

Szczególny przypadek awarii silnika indukcyjnego w podziemiach kopalni węgla kamiennego

Artur Polak – DFME DAMEL S.A. Dąbrowa Górnicza

1. Wstęp

Najczęstszymi awariami eksploatowanych silników indukcyjnych są awarie węzłów łożyskowych spowodowane: uszkodzeniem łożyska (w tym prądami łożyskowymi), brakiem smarowania łożyska, a także nieprawidłowym połączeniem silnika z urządzeniem napędzanym. Często przyczyną uszkodzenia silnika jest awaria układu elektroizolacyjnego obwodu stajana. Kolejnym typem uszkodzeń są awarie wirnika: uszkodzenie klatki wirnika, skrzywienie czopu wału i nader rzadko ukręcenie wału.

W przypadku awarii silnika stanowiącego napęd sprężarki typu WRV 321/1.32 mamy do czynienia z przypadkiem szczególnym zaliczanym do tzw. awarii nietypowych [1].

2. Opis uszkodzenia silnika

Stan silnika przedstawiono do pierwszych oględzin:

Łapy silnika oderwane od pozostałej części korpusu, tarcza łożyskowa od strony napędowej „D” rozbita na liczne fragmenty. Śruby mocujące tarczę pozostały wkręcone w korpus. Czop wału zgięty i oderwany od pozostałej jego części w miejscu podpory łożyskowej. Podczas oględzin czopa wału szczególną uwagę zwrócił nienaruszony klin wpustowy. Tarcza łożyskowa od strony przeciwnapędowej „ND” popękana, śruby wkręcone do korpusu silnika trzymały jej fragmenty. W obrębie gniazda łożyskowego nie zauważono znaczących zniszczeń. Wentylator całkowicie zniszczony. Osłona wentylatora zniszczona. Sprzęgło zniszczone, część środkowa wybrzuszona od strony silnika. Błazki dylatacyjne sprzęgła wyłamane. Śruba mocująca jedną z grup błazek jest wyłamana.

Skrzynka zaciskowa rozbita, oddzielona od korpusu. Uzwojenie stojana od strony „D” uszkodzone mechanicznie bez znaków przegrzania i zwarcia. Wirnik osadzony we wnętrzu stojana. W wirniku zauważono zerwane śruby mocujące ciężarki wyważenia wirnika.

STRESZCZENIE: W szeregu publikacji prezentowane są przykłady licznych awarii silników indukcyjnych dużej mocy. Analizując przyczyny awarii silników, można wymienić szereg nietypowych przyczyn, których początkiem są przede wszystkim uszkodzenia o charakterze mechanicznym i zmęczeniowym. Niejednokrotnie skutki takich uszkodzeń prowadzą do poważnych awarii o charakterze katastrofalnym. Celem opisanego badania było wyjaśnienie przyczyn wystąpienia awarii silnika o mocy PN=630 kW i napięciu zasilania – UN=6000 V, który stanowił napęd sprężarki agregatu chłodniczego. Awaria silnika miała miejsce w podziemiach kopalni węgla kamiennego.

W przypadku opisanego awarii silnika mamy do czynienia z przypadkiem szczególnym zaliczanym do tzw. awarii nietypowych. Choć taka kwalifikacja zdarzeń jest nieformalna to określa ona bardzo rzadkie przypadki ich występowania.

Słowa kluczowe: awaria katastrofalna, napęd.

Summary: In the following series of publications, examples of failures of high-power squirrel cage motors are presented.

While analysing failure cases of motors, it is possible to list out number of unusual causes, the beginning of which are primarily mechanical and fatigue damage. Often the effects of such damage leads to serious catastrophic failures.

The purpose of the expertise was to explain the cause of failure of motor with power of PN = 610 kW and supply voltage of UN = 6000 V, which was powering refrigeration unit. The failure occurred in underground mine of bituminous coal.

In the described case, we are dealing with special case of so-called atypical failures. Although such a qualification is informal, it defines very rare cases of their occurrence.

