

Maciej Bernatt, BOBRME Komel, Katowice
Ryszard Rut, Jan Mróz, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

O USZKODZENIACH KLATEK WIRNIKA

ROTOR CAGE FAILURES

Abstract: Rotor cage failures are not regarded as the main cause of the induction motors breakdowns. An induction motor with broken squirrel cage bars can still be exploited, consecutive starts may be executed. At durability tests carried out by Komel Centre some years ago on a prototype 800 kW induction motor, it was stated, that even if 80% of the rotor bars were broken, the motor started fairly successfully and could be loaded. But any rotor cage failure (e.g. single bar or end ring fracture) causes electromagnetic asymmetry of the motor; main technical features of the motor are heavily deteriorated. Sound power level and vibration level become higher, efficiency factor lower, temperature rise of the stator winding may be higher. Starting (locked rotor) and breakdown torque is lower. In the paper special laboratory tests of a standard, 4 kW, 1500 RMP, 3 phase motor with aluminium rotor cast are presented. The tests were carried out on symmetric (“healthy”) squirrel cage and on the cage with one, three and six broken bars. Several examples of large AC motors with damaged rotors and a reliable method for rotor squirrel cage diagnostics are presented.

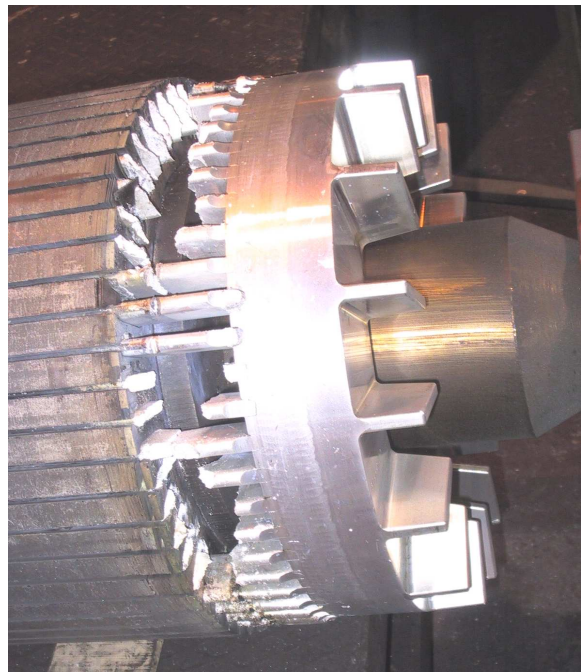
1. Wstęp

Uszkodzenia klatek wirnika zajmują dość odległą pozycję w statystykach awaryjności silników elektrycznych. Silnik z poważnie uszkodzoną klatką pracować może nadal z pozoru normalnie, a nawet odbywać kolejne rozruchy. Podczas niszczących trwałościowych badań prowadzonych przez Komel dla prototypowych silników mocy kilkuset kW stwierdzono, iż przy pęknięciu i wyłamaniu nawet 80% prętów klatki, rozruch silnika na biegu jałowym, bez sprzęgnięcia z maszyną napędzaną odbywał się niemal identycznie jak dla silnika z klatką zdrową.

Pęknięcia lub inne uszkodzenia klatki wywołują jednak asymetrię obwodu elektromagnetycznego całego silnika, która pociąga za sobą szereg negatywnych zjawisk, takich jak:

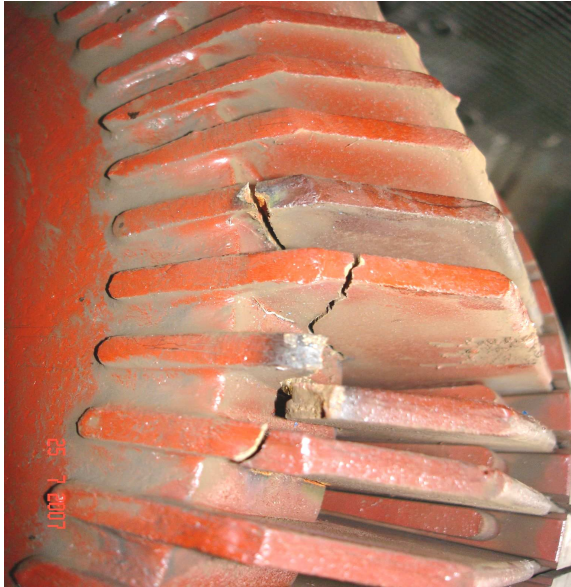
- zwiększenie przyrostu temperatury uzwojenia stojana,
- zwiększenie strat i obniżenie współczynnika sprawności, a więc wzrost kosztu eksploatacji,
- odkształcenie przebiegu momentu rozruchowego, a zwłaszcza obniżenie jego wartości maksymalnej,
- zwiększenie naciągu magnetycznego (większe obciążenie łożysk),
- wzrost poziomu drgań przy obciążeniu
- wzrost poziomu hałasu pochodzenia magnetycznego.

Użytkownicy zdają sobie sprawę, że przeciążenie silnika ponad moc znamionową może mieć groźne termiczne następstwa dla układu izolacji stojana. Jednak podobne efekty, bez zwiększania obciążenia na wale, mogą być również wynikiem asymetrii elektromagnetycznej pochodzącej od uszkodzonej klatki.

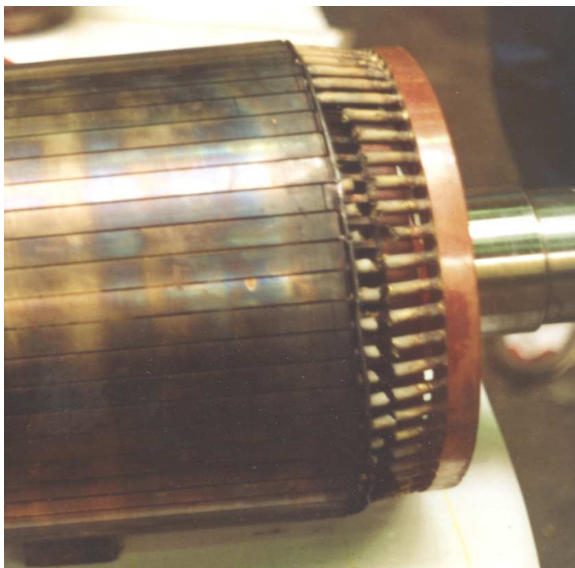


Rys. 1. Uszkodzony wirnik silnika 800 kW $2p=4$, klatka aluminiowa, spawana

Nawet drobne pęknięcie pręta stanowi rozpoczęcie procesu niszczenia klatki. Pręty sąsiadujące z uszkodzonym obciążają się prądowo (i termicznie) więcej, co z reguły prowadzi do kolejnych pęknięć i degradacji wirnika, a w konsekwencji do awarii silnika.



Rys. 2. Uszkodzony wirnik silnika 800 kW $2p=4$



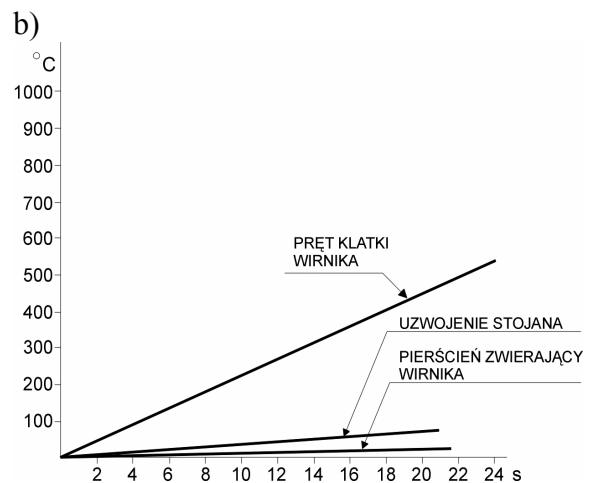
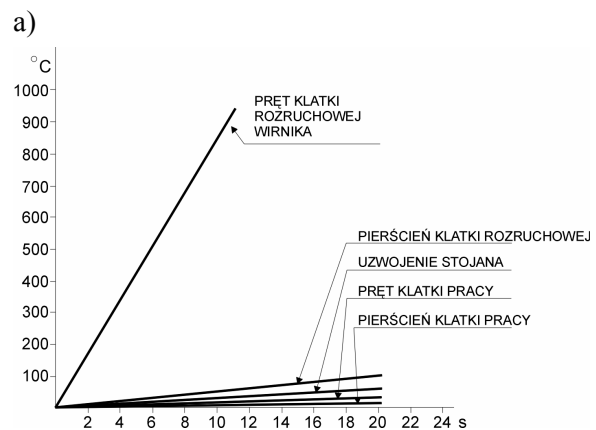
Rys. 3. Wytopiona klatka rozruchowa silnika dwuklatkowego 300 kW $2p=4$

2. Czynniki powodujące niszczenie klatek

Ciepłone i dynamiczne procesy występujące w trakcie rozruchu silnika są głównymi czynnikami powodującymi zużycie i niszczenie klatek wirnika. W trakcie rozruchu klatka gwałtownie nagrzewa się. Zgodnie z zasadą zachowania energii, cała energia kinetyczna którą w wyniku rozruchu osiągnie wirujący układ mechaniczny

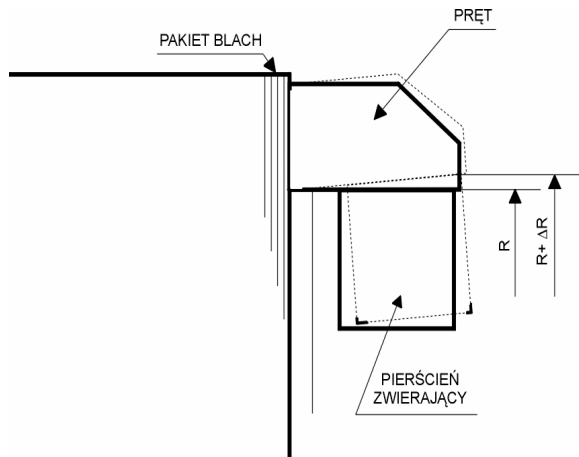
silnik - maszyna napędzana wydzielić się musi w klatce wirnika w postaci ciepła [1].

W klatkach silników średniej i dużej mocy dla poprawy ich parametrów rozruchowych wykorzystywane jest z reguły zjawisko wypierania prądu. Powoduje to nierównomierność nagrzewania się klatki (klatek) podczas rozruchu. Prędkość narastania temperatury prętów i pierścieni zwierających przy poślizgu $s=1$ (blokada wirnika) oraz w trakcie rozruchu zawiera się w granicach od jednego do kilkudziesięciu $^{\circ}\text{C/s}$ – w zależności od przyjętego rozwiązania wirnika.



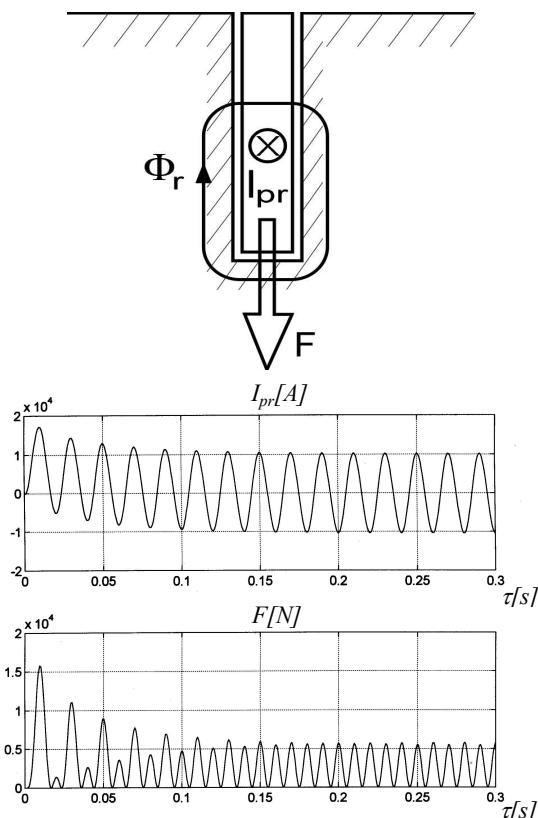
Rys. 4. Narastanie temperatury w uzwojeniach silnika 300 kW w stanie $s=1$ (blokada wirnika) a) wirnik dwuklatkowy, b) wirnik jednoklatkowy (głębokożłobkowy)

