

Jerzy TOMASZEWSKI, Jacek RYSIŃSKIKATEDRA PODSTAW BUDOWY MASZYN, AKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA,
ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biala**Diagnostyka elementów układu napędowego przy wykorzystaniu urządzenia WiViD****Dr inż. Jerzy TOMASZEWSKI**

Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Praca doktorska z zakresu diagnostyki przekładni zębatych obroniona w 1997 roku na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych. Do 2005r. pracownik OBR Redor w Bielsku-Białej, a następnie, do 2006, Centrum Mechanizacji Górniczej Komag w Gliwicach. Obecnie adiunkt ATH w Bielsku-Białej. Autor 60 publikacji na temat wibroakustycznej diagnostyki maszyn.



e-mail: jtomaszewski@ath.bielsko.pl

Dr inż. Jacek RYSIŃSKI

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej. Od 1995 roku zatrudniony w Katedrze Podstaw Budowy Maszyn. Pracę doktorską obronił na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej w 2003 r. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z diagnostyką przekładni zębatych oraz analizą pęknięć zmęczeniowych kół zębatych. Interesuje się komputerowym wspomaganiami projektowania części maszyn, oraz symulacją komputerową procesu pęknięcia.



e-mail: jrysiński@ath.bielsko.pl

Streszczenie

W pracy zaprezentowano przykładowe zastosowanie urządzenia WiViD do diagnostyki stanu maszyn. Pokazano, iż urządzenie to wykorzystuje moduł komunikacji bezprzewodowej do akwizycji sygnału z pomiarów. Przedstawiono skuteczność zastosowania wbudowanych funkcji pomiarowych w systemie WiViD do diagnostyki stanu technicznego sprężarki śrubowej i przekładni zębatej oraz wykazano, że uniwersalne funkcje pomiarowe w systemie WiViD umożliwiają opracowanie indywidualnych metod diagnostyki maszyn złożonych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, pomiar, przekładnia zębata, sprężarka śrubowa.

Diagnostics of elements of a drive system performed by means of the WiViD device**Abstract**

In the paper exemplary applications of the WiViD device to machine diagnostics are described. The basic working element of the system is a wireless, multi-channel measurement card placed in the ergonomic housing (resistant to any damage). The measurement head allows for making measurements of vibrations in three directions (mutually perpendicular), within a very wide band of frequency (0.4Hz -20kHz). The scope of the application can be even wider due to the possibility of connecting an external multi-purpose gauge of CLPS type which could be i.e.: gauge of vibrations, gauge of forces, microphone as well as connecting the signal of phase indicator. All measurements are taken in a synchronous way. Additionally, the device may serve as a mini thermo-vision camera. The thermal view/pictures can be presented by means of point resolution 16x4, for the temperature range -50 C to 300 C. The second element of the system consists of a Smartphone or a tablet working under control of the operational system Android version 4.x. The specialized software gathers (collects, stores) measurement information in the mobile data base and after processing, the adequate data are presented on the screen in a clear and concise form. The program integrates the tool kit (procedures) for an evaluation of technical state of machine elements - as for example: bearings or elements of the system of drive transmission. In the paper some examples of application of the afore described device to diagnostics of compressors and gears are shown. For the evaluation of the technical state of a gear - during its exploitation - the adequate procedure was prepared. The procedure consists in determination of the thresholds of statistical point estimates of the vibration signal measured on the housings of bearings for a particular gear. Moreover, the evaluation procedure of the overall technical state based on the afore determined thresholds - was formulated. Own software applications dedicated to the measurement analysis of the technical state of the machine were written. The original expert system (worked out by the authors) was prepared. It supports the assessment of the state of the device.

Keywords: diagnostic, measurement, gear box, screw compressor.

1. Wstęp

Diagnostyka jest powszechnie stosowaną metodą do oceny stanu technicznego urządzeń oraz elementów układów napędowych

pracujących w przemysłowych liniach technologicznych. Jej szybki rozwój możliwy był dzięki pojawieniu się na rynku szerokiej gamy nowoczesnych urządzeń pozwalających na wykonanie w czasie rzeczywistym pomiarów parametrów diagnostycznych, które umożliwiały ocenę stanu technicznego maszyny. W prezentowanej pracy pokazano wykorzystanie bezprzewodowego systemu do diagnostyki maszyn WiViD polskiej firmy Alitec z Łodzi. System WiViD™ przedstawiony na rys. 1 jest unikalnym rozwiązaniem, w którym rozdzielono pomiędzy dwa odrębne urządzenia funkcję przetwarzania danych, ich analizy i prezentacji. Podstawowym elementem wykonawczym systemu jest bezprzewodowa, wielokanałowa karta pomiarowa zamknięta w odpornej na uszkodzenia, ergonomicznej obudowie. Głowica pomiarowa umożliwia pomiar drgań w trzech kierunkach, w bardzo szerokim paśmie częstotliwości (0.4Hz -20kHz). Obszar zastosowań rozszerza możliwość podłączenia zewnętrznego czujnika typu CLPS tj. czujnika drgań, siły, mikrofonu oraz doprowadzenie sygnału znanca fazy. Wszystkie pomiary realizowane są synchronicznie. Urządzenie może pełnić rolę mini kamery termowizyjnej, wyświetlając obraz termiczny o rozdzielczości punktowej 16x4 w zakresie temperatur -50°C do 300°C.



Rys. 1. Stanowisko badawcze, w skład którego wchodzi: badana przekładnia, urządzenie pomiarowe WiViD oraz urządzenie rejestrujące – analizujące (smartfon)

Fig. 1. Test stand. Elements: investigated gear, WiViD measurement device, register-analytical device (smartfon)

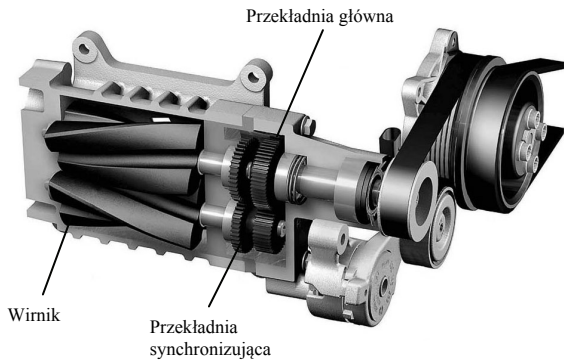
Drugi element systemu stanowi smartfon lub tablet pracujący pod kontrolą systemu operacyjnego Android ver. 4.x. Specjalizowane oprogramowanie gromadzi informację pomiarową w mobilnej bazie danych, po przetworzeniu, prezentuje ją w czytelnej formie na ekranie. Program integruje zestaw narzędzi do oceny stanu technicznego elementów maszyn, takich jak łożyska czy elementy układu przeniesienia napędu.

W artykule przedstawiono przykład zastosowania w/w urządzenia do diagnostyki sprężarek oraz przekładni zębatych.

Do oceny stanu technicznego przekładni w czasie ich eksploatacji, opracowano procedurę wyznaczania progów estymat punktowych sygnału drganiowego mierzonego na obudowach łożysk przekładni oraz procedurę ocenę stanu technicznego na podstawie wcześniej wyznaczonych progów.

2. Diagnostyka sprężarek śrubowych

Sprężarki śrubowe (rys. 2) są urządzeniami, w których proces sprężania gazu (w tym przypadku powietrza) wynika ze zmniejszania się przestrzeni pomiędzy obracającymi się śrubami - od otworów ssawnych (wlotowych) do otworów tłocznych (wylotowych). Wartość kompresji w tego typu sprężarkach zależy od ich konstrukcji, a sprawność samego elementu sprężającego w dużej mierze od stopnia szczelności uzyskanej pomiędzy obiema śrubami oraz śrubami i obudową.



Rys. 2. Schemat działania sprężarki śrubowej
Fig. 2. Functional scheme of the screw compressor

Sprężarki śrubowe można podzielić na dwie grupy: sprężarki bezolejowe i olejowe. W śrubowych sprężarkach bezolejowych proces sprężania powietrza odbywa się poprzez zmniejszenie przestrzeni pomiędzy dwoma obracającymi się wirnikami bez uszczelnienia przestrzeni między nimi w postaci filmu olejowego. W śrubowych sprężarkach olejowych olej wtryskiwany jest do komory sprężania, zapewniając jednocześnie uszczelnienie przestrzeni pomiędzy obracającymi się śrubami oraz chłodzenie elementu sprężającego. Olej jest separowany ze strumienia sprężonego powietrza, a następnie schładzany, filtrowany i kierowany z powrotem do komory sprężania. Sprężone powietrze na wylocie z elementu sprężającego zawiera cząstki stałe, cząstki oleju i wody, które wpływają ujemnie na jakość i wydatek powietrza na wylocie. Dlatego też są one usuwane w drodze separacji cyklonowej oraz filtracji we wkładach filtracyjnych filtrów sprężonego powietrza.

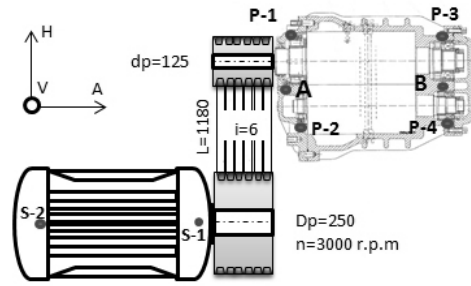
Diagnostykę sprężarek śrubowych można podzielić na dwie grupy: diagnostykę odbiorczą nowo wyprodukowanych i diagnostykę eksploatacyjną.

Przykład diagnostyki stanu technicznego eksploatowanej sprężarki śrubowej

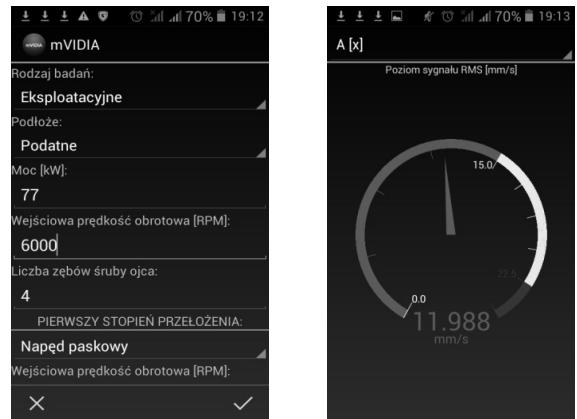
Diagnostyczny system pomiarowy WiViD wyposażony jest w specjalistyczne narzędzie umożliwiające m. in. ocenę stanu technicznego eksploatowanych sprężarek. W przedstawionym przypadku wykorzystano następujące moduły systemu:

- zestaw do diagnostyki sprężarek,
- moduł do diagnostyki stanu łożysk BWI,
- standardowe funkcję pomiaru wartości skutecznej prędkości wg PN-ISO 10816 (dla oceny silników elektrycznych, przekładni pasowej, itp.) [2, 3].

Na rys. 3 pokazano schemat badanej sprężarki śrubowej. Na rys. 4 pokazano przykładowe okno wprowadzania danych do modułu diagnostyki sprężarek i wynik pomiaru uzyskany w pkt. A.



Rys. 3. Schemat sprężarki śrubowej napędzanej przekładnią pasową (multiplikator) z oznaczeniem punktów pomiarowych
Fig. 3. Scheme of screw compressor driven by a belt gear. Measurement points are marked



Rys. 4. Okno wprowadzania danych i wyniku z pomiarów uzyskane w systemie WiViD (wykorzystano moduł diagnostyki sprężarek)
Fig. 4. Windows of the data input and measurement results obtained by means of the diagnostics set incorporating the WiViD system

Ustalanie wartości progów dla eksploatowanej sprężarki opisane jest w normie VDI 3836 [1] (zaimplementowanej w systemie WiViD). Wyniki pomiarów wskazały na groźący awarią zły stan techniczny sprężarki. Przyczyna tego stanu nie jest związana z uszkodzeniem łożysk tocznych sprężarki. Przekroczenie stanu alarmowego dla pomiarów w paśmie B wskazuje na przyczynę wzrostu amplitud drgań związanych z przekładnią pasową, a nie ze stanem śrub sprężarki (niskie wartości drgań w paśmie A). Wzrost poziomu drgań silnika w punkcie pomiarowym S1 w kierunku drgań promieniowych (brak dużych wartości amplitud w kierunku osiowym) wyklucza przekoszenie pasów przekładni.

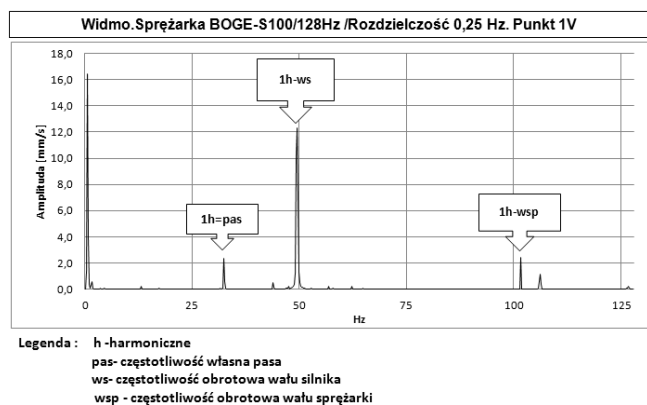
Obliczone parametry w pasmach								
P-kt pom	v RMS 0.5-1000	Ocena	v RMS 0.5-200	Ocena	T	BWI [gE]	Ocena [gE]	Łożysko typ
A-A	10,63	<15	10,00	<8,75				
A-H	12,37	<15	6,42	5,63-9,75				
A-V	11,99	<15	9,50	<8,75				
B-A	6,24	<15	2,22	<5,63				
B-H	8,51	<15	9,44	<8,75				
B-V	11,27	<15	9,73	<8,75				
1A						1,06	<16	NU2213E
1H					54,10	1,11	<16	
1V						1,88	<16	
2A						1,94	<16	NU206E
2H					32,20	1,36	<16	
2V						1,69	<16	
3A						1,16	<18,6	NU210E
3H					74,00	1,53	<18,6	7308
3V						2,58	<18,6	ustalone
4A						0,73	<17,4	NU2208
4H					71,70	0,81	<17,4	7307
4V						1,63	<17,4	ustalone
	v RMS 10-1000 Hz	Ocena			T	BDT	Ocena	
S1-A	3,86	<4,5						
S1-H	6,54	4,5-7,1			44,9			
S1-V	5,27	4,5-7,1						
S2-A	2,34	<4,5						
S2-H	1,33	<4,5			42,4			
S2-V	2,40	<4,5						

Rys. 5. Zestawienie wyników pomiarów sprężarki śrubowej
Fig. 5. Measurement results of the screw compressor

W celu określenia przyczyn złej pracy przekładni pasowej należy wykonać analizę widma w punkcie P1 lub S1 sprężarki. Na rys. 6 pokazano widmo prędkości drgań wyznaczone w punkcie P1 sprężarki.

W widmie prędkości drgań dominującymi składowymi są amplitudy o częstotliwościach: własnej pasa, częstotliwości obrotowej wału wejściowego sprężarki i częstotliwości obrotowej silnika. Taki układ składowych wskazuje na nieprawidłową pracę przekładni pasowej, której przyczynami mogą być [4]:

- nieprawidłowy naciąg pasa,
- nadmierne bicie promieniowe kół pasowych,
- zużycie pasów.



Rys. 6. Widmo prędkości drgań wyznaczone w punkcie P1 sprężarki
Fig. 6. Spectrum of the vibration velocities determined in the measurement point P1 (on the screw compressor)

3. Diagnostyka wybranych uszkodzeń przekładni zębatach

Spośród wielu dostępnych metod diagnostycznych wykrywania uszkodzeń w praktyce znalazły zastosowanie metody analizy widma drgań i obwiedni. Obie metody wykorzystano do diagnostyki stanu technicznego strategicznych urządzeń m.in. w cementowni Dyckerhoff w okresie 10 lat. Podstawą do opracowania metodyki diagnozowania uszkodzeń przekładni była metodologia opisana w normie [3] i doświadczenia nabyte podczas diagnozowania stanu technicznego urządzeń w cementowni. Wykaz uszkodzeń i zestaw symptomów wykrywających niesprawność zestawiono w tabelicy 1.

Dla każdego rodzaju uszkodzenia przyjęto trzy rodzaje symptomów wskazujących na określony rodzaj uszkodzenia. Symptomami tymi są:

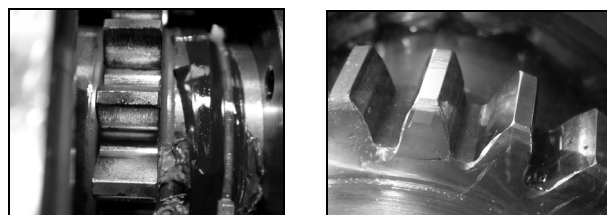
- pasmo częstotliwości, w którym obserwuje się wzrost amplitudy szczytowej drgań. Rozróżnia się trzy zakresy pasma analizy dla przekładni zębatach ogólnego przeznaczenia [4]: pasmo niskiej częstotliwości (N.CZ.) 0 – 300 Hz, pasmo średniej częstotliwości (S.CZ.) 300 - 3000 Hz, pasmo wysokiej częstotliwości (W.CZ.) > 3000Hz),
- występowanie określonych układów składowych w widmie przyspieszenia drgań,
- występowanie określonych układów składowych w widmie obwiedni drgań.

W metodzie jako priorytet przyjmuje się pojawienie się określonego układu składowych w obwiedni przyspieszenia drgań. Wyznaczaniem obwiedni drgań rządzą określone reguły. Przed wyznaczaniem obwiedni należy sygnał drganiowy poddać procedurze filtracji filtrem górnoprzepustowym o częstotliwości odcięcia dobranej tak, aby dla wartości częstotliwości powyżej f_f nie występowały w widmie dominujące składowe. W praktyce przyjmuje się wartość pasma odcięcia filtra z przedziału $f_f = (5\text{kHz} \div 12\text{kHz})$.

Tab. 1. Przykładowe symptomy uszkodzenia przekładni zębatach
Tab. 1. Exemplary symptoms of the failures of gears

Charakter widma	Opis uszkodzenia
	<i>Defekt koła napędzanego (brak wzrostu W.CZ.)</i> Symptodem defektu jest pojawienie się w widmie drgań, harmonicznych prędkości obrotowej wału napędzane-go ($k f_{z2}$ dla $k > 4$ dodatkowo $k f_z \pm k f_{z2}$)
	<i>Defekt koła napędzającego (brak wzrostu W.CZ.)</i> Symptodem defektu jest pojawienie się w widmie drgań harmonicznych prędkości obrotowej wału napędzane-go ($k f_{o1}$ dla $k > 4$ dodatkowo $k f_z \pm k f_{o1}$)
	<i>Defekty zazębienia (brak wzrostu W.CZ.)</i> Symptodem uszkodzenia jest poja-wienie się w widmie drgań i obwiedni harmonicznych częstotliwości zazę-bienia mierzonego stopnia ($k f_z$ dodatkowo brak dominujących składowych: $k f_{o1,2}$, $k f_z \pm k f_{o1,1}$)
	<i>Niejednorodny radialny wcisk (wzrost widma W.CZ.)</i> Symptodem widmowym uszkodzenia są harmoniczne dwukrotnej prędkości obrotowej wału ($2k f_o$) oraz brak wzrostu widma wysokiej częstotliwości (> 3000 Hz). W widmie obwiedni występują harmoniczne dwukrotnej prędkości obrotowej wału ($2k f_o$ dla $k < 10$)

Analiza sposobów diagnozowania określonych rodzajów uszkodzeń przekładni pokazuje, że jeden symptom może diagnozować całą gamę uszkodzeń. Na przykład symptomy uszkodzenia zazębienia (wiersz 3 tablica 1) wskazują na inne rodzaje uszkodzeń, np. pitting, spalling, zmęczeniowe wyłamanie zęba (rys. 7), falowanie, itp. Fakt ten pociąga za sobą konieczność dokonaniu oględzin zazębienia w celu określenia rodzaju uszkodzenia [5, 6, 7].



Rys. 7. Defekty uszkodzenia kół zębatach zaobserwowane podczas pracy na stanowisku mocy zamkniętej: pitting oraz propagacja pęknięcia zmęczeniowego zęba koła

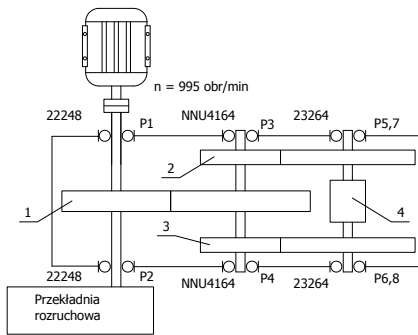
Fig. 7. Typical failures of gears observed on the special test stand (called back-to-back rig or 'recirculating power' stand): pitting, fatigue crack growth

Przykład zastosowania metody

Podczas diagnostycznych badań okresowych przekładni napędowej, której schemat pokazano na rys. 8, zaobserwowano przekroczenie progów alarmowych estymat amplitudy szczytowej przyspieszenia w paśmie od 300 Hz - 3000 Hz.

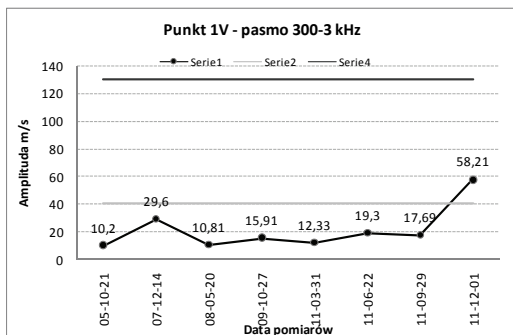
Na rys. 9 pokazano trend zmian wartości amplitudy szczytowej przyspieszenia w paśmie 300 Hz - 3000 Hz.

Analiza wyników pomiarów amplitudy szczytowej przyspieszenia w paśmie powyżej 3 kHz nie wykazała przekroczenia progu ostrzegawczego (brak wzrostu widma W.CZ. -wysokiej częstotliwości, tj. powyżej 3 kHz).



Rys. 8. Schemat kinematyczny przekładni napędowej (1, 2, 3 - stopnie przekładni, 4 - napęd młyna) z oznaczeniem punktów pomiarowych P_i

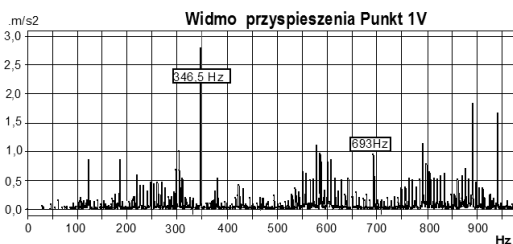
Fig. 8. Kinematic scheme of the drive gear (1, 2, 3 - stages of gear, 4 - drive of mill), measurement points P_i



Rys. 9. Trend zmian amplitudy szczytowej przyspieszenia wyznaczony w punkcie pomiarowym 1 w kierunku pionowym

Fig. 9. Trend of variations of the acceleration pick-amplitude determined in the measurement point no. 1 in the vertical direction

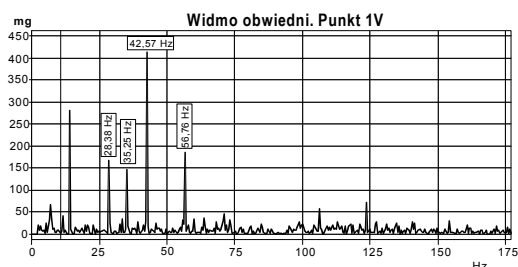
Na rys. 10 pokazano widmo przyspieszenia drgań wyznaczone w punkcie 1V.



Rys. 10. Widmo przyspieszenia wyznaczone w punkcie 1V przekładni

Fig. 10. Spectrum of the accelerations determined in the measurement point no. 1V of the gear

W widmie drgań uwidaczniają się składowe związane z ząbieniem stopnia wejściowego przekładni oraz pojawiają się wstęgi boczne w odległości częstotliwości obrotowej wału wejściowego przekładni. W widmie obwiedni, rys. 11, wyznaczonym w punkcie 1V obserwuje się dominujące składowe związane z częstotliwością obrotową wału drugiego przekładni.



Rys. 11. Widmo obwiedni wyznaczone w punkcie 1V wyznaczone w paśmie powyżej 8 kHz

Fig. 11. Envelope spectrum determined in the measurement point no. 1V for the frequency bond higher than 8 kHz

Harmoniczne prędkości obrotowej wału drugiego w widmie obwiedni pojawiają się powyżej czwartej ($k > 4$). Charakter widma niskoczęstotliwościowego i widma obwiedni wskazuje na przypadek przedstawiony w 2 wierszu tablicy 1. Oznacza to defekt koła stopnia pierwszego napędu.

Przedstawiony przykład pokazuje skuteczność metod diagnostycznych opartych na analizie widma i widma obwiedni sygnału zmierzonego na obudowie łożysk, w którym pracuje zdefektowany element przekładni. Praktyka wskazuje, że do skutecznej diagnostyki konieczny jest pomiar sygnału drganiowego na każdej obudowie łożyska. W przytoczonym przykładzie tylko na obudowie łożysk 1 i 2 występuje zjawisko przekroczenia progu ostrzeżenia amplitudy szczytowej w paśmie 300-3000Hz. W innych punktach pomiarowych przekładni nie zaobserwowano tego zjawiska.

4. Wnioski

Zaprezentowane w artykule dwie metody diagnostyki wybranych rodzajów maszyn wskazują na złożoność procesu diagnozowania stanu technicznego urządzenia na podstawie analizy sygnału drganiowego. Sposób diagnostyki sprzężarek śrubowych jest odmienny od ogólnie znanych metod oceny stanu technicznego maszyn w oparciu o normy ISO 10816 (1-7) i polski odpowiednik PN-ISO 10816-1. Sprężarka śrubowa, chociaż należy do grupy maszyn prostych, to do jej diagnostyki ma zastosowanie specjalnie opracowana norma VDI 3836.

Przekładnie zębate, które należą do grupy maszyn złożonych, nie mogą być oceniane na podstawie norm ISO 10816(1-7), gdyż praktyka pokazuje, że próby oceny stanu technicznego z zastosowaniem tych norm nie zawierają wiarygodnych informacji o ich stanie technicznym. Z tego powodu należy do diagnostyki maszyn złożonych stosować inne metody oceny ich stanu technicznego, między innymi wyznaczając indywidualne progi diagnostyczne, z zastosowaniem szeregu różnych estymat sygnałowych.

Praca wykonana w ramach: „PI-PWP Innowacyjny model współpracy pomiędzy uczelniami wyższymi i przedsiębiorstwami, oparty na nowym systemie wdrażania technologii”, POKL.08.02.01-24-009/11, realizowany przez Akademię Techniczno-Humanistyczną w Bielsku-Białej; projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

5. Literatura

- [1] Norma VDI 3836. Measurement and evaluation of mechanical vibration of screw-type compressors and Roots blowers. Addition to DIN ISO 10816-3.
- [2] Norma ISO 10816-3. Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ.
- [3] Norma PN-ISO 10816-1. Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących - Wytyczne ogólne.
- [4] Barkov A.V. Barkova N.A: Diagnostics of Gearings and Geared Couplings Using Envelope Spectra Methods, Pro-ceedings of the 20th Annual Meeting of the Vibration Institute. Saint Louis, Missouri USA: 1996, p. 75-83.
- [5] Mirola K., Tomaszewski J., Rysiński J.: Diagnostics of Scoring in Gears, Solid State Phenomena 2009 vol.144.
- [6] Kwiecień A., Rysiński J., Sidzina M.: Application of distributed system in control and diagnostic toothed gears. Computer networks: eds. Andrzej Kwiecień, Piotr Gaj, Piotr Stera. - Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, s. 334-343.
- [7] Rysiński J., Sidzina M.: Badania diagnostyczne parametrow przekładni z zastosowaniem przemysłowych elementów automatyki oraz protokołu http, Pomiary, Automatyka, Kontrola 2012 Vol. 58 nr 11.

otrzymano / received: 04.05.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.07.2014

artykuł recenzowany / revised paper