

Stanisław FOBER, Aleksander LUTYŃSKI

Politechnika Śląska, Gliwice

POMIARY DRGAŃ I HAŁASÓW W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ MASZYN I URZĄDZEŃ PRZERÓBCZYCH

Streszczenie. W referacie omówiono zagadnienia dotyczące pomiarów drgań i hałasów istotne przy diagnozowaniu maszyn i urządzeń przeróbczych. Przedstawiono pewne ogólne informacje wynikające z doświadczeń nabytych podczas prowadzonych badań przemysłowych maszyn i urządzeń górniczych i przeróbczych.

MEASUREMENTS OF VIBRATION AND NOISE IN A TECHNICAL DIAGNOSTICS OF THE PROCESSING MACHINES AND EQUIPMENT

Summary. Problems concerning measurements of vibration and noise important in diagnosing of the processing machines and equipment were discussed in the paper. Some general information resulting from the experience gained from an industrial testing of the processing machines and mining equipment were given.

1. Wstęp

Maszyny i urządzenia, jak każdy wytwór techniczny, przechodzą w swoim istnieniu trzy etapy: konstruowanie, wytwarzanie i użytkowanie, czyli eksploatację. Maszyny i urządzenia w ramach wymienionego trzeciego etapu mogą mieć kilka faz swojego istnienia. Pomędzy poszczególnymi fazami istnienia występuje odnowa (remont) maszyny czy urządzenia. Decyzja o przejściu z etapu wytwarzania do użytkowania oraz o przejściu z jednej fazy do następnej w etapie użytkowania wymaga obiektywnych metod i środków wartościowania jakości. Może to zapewnić diagnostyka techniczna.

Diagnostyka [1] („diagnoss” – rozpoznawanie) jest dziedziną wiedzy zmierzającą do rozpoznania badanego stanu rzeczy. Diagnostyka techniczna natomiast jest dziedziną nauki

oraz praktyki przemysłowej zajmującej się oceną stanu technicznego maszyn i urządzeń mechanicznych poprzez bezpośrednie badanie ich właściwości. Diagnostyka techniczna maszyn i urządzeń przerobczych pozwala na dokonanie:

- diagnozy, a więc identyfikacji ich aktualnego stanu technicznego,
- genezy, określenia przyczyn zaistnienia obecnego stanu technicznego,
- prognozy, określenia horyzontu czasowego przyszłej zmiany stanu technicznego.

Wszystkie procesy zmierzające do realizacji powyższych zadań nazywamy procesami diagnostycznymi. Ich przebieg jest identyfikowany sygnałem diagnostycznym, który jest dowolnym materialnym nośnikiem informacji. Jest to najczęściej przebieg wielkości fizycznej, umożliwiający przenoszenie w przestrzeni i czasie wiadomości o badanym stanie maszyny. Wiadomości diagnostyczne o maszynach i urządzeniach przerobczych mogą być przesyłane za pomocą sygnałów elektrycznych, pneumatycznych, optycznych itp. Najczęściej jednak przy przekazywaniu wiadomości diagnostycznych stosuje się sygnały elektryczne i dlatego też rozważania niniejszego referatu ograniczone zostaną do tego typu sygnałów.

Celem tych rozważań jest ogólne określenie cech sygnałów przekazywanych z maszyn i urządzeń przerobczych dla sformułowania wymagań, którym powinny odpowiadać czujniki pomiarowe, przetworniki, linie przesyłowe, odbiorniki i rejestratory, aby straty wiadomości diagnostycznych, przenoszone przez te sygnały podczas pomiaru, były zawarte w granicach dopuszczalnych. Podstawą do sformułowania tych wymagań jest analiza metrologiczna sygnałów, którą opisano w [3], [4] i [7].

