

**Maciej Bernatt**  
BOBRME KOMEL, Katowice

## DWA PRZYKŁADY WŁAŚCIWEGO DOBORU SILNIKÓW DUŻEJ MOCY DO CZĘSTO POWTARZANYCH LUB DŁUGO TRWAJĄCYCH ROZRUCHÓW

### TWO EXAMPLES OF PROPER BIG CAPACITY SQUIRREL CAGE MOTOR CHOICE FOR FREQUENTLY REPEATED OR LONG LASTING STARTS

**Streszczenie:** Przemysłowe silniki klatkowe dużej mocy dokonują rozruchu najczęściej poprzez bezpośrednie załączenie do sieci. Uderzenie i przepływ prądu rozruchowego wywołuje w silniku duże naprężenia natury termicznej i dynamicznej, które mogą być groźne zwłaszcza dla klatki wirnika. Silniki klatkowe dużej mocy do rozruchu bezpośredniego muszą mieć odpowiednio zaprojektowane i wykonane klatki wirnika: z reguły inaczej dla silników do wielkiej ilości rozruchów krótkotrwałych, inaczej dla rozruchów długotrwałych. W artykule opisano dwa przykłady rozwiązań wirników dla takich silników: dla silnika 515 kW 2p=2 o wielkiej ilości rozruchów krótkotrwałych, dla silnika 2000 kW 2p=4/8 dla rozruchów długotrwałych. Obydwa silniki pozytywnie przeszły test wieloletniej eksploatacji w trudnych warunkach rozruchowych.

**Abstract:** Big capacity industrial squirrel cage motors are usually started by switching direct on line. Starting current causes thermal and mechanical stresses dangerous for motor's structure. The most dangerous stresses in starting period occur at the rotor. Proper rotor design and its manufacturing process is of high importance for motor's durability. Rotors for short lasting, frequently repeated starts, and rotors for long lasting starts should be designed in special (and different) way. In the paper two examples of proper motor's choice for different starting conditions are presented. A 515 kW motor for short lasting, frequently repeated starts with double cage rotor, and 2000 kW motor for long lasting starts with "idle bar" rotor. The "idle bar" rotor is usually the best solution for long lasting starts. Both the motors with redesigned rotors have successfully passed long lasting exploitation tests.

**Słowa kluczowe:** silniki klatkowe dużej mocy, rozruch bezpośredni, trwałość  
**Keywords:** Dol started high capacity AC motors, durability

#### Wstęp

Większość silników klatkowych dużej mocy o napięciu znamionowym 6000 V dokonuje rozruchu poprzez bezpośrednie załączenie do sieci. Rozruch bezpośredni jest okresem występowania największych narażeń dla silnika klatkowego. [1,2] Trwałość (inaczej: zasób pracy) silnika klatkowego określa się przewidywaną ilością lat jego eksploatacji, ale również ilością przebytych rozruchów. Większość znanych producentów maszyn elektrycznych deklaruje trwałość swych silników klatkowych dużej mocy w wersji standardowej na 5000 rozruchów (przy określonym czasie trwania rozruchu). Trwałość ta podawana jest we współczesnych katalogach silników. W eksploatacji niektórych napędów zasób pracy standardowego silnika dużej mocy – o liczbie 5000 rozruchów - wyczerpuje się już w ciągu jednego roku i silnik ulega uszkodzeniu. Awaria występuje najczęściej w wirniku, bowiem podczas rozruchu klatka jest miejscem lokalizacji największych

narażeń i zagrożeń. Uszkodzenie stojana, choć zwykle ono decyduje o wyłączeniu silnika z eksploatacji, jest najczęściej efektem wtórnym.

KOMEL dysponuje własnymi metodami obliczeń naprężeń termicznych i naprężeń mechanicznych występujących w klatkach wirnika oraz w uzwojeniach stojana podczas rozruchu; posiada też metody projektowania silników odpornych na wyjątkowo trudne warunki rozruchowe. Metody obliczeniowe zostały pozytywnie zweryfikowane w wieloletniej praktyce eksploatacyjnej.

#### Przykład I

*Silnik do wielkiej ilości rozruchów krótkotrwałych.*

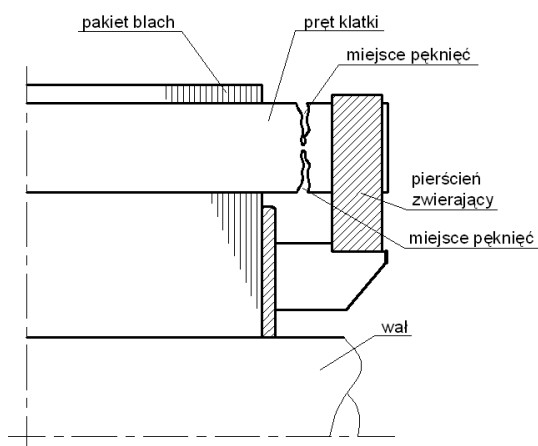
Rozruchy takie występują m.in. w napędach pomp, gdzie potrzebny, zmienny wydatek przepływającego czynnika regulowany jest metodą załączania i wyłączania pompy – a nie poprzez

regulację jej prędkości obrotowej, czy dławienie przepływu zaworami.

Przy rozruchu krótkotrwałym zagrożeniem dla silnika są przede wszystkim zjawiska o charakterze dynamicznym, jak np. szybko zmienne naprężenia od sił elektrodynamicznych, drgania skrętne wirnika, drgania poza pakietowej części klatki, przepięcia łączeniowe. Efekty termiczne podczas krótkiego czasu przepływu prądu rozruchowego zwykle nie zdołają osiągnąć niebezpiecznego poziomu.

### Omówienie wybranego przykładu

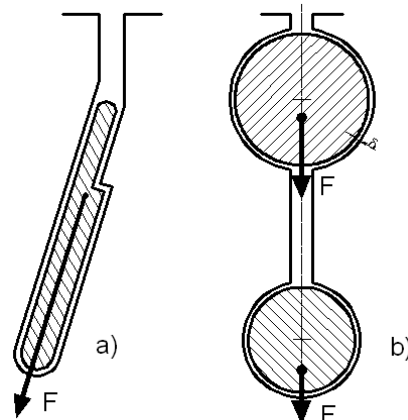
W stalowni jednej z hut, kotły przechwytyjące odpadowe ciepło procesu topienia stali zasilane były pompami wody napędzanymi silnikami klatkowymi mocy 515 kW, 3000 obr/min. Rozruch pompy realizowany poprzez załączenie silnika bezpośrednio na sieć trwał bardzo krótko, około 1.5 sek., jednak proces technologiczny wymagał wielkiej ilości załączeń. Przeciętnie odbywało się to dwa razy w ciągu jednej godziny. W napędach pomp stosowane były standardowe silniki klatkowe 6000 V z wirnikiem głębokożłobkowym, o kształtach żłobków i prętów jak na rys. 1a. Dostawca silników, znany europejski producent określał ich trwałość na 5000 rozruchów. Deklarowany zasób pracy wyczerpywano jednak już po kilku miesiącach eksploatacji. Przeciętnie po odbyciu 6000 - 7000 rozruchów w klatkach wirnika występowały typowe uszkodzenia od działania żłobkowych sił elektrodynamicznych – pęknięcie prętów tuż przy połączeniu z pierścieniem zwierającym (p. rys. 1).



Rys. 1. Pęknięcia prętów klatki oryginalnego wirnika silnika 515 kW (wirnik głębokożłobkowy, pręt o przekroju „L”)

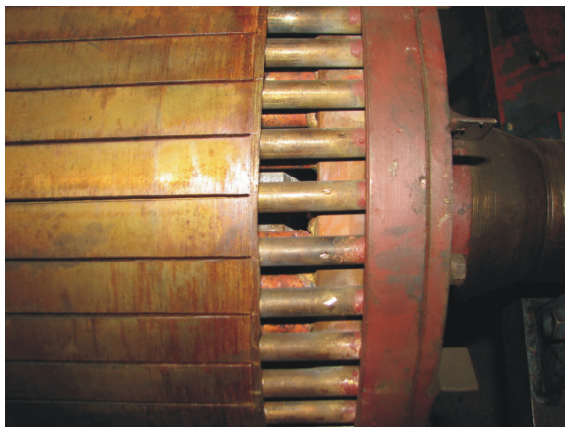
Silniki trzeba było odstawiać z ruchu. Rutynowo oddawano wirniki do remontu. Nie było to działaniem racjonalnym: po pierwszym remoncie wirnik znosił już tylko 2000 do 3000 rozruchów, a po kolejnym remoncie jego trwałość dalej spadała. Producent oferował jednak tylko dostawy silników w wersji standard, o trwałości deklarowanej jako 5000 rozruchów, nie przewidywał natomiast możliwości dostaw silników o podwyższonej trwałości rozruchowej.

W KOMEL-u, po wykonaniu obliczeń elektromagnetycznych i wytrzymałościowych zaprojektowano nowy, specjalny wirnik dla eksploatowanych silników 515 kW,  $2p=2$  [3]. Zdecydowano się na wybór wirnika dwuklatkowego, o kształcie żłobków jak na rys 2b, ponieważ w takim rozwiązaniu, żłobkowa siła elektrodynamiczna, będąca głównym czynnikiem niszczenia klatek przy rozruchu, może mieć najmniejsze wartości (na rys 2a,b długości wektorów  $F$  przedstawiających siły elektrodynamiczne obu rozwiązań proporcjonalne są do wielkości amplitud tych sił).



Rys. 2. Kształt żłobka wirnika silnika 515 kW,  $2p=2$ , gdzie: a) wersja oryginalna, b) wirnik zmodernizowany;  $F$  – żłobkowa siła elektrodynamiczna

Dla nowego wirnika w wersji dwuklatkowej dobrano też optymalne wielkości luzu  $\delta$  między prętami klatki rozruchowej, a ściankami jej żłobków; wielkość tego luzu ma istotne znaczenie dla wytrzymałości oraz trwałości klatki. W rezultacie uzyskano wyrób o wielkiej trwałości eksploatacyjnej; w ciągu 25 lat pracy nie stwierdzono uszkodzeń w żadnym z pięciu wykonanych wirników – p. rys. 3.



Rys. 3. Fragment zmodernizowanego wirnika silnika 515 kW, stan po 25 latach eksploatacji

## Przykład II

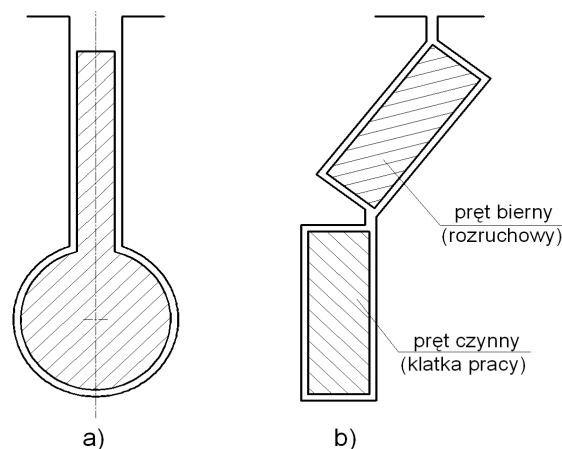
### Silnik do rozruchów długotrwałych.

Rozruch długotrwały występuje przede wszystkim w napędach urządzeń o dużej masie zamachowej. Oprócz narażeń dynamicznych w trakcie długiego rozruchu w silniku występują narażenia termiczne będące efektem przepływu prądu rozruchowego. W prętach klatki wirnika głębokożłobkowego, gdzie wykorzystuje się zjawisko wypierania prądu podczas rozruchu, występuje duży gradient temperatury na wysokości pręta i stąd dodatkowe naprężenia natury termicznej, sumujące się z naprężeniami od sił elektrodynamicznych. We wszystkich rodzajach wirników elementy klatki podczas rozruchu nagrzewają się bardzo szybko, co może doprowadzić do wytopień materiału klatki.

