

mgr inż. PIOTR SOKOLSKI

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wroclawska

dr inż. KRZYSZTOF DUDEK

dr hab. inż. FRANCISZEK W. PRYZSTUPA, prof. nzw. PWr

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wroclawska

Wydział Techniczny, Karkonoska Państwowa Szkoła Wyższa w Jeleniej Górze

mgr inż. RAFAŁ MASTALERSKI

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wroclawska

Termiczny i wibroakustyczny model wzorca diagnostycznego napędów elektrycznych maszyn górnictwa odkrywkowego

W pracy przedstawiono autorską propozycję modelu diagnostycznego do oceny stanu technicznego napędu elektrycznego stosowanego w maszynach górnictwa odkrywkowego. Na potrzeby budowy tego modelu wybrano dwa rodzaje sygnałów: wibroakustyczny i termiczny. Badania przeprowadzone zostały dla kilku charakterystycznych prędkości roboczych silnika elektrycznego wybranej maszyny stosowanej do transportu materiałów sypkich.

1. WPROWADZENIE

Proces diagnozowania stanu maszyn stosowanych do eksploatacji złóż węgla brunatnego w kopalniach odkrywkowych zyskuje na znaczeniu [6]. Wynika to głównie z istotnych konsekwencji ekonomicznych po wystąpieniu awarii lub uszkodzenia, utrudniającego dalszą pracę tych maszyn. Tendencja ta objawia się montowaniem różnego rodzaju czujników, za pomocą których możliwe jest przeprowadzanie kontroli stanu technicznego obiektów w trakcie ich eksploatacji. W ten sposób spełnione jest jedno z fundamentalnych założeń skutecznego procesu diagnostycznego, tj. ciągła akwizycja danych. W pracy przedstawiono własny model diagnostyczny do oceny stanu technicznego silnika elektrycznego wybranej maszyny przemysłu surowcowego.

Dla dozoru technicznego maszyn górnictwa odkrywkowego najważniejszymi zaletami tego typu napędów są przede wszystkim wysoka niezawodność i sprawność oraz łatwość regulacji prędkości obrotowej. Dla służb tych eksploatacja silników elektrycznych wiąże się przy tym z koniecznością stosunkowo częściej ich konserwacji.

Na potrzeby budowy modelu do oceny stanu technicznego badanego obiektu, posłużono się dwoma rodzajami sygnałów diagnostycznych: termicznym i wibroakustycznym. Przedstawiono obrazy rozkładu temperatury silnika podczas jego eksploatacji, a także sporządzono widma amplitudowe jego drgań. Badania przeprowadzone zostały dla kilku charakterystycznych wartości parametrów roboczych układu napędowego.

2. METODYKA BADAŃ

W celu zbudowania opisanego powyżej modelu diagnostycznego, przydatne będzie wprowadzenie równoważnika diagnostycznego. Jest to właściwość systemu, która – w sytuacji, gdy badany obiekt przyjmuje postać ciągłej struktury – określa możliwość przeprowadzenia procesu diagnostycznego [3, 4]. Równoważnik diagnostyczny może być zatem rozumiany jako wskaźnik charakteryzujący potencjał diagnozowania.

Kluczowe dla odpowiedniego wykorzystania równoważników jest określenie ich liczby w danym sys-

temie. Wynika to z faktu, że wartość ta równa jest liczbie koniecznych do przeprowadzenia procesów diagnostycznych.

Zastosowanie równoważnika może mieć również miejsce podczas ustalania wymaganej liczby jednocześnie funkcjonujących diagnozatorów, gdy liczba obiektów diagnozy rośnie.

W przedstawionym w artykule przypadku, do wyznaczenia liczby równoważników diagnostycznych skorzystano z zestawienia podanego w pracach [3, 4].

Wdrożenie opracowanej metodyki wymaga zastosowania efektywnych procedur i metod badawczych w celu uzyskania wzorca diagnostycznego stanowiącego podstawę oceny ocenianego obiektu. Jedną z istotnych cech maszyn górniczych i przerobczych jest ich ciągła praca. W tych warunkach diagnozowanie stanu technicznego ich zespołów napędowych wymaga zastosowania technik nieinwazyjnych, bowiem okresowe wyłączanie tych maszyn z eksploatacji bywa kosztowne, a nierzadko nie jest możliwe.

Mając to na uwadze, do monitorowania stanu technicznego zespołów napędowych zastosowano techniki diagnostyki wibracyjnej oraz termicznej. Obie te techniki oparte są na pozyskiwaniu informacji o stanie obiektu na podstawie obserwacji wybranych procesów resztkowych – tj. drgań i hałasu oraz temperatury, generowanych podczas pracy zespołu napędowego. Jedną z najważniejszych zalet tych metod jest możliwość ich zastosowania bez wyłączenia maszyny.

Dokonano odpowiednich pomiarów rozkładu temperatury oraz drgań obudowy podczas pracy rzeczywistego obiektu stosowanego do transportu materiałów sypkich. Napęd urządzenia złożony był z falownika połączonego z zespołem motoreduktora zawierającym dwustopniową przekładnię planetarną. Układ ten cechowały następujące wartości parametrów roboczych [6]:

- moc $P=0,75$ kW,
- znamionowa prędkość obrotowa: silnika $n_s=1400$ obr/min, prędkość wałka wolnoobrotowego $n_w=70$ obr/min,
- całkowite przełożenie motoreduktora $i=20$.

Przyjmując jako wzorcowe, dla celów diagnozy, dwa podzespoły występujące w układzie napędowym: silnik elektryczny i dwustopniową przekładnię zębatą, liczba równoważników jest równa odpowiednio 1 i 3. Łączna liczba równoważników równa się wówczas 4, co oznacza, że diagnozowanie odbywać się może za pomocą pojedynczych przyrządów laboratoryjnych, np. proponowanych przez autorów urządzeń do pomiaru drgań i rozkładu temperatury. Należy przy tym zwrócić uwagę, że podana wartość ulegnie zwielokrotnieniu, kiedy przystąpi się do analizy rozległego systemu, w którym podstawowy obiekt

występować może w liczbie kilku i więcej tysięcy. Całkowita liczba równoważników będzie wówczas równa iloczynowi wartości równoważnika dla jednego obiektu i łącznej liczby tych obiektów.

Wyróżnić można dwie strategie wykorzystania równoważnika diagnostycznego. Pierwszy wariant polega na prowadzeniu monitoringu stanu każdego z elementów systemu. Drugi wariant składa się z dwóch etapów. Celem początkowej fazy jest zaobserwowanie przekształcenia się symptomu w syndrom. Następnie stosuje się postępowanie zgodne z wariantem pierwszym.

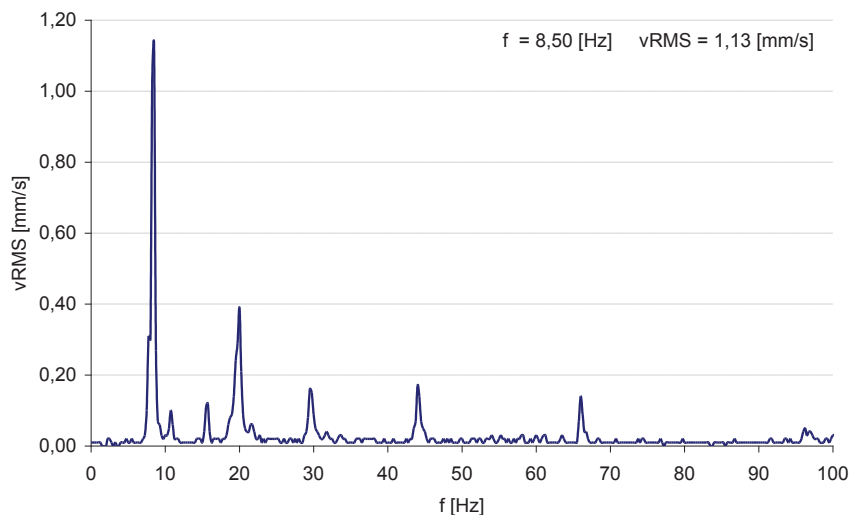
W przedstawionej przez autorów procedurze diagnostycznej, realizacja wykorzystania równoważnika według drugiego wariantu, oparta może być na bieżącym kontrolowaniu procesów zachodzących w badanym obiekcie dowolną metodą techniczną (pomiar wydajności, analiza wydatku energetycznego itp.). Konieczne jest przy tym wcześniejsze jednoznaczne ustalenie dopuszczalnego dla poprawnej pracy układu napędowego stanu jego podzespołów. Możliwe jest wówczas zarejestrowanie zmiany symptomu w syndrom.

