

**Maciej Bernatt**  
BOBRME Komel, Katowice

## ZAPEWNIENIE NIEZAWODNOŚCI SILNIKOM ŚREDNIEJ I DUŻEJ MOCY NA ETAPIE PROJEKTOWANIA

### ASSURANCE OF HIGH RELIABILITY FOR MIDDLE AND HIGH POWER INDUCTION MOTORS AT THEIR DESIGN STAGE

**Abstract.** The cost of an unexpected failure of a large AC motor can be very high. Not only the cost of simple repair (or replace) of the failed motor, but the costs of production breakdown should be taken into consideration. Many of the motor failures may be avoided by careful and proper motor design, especially by proper design of stator winding and its insulation system, bearing housing and bearing selection, rotor squirrel cages. At Komel Centre evaluation and calculation methods of mechanical and thermal stresses occurred in rotor cages of different types (deep bar, double cage, idle bar) at motor starting period are developed. The calculation are verified by special bench tests. The objects of the tests were sample AC motors 315, 500 and 800 kW, 6000 V. The same was performed for stator winding overhangs for 2 and 4-pole 6000 V motors.

Very helpful in design process of reliable AC motors are case studies and expert evidences of different motors breakdowns and failures occurred at their exploitation. At Komel Centre many expert evidences of failed large AC motors of various manufacturers were carried out (see table 1).

#### Wstęp

Skutki awarii silnika dużej mocy mogą być bardzo dotkliwe. Liczyć należy nie tylko koszty demontażu, remontu lub wymiany i powtórnego montażu silnika, ale również koszty strat wynikających z przerwy (lub choćby tylko zakłócenia) procesu produkcyjnego ciągu technologicznego, w którym dany silnik jest eksploatowany. Powodem uszkodzeń silników mogą być błędy wykonawcze i nieprawidłowa eksploatacja. Jednak znaczna część uszkodzeń wynika z niewłaściwej konstrukcji silnika, a dokładniej: z konstrukcji nieodpowiedniej dla danego napędu, jego warunków eksploatacyjnych i rozruchowych. Wielu przyszłym awariom można skutecznie zapobiegać już na etapie projektowania silników, zwłaszcza jeśli silnik projektowany jest specjalnie dla konkretnego rodzaju napędu.

Uszkodzenia silników najczęściej występujące w eksploatacji to:

1. awarie uzwojenia stojana i jego wyprowadzeń (przebiecia, deformacje, utrata własności izolacyjnych),
2. uszkodzenia łożysk,
3. uszkodzenia klatek wirnika.

Przy projektowaniu silników o wysokiej niezawodności tym trzem elementom (uzwojenie stojana, łożyskowanie, klatka wirnika) poświęcić trzeba szczególną uwagę.

#### Uzwojenie stojana

Wprowadzenie układu izolacji typu VPI dla uzwojeń stojanów wysokiego napięcia (w Polsce nastąpiło to w latach 90-tych ub. wieku) radykalnie poprawiło odporność środowiskową, wytrzymałość dielektryczną i wytrzymałość mechaniczną uzwojeń. Jednak sama technologia układu izolacji typu VPI nie wyklucza możliwości powstania uszkodzeń w uzwojeniu. Konieczne jest właściwe zaprojektowanie mocowania czoł uzwojeń, ich wyprowadzeń i bardzo staranne przeprowadzenie w technologii VPI procesów nasycania i utwardzania. Dla silników  $2p=2$  i  $2p=4$  (3000 i 1500 obr/min) dużej mocy szczególnie ważne jest zapewnienie wymaganego kształtu i wymiarów cewek, ich odstępów w czołowej części oraz skutecznych mocowań, koniecznych dla wytrzymałości czoł na siły elektrodynamiczne i wywołane nimi naprężenia mechaniczne działające na uzwojenie podczas rozruchu [1]. Deformacjom i uszkodzeniom czoł mają przeciwdziałać mocowania i powiązania cewek obwodowo w pierścieniu usztywniające (lub do oddzielnych pierścieni usztywniających) oraz skuteczne uchwycenie przewodów wyprowadzeń między uzwojeniem a skrzynką zaciskową. Rozkład mocowań czoł stojana dobierany jest drogą obliczeń wytrzymałościowych, Ośrodek Komel dysponuje programami obliczeniowymi opracowanymi w oparciu o [1]. Przyjmowane do tych obliczeń modele wytrzymałościowe czoł stanowią jed-

nak dość duże uproszczenie w stosunku do rzeczywistego, skomplikowanego układu mechanicznego. Dlatego do wyniku obliczeń należy podchodzić ostrożnie i stosować odpowiednio duże współczynniki bezpieczeństwa – najlepiej zebrane drogą doświadczeń eksploatacyjnych. Ostatecznym sprawdzianem właściwego zaprojektowania i wykonania połączeń czołowych jest pomiar częstotliwości drgań własnych czoła silnika prototypowego (musi ona być dostatecznie oddalona od częstotliwości sił wymuszających, tj. od 50 i 100 Hz i harmonicznych). Jeśli to możliwe silnik prototypowy powinien też przejść próby trwałościowe polegające na wielokrotnych załączeniach bezpośrednio na sieć o dużej mocy zwarciowej. Pomiar takie były przez nas wykonywane.

### Łożyska i łożyskowanie

Procesy produkcyjne, metody prób końcowych i metody selekcji łożysk tocznych osiągnęły wysoki poziom doskonałości, dostępne na rynku i stosowane w silnikach łożyska są wyrobami wysokiej jakości. Zdarzające się w eksploatacji przypadki uszkodzenia łożysk – pociągające za sobą często poważną awarię silnika – z reguły nie wynikają z defektów samych łożysk. Częściej są wynikiem wadliwego rozwiązania konstrukcyjnego węzła łożyskowego, jego usterek wykonawczych, lub niewłaściwego wyboru rodzaju łożysk. Także braki w smarowaniu (lub niewłaściwy smar) przyczyniają się do szybkiego zużycia lub uszkodzenia łożysk.

Rozwiązanie konstrukcyjne (a także dokładność wykonania) węzła łożyskowego ma dla trwałości łożysk silnika duże znaczenie. Ważny jest odpowiedni dobór pasowań i tolerancji luzów promieniowych, ale także wielkości luzów osiowych, tak aby przy wydłużeniach cieplnych wału zapewnić zawsze możliwość swobodnego osiowego ruchu łożyska przesuwne (oraz możliwie stały jego osiowy docisk). Konieczne jest wykonanie analizy wymiarów osiowych złożenia całego silnika.

Rozwiązania węzła łożyskowego nie da się wyliczyć. Doświadczenie i umiejętności konstruktora są najważniejszymi czynnikami w procesie projektowania.



*Rys. 1. Fragment łożyska 6328 silnika 1400 kW, 1500 obr/min zniszczonego osiowym dociskiem wału od jego wydłużeń cieplnych. Łożysko zostało zablokowane, pierścień bieżni wewnętrznej zaczął obracać się (ślizgać) na wale. W oryginalnym rozwiązaniu konstrukcyjnym przewidziano zbyt mały luz osiowy w łożyskowaniu jak dla silnika napędzającego wentylator o długim czasie rozruchu*

### Klatka wirnika

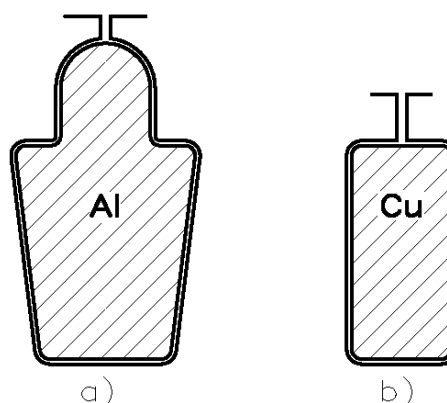
Pojedyncze pęknięcia lub nawet całkowity przełom kilku prętów czy pęknięcie pierścienia zwierającego na ogół nie skutkują koniecznością natychmiastowego wyłączenia silnika z sieci. Mimo uszkodzonej klatki silnik może pracować dalej, a nawet względnie poprawnie odbywać kolejne rozruchy. Posiada jednak asymetrię obwodu elektromagnetycznego, jego parametry (sprawność, poziom hałasu, drgania) ulegają wyraźnemu pogorszeniu, uzwojenie stojana przegrzewa się, a każdy następny roz-

ruch zwykle zwiększa rozmiar uszkodzeń (i asymetrii elektromagnetycznej klatki), doprowadzając w końcu do awarii i konieczności wyłączenia silnika.

Silnik o wysokim poziomie niezawodności musi mieć klatkę wirnika bez jakichkolwiek defektów, elektrycznie symetryczną i zapewniającą symetrię elektromagnetyczną całego obwodu wirnika.

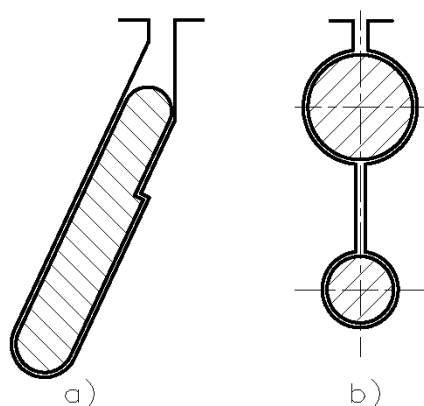
Uszkodzenia klatek wirnika zdarzają się w zasadzie wyłącznie podczas rozruchu silnika [2]. Można im zapobiegać na etapie projektowania przez odpowiednią konstrukcję klatki. Ośrodek Komel opracował własne metody i programy obliczeniowe dla naprężeń mechanicznych i termicznych występujących w klatkach. Wszystkie projektowane w Komelu silniki mają klatki dobierane z pomocą tych programów. Metodami obliczeniowymi dobiera się m.in. wielkość promieniowych luzów prętów w żłobkach wirnika; wymiar ten ma decydujące znaczenie dla eksploatacyjnej trwałości klatki. Metody obliczeniowe klatek zostały zweryfikowane eksperymentalnie badaniami specjalnych fizycznych modeli i co ważniejsze, wielu silników prototypowych. Umożliwiają one projektowanie klatek odpornych na najtrudniejsze warunki rozruchowe i eksploatacyjne. Wykorzystywane jest to przy projektowaniu nowych krajowych serii silników indukcyjnych średniej i dużej mocy oraz przy wielu rekonstrukcjach i modernizacjach wirników w silnikach (często pochodzących od renomowanych światowych producentów) które, eksploatowane w bardzo trudnych warunkach rozruchowych, uległy awariom. (tablica 1).

Przy rekonstrukcji wirnika nowa klatka może być dobierana optymalnie do konkretnego napędu. Projektant uwzględnia tu nie tylko potrzebny moment rozruchowy, ale również długość trwania i częstość występowania rozruchów. Przykład wykonanej rekonstrukcji wirnika silnika 1000 kW pracującego przy długich (30 s) rozruchach podano na rys 2.



Rys. 2. Silnik 1000 kW, 6000 V, 1500 obr/min. a) przekrój żłobka wirnika w wersji oryginalnej; rozwiązanie nieodpowiednie dla napędu wentylatora o czasie rozruchu 35 s., b) przekrój żłobka wirnika silnika po rekonstrukcji – dobrze znosi wydłużony rozruch

Innym interesującym przykładem może być silnik 515 kW, 6000 V, 3000 obr/min, produkcji firmy ACEC, Belgia. Producent określał jego trwałość na 5000 rozruchów. Silniki takie były eksploatowane w jednej z krajowych hut stali przy napędach pomp wody pracujących w cyklu przerywanym (2 zatrzymania i 2 rozruchy w ciągu jednej godziny). W tym reżimie pracy 5000 rozruchów realizowane było już w ciągu 1-1.5 roku. Po tym występowało pękanie prętów klatki, konieczny był jej remont, lub wymiana całego wirnika. Oryginalne wirniki były jednoklatkowe, z prętami głębokimi (rysunek) zapewniającymi wysoki moment rozruchowy; nie miały jednak żadnych specjalnych rozwiązań ograniczających promieniowe drgania prętów, które występują przy każdym rozruchu i które są głównym czynnikiem niszczącym klatkę. W rezultacie po kilku tysiącach rozruchów następowało zmęczenie materiału; pręty pękały w charakterystycznych miejscach, tuż w pobliżu mocowania pręta do pierścieni zwierających.



Rys. 3. Silnik 515 kW, 6000 V, 3000 obr/min.  
 a) przekrój żłobka wirnika w wersji oryginalnej; rozwiązanie nieodpowiednie dla pracy przy wielkiej ilości rozruchów (wytrzymuje max 5000 – 7000 rozruchów), b) przekrój żłobka wirnika silnika po rekonstrukcji – dobrze znosi wiele ilości rozruchów

W trakcie rekonstrukcji opracowano inne rozwiązanie klatki: wybrano wirnik dwuklatkowy o specjalnym rozwiązaniu klatki rozruchowej, z dużą pojemnością cieplną i dużą odpornością na elektrodynamiczne efekty przepływu prądu rozruchowego (rysunek). Wykonane wg tego projektu wirniki zabudowane w oryginalnych stojanach pracują niezawodnie już kilkanaście lat.