Jednym z rodzajów diagnostyki technicznej jest diagnostyka wibroakustyczna, pozwalająca na ocenę stanu technicznego maszyny lub urządzenia mechanicznego na podstawie badań procesów wibroakustycznych. Są to procesy dynamiczne (drżania) lub akustyczne (hałas) zachodzące w maszynie lub urządzeniu podczas pracy. Widmo częstotliwości tych procesów zawarte jest w szerokim przedziale. Diagnostykę wibroakustyczną cechuje szereg istotnych zalet wynikających z tego, że:

- zjawiska wibroakustyczne stanowią odbicie najistotniejszych procesów fizycznych zachodzących w maszynie lub urządzeniu,
- sygnały wibroakustyczne posiadają znaczną pojemność informacji i charakteryzują się znaczną szybkością ich przekazywania,
- badania procesów wibroakustycznych przeprowadzić można w rzeczywistych warunkach eksploatacji maszyn i urządzeń bez zakłóceń procesów eksploatacyjno-technologicznych.

Analizując wiele sygnałów z pomiarów drgań i hałasów diagnostycznych maszyn i urządzeń górniczych wykonywanych przez Instytut Mechanizacji Górnictwa można

stwierdzić, że widma gęstości mocy tych sygnałów zaczynają się od częstotliwości 0 - 5 Hz i dochodzą do częstotliwości od 600 Hz do 18 kHz. Większość sygnałów posiada widmo ciągle, jednakże w zależności od stopnia powtarzalności sygnału w jego widmie pojawiają się bardziej lub mniej intensywne składowe w pasmach zgrupowanych wokół częstotliwości będących krotnością powtarzalności sygnału. Prawie cała energia sygnału skupiona jest w paśmie częstotliwości 0 Hz do 10-18 kHz. Powyżej tych częstotliwości składowe widma sygnału rejestrują pomijalnie małą energię sygnału. Dlatego z dokładnością wystarczającą dla praktyki przyjąć można, że zdecydowana większość sygnałów pomiarowo-diagnostycznych przekazywana podczas pomiaru z maszyny czy urządzenia przeróbczego zajmuje pasmo częstotliwości od dolnej częstotliwości granicznej równej 0-5 Hz do górnej częstotliwości granicznej nie przekraczającej 18 kHz.

Korzystając z doświadczeń nabytych przy wykonywaniu pomiarów maszyn górnictwa stwierdzić można, że przy obecnym stanie techniki pomiarowej nie ma możliwości wyeliminowania wpływu pewnych czynników utrudniających prawidłowe przekazywanie wiadomości i sygnałów pomiarowych, a więc wszelkiego rodzaju zakłóceń. Podczas pomiarów maszyn i urządzeń górnictwa w bardzo trudnych warunkach naturalnych i środowiskowych zakładów górnictwa występują najczęściej następujące zakłócenia:

- elektromagnetyczne wolno i szybko zmienne,
- impulsowe,
- szerokopasmowe.

Charakterystykę tych zakłóceń oraz wpływu na aparaturę pomiarową i przekazywane sygnały pomiarowe przedstawiono w [6].

Zasadniczym zastosowaniem pomiarów parametrów drgań i hałasów, czyli sygnałów wibroakustycznych, jest diagnostyka techniczna maszyn i urządzeń oraz ocena zagrożenia drganiami i hałasem człowieka i jego środowiska naturalnego. Dokładna znajomość parametrów hałasu i drgań występujących w środowisku pracy i życia człowieka stanowi podstawę do oceny stwarzanego przez nie zagrożenia, a także podstawę do wszelkiej działalności mającej na celu ochronę przed tego typu zagrożeniami lub uciążliwościami. Zasady wykonywania pomiarów hałasów i drgań ze względu na ochronę środowiska w miejscu przebywania ludzi podają określone normy.

2. Aparatura do pomiarów drgań i hałasów maszyn i urządzeń przeróbczych

Zgodnie z definicjami zamieszczonymi w literaturze [3] i [5], zespół środków technicznych umożliwiający przesłanie i przetwarzanie sygnału od czujnika do odbiornika nazywa się układem pomiarowym lub kanałem pomiarowym. System pomiarowy jest zbiorem układów pomiarowych działających według określonych zasad.

Do podstawowych problemów związanych z przesyłaniem sygnałów pomiarowych z maszyn i urządzeń przeróbczych zaliczyć można zagadnienie wierności przesyłania sygnałów pomiarowych, a więc odporności układów pomiarowych na zakłócenia. Wygodnym, pozwalającym na kompleksowe porównanie układów pomiarowych oraz ich dobór do warunków wykonywania pomiarów jest kryterium granicznej przepustowości układu pomiarowego, wyprowadzone z teorii informacji. Kryterium to określane jest zależnością:

$$C_u = \Delta F \log_2 \frac{P_s + P_z}{P_z} \left[\frac{\text{bit}}{\text{s}} \right] \quad (1)$$

gdzie:

- C_u – graniczna przepustowość układu, bit/s,
- ΔF – szerokość częstotliwości układu, Hz,
- P_s – średnia moc sygnału, W,
- P_z – średnia moc zakłóceń, W.

Zależność (1) przedstawia teoretyczną wartość graniczną prędkości przesyłania informacji układem pomiarowym przy ograniczonej średniej mocy sygnału przesyłowego w obecności zakłóceń typu „szumu białego” z ograniczonym widmem.

Dobór przepustowości układu pomiarowego niech zobrazuje następujący przykład. Układem pomiarowym ma zostać przekazywany sygnał akustyczny o paśmie częstotliwości $\Delta F=20$ kHz w obecności zakłóceń o rozkładzie normalnym. Aby na wyjściu układu pomiarowego popełniany błąd pomiaru nie był większy od 1%, a więc stosunek wartości średniej mocy sygnału do średniej mocy zakłóceń wyniósł 100, to przepustowość układu pomiarowego powinna wynosić $132 \cdot 10^3$ bit/s.

Podstawowym elementem każdego układu pomiarowego są przetworniki pomiarowe, przetwarzające energię sygnału do postaci, która umożliwia jego najefektywniejsze

przesyłanie lub porównywanie. Zespół przetworników pomiarowych znajdujących się najczęściej w jednej obudowie nazywa się czujnikiem.

Ogólna teoria przetworników pomiarowych [2], [5] określa wiele parametrów umożliwiających charakteryzowanie i porównywanie przetworników działających na podstawie różnych zjawisk fizycznych.

Na podstawie literatury przedmiotowej [3], [5] i [7] oraz własnej praktyki pomiarowej stwierdzić można, że przy doborze przetworników pomiarowych uwzględnić należy następujące ich cechy:

- statyczną funkcję przetwarzania, z której wynika zakres pomiarowy przetwornika,
- czułość statyczną,
- stałość zera,
- oddziaływanie przetwornika na źródło informacji,
- odporność przetwornika na warunki otoczenia, w którym wykonujemy pomiary.

Pełną charakterystykę dynamiczną przetworników pomiarowych podaje się najczęściej w postaci odpowiedzi skokowej $h(t)$ lub impulsowej $g(t)$ oraz wykresów częstotliwościowych. Do oceny charakterystyk czasowych często wykorzystuje się pewne cechy przetworników opisywane takimi wskaźnikami liczbowymi jak stała czasowa (T) charakteryzująca prędkość odpowiedzi przetwornika i czas ustalania się odpowiedzi. Jak wykazano w literaturze [5], czas ustalania się odpowiedzi jest odwrotnie proporcjonalny do górnej częstotliwości granicznej.

Do oceny charakterystyk częstotliwościowych należy stosować:

- częstotliwość naturalną (f_0), czyli częstotliwość drgań swobodnych nie tłumionych,
- tłumienie względne (ρ),
- częstotliwości graniczne (górną f_g i dolną f_d),
- szczyt rezonansowy (M_p),
- poziom szumów, czyli wartość skuteczną odchyłeń wielkości wyjściowej przy stałej wartości wielkości wejściowej w paśmie częstotliwości ograniczonej częstotliwościami granicznymi przetwornika.

Do pomiarów wibroakustycznych, w zależności od rodzaju sygnału, czujnikiem wejściowym w układzie pomiarowym jest mikrofon lub akcelerometr. Mikrofon jest przetwornikiem pomiarowym przetwarzającym energię akustyczną na elektryczną - przetwarza on ciśnienie akustyczne na sygnał elektryczny. W zależności od zasady przetwarzania energii mikrofony dzielą się na: stykowe (węglowe), dynamiczne, elektromagnetyczne, piezoelektryczne i pojemnościowe. Ze względu na sposób pobudzania

membrany mikrofony dzielimy na ciśnieniowe i gradientowe. Najważniejsze właściwości mikrofonów są określone dwoma wielkościami: skutecznością i kierunkowością.

