

Wojciech Poprawski
BOBRME Komel, Katowice

REKONSTRUKCJA WIRNIKA W SILNIKU 800 kW, 2p=4, 6 kV W CELU PRZYSTOSOWANIA UZWOJENIA KLATKOWEGO DO TRUDNYCH WARUNKÓW PRACY

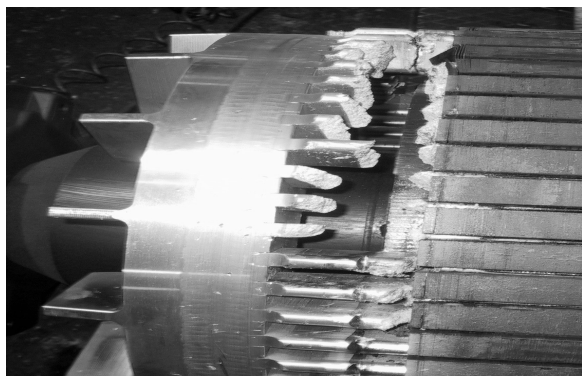
RECONSTRUCTION AND ADAPTATION OF SQUIRREL CAGE IN 4-POLE, 800 kW, 6 kV INDUCTION MOTOR FOR HEAVY-DUTY OPERATION

Abstract: In the paper the case of the squirrel cage failure in high voltage induction motor is described. This motor is operating in the drive characterised by long starting time and by very high and frequent overloads. The analysis of drive operation and reasons of failure carried out. The changes in rotor construction has been proposed to increase the motor service life.

1. Wstęp

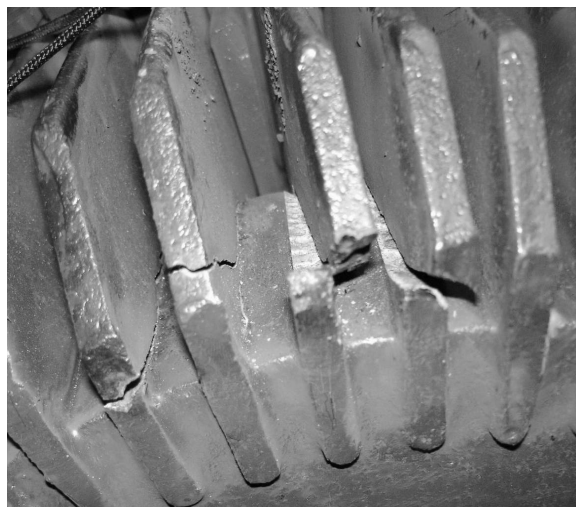
Rozruch silników klatkowych wysokiego napięcia odbywa się zwykle przez bezpośrednie załączenie na pełne napięcie sieci. W przypadku napędów wymagających częstych rozruchów lub długiego czasu rozruchu oznacza to znaczne narażenia uzwojeń silnika na termiczne i dynamiczne oddziaływanie prądu rozruchowego o stosunkowo dużej wartości. W takich napędach powinno się stosować silniki specjalnie przystosowane do trudnych warunków pracy – dotyczy to zwłaszcza konstrukcji klatki wirnika.

Zagadnienie to omówiono na przykładzie napędu „rębaka”, urządzenia służącego do rozdrabniania drewna do postaci nadającej się na dodatek do paliwa. Do jego napędu zastosowano pierwotnie importowany silnik o mocy 710 kW z klatką wirnika spawaną z prętów aluminiowych. Po 8 miesiącach pracy doszło do awarii silnika, uszkodzeniu uległa klatka wirnika (Rys.1).



Rys. 1. Uszkodzenia klatki wirnika w silniku 710 kW

Następnie został zainstalowany nowy silnik (krajowy) o mocy 800 kW z klatką miedzianą. Silnik ten pracował 16 miesięcy. Po tym okresie również uległa uszkodzeniu klatka wirnika (Rys.2). Ten drugi przypadek został poddany szczegółowej analizie.