Keywords: catastrophic failures, powering refrigeration unit.

reklama

Na wirniku ujawniły się odbarwienia blach rdzenia, które świadczą o wysokiej temperaturze, która pojawiła się podczas awarii. Rozmieszczenie odbarwień rdzenia w części środkowej przebiega równomiernie po całym obwodzie, po stronie napędowej „D” odbarwienie obejmuje jedynie 3/4 obwodu, a po stronie przeciwnapędowej brak śladów odbarwień i otarć. Ślady te powstały w wyniku zaistniałej awarii.

Łożysko od strony napędowej „D” od strony wału znacznie odkształcone i odbarwione. Zewnętrzna panewka nie ma znaczących odbarwień i brak odkształcenia. Koszyk łożyska jest zniszczony lecz elementy toczne nie wysypały się. Łożysko można obrócić pomimo dużej dewastacji. Łożysko od strony przeciwnapędowej „ND” można obrócić bez znaczącego oporu.

W łożysku od strony „ND” znajdował się smar. Uzwojenie stojana w części czołowej od strony „ND” jest uszkodzone mechanicznie i można dostrzec skutki krótkotrwałego zwarcia.

Jeden kołek ustalający stojan w korpusie jest ścięty, drugi wyrwany, a trzeci nienaruszony. Podczas oględzin zwrócono uwagę na bardzo chropowatą powierzchnię przełomów fragmentów odlewu.

Uszkodzenie uzwojenia stojana od strony przeciwnapędowej „ND” było następstwem utraty podpory wału wirnika w tarczy łożyskowej od strony napędowej „D”.

3. Hipotetyczny przebieg awarii silnika

Dysponując jedynie wrakiem silnika przeanalizowano rodzaj zauważonych uszkodzeń oraz ich rozmieszczenie. Stworzono hipotetyczny przebieg zaistniałej awarii.

Sugerowany przebieg awarii zestawiono z wykresem czasowym zarejestrowanych parametrów pracy sprężarki rys. 9 – przebiegi czasowe wartości skutecznej prądu fazowego silnika oraz wydajności agregatu chłodniczego.

- **Etap I** – praca ustalona z małymi wahaniami obciążenia silnika do godz. 17.55.
- **Etap II** – pęknięcie korpusu silnika pomiędzy 17.55 – 18.01
- **Etap III** – pęknięcie korpusu i oddzielenie się łap od pozostałej części korpusu ok. godz. 18.01

Zarejestrowana była wtedy następująca sekwencja załączeń i wyłączeń transformatora:

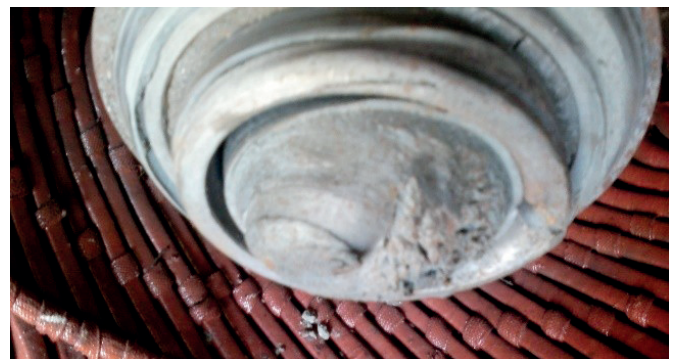
- godz. 05:04:00 – wyłączenie, 05:05:59 załączenie (119 s przerwy);
- godz. 05:58:55 – wyłączenie, 05:59:48 załączenie (53 s przerwy);
- godz. 14:55:08 – wyłączenie, 14:56:17 załączenie (69 s przerwy);
- godz. 17:03:29 – wyłączenie, 17:03:38 załączenie (9 s przerwy);
- godz. 17:09:54 – wyłączenie, 17:10:02 załączenie (8 s przerwy);
- godz. 21:16:22 – wyłączenie, 21:19:06 załączenie (164 s przerwy);
- **Etap IV** – wyrwanie i krzywienie wału, pęknięcie tarczy łożyskowej od strony napędowej „D” i ukręcenie wału silnika.