### Omówienie wybranego przykładu

Napęd ssaw dymowych stalowni jednej z hut stanowiły 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 ok. 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 4a. Przy tej wersji wirnika po dokonaniu ok.

8000 przełączeń prędkości obrotowej występowały wyraźne pęknięcia klatek wirnika, zlokalizowane podobnie jak w omawianym wyżej przykładzie silnika 515 kW (rys. 1) [4].



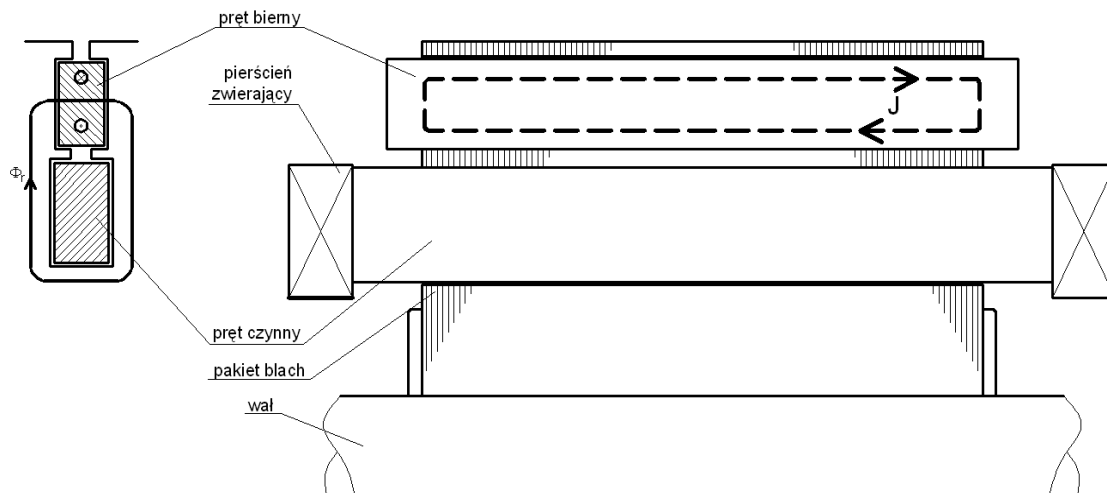
Rys. 4. Kształt żłobka wirnika silnika 2000/500 kW,  $2p=4/8$ ; a) wersja oryginalna, b) wirnik zmodernizowany



Rys. 5. Zmodernizowany wirnik silnika 2000/500 kW stan po odbyciu 70.000 rozruchów

Modernizacji wirników podjął się KOMEL. Zdecydowano się na wybór rozwiązania z tzw. prętami biernymi, (kształt żłobka pokazano na rys 4b), który jest rodzajem wirnika najbardziej odpornym na niszczące działanie przepływu prądu rozruchowego i który zapewnia silnikowi charakterystykę mechaniczną (moment w funkcji prędkości obrotowej) zbliżoną do charakterystyki silnika dwuklatkowego, ograniczając przy tym wydatnie wielkość prądu rozruchowego [5,6].

Zasadę budowy wirnika z prętami biernymi wyjaśnia bliżej rys.6. W każdym żłobku wirnika znajdują się dwa pręty, zazwyczaj o prostokątnym przekroju.



Rys. 6. Zasada budowy i działania wirnika z prętami biernymi

Pręty dolne, tzw. pręty czynne połączone są pierścieniami zwierającymi i tworzą zwykłą klatkę wirnika. Pręty leżące w górnej (przyszczelinowej) części żłobka nie są ze sobą połączone. Strumień magnetyczny  $\Phi_r$  rozproszenia żłobkowego prętów dolnych (czynnych) zamyka się poprzez pręty górne (bierne) wywołując w nich prądy wirowe, jak pokazano na rysunku. Pręty bierne są odpowiednio mocowane w żłobkach tak, aby nie mogły się z nich osiowo wysuwać. Mogą się natomiast swobodnie wydłużać cieplnie, nie powodując przy tym żadnych naprężeń w ustroju klatki. Również siły elektrodynamiczne nie wywołują w tych prętach praktycznie żadnych naprężeń. Prądy w prętach biernych płyną tylko w czasie rozruchu, znacząco poprawiając parametry rozruchowe silnika. Przy pracy znamionowej prąd w nich praktycznie nie płynie – stąd też nazwa: pręty bierne.

### Podsumowanie, wnioski

Silnik klatkowy dużej mocy o napięciu znamionowym 6000 V, w wersji standardowej, znosi przeciętnie nie więcej niż 5000 do 10000 rozruchów przy załączaniu bezpośrednio na sieć, po czym uszkodzeniu (zużyciu) ulega klatka wirnika. Silnik mimo uszkodzenia klatki najczęściej może dalej pracować, także odbywać kolejne rozruchy, jednak degradacja uszkodzonego silnika jest już znacznie przyspieszona. Silnik z uszkodzoną klatką ma też wyraźnie gorsze parametry techniczne (niższa sprawność,

wyższy poślizg, wyższy przyrost temperatury uzwojenia stojana); jednak dopiero uszkodzenie stojana decyduje zwykle o wyłączeniu go z ruchu. Silniki do bezawaryjnej eksploatacji przy wielkiej ilości rozruchów, lub przy rozruchach długotrwałych wymagają stosowania specjalnych rozwiązań klatek wirnika. KOMEL posiada duże doświadczenie w projektowaniu silników do najtrudniejszych warunków rozruchowych [7], wykonane wg tych projektów silniki przeszły pomyślnie sprawdzian wieloletniej eksploatacji w warunkach przemysłowych. Omawiane w artykule dwa przykłady modernizacji silników wymagały wykonania nowych wirników. Wirniki te wykonane zostały:

- dla silników 515 kW,  $2p=2$  - w Zakładzie DAMEL w Dąbrowie Górniczej,
- dla silników 2000/500 kW,  $2p=4/8$  - w Zakładzie EMIT w Żychlinie.

Pomimo, iż do ich wykonania konieczne było wówczas sporządzenie nowych kosztownych narzędzi – wykrojników blach, łączny koszt zaprojektowania i wykonania nowych wirników był niższy od zakupu nowego silnika danej mocy. Obecnie, przy możliwościach laserowego wykrawania blach dowolnych kształtów, wykonanie wirnika specjalnego jest znacznie prostsze oraz mniej kosztowne.

### Literatura

- [1]. Bernatt M.: Narażenia silników klatkowych wywołane przepływem prądu rozruchowego. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, KOMEL, 1986 nr 39, s. 3-10.

- [2]. Bernatt M., Rut R., Mróz J.: Bezpośredni rozruch zagrożeniem dla silników klatkowych dużej mocy. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, nr 1a, s. 207-211.
- [3]. Jakubiec M., Bernatt M., Szczerba J.: Przystosowanie silnika typu AK 400L-10, 515 kW, 6000 V do pracy przy dużej ilości rozruchów. *Materiały Szkoły Niezawodności RELEMA*, 1987, t. XXVI s. 112-124.
- [4]. Zięba K.: Rekonstrukcja wirnika silnika asynchronicznego dwubiegunowego 2000/500 kW. *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, KOMEL*, 1996 nr 52, s. 128-129.
- [5]. Śliwa B.: Optymalizacja obwodu elektromagnetycznego silników indukcyjnych dużej mocy z wirnikiem wyposażonym w pręty bierne. *Politechnika Śląska* 1979. Praca doktorska.
- [6]. Bernatt J.: Squirrel Cage Induction Motors with Idle Bars. *Archives of Electrical Engineering (Archiwum Elektrotechniki)*. 2010, vol. 59, s 1-8.
- [7]. Bernatt J.: Silniki wysokiego napięcia dla trudnych warunków rozruchowych. (projektowanie i wykonawstwo). *Przegląd Elektrotechniczny*, 2010 nr 8, s. 294-297.