

Zniszczenia klatek rozruchowych wirników dwuklatkowych silników indukcyjnych

Bronisław Drak

1. Wstęp

Uzwojenie wirnika dwuklatkowego obejmuje klatkę rozruchową umieszczoną w strefie zewnętrznej rdzenia wirnika i umieszczoną pod nią klatkę pracy. Pręty uzwojenia klatki rozruchowej są wykonywane najczęściej z mosiądzu, rzadziej z brązu, a pierścienie zwierające są wykonywane z miedzi. Pręty i pierścienie zwierające klatki pracy są wykonywane z miedzi. Połączenia prętów klatki z pierścieniami zwierającymi tworzą luty twarde.

Uszkodzenia uzwojeń klatkowych wirników występują niemal zawsze w strefie pozapakietowej prętów klatki, głównie w strefie połączeń prętów z pierścieniami zwierającymi [1, 2, 3]. W wirnikach dwuklatkowych uszkodzenia występują w klatce rozruchowej wirnika.

Naprężenia mechaniczne w uzwojeniu klatkowym wirnika [5] są wynikiem działania:

- sił elektrodynamicznych, działających głównie na części żłobkowe prętów klatki;
- naprężeń wywołanych nierównomiernym rozkładem temperatury w uzwojeniu klatkowym wirnika w czasie rozruchu silnika;
- naprężeń wywołanych działaniem sił odśrodkowych na masy własne prętów uzwojenia klatkowego i pierścieni zwierających.

Asymetria uzwojenia klatkowego wirnika wywołana jego uszkodzeniem wpływa na prądy w stojanie oraz na moment obrotowy silnika. Pęknięcie lutu łączącego jeden pręt klatki z pierścieniem zwierającym lub wytopienie łukiem elektrycznym jednego pręta nie wpływa praktycznie na pracę silnika. Wzrost procentowy uszkodzonych (np. wytopionych łukiem elektrycznym) prętów klatki wirnika zdecydowanie wpływa na charakterystykę momentu silnika i prądów stojana. Wpływ procentowych uszkodzeń prętów klatki wirnika na przebieg momentu silnika i prądów stojana w czasie rozruchu silnika przedstawiono na rys. 1 [4]. Rysunki 1 a do 1 e uwiadcniają wpływ procentowych uszkodzeń prętów klatki na przebieg momentu, prądu stojana i prędkości obrotowej silnika. Rys. 1 f wskazuje na zmniejszanie momentu silnika przy procentowych uszkodzeniach prętów klatki.

Z wykresów wynika, że już kilkunastoprocentowe uszkodzenie klatki wirnika powoduje obniżenie momentu rozruchowego silnika.

2. Zniszczenia klatki rozruchowej

2.1. Zniszczenie klatki łukiem elektrycznym

Zniszczenie uzwojenia klatki rozruchowej wirnika polegające na pełnych upaleniach łukiem elektrycznym wszystkich prętów klatki uwiadczniono na rys. 2.

Zbliżenie upalonych prętów klatki łukiem elektrycznym uwiadczniono na rys. 3.

START-UP CAGES FAILURES OF INDUCTION MOTOR DOUBLE-CAGE ROTORS

Abstract: Problems of fatal failures in start-up cages of high-power induction motors double-cage rotors are discussed in this paper. The causes of faults in bars in cage winding and their impact on electromechanical properties of the motor have been analyzed. Two examples of fatal damages in rotor cages have been presented. The first one shows how electric arc burned all bars of start-up cage at both sides of rotor core. The rupture of all bars of start-up cage at the side opposite to drive, which was caused by dynamic forces, has been analyzed in the other example.

2.2. Zniszczenie klatki rozruchowej wywołane drganiami osiowymi silnika

W jednym z rozwiązań kombajnów ścianowych, pracujących w kopalniach węgla kamiennego, do napędu głowicy urabiającej węgiel stosuje się silniki indukcyjne dwuklatkowe. Silnik napędowy jest zamontowany w ramieniu kombajnu i poprzez przekładnię zębatą napędza głowicę urabiającą węgiel. Stanowi on część składową ramienia kombajnu (rys. 4).

Praktyka eksploatacyjna wykazała, że na jednej z kopalń, po stosunkowo krótkim okresie eksploatacji, następuje zniszczenie klatki rozruchowej wirnika (rys. 5) po stronie przeciwnapędowej, a po stronie napędowej nie są widoczne żadne uszkodzenia.

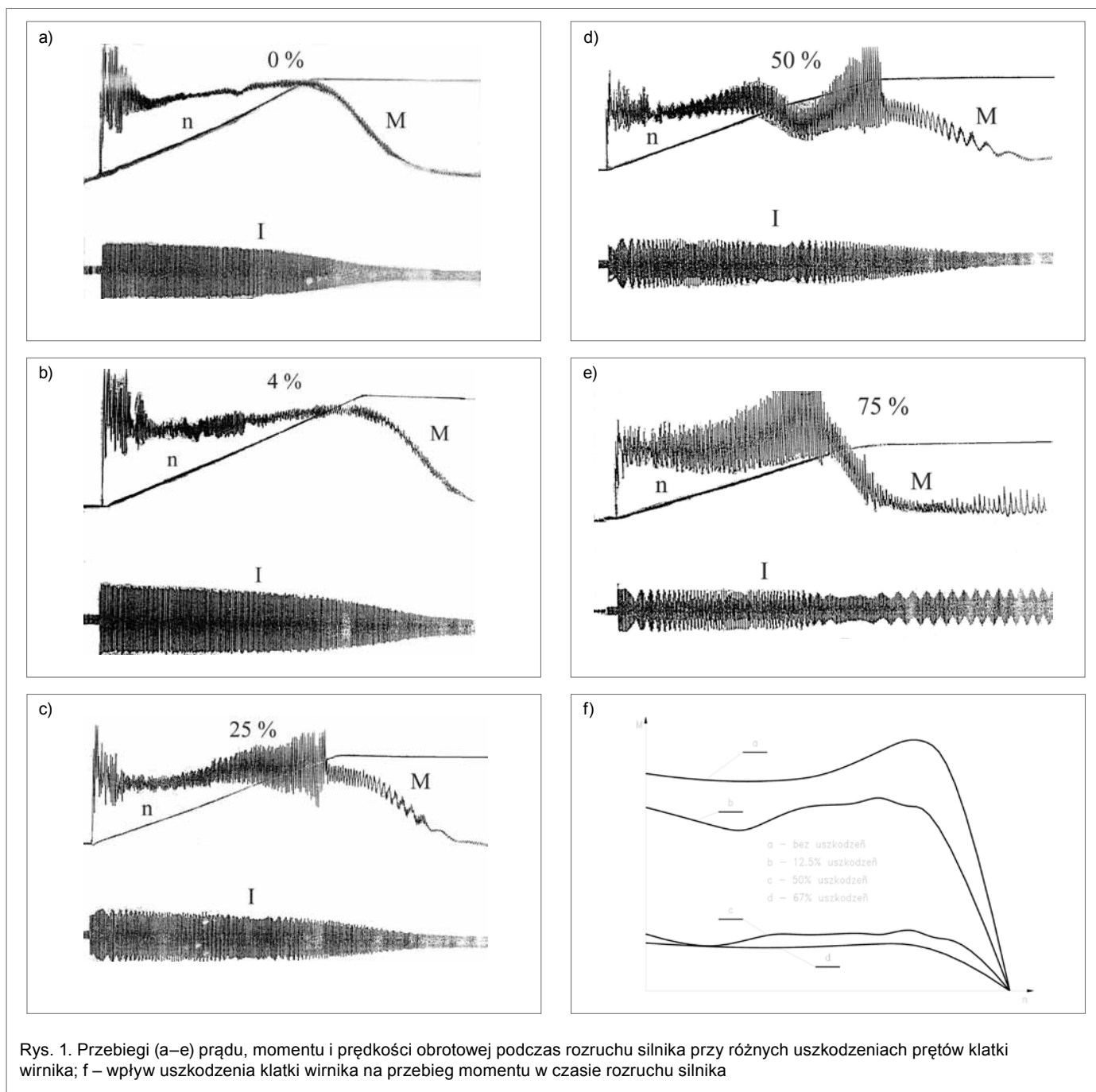
Po stronie przeciwnapędowej ulegają zerwaniu wszystkie pręty klatki rozruchowej (rys. 6) w odległości około 5 mm od pierścienia zwierającego (rys. 7).

Przeprowadzona ocena złomów zerwanych prętów klatki wykazała, że naprężenia rozciągające występujące w przekrojach poprzecznych pręta są główną przyczyną ich zrywania. Wskazują na to oględziny złomów przy około 10-krotnym powiększeniu (rys. 8), jak i przy powiększeniu w mikroskopie skaningowym. Dla celów analizy przyczyn uszkodzeń klatki rozruchowej silnika wykonano pomiary twardości na powierzchni zewnętrznej trzech odciętych końcówek prętów klatki silnika. Z pomiarów twardości metodą Rockwella wynika, że w odległości około 5 mm od miejsca zerwania pręta twardość materiału wynosiła 21 HRA, a w odległości około 20 mm, twardość wynosiła już 30 HRA.

2.2.1. Proces pęknięcia prętów klatki rozruchowej wirnika

W czasie pracy głowicy urabiającej na kombajn, w tym głównie na ramię kombajnu, działają siły dynamiczne. One to powodują drgania i uderzenia. Ich wartości są uzależnione od twardości górotworu.

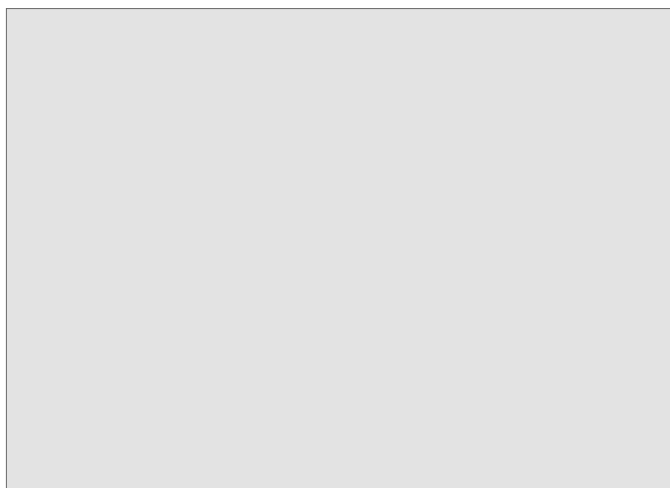
Od głowicy urabiającej pochodzą siły dynamiczne przeszerenne. Dla prętów klatki rozruchowej wirnika najbardziej



niekorzystne są siły osiowe wzdłuż ramienia urabiającego. Siły dynamiczne, które starają się nadać przyspieszenie ramienia kombajnu, są skierowane do podstawy kombajnu. W konsekwencji następuje uderzenie ramienia o podstawę kombajnu, a właściwie o przegub między ramieniem i podstawą kombajnu. Konsekwencją tego są siły dynamiczne, które działają na masy pierścieni zwierających wzdłuż osi wału wirnika silnika i są skierowane do końca wału po stronie przeciwnapędowej. W wyniku tego w prętach klatki rozruchowej wirnika, w strefie pozapakietowej po stronie przeciwnapędowej (także i w prętach klatki pracy) występują naprężenia rozciągające. W tych samych segmentach prętów klatki po stronie napędowej pod działaniem tych sił występują naprężenia ściskające.

Na zasadzie akcji – reakcji w przegubie, na początku ramienia kombajnu, na ramię działa przyspieszenie skierowane do głowicy kombajnu. Ono jest powodem działania sił bezwładności

reklama





Rys. 2. Zniszczone uzwojenie klatki rozruchowej wirnika silnika napędu potrzeb własnych elektrociepłowni



Rys. 3. Widok prętów klatki rozruchowej upalonych łukiem elektrycznym



Rys. 4. Silnik dwuklatkowy zamontowany w ramieniu kombajnu



Rys. 5. Uzwojenie klatki rozruchowej wirnika silnika do napędu kombajnu

na masy pierścieni zwierających obu klatek wirnika. W strefie pozapakietowej prętów klatki po stronie przeciwnapędowej powstają naprężenia rozciągające, a po stronie napędowej – naprężenia ściskające.

Powyższe wyjaśnienia wykazują, że pod działaniem ww. osiowych sił bezwładności na masy pierścieni zwierających, zawsze w segmentach prętów klatki po stronie przeciwnapędowej, występują naprężenia rozciągające, a po stronie napędowej występują naprężenia ściskające. Na żywotność prętów klatki decydujący wpływ mają naprężenia rozciągające.



Rys. 6. Widok zerwanych wszystkich prętów klatki rozruchowej po stronie przeciwnapędowej



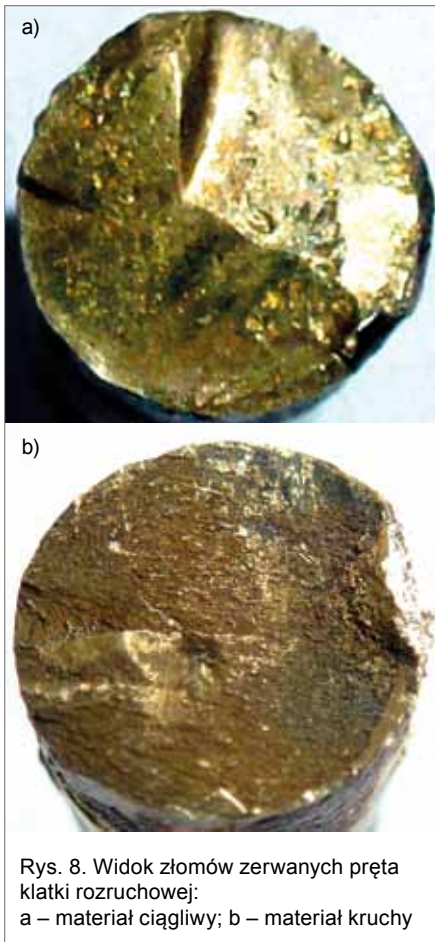
Rys. 7. Widok pierścienia zwierającego po stronie przeciwnapędowej i strefy zerwania prętów klatki rozruchowej

Złomy prętów klatki rozruchowej wskazują, że ich zerwanie wystąpiło w wyniku naprężeń zmęczeniowych po krótkich okresach ich działania. Największy udział mają naprężenia rozciągające. Uwidoczniają się także naprężenia ścinające, będące wynikiem działania sił dynamicznych w kierunku prostopadłym do osi wirnika. Kształt złomu uwidocznionego na rysunku 8a wskazuje, że materiał pręta był dość ciągliwy, a złom na rysunku 8b wskazuje, że materiał pręta był kruchy. Ta różnica w kruchości materiału może być wynikiem warunków termicznych przy lutowaniu prętów z pierścieniem zwierającym.

3. Podsumowanie

Problem uszkodzania klatek rozruchowych silników indukcyjnych jest zagadnieniem często występującym. Dotyczy to głównie silników o długich czasach rozruchu, w przypadku ich zastosowania w napędach stacjonarnych, lub silników pracujących w urządzeniu, w których działają duże siły dynamiczne.

Przy projektowaniu uzwojenia klatkowego wirnika należy zwrócić uwagę na wzrost temperatury do około 350°C [6]



Rys. 8. Widok złomów zerwanych pręta klatki rozruchowej:
a – materiał ciągliwy; b – materiał kruchy

w strefie połączeń prętów klatki z pierścieniami zwierającymi w silnikach o długotrwałych rozruchach. W tych temperaturach wytrzymałość mechaniczna materiałów elementów składowych klatki zmniejsza się dwukrotnie, a pod koniec rozruchu silnika zasadniczy wpływ na naprężenia mechaniczne w strefie pierścieni zwierających mają siły odśrodkowe działające na uzwojenia klatkowe wirnika.

W przedstawionym przykładzie zniszczenia klatki rozruchowej wirnika, podanym w rozdziale 2.2, czas rozruchu silnika wynosił od 2 do 5 sekund, co wskazuje, że temperatura uzwojenia klatkowego nie mogła znacząco wzrosnąć, na co wskazywały także oględziny uszkodzeń klatki wirnika.

Silnik ze zniszczoną klatką rozruchową może przejść proces rozruchu, gdy jego obciążenie mechaniczne jest stosunkowo małe. W przypadku, gdy oba pierścienie zwierające są oddzielone od prętów klatki, pręty uzwojenia stanowią w pewnym sensie klatkę z prętami biernymi. Łatwiejszy jest rozruch, gdy odrywaniu od prętów klatki ulegnie jeden pierścień zwierający.

Przy doborze silnika należy zwrócić szczególną uwagę na warunki jego pracy w napędzie konkretnego urządzenia. Dotyczy to nie tylko czasu rozruchu, wilgotności i zapylenia, lecz także obciążeń dynamicznych i drgań urządzenia napędzanego przez silnik.

Podczas eksploatacji silnika należy stosować diagnostykę umożliwiającą ocenę stanu technicznego klatki wirnika w oparciu o pomiar prądu stojana podczas rozruchu silnika. Podczas okresowych przeglądów technicznych silnika należy prowadzić szczegółowe oględziny uzwojenia klatkowego wirnika dla oceny stanu technicznego uzwojenia.

Literatura

- [1] DRĄK B.: *Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 89, 2011, wyd. BOBRME Komel, s. 7–14.
- [2] DRĄK B.: *Results of high power inductive motors failures in power industry*. ISEM 2004, Praga 2004.
- [3] DRĄK B.: *Uszkodzenia uzwojeń klatkowych wirników silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej ELEKTRYKA, Gliwice 2004, z. 188, s. 103–110.
- [4] DRĄK B.: *Analiza awarii silników indukcyjnych dużej mocy prądu przemiennego*. Proceedings of XL ISEM SME;2004, Polska 2004.
- [5] DRĄK B., RUT R.: *Naprężenia w luźnych głębokożłobkowych prętach klatek wirników indukcyjnych w czasie długotrwałego rozruchu*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej ELEKTRYKA, Gliwice 2001, z. 177, s. 49–56.
- [6] RUT. R.: *Analiza nieustalonych stanów termicznych uzwojeń silników indukcyjnych dużej mocy w trudnych warunkach rozruchowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2001, s. 180.

Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego Narodowego Centrum Nauki 6025/B/T02/2011/40.

dr hab. inż. Bronisław Drak, prof. Pol. Śl.
– Instytutu Elektrotechniki i Informatyki
Politechniki Śląskiej,
e-mail: bronislaw.drak@polsl.pl