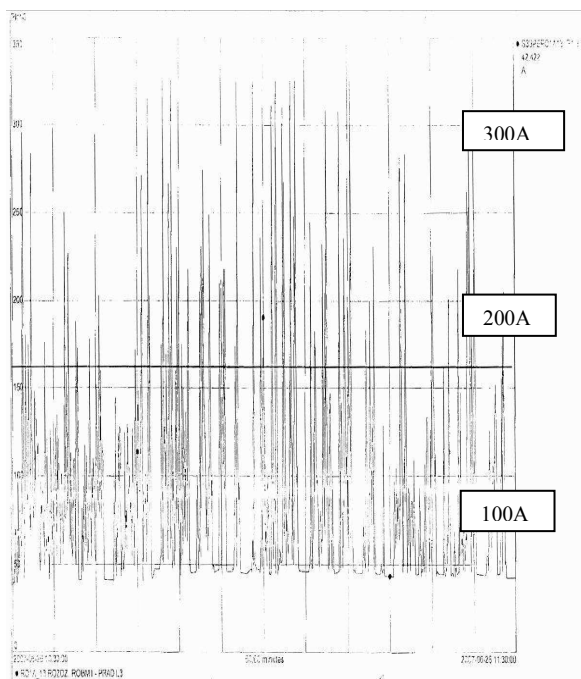


Rys. 2. Uszkodzenia klatki wirnika w silniku 800 kW

2. Analiza pracy napędu i uszkodzeń wirnika.

Napęd wymaga przeprowadzania częstych rozruchów. Czas rozruchu silnika wynosi ok. 25 s. Napęd rębaka charakteryzuje się przy tym bardzo dużą nierównomiernością obciążenia. W czasie pracy występują częste przeciążenia spowodowane rodzajem drewna (duże klocki) o zróżnicowanej twardości. Chwilowe przeciążenie prądowe dochodzi do wartości ok. 350 A przy prądzie znamionowym wynoszącym 90 A.

Na Rys.3 przedstawiono przykładowy przebieg obciążenia prądowego silnika. Wykres obejmuje okres 10 min.



Rys. 3. Prąd obciążenia silnika 800 kW w czasie pracy

W czasie oględzin uszkodzonego wirnika nie stwierdzono śladów przegrzania klatki. Potwierdziły to przeprowadzone obliczenia nagrzewania klatki wirnika w czasie rozruchu. Obliczony przyrost temperatury prętów klatki wyniósł ok. 109 K a pierścieni zwierających ok. 19 K. Również stan prętów w miejscu pęknięć świadczył o tym, że uszkodzenia nie są spowodowane naprężeniami o charakterze termicznym. Klatka wirnika jest dobrze zabezpieczona przed działaniem sił odśrodkowych, pierścienie zwierające są osadzone na podzwojnijkach i dodatkowo zabezpieczone klinami przed działaniem drgań skrętnych. Obliczona częstotliwość poprzecznych drgań własnych prętów wynosi 354 Hz i jest wystarczająco odległa od częstotliwości sił wymuszających (50 Hz i 100 Hz). Wobec tego przyczyną powodującą uszkodzenia mogły być jedynie siły elektrodynamiczne działające na pręty klatki w czasie rozruchów i przy skokowych zmianach obciążenia w czasie normalnej pracy silnika. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń elektromagnetycznych określono wartości prądów w pręcie klatki oraz obliczono, wg [1], siłę elektromagnetyczną działającą na pręt w czasie rozruchu i przy chwilowych przeciążeniach.

Obliczenia wytrzymałościowe wykonano, wg [2], dla uproszczonego modelu obustronnie sztywno utwierdzonego pręta.

Tablica 1.

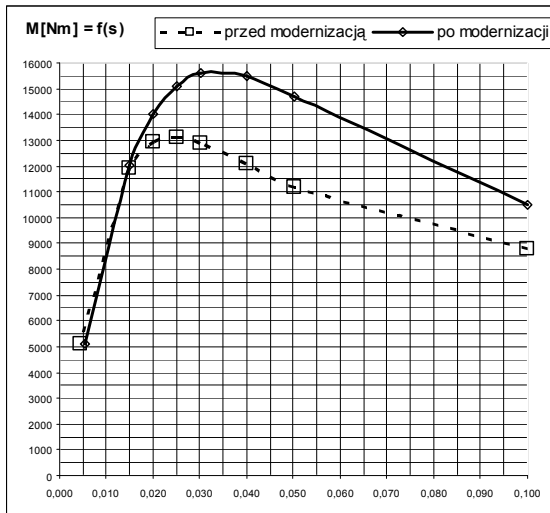
Silnik 800 kW przed modernizacją, wyniki obliczeń elektromagnetycznych i wytrzymałościowych

Parametr	Jedn.	Rozruch	Praca
Prąd stojana	A	585	350
Prąd wirnika	A	6301	3750
Siła elektrodynamiczna	N	5544	1964
Strzałka ugięcia pręta (bez ograniczenia żłobkiem)	mm	0.65	0.23
Dopuszczalne (dla miedzi) naprężenie zmęczeniowe	MPa	35	35
Dopuszczalna strzałka ugięcia	mm	0.22	0.22
Naprężenie w pręcie przy luzie 0.22 mm	MPa	35.4	35.4

