

OCENA STANU DYNAMICZNEGO ŁOŻYSK STOSOWANYCH W INSTALACJI CHŁODNICZEJ DO ZAMRAŻANIA PRODUKTÓW POCHODZENIA ZWIERZĘCEGO

Streszczenie

Przedstawiono metody wibroakustyczne stosowane do oceny stanu dynamicznego łożysk. Przedstawiono wyniki badań stosowanych w instalacji chłodniczej do zamrażania produktów pochodzenia zwierzęcego. Stan dynamiczny instalacji chłodniczej oceniono na podstawie pomiaru wartości skutecznej prędkości drgań mechanicznych mierzonych na korpusie łożysk sprężarek. Wyniki pomiarów otrzymane podczas badań porównano z zalecanymi przez normy krajowe PN lub ISO.

słowa kluczowe: drgania mechaniczne, diagnostyka łożysk, instalacja chłodnicza

Wstęp

Procesy wibroakustyczne to ogół zjawisk dynamicznych, mechanoakustycznych, które występują w urządzeniach, maszynach i konstrukcjach. Zjawiska tego rodzaju to hałas, drgania oraz pulsacje medium w przestrzeniach roboczych maszyn. Stan dynamiczny maszyn można ocenić za pomocą generowanych przez nie procesów wibroakustycznych. Węzły łożyskowe są odpowiedzialne za około 2/3 awarii podczas eksploatacji maszyn. Według producentów łożysk, najczęstszą przyczyną awarii łożysk są: nieprawidłowe smarowanie, zmienne obciążenia podczas pracy oraz błąd montażu łożyska.

Monitorowanie stanu dynamicznego węzłów łożyskowych na podstawie analizy sygnałów wibroakustycznych umożliwia określenie terminu remontu z powodu stanu technicznego i zaniechanie remontów po określonym czasie użytkowania oraz remontów spowodowanych awarią.

Metody wibroakustyczne diagnostyki łożysk

Wśród metod wibroakustycznych diagnostyki łożysk tocznych można wyróżnić metody oparte na pomiarach emitowanych drgań, pomiarach emitowanego hałasu, pomiarach impulsów udarowych oraz metodę obwiedni wysokoczęstotliwościowej.

Celem diagnostyki jest określenie stanu łożyska oraz oszacowanie dalszego czasu bezpiecznej pracy. Istnieje wiele wzorów i formuł przyporządkowujących określone defekty łożyska odpowiednim częstotliwościom drgań [2].

Do częstotliwości charakterystycznych dla uszkodzonego łożyska, które mogą pojawić się w widmie drgań należą [2, 3]:

- częstotliwość koszyka,
- częstotliwość przetaczania po zewnętrznym pierścieniu,
- częstotliwość przetaczania po wewnętrznym pierścieniu,
- częstotliwość kulek.

Analiza widmowa drgań pozwala śledzić częstotliwości charakterystyczne dla defektów łożysk. W tab. 1 zamieszczono wartości składowych widma drgań charakterystyczne dla określonych typów uszkodzeń łożysk tocznych.

Tab. 1. Częstotliwości składowych widma wibracji charakterystyczne dla określonych typów uszkodzeń łożysk tocznych [2, 3]
Table 1. The frequencies of the components of the vibration spectrum characteristic for specific types of damage to rolling bearings [2, 3]

Typ uszkodzenia	Główne częstotliwości modulujące
Bicie, luzy koszyka	$f_k = 0,5 f_n \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right)$
Bicie bieżni	f_n
Defekt elementu tocznego (częstotliwość kulek)	$f_t = 0,5 f_n \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right]$
Defekty punktowe na ruchomej bieżni wewnętrznej łożyska	$f_w = 0,5 n f_n \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right)$
Defekt bieżni zewnętrznej	$f_z = 0,5 n f_n \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right)$

gdzie:

d - średnica elementu tocznego,

D - średnica podziałowa łożyska,

β - kąt obciążenia łożyska,

n - liczba elementów tocznych,

f_n - częstotliwość pierścienia zewnętrznego względem pierścienia wewnętrznego.

Wyniki badania drgań mechanicznych w instalacji chłodniczej

Przeprowadzono badania drgań mechanicznych łożysk stosowanych w instalacji chłodniczej do zamrażania produktów pochodzenia zwierzęcego. Badano sprężarkę średniej mocy o zastosowaniu niskotemperaturowym, gdzie medium pośrednim jest mrówcezan potasu oraz sprężarkę dużej mocy o zastosowaniu średniotemperaturowym, gdzie medium

pośrednim jest glikol etylenowy. Na rys. 1 i 2 pokazano rozmieszczenie czujników przyspieszeń na korpusie łożyska sprężarki. Pomiar przyspieszeń drgań wyznaczono w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (wg PN- ISO 10816).



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 1. Badana sprężarka średniej mocy
Fig. 1. Medium power compressor under test



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 2. Badana sprężarka dużej mocy
Fig. 2. High power compressor under test

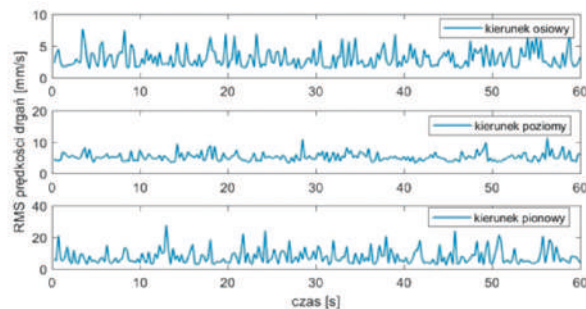
Uszkodzenia maszyn wirnikowych mają swoje odbicie w drganiach. Stąd też podstawowym sygnałem diagnostycznym dla tego typu maszyn są sygnały drganiowe. Oceniane są drgania na podstawie pomiarów wykonanych na częściach niewirujących. Są to pomiary bezwzględnych prędkości drgań na stojakach łożysk oraz w określonych miejscach korpusów. Pomiary tego rodzaju można przeprowadzić bez ingerencji w strukturę maszyny oraz podczas jej ruchu. Badania te dostarczają informacji o uszkodzeniach objawiających się wzrostem drgań korpusów.

Podstawą wibroakustycznej oceny stanu dynamicznego maszyny jest intensywność drgań. Za miarę intensywności drgań najczęściej przyjmuje się wartość przyspieszeń, prędkości lub przemieszczeń drgań mechanicznych.

Dla stałych (niewirujących) części maszyn można przyjąć, że:

- dla maszyn o małej częstotliwości drgań podstawowych (prędkości obrotowych), w zakresie drgań poniżej 10 – 30 Hz podstawą oceny intensywności drgań są przemieszczenia drgań,
- dla maszyn pracujących w szerokim i średnim zakresie prędkości obrotowych i częstotliwości drgań podstawowych od ok. 10 Hz aż do 1500 Hz podstawą oceny intensywności drgań jest prędkość drgań,
- dla maszyn o wysokich częstotliwościach drgań podstawowych, powyżej 1500 Hz, podstawą oceny intensywności drgań jest przyspieszenie drgań.

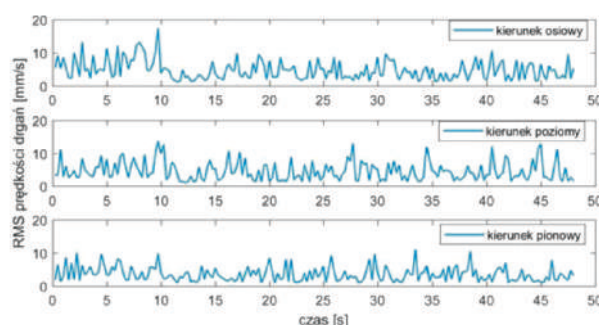
Na rys. 3 i 4 pokazano zmierzone przebiegi wartości skutecznej prędkości drgań mechanicznych na korpusie łożyska badanych sprężarek.



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 3. Wartości skuteczne prędkości drgań mechanicznych zmierzone na korpusie łożyska sprężarki średniej mocy.

Fig. 3. RMS values of the velocity of mechanical vibrations measured on the bearing housing of the medium power compressor



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 4. Wartości skuteczne prędkości drgań mechanicznych zmierzone na korpusie łożyska sprężarki większej mocy

Fig. 4. RMS values of the velocity of mechanical vibrations measured on the bearing housing of the higher power compressor

Ocena stanu drgań instalacji chłodniczej

Do oceny stanu dynamicznego maszyn wirnikowych stosuje się najczęściej normę PN-ISO 10816-1:1998 Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących. Wytyczne ogólne [6]. Stan dynamiczny maszyn ocenia się na podstawie wartości skutecznej prędkości drgań mechanicznych. Maszyny dzielone są na klasy, w zależności od wielkości, mocy i sposobu posadowienia.

Tab. 2. Klasyfikacja stanu dynamicznego maszyn wirnikowych ze względu na prędkość drgań bezwzględnych [3, 4]

$V_{RMS} [mm \cdot s^{-1}]$	Klasa I	Klasa II	Klasa III	Klasa IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	A
1,8				
2,8	C	C	C	B
4,5				
7,1	D	D	D	C
11,2				
18	D	D	D	D
28				
45				

Określenie stref oceny drgań umożliwia jakościową ocenę drgań danej maszyny i podjęcie odpowiednich środków zaradczych.