Fot. 1. Łapy silnika oderwane od pozostałej części korpusu



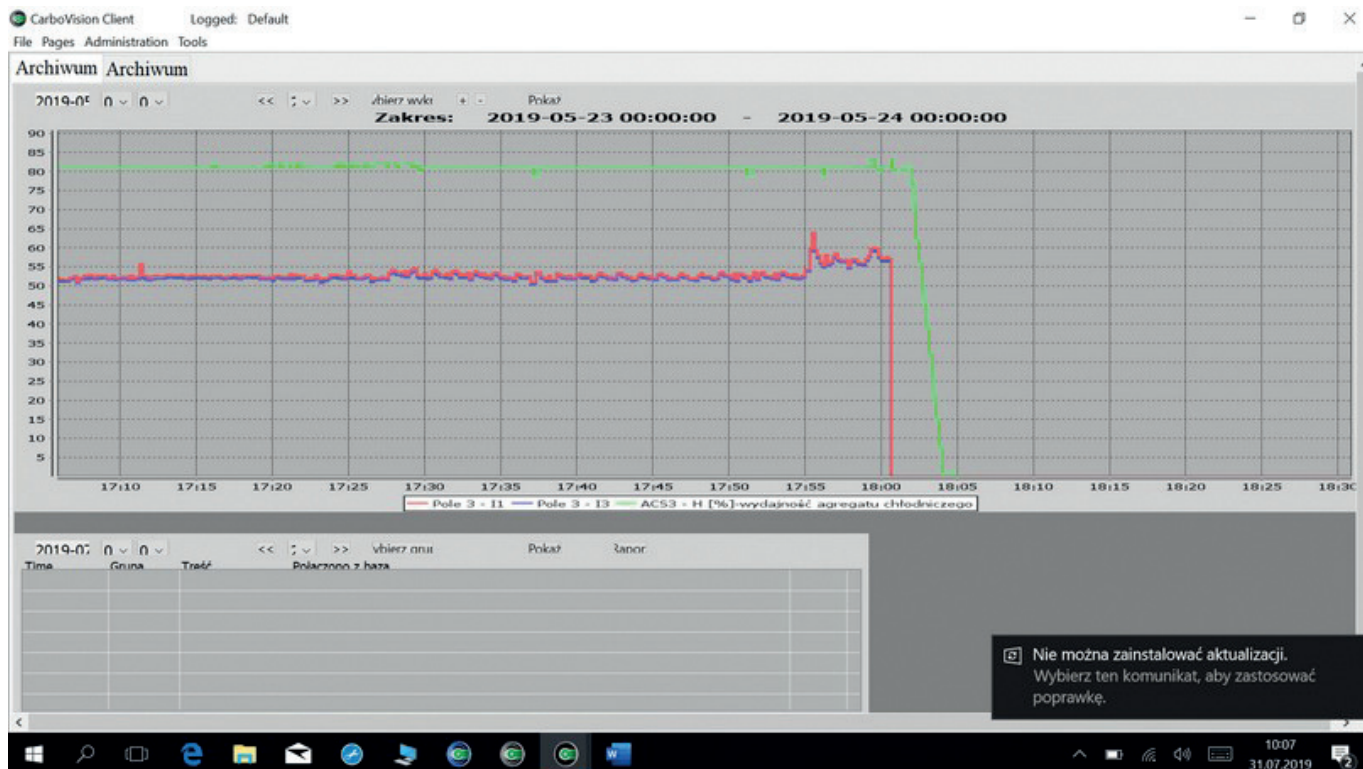
Fot. 2. Fragmenty tarczy łożyskowej od strony napędowej



