy stąd:

$$d\Theta = j^2 \frac{dt}{\gamma c} \quad (2)$$

gdzie:

Θ - przyrost temperatury uzwojenia od stanu zimnego $[K]$

j - gęstość prądu w przewodzie $[A/mm^2]$

c - ciepło właściwe miedzi na jednostkę objętości $[J/cm^3K]$

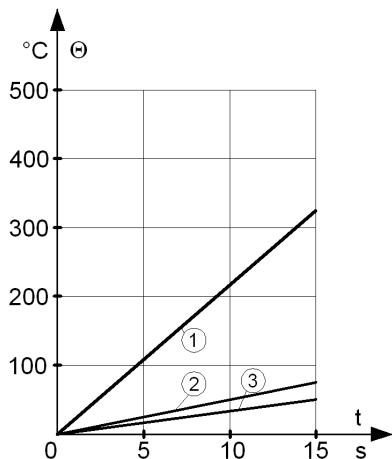
γ - konduktywność właściwa materiału

$$\text{uzwojenia } \left[\frac{m}{\Omega mm^2} \right]$$

lub też, stosowany często w obliczeniach inżynierskich wzór na szybkość narastania temperatury uzwojenia w procesie adiabatycznym:

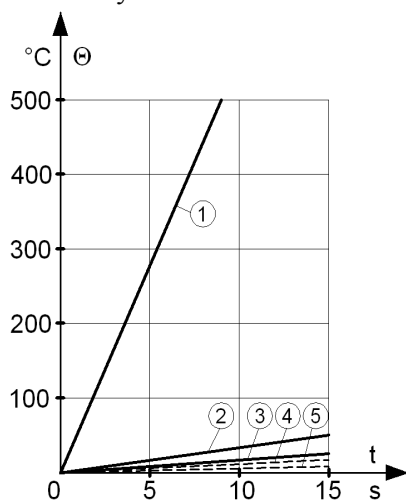
$$v = \frac{d\Theta}{dt} = \frac{j^2}{\gamma c} \left[\frac{K}{s} \right] \quad (3)$$

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono obliczeniowe, adiabatyczne przebiegi narastania temperatury uzwojeń dla poślizgu $s=1$ (blokada wirnika) przykładowego, standardowego silnika klatkowego mocy 800 kW z dwoma wersjami wirnika: z wirnikiem jednoklatkowym, głębokożłobkowym o prostokątnych, miedzianych prętach klatki oraz z wirnikiem dwuklatkowym, posiadającym klatkę rozruchową z prętów mosiężnych o przekroju kołowym, a klatkę pracy z prętów miedzianych o przekroju prostokątnym.



Rys. 1. Narastanie temperatury uzwojeń przy poślizgu $s=1$ (wirnik zablokowany) silnika mocy 800 kW z wirnikiem jednoklatkowym, głębokożłobkowym, 1-pręt klatki wirnika, 2-pierścień zwierający klatki, 3-uzwojenie stojana

W wirniku dwuklatkowym graniczny dopuszczalny poziom temperatury prętów klatki rozruchowej osiągnąć jest w bardzo krótkim czasie. Ogranicza to stosowanie silników dwuklatkowych tylko do napędów o krótkim czasie rozruchu. Szybkie nagrzewanie wirnika podczas rozruchu skutkuje powstawaniem dużych naprężeń mechanicznych o podłożu termicznym, które również mogą być poważnym zagrożeniem dla struktury wirnika.

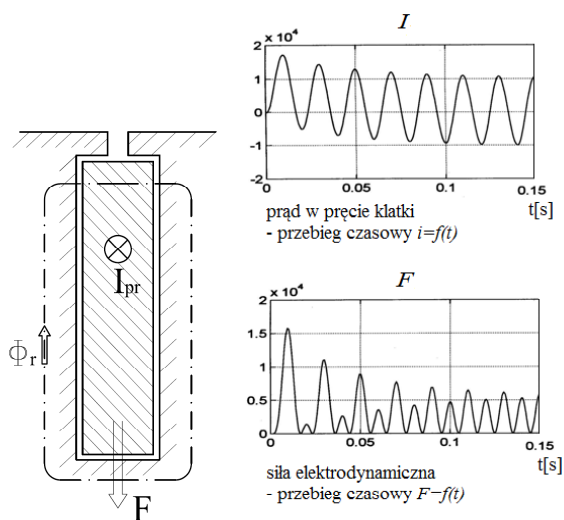


Rys. 2. Narastanie temperatury uzwojeń przy poślizgu $s=1$ silnika 800 kW z wirnikiem dwuklatkowym, 1-pręt klatki rozruchowej, 2-pierścień klatki rozruchowej, 3-uzwojenie stojana, 4,5-pręt i pierścień klatki pracy

Rysunki nr 1, 2 pokazują, że nawet dość długo trwający pojedynczy rozruch nie stanowi termicznego zagrożenia dla przykładowego silnika (800 kW, $2p=4$).

Efekty dynamiczne

Płynący w uzwojeniu stojana i klatce wirnika prąd powoduje powstawanie sił elektrodynamicznych działających na te uzwojenia. Uzwojenia stojana współczesnych silników dużej mocy wykonywane są w technologii oznaczanej symbolem VPI (vacuum pressure impregnation), co czyni je bardzo odpornymi na działanie udarów i sił dynamicznych występujących w trakcie rozruchu, lub podczas zwarć. Siły elektrodynamiczne są natomiast poważnym zagrożeniem dla klatki wirnika. Siła elektrodynamiczna w klatce jest efektem współdziałania prądu płynącego w pręcie oraz sprzężonego z nim strumienia magnetycznego rozproszenia żłobkowego wirnika. Jest to siła pulsująca o częstotliwości podwojonej w stosunku do częstotliwości prądu wirnika, jej amplituda proporcjonalna jest do drugiej potęgi natężenia prądu. Siła ta osiąga znaczne wartości w początkowej fazie rozruchu, gdy w prądzie rozruchowym płynie jeszcze składowa aperiodyczna (rysunek 3).



Rys. 3. Siła elektrodynamiczna F wzbudzana w żłobkowej części prostokątnej pręta klatki

Chwilowe wartości żłobkowej siły elektrodynamicznej F (przy założeniu nieskończonej wielkiej przenikalności magnetycznej żelaza) wynoszą [3]:

Dla żłobka o kształcie prostokątnym:

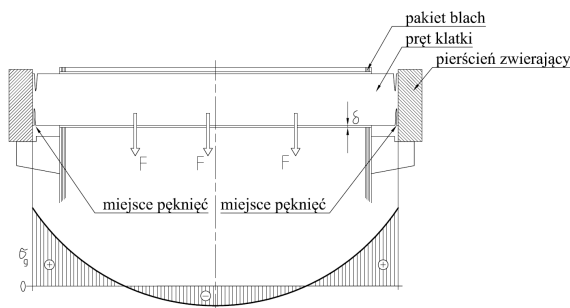
$$F = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 l i^2}{d} \quad (4)$$

dla żłobka o kształcie kołowym:

$$F = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 l i^2}{\pi d} \quad (5)$$

gdzie: μ_0 - przenikalność magnetyczna powietrza, $4\pi 10^{-7}$ [H/m], i - prąd w przewodzie (wartość chwilowa) [A], l - długość pakietu blach [m], d - szerokość/średnica żłobka wirnika [m].

W przypadku istnienia niewielkich nawet luzów między prętami a dnem żłobka, siła elektrodynamiczna wywołuje w prętach klatki niebezpieczne naprężenia zginające, pulsujące, powodujące zmęczenie materiału. Maksimum tych naprężeń występuje na połączeniu prętów z pierścieniami zwierającymi, jak pokazuje rysunek 4.



Rys. 4. Rozkład naprężeń zginających σ_g od siły elektrodynamicznej F , działającej na pręt klatki wirnika przy dostatecznym dużym promieniowym luzie δ (luz większy od strzałki ugięcia pręta)

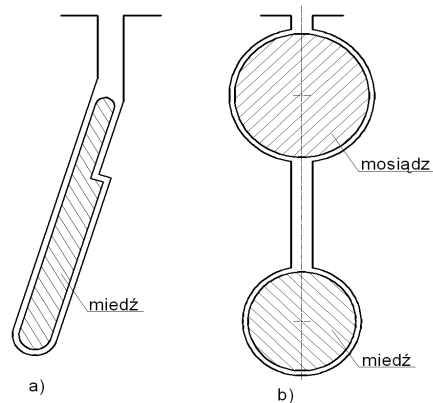
Silniki do wielkiej ilości rozruchów krótkotrwałych

Reżim pracy silników klatkowych z dużą częstością załączeń przy krótkim czasie trwania rozruchu występuje często w napędach układów pomp, gdy potrzebny zmienny wydatek pompy jest osiągnięty metodą załączania i wyłączania, a nie np. poprzez regulację prędkości obrotowej. Silnik klatkowy w takim napędzie musi mieć wirnik szczególnie odporny na dynamiczne efekty przepływu prądu rozruchowego. Naturalnym rozwiązaniem może być tu wirnik dwuklatkowy, posiadający klatkę rozruchową wykonaną z prętów o przekroju kołowym. Żłobkowa siła elektrodynamiczna działająca podczas rozruchu na taki pręt jest znacznie mniejsza niż w przypadku pręta prostokątnego w wirniku głębokożłobkowym p. (4), (5), ponadto pręt okrągły ma znacznie mniejszy wskaźnik zginania (jest bardziej elastyczny), zatem siła elektrodynamiczna nie wywołuje na połączeniach pręt-

tów z pierścieniem tak wielkich naprężeń. Klatka rozruchowa wirnika dwuklatkowego musi być jednak odpowiednio zaprojektowana, aby podczas rozruchu nie osiągać niebezpiecznego poziomu temperatury. Właściwy dobór wirnika dla napędu o krótkim czasie rozruchu i wielkiej ilości załączeń ilustruje podany niżej przykład I.

Przykład I

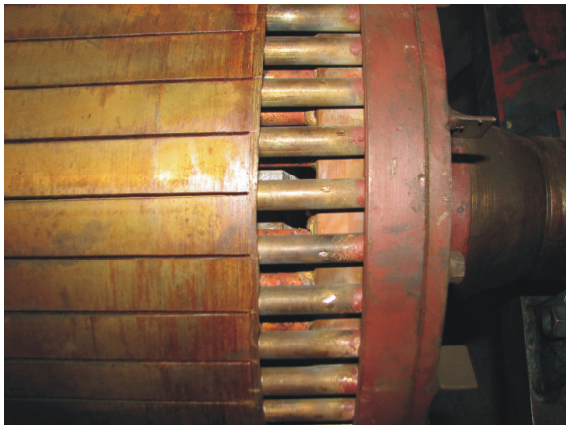
W napędach pomp wody zasilającej tzw. kotły odzysknicowe, przechwytyjące ciepło odpadowe w stalowni konwertorowej jednej z krajowych hut stosowane były silniki klatkowe mocy 515 kW, 3000 obr/min. Dostawca silników (znany europejski producent) deklarował trwałość rozruchową silników jako 5000 rozruchów przy załączaniu bezpośrednio na sieć. Reżim pracy kotła wymagał jednak częstych, choć krótkotrwałych uruchomień pomp. Mimo iż czas trwania rozruchu silnika sprzęgniętego z pompą był bardzo krótki (1,4-1,6 s), już po odbyciu 7000-8000 rozruchów występowały typowe uszkodzenia klatek wirnika od sił elektrodynamicznych działających podczas rozruchu – pęknięcia prętów na połączeniu z pierścieniami zwierającymi (był to silnik z wirnikiem jednoklatkowym, głębokożłobkowym). Użytkownik pomp zdecydował się na modyfikację wirników w silnikach 515 kW. Zamiast wirników jednoklatkowych o kształcie żłobka wirnika jak na rysunku 5a, zastosowano specjalnie do tych napędów i tych silników zaprojektowane wirniki dwuklatkowe o kształcie żłobka jak na rys. 5b.