Należy zwrócić przy tym uwagę, że początkowo monitorowany symptom pojmowany jest w perspektywie globalnej. Realizacja postępowania po wystąpieniu syndromu zawężana jest do mniejszej liczby obiektów, tj. obserwacja przekształca się w lokalną.

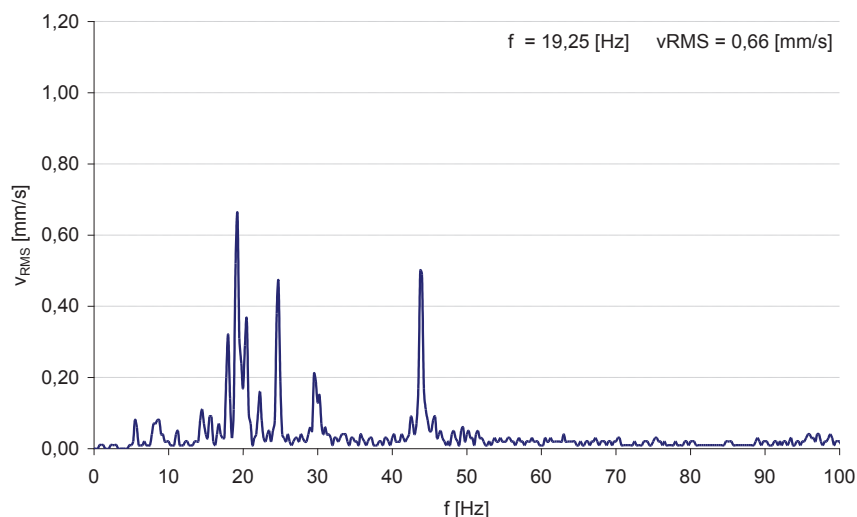
Wymagana liczba diagnozatorów, pozwalająca na odpowiednie przeprowadzenie procesu diagnostycznego uzależniona będzie ponadto od częstotliwości diagnozowania. Podczas fazy ustabilizowanego zużycia obiektu, która w większości przypadków jest najdłuższym etapem eksploatacji, częstotliwość ta będzie najmniejsza. W przypadku zarejestrowania rozpoczęcia fazy przyspieszonego zużycia, a więc utraty stabilności, konieczne jest zmniejszenie czasu pomiędzy kolejnymi obserwacjami diagnostycznymi.

W pracy [1, 5] podano trzy możliwe czynniki, które determinują postać sygnału diagnostycznego: konstrukcyjne, technologiczne, eksploatacyjne. W niniejszym artykule autorzy porównali wpływ prędkości roboczej napędzanego urządzenia na wielkość i charakter drgań obudowy układu napędowego, a także na przebieg zjawisk termicznych zachodzących w motoreduktorze. Do analiz przyjęto trzy prędkości robocze obiektu.

Badania przeprowadzone zostały za pomocą urządzenia do pomiaru drgań (VIBSCANNER) oraz kamery termowizyjnej. Drgania obudowy mierzone były w dwóch kierunkach: poziomym i pionowym. Na podstawie uzyskanych danych sporządzono widma amplitudowe prędkości drgań. Przykładowe charakterystyki zaprezentowano na rys. 1-2.



Rys. 1. Drgania w kierunku pionowym; prędkość obrotowa silnika 500 obr/min



Rys. 2. Drgania w kierunku pionowym; prędkość obrotowa silnika 1120 obr/min

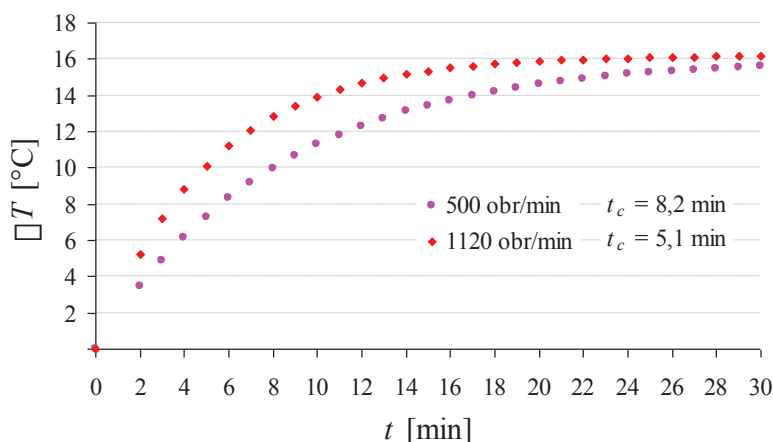
Wg [1], w celu sformułowania diagnozy na temat stanu technicznego przekładni obiegowej, należy wyznaczyć częstotliwości pracy napędzanego urządzenia, jarzma oraz zazębień. Z wymienionych wielkości możliwe było jedynie określenie częstotliwości pracy napędzanego obiektu. W pierwszym analizowanym przypadku częstotliwość ta wynosiła ok. 0,42 Hz (rys. 1), a w drugim ok. 0,95 Hz (rys. 2).

Ocena stanu technicznego silnika elektrycznego na podstawie badania zachodzących w nim procesów cieplnych, oprócz pomiarów temperatury, wymaga rozwiązania przez diagnostę określonych algorytmów diagnozowania. W przypadku diagnostyki cieplnej z wykorzystaniem techniki termograficznej, decyzję o stanie obiektu wydaje się w oparciu o wynik porównania uzyskanych termogramów z termogramami wzorcowymi. Kryterium decydującym o zaliczeniu maszyny lub jej zespołu do klasy

spawny bądź niesprawny mogą być wartości graniczne takich symptomów temperaturowych jak: maksymalny przyrost temperatury wybranej powierzchni w stanie równowagi cieplnej ΔT_u , przyrost temperatury wybranego obszaru obiektu w określonym czasie od uruchomienia maszyny, czas nagrzania powierzchni obiektu do określonej temperatury, itp. Wyboru optymalnego symptomu temperaturowego oraz określenia jego wartości dyskryminacyjnej (progowej) dla określonej klasy maszyn i urządzeń można dokonać w oparciu o krzywe ROC, wykorzystując narzędzia estymacji parametrów rozkładów statystycznych i analizę dyskryminacyjną. W niniejszej pracy za symptom diagnostyczny przyjęto cieplną stałą czasową t_c , która jest równa czasowi, po którym temperatura obudowy silnika osiągnęłaby temperaturę równą temperaturze ustalonej (T_u) przy zwykłej wymianie ciepła.



Rys. 3. Obiekt badań i wybrane termogramy



Rys. 4. Przyrost temperatury maksymalnej obudowy silnika w funkcji czasu dla dwóch prędkości obrotowych oraz oszacowane stałe czasowe

Przeprowadzone badania (rys. 3) pozwoliły określić parametry równania przyrostu temperatury obudowy silnika elektrycznego ponad temperaturę otoczenia ΔT :

$$\Delta T = \Delta T_u \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_c}\right) \right] \quad (1)$$

w którym: $\Delta T_u = T_u - T_o$; T_u – temperatura ustalona powierzchni silnika, T_o – temperatura otoczenia, t – czas obserwacji, t_c – cieplna stała czasowa.

Cieplne stałe czasowe (rys. 4) zostały oszacowane z zależności:

$$t_c = \frac{t}{\ln\left(\frac{\Delta T_u}{\Delta T_u - \Delta T}\right)} \quad (2)$$

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W oparciu o charakterystyki przedstawione na rys. 1÷2, stwierdzić można występowanie kilku dominujących składowych widma amplitudowego drgań. Ich

wartości zależne są ściśle od parametrów roboczych, a także od stanu technicznego obiektu. Występowanie różnej liczby częstotliwości, dla których prędkości drgań są znacznie większe od średnich wartości, świadczyć może o występowaniu dodatkowych składowych drgań, wynikających z postępującego zużycia badanego urządzenia. Jest to podstawa do stwierdzenia zwiększonej degradacji maszyny.