Obecnie do pomiarów akustycznych używa się wyłącznie mikrofonów pojemnościowych, które charakteryzują się bardzo małymi zniekształceniami w szerokim paśmie częstotliwości, nawet od 0,4 Hz do 100 Hz oraz dużą skutecznością od 0,1 do 1 mW/Pa.

Ważnym zagadnieniem przy pomiarach akustycznych jest identyfikacja i lokalizacja źródła dźwięku. Szczególnie ważne jest to przy pomiarach akustycznych w diagnostyce technicznej. Zakłócenia sygnału mierzone równocześnie z sygnałem informacyjnym zawsze będą obciążać dalsze etapy procesu diagnostycznego. Problem lokalizacji źródła dźwięku staje się tym trudniejszy, im bardziej obiekt (źródło dźwięku) różni się od źródła punktowego. W pomiarach maszyn i urządzeń przerobczych za punktowe uważa się takie źródło dźwięku, którego największy wymiar liniowy jest kilkakrotnie mniejszy od odległości pomiędzy źródłem dźwięku a punktem pomiaru oraz jeżeli długość promieniowania fali jest mała w porównaniu z tą odległością. Dokładne metody identyfikacji i lokalizacji źródeł dźwięku w diagnostyce technicznej są oparte na skomplikowanych analizach korelacyjnych i koherencyjnych sygnałów mierzonych równocześnie dwoma mikrofonami.

Na podstawie wyżej przedstawionych kryteriów w Instytucie Mechanizacji Górnictwa i Katedrze Przeróbki Kopalini i Utylizacji Odpadów stosuje się do pomiaru hałasu precyzyjny całkujący miernik poziomu dźwięku typu 2236 firmy Brüel & Kjær o następujących danych technicznych:

- zakres pomiarowy 10 ÷ 140 dB,
- poziom szumów 18 dB (A),
- charakterystyka ważenia częstotliwościowego A,C,L zgodnie z IEC 65 klasa 1,
- filtry pasmowe o częstotliwościach środkowych: 31,5; 63; 125; 250; 500 Hz,
- jednocześnie działające: detektor wartości szczytowej i skutecznej z niezależnymi charakterystykami ważenia częstotliwościowego,
- zakres liniowości 80 dB,
- czas narastania detektora < 50 μs,
- stałe czasowe S,F,I zgodnie z IEC 65,
- mierzone parametry: Max L, Min L, Max P, Peak, SPL, L_{eq} , L_{Im} , SEL, IEL, L_{EPd} , L_{95} , L_5 , przesterowanie % czasu pomiaru,
- rozdzielczość 0,5 dB,
- rejestry – 40 rejestrów wyników ogólnych,

- pamięć historii czasowej: Leg, Max P, Max L, zapamiętywane co 1s lub 1 min i przekazywane do pamięci o pojemności 128 kB,
- mikrofon typu 4188, 1/2" pojemnościowy: pole swobodne, czułość – 1V/Pa, zakres częstotliwości $8 \div 12$ kHz, pojemność 12 pF,
- interfejs – szeregowy,
- wyjście: DC, AC,
- zegar czasu rzeczywistego, kalendarz i czas trwania pomiaru,
- temperatura pracy: $-10 \div 50$ °C,
- masa 460 g,
- wymiary 257x97x41 mm.

Drgania punktu materialnego (wibracje) można przedstawić za pomocą trzech matematycznie powiązanych ze sobą wielkości:

- amplitudy przyspieszeń,
- amplitudy prędkości,
- amplitudy przemieszczeń.

W praktyce drgania są złożonymi przebiegami, najczęściej okresowymi, które można rozłożyć na wiele sinusoidalnych przebiegów harmoniczych.

Do ilościowego opisu parametrów drgań przeprowadza się najczęściej pomiary amplitud przyspieszeń. Czujnikiem wejściowym układu pomiarowego przetwarzającym przyspieszenie drgań na sygnał elektryczny jest akcelerometr piezoelektryczny pracujący w szerokim paśmie częstotliwości.

Różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych akcelerometrów umożliwia przeprowadzenie pomiarów w bardzo różnych warunkach, co praktycznie zaspokaja znaczną część zapotrzebowania systemów diagnostycznych. Bardzo ważnym czynnikiem mającym wpływ na jakość pomiarów jest zamocowanie akcelerometru do źródła informacji o drganiach. Najkorzystniejsze jest trwałe zamocowanie (np. przykręcenie wkrętem) w sposób zapewniający dobre przyleganie płaszczyzny akcelerometru do płaszczyzny pomiarowej.

Podczas pomiarów sygnały wibroakustyczne rejestrowane są za pomocą rejestratorów analogowych lub cyfrowych. Zarejestrowany sygnał poddawany jest w laboratoriach wnikliwej analizie.

W Instytucie Mechanizacji Górnictwa skompletowano zestaw aparatury firmy Brüel & Kjaer [8] do pomiarów i rejestracji drgań, który składa się z:

1. Trójosiowego czujnika przyspieszeń typu 4321 o trzech niezależnych wyjściach, do równoczesnego pomiaru w trzech prostopadłych osiach, posiadającego następujące parametry:
 - czułość ładunkowa $1 \pm 2\%$ pC/ms⁻²,
 - zakres częstotliwości pomiarowej 0,1 ÷ 12 000 Hz,
 - częstotliwość rezonansu własnego 40 kHz,
 - masa 55 g,
 - maksymalna temperatura pracy 250 °C.
2. Trzech wzmacniaczy ładunku typu 2643, o wzmocnionej konstrukcji przystosowanej do pomiarów w warunkach przemysłowych, o danych:
 - wzmocnienie 0,9 ÷ 10 mV/pC (0 ÷ 20 dB),
 - zakres częstotliwości pomiarowej 1 Hz ÷ 200 kHz (-3 dB),
 - maksymalne napięcie wyjściowe 8 V,
 - oporność wyjściowa 100 Ω,
 - zakłócenia < 15 * 10⁻³ pC (2 Hz ÷ 22kHz),
 - napięcie zasilające ±14 V ÷ ± 18 V,
 - masa 112 g.
3. Magnetofonu pomiarowego, przenośnego, typu 7005, czterokanałowego, do pomiarów terenowych i laboratoryjnych, szczególnie przydatnego do pomiarów drgań. Magnetofon wyposażony jest w moduły wejścia / wyjścia z zasilaniem akumulatorowym i posiada następujące parametry techniczne:
 - taśma 1/4" na szpulach 7" lub kasety B&K z pętlą,
 - napęd różnicowy zapewniający wysoką równomierność przesuwu taśmy, silniki prądu stałego sterowane generatorem kwarcowym (zniekształcenie typu flutter < 0,06 % przy przesuwie taśmy 15 "/s),
 - kompensacja zniekształceń typu flutter w kanałach FM,
 - automatyczny stop i znacznik wysterowania oraz głośnik kontrolny,
 - zestaw sześciu akumulatorów zapewniający pracę przez okres 5 godzin,
 - masa 8,8 kg,
 - wymiary 102x430x274 mm.
4. Modułu zapisu do magnetofonu 7005, typ ZM 0053 o następujących parametrach technicznych:
 - zapis FM,

- wejście bezpośrednie: 30 mV ÷ 30 V wartości skutecznej,
 - tłumik wejściowy od 0 do 60 dB skokowo co 10 dB, 13 dB regulacja płynna,
 - indywidualne wskaźniki przesterowania,
 - wejście 5 Ω , normalnie 1 V wartości skutecznej.
5. Analizatora drgań typu 2515 przenośnego, zasilanego bateryjnie. Przeznaczony jest do diagnostyki technicznej w trudnych warunkach przemysłowych, wodoszczelny, pyłoszczelny, odporny na udary. Posiada następujące parametry:
- zakres częstotliwości, górny zakres od 100 Hz ÷ 20 kHz,
 - 255 linii przy rozdzielczości do 400 mHz (80 Hz zoom),
 - stała względna szerokość pasma lub stałoprocentowa 23 % i 6 %,
 - dynamik 60 dB,
 - bezpośrednie podłączenie akcelerometrów, zasilanie wzmacniaczy,
 - przewodowe wyjście napięciowe dla sygnałów z magnetofonu lub czujników przemieszczenia,
 - korekcja prostokątna Hanniga, uśrednianie liniowe i wykładnicze,
 - analiza sekwencyjna i uśrednianie sekwencji stosowane przy sygnałach niestacjonarnych,
 - pięciokrotne powiększenie (zoom) stosowane do identyfikacji harmonicznym i wstęp bocznych,
 - analiza cepstrum do diagnostyki przekładni i łożysk,
 - synchroniczne uśrednianie czasowe i pięciokrotne rozszerzenia obrazu przebiegu czasowego,
 - możliwość zapamiętania do 100 stałoprocentowych widm z aktualnymi nastawami analizatora,
 - możliwość kompensacji małych zmian prędkości obrotowej maszyny przy porównywaniu widm,
 - bardzo szerokie możliwości kursora: poziom względny, znacznik harmoniczny, precyzyjny pomiar częstotliwości, różniczkowanie i całkowanie pozwalające na odczyt przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia,
 - ekran 5" o wysokiej rozdzielczości, oś Y liniowa lub logarytmiczna, oś X w Hz lub obr/min oraz inne jednostki pomiarowe,
 - masa 16 kg,
 - wymiary 177x430x320 mm.

3. Podsumowanie

Na podstawie licznych badań przemysłowych, analiz laboratoryjnych i przeprowadzonych rozważań stwierdzić można, że:

- do oceny i porównywania układów pomiarowych służących do przekazywania i rejestracji sygnałów wibroakustycznych można stosować kryterium granicznej przepustowości układu pomiarowego,
- wartość granicznej przepustowości układu pomiarowego powinna być większa od $132 \cdot 10^3$ bit/s,
- przy wyborze i ocenie układu pomiarowego należy, oprócz parametrów elektrycznych, uwzględnić następujące kryteria:
 - odporność przetworników pomiarowych układu na warunki otoczenia,
 - odporność układu pomiarowego na najczęściej występujące zakłócenia,
 - łatwość i szybkość montażu czujników na źródle sygnałów,
- przed pomiarami wibroakustycznymi należy po analizie diagnostycznej źródła sygnałów starannie dobrać punkty pomiarowe,
- podczas pomiarów sygnały wibroakustyczne należy rejestrować za pomocą rejestratorów magnetycznych analogowych lub cyfrowych w celu poddania sygnałów analizie diagnostycznej w laboratoriach.

LITERATURA

1. Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.
2. Cholewa W., Moczulski W.: Diagnostyka techniczna maszyn – pomiary i analiza sygnałów. Politechnika Śląska, Skrypt Pol. Śląskiej nr 1758, Gliwice 1993.
3. Fober S.: Analiza metrologiczna systemów przekazywania informacji pomiarowych z obiektów wirujących. Praca doktorska, Gliwice 1979.
4. Fober S., Lutyński A.: Ocena stanu technicznego wirówki sedymentacyjno-sitowej metodą analizy wibroakustycznej. ZN Pol. Śląskiej Nr. 1480, Seria Górnictwo z. 246, Gliwice 2000.
5. Hagel R.: Miernictwo dynamiczne. WNT, Warszawa 1975.
6. Lipowczan A.: Wibroakustyczna diagnostyka maszyn górniczych. Prace GIG, Katowice 1986.
7. Spałek J., Fober S.: Możliwości stosowania metody diagnostyki wibroakustycznej do oceny stanu technicznego układów napędowych maszyn wyciągowych. ZN Pol. Śląskiej nr 1099, Seria Górnictwo z. 193, Gliwice 1990.
8. Katalogi firmy Brüel – Kjaer.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Karol F. Reich

Abstract

Problems concerning measurements of vibration and noise important in diagnosing of the processing machines and equipment were discussed in the paper.

Some general information resulting from the experience gained from an industrial testing of the processing machines and mining equipment were given.

Disturbances in the diagnostic signal transmission that occur due to difficult circumstances in which the diagnosed machines operate.

General requirements concerning the testing equipment for measuring vibrations and noise of mining and processing machines and equipment, were presented. Technical and utility parameters, sets of measuring instruments, which is in a possession of the Institute of Mining Mechanization, and that was used during testing of those machines were characterized and described.