Rys. 5. Kształt żłobka wirnika silnika mocy 515 kW, 3000 obr/min; a) żłobek wirnika oryginalnego, b) żłobek wirnika zmodyfikowanego [5]

Zdały one doskonale egzamin eksploatacyjny pracując bezawaryjnie ponad 20 lat. Rysunek 6

przedstawia fragment zmodernizowanego wirnika. Zdjęcie wykonano podczas przeglądu silnika po 25 latach jego eksploatacji; przegląd nie wykazał żadnych pęknięć, uszkodzeń lub deformacji klatek wirnika.



Rys. 6. Fragment zmodyfikowanego wirnika silnika 515 kW, stan po 25 latach eksploatacji

Silniki do rozruchów długotrwałych

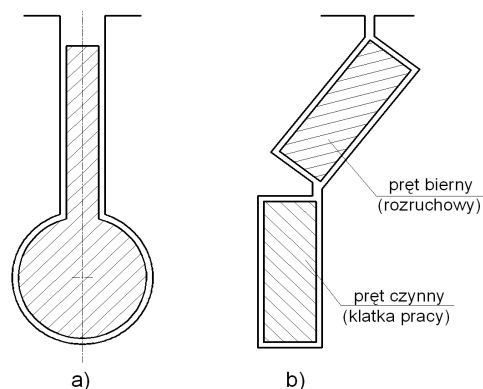
Długotrwałe rozruchy występują przy napędach urządzeń o wielkiej masie zamachowej, jak wentylatory promieniowe, ssawy dymowe, wirówki. Silniki klatkowe przeznaczone do takich napędów muszą mieć przede wszystkim wirniki odpowiednio zwymiarowane pod względem termicznym, ponieważ w uzwojeniu wirnika w czasie rozruchu wydziela się ciepło równe energii kinetycznej, którą osiąga układ mechaniczny: wirnik silnika z wirnikiem maszyny napędzanej. Temperatura w elementach uzwojenia wirnika podczas rozruchu narasta znacznie szybciej niż w uzwojeniu stojana – p. rysunki 1, 2. Jeśli rozruch długotrwały ma być często powtarzany, wówczas wirnik musi być również skutecznie zabezpieczony od szkodliwych oddziaływań dynamicznych prądu rozruchowego.

Dla rozruchów długotrwałych stosuje się zwykle silniki jednoklatkowe, głębokożłobkowe, ze specjalnym mocowaniem prętów w żłobkach, ograniczającym do minimum niebezpieczne luzy promieniowe pręta w żłobku, jednak rozwiązaniem najbardziej predysponowanym dla długich lub bardzo długich (trwających powyżej 60 s) rozruchów jest wirnik z tzw. prętami „biernymi” (*idle bar rotor*). Budowa i zasady działania silników z takimi wirnikami opisane są w literaturze [4], metody projektowania i własności rozruchowe podano w [5, 6]. W podanym niżej przykładzie II przedstawiono optymalny dobór

wirnika dla silnika dużej mocy o długich i często powtarzanych rozruchach.

Przykład II

Napęd ssaw dymowych stalowni jednej z hut stanowią silniki klatkowe dwubiegowe mocy 2000/500 kW, $2p=4/8$, o prędkości obrotowej 1500/750 obr/min. Silniki pracują w ruchu ciągłym, rozruch (przeciętnie 1 raz w miesiącu) odbywa się przy mniejszej prędkości obrotowej, a następnie co godzinę następuje przełączenie na prędkość wyższą i praca przez 20-25 minut. Czas dochodzenia silnika z niższej, do pełnej, wyższej prędkości obrotowej wynosi około 16-17 s, w tym czasie w uzwojeniu stojana (i klatce wirnika) płynie prąd rozruchowy, po osiągnięciu pełnej prędkości silnik pracuje przy obciążeniu znamionowym około 20 min, a następnie uzwojenie stojana jest przełączane na prędkość niższą. Silniki w wersji oryginalnej posiadały wirniki jednoklatkowe o specjalnym kształcie żłobka przedstawionym na rysunku 7a.



