

Maciej Bernatt  
BOBRME KOMELI, Katowice

## PRZYSTOSOWANIE SILNIKÓW KLATKOWYCH DO PRACY W WARUNKACH DŁUGO TRWAJĄCYCH LUB CZĘSTO POWTARZANYCH ROZRUCHÓW

### ADJUSTMENT OF SQUIRREL CAGE MOTORS TO LONG LASTING OR FREQUENTLY REPEATED STARTS

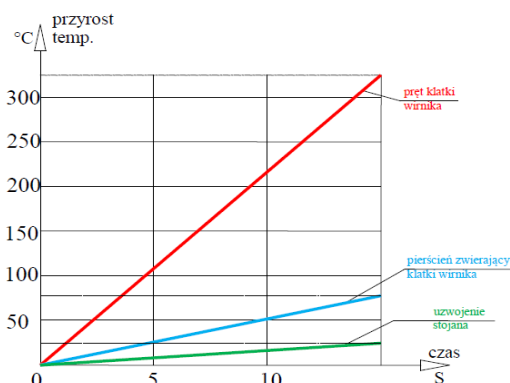
**Abstract:** Induction squirrel cage motors used in many industrial drives, even of high capacity, are started by switching direct on line. Starting current, several times higher than nominal load current, causes thermal and mechanical, dynamic stresses dangerous for motor's structure. Both, stator and rotor windings are endangered at starting period, but stresses in rotor cages are usually higher, therefore proper rotor design (and its manufacturing process) is of high importance for motor's durability. Examples given in the paper show, that even standard motor with new, special, redesigned rotor can withstand as many as 70.00 long lasting starts, executed by switching the motor direct on line.

#### Wstęp

Znaczna część silników klatkowych eksploatowanych w napędach przemysłowych odbywa rozruch poprzez bezpośrednie załączenie na pełne napięcie. Współczesne zakłady przemysłowe mają zwykle sieci o wystarczająco dużej mocy zwarciowej, pozwalającej na taki rozruch. Bezpośredni rozruch jest obecnie regułą we wszystkich urządzeniach potrzeb własnych energetyki, nawet w napędach największych mocy.

Rozruch bezpośredni jest okresem największych narażeń dla silnika klatkowego. Z przepływem prądu rozruchowego, którego natężenie (w stanie ustalonym) jest kilkakrotnie większe od natężenia przy obciążeniu znamionowym - związane są efekty termiczne i dynamiczne, działające niszcząco na strukturę silnika [1,2]. Przepływ prądu rozruchowego oddziałuje na uzwojenie stojana i uzwojenie (klatkę) wirnika. Termiczne efekty przepływu prądu proporcjonalne są do drugiej potęgi gęstości prądu w uzwojeniu. W wirnikach silników klatkowych występują z reguły wyraźnie wyższe gęstości prądu niż w uzwojeniu stojana, stąd klatki podczas rozruchu nagrzewają się znacznie szybciej (rys 1).

Oprócz efektów termicznych przepływ prądu rozruchowego skutkuje efektami dynamicznymi. Współczesne silniki wysokiego napięcia mają uzwojenia stojana wykonane tzw. techniką VPI (Vacuum Pressure Impregnation).

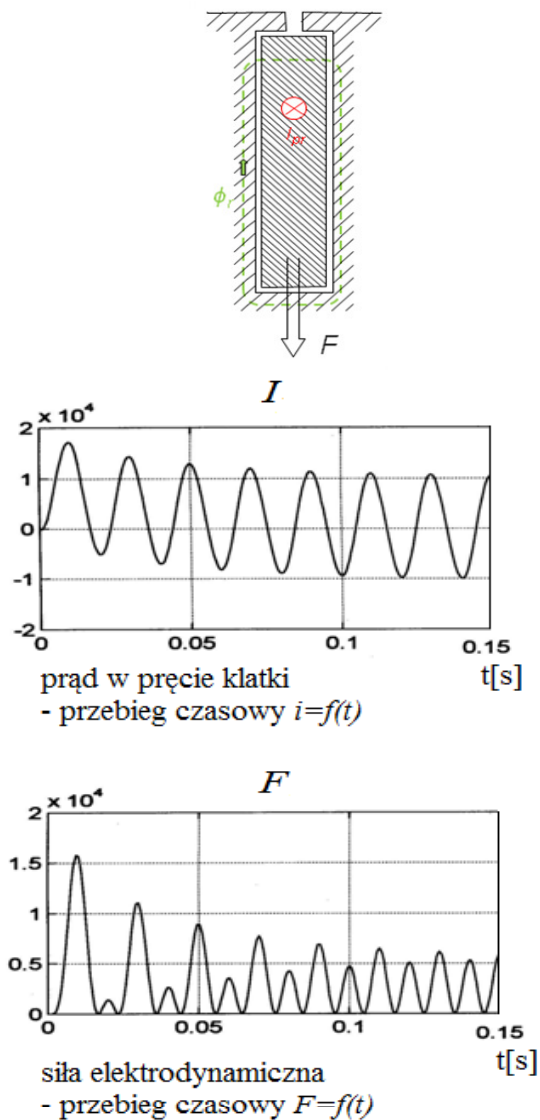


Rys. 1. Narastanie temperatury uzwojeń standardowego silnika mocy 800 kW,  $2p=4$ , jednoklatkowego, w stanie  $s=1$  (wirnik zahamowany)

Cewki z nałożoną izolacją ciągłą układane są do stojana w stanie suchym; również w stanie suchym wykonuje się wszystkie wiązania i mocowania czoł uzwojenia. Nasytanie żywicami odbywa się w kotle w procesie próżniowo-ciśnieniowym, następnie uzwojony stojan utwardzany jest w piecu. Wykonane tą techniką uzwojenie stojana [3] ma strukturę monolityczną, jest odporne nie tylko na wilgoć i wpływy środowiskowe, ale przede wszystkim na działanie sił dynamicznych występujących podczas rozruchu, rewersu, czy powtórnego załączania na nie wygaszone pole. Silniki starsze, z izolacją stojana wykonaną techniką prasowania, jak również wszystkie silniki remontowane (technikę VPI można stosować tylko w trakcie produkcji wyrobu nowego), są znacznie bardziej wrażliwe na działanie rozruchowych i zwarciowych sił elektrodynamicznych.

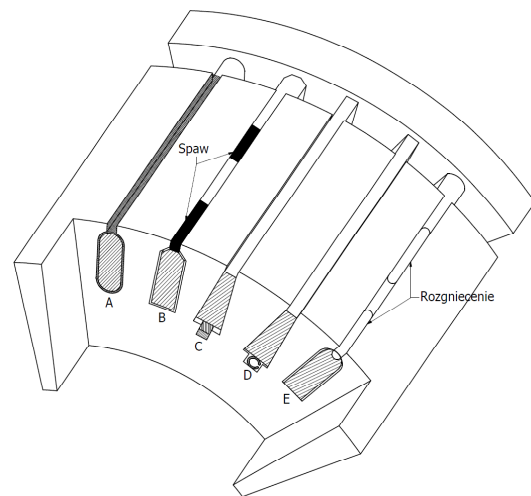
### Klatka wirnika

Uzwojenie klatkowe w trakcie bezpośredniego rozruchu jest najbardziej narażonym fragmentem silnika. Im większa moc silnika, tym te narażenia są też większe. Podstawowe zagrożenie klatki podczas rozruchu stanowi żłbkowa siła elektrodynamiczna będąca efektem współdziałania magnetycznego strumienia rozproszenia żłbkowego oraz prądu przepływającego w prętach wirnika. Jest to siła pulsująca, o częstotliwości podwojonej w stosunku do częstotliwości prądu wirnika. Największe wartości osiąga ona w pierwszych kilku okresach po założeniu, kiedy w prądzie rozruchowym płynie jeszcze składowa aperiodyczna (rys. 2).



Rys. 2. Siła elektrodynamiczna  $F$  wzbudzana w żłbkowej części prostokątnej pręta klatki

Siła ta wywołuje w prętach klatki naprężenia pulsujące, szybko zmienne, prowadzące do zmęczenia materiału. W żłbkach o kształcie prostokątnym siła elektrodynamiczna skierowana jest zawsze do dna żłbka. Jeśli między prętem, a dnem żłbka występuje luz (nawet wielkości paru dziesiątych mm) - pręt pod wpływem tej siły ulega wibracji i może pękać, zwykle następuje to w pobliżu połączenia z pierścieniem zwierającym. Istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych (i wiele patentów) ograniczających promieniowy luz pręta w żłbkach wirnika, niektóre z nich pokazano na rysunku 3.

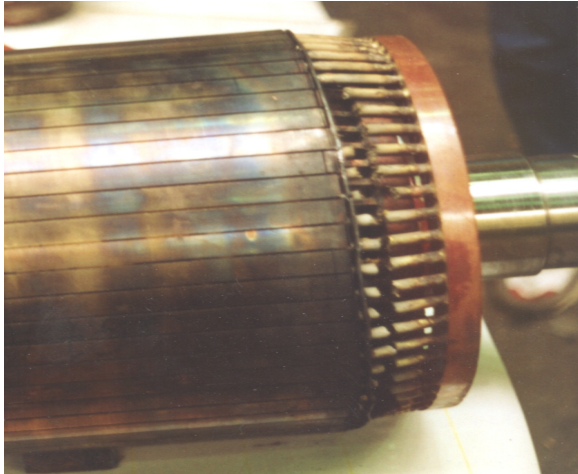


Rys. 3. Różne metody mocowania prętów w żłbku dla ograniczenia promieniowego luzu w żłbku

- A) impregnacja żywicą
- B) spawanie
- C) podklinowanie
- D) osadzenie sprężyste
- E) rozgniatanie

Nie wszystkie z tych rozwiązań są dostatecznie skuteczne, a przede wszystkim nie wszystkie są dostatecznie trwałe. Zgromadzenie odpowiedniego materiału doświadczalnego z eksploatacji silników pracujących w trudnych warunkach rozruchowych ma dla procesu projektowania podstawowe znaczenie.

Termiczne efekty przepływu prądu rozruchowego również mogą być groźne dla ustroju klatki, szczególnie dla klatek rozruchowych silników dwuklatkowych. W klatce rozruchowej występują duże gęstości prądu podczas rozruchu i ta klatka nagrzewa się bardzo szybko. Na rys. 4 przedstawiono typowe wytopienia prętów klatki rozruchowej silnika dwuklatkowego, spowodowane przepływem prądu rozruchowego (rozruch zbyt długi).



Rys. 4. Zniszczona klatka rozruchowa silnika dwuklatkowego, 300 kW, 2p=4 - termiczny efekt przepływu prądu rozruchowego

### Przystosowanie silników do trudnych warunków rozruchu

Szacuje się, że silnik klatkowy średniej lub dużej mocy, w standardowym wykonaniu, może wytrzymać około 5000 rozruchów bezpośrednich. Taką trwałość dla swoich wyrobów deklaruje większość producentów maszyn elektrycznych.

Silniki, od których wymaga się większej trwałości rozruchowej, lub dobrego znoszenia rozruchów długotrwałych, muszą mieć rozwiązania specjalne. Dotyczy to szczególnie wirnika, bowiem podczas rozruchu właśnie klatka wirnika jest najbardziej narażonym elementem maszyny. W wielu przypadkach odpowiednio dobrane rozwiązanie klatki zapewnia długotrwałą, bezawaryjną eksploatację silnika w najtrudniejszych warunkach rozruchowych. Zebrane do-

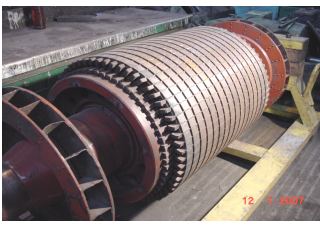
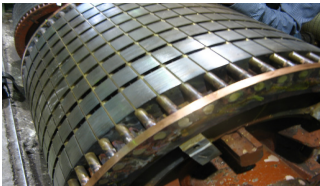

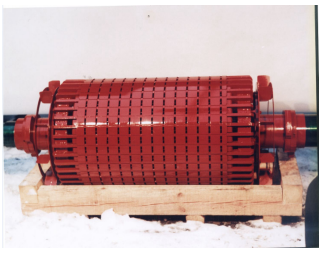
świadczenia Ośrodka KOMEL w tej materii zestawiono w tabeli. W przedstawionych przykładach przeprojektowanie i nowe wykonanie samego tylko wirnika okazało się wystarczające dla zapewnienia silnikom wysokiej trwałości i odporności na niszczące działanie prądów rozruchowych występujących przy łączeniu bezpośrednio na sieć.