Strefa A – Do strefy tej zalicza się maszyny przekazane do eksploatacji.

Strefa B – Maszyny, których drgania zaliczono do tej strefy mogą pracować długotrwale bez ograniczeń.

Strefa C – Maszyny, których drgania zaliczono do tej strefy, uważa się zwykle za nieprzydatne do długotrwałej ciągłej pracy. W tym stanie maszyna może zasadniczo pracować w ograniczonym okresie czasu, aż będzie odpowiednia sposobność do podjęcia działań zapobiegawczych.

Strefa D – Drgania w tej strefie uważa się zwykle za wystarczająco intensywne, aby spowodować uszkodzenie maszyn.

Maszyny dzielone są na klasy, w zależności od wielkości, mocy i sposobu posadowienia.

Norma przewiduje następujące klasy maszyn:

Klasa I: Części składowe silników i maszyn połączone z kompletną maszyną w stanie jej normalnej pracy. Moc maszyn do 15 kW.

Klasa II: Maszyny średniej wielkości o mocy od 15 kW do 75 kW bez specjalnych fundamentów lub o mocy od 15 kW do 300 kW przy mocowaniu sztywnym na specjalnych fundamentach.

Klasa III: Duże maszyny z wirującymi masami, ustawione na sztywnych i ciężkich fundamentach.

Klasa IV: Duże silniki napędowe lub inne maszyny z wirującymi masami, ustawione na fundamentach stosunkowo podatnych w kierunku pomiaru drgań (na przykład turbosopły i turbiny gazowe o mocy wyjściowej ponad 10 MW).

Największe średnie wartości prędkości drgań zarejestrowano na sprężarce średniej mocy w kierunku pionowym i wynosiły one $7,1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. W tym stanie maszyna może zasadniczo pracować w ograniczonym okresie czasu, aż będzie odpowiednia sposobność do podjęcia działań zapobie-

gawczych. Na sprężarce większej mocy średnie wartości prędkości drgań były podobne we wszystkich kierunkach pomiarowych i wynosiły $3,6 - 4,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Wnioski

Metody opierające się na pomiarze emitowanych drgań pozwalają na ocenę przekroczenia wartości granicznych drgań łożysk określonych w normach międzynarodowych i krajowych [6]. Wykorzystanie analizy widmowej w połączeniu z analizą obwiedni pozwala na precyzyjne oddzielenie informacji o uszkodzonym łożysku tocznym od zakłóceń zewnętrznych i umożliwia śledzenie rozwoju uszkodzenia łożysk. Największe średnie wartości prędkości drgań zarejestrowano na sprężarce średniej mocy w kierunku pionowym. W tym stanie maszyna może zasadniczo pracować w ograniczonym czasie.

Bibliografia

- [1] Bingen Yang: Stress, Strain, and Structural Dynamics, An Interactive Handbook of Formulas, Solutions, and MATLAB Toolboxes, Elsevier, 2005.
- [2] Dzwonkowski A.: Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny. Politechnika Gdańska, 2018.
- [3] Cempel C.: Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn. WNT Warszawa, 1982.
- [4] Łączkowski R., Wibroakustyka maszyn i urządzeń. WNT, Warszawa, 1983.
- [5] Lyons R.G.: Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności sp. z o.o., Warszawa, 1999.
- [6] PN-ISO-10816-1: 1998. Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących.

ESTIMATION OF DYNAMIC CONDITION OF BEARINGS USED IN A REFRIGERATING SYSTEM FOR THE FREEZING OF ANIMAL PRODUCTS

Summary

The vibroacoustic methods used to assess the dynamic condition of bearings are presented. The paper presents the results of tests used in a refrigeration system for the freezing of animal products. The dynamic condition of the cooling system was assessed on the basis of the measurement of the effective value of the velocity of mechanical vibrations measured on the bearing housing of compressors. The results of measurements obtained during the tests were compared with national standards recommended by the PN or ISO.

Key words: mechanical vibrations, bearing diagnostics, cooling installation

Artykuł powstał w ramach projektu „Opracowanie przyjaznej dla środowiska technologii zamrażania produktów pochodzenia zwierzęcego”, współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Inteligentny Rozwój. Projekt realizowany w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju: 1/4.1.4/2019 Projekty Aplikacyjne Umowa nr: POIR.04.01.04-00-0028/19-00 z dnia 25.09.2019 r.