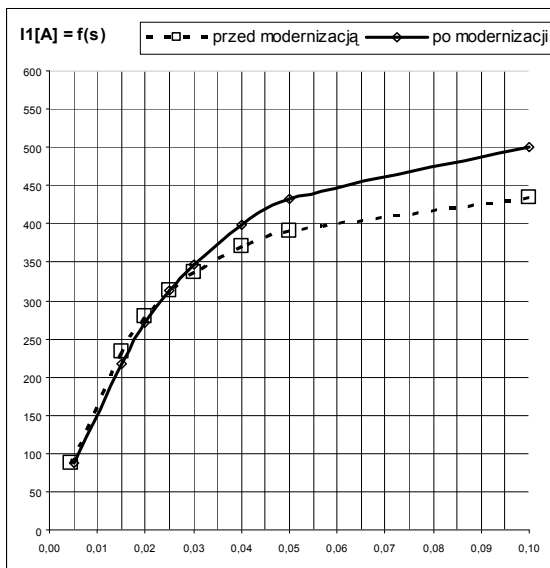
Strzałka ugięcia pręta bez oparcia o dno żłobka może osiągnąć wartość 0.65 mm przy rozruchu i 0.23 mm przy przeciążeniach. Oznacza to, że jeżeli pod wpływem sił elektrodynamicznych działających na pręty nastąpiło powiększenie luzu promieniowego prętów w żłobkach wirnika do wartości 0.22 mm, to dopuszczalne (zmęczeniowe) naprężenie zginające w prętach było przekroczone nie tylko przy rozruchu silnika, ale również przy nagłych przeciążeniach.

3. Rekonstrukcja wirnika

Ze względu na stosunkowo długi czas rozruchu i dużą moc znamionową silnika nie można było zastosować wirnika dwuklatkowego z prętami okrągłymi, których dopuszczalna strzałka ugięcia jest zwykle znacznie większa niż stosowane luzy technologiczne (jest to strzałka ugięcia, która występuje, gdy naprężenia osiągają wartość dopuszczalną ze względu na wytrzymałość zmęczeniową materiału). Dlatego zdecydowano się na pozostawienie rozwiązania z wirnikiem jednoklatkowym z prętami prostokątnymi. Klatka wirnika została jednak przeprojektowana w taki sposób, żeby w maksymalnym stopniu zmniejszyć narażenia mechaniczne. Zastosowano pręty wirnika o zmniejszonej sztywności (większy stosunek W/J) i dzięki temu większej dopuszczalnej strzałce ugięcia. Dodatkowo powiększony został moment maksymalny silnika (Rys.4).



Rys. 4. Moment obciążenia w funkcji poślizgu w silnikach 800 kW



Rys. 5. Prąd obciążenia w funkcji poślizgu w silnikach 800 kW

Do obliczeń wytrzymałościowych nowego wirnika przy rozruchu przyjęto prąd w prętach z obliczeń elektromagnetycznych. Dane do obliczeń dla przeciążeń oszacowano w sposób pośredni. W silniku przed modernizacją prąd stojana przy przeciążeniach wynosił ok. 350 A. Dla tej wartości prądu poślizg silnika wynosił $s=0.03$. Z charakterystyki mechanicznej $M=f(s)$ na Rys.4 przy tym poślizgu moment obciążenia silnika równy jest ok. 13000 Nm. W silniku zmodernizowanym taki moment obciążenia wystąpi przy mniejszym poślizgu ok. $s=0.017$. Z Rys.5 odczytujemy dla tego poślizgu prąd stojana równy ok. 250 A, który wystąpi w zmodernizowanym silniku przy przeciążeniach. Wyniki obliczeń zestawiono w Tabelicy 2.

Tablica 2.

Silnik 800 kW po modernizacji, wyniki obliczeń elektromagnetycznych i wytrzymałościowych

Parametr	Jedn.	Rozruch	Praca
Prąd stojana	A	604	250
Prąd wirnika	A	6510	2655
Siła elektrodynamiczna	N	4492	747
Strzałka ugięcia pręta (bez ograniczenia żłobkiem)	mm	1.32	0.22
Dopuszczalne (dla miedzi) naprężenie zmęczeniowe	MPa	35	35
Dopuszczalna strzałka ugięcia	mm	0.33	0.33
Naprężenie w przecię przy luzie 0.22 mm	MPa	23.6	23.6

Dopuszczalna strzałka ugięcia dla prętów klatki wynosi ok. 0.33 mm. Jest ona mniejsza od swobodnego ugięcia pręta dla siły elektrodynamicznej w czasie chwilowych przeciążeń. Obliczony przyrost temperatury prętów klatki w czasie rozruchu wyniósł ok. 107 K, a pierścieni zwierających ok. 27 K, czyli pozostał na bezpiecznym poziomie.

4. Zakończenie

W zmodernizowanym silniku uzyskano znaczne zwiększenie odporności klatki wirnika na narażenia mechaniczne wynikające ze specyficznych warunków pracy. Dopuszczalna strzałka ugięcia pręta klatki wirnika jest powiększona o ok. 50%. Naprężenie zginające w prętach przy luzie promieniowym w żłobku równym 0.22 mm zostało obniżone o ok. 30% - przed modernizacją przekraczało wartość dopuszczalną. W czasie chwilowych przeciążeń naprężenia zginające w prętach klatki nie przekraczają wartości dopuszczalnej.

5. Literatura

- [1]. Bernadt M.: *Obliczanie naprężeń od sił elektrodynamicznych działających w czasie rozruchu w prętach klatki wirnika głębokożłobkowego*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 11, 1970, wyd. BOBRME Komel, s. 1-3
- [2]. Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: *Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe*. PWN Warszawa 1984.