

Jakub Bernatt, Maciej Bernatt
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

MODERNIZACJA I POPRAWA PARAMETRÓW SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH DUŻEJ MOCY PODCZAS REMONTU

MODERNIZATION AND PERFORMANCE DATA UPGRADING OF HIGH POWER ELECTRIC MOTORS AT THEIR REPAIR PROCESS

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwość znaczącej poprawy parametrów technicznych (w tym również trwałości eksploatacyjnej) silników elektrycznych dużej mocy, którą można osiągnąć w trakcie remontu. Do osiągnięcia tego konieczne są jednak pewne zmiany projektowo- konstrukcyjne w remontowanym silniku. Podano przykłady dla silników klatkowych mocy do 3200 kW.

Abstract: The paper presents a possibility of improving performance data and durability in exploitation of high power electric motors at their repair process. Some redesigning of the motors may be necessary. Examples of redesigned squirrel cage motor output up to 3200 kW are given. As a result increasing of durability for hard starting conditions (frequent or long lasting starts of the motor), diminishing the noise level or increasing of efficiency level of the redesigned motors were achieved.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, wirnik klatkowy, modernizacja
Keywords: electric machines, squirrel cage rotor, redesigning

1. Wstęp

W wielu napędach różnych urządzeń przemysłowych eksploatowane są silniki dwudziesto, a nawet trzydziestoletnie, projektowane jeszcze w latach 70-tych ubiegłego wieku. Wymiana ich na wyroby współczesne o znacznie lepszych parametrach nie zawsze jest celowa i możliwa. Eksploatowane silniki są jednak, co pewien czas remontowane.

Celem rutynowego remontu silników elektrycznych jest przywrócenie parametrów technicznych i zdolności ruchowej do stanu uprzedniego [1]. Zazwyczaj jest to (w mniejszym lub większym stopniu) osiągane, choć np. współczynnik sprawności remontowanych maszyn elektrycznych po wymianie uzwojeń jest z reguły mniejszy niż przed remontem [4].

Możliwe jest jednak przeprowadzanie remontu (zwłaszcza silników większej mocy), tak aby szereg parametrów technicznych remontowanej maszyny uległ wyraźnej poprawie, nawet w stosunku do maszyny nowej. Remont taki nazwiemy **modyfikacyjnym**; jest on możliwy i celowy szczególnie w silnikach starszych, projektowanych i wytwarzanych w latach 80-tych ub. wieku, posiadających rezerwy cieplne, duże grubości izolacji w klasie B, czy bardzo mało efektywne, hałaśliwe, dwukierunkowe wentylatory promieniowe. W trakcie remontu możliwa jest taka modernizacja, która zmienia silnik ze

standardowej wersji katalogowej na wyrób specjalny, optymalnie przystosowany do aktualnych warunków eksploatacyjnych.

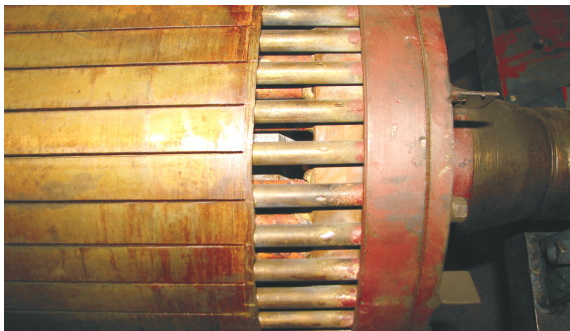
W trakcie remontu modyfikacyjnego możliwym jest:

- zwiększenie trwałości eksploatacyjnej silnika przez znaczące podwyższenie jego odporności rozruchowej,
- obniżenie poziomu hałasu,
- zmniejszenie strat i poprawa współczynnika sprawności, lub opcjonalnie:
- podwyższenie mocy znamionowej,
- obniżenie przyrostu temperatury uzwojeń,
- dostosowanie wartości początkowego momentu rozruchowego do aktualnej potrzeby,
- poprawa układu izolacji głównej oraz izolacji zwojowej (tylko w starych silnikach z izolacją klasy B),
- przystosowanie do zasilania przekształtnikowego.

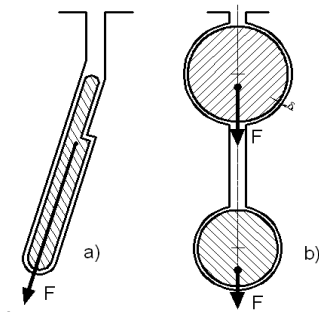
Dla osiągnięcia powyższych celów koniecznym jest dokonanie w remontowanym silniku odpowiednich, czasami nawet niewielkich, korekt i modyfikacji projektowo – konstrukcyjnych. Wiele takich korekt i modernizacji było już przez Instytut KOMEL realizowanych oraz eksploatacyjnie sprawdzonych przez użytkowników, z bardzo dobrymi wynikami.

2. Zwiększenie odporności rozruchowej i trwałości eksploatacyjnej

Największe narażenia w całym okresie eksploatacji silnika klatkowego dużej mocy załączonego bezpośrednio na sieć występują w trakcie rozruchu [2, 3]. Są przyczynami wielu uszkodzeń i prowadzą do przedwczesnego zużycia silnika. Uderzenia prądu rozruchowego, o natężeniu zwykle kilkakrotnie większym od prądu znamionowego, wywołują efekty termiczne i elektrodynamiczne działające na całą strukturę silnika, szczególnie jednak na klatkę wirnika. W silnikach eksploatowanych przy dużej liczbie rozruchów, lub przy rozruchach długotrwałych, przyjęte rozwiązanie klatki wirnika decyduje o trwałości całego silnika. W Instytucie KOMEL opracowano metody obliczania naprężeń elektrodynamicznych oraz naprężeń termicznych występujących w klatkach podczas rozruchu. Posługując się nimi opracowano szereg rozwiązań konstrukcyjnych klatek wirnika dla silników eksploatowanych w najtrudniejszych warunkach rozruchowych (tab. 1, rys. 1,2).



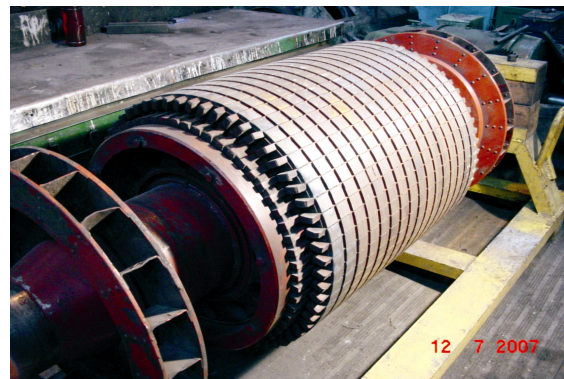
Rys. 1. Zmodyfikowany wirnik silnika 550 kW, stan po 25 latach eksploatacji w reżimie częstych rozruchów. Brak jakichkolwiek widocznych zmian lub uszkodzeń klatek



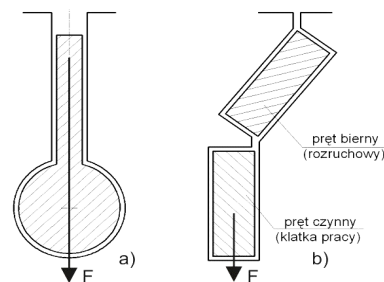
Rys. 1a. Kształt żłobka wirnika silnika 550 kW; a) wersja oryginalna, b) wersja zmodyfikowana; F - wektor żłobkowej siły elektrodynamicznej działającej podczas rozruchu

Długość przedstawionych na rysunkach 1a oraz 2a wektorów sił elektrodynamicznych F proporcjonalna jest do amplitud tych sił występujących w pierwszej chwili rozruchu. Modyfikacja rozwiązania klatek wirnika pozwoliła na znaczące zmniejszenie tych sił działających na pręty w klatkach i tym samym na zmniejszenie pochodzących od nich naprężeń.

Jeszcze przed kilkunastu laty wykonanie nowego, specjalnego wirnika, posiadającego inne wymiary żłobków blach, wiązało się z dużymi kosztami i uciążliwościami. Obecnie laserowa technika wykrawania blach w znacznym zakresie rozwiązuje ten problem. Instytut KOMEL dysponuje urządzeniem laserowym do precyzyjnego wykrawania blach dowolnych kształtów, dzięki czemu możliwe jest znaczące skrócenie czasu remontu i obniżenie jego kosztu (nie jest koniecznym wykonywanie wykrojników żłobkowych).



Rys. 2. Zmodyfikowany wirnik dla silnika 1500/750 kW, stan po dokonaniu 70.000 załączeń



Rys. 2a. Kształt żłobka wirnika silnika 1500/750 kW; a) wersja oryginalna, b) wersja zmodyfikowana

Tabela 1. Silniki o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej, z wirnikami zmodyfikowanymi w trakcie remontu

Typ silnika	Moc [kW]	Obroty synchr [1/min]	Producent silnika oryginaln.	rodzaj napędu, dane rozruchowe	cel do osiągnięcia poprzez modernizację	Rozwiązanie wirnika wersja:	
						oryginalna	po modyfikacji
SZJe 196t	320	1000	EMIT	taśmociąg węgla czas rozr. ok. 30s	duża odporność rozruchowa	pręty trapezowe	pręty bierne
DAZO 13-70	500	750	ZSRR	młyn kulowy (cementownia)	eliminacja uszkodzeń klatki	jednoklatkowy pręt "kropłowy"	pręty bierne
SZUDc 176d	200	1000	EMIT	mieszarka masy gumowej	eliminacja wirnika pierścieniowego	wirnik pierścieniowy	klatkowy pręty bierne
AK400L-18	515	3000	ACEC	pompa wielka ilość rozr.	eliminacja uszkodzeń klatki	jednoklatkowy pręty typu "L"	dwuklatkowy specjalny
Se 355M-4	200	1500	EMIT	wirówka masy czas rozr. 6 min.	wytrzymałość na długi rozruch	dwuklatkowy	pręty bierne
SZJr 138r	400	750	DOLMEL	kruszarka udarowa	wytrzymałość na duże przeciąż.	jednoklatkowy pręt trapezowy	pręty bierne
3SKB236-4xy	160	1500	CELMA	kombajn kopalni soli potasowych	odporność na przeciążenia	dwuklatkowy	dwuklatkowy specjalny
SZDc 174s	200	1500	EMIT	wentylator młyna	duża odporność rozruchowa	dwuklatkowy	pręty bierne
DAZ1616 4/8	2000	1500/750	ZSRR	ssawa dymowa 7000 rozr./rocznie	duża odporność rozruchowa	jednoklatkowy pręt "kropłowy"	pręty bierne
MBR 500L	1000	1500	ASEA	wentylator spalin czas rozr. 30s	eliminacja uszkodzeń klatki	jednoklatkowy, alumin., spaw.	jednoklatkowy międz., spec.
83.60.2	1070	3000	Oerlikon	pompa wody	eliminacja uszkodzeń	jednoklatkowy	jednoklatkowy specjalny
SYJe 142r	3200	3000	DOLMEL	pompa wody zasilającej blok	eliminacja uszkodzeń wirn.	jednoklatkowy pręt trapezowy	jednoklatkowy specjalny

3. Obniżenie hałasu

Hałas silnika elektrycznego posiada trzy główne składowe:

- wentylacyjną,
- magnetyczną,
- łożyskową.

W wielu silnikach dużej mocy dominującą jest składowa wentylacyjna. Standardowy, katalogowy silnik indukcyjny wykonywany jest z reguły do pracy dla dwu kierunków obrotów, jego wentylator posiada promieniowe łopatki proste. Wentylator taki cechuje bardzo mała sprawność aerodynamiczna, natomiast emituje on hałas o dużym natężeniu. Natomiast większość urządzeń przemysłowych średniej i dużej mocy eksploatowana jest przy jednym tylko kierunku obrotów. Wymieniając w silniku elektrycznym uniwersalny dwukierunkowy wentylator o łopatkach prostych na aerodynamicznie zmodyfikowany wentylator jednokierunkowy o łopatkach pochylonych i odpowiednio wyprofilowanych, można uzyskać znaczne obniżenie hałasu bez pogarszania warunków chłodzenia silnika. Dodatkowym efektem jest przy tym zmniejszenie mechanicznych strat wentylacyjnych. Doświadczenia Instytutu KOMEL wykazują, że ten ostatni efekt może mieć także istotne znaczenie. W wyciszonym silniku typu SZJr 134s o mocy 850 kW wymiana wentylatora na