Narastanie temperatury doprowadzić może do przegrzania a nawet wytopienia materiału klatki, oraz do powstania w klatce pod koniec rozruchu znacznych naprężeń o charakterze termicznym. Największe i najgroźniejsze z nich to naprężenia zginające w prętach wywołane rozszerzalnością cieplną pierścieni zwierających.



Rys. 5. Odształcenie pozapakietowej części klatki podczas rozruchu (pierścień zwierający zawieszony swobodnie)

Płynący w prętach ułożonych w żłobkach (w ośrodku ferromagnetycznym) prąd o wielkim natężeniu wywołuje powstawanie siły elektrodynamicznej, proporcjonalnej do kwadratu prądu i pulsującej z częstotliwością równą podwójnej częstotliwości prądu wirnika.



Rys. 6. Siła elektrodynamiczna F wzbudzana w żłobkowej części prostokątnego pręta wirnika, pochodząca od współdziałania prądu I_{pr} oraz strumienia Φ_r rozproszenia żłobkowego. Przebiegi czasowe $I_{pr}(\tau)$, $F(\tau)$ w stanie $s=1$ (blokady wirnika)

Pulsująca siła skierowana jest do dna żłobka, wywoływać ona może w ustroju mechanicznym klatki wielkie naprężenia, których maksimum znajduje się zwykle w okolicy połączenia pręta z pierścieniem zwierającym [2]. Tu też właśnie najczęściej występują pęknięcia i przełamania prętów. Innymi czynnikami mogącymi prowadzić do uszkodzeń są drgania skrętne swobodnie zawieszony poza-pakietowej części klatki, a także różnice nagrzewania się prętów w sąsiadujących ze sobą żłobkach.

3. Rozwiązania konstrukcyjne klatek

W silnikach mocy małej i średniej (do kilkuset kW) regułą jest wykonanie klatki jako zalewanej aluminium. Klatka taka jest odporna na działania żłobkowej siły elektrodynamicznej, jest jednak wrażliwa na długotrwały rozruch, podczas którego może dojść do wytopienia materiału klatki. W silnikach większej mocy klatki wykonuje się jako prętowane, (z miedzi lub mosiądzu, rzadziej z aluminium) z lutowanym lub spawanym połączeniem prętów do pierścieni zwierających. Rodzaj klatki i kształt żłobków dobierany powinien być w zależności od spodziewanych warunków rozruchowych silnika. Prawidłowo wykonany silnik klatkowy średniej mocy z klatką prętowaną znieść może od kilku do nawet kilkudziesięciu tysięcy rozruchów, po czym klatkę (lub cały wirnik) należy traktować jako zużyty. Dla zwiększenia odporności klatki na siły elektrodynamiczne oraz naprężenia termiczne występujące podczas rozruchów stosuje się wiele specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. Istotna jest również topologia i sposób łączenia prętów z pierścieniami zwierającymi. (Autorzy wykonywali m.in. badania elastoptyczne ułatwiające znalezienie optymalnej konfiguracji połączenia prętów z pierścieniami zwierającymi [4]. Wyniki tych badań zastosowano m.in. przy projektowaniu serii silników Sf oraz Sh wysokiego napięcia).