Daje się ponadto zauważyć, że przy maksymalnych prędkościach silnika napędowego n_s w widmie drgań wokół częstotliwości podstawowej $f_1 = n_s/60$ pojawiają się tzw. wstęgi boczne o częstotliwościach $f_s \pm f_{0i}$. Może być to symptomem mimośrodowości wałów przekładni motoreduktora, powodującej okresowe zmiany kinematyki zazębienia [2].

Analiza przedstawionych termogramów nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie wystąpienia uszkodzeń. Równomierny rozkład temperatury obudowy układu napędowego oznacza brak pogorszenia się właściwości tribologicznych węzłów tarcia.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono kompleksową metodę diagnozowania stanu technicznego wybranych ukła-

dów napędowych maszyn stosowanych w górnictwie i przeróbce mechanicznej. Ze względu na konieczność ciągłej eksploatacji tych urządzeń, posłużono się w tym celu technikami termicznymi oraz wibracyjnymi. Jako metody bezinwazyjne nie zakłócają one pracy badanych maszyn, co jest istotną zaletą w kopalnianych warunkach eksploatacyjnych. Na przykładzie konkretnej maszyny napędzanej zespołem motoreduktora zidentyfikowano symptomy i podano możliwe przyczyny zaistniałego stanu badanego obiektu. Analiza sygnału wibroakustycznego pozwoliła na stwierdzenie postępującej degradacji badanego układu napędowego, podczas gdy na podstawie oceny termogramów nie było to możliwe. Wykazano w ten sposób konieczność doboru komplementarnych sygnałów diagnostycznych do określenia stanu technicznego obiektów technicznych.

Zdefiniowano równoważniki diagnostyczne oraz wyznaczono ich postać liczbową dla rozległego systemu złożonego z przedstawionych w pracy układów napędowych.

Literatura

1. *Bartelmus W., Zimroz R.*: Metoda diagnostyki przekładni planetarnej, *Górnictwo i geologia IX*. [Red. nauk. Walter Bartelmus]. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2007, s. 3-15.
2. *Cempel Cz.*: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn, Warszawa, PWN, 1989.
3. *Przystupa F. W.*: Diagnostic equivalent for widespread manufacturing system, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2010, vol. 10, nr 3, s. 111-122.
4. *Przystupa F. W.*: Diagnozy w systemie technicznym: od ontologii i aksjologii do praktyki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Seria: Monografie, Wrocław, 2010.
5. *Samuel P. D., Pines D. J.*: A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics, *Journal of Sound and Vibration* 282/2005, 475-508.
6. *Sobczykiewicz W., Kowalczyk M.*: Realizacja zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego konstrukcji nośnych MRC. Ujęcie zintegrowane, *Górnictwo Odkrywkowe*, Nr 4-5, 2009, s. 109-115.
7. Katalog motoreduktorów Elkon (www.elkon.pl), pobrano: marzec 2011.

Recenzent: dr inż. Marcin Habrych

THERMAL AND VIBROACOUSTIC MODEL OF A DIAGNOSTIC STANDARD OF ELECTRIC MOTORS DRIVING MACHINES USED IN OPEN-PIT MINING

In the article the proposal of an original diagnostic model for evaluation of the technical condition of electric drives used in open-pit mining machines was presented. In order to build such a model 2 types of diagnostic signals were selected: vibroacoustic and thermal. The tests were performed for several typical values of speed of the electric motor driving the selected machine applied to transport aggregate.

ТЕРМИЧЕСКАЯ И ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ МАШИН В УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ

В работе представлена авторская версия диагностической модели для оценки технического состояния электрического привода, используемого в машинах в угольных разрезах. Для создания данной модели выбрано 2 вида сигналов: вibroакустический и термический. Испытания были выполнены для нескольких характеристических рабочих скоростей электрического двигателя выбранной машины, используемой для транспортировки сыпучих материалов.