

Bronisław Drak
Politechnika Śląska, Gliwice

TYPOWE USZKODZENIA SILNIKÓW INDUKCYJNYCH DUŻEJ MOCY

TYPICAL DAMAGES OF HIGH-POWER INDUCTION MOTORS

Abstract: In the paper, analysis of damage reasons and effects after failure of high-power induction motors that operate at company's facilities drives of industrial power generation plant and heat and power generating plants. The first part of the paper includes analysis and effects of typical damages of stator winding within the area: core of stator, on butts of stator winding as well as in area of noses of coils. In the further part, the reasons and effects of typical damages of squirrel-cage winding of rotor as well as examples are presented: damage of fans, rolling bearings and broken tips of motor shafts and their influence to motor damages shall be indicated.

1. Wstęp

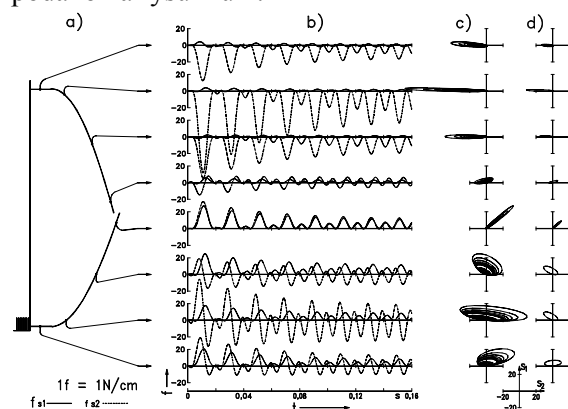
Doświadczenia w zakresie oceny przyczyn awarii silników indukcyjnych dużej mocy, pracujących w napędach potrzeb własnych elektrowni zawodowych i elektrociepłowni wskazują, że ostatnio ich awaryjność ulega zmniejszeniu. Wynika to ze zastosowania lepszych materiałów izolacyjnych, poprawy jakości obsługi maszyn, lepszej diagnostyki w eksploatacji. Mimo tego, problem awaryjności tych silników jest nadal aktualny, tak ze względów technicznych jak i ekonomicznych. Statystyka wykazuje, że w wymienionej grupie silników awarie występują przede wszystkim w silnikach dwubiegunowych, a w większości, uszkodzeniom ulegają uzwojenia stojanów (około 75%). Uszkodzenia w wirniku, w tym: uszkodzenia w uzwojeniu klatkowym, uszkodzenia łożysk, wentylatora oraz wału wirnika, powodują równoczesne uszkodzenie uzwojenia stojana. Najczęściej występują uszkodzenia uzwojenia klatkowego wirnika, a w przypadku uzwojeń dwuklatkowych, występuje z zasady uszkodzenie klatki rozruchowej. Rzadziej występuje uszkodzenie na czopach łożyskowych lub zerwanie wału wirnika.

2. Uszkodzenia uzwojeń stojanów silników indukcyjnych

Ogólnie można stwierdzić, że w stojanach silników indukcyjnych występują przede wszystkim uszkodzenia w uzwojeniu stojana. Na podstawie własnej statystyki można określić szereg typowych stref, w których mogą wystąpić źródła uszkodzeń uzwojenia stojana, będących przyczyną awarii silnika. Do nich należy zaliczyć:

- żłobki rdzenia stojana: w środku długości rdzenia oraz na wyjściu cewek uzwojenia ze żłobków,
- części czołowe uzwojenia: na przejściu prostoliniowych wysięgów żłobkowych cewek w ich główne łuki stożkowe, na łukach stożkowych skrajnych cewek w poszczególnych grupach fazowych uzwojenia, na główkach cewek oraz na połączeniach międzycewkowych, międzygrupowych i połączeniach zasilających uzwojenie stojana.

Podstawową przyczyną awarii silnika spowodowanej uszkodzeniem w uzwojeniu stojana są drgania cewek wymuszane działaniem sił elektrodynamicznych. Rozkłady liniowe tych sił w czasie rozruchu silnika o mocy 3150 kW podano na rysunku 1.



Rys. 1. Rozkład sił elektrodynamicznych działających na skrajną cewkę w fazie przy rozruchu silnika o mocy 3150 kW: a) - punkty na czole cewki, b) - przebiegi sił w pierwszych okresach rozruchu, c) - trajektorie wektorów sił w pierwszych okresach rozruchu, d) - trajektorie wektorów sił po zaniku składowych aperiodycznych prądów stojana

Z wykresów podanych na rysunku 1 wynika, że wektory sił elektrodynamicznych mają kierunki zmienne. Końce wektorów tych sił zakreślają krzywe zbliżone do elips. W początkowym okresie stanu nieustalonego, przy dużych wartościach składowych aperiodycznych prądów, częstotliwość sił elektrodynamicznych jest równa częstotliwości prądów, a po zaniku tych składowych, częstotliwość sił jest podwójną częstotliwości prądów.

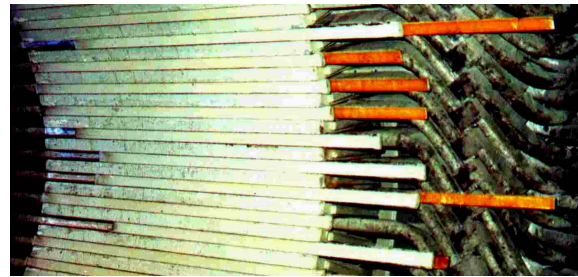
Około 90% końcowych uszkodzeń w uzwojeniu stojana występuje w czasie rozruchu silnika, wówczas, gdy siły elektrodynamiczne mają wartości około 80-krotnie większe w porównaniu z ustalonym stanem pracy silnika przy obciążeniu znamionowym.

2.1. Uszkodzenia cewek w żłobkach rdzenia stojana

Cewki uzwojenia stojana są usztywnione klinami w żłobkach rdzenia stojana, wykonanymi najczęściej z rezoteks. Po pewnym okresie eksploatacji silnika następuje poluzowanie tego usztywnienia i istnieje możliwość wystąpienia luzu promieniowego między cewkami, a dnem żłobka i klinami żłobkowymi. Przyczyną tego są siły elektrodynamiczne działające na części żłobkowe cewek. Siły te o podwójnej częstotliwości prądu mają charakter sił tętniących pełnych skierowanych do dna żłobka, w przypadku gdy w żłobku są cewki tej samej fazy oraz są dwustronnie zmienne, gdy w żłobku są cewki dwóch różnych faz uzwojenia stojana. Działanie tych sił powoduje wgniatanie blach rdzenia stojana w kliny żłobkowe oraz izolację główną cewki ułożonej na dnie żłobka względnie podkładki umieszczonej dodatkowo na dnie żłobka. Wystąpienie luzu promieniowego w żłobku rdzenia stojana jest przyczyną drgań promieniowych cewek wymuszanych siłami elektrodynamicznymi, a w konsekwencji następuje wycieranie izolacji głównej cewek przez blachy rdzenia. Drgania te powodują także stopniowe niszczenie izolacji zwojowej cewek. Objawem zewnętrznym występującego luzu w usztywnieniu cewek w żłobkach są zauważalne luźno zamocowane kliny żłobkowe, często przemieszczające się wzdłuż osi podłużnej silnika (rys. 2a), szczególnie w silnikach pracujących w pozycji pionowej. W przypadku, gdy fakt taki zostanie zauważony w czasie przeglądów technicznych silnika, dokonuje się wymiany klinów żłobkowych, która na pewien okres przedłuży dalszą bezawaryjną pracę silnika.

Uszkodzenie izolacji głównej cewek, poprzez jej wycieranie o blachy rdzenia stojana, uwiadcza się zewnętrznie poprzez przebicia izolacji do rdzenia stojana. Występują wówczas zwarcia między przewodami zwojowymi cewek oraz zwarcia do rdzenia stojana, powodujące w konsekwencji wyłączenia zasilania silnika przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe. Może także wystąpić znaczne wytopienie łukiem elektrycznym blach rdzenia stojana. W przypadku wystąpienia takiego zwarcia w górnej półcewce następuje miejscowe wypalenie klinów żłobkowych (rys. 2b). Jeżeli zasilanie silnika zostanie wyłączone ze znacznym opóźnieniem, może nastąpić miejscowe wytopienie wszystkich przewodów zwojowych, lub wytopienie uwidocznione na rysunku 2c.

a)



b)



c)



Rys. 2. Uszkodzenia uzwojenia w żłobkach rdzenia stojana: a) - wysunięte kliny żłobkowe, b) - zwarcia zwojowe i wypalenie klinów żłobkowych, c) - miejscowe zwarcia w cewce

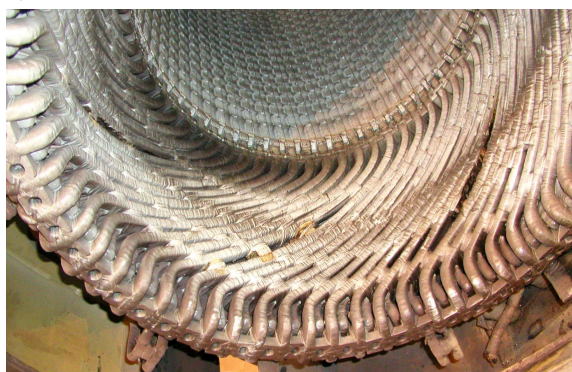
2.2. Uszkodzenia na czołach uzwojenia stojana

Z obliczeń wytrzymałościowych w programach własnych i firmowych programach wykorzystujących MES wynika, że:

- na usztywnienia czoł skrajnych cewek dwóch sąsiednich faz uzwojenia stojana działają zawsze siły rozrywające.
- największe naprężenia występują w skrajnych cewkach fazowych: przy wyjściu cewek ze żłobków rdzenia stojana, na wykorbieniu czoł cewek przy przejściu z części żłobkowej na stożkową oraz w strefie główek cewek.

Typowym uszkodzeniem uzwojenia stojana obserwowanym po awarii silnika jest deformacja czoł cewek, obejmująca głównie skrajne cewki w poszczególnych grupach fazowych uzwojenia (rys. 3a). Zawsze występuje rozerwanie wiązań czoł skrajnych cewek dwóch sąsiednich grup fazowych uzwojenia stojana. Większym deformacjom ulegają czoła górnej warstwy uzwojenia, które po awarii silnika mogą wyglądać jak na rysunku 3b.

a)



b)



Rys. 3. Typowe deformacje czoł cewek uzwojeń stojanów silników dwubiegunowych: a) - widok rozerwanych wiązań skrajnych cewek, b) - całkowita miejscowa deformacja czoł

Rzadziej występują wygięcia czoł górnych półcewek dwóch sąsiednich faz uzwojenia stojana w kierunku wału wirnika (rys. 4a) lub znacząca deformacja promieniowa skrajnej cewki w grupie fazowej uzwojenia stojana (rys. 4b).

a)



b)



Rys. 4. Deformacje promieniowe i obwodowe czoł cewek: a) - dwóch i b) - jednej skrajnej cewki w grupie fazowej uzwojenia stojana

Przykłady skutków wystąpienia zwarć zwojowych: na wyjściu cewek ze żłobków stojana podano na rysunku 5, a na główkach cewek zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 5. Skutki zwarcia zwojowego na wyjściu cewki ze żłobka stojana



Rys. 6. Skutki zwarcia zwojowego w strefie główek cewek

Jedną z częstych przyczyn awarii silnika są zwarcia między przewodami zasilającymi uzwojenia stojana lub połączeniami międzygrupowymi uzwojenia, a połączeniami międzycewkowymi, które powodują miejscowe wytopienia łukiem elektrycznym tych przewodów lub połączeń (rys. 7a). Główną przyczyną tych zwarc jest stopniowe wycieranie izolacji na połączeniach międzycewkowych (rys. 7b) i wymienionymi przewodami zasilającymi lub połączeniami międzygrupowymi, które są usztywniane do połączeń międzycewkowych.

a)



b)



Rys. 7. Wytopienie i deformacja połączeń zasilających – a) oraz wytarcia izolacji na połączeniach międzycewkowych - b)

3. Awaryje silników spowodowane uszkodzeniami wirnika

3.1. Uszkodzenia uzwojenia klatkowego wirnika

Najbardziej niekorzystny stan obciążeń i naprężeń mechanicznych w uzwojeniu klatkowym wirnika występuje w czasie rozruchu silnika. Uzwojenie klatki wirnika jest obciążone: siłami elektrodynamicznymi działającymi na pręty klatki wirnika głównie w części żłobkowej, naprężeniami wynikającymi z nierównomiernego rozkładu temperatury oraz siłami odśrodkowymi od prędkości obrotowej wirnika.

Siła elektrodynamiczna działająca na pręt klatki jest efektem oddziaływania prądu pręta i strumienia rozproszenia żłobkowego wywołanego tym prądem. W uzwojeniach z prętami głębokożłobkowymi o przekroju prostokątnym jest ona siłą tętniącą pełną skierowaną do dna żłobka, a w przypadku prętów o przekroju trapezowym jest dwustronnie zmienna o składowej stałej skierowanej do dna żłobka.

Nierównomierny rozkład strat ciepłych w żłobkowej i pozażłobkowej części głębokich prętów prostokątnych i trapezowych uzwojeń klatkowych jest spowodowany różnicą w szybkości narastania nierównomiernego rozkładu temperatury, głównie w obszarze pręta. W pierwszym okresie rozruchu silnika temperatura w górnych warstwach pręta jest znacznie wyższa. Pod koniec rozruchu silnika, temperatura na wysokości pręta w części żłobkowej znacznie się wyrównuje, a wzrasta temperatura pierścieni zwierających pręty klatki wirnika. Taki stan termiczny wywołuje naprężenia mechaniczne i odkształcenia tak prętów klatki, jak i pierścieni zwierających.

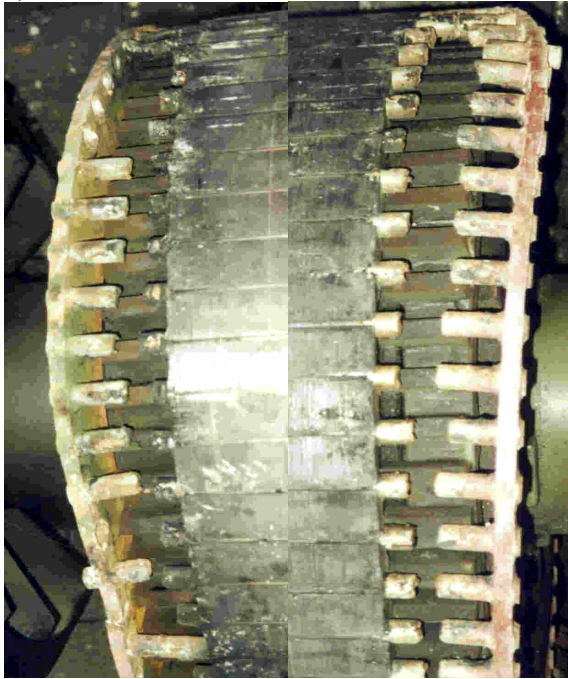
W silnikach dwuklatkowych, największe naprężenia termiczne w czasie rozruchu silnika występują w klatce rozruchowej, w której występują wówczas duże wartości prądów. Pod koniec rozruchu silnika, gdy wzrasta temperatura w strefie pozażłobkowej prętów i temperatura pierścieni zwierających, wzrasta też wpływ sił odśrodkowych wynikających z prędkości obrotowej wirnika.

Uszkodzenie klatki wirnika występuje dość często w eksploatacji silnika. Początkowymi ich objawami są pęknięcia lutów łączących pręty z pierścieniami zwierającymi lub pęknięcie prętów w tej strefie. Pęknięcie jednego, a nawet kilku prętów klatki wirnika, nie wpływa znacząco na własności ruchowe silnika. Pęknięcie

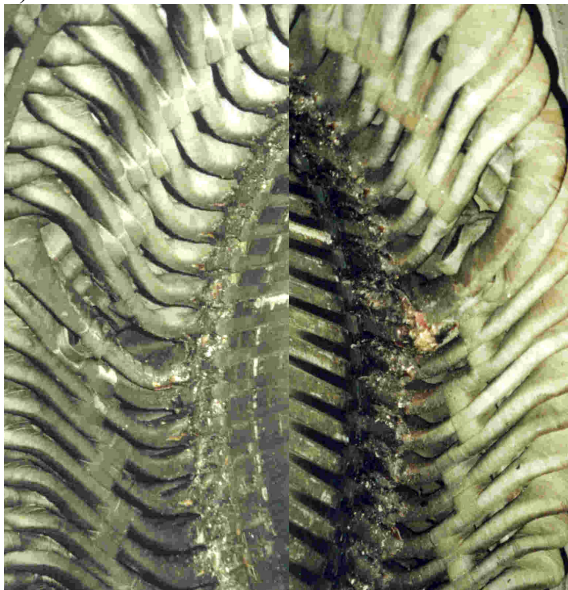
kilkunastu procent prętów uwidacznia się zwiększonym czasem rozruchu silnika oraz tętnieniami wskazań mierników prądu stojana przy obciążeniu znamionowym silnika.

Poważne uszkodzenie klatki wirnika (rys. 8a), lub całkowite jej zniszczenie (rys. 9), powoduje zniszczenie uzwojenia stojana (rys. 8b) spowodowane termicznym zniszczeniem izolacji cewek po ich wyjściu ze żłobków rdzenia stojana, lub wytarciem izolacji cewek stojana przez odgięte lub zerwane elementy uzwojenia klatkowego wirnika.

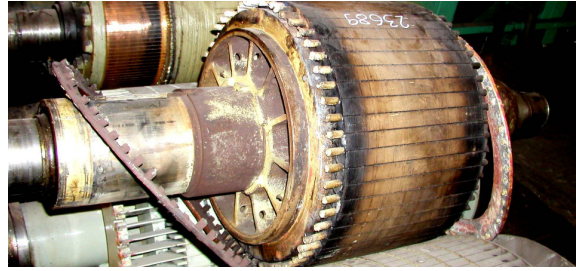
a)



b)



Rys. 8. Znaczące uszkodzenie klatki rozruchowej wirnika- a) i uszkodzenie stojana – b)



Rys. 9. Całkowite zniszczenie klatki rozruchowej wirnika

Częściowe pęknięcie pierścienia zwierającego pręty klatki wirnika, zauważone podczas przeglądów technicznych wirnika, są często usuwane we własnym zakresie. Zaprezentowane na rysunku 10 przykłady pęknięć pierścieni zwierających uzwojenia wirnika silnika dwuklatkowego prowadziły do równoczesnego zniszczenia uzwojenia stojana.



Rys. 10. Pęknięcia pierścieni zwierających uzwojenia klatkowe wirników

W silnikach jednoklatkowych stosowane są najczęściej pręty uzwojenia klatkowego wykonane z prętów miedzi o przekroju trapezowym. W celu usztywnienia prętów klatki wirnika stosuje się kliny między prętem i dnem żłobka rdzenia wirnika. Kliny te są przyspawane punktowo do pierścienia prasującego rdzeń wirnika. Pęknięcie takiego spawu w czasie eksploatacji silnika powoduje wysuwanie się klina ze żłobka rdzenia wirnika, co wywołuje drgania pręta. Prowadzi to w konsekwencji do pęknięcia lutu łączącego pręt klatki z pierścieniem zwierającym, a działanie sił odśrodkowych powoduje skutki uwidocznione na rysunku 11, prowadzące do zniszczenia uzwojenia stojana.



Rys. 11. Uszkodzenia uzwojenia klatkowego wirnika silnika jednoklatkowego

3.2. Uszkodzenia wentylatorów

Uszkodzenie wentylatora może być przyczyną uszkodzenia uzwojenia stojana, wymagającego pełnego jego przezwojenia. Rzadko, ale zda-

rzają się przypadki zerwania łopatki wentylatora w przypadku, gdy są one przyspawane do jednego wieńca, lub jak zaprezentowano na rysunku 12a, może ulec zerwaniu fragment wieńca wzmacniającego wentylatora (rys. 12b) między spawami łączącymi łopatki wentylatora z tym wieńcem. Odrywający się fragment wieńca wentylatora pod działaniem sił odśrodkowych, niszczył izolację główną i zwojową czoł cewek uzwojenia stojana (rys. 12c).

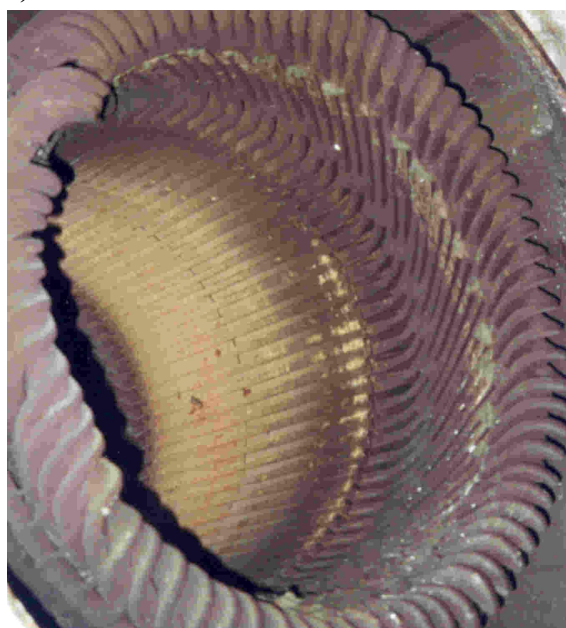
a)



b)



c)

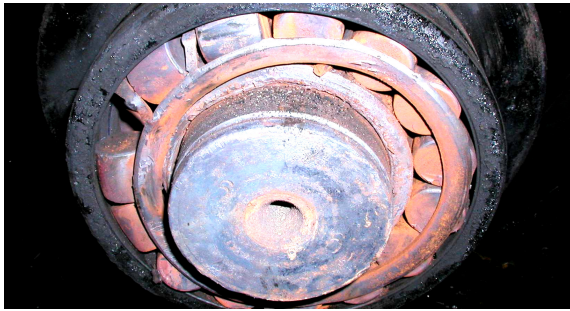


Rys. 12. Skutki awarii silnika w wyniku uszkodzenie wentylatora: a) - miejsce zerwania segmentu wieńca wentylatora, b) - zerwany segment, c) - uszkodzenia uzwojenia stojana

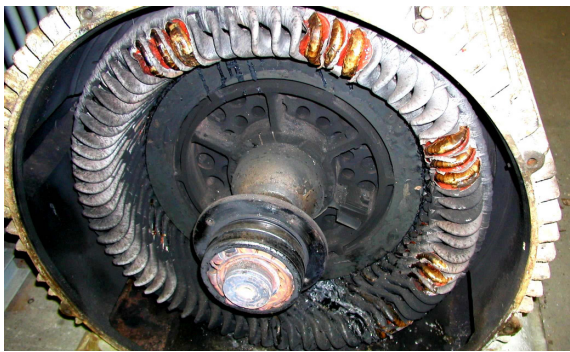
3.3. Uszkodzenia węzła łożyskowego wirnika

Uszkodzenie węzła łożyskowego może być spowodowane: uszkodzeniem łożyska (w tym prądami łożyskowymi), brakiem smarowania łożyska, a także nieprawidłowym połączeniem silnika z urządzeniem napędzanym. Przykłady skutków uszkodzenia łożysk tocznych zaprezentowano na rysunku 13.

a)



b)



c)



d)



Rys. 13. Uszkodzenia łożysk tocznych i ich skutki: a) i c) – uszkodzone łożyska, b) – uszkodzone uzwojenie stojana, d) – zniszczony czop łożyskowy po uszkodzeniu łożyska (rys. c)

3.4. Urwanie wału wirnika

Rzadką, ale występującą, przyczyną awarii silnika jest urwanie wału wirnika spowodowane: zmęczeniem materiału i przyspieszonym działaniem karbu występującym w ukształtowaniu wału, rodzajem obciążeń końcówki wału lub nieprawidłowym montażem silnika z urządzeniem napędzanym. Rysunek 14a przedstawia urwany wał wirnika w strefie przejścia czopu łożyskowego w konstrukcję wirnika, na której jest zamontowany rdzeń wirnika. Na rysunku 14b jest widoczny złom zmęczeniowy urwanego wału wirnika na początku końcówki wału na zewnątrz silnika.

Najgroźniejsze w skutkach jest urwanie wału wirnika za łożyskiem po stronie wewnętrznej silnika. Do chwili wyłączenia zasilania, silnik wytwarza moment obrotowy, przy czym wirnik ociera o rdzeń stojana. To powoduje wycieranie rdzenia stojana i wirnika, prowadzące w konsekwencji do zniszczenia uzwojenia stojana i wirnika. Przykład tych uszkodzeń, wywołanych urwaniem wału (rys. 14a) przedstawiono na rysunkach 15a i 15b.