Fot. 3. Ukręcony czop wału



Fot. 4. Wirnik uszkodzonego silnika



Fot. 6. Wykres czasowy zarejestrowanych parametrów pracy sprężarki

4. Konkluzja i uwagi końcowe

Analiza zgromadzonych dokumentów, literatury przedmiotu pozwalają stwierdzić, co następuje:

- 4.1 nie stwierdzono wystąpienia wad ukrytych w silniku,
- 4.2 nie stwierdzono zaniedbań po stronie eksploatacji: brak śladów przegrzania łożysk, łożyska były smarowane, co potwierdzają ślady smaru w zdemontowanych łożyskach,
- 4.3 z wykresu czasowego parametrów pracy sprężarki wynika, że silnik nie był przeciążany, pracował z prądem o wartości niższej od wartości znamionowej, która wynosi $I_n = 62,5$ A.

Przekroczenie wartości prądu znamionowego nastąpiło ok. godz. 17.55 w chwili przyjętej za początek destrukcji silnika wywołanej awarią (fot. 6. Wykres czasowy zarejestrowanych parametrów pracy sprężarki).

- 4.4 zasprężlenie silnika ze sprężarką było wykonane poprawnie, o czym świadczy brak otarć i uszkodzeń klina wpustowego silnika (fot. 9. Obraz pełnej destrukcji silnika).

Przyczyną uszkodzenia silnika było zdarzenie o charakterze zewnętrznego uderzenia mechanicznego, które wyzwoliło energię skoncentrowanych naprężeń, co w konsekwencji spowodowało powstanie przełomu korpusu na linii łap. Najbardziej prawdopodobnymi przyczynami wystąpienia uderzenia mechanicznego mogło być tąpnięcie w podziemiu kopalni spowodowane ruchem górotworu lub bezpośrednie uderzenie w korpus silnika przedmiotem o znacznej masie np. podczas



Fot. 5. Wnętrze stojana



Fot. 7. Oddzielone łapy od pozostałej części korpusu silnika.

prac transportowych prowadzonych w pobliżu zainstalowanego silnika. Pęknięcie korpusu i oddzielenie się łap od pozostałej części korpusu wywołało utratę stabilności podpory wału wirnika. Odspojony od łap korpus silnika z wirującym wirnikiem został poderwany i wyginając czop wału wirnik spowodował zniszczenie tarczy łożyskowej od strony napędowej „D”, a następnie ukręcenie zgiętego już czopa wału.

5. Inne uwagi:

- przyczyną awarii nie mogło być zahamowanie silnika od strony urządzenia napędzanego, co wiązałoby się z jego przeciążeniem, brak śladów uszkodzeń klina wpustowego silnika,
- otarcia wirnika są konsekwencją utraty stabilnego mocowania wirnika w tarczach łożyskowych, jak było można zauważyć wirnik nie dokonał pełnego obrotu po uszkodzeniu tarczy łożyskowej – ślad przegrzania na $\frac{3}{4}$ obwodu pakietu wirnika,
- uszkodzenie uzwojenia stojana po stronie przeciwnapędowej „ND” jest wynikiem przesunięcia poosiowego wirnika po uszkodzeniu tarczy łożyskowej „D”,
- nie stwierdzono wystąpienia wad ukrytych silnika.

Na podstawie informacji publicznej zamieszczonej w Raplocie Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej (strona <http://www.grss.gig.eu/pl/>) [6] wynika, że w czasie poprzedzającym wystąpienie awarii miały miejsce zjawiska związane z ruchem górotworu. Trudno więc się zgodzić, że nie wystąpiły „niepokojące wstrząsy”. Wstrząsy odnotowane w raporcie GRSS wskazują wystąpienie w okolicy rzeźnionego wyrobiska wstrząsów o magnitudzie 2,5 – 2,7 na głębokości 900 m. Niestety w lipcu 2019 r. na tym samym poziomie miał miejsce wstrząs o magnitudzie 2,66 i został zaliczony do kategorii wstrząsów wysokoenergetycznych, stąd szukanie analogii.