Rys. 7. Kształt żłobka wirnika silnika mocy 2000/500 kW, 1500/750 obr/min; a) żłobek wirnika oryginalnego, b) żłobek wirnika zmodyfikowanego [5]

W ciągu roku dokonywanych było około 7000-8000 przełączeń i rozruchów; przeciętnie po 20000 przełączeniach następowało typowe pękanie klatek od działania żłobkowych sił elektrodynamicznych, w miejscach jak na rysunku 4. Silniki zmodernizowano wprowadzając do nich specjalne wirniki z prętami „biernymi” [5] o przekroju żłobka jak na rysunku 7b. Uzyskano radykalne zwiększenie trwałości eksploatacyjnej silników, rysunek 8 przedstawia widok zmodernizowanego wirnika silnika 2000/500 kW po dokonaniu 70000 rozruchów.



Rys. 8. Zmodyfikowany wirnik silnika 2000/500 kW, 1500/750 obr/min, stan po odbyciu 70000 rozruchów [5]

Podsumowanie, wnioski końcowe

Standardowe silniki klatkowe dużej mocy są wyrobami katalogowymi; producenci określają zazwyczaj ich trwałość rozruchową jako 5000 rozruchów, odpowiednio rozłożonych w czasie. W katalogach podawany jest też dopuszczalny czas pojedynczego rozruchu dla danego silnika. W napędach, gdzie występuje częste załączanie i wyłączenie silnika, lub czas rozruchu silnika jest długi, konieczne jest stosowanie rozwiązań specjalnych. Dotyczy to przede wszystkim rozwiązań wirnika. Inaczej należy dobierać wirnik dla napędu o wielkiej ilości rozruchów krótkotrwałych, inaczej dla rozruchu długotrwałego. Racjonalnym rozwiązaniem jest projektowanie wirnika specjalnie dla danego rodzaju napędu i spodziewanego trybu eksploatacji. Zaprojektowanie i wykonanie specjalnego wirnika dla silnika dużej mocy może być nawet mniej kosztowne od zakupu całego standardowego silnika nowego; natomiast trwałość eksploatacyjna roz-

wiązania specjalnego, już konstrukcyjnie przystosowanego do danego rodzaju napędu jest wielokrotnie wyższa.

Literatura

- [1]. Bernatt M., Rut R., Mróz J., Bezpośredni rozruch zagrożeniem dla silników klatkowych dużej mocy, *Przegląd Elektrotechniczny* (2012), nr 1a, 207-211.
- [2]. Bernatt M., Narażenia silników klatkowych wywołane przepływem prądu rozruchowego, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, (1986), nr 39.
- [3]. Bernatt M., Rut R., Badania własności cieplnych uzwojenia stojana silnika indukcyjnego wysokiego napięcia, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, (1978), nr 25.
- [4]. Alger Ph., Induction Machines, Their Behavior and Uses, *Gordon&Breach*, N.York, (1970).
- [5]. Bernatt J., Silniki wysokiego napięcia dla trudnych warunków rozruchowych (projektowanie i wykonawstwo), *Przegląd Elektrotechniczny*, (2010), nr 8, 294-297.
- [6]. Śliwa B., Własności rozruchowe silników klatkowych z prętami biernymi w wirniku, *Przegląd Elektrotechniczny*, (1979), nr 5, 204-207.

Autorzy

dr hab. inż. Jakub Bernatt
mgr inż. Maciej Bernatt
Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL
Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice
E-mail: info@komel.katowice.pl