### Baza danych o awariach i uszkodzeniach silników średniej i dużej mocy

W Ośrodku Komel wykonywane są ekspertyzy poawaryjne silników indukcyjnych średniej i dużej mocy [3]. Zarówno silników producentów krajowych, jak i znanych producentów zagranicznych. Silników eksploatowanych w różnych napędach, w różnych gałęziach przemysłu. W ekspertyzach Komelu, oprócz samego opisu stanu poawaryjnego analizowane są również przyczyny powstania awarii, przedstawiane konstrukcyjne i technologiczne zalecenia, które należy wprowadzać dla wykluczenia (lub ograniczenia) podobnych uszkodzeń. Zbiór ekspertyz poawaryjnych stanowi bazę danych wielkiej przydatności dla projektowania silników dużej niezawodności. Zestawienie wykonanych ważniejszych ekspertyz podano w tabelicy 1.

### Niszczące badania niezawodności

Prototypowe silniki z nowych serii, którym stawiane są wysokie wymagania niezawodności, powinny być poddane próbom sprawdzającym ich odporność na zagrożenia eksploatacyjne, zwłaszcza na zagrożenia występujące w momencie załączania do sieci i w ciągu dalszego rozruchu. Badania tego typu są badaniami niszczącymi, nie są one określone normami PN, ich program i metodykę ustala konstruktor silników. W ubiegłych latach Ośrodek Komel wykonywał takie badania na silnikach klatkowych wysokiego napięcia wchodzących do obecnej serii Sf produkowanej aktualnie w Zakładzie EMIT. Były to silniki (wymieniono w kolejności przeprowadzanych badań):

- Sf 400 Y-4, 500 kW, 6000 V
- Sf 355 Y-4E, 315 kW, 6000 V
- Sf 450 Y-4E, 800 kW, 6000 V

Pierwszy z wymienionych silników miał wykonanie specjalne, pozwalające przetestować różne rozwiązania odnośnie klatki wirnika i połączeń czołowych uzwojenia stojana. Badania trwałościowe polegały na zaaplikowaniu silnikom serii długotrwałych rozruchów, serii (kilku tysięcy) rewersów oraz pewnej ilości powtórnych szybkich załączeń przy niewygaszonym polu wirnika i możliwie pełnej przeciwfazie napięcia resztkowego [4]. Badania przeprowadzono na specjalnych stanowiskach w elektrowniach, co pozwalało bezpośrednio załączać silnik do sieci o wielkiej mocy zwarciowej (stacje prób producentów silników nie dysponują źródłem zasilania odpowiedniej mocy dla takich badań). Po serii prób silniki rozbierano, poddawano dokładnym oględzinom stojany i wirniki, dokumentowano i opisywano deformacje lub uszkodzenia (o ile nastąpiły). Następnie próby ponawiano. Pierwszy z trójki silników badano z trzema różnymi wersjami wirnika głębokożłobkowego o prostokątnych kształtach prętów. Klatki wytrzymały kolejno: 153, 1473, 4200 rewersów. Ostatnią wersję jeszcze po pewnych korektach uznano jako zadawalającą dla silników standardowych. Wyniki przeprowadzonych badań zostały wykorzystane przy projektowaniu silników klatkowych wysokiego napięcia serii Sf oraz serii Sh, którym już w wersji standardowej postawione zostały wysokie wymagania dotyczące trwałości i niezawodności eksploatacyjnej.

Tablica 1. Wybrane, analizowane w BOBRME Komel przypadki awarii różnych silników średniej i dużej mocy (WN i NN)