Wszystkie silniki z nowymi wirnikami przedstawione w poniższej tabeli przeszły pomyślnie test długoletniej eksploatacji przy trudnych warunkach rozruchowych i załączaniu bezpośrednio na sieć. Silnik wymieniony w poz. 2 (dwubiegowy, 2p=4/8, moc 2000/500 kW) po modernizacji wirnika wytrzymał 70.000 ciężkich rozruchów i dopiero w wyniku okresowego przeglądu jego klatka zakwalifikowana została jako zużyta.

### Literatura

- [1]. Bernatt M. Narażenia silników klatkowych wywołane przepływem prądu rozruchowego. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, Komel, 1986, nr 39 str 3-10.
- [2]. Bernatt M., Rut R., Mróz J. Bezpośredni rozruch zagrożeniem dla silników klatkowych dużej mocy. Przegląd Elektrotechniczny 2012, nr 1a str. 207-211.
- [3]. Proczek M. Układ izolacyjny dla stojanów silników wysokiego napięcia. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, Komel 1992, nr 45 str 22-25.
- [4]. Bernatt M., Rut R., Mróz J. O uszkodzeniach klatek wirnika. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, Komel, 2008, nr 78 str 1-6.
- [5]. Jokiniemi M. D.o.l. starting can cause problems. Electrical Times, 1980. October 10.

Tab. 1. Wykaz silników z wirnikami zmodernizowanymi (wg projektów BOBRME Komel)

	<b>DANE SILNIKA</b> wirnik (wersja oryginalna)	rodzaj napędu	dane rozruchowe, rodzaj pracy	uszkodzenia silnika oryginalnego	rozwiązanie wirnika nowego	widok wirnika
1	515 kW 2p=2 6000 V wirnik jednoklatkowy głębokożłobkowy	Pompa wody, Huta Stali	$t_r=1.5$ s 40-50 rozr. na dobę	pękanie prętów klatki	dwuklatkowy, specjalny (patent)	-
2	2000/500 kW 2p=4/8, 6000 V wirnik jednoklatkowy, pręt specjalny	Ssawa dymowa, Huta Stali	$t_r=18$ s 7000 rozr. rocznie	pękanie prętów klatki, pękanie pierścieni zwier.	wirnik z prętem biernym (patent)	
3	740 kW 2p=6 6000 V wirnik dwuklatkowy	Pompa wody Huta stali	$t_r=1.6$ s do 20 rozr. na dobę	pękanie prętów klatki rozruchowej	wirnik dwuklatkowy, specjalny	
4	800 kW 2p=4 6000 V wirnik jednoklatkowy głębokożłobkowy	napęd rębaka drewna elektrowni	pulsujące uderzenia momentu obciążenia, przeciążenia	pękanie prętów klatki	wirnik jednoklatkowy specjalny	
5	400 kW 2p=8 6000 V wirnik jednoklatkowy, pręt trapezowy	młyn węgla	kilkaset rozruchów rocznie, możliwość blokad	pękanie prętów klatki pękanie pierścieni zwieraj.	wirnik z prętem biernym (patent)	-
6	1000 kW 2p=4 6000 V wirnik głębokożłobkowy, pręt trapezowy, Alu, spawany	wentylator	$t_r=30$ s rozruchy powtarzane	odrywanie prętów klatki od pierścienia zwierającego	jednoklatkowy, miedziany, rozwiąz. specjalne	
7	5.5 kW 2p=2 380V wirnik jednoklatkowy pręt okrągły	serwomechanizm otwier. zaworów instalacji	kilkadziesiąt tysięcy rozruchów rocznie	pękanie prętów klatki na połączeniu z pierśc.	jednoklatkowy, rozwiąz. specjalne (patent)	