

Analiza uszkodzeń silników wysokonapięciowych prądu przemiennego w elektrowniach zawodowych

Bronisław Drak, Piotr Zientek

1. Wstęp

W napędach głównych urządzeń potrzeb własnych elektrowni zawodowych i elektrociepłowni stosuje się silniki indukcyjne prądu przemiennego o mocach od 100 do 6300 kW, zasilane napięciem 6 kV. Większość tych silników została wyprodukowana w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Niemal wszystkie pracujące silniki są po remontach przeprowadzanych po ich awariach. W ramach remontów najczęściej zachodziła konieczność wykonania nowego uzwojenia stojana. Dotyczy to silników napędzających pompy wody zasilającej, młyny węglowe i wentylatory młynowe. Często uszkodzeniu ulegał także jednocześnie stojan i wirnik. Uszkodzenia wirników występują głównie w strefie połączeń lutowanych prętów uzwojeń klatkowych z pierścieniami zwierającymi. W silnikach o wirnikach dwuklatkowych uszkodzeniu ulegają przede wszystkim klatki rozruchowe wirnika. Rzadziej występują awarie spowodowane uszkodzeniem samego łożyska, łożyska i stojana oraz wentylatora i stojana silnika. Mniejsza liczba awarii łożysk spowodowana jest szybkim rozwojem nowoczesnych technik diagnozowania stanu łożysk tocznych, dzięki którym dokonywana jest wymiana łożysk na nowe, przed ostatecznym zniszczeniem łożyska, które prowadzi do awarii silnika (wirnika, jak i stojana).

2. Statystyka uszkodzeń silników

Na podstawie ekspertyz z lat 1995–2010 uszkodzeń silników indukcyjnych dużej mocy zainstalowanych w napędach potrzeb własnych 5 elektrowni zawodowych i kilkunastu elektrociepłowni (głównie na południu Polski) przeprowadzono analizę statystyczną przyczyn i skutków awarii 290 silników. Podczas analizy szczególną uwagę zwrócono na rodzaj uszkodzenia, które bezpośrednio wywołało awarię, a nie uszkodzenia pochodne od tego uszkodzenia, których można było uniknąć, stosując bardziej rozbudowane i szybsze zabezpieczenia. Statystyki wykonano dla różnych zestawień, m.in. z uwzględnieniem mocy silników, liczby par biegunów, rodzaju napędu (miejsca zainstalowania) oraz czasu, jaki upłynął od ostatniego przezwojenia stojana do kolejnej awarii silnika. Na podstawie analizy materiałów określono 20 głównych przyczyn awarii silników oraz 8 przyczyn mniej ważnych, występujących znacznie rzadziej. Procentowe zestawienie typowych awarii silników przedstawiono na rysunku 1.

Z przedstawionego wykresu widać, że najwięcej awarii silników spowodowanych jest zwarcie zwojowym uzwojenia stojana oraz uszkodzeniem izolacji głównej (przebicie do rdzenia

ANALYSIS OF FAILURES OF HIGH-POWER INDUCTIVE MOTORS IN ELECTRIC POWER STATION

Abstract: The paper presents results of statistic analysis of large power induction motors damages mounted as company own drives of industrial power stations and heat and power stations. Special attention was paid to main reasons of motors failures. Bar chart presents the percentage list of typical motor failures. Comparison was made of damage number in 5 industrial power plants and in several heat and power plants. Faultless operation periods of inductive motors are presented in Table. The second part of the paper present selected effects of motor failures.

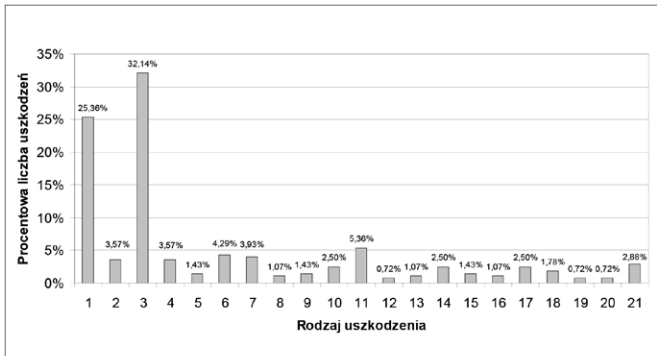
stojana). Procentowe zestawienie tych uszkodzeń w rozpatrywanych 5 elektrowniach zawodowych i kilkunastu elektrociepłowniach przedstawiono na rysunku 2.

Źródło uszkodzenia w silnikach indukcyjnych najczęściej występuje w stojanie maszyny. Często zdarza się jednak, że uszkodzenie wentylatora, łożyska lub wirnika silnika powoduje bardzo poważne uszkodzenie stojana, które kończy się jego przezwojeniem. W takich przypadkach bardzo często dochodzi do zatarcia rdzenia stojana przez rdzeń wirnika lub uszkodzenia połączeń czołowych uzwojenia stojana. Procentowe ujęcie miejsc uszkodzeń silników w czasie ich awarii przedstawiono na rysunku 3 oraz w tabeli 1.

Podział wszystkich analizowanych uszkodzeń pomiędzy rozpatrywane elektrownie przedstawiono na rysunku 4.

Bazując na rysunku 4, można jednoznacznie stwierdzić, że w trzech elektrowniach wystąpiła podobna ilość awarii. Ponieważ liczba zainstalowanych silników w napędach potrzeb własnych w rozpatrywanych elektrowniach może być zróżnicowana, dlatego dokonano także procentowych obliczeń miejsc występowania uszkodzeń silników, osobno w poszczególnych elektrowniach. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Widać, że we wszystkich rozpatrywanych elektrowniach zawodowych głównym miejscem wystąpienia awarii jest stojan. Z pozostałych uszkodzeń największa ilość to uszkodzenia stojana spowodowane awarią wirnika. Sporadycznie występowały uszkodzenia łożysk oraz uszkodzenia uzwojeń stojana w wyniku awarii wentylatora lub łożysk silnika.



Rys. 1. Procentowe zestawienie typowych awarii silników indukcyjnych.
Legenda:

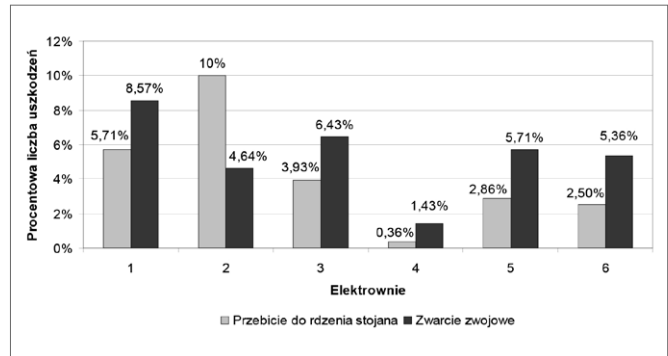
1. Przebiecie do rdzenia stojana.
2. Upalenie cewki od przewodu zasilającego.
3. Zwarcie zwojowe.
4. Przebiecie do pierścienia usztywniającego.
5. Wytarcie przez uszkodzony wirnik.
6. Upalenie połączenia międzycewkowego.
7. Upalenie przewodu zasilającego od izolatora.
8. Wytarcie izolacji czoł zerwanym wysięgiem klatki.
9. Obrót całego rdzenia.
10. Uszkodzenie łożyska.
11. Uszkodzenie wirnika uszkodziło stojan.
12. Deformacja czoł oraz zerwanie ich wiązań.
13. Pęknięcie przewodów zwojowych w strefie ich połączenia lutowanego (pęknięcie zezwoju).
14. Upalenie połączenia obręczy z zezwojem fazowym jednej fazy uzwojenia stojana po stronie zasilania.
15. Zwarcie przewodu zasilającego jedną z faz uzwojenia stojana z połączeniem międzycewkowym.
16. Pogarszające się własności izolacji czynnych i rezerwowych przewodów zasilających w silniku.
17. Uszkodzenie klatki wirnika.
18. Zwarcie międzyfazowe.
19. Uszkodzenie wentylatora uszkodziło stojan.
20. Uszkodzenie łożyska uszkodziło stojan.
21. Inne uszkodzenia.

Do innych uszkodzeń należy zaliczyć:

1. Uszkodzenie układu chłodzenia silnika po stronie dodatkowego wentylatora.
2. Uszkodzenie łącznika wirnika silnika pierścieniowego.
3. Zerwanie końcówki wału wirnika.
4. Rozruch z przerwą jednej fazy.
5. Wyłączenie zasilania silnika z jednej sekcji i przełączenie silnika na drugą sekcję, przy istniejącym dużym napięciu resztkowym na zaciskach silnika.
6. Awaria transformatora zasilania spowodowała awarię silnika.
7. Nagłe obniżenie stanu izolacji jednej fazy stojana.
8. Zanieczyszczenie pyłem węglowym.

Tabela 1. Procentowe ujęcie miejsc uszkodzeń silników

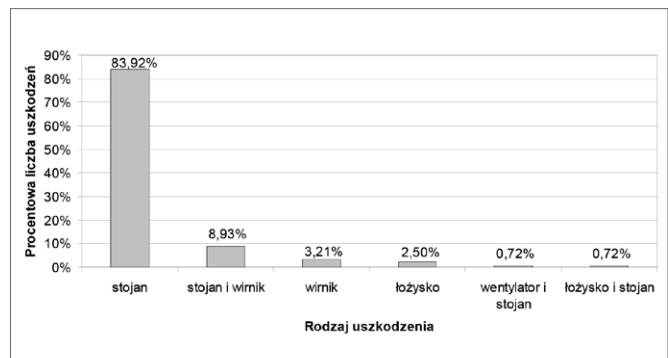
Miejsce uszkodzenia silnika	Procentowe uszkodzenia [%]					
	Elektrownie					
	1	2	3	4	5	6
stojan	18,57	18,21	17,50	2,86	9,29	17,50
wirnik	-	0,36	1,07	-	0,36	1,43
stojan + wirnik	0,72	1,78	-	0,36	1,43	4,64
łożysko	-	-	0,36	-	-	2,14
wentylator + stojan	0,36	-	-	-	0,36	-
łożysko + stojan	-	-	0,36	-	-	0,36



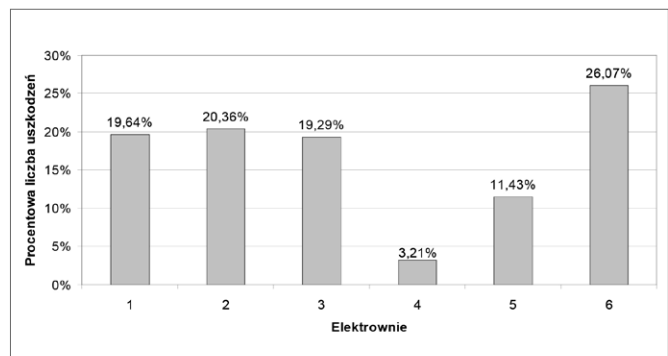
Rys. 2. Procentowe zestawienie zwarcia zwojowego oraz przebiecia do rdzenia stojana w rozpatrywanych elektrowniach zawodowych i elektrociepłowniach

Legenda:

- 1, 2, 3, 4, 5 – elektrownie zawodowe.
6 – małe elektrownie i elektrociepłownie.



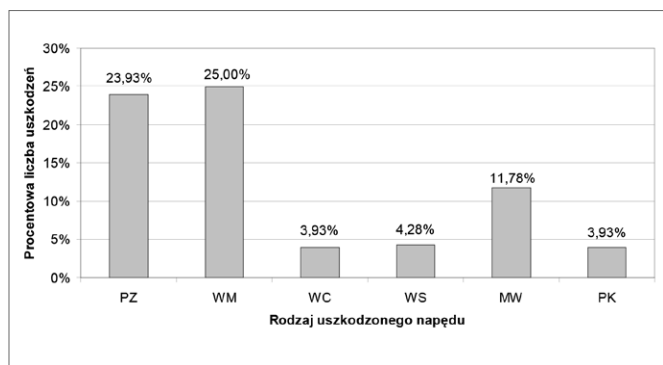
Rys. 3. Procentowe ujęcie miejsc uszkodzeń silników w czasie ich awarii



Rys. 4. Procentowa liczba uszkodzeń silników w poszczególnych elektrowniach

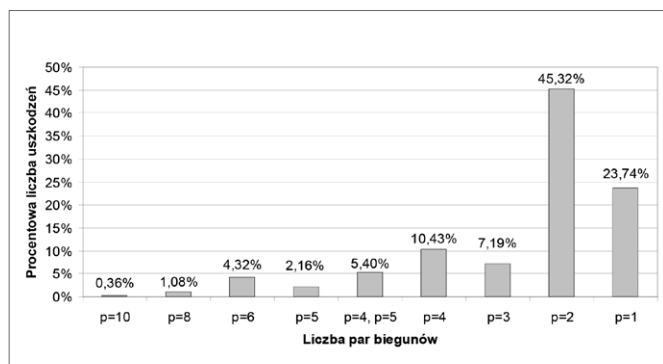
Tabela 2. Procentowe ujęcie miejsc uszkodzeń silników w poszczególnych elektrowniach

Miejsce uszkodzenia silnika	Procentowe uszkodzenia [%]					
	Elektrownie					
	1	2	3	4	5	6
stojan	94,6	89,4	90,6	88,9	81,3	67,1
wirnik	-	1,8	5,6	-	3,1	5,5
stojan + wirnik	3,6	8,8	-	11,1	12,5	17,8
łożysko	-	-	1,9	-	-	8,2
wentylator + stojan	1,8	-	-	-	3,1	-
łożysko + stojan	-	-	1,9	-	-	1,4

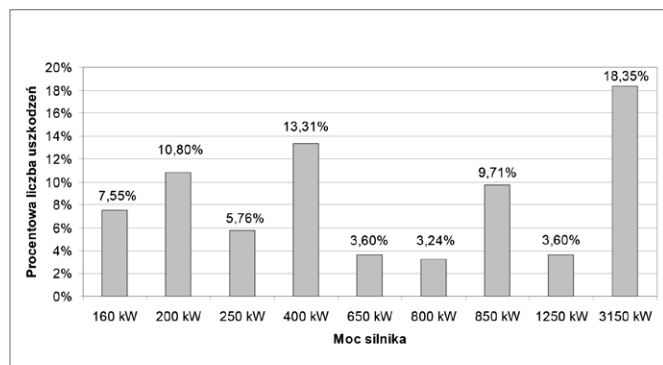


Rys. 5. Procentowa liczba uszkodzeń silników w typowych napędach, gdzie:

- PZ – pompy wody zasilającej;
- PK – pompy kondensatu;
- WM – wentylatory młynowe;
- WC, WS – wentylatory ciągu, spalin;
- MW – młyny węglowe



Rys. 6. Procentowa liczba uszkodzeń silników w zależności od liczby par biegunów



Rys. 7. Procentowa liczba uszkodzeń dla różnych mocy silników

Tabela 3. Okresy bezawaryjnej pracy silników

Wyszczególnienie	Okres bezawaryjnej pracy [lata]	
	do pierwszego przezwojenia stojana	po ostatnim przezwojeniu stojana
Ogółem w latach 1996–2009	13,7	9,2
Trzy elektrownie w latach 1996–2009	14,3	10,5
Napędy wymienione na rys. 5 w latach 1996–2009	12,3	10,1

Rodzaj awarii oraz miejsce jej wystąpienia w silniku w dużej mierze uzależniony jest od rodzaju napędu, w którym pracował silnik. Dla każdego napędu należy zastosować silnik o odpowiedniej konstrukcji (np. układu chłodzenia) oraz mocy i prędkości obrotowej.

Zestawienie awarii silników z uwzględnieniem typowych napędów dla różnych mocy i prędkości obrotowych (par biegunów silnika) przedstawiono na rysunkach 5, 6 i 7.

Dla określenia okresów bezawaryjnej pracy silników do pierwszego przezwojenia stojana oraz po ostatnim przezwojeniu stojana w zakładach remontowych opracowano statystykę na podstawie „historii silników”. Dane statystyczne przedstawiono w tabeli 3.

Statystyka wykazuje, że najkrótsze okresy bezawaryjnej pracy silników wynosiły: 1 rok do pierwszego przezwojenia i 2 lata między kolejnymi przezwojeniami stojana. Po roku pracy uszkodzenie stojana najczęściej spowodowane było awarią wirnika lub awarią układu zasilania silnika (rozruch 2-fazowy). Najdłuższe okresy bezawaryjnej pracy silników wynosiły odpowiednio 30, 31, 32, 36, 37 i 48 lat. Po tylu latach awarie najczęściej występowały w wyniku uszkodzenia izolacji głównej uzwojenia stojana (przebiecie do rdzenia), zwarcia zwojowego, przebiecia uzwojenia do pierścienia usztywniającego oraz upalenia przewodu zasilającego uzwojenie stojana.

3. Przykładowe uszkodzenia silników

W protokołach poawaryjnych najczęściej podaje się, że przyczyną awarii silnika są:

- zwarcia zwojowe, zwarcia do rdzenia stojana, deformacja czoł uzwojenia stojana;
 - uszkodzenia lub zniszczenia uzwojenia klatkowego wirnika połączone z uszkodzeniem uzwojenia stojana.
- Zwarcia w uzwojeniach stojana są poprzedzone uszkodzeniem izolacji, najczęściej izolacji głównej, spowodowanym wycieraniem izolacji (rys. 8 i 9) podczas drgań uzwojenia wymuszonych siłami elektrodynamicznymi.



Rys. 8. Wytarcia izolacji głównej w żłobkach oostre blachy rdzenia stojana



Rys. 9. Wzajemne wytarcie izolacji na połączeniach międzycewkowych i zasilających

Zniszczona izolacja główna powoduje w żłobkach zwarcie do rdzenia stojana, które może spowodować wypalenie klinów żłobkowych (rys. 10), miejscowe uszkodzenia blach rdzenia (rys. 11) oraz zwarcia zwojowe prowadzące do wytopienia między zwojowej (rys. 11).

Łagodnym uszkodzeniem w strefie łuków stożkowych czoł uzwojenia stojana jest widoczna na rysunku 13 deformacja czoł skrajnych cewek w grupach fazowych. Deformacja ta jest skutkiem działania sił elektrodynamicznych, które starają się rozzerwać wiązania usztywniające czoła. Takie uszkodzenie może wystąpić bez zwarcia w uzwojeniu stojana.

W przypadku np. zwarcia międzyfazowego i stosunkowo długiego jego trwania, może wystąpić całkowita strefowa deformacja czoł cewek, co uwidoczniło na rysunku 14.

W strefie wykorbienia czoł cewek i nieprawidłowego ich ukształtowaniu, może wystąpić wzajemne wycieranie ich izolacji głównej, prowadzące do zwarcia, którego skutki uwidoczniło na rysunku 15.

Uszkodzenie izolacji zwojowej występuje często w strefie główek cewek, co jest wynikiem wzdluznego wzajemnego przemieszczania się zezwojów cewek. Skutkiem tego są zwarcia zwojowe, powodujące wypalenia izolacji i wytopienie przewodów zwojowych (rys. 16).

Wzajemne wycieranie izolacji uwidoczniło na rysunku 9 jest przyczyną zwarc między połączeniami zasilającymi uzwojenie stojana a połączeniami międzycewkowymi. Skutki takie zwarcia uwidoczniło na rysunku 17.

Dane statystyczne podane w rozdziale 2 obejmują uszkodzenia wirników silników, których awarie zostały zgłoszone do ubezpieczycieli.

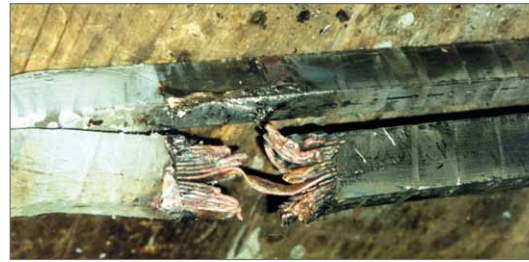
W wirnikach silników dwuklatkowych stopniowemu uszkodzeniu ulega klatka rozruchowa, która może ulec pełnemu zniszczeniu (rys. 18).



Rys. 10. Wypalone kliny żłobkowe w wyniku zwarc do rdzenia stojana i zwarc zwojowych



Rys. 11. Zwarcie cewki uzwojenia do rdzenia na wyjściu ze żłobka stojana



Rys. 12. Wytopione przewody zwojowe cewki w wyniku zwarcia zwojowego



Rys. 13. Widok nieznaczących deformacji czoł



Rys. 14. Strefowe zniszczenie czoł cewek



Rys. 15. Skutki wytarcia izolacji głównej



Rys. 16. Zniszczenia główek cewek

Rys. 17. Skutki zwarcia między połączeniami zasilającymi uzwojenie stojana



Rys. 18. Zniszczona klatka rozruchowa silnika dwuklatkowego



Rys. 19. Zerwane pręty i pęknięte pierścienie



Rys. 20. Uszkodzenie wirnika jednoklatkowego



Innym powodem zniszczenia klatki rozruchowej jest zerwanie większości prętów oraz pęknięcia pierścieni zwierających (rys. 19).

W wirnikach jednoklatkowych z prętami o przekroju trapezowym często występuje wysuwanie klinów usztywniających pręty w żłobkach. Może to spowodować zerwanie lutu i urwanie części pozapakietowej pręta (rys. 20).

4. Podsumowanie

Długoletnie oględziny i analizy przyczyn awarii silników indukcyjnych dużej mocy prądu przemiennego, pracujących w napędach urządzeń potrzeb własnych elektrowni zawodowych i elektrociepłowni, pozwalają na wysunięcie pewnych wniosków ogólnych.

W czasie awarii silników w około 84% uszkodzeniu ulegają uzwojenia stojana. Pozostałe uszkodzenia występują w wirnikach i są spowodowane uszkodzeniami uzwojeń klatkowych lub uszkodzeniami łożysk tocznych silnika, często w wyniku ich zatarcia.


W głównych urządzeniach potrzeb własnych elektrowni zawodowych najczęściej ulegają awarii silniki napędzające pompy wody zasilającej bloki oraz wentylatory młynowe.

Uszkodzenie izolacji uzwojenia jest najczęstszą przyczyną awarii stojana.

Statystyka wykazuje, że okres bezawaryjnej pracy nowych silników jest dłuższy niż okres od ostatniego przewożenia stojana. Analiza materiałów z awarii silników wskazuje, że zwiększa się okres bezawaryjnej pracy silników po ostatnim przewożeniu stojana. Zdarzają się jednak nieliczne przypadki, w których te same egzemplarze silników były przewożone co dwa lub trzy lata.

Literatura

- [1] DRAK B.: *Zagadnienia elektromechaniczne czoł uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych dużej mocy prądu przemiennego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „ELEKTRYKA” z. 163, Gliwice 1998, s. 189.
- [2] DRAK B.: *Analiza awarii silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 54/1997, BOBRME Komel Katowice, ss. 82–87.
- [3] DRAK B.: *Wpływ uszkodzeń wirników klatkowych na skutki awarii silników indukcyjnych dużej mocy*. Mat. XII Konferencji Energetyki, Szczyrk 2001, ss. 229–240.
- [4] DRAK B., ZIENTEK P.: *Uszkodzenia łożysk tocznych silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 64/2002, BOBRME Komel Katowice, ss. 49–52.
- [5] DRAK B.: *Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 89/2011, BOBRME Komel Katowice, ss. 7–14.
- [6] DRAK B.: *Nietypowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 96/2012, BOBRME Komel Katowice, ss. 1–6.

 dr hab. inż. Bronisław Drak Prof. Pol. Śl. – Politechnika Śląska, Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, e-mail: bronislaw.drak@polsl.gliwice.pl;
dr inż. Piotr Zientek – Politechnika Śląska, Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, e-mail: piotr.zientek@polsl.pl

artykuł recenzowany