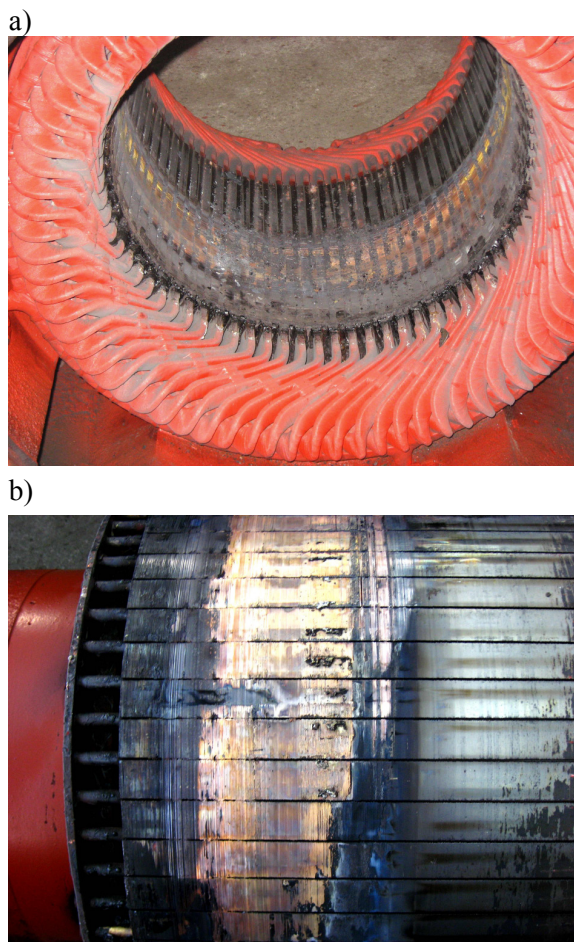
a)



b)



Rys. 14. Złomy zmęczeniowy urwanych wałów wirników: a) - wewnątrz i b) - zewnątrz silnika



Rys. 15. Widok uszkodzeń rdzenia stojana – a) i wirnika – b) spowodowane zerwaniem wału (rys. 14a)

4. Podsumowanie

1. Podstawową przyczyną uszkodzeń w uzwojeniu stojana są drgania cewek wymuszane siłami elektrodynamicznymi. Drgania te przyczyniają się do stopniowej degradacji izolacji zwojowej i głównej cewek. W konsekwencji występują zwarcia zwojowe w cewkach lub zwarcia do rdzenia stojana powodujące wystąpienie prądów zwarciowych. Prądy zwarciowe powodują między innymi: wytopienia miedzi zwojowej, deformacje czoł cewek wywołane siłami elektrodynamicznymi, miejscowe wytopienia blach rdzenia stojana. Uszkodzenia te powodują awarię silnika, której usunięcie wymaga wykonania nowego uzwojenia stojana.
2. Uszkodzenie uzwojenia prętowego wirnika silnika klatkowego jest z zasady procesem długotrwałym. Zawsze pęknięcia prętów klatki wirnika zapoczątkowane są mikropęknięciami, które są przede wszystkim wynikiem różnicy temperatur między prętami

uzwojenia. Postępujące mikropęknięcia powodują w konsekwencji wytopienie łukiem elektrycznym prętów uzwojenia klatkowego. Dodatkowymi czynnikami przyspieszającymi degradację klatki wirnika są siły elektrodynamiczne występujące w początkowym etapie rozruchu silnika oraz siły odśrodkowe, działające na masy własne uzwojenia wirnika w końcowym etapie rozruchu i po rozruchu silnika. Dotyczy to głównie wirników dwuklatkowych.

3. Istnieje jeszcze wiele przyczyn uszkodzeń uzwojeń stojanów, których wystąpienie prowadzi do awarii silnika, Należą do nich między innymi:
 - a) Obrót rdzenia stojana (o kilka stopni) względem korpusu silnika z powodu nieprawidłowego zabezpieczenia rdzenia przed takim obrotem.
 - b) Wytopienie łukiem elektrycznym połączeń tablicy zasilającej silnika z uzwojeniem stojana z powodu nieprawidłowo wykonanych tych połączeń.
 - c) Przeprowadzanie prób napięciowych izolacji uzwojenia stojana podczas każdego przeglądu głównych silnika, które zawsze prowadzi do pogorszenia stanu izolacji uzwojenia.

Literatura

- [1]. Drak B.: *Zagadnienia elektromechaniczne czoł uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy prądu przemiennego*, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Zesz. 1401, Gliwice 1998, ss. 189
- [2]. Drak B.: *Ekspertyzy przyczyn awarii silników indukcyjnych dużej mocy*. Gliwice 1995 do 2009, materiały niepublikowane

Autor

Dr hab. inż. Bronisław Drak, prof. Pol. Śl.,
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie Instytutu Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel/fax: 32-2371447
E-mail: bronislaw.drak@polsl.pl
b.drak@upcpoczta.pl

Artykuł opracowano w ramach grantu:
6025/B/T02/2011/40