

Badania diagnostyczne i niezawodnościowe górnich maszyn transportowych zasilanych z zasilaczy przekształtnikowych

W referacie przedstawiono metodykę badań diagnostycznych i niezawodnościowych układów: zasilania, sterowania i zespołów napędowych maszyn górniczych, zasilanych z zasilaczy przekształtnikowych. Omówiono wybrane metody badań diagnostycznych silników napędowych, zasilaczy przekształtnikowych oraz węzłów łożyskowych. Opisano metodykę badań niezawodnościowych oraz przedstawiono wyniki badań awaryjności górniczych maszyn transportowych, przenośników ścianowych i taśmowych.

1. WSTĘP

W polskich kopalniach węgla kamiennego stosowane są systemy urabiania, oparte na wysokiej koncentracji wydobywania. Wymaga to zastosowania odpowiednich maszyn urabiających oraz niezawodnych systemów transportowych, zarówno transportu poziomego, jak i transportu pionowego. Systemy transportu poziomego powinny zapewniać płynną odstawę urobku do stacji załadunkowych na podziemiu lub bezpośrednio na powierzchnię [1]. Systemy transportu pionowego powinny być skoordynowane z dostawą urobku. Do odstawy urobku wykorzystuje się przede wszystkim układy przenośników taśmowych oraz w ograniczonym zakresie transport szynowy. Maszyny górnicze eksploatowane w podziemnych zakładach górniczych wymagają spełnienia warunków: energooszczędności, niezawodności oraz bezpieczeństwa pracy [1]. Systematycznie wzrasta ilość napędów maszyn górniczych zasilanych z zasilaczy przekształtnikowych. Są to układy zasilania maszyn wyciągowych, maszyn transportowych i przepływowych. Negatywnym skutkiem wzrostu mocy znamionowej zasilaczy przekształtnikowych jest wzrost poboru mocy biernej przez przekształtniki statyczne, generowanie wyższych harmonicznych prądu i napięcia w układach zasilania, występowanie komuta-

cyjnych spadków napięcia oraz pojawienie się zakłóceń elektromagnetycznych wpływających na pracę układów sterowania oraz systemów transmisji sygnałów. Wzrost częstotliwości kluczenia przekształtnika powoduje przepływ prądów pasożytniczych przez korpus silnika. Są to m.in. prądy łożyskowe przepływające przez węzeł łożyskowy, które zmniejszają jego żywotność. W referacie przedstawiono metodykę badań diagnostycznych maszyn górniczych, zasilanych z zasilaczy przekształtnikowych. Dla wybranego napędu maszyny górniczej przedstawiono przyczyny powstawania prądów pasożytniczych oraz sposoby ich ograniczania.

2. OCENA AWARYJNOŚCI MASZYN GÓRNICZYCH

Niezawodność pracy górniczej maszyny transportowej jest definiowana jako zdolność tej maszyny do realizacji zadań przewozowych w danym przedziale czasu (zmiany roboczej), w określonych warunkach eksploatacyjnych [1, 3, 4, 5]. Do oceny jej niezawodności służą wskaźniki niezawodności układu, określające rodzaj obiektu, jego własności konstrukcyjne oraz eksploatacyjne. Zgodnie z teorią niezawodności przenośniki górnicze są obiektami naprawialnymi, nato-

miast podzespoły przenośników należą zarówno do klas obiektów naprawialnych, jak i nienaprawialnych. Silnik elektryczny jest obiektem nienaprawialnym, pracującym z przerwami losowymi, a praca układu może być kontynuowana po wymianie silnika – odpowiada to kodowi 1131. Dla obiektów nienaprawialnych należy określać wskaźniki: Θ – średni czas pracy do wystąpienia awarii, $\lambda(t)$ – intensywność uszkodzeń. Badania niezawodnościowe przeprowadzono na reprezentatywnej grupie przenośników górniczych pracujących na 20 kopalniach węgla kamiennego. Informacje uzyskano na podstawie ankiet wysłanych do kopalń, rozmów z pracownikami dozoru oraz danych z zakładów remontowych silników elektrycznych. Badania wykonano w okresie 1999-2004 r. Z analizy danych wynika, że:

- w przenośnikach ze sprzęgłem hydrokinetycznym 70% uszkodzeń było spowodowanych awarią sprzęgła, 20% – awarią przekładni, 8% – uszkodzony silnik napędowy,
- w napędach przenośników ze sprzęgłem podatnym 65% uszkodzeń było spowodowanych awarią przekładni, 20% – awarią silnika napędowego, 12% – awarią sprzęgła.

Głównymi przyczynami awarii silników napędowych było zwarcie uzwojenia stojana – 80% i uszkodzenie łożysk – 16%. Podstawowymi przyczynami awarii sprzęgła hydrokinetycznego były: utrata szczelności – 70%, uszkodzenie łożysk – 25%, natomiast w przekładni najczęściej uszkodzeniu ulegały: wałek szybkobieżny – 70%, łożyska – 15%, koła zębate – 10% oraz utrata szczelności – 4%. [1, 5]. Badania przeprowadzono dla przenośników typu Rybnik, napędzanych silnikami o mocach znamionowych 90 kW lub 135 kW. W silnikach górniczych najczęściej ulegały uszkodzeniu: uzwojenie wirnika 52%, uzwojenie stojana – 18%, węzły łożyskowe – 15% i inne – 15% [5]. Na podstawie analizy przyczyn uszkodzeń 1500 silników obliczono ich średni czas pracy, który wynosi 345 dni dla silnika SZDKSp-74f oraz 517 dni dla silnika BMSKf-250, przy czym pierwsza awaria wystąpiła po 6 dniach, natomiast ostatni silnik uległ uszkodzeniu po 1737 dniach pracy [5]. Intensywność uszkodzeń określona na podstawie wyników empirycznych ma charakter monotoniczny o rozkładzie Weibulla o postaci:

$$R(t) = \exp(-t^{\delta}/\theta) \quad (1)$$

Wartości nieznanymi parametrów, określających intensywność uszkodzeń oraz dystrybuanty i przedziały pracy bezawaryjnej, można obliczyć, wykorzystując metodę największej wiarygodności Fischera [2, 3, 4, 5]. Po przeprowadzeniu obliczeń analitycz-

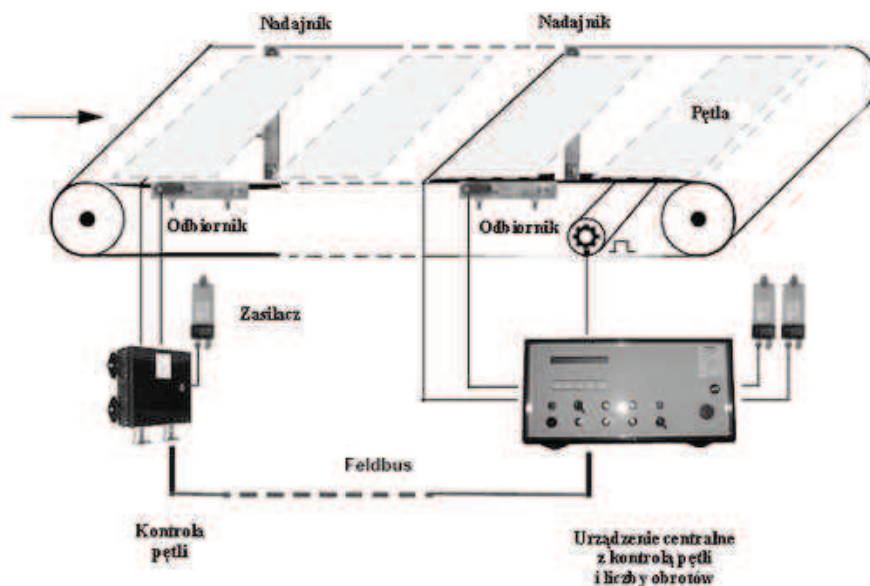
nych i wykorzystaniu metody analizy statystycznej oraz teorii niezawodności [2, 4] uzyskano dla poszczególnych silników analityczne wartości funkcji niezawodności:

- $R(t) = \exp(-t^{0,9}/179)$ dla silnika BMSKf-250,
- $R(t) = \exp(-t^{0,72}/110)$ dla silnika SZDKSp-74f. [4, 5].

3. METODYKA BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH MASZYN GÓRNICZYCH

Niezawodność pracy maszyn górniczych zależy w znacznym stopniu od prawidłowej oceny stanu technicznego ich obwodów elektrycznych, elektromechanicznych oraz mechanicznych. Ocenę można zrealizować w sposób globalny, wykorzystując centralne stanowisko diagnostyczne lub w ograniczonym zakresie, stosując elementy diagnostyczne zainstalowane w maszynie. Diagnostykę globalną powinno się przeprowadzać w sposób okresowy [1, 5, 6]. Ocena lokalna powinna być realizowana przed każdym uruchomieniem maszyny. W ramach diagnostyki lokalnej sprawdza się stan techniczny silnika napędowego, układu zasilania, obwodów sterowania i zabezpieczeń, parametry i stan techniczny elementów transportowych: bębnow napędowych oraz taśmy przenośnika, a także ocenia się skuteczność pracy układu hamulcowego.

Specjalny program symulacyjny **Diagopzen** (opracowany przez Autora) oraz odpowiednie czujniki i przetworniki pomiarowe umożliwiają realizację pomiarów w sposób automatyczny. Wyniki obliczeń numerycznych i symulacyjnych uzyskanych na podstawie modeli matematycznych silników napędowych, zasilacza przekształtnikowego oraz układu mechanicznego, są prezentowane w sposób tabelaryczny i graficzny na ekranie monitora oraz drukowane w postaci protokołu badań diagnostycznych. Ocenę stanu technicznego silnika napędowego można przeprowadzić przy wykorzystaniu wyników analizy harmonicznych napięć i prądów stojana przy zasilaniu trójfazowym i dwufazowym, analizy sygnału napięciowego, indukowanego w dodatkowym uzwojeniu umieszczonym w żłobkach stojana, stosując metody wibromechaniczne albo akustyczne [1, 5, 6]. Przy bieżącej kontroli stanu technicznego silnika napędowego można ograniczyć zakres badań do pomiarów: rezystancji uzwojeń stojana, rezystancji izolacji uzwojenia stojana, kontroli stanu technicznego łożysk silnika [1, 5]. Ocenę stanu technicznego układu zasilania (falownika napięcia) przeprowadza się, sprawdzając elementy wykonawcze, zabezpiecze-



Rys. 1. Elektroniczny system zabezpieczenia taśmy

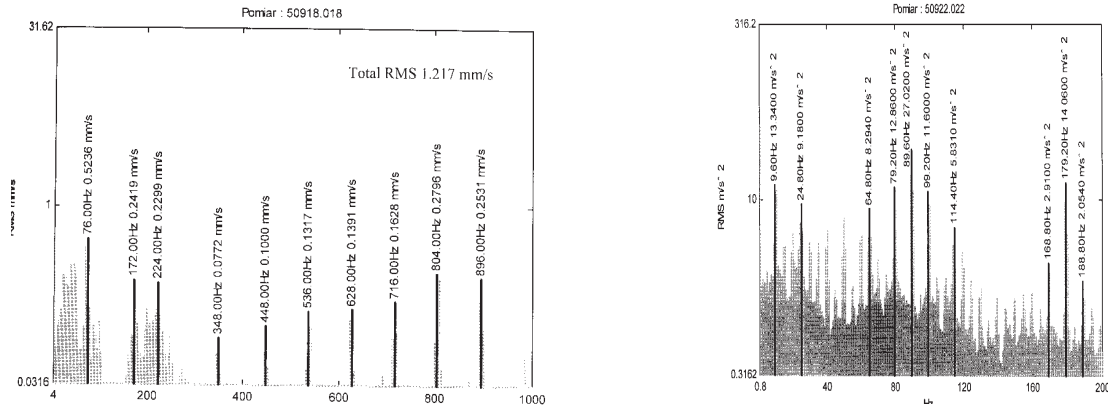
nia zwarciove oraz realizując programy testujące umieszczone w pamięci sterownika mikroprocesorowego. Do diagnostyki układu mechanicznego i kinematycznego przenośnika wykorzystuje się sygnały z czujników umieszczonych na przenośniku. Są to m.in. czujniki: temperatury, ruchu taśmy, spiętrzenia urobku oraz czujniki uszkodzeń taśmy, bębnow napędowych oraz przekładni. Sygnały z czujników są przesyłane do komputera nadrzędnego magistralą komunikacyjną, gdzie są wykorzystywane zarówno do celów diagnostycznych, jak i do optymalnego sterowania pracą przenośnika.

4. NOWOCZESNE PRZETWORNIKI POMIAROWE W NAPĘDACH MASZYN TRANSPORTOWYCH

Większość kopalń węgla kamiennego wykorzystuje do głównej odstawy urobku przenośniki taśmowe. Do pomiaru ilościowego wielkości urobku stosowane są taśmowe wagi elektroniczne, natomiast do oceny jakościowej wykorzystuje się przetworniki izotopowe lub komputerową analizę obrazu z kamery przemysłowej [1, 5]. Do kontroli pracy przenośnika oraz dla celów diagnostycznych obok przenośnika są umieszczone między innymi: zespoły łączności, wyłączniki awaryjne, urządzenia zraszające, natomiast w obrębie bębna napędowego umieszczono czujniki: prędkości bębna, prędkości taśmy, temperatury, schodzenia taśmy, spiętrzenia urobku oraz bramki materiałowe. Zastosowanie sterowników przemysłowych umożliwi wprowadzenie dla celów kontrolnych oraz diagnostycznych dodatkowych czujników, które będą in-

formować o stopniu zużycia taśmy, przekładni zębatej lub o awarii: silnika, łożysk, bębna napędowego, hamulca lub taśmy. W silniku napędowym należy zastosować czujniki temperatury: uzwojeń, łożysk, medium chłodzącego, przetworniki napięcia, prądu oraz kontroli stanu izolacji. Układ zasilania powinien posiadać przetworniki napięcia, prądu, temperatury modułów zasilacza, temperatury medium chłodzącego. Układ mechaniczny oraz układ przeniesienia napędu należy wyposażyć w czujniki: zużycia okładzin ciernych hamulca, pęknięcia bębna napędowego, uszkodzenia taśmy. Dane z czujników są przesyłane do komputerów sterownika, w których w oparciu o bazy danych, bazy wiedzy i wykorzystania odpowiednich programów diagnostycznych oraz modeli matematycznych: silnika oraz układu kinematycznego podejmuje się decyzje o stanie technicznym układu oraz o trwałości i niezawodności pracy układów przenośników taśmowych. Do wykrywania uszkodzeń taśmy mogą być wykorzystywane czujniki: elektromechaniczne, magnetyczne lub elektroniczne [1, 5].

Na rysunku 1 przedstawiono elektroniczny system zabezpieczenia taśmy przenośnika typu Sensor Guard [1, 6]. System ten służy do ochrony taśmy przed rozległymi uszkodzeniami (przecięcie taśmy) oraz sygnalizuje ruchy poprzeczne i nadmierny poślizg taśmy. W skład układu wchodzi: pętla przewodów implantowane w taśmie, detektor uszkodzeń oraz jednostka sterująca. Czujniki i głowice detektora są sprzężone rozkładem pola elektromagnetycznego. Jeśli nastąpi uszkodzenie taśmy, to zostanie uszkodzony czujnik. Wtedy detektor wykrywa uszkodzenie i wyłącza taśmę. Innym wariantem zabezpieczenia jest czujnik elektroniczny typu Conti Tronic [5], który wymaga zastosowania taśmy z zaimplantowanymi transponderami.



Rys. 2. Wyniki badań węzła łożyskowego

Do oceny zużycia, korozji oraz do wykrywania pęknięć linek stalowych stanowiących rdzeń taśmy przenośnikowej wykorzystuje się metody magnetyczne. W skład układu wchodzi wzbudnik magnetyczny z magnesami trwałymi, czujniki indukcyjne oraz defektoskop. Uszkodzony pręt powoduje zmiany rozkładu pola magnetycznego wykrywane przez defektoskop. Nowoczesne, inteligentne czujniki pomiarowe wymagają zmian w konstrukcji taśm przenośnikowych, co wiąże się z określonymi kosztami ekonomicznymi. Dlatego proponuje się wprowadzić do układów diagnostycznych przenośnika układy bazujące na rozbudowanym modelu matematycznym układu elektromechanicznego przenośnika, wykorzystując możliwości obliczeniowe sterowników przemysłowych.

Jedną z przyczyn awarii maszyn górniczych jest awaria węzła łożyskowego. Uszkodzeniu węzła łożyskowego maszyny górniczej towarzyszy wzrost drgań, głośnie praca, szum, wzrost temperatury uzwojeń i obudowy. Do diagnostyki węzła łożyskowego wykorzystuje się m.in. metody: SPM (Shock Pulse Method), SE (Spike Energy), SEE (Spectral Emitted Energy), metodę analizy częstotliwościowej, analizy akustycznej oraz metodę detekcji obwiedni. Metoda detekcji obwiedni polega na analizie drgań rezonansowych maszyny. Krótkotrwałe udary widoczne w przebiegach czasowych mierzonego sygnału maszyny mogą być spowodowane uszkodzeniem węzła łożyskowego. Znając geometrię łożyska, ilość elementów tocznych oraz prędkość obrotową bieżni, można obliczyć częstotliwości rezonansowe układu. Czujnik drgań jest umieszczany na badanym elemencie. Sygnał pomiarowy, po filtracji w filtrach pasmowo przepustowych i dopasowaniu, jest analizowany w pobliżu obliczonych częstotliwości rezonansowych. Transformaty Fouriera z otrzymanego sygnału widma pozwalają określić dominujące częstotliwości i określić stopień uszkodzenia. Przykładowe wyniki badań diagnostycznych węzła łożyskowego przedstawiono na rysunku 2.

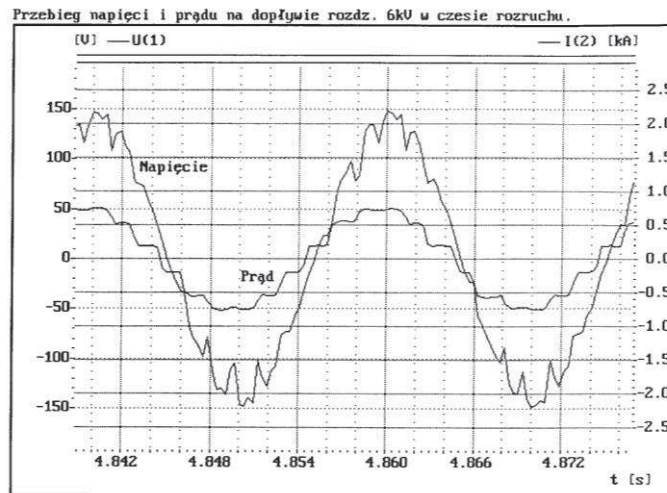
5. WPŁYW UKŁADU PRZEKSZTAŁTNIKOWEGO NA UKŁAD NAPĘDOWY MASZYN GÓRNICZYCH

W kopalniach wzrasta ilość maszyn górniczych zasilanych z przemienników częstotliwości. Są to układy napędowe maszyn wyciągowych, napędy maszyn transportowych i maszyn przepływowych. Negatywnymi skutkami zwiększania mocy zasilaczy przekształtnikowych są: wzrost poboru mocy biernej przez przekształtniki statyczne, generowanie wyższych harmonicznych prądu i napięcia w sieciach zasilających, występowanie komutacyjnych spadków napięcia oraz pojawienie się zakłóceń elektromagnetycznych. Dopuszczalne wartości poziomów zakłóceń narzucone przez obowiązujące przepisy [6] dla napięcia 6 kV wynoszą:

- wielkość załamania komutacyjnego sinusoidy napięcia zasilającego nie powinna przekraczać 20% napięcia zasilania,
- wielkość odkształcenia sinusoidy napięcia zasilającego nie może przekraczać 5% napięcia zasilania,
- wielkość wahań napięcia przy udarach mocy biernej nie może przekroczyć wartości napięcia $0,03U_{1n}$.

Przykładowe przebiegi napięcia zasilania oraz prądu pobieranego podczas rozruchu maszyny wyciągowej przedstawiono na rysunku 3. Stopień załamania komutacyjnego napięcia zasilania można ograniczyć przez zastosowanie dodatkowych dławików sieciowych lub zmieniając przesunięcia godzinowe na stronach wtórnych transformatorów zasilających (układ H). Poziom wyższych harmonicznych w górniczych sieciach energetycznych można ograniczyć, stosując filtry wyższych harmonicznych prądu oraz napięcia.

W górniczych sieciach energetycznych stosuje się przede wszystkim różne kombinacje rezonansowych filtrów LC (szeregowe lub równoległe połączenie po-



Rys. 3. Przebiegi napięcia i prądu podczas rozruchu

jemności oraz indukcyjności), dostrojonych do poszczególnych harmonicznych (5 h, 7 h, 11 h, 13 h, ...) odkształconego napięcia. Filtry statyczne LC są załączane w sposób indywidualny lub grupowy przez układy odłączników liniowych wyposażonych w blokady uniemożliwiające pracę filtrów wyższych harmonicznych przy odłączonych filtrach niższego rzędu. Większość zasilaczy przekształtnikowych maszyn górniczych jest wyposażona w sterownik MSI (PWM). Przebieg napięcia wyjściowego falownika jest superpozycją przebiegów prostokątnych o różnych szerokościach. Teoretyczny przebieg napięcia wyjściowego falownika przedstawiono na rysunku. 4. Falowniki napięcia generują szerokie spektrum wyższych harmonicznych. Istnieje szereg zjawisk na wyjściu falownika, które nie są bezpośrednio przedmiotem obowiązujących norm, a które mają ogromny wpływ na niezawodność pracy maszyny górniczej. Do zjawisk tych należą: duże stromości narastania napięcia wyjściowego du/dt , przepięcia i piki napięciowe, dodatkowe straty mocy czynnej (straty w uzwojeniu i straty mechaniczne) w silniku, ekranowanie przewodów i prądy pasożytnicze do ziemi, prądy w łożyskach silnika, zaburzenia o charakterze akustycznym. Zjawiska te negatywnie wpływają na pracę układu napędowego maszyny górniczej.



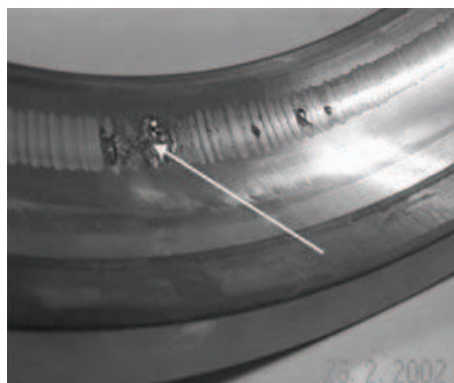
Rys. 4. Napięcie wyjściowe falownika z modulacji MSI

Duże stromości narastania napięcia wyjściowego du/dt (związane z wysoką częstotliwością przełączania tranzystorów IGBT) powodują punktowe uszkodzenie izolacji uzwojeń silnika (tzw. gorące punkty izolacji). Tętnienia prądu wywołane przez modulacje MSI oraz przez wyższe harmoniczne powodują wzrost strat w żelazie silnika. Żywotność silnika skraca się z powodu przekroczenia temperatury dopuszczalnej dla danej klasy izolacji (maszyny górnicze klasa izolacji F). Ekranowanie przewodów jest skuteczne tylko wtedy, gdy oba końce ekranu zostaną przyłączone do zacisków uziemienia falownika i silnika za pomocą obejmy o niskiej impedancji RF. Natężenie prądów pasożytniczych w ekranie przewodu zależy od wartości stromości napięcia du/dt oraz od wartości pojemności pasożytniczych ($I = C \cdot du/dt$). W przewodach o długości około 100 m wartości szczytowe impulsów prądu są rzędu 20 A i są niezależne od mocy układu napędowego.

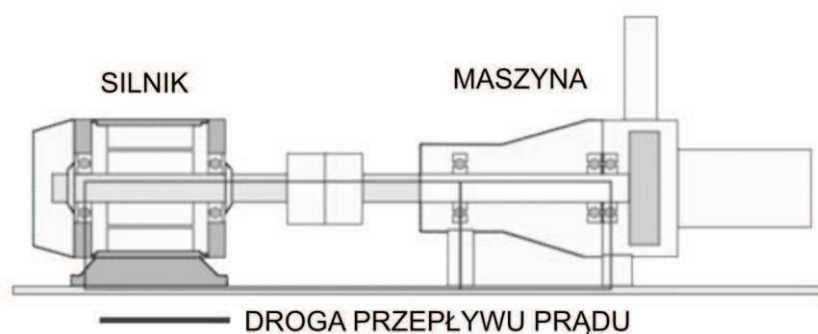
W układach napędowych maszyn górniczych łożyska silników elektrycznych ulegają uszkodzeniu już w kilka miesięcy po uruchomieniu. Objawia się to głośną pracą łożyska, występowaniem wibracji, a podczas oględzin bieżni można zauważyć równoległe, ciemne, gęste rysy ułożone prostopadle do toru przetaczania elementów tocznych. Zjawisko to może być spowodowane prądami łożyskowymi, które indukują się w wale silnika i przepływają do uziomu przez łożyska. Bardzo szybkie przełączanie zaworów przemienników częstotliwości (falowników) może generować impulsy prądowe wysokiej częstotliwości przepływające przez łożyska. Jeśli ich natężenie jest wystarczająco duże, to wystąpi zjawisko przemieszczania się cząstek metalu między kulą łożyska a bieżnią. Zjawisko to jest znane jako maszynowe elektryczne rozładowanie (Electric Discharge Machine – EDM).



Rys. 5a. Widok bieżni wewnętrznej łożyska



Rys. 5b. Widok bieżni zewnętrznej łożyska



Rys. 6. Droga przepływu prądu łożyskowego od strony napędowej wału silnika

Może to spowodować konieczność wymiany łożyska już po krótkim czasie pracy. Zmiany struktury łożyska spowodowane przepływem prądów łożyskowych przedstawiono na rysunku 5a i 5b. W układach zasilania maszyn górniczych można zaobserwować wzrost liczby uszkodzeń łożysk z powodu elektrycznego rozładowania maszynowego, występujących w okresie od jednego do sześciu miesięcy po uruchomieniu lub remoncie maszyny. Jedną z przyczyn występowania prądów łożyskowych wysokiej częstotliwości jest SEM indukowana na wale z powodu asymetrycznego rozprzyszczenia strumienia w obwodzie elektromagnetycznym silnika.

Impulsy napięciowe na wyjściu falownika zawierają cechy harmoniczne, dzięki którym rozkład strumienia rozproszenia uzwojeń silnika zapewnia przepływ prądu pasożytniczego do uziomu. Powoduje to powstanie różnicy potencjałów między końcami wału. Jeśli indukowane napięcie jest wystarczająco duże do przebicia cienkiej powłoki oleju na łożysku, zachodzi zjawisko przepływu cyrkulacyjnych prądów łożyskowych o wysokiej częstotliwości. Prądy łożyskowe zamykają się przez obwód składowej zerowej. Ich przepływ powoduje powstanie różnicy potencjału pomiędzy wyjściem falownika i uziomem, co wymusza przepływ prądu przez impedancję rozproszenia. Prąd płynący przez łożyska może ulegać nagłym wahaniom, jego

wartość zależy od stanu technicznego łożyska. Przy bardzo małych prędkościach łożyska mają galwaniczne połączenie, ponieważ bieżnie nie są izolowane warstwą oleju. Występuje zjawisko przerywania ciągłości filmu smarowego. Impedancja łożysk określa poziom napięcia, przy którym łożyska zaczynają przewodzić. Impedancja ta jest nieliniową funkcją: obciążenia łożysk, prędkości obrotowej oraz użytego smaru i podlega ona chwilowym zmianom. Drogi przepływu prądów łożyskowych w układzie napędowym maszyny górniczej przedstawiono na rysunku 6.

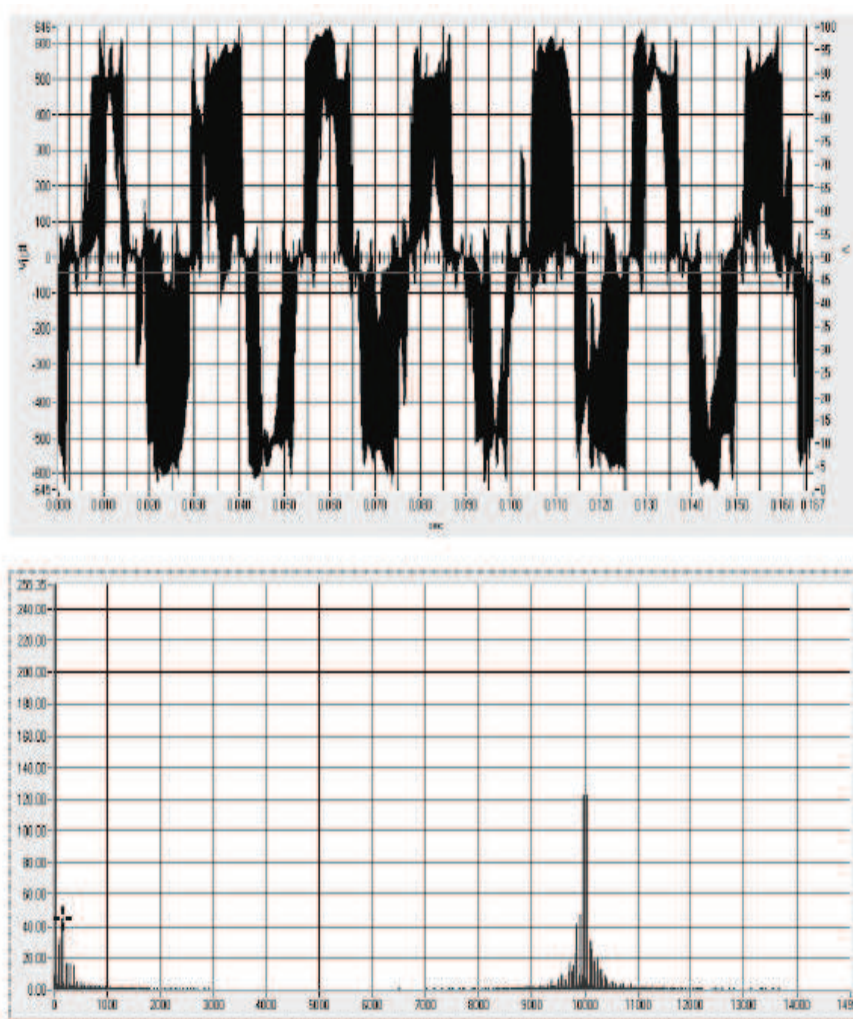
6. METODY OGRANICZANIA WPŁYWU ZASILACZY PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH NA UKŁAD ZASILANIA MASZYNY GÓRNICZEJ

Dla ograniczenia wielkości prądów łożyskowych należy zastosować właściwy system okablowania i uziemienia układu napędowego, również należy przerwać galwaniczny obwód przepływu prądu łożyskowego oraz ograniczyć prądy wysokiej częstotliwości składowej kolejności zerowej prądu zasilania.

Napęd z płynną regulacją prędkości może być skutecznie uziemiony dla składowych zerowych kolejności prądu wysokich częstotliwości, jeśli stosowane są

symetryczne wielożyłowe kable zasilające obwód silnika. Należy dla nich określić drogę powrotu dla prądu składowej zerowej do obwodu falownika, zastosować połączenia wyrównawcze dla wysokich częstotliwości pomiędzy obwodem składowej zerowej i znanymi punktami odniesienia potencjału ziemi, używając miedzianej plecionki oraz stosując wkładki izolacyjne między silnikiem i podstawą, montowane w silniku łożyska z izolowanym pierścieniem zewnętrznym. Znaczny stopień deformacji napięcia i prądu sieci zasilających, spowodowany przez aktywne odbiorniki nieliniowe, wymaga wprowadzania nowych metod kompensacji zniekształceń. Stosowane obecnie statyczne kompensatory rezonansowe oprócz zalet posiadają także szereg mankamentów: skokową regulację mocy biernej, ograniczoną szybkość regulacji mocy chwilowej oddawanej do sieci, duży wpływ parametrów sieci zasilającej na efektywność filtracji filtrów pasywnych LC, możliwość powstawania rezonan-

sów: szeregowych lub równoległych pomiędzy układem filtrów a źródłami zasilania. Wady te można znacznie ograniczyć, stosując filtry aktywne [6]. Filtry aktywne AFP zapewniają skuteczną kompensację wyższych harmonicznych prądu i napięcia, ograniczają skutki niesymetrii napięć i prądów sieci, stabilizują wartość napięcia na zaciskach odbiornika, kompensują spadki napięcia na reaktancji sieci zasilającej oraz umożliwiają kompensację mocy biernej. Badania sprawdzające opracowaną metodykę badań diagnostycznych przeprowadzono na modelach laboratoryjnych maszyny transportowej oraz w warunkach przemysłowych. Przebiegi zarejestrowane podczas badań pozwoliły skutecznie przewidywać stany awaryjne napędu. Proponowana metodyka badań diagnostycznych jest na etapie testowania. Przykładowe przebiegi napięcia oraz spektrum harmonicznych prądu zasilania łącznika przekształtnikowego przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Przebiegi napięcia i prądu zasilania maszyny górniczej

7. ZAKOŃCZENIE

Zastosowanie teorii niezawodności oraz metod statystyki matematycznej do projektowania, eksploatacji oraz diagnostyki maszyn transportowych zapewni znaczne wydłużenie czasów bezawaryjnej eksploatacji, umożliwi zaprojektowanie odpowiedniej bazy remontowej oraz opracowanie harmonogramów przeglądów, newralgicznych elementów konstrukcyjnych maszyn transportowych. Wykorzystując bazy danych oraz bazę wiedzy o ilości i przyczynach uszkodzeń górniczych maszyn transportowych, można zmodyfikować rozwiązania konstrukcyjne awaryjnych elementów. Zapewni to pewne oszczędności eksploatacyjne górniczych maszyn transportowych oraz umożliwi ograniczenie ilości potencjalnych awarii tych maszyn. Dla zwiększenia niezawodności oraz trwałości pracy maszyn górniczych muszą być przeprowadzane pomiary diagnostyczne, które zapewniają właściwą kontrolę poszczególnych zespołów maszyny oraz zapobiegają ewentualnym awariom. Wprowadzenie nowoczesnych metod diagnostycznych wiąże się ze znacznymi kosztami inwestycyjnymi, ale rachunek ekonomiczny powinien skłó-

nić kopalnie do modernizacji układów sterowania i stosowania procedur diagnostycznych do systemów sterujących. Zastosowanie zasilaczy przekształtnikowych w układach napędowych maszyn górniczych wiąże się ze zmianą sposobu montażu kabli zasilających, wymaga także wprowadzenia zmian konstrukcyjnych silników napędowych oraz sposobu ich montażu.

Literatura

1. *Antoniak J.*: Urządzenia i systemy transportu poziomego w kopalniach. Wyd. Śląsk. Katowice, 1998.
2. *Bobrowski D.*: Wprowadzenie matematyczne do teorii niezawodności. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Poznań, 1977.
3. *Gawuć W.*: Niezawodność maszyn elektrycznych. Zagadnienia ogólne, badania. Szkoła niezawodności T. X. Bydgoszcz, 1982.
4. *Migdalski J. red.*: Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne. Wyd. WEMA. Warszawa, 1982.
5. *Szymański Z.*: Nowoczesne układy diagnostyki górniczych maszyn transportowych zasilanych z układów przekształtnikowych. Materiały Konferencyjne Międzynarodowej Konferencji TEMAG'2004. Szczyrk, październik, 2004.
6. *Szymański Z.*: Wpływ oddziaływania zasilaczy przekształtnikowych na niezawodność i bezpieczeństwo pracy układów zasilania maszyn górniczych. Materiały Konferencyjne Krajowej Konferencji Elektryki Górniczej Elektryka'2008. Szczyrk, czerwiec, 2008.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.