jednokierunkowy o pochylonych łopatkach dała obniżenie strat mechanicznych aż o **11 kW**, a więc podwyższenie współczynnika sprawności silnika

o 1,3%. W niektórych silnikach już sama wymiana wentylatora zewnętrznego (wraz z jego osłoną) może okazać się wystarczająca dla osiągnięcia wymaganego poziomu hałasu średniego poniżej 85 dB/A/. Dla silników, w których przeważa hałas magnetyczny i łożyskowy koniecznym jest zakładanie na silnik odpowiednio dobranych osłon (otulin) akustycznych.

4. Zwiększenie współczynnika sprawności, zwiększenie mocy znamionowej

Podczas standardowego remontu straty w silniku zazwyczaj ulegają pewnemu powiększeniu. Straty w żelazie mogą rosnąć w wyniku wypalania rdzenia przy zbyt wysokiej temperaturze, a także w przypadku ręcznego (za pomocą przecinaka i młotka) odcinania czołowych części uzwojenia. Straty w uzwojeniu rosną, jeśli połączenia czołowe przezwanego silnika wykonano o większej długości. Jeśli jednak te procesy technologiczne remontu wykonano starannie, sprawność silnika może pozostać na poziomie nie zmienionym.

Tabela 2. Zestawienie wyciszonych silników różnych typów

LP	Typ	Moc [kW]	Obroty synchr [min ⁻¹]	Poziom hałasu przed i po modernizacji [dB/A]		Zmodyfikowane lub dodane elementy silnika				
						wentylator zewnętrzny	osłona wentylatora zewnętrznego	wentylator wewnętrzny	osłona wylotu	obudowa dźwięko-chłonna
1	SZJc 174	200	1500	87.7	78.1	x	x	-	-	-
2	SZDc 194	400	1500	90.6	81.0	x	x	-	-	-
3	SCd 134	1250	1500	97.0	84.0	-	-	x	x	-
4	SBVd 134	1000	1500	96.3	83.6	-	x	-	x	x
5	SZJr 134s	850	1500	101.0	83.5	x	x	--	x	x
6	SZJr 136s	630	1000	97.0	82.5	-	x	-	x	x
7	SCd 136	920	1000	92.7	83.6	-	-	x	x	-
8	SAJV 156	1600	1000	97.0	83.0	-	x	-	x	x
9	SZJr 138t	400	750	91.7	83.0	x	x	-	-	-
10	SZJr 128t	315	750	89.4	81.3	x	x	-	-	-

Tabela 3. Podstawowe parametry różnych wersji silnika typu SZJr 134s

	Jedn.	Wersja oryginalna (prod.1974r)	Modernizacja, -zwiększenie sprawności	Modernizacja, -zwiększenie mocy
Moc znamionowa	kW	850	850	1000
Prędkość obrotowa	1/min	1490	1492	1495
Sprawność	%	92.5	93.7	93.9
Współczynnik mocy	-	0.89	0.91	0.91
Moment rozruchowy	-	1.1	1.0	1.15
Prąd rozruchowy	-	5.4	5.3	5.8
Moment maksymalny	-	2.3	2.2	2.3
Przyrost temperatury uzwojenia stojana	K	64	62	68
Klasa izolacji	-	B	F	F
Dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń	K	80	100	100

W wielu przypadkach w trakcie remontu połączonego z przeważaniem stojana możliwe jest zmniejszenie strat silnika i podwyższenie jego współczynnika sprawności lub opcjonalnie podwyższenie mocy znamionowej. Osiągnąć to można poprzez:

- zastosowanie zoptymalizowanych wentylatorów jednokierunkowych,
- zwiększenie przekroju miedzi w żłobkach stojana (kosztem grubości izolacji, jeśli była zbyt gruba),
- zastosowanie klinów magnetycznych zamykających żłobki stojana,
- zmianę danych nawojowych (ilość zwojów, przekrój drutu).

Dwie ostatnie modyfikacje wpływają również na zmianę innych parametrów silnika, zastosowanie klinów magnetycznych powoduje obniżenie przyrostu temperatury uzwojenia stojana

o około 8 – 10 °C, obniża prąd i moment rozruchowy. W tabeli 3 zestawiono parametry oryginalnego silnika typu SZJr 134s, 850 kW w wersji z lat 70-tych, oraz parametry tego samego silnika po wprowadzeniu omawianych wyżej zmian.

5. Przystosowanie silnika do zasilania z przemiennika częstotliwości i regulacja prędkości obrotowej

Dostępne rynkowe przemienniki częstotliwości oferowane są obecnie na napięcie niskie, zwykle 690-800 V. Przemienniki o napięciu 6000 V są technicznie osiągalne, ale ich cena jest ciągle wysoka (pewną odmianą są przemienniki o napięciu 3300V).

Eksploatowane silniki indukcyjne mocy powyżej 200 kW posiadają najczęściej napięcie znamionowe 6000V. Konieczną zmianą w silniku

jest więc przezwojenie stojana na napięcie niskie. Modyfikację taką można wykonać bez obniżania mocy znamionowej silnika.

Natomiast przy regulacji prędkości obrotowej "w dół" i charakterystyce obciążenia $M=f(n)$ urządzenia napędzanego różnej od charakterystyki wentylatorowej, koniecznym może być wyposażenie silnika w dodatkowy układ chłodzenia obcego. Przy zasilaniu przemiennikowym celowym jest stosowanie przynajmniej jednego łożyska izolowanego, a to dla eliminacji szkodliwych prądów łożyskowych, a także stosowanie odpowiednio dobranej, wzmocnionej izolacji zwojowej, ponieważ przy zasilaniu z przemiennika typu PWM izolacja ta jest bardziej narażona niż przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym z sieci.

Silnik dużej mocy zasilany napięciem niskim musi mieć odpowiednio rozbudowane zaciski prądowe i powiększoną skrzynkę zaciskową.

Wszystkie te modyfikacje mogą być wykonane w trakcie remontu silnika, koszt ich jest jednak znacznie niższy od kosztu nabycia silnika nowego, specjalnego, przystosowanego do zasilania z przemiennika częstotliwości.

Autorzy

dr hab. inż. Jakub Bernatt, prof. KOMEL, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, E-mail: dyrekcja@komel.katowice.pl; mgr inż. Maciej Bernatt, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, E-mail: m.bernatt@komel.katowice.pl.

Literatura

- [1]. Chmelik K., Awaryjność silników i układów napędowych. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*. nr 61/2000, 7-10
- [2]. Bernatt M., Rut R., Mróz J., Bezpośredni rozruch zagrożeniem dla silników klatkowych dużej mocy. *Przegląd Elektrotechniczny* nr 1a/2012, 207-211.
- [3]. Bernatt J., Bernatt M., High Power squirrel cage motors for heavy starting conditions. *Przegląd Elektrotechniczny* nr 2a/2013, 25-27.
- [4]. Walters D.G., Minimising Efficiency Loss Caused by Motor Rewinds. *Energy Improvements in Electric Motors and Drives*. Springer Verlag 2000, 168-189.
- [5]. Broda J.A., Efekty wyciszania silników 6 kV potrzeb własnych elektrowni Jaworzno III. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* nr 55/1998, 100-105.

[6]. Bernatt J., Bernatt M., Remontować czy wymieniać stare silniki elektryczne w przemysłowych napędach średniej i dużej mocy?, *Wiadomości Elektrotechniczne* nr 11/2006 28-32.

[7]. Bernatt J., Bernatt M., Dobór silników elektrycznych w napędach przemysłowych. *Wiadomości Elektrotechniczne* nr 10/2009, 10-12.

[8]. Drak B., Statystyka uszkodzeń silników wysokonapięciowych prądu przemiennego w elektrowniach zawodowych. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*. nr 65/2003, 41-45.