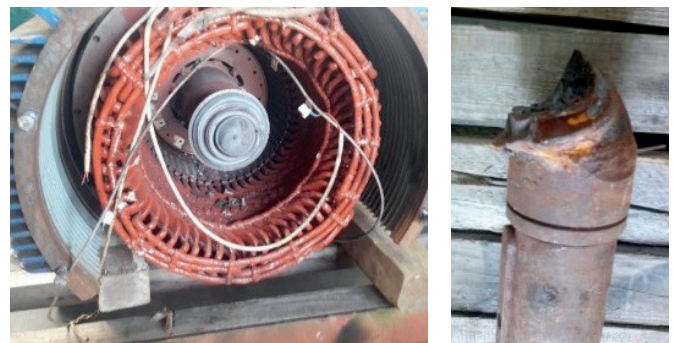
Jeśli chodzi o określenie wytrzymałości obudowy na oddziaływanie sił zewnętrznych możemy odwołać się do normy PN-G-38010:1997 (nadal stosowana) [4], która jednoznacznie określa w pkt 2.14, że korpusy silników o mocy $P_n > 45 \text{ kW}$ muszą pochłonąć energię uderzenia nie mniejszą jak 250 Nm. Szczegółowy opis przebiegu próby zawarto w pkt 3.5.15 przytoczonej normy. Niestety żeliwo szare, z którego wytwarza się odlewy korpusów, obudów, bloków pomp, sprężarek i silników charakteryzuje się dobrą podatnością na obróbkę skrawaniem, dużą odpornością na ścieranie, zdolnością tłumienia drgań, ale znaczącymi wadami żeliwa szarego są: słaba udatność spowodowana płatkową strukturą grafitu oraz skłonność do koncentracji naprężeń [3].

Awaria omawianego silnika zaliczana jest to przypadków szczególnych. Tego typu awarie występują niezwykle rzadko. Skąd też literatura przedmiotu jest bardzo uboga. Wartość siły przyłożonej do obudowy silnika, która spowodowała jej zniszczenie nie jest jedynym istotnym parametrem. Nie wątpliwie innymi czynnikami, które przyczyniły się do wystąpienia awarii były: możliwość koncentracji naprężeń w wyniku sił zewnętrznych i prędkość narastania siły inicjującej pęknięcie korpusu (udar).

Szukanie przyczyny awarii w tzw. wadach ukrytych korpusu silnika nie ma podstaw. Wady ukryte w budowie korpusu



Fot. 8. Ukręcony czop wału



Fot. 9. Obraz pełnej destrukcji silnika

byłyby związane z błędem w wykonaniu odlewu (błąd technologii odlewania lub wada materiału). Tego typu wady powodują zniszczenia typu zmęczeniowego. W przedmiotowej awarii mieliśmy do czynienia ze zdarzeniem dynamicznym, krótkotrwałym. Wszystkie dostarczone do ekspertyzy przełomy żeliwa charakteryzowały się ostrym ziarnem bez oznak wzajemnego przemieszczania się (wycierania) krawędzi przełomów, co wyklucza mechanizm zmęczeniowy powstania awarii. ■

Literatura

- [1] B. Drak: Nietypowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 3/2012 (96)
- [2] Drak B., Zientek P.: Analiza uszkodzeń silników wysokonapięciowych prądu przemiennego w elektrowniach zawodowych. „Napędy i Sterowanie” 2/2014
- [3] Żeliwo: struktura, właściwości, zastosowanie. /T. 1/ Czesław Podrzucki. Kraków: wydaw. ZG STOP, 1991.
- [4] Norma PN-G-38010:1997 Ochrona pracy w górnictwie – Silniki indukcyjne trójfazowe klatkowe do maszyn górniczych – Wymagania i badania
- [5] L.A. Dobrzański: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo WNT W-wa 2002
- [6] Raport Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej z dn. 23.05.2019 r. – <http://www.grss.gig.eu/pl/>