W dziedzinie konstrukcji i sposobach wykonania prętowanych klatek wirnika istnieje wiele specjalnych rozwiązań i wiele patentów. Jednak żadne rozwiązanie klatki nie stanowi zabezpieczenia od skutków zbyt długiego rozruchu, a zwłaszcza zbyt długo trwającej blokady wirnika (dopuszczalny czas rozruchu, lub blokady wirnika określają projektanci silnika). Przy zbyt długim rozruchu lub zbyt długo trwającej blokadzie zawsze dochodzi do zniszczenia - wytopienia fragmentów klatki, (patrz

rys. 4). W napędach gdzie potencjalne zagrożenie blokadą wirnika istnieje, koniecznym jest stosowanie odpowiednio skutecznych zabezpieczeń, w porę odłączających silnik od sieci.

4. Badania laboratoryjne silnika z uszkodzoną klatką

Dla stwierdzenia jak uszkodzenia klatki wpływają na podstawowe parametry silnika (sprawność, przyrost temperatury uzwojenia stojana, moment rozruchowy i maksymalny) przeprowadzono badania laboratoryjne na standardowym silniku niewielkiej mocy (4 kW) typu Sh 112 M 4 z klatką zalewaną aluminium, o ilości żłobków wirnika $N_2=28$. Współczynnik sprawności wyznaczano metodą bezpośrednią, jako stosunek mocy oddawanej na wale (pomiar

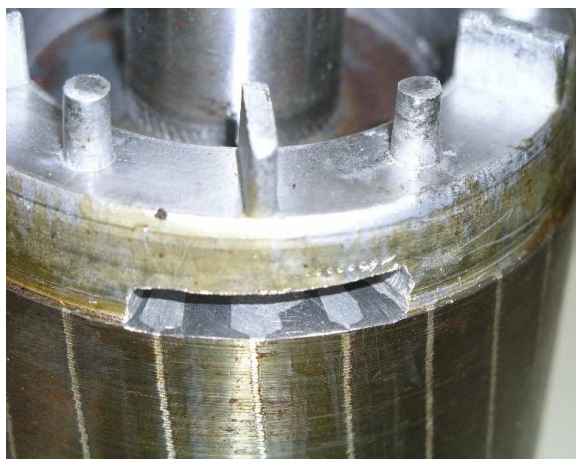
momentu na wale, pomiar prędkości obrotowej) do mocy pobieranej z sieci zasilającej (pomiar watomierzami). Metoda ta pozwala na uwzględnienie rzeczywistych wartości strat dodatkowych obciążeniowych, które w maszynie z asymetrią magnetyczną mogą mieć istotne znaczenie. Próby nagrzewania silnika i pomiar jego sprawności wykonywano przy stałym napięciu zasilania (400 V) i utrzymywanym stałym obciążeniu mocą na wale (4000 W). Złamania prętów klatki realizowano przecinając pręt na wyjściu z pakietu blach, na połączeniu z pierścieniem zwierającym. Przecięte pręty leżały w sąsiadujących żłobkach. Przyrost temperatury uzwojenia stojana określano metodą oporową. Wyniki pomiarów podano w tabeli Nr 1

Tabela 1.

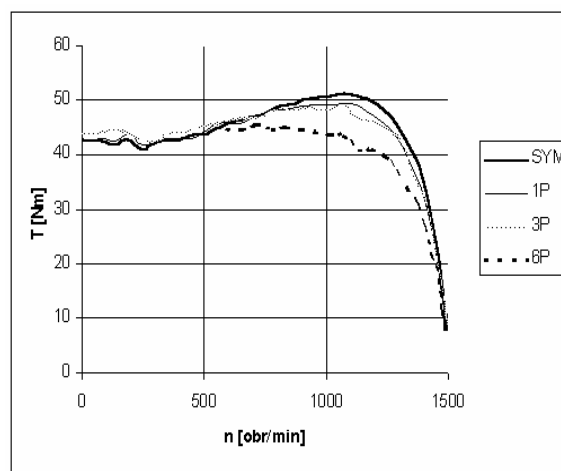
Ilość przerwanych prętów	Przyrost temp. uzw.stoj. [$^{\circ}\text{C}$]	Sprawność [%]	Prędk. obrot. przy $P=P_N$ [obr/min]
0 (klatka symetr.)	99	88.0	1423
1	104	83.6	1412
3	114	81.3	1409
6	119	80.3	1382

Wykonane pomiary laboratoryjne potwierdziły, iż wystąpienie nawet dość znacznej ilości przełamanych prętów klatki ma stosunkowo niewielki wpływ (a przynajmniej tak jest dla silnika z klatką zalewaną) na wartość początkową mo-

mentu rozruchowego silnika. Zmienia się jednak przebieg krzywej momentu $T=f(n)$ i wyraźnie obniża wartość momentu maksymalnego (patrz rys. 8).



Rys. 7. Wirnik silnika 4 kW, odcięte trzy pręty klatki



Rys. 8. Przebieg momentu T w funkcji prędkości obrotowej n silnika 4 kW dla różnych stanów uszkodzenia klatki

W miarę wzrostu ilości złamanych prętów klatki wzrasta przyrost temperatury uzwojenia stojana i obniża się współczynnik sprawności silnika. Wzrasta również poślizg i zmniejsza się prędkość obrotowa przy obciążeniu.

W trakcie badań omawianego silnika stwierdzono też, iż tzw. „falowanie” prądów przy obciążeniu, (objawiające się kołysaniem w takt poślizgu amperomierzy wskazówkowych), charakterystyczne dla silnika z uszkodzoną klatką, występuje tu wyraźnie poczynając od ilości trzech przerwanych prętów.

5. Diagnostyka stanu klatki

W napędach średniej i dużej mocy, gdzie ilość rozruchów osiąga lub przekracza 1000 w ciągu roku (czyli średnio 3 rozruchy na dobę), niszczenie lub po prostu zużycie klatki jest głównym czynnikiem determinującym dalszą trwałość silnika. Uszkodzenia nieznaczne - w postaci pękniętych lub oderwanych od pierścienia zwierającego pojedynczych prętów zwykle nie dają efektów, które w warunkach eksploatacyjnych mogłyby zwrócić uwagę obsługi. Jednak nawet pojedyncze pęknięte pręty wirnika mogą stanowić zagrożenie dla czołowej części uzwojenia stojana. Ponadto raz rozpoczęty proces pęknięcia klatki zawsze rozwija się dalej. Celowe zatem jest możliwie częste sprawdzanie stanu klatki, zwłaszcza dla silników odbywających rozruchy częste lub długotrwałe, ponieważ dla takiego reżimu pracy prawdopodobieństwo uszkodzeń klatek jest największe [5]. Istnieje wiele metod diagnozowania stanu klatki wirnika [3]. Autorzy posługują się stosunkowo prostym a niezawodnym sygnalizatorem uszkodzeń typu SU10, którego zasadę działania opisano w [7]. Diagnostykę uszkodzeń klatki wirnika można przeprowadzić tym przyrządem zarówno w czasie rozruchu silnika, jak i w czasie pracy ustalonej; konieczne jest jedynie przeprowadzenie pomiaru prądu w jednej fazie uzwojenia stojana w czasie rozruchu, lub przy obciążeniu podczas pracy ustalonej. Szeregu pomiarów wspomnianym sygnalizatorem na różnych silnikach (asynchronicznych i synchronicznych) wykonało też Laboratorium Maszyn Elektrycznych BOBRME. Diagnostykę tym sygnalizatorem może łatwo przeprowadzać każdy użytkownik silników klatkowych, nawet jeśli na danym obiekcie zainstalowane jest kilkadziesiąt sztuk silników różnych typów.

Dla ustalenia faktycznego stanu degradacji klatki, tj. ustalenia liczby przerwanych lub na-

derwanych prętów, konfiguracji uszkodzonych prętów oraz stanu pierścieni zwierających konieczne jest przeprowadzenie dokładniejszych badań diagnostycznych. Takie badania musi przeprowadzać odpowiednio wyposażony zespół badawczy, doświadczony w metodach ustalania stopnia uszkodzenia, a także w prognozowaniu dalszej degradacji klatki [8, 9].

6. Wnioski, zalecenia

Uszkodzenia klatek silników średniej i dużej mocy załączanych bezpośrednio do sieci powstają podczas ich rozruchu, rewersu i blokady wirnika. Niewielkie uszkodzenie klatki (np. przelamany jeden pręt) nie mają wielkiego wpływu na moment rozruchowy silnika. Jednak raz rozpoczęte uszkodzenie rozwija się dalej. Silnik z uszkodzoną klatką posiada wyraźnie gorszy rzeczywisty (a więc uwzględniający straty dodatkowe) współczynnik sprawności, eksploatacja takiego silnika kosztuje więcej. Wyższy jest też przyrost temperatury uzwojenia stojana, co zagraża trwałości jego układu izolacyjnego. Istniejące metody diagnostyczne pozwalają dość łatwo i niewielkim kosztem sprawdzać stan klatki w eksploatowanym silniku. W przypadku stwierdzenia uszkodzenia, a zwłaszcza w przypadku stwierdzenia jego dalszego narastania, silnik lub przynajmniej jego wirnik należy wymienić. Wymiana wirnika w danym silniku wydaje się najbardziej racjonalnym rozwiązaniem: nowy wirnik może być już konstrukcyjnie przystosowany do warunków rozruchu i eksploatacji napędzanego urządzenia. Natomiast jakiegokolwiek naprawy uszkodzonej klatki z reguły są zupełnie nieskuteczne.

7. Uwagi końcowe

W trakcie badań laboratoryjnych silnika 4 kW z klatką zalewaną aluminium stwierdzono wyraźny wzrost przyrostu temperatury uzwojenia oraz obniżenie współczynnika sprawności w miarę narastania uszkodzeń klatki. Sądzymy, że główną tego przyczyną mógł być wzrost dodatkowych strat obciążeniowych powodowany asymetrią obwodu elektromagnetycznego. Natomiast początkowy moment rozruchowy pozostawał tu praktycznie niezmienny mimo wzrostu ilości uszkodzonych prętów. Wynika to zapewne z faktu, że w silniku z klatką zalewaną dużą rolę odgrywają płynące w wirniku prądy poprzeczne. Problem ten jest jednak mało rozeznanym i wymagałby dalszych badań.

8. Literatura

- [1]. Bernatt M. O niektórych własnościach cieplnych i rozruchowych silników dwuklatkowych. Zeszyty Problemowe Komel, 1995 Nr 51 s 95-97.
- [2]. Bernatt M., Rut R. i in. Naprężenia w prętach klatki wirnika w czasie rozruchu silnika indukcyjnego. Zeszyty Problemowe Komel, 1972, Nr 16.
- [3]. Glinka T. Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. BOBRME Komel, Katowice, 1993.
- [4]. Rut R. O przydatności badań elastooptycznych w analizie uszkodzeń głębokożłobkowych prętów uzwojeń klatkowych. Zeszyty Problemowe Komel, 1986 Nr 39
- [5]. Rut R. Analiza nieustalonych stanów termicznych uzwojeń silników indukcyjnych dużej mocy w trudnych warunkach rozruchowych. Politechnika Rzeszowska 2001, (monografia).
- [6]. Mróz J., Rut R. Skutki mechaniczne niesymetrycznego przejmowania ciepła z uzwojeń klatkowych wirników silników indukcyjnych. Przegląd Elektrotechniczny 1997, Nr 10 s 261-265.
- [7]. Janik T., Rut R. Sygnalizator uszkodzeń klatek silników indukcyjnych. Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne BOBRME nr 52, 1996
- [8]. Rams W., Rusek J. Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych. BOBRME Komel, Katowice 2004
- [9]. Rusek J. Program do diagnostyki maszyn indukcyjnych klatkowych wersja in statu nascendi. SME 2004 Hajnówka