Uszkodzony element	LP	Typ silnika Producent	Moc [kW]	Prędk. Obrot [min <sup>-1</sup> ]	Napędzane urządzenie	Rodzaj uszkodzenia	Zalecane /wprowadzone modyfikacje konstrukcyjne	Rok oddania do ponownej eksploatacji (po zmianach konstrukcyjnych)
Uzwojenie stojana	1	83.60.2 Oerlikon, Szwajc.	1070	3000	Pompa wody zasilającej	Deformacje i przebicie uzwojenia	Zmiana rodzaju uzwojenia zmiany mocowań czół	1996-1999
	2	KL 65 353 (6faz) Schorch, Niemcy	2600	1500	Pompa wody	Zwarcie w uzwojeniu (zalanie wodą chłodnicy)	Zmiana uzwojenia, dodatk. zabezp. od wody	1997
	3	SYJf 131 LS Dolmel, Wrocław	3150	3000	Pompa wody zasilającej	Poluzowanie mocowań, przebicie w czolach	Zmiana mocowań czół	2005
Łożyska łożyskowanie	4	BF 6500 HP10 EFACEC, Portug.	1300	1500	Wentylator	Zatarcie i zniszczenie łożyska strony ND	Zmiana osadzenia łożyska str ND, zmiana luzów	1997
	5	AMH 355 L2 ABB, Szwecja	660	3000	Turbosprężarka	Zatarcie łożyska str. D Zatarcie wirnika	Zmiana pasowań łożyska przesuwanego, czujniki temp	2004
	6	MKZ 540 S02T Elin, Austria	400	8000	Atomizer instal odsiarczania	Szybkie zużycie się łożysk, narastanie drgań	Zmiana rozwiązania łożyskowania strony D	2003
	7	SCf 355 Y-2/1 Emit, Żychlin	515	3000	Turbosprężarka	Szybkie wyrobienie gniazd łożysk, drgania	Zmiana pasowań gniazd łożysk. Zmiana tarcz łożysk	2004
Klatka wirnika	8	AK 400 L-18 ACEC, Belgia	515	1500	Pompa wody	Pęknięcie prętów klatki wirnika po 5-7 tys. rozr.	Zmiana wirnika na dwuklatk., specjalne rozw.	1987
	9	MBR 500 L ASEA, Szwecja	1000	1500	Wentylator osiowy	Odrywanie prętów klatki od pierścieni zwierających	Zmiana wirnika na jednokl., prostok., miedziany, spec.	1996
	10	SZJr 138r Dolmel, Wrocław	400	750	Młyn węglowy wentylatorowy	Pęknięcie prętów klatki (trapez), pęknięcie pierśc.	Zmiana wirnika na specj., (pręty bierne)	1987
	11	DAZ 1616 4/8 ZSRR	2000/ 800	1500/ 750	Ssawa dymowa	Pęknięcie prętów klatki, wytapianie prętów	Zmiana wirnika na specj., (pręty bierne)	2001-2005
	12	SCf 315 X-4 Sp EMIT, Żychlin	200	1500	Wentylator młynowy	Wytapianie aluminiowej klatki wirnika	Zmiana klatki na miedz., specj. rozwiązanie	1999

## Wnioski

1. Wykonane niszczące próby trwałościowe prototypowych silników klatkowych wysokiego napięcia oraz przeprowadzane analizy przyczyn awarii silników średniej i dużej mocy pochodzących od różnych producentów stanowią dla konstruktorów istotny materiał wyjściowy dla zapewnienia wysokiej niezawodności silnikom już na etapie ich projektowania.

2. BOBRME Komel opracowuje konstrukcje silników elektrycznych o dużym poziomie niezawodności z uwzględnieniem ich warunków pracy. Dotyczy to zarówno silników nowych przewidzianych do powtarzalnej seryjnej produkcji, jak i rekonstrukcji silników już eksploatowanych, które uległy awarii. Przed remontem wprowadza się w nich odpowiednie zmiany i modyfikacje konstrukcyjne, które skutecznie zapobiegają powtarzaniu się awarii (wybór re-

montowanych silników zmodyfikowanych przez BOBRME podano w tabl.1)

## Literatura

[1]. B. Drak. Zagadnienia projektowania kształtu i usztywnień czół uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. Zeszyty Problemowe Komel, nr 64/2002, str. 99-104.

[2]. M. Bernatt. Rekonstrukcje klatek eksploatowanych silników dla zwiększenia ich niezawodności ruchowej. Zeszyty Problemowe Komel nr 45/1992.

[3]. J. Bernatt, M. Bernatt. Ekspertyzy i oceny przyczyn uszkodzeń silników elektrycznych dużej mocy. Zeszyty Problemowe Komel nr 68/2004 str. 41-45.

[4]. R. Rut i in. Konstruktorskie badania trwałości eksploatacyjnej klatkowego silnika prototypowego Sf 400-4 6000 V, 500 kW. Politechnika Rzeszowska, 1987r. Praca niepublikowana.