

Diagnostyka maszyn i urządzeń – uwagi ogólne

Tadeusz Glinka, Sławomir Szymaniec

Współcześnie, w okresie stale rosnących wymagań wobec wydajności oraz redukcji kosztów produkcji w przemyśle i energetyce, koniecznością staje się właściwa eksploatacja i diagnostyka maszyn. Często uszkodzenia niewielkich elementów napędowych skutkują znacznymi stratami wynikającymi z nieprzewidzianego zatrzymania procesu produkcyjnego oraz nieplanowych prac remontowych. Diagnostyka maszyn i urządzeń oraz monitorowanie parametrów ich pracy pozwalają uniknąć skutków awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów maszyn i urządzeń oraz znacznie wydłużyć czas ich eksploatacji [2.1–2.33].

Maszyny przemysłowe tworzą coraz to bardziej złożone zespoły, towarzyszy temu coraz intensywniejsza produkcja przemysłowa i eksploatacja maszyn i urządzeń, często 24 godziny na dobę, czyli w ruchu ciągłym. Podstawowym zadaniem stawianym inżynierom jest ciągły wzrost wydajności maszyn i urządzeń. Wzrostowi wydajności powinno towarzyszyć zwiększenie starań o zapewnienie pełnej sprawności maszyn i urządzeń. Trzeba to pogodzić ze stale malejącą liczebnością personelu odpowiedzialnego za utrzymanie ruchu i serwisu maszyn i urządzeń. Wzrastająca wartość maszyn i urządzeń w przemyśle kieruje uwagę służb utrzymania ruchu i służb eksploatacyjnych na unowocześnianie zasad eksploatacji i serwisu.

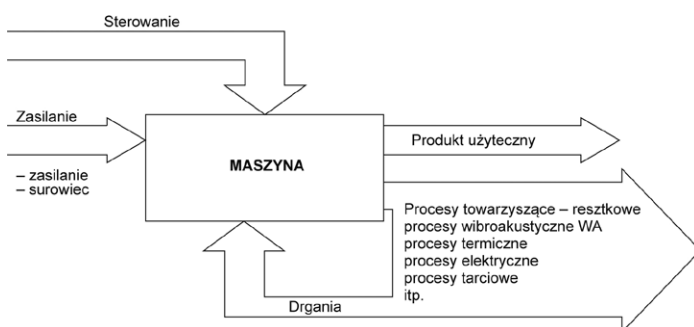
Stawiane są żądania wysokiej efektywności, niezawodności i konieczności spełnienia innych cech świadczących o sprawnym i prawidłowym wykonywaniu zadań eksploatacyjnych. Pociąga to za sobą konieczność opracowania i ciągłego udoskonalania metod umożliwiających zbieranie oraz analizowanie informacji o właściwościach funkcjonujących maszyn i urządzeń, o stopniu ich zdadności do wykonywania przewidzianych przez inżynierów zadań. Można powiedzieć, że stawiane jest co chwilę pytanie: jaki jest stan techniczny maszyny i urządzenia, jak się one zachowują, czy mają jakieś uszkodzenia? Efektywna organizacja procesów zmierzających do odpowiedzi na postawione wcześniej pytania jest podstawowym zadaniem diagnostyki technicznej [2.1–2.33]. Bezpieczeństwo eksploatacji, dyspozycyjność oraz trwałość i niezawodność maszyn i urządzeń wykorzystywanych w procesie produkcyjnym mają decydujący wpływ na kondycję ekonomiczną przedsiębiorstwa [2.1–2.33]. Znaczne straty produkcyjne mogą być skutkiem nieprzewidzianych awarii maszyn i urządzeń, a w konsekwencji ich postoju. Do tego dochodzą często bardzo kosztowne naprawy. Konieczne jest dysponowanie informacjami na bieżąco o zmianach stanu dynamicznego maszyn, o stopniu zaawansowania ich zużycia, rodzaju i poziomie uszkodzeń, po to, aby przewidzieć awarie i w miarę możliwości wcześniej podjąć odpowiednie działania zapobiegawcze. Prowadzenie eksploatacji maszyn i urządzeń na podstawie ich obserwacji przez obsługę jest niewystarczające. Diagnostyka maszyn i urządzeń oraz monitorowanie parametrów ich pracy pozwalają uniknąć

awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów oraz znacznie wydłużyć czas ich eksploatacji. Organizacyjna i finansowa atrakcyjność diagnostyki zespołów maszynowych oraz ciągły postęp w elektronice i jej dostępność zachęcają do intensywnego stosowania diagnostyki maszyn i urządzeń [2.23–2.25].

Jak pisze prof. Wojciech Cholewa [2.43], diagnostyka techniczna jest dziedziną intensywnie rozwijaną od połowy ubiegłego wieku. Obejmuje ona diagnostykę maszyn i diagnostykę procesów. W niniejszej książce ograniczymy się do diagnostyki maszyn i urządzeń.

1. Diagnostyka techniczna maszyn

Według prof. Czesława Cempla [2.13, 2.14] diagnostyka techniczna to dziedzina wiedzy, której celem jest określenie szeroko rozumianego stanu technicznego maszyn i urządzeń za pomocą obiektywnych metod i środków poprzez badania bezpośrednie ich właściwości i badania pośrednie procesów towarzyszących, tzw. procesów reszkowych. Każdy proces użyteczny wykonywany przez maszyny i urządzenia występuje w towarzystwie generacji procesów reszkowych typu wibroakustycznego, elektrycznego, termicznego itp. [2.13]. Współdziałanie maszyny z otoczeniem przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Współdziałanie maszyny z otoczeniem w dowolnym procesie produkcyjnym [2.13]

Według tego samego autora cel użyteczny diagnostyki maszyn charakteryzuje się trzema zadaniami:

- diagnoza – określenie bieżącego stanu technicznego;
- geneza – określenie przyczyn zaistnienia obecnego stanu;
- prognoza – określenie horyzontu czasowego przyszłej zmiany stanu technicznego.

Przesłanki [2.13, 2.14] do obiektywnej oceny stanu danej maszyny dają pomiary dostępnych do obserwacji symptomów (objawów) stanu technicznego i następnie wnioskowanie na podstawie otrzymanych danych. Symptom stanu [2.13, 2.14] zawiera w sobie trzy grupy parametrów i charakterystyk możliwych do obserwacji:

- parametry funkcjonalne, robocze maszyny elektrycznej (np. moc, prędkość, prąd);
- parametry i charakterystyki będące bezpośrednim symptomem zużycia (np. luzy, odchyłki kształtu i wymiarów w stosunku do wzorca);
- badanie procesów resztkowych (np. drgania, hałas, strumień osiowy, wyładowania niezupełne – *wnz*).

Każda maszyna przechodzi cztery fazy swego istnienia: konstruowanie, wytwarzanie, eksploatację i złomowanie. Na każdym etapie należy prowadzić stosowną diagnostykę. W sposób poglądowy przedstawiono to na rys. 2 [2.23]. Na rys. 3 przedstawiono ideę diagnostyki eksploatacyjnej maszyn [2.19–2.22].

W sposobie podejścia do diagnostyki autor [2.23] wyodrębniła jako oddzielną fazę życia maszyny – obszar złomowania, natomiast w fazie eksploatacji – obszar remontu, modernizacji i retrofitu [2.23]. Autor [2.23] uważa również, że faza eksploatacji zawierać w sobie może fazę procesu technologicznego z udziałem danej maszyny. Wykorzystanie metod diagnostyki technicznej na każdym etapie życia maszyny elektrycznej jest podstawowym elementem racjonalnego zachowania użytkownika maszyny. Na podstawie analizy sygnałów generowanych przez maszyny i urządzenia określa się ich stan, przewidując przy tym terminy koniecznych przeglądów i remontów – rys. 3. Spośród nowoczesnych metod badań diagnostycznych maszyn należy wyróżnić bardzo efektywne badania opierające się na wykorzystaniu informacji zawartych w sygnałach towarzyszących normalnej pracy maszyn [2.13, 2.14].

Podsumowując dotychczasowe rozważania, można stwierdzić, że głównym zadaniem diagnostyki maszyn i urządzeń jest rozpoznawanie stanu obiektu na podstawie dostępnych o nim informacji [2.43]. Stosowane metody takiego postępowania można podzielić ogólnie na dwie klasy [2.13, 2.14, 2.43]:

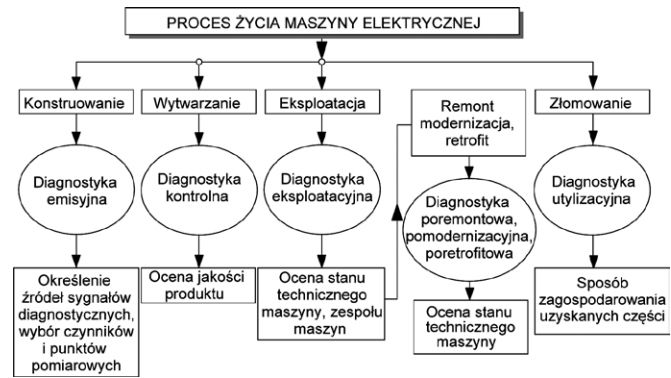
- diagnostyka symptomowa;
- diagnostyka wsparta modelami.

Diagnostyka symptomowa w opinii autorów monografii przeważa w zastosowaniach przemysłowych. Opiera się ona głównie na czynnym i biernym eksperymencie diagnostycznym [2.13, 2.14, 2.43]. Istotną zaletą diagnostyki symptomowej jest możliwość jawnego wykorzystania posiadanej wiedzy podczas postępowania diagnostycznego. *Postępowaniem alternatywnym do diagnostyki symptomowej jest diagnostyka wsparta modelami. Jej istotą jest porównanie wyników obserwacji działającego obiektu z wynikami symulowanego jego działania za pomocą posiadanego modelu i przy założeniu, że wejścia do procesu symulacji odpowiadają wejściom obserwowanym dla rozpatrywanego obiektu* [2.43].

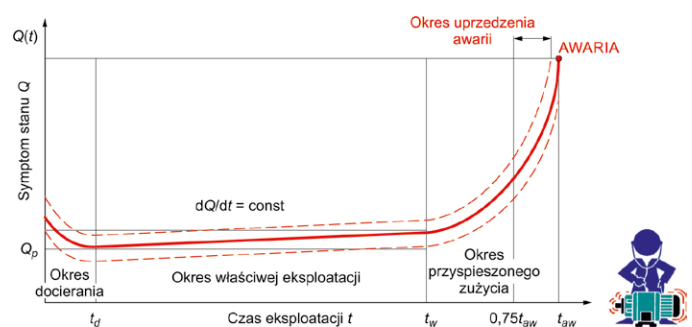
Przedstawione przez autorów niniejszej monografii metody diagnozowania maszyn elektrycznych i transformatorów mieszczą się w klasie diagnostyki symptomowej.

2. Symptomy uszkodzeń – zagadnienia ogólne

Diagnostyka techniczna maszyn i urządzeń, a w szczególności diagnostyka eksploatacyjna jest związana głównie ze strategią utrzymania maszyn w danym zakładzie przemysłowym, zależną od ich stanu technicznego. Określenie stanu technicznego maszyn i urządzeń odbywa się na podstawie analizy symptomów towarzyszących ich eksploatacji. Za symptomy autorzy



Rys. 2. Cele diagnostyki na poszczególnych etapach życia maszyny elektrycznej [2.23]

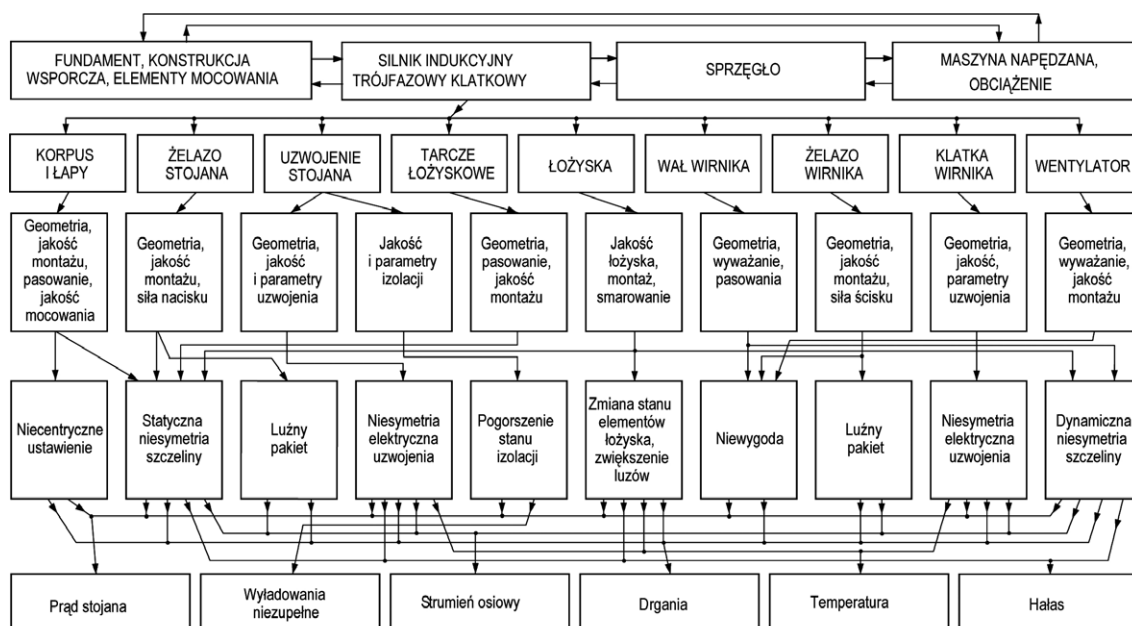


Rys. 3. Idea diagnostyki eksploatacyjnej maszyn, krzywa życia maszyn [2.5–2.12, 2.19–2.22]

uwzględniają ogół wielkości fizycznych związanych z pracą danej maszyny i urządzenia, a w szczególności zmiany tych wielkości. Odnosząc to przykładowo do silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych, do symptomów towarzyszących ich pracy autorzy zaliczają charakterystyczne zmiany: prądu stojana, strumienia osiowego, drgań, temperatury, hałasu, wyładowań niezupełnych.

Zmiana symptomu może być związana ze zmianą obciążenia silnika bądź ze zmianą jego stanu technicznego, albo ze zmianą jednego i drugiego. W celu rozróżnienia zmiany obciążenia od zmiany stanu technicznego należy wykonać analizę tych zmian, przeprowadza się to w czasie procedury diagnostycznej. Określenie sposobu diagnozowania eksploatacyjnego przykładowo silników indukcyjnych klatkowych, podobnie jak i dla innych maszyn, musi być poprzedzone analizą mechanizmu powstawania danego uszkodzenia, które prowadzi do awarii lub do zatrzymania napędu i wykonania remontu. Trzeba prześledzić możliwą drogę powstawania uszkodzenia w maszynie i urządzeniu oraz określić symptomy towarzyszące ich eksploatacji, które będą reagowały już na początku pojawienia się uszkodzenia w możliwie najkrótszym czasie.

Na rys. 4 przedstawiono opracowany przez autora [2.23] uproszczony schemat przyczynowo-skutkowy występowania symptomów uszkodzenia w silnikach indukcyjnych trójfazowych klatkowych używanych w napędach przemysłowych. Pokazano w uproszczony sposób wzajemne zależności oraz



Rys. 4. Ogólny, uproszczony schemat przyczynowo-skutkowy występowania symptomów uszkodzenia w silnikach indukcyjnych trójfazowych klatkowych [2.13]

drogi powstawania zmian danego symptomu. Zwraca uwagę bardzo złożony mechanizm występowania symptomów uszkodzenia. Aby zmniejszyć awaryjność zespołów maszynowych w przedsiębiorstwach, ustalono [2.23] warunki konieczne, jakich należy bezwzględnie przestrzegać dla zapewnienia należytego utrzymania ruchu zespołów maszynowych. Są to [2.23]:

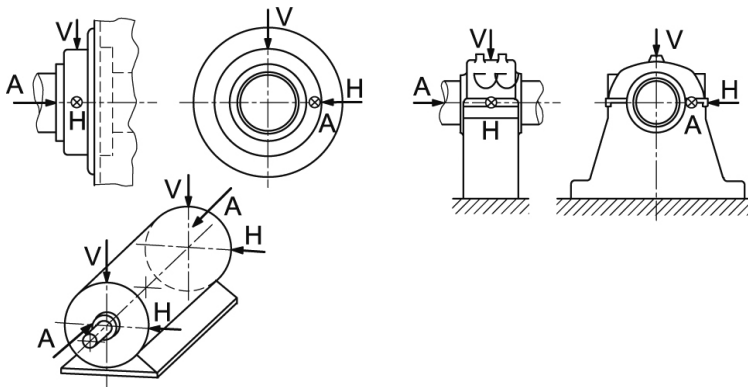
- udział zespołu diagnostycznego w odbiorach nowych maszyn i urządzeń;
- silniki bezwzględnie przed oddaniem do eksploatacji należy sprawdzać w Stacji Prób i Pomiarów z właściwym wyposażeniem badawczym (fundament do badań, stanowisko, aparatura), zarówno pod względem elektrycznym, jak i dynamicznym oraz termicznym;
- prawidłowy dobór silnika do wymagań napędzanego urządzenia oraz możliwości zasilania;
- prawidłowy dobór łożysk w napędzie i w maszynie napędzanej;
- prawidłowy dobór sprzęgła;
- właściwie zaprojektowana i wykonana konstrukcja wsporcza, fundament z elementami do mocowania silnika i maszyny napędzanej, dbałość o ich stan techniczny;
- napędy prawidłowo ustawione na konstrukcji wsporczej, fundamencie;
- wszystkie maszyny ustawiane z uwzględnieniem poprawek cieplnych;
- wszystkie wirniki wyważone z uwzględnieniem niewyważenia cieplnej;
- prawidłowe wyważanie wirnika zespołu: silnik + sprzęgło + maszyna napędzana;
- stosowanie właściwej techniki smarowania łożysk w zespole maszyn;
- dbałość o dobry stan izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych i transformatorów;

- stosowanie pomiaru temperatury tam, gdzie jest to konieczne;
- przestrzeganie zasad montażu i demontażu łożysk – podgrzewanie indukcyjne;
- przeprowadzanie remontów tylko wtedy, gdy stan techniczny maszyny i urządzenia wskazuje na jego konieczność; nie powinno się ingerować w sprawnie działającą maszynę i urządzenie; zalecana jest strategia utrzymania maszyn i urządzeń polegająca na eksploatacji zależnej od ich stanu technicznego. Powyższe uwarunkowania mają jednakową wagę.

3. Diagnostyka eksploatacyjna w przemyśle i energetyce

Najprostszą i najstarszą metodą diagnozowania maszyn wirujących pod względem mechanicznym są okresowe lub ciągłe pomiary szerokopasmowych poziomów drgań, które bazują na śledzeniu trendu zmian poziomu prędkości (głównie Europa) lub przyspieszenia drgań (głównie Ameryka, rzadziej Europa) w szerokim paśmie częstotliwości, obejmującym zakres widma częstotliwościowego maszyny. Zakres częstotliwości zależy od rodzaju maszyny [2.34, 2.35]. Zakres niezbędny do oceny maszyny z łożyskami tocznymi powinien zawierać częstotliwości wyższe niż w przypadku maszyny z łożyskami ślizgowymi. Dla silników WN częstotliwości żłobkowe znajdują się powyżej 1 kHz. Oznacza to, że zakres pomiarowy powinien obejmować co najmniej pasmo od 10 Hz do 2,0 kHz [2.23]. Dla maszyn wolnoobrotowych jest zalecana dolna granica częstotliwości na poziomie 2 Hz [2.23]. Autorzy zwracają uwagę na istotną różnicę w stosunku do poprzednich wymagań normowych. W przeszłości intensywność drgań wyznaczała wartość skuteczna prędkości drgań mierzona w paśmie od 10 Hz do 1 kHz.

Wielkości otrzymane z pomiarów w szerokim paśmie częstotliwości, obejmującym zakres widma częstotliwościowego



Rys. 5. Punkty pomiarowe w silniku poziomym wg norm [2.34, 2.35]

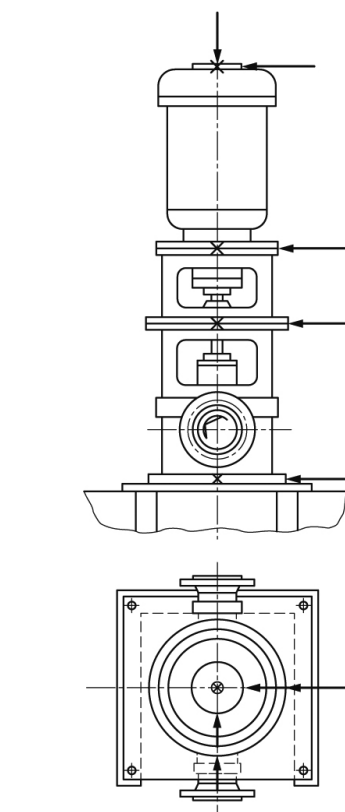
maszyny, są porównywane z dopuszczalnymi granicznymi poziomami wibracji określonymi w normie ISO 10816 [2.34] oraz normie ISO 7919 [2.35] i na tej podstawie maszyna jest oceniana, a następnie jest podejmowana decyzja o dalszej eksploatacji lub zatrzymaniu danej maszyny. Według normy ISO 10816 do oceny stanu technicznego maszyny należy wykonać pomiary wartości skutecznej prędkości drgań w ustalonym zakresie częstotliwości V_{RMS} w punktach przedstawionych na rys. 5 i rys. 6 oraz porównać wyniki ze wskazaniami norm. Natężenie drgań maszyny to największa ze zmierzonych wartości V_{RMS} w punktach pomiarowych.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (1)$$

gdzie:

V_{RMS} – wartość skuteczna prędkości drgań w określonym przedziale częstotliwości; T – przedział czasu, dla którego określa się V_{RMS} , czas całkowania; $v(t)$ – prędkość drgań, sygnał prędkości drgań.

Bezwzględne wartości V_{RMS} podane przez normy nie zawsze są trafne, zważywszy na indywidualne cechy poszczególnych maszyn, impedancję mechaniczną w punkcie pomiaru, niemniej są one ogólnie użyteczne. Wskazują bowiem na ważność wzrostu poziomu drgań w różnym stopniu dla różnych maszyn. W normie ISO 10816 (rys. 9) stwierdza się, iż wzrost wartości V_{RMS} 2,5-krotny (o 8 dB) jest zmianą istotną, ponieważ pokrywa jedną klasę jakości. Wzrost V_{RMS} 10 razy (o 20 dB) lub więcej jest poważny, ponieważ może

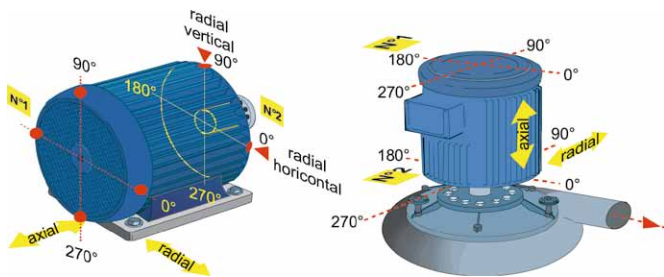


Rys. 6. Punkty pomiarowe na pionowym zespole maszynowym wg normy [2.34, 2.35]

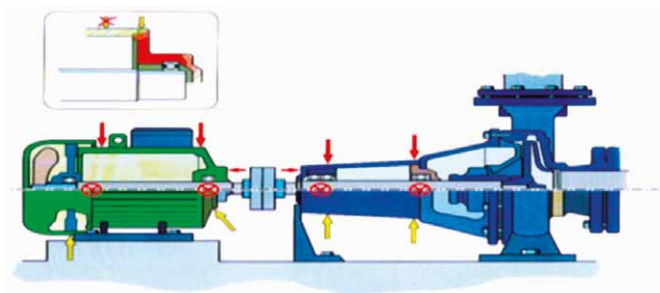
zmienić klasyfikację maszyny – „dobry stan techniczny” na „niedopuszczalny stan techniczny”. W praktyce diagnostycznej wykonuje się pomiary drgań na obudowie łożysk lub na tarczach łożyskowych w obszarze największej sztywności albo na korpusie maszyny w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (X, Y, Z) w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału w kierunku poziomym i pionowym oraz wzdłuż osi wału na wysokości osi, możliwie jak najbliżej wału. Ilustrują to rys. 7 i 8.

reklama

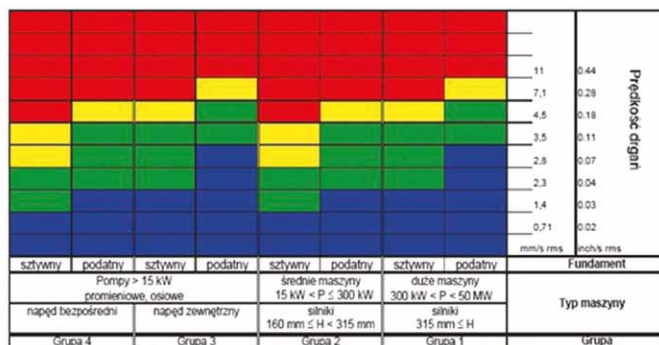
reklama



Rys. 7. Punkty pomiarowe i kierunki pomiarów drgań dla przykładowego silnika poziomego i pionowego [2.36]



Rys. 8. Punkty pomiarowe i kierunki pomiarów drgań dla przykładowego agregatu pompowego [2.36]



Rys. 9. Graniczne dopuszczalne poziomy wibracji wg normy PN-EN-ISO 10816 [2.34]

Do oceny stanu drganiowego maszyn, utożsamianego z ich stanem dynamicznym, w praktyce przyjmuje się najczęściej podział na cztery strefy dynamiczne:

- **A – STAN DOBRY.** Na rys. 9 kolor niebieski. Poziom drgań nowo oddanych do eksploatacji maszyn powinien zawierać się w tej strefie.
- **B – STAN UŻYTECZNY.** Na rys. 9 kolor zielony. Maszyny, których poziom drgań zakwalifikowano do tej strefy, mogą pracować długotrwale bez ograniczeń.
- **C – STAN WARUNKOWO DOPUSZCZALNY.** Na rys. 9 kolor żółty. Maszyny, których poziom drgań zawiera się w tej strefie, uważa się zwykle za nienadające się do długotrwałej pracy ciągłej. Na ogół maszyna może pracować przez ograniczony czas, aż będzie możliwość podjęcia działań zapobiegawczych, remontowych.

Tabela 1. Klasyfikacja stref dla poszczególnych grup maszyn – drgania bezwzględne [2.34]

GRUPA	POSADOWIENIE	GRANICE STREFY	PRĘDKOŚĆ DRGAŃ, WARTOŚĆ SKUTECZNA V_{RMS} [mm/s]
1	Sztwywny	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
1	Sprężyste	A/B	3,5
		B/C	7,1
		C/D	11
2	Sztwywny	A/B	1,4
		B/C	2,8
		C/D	4,5
2	Sprężyste	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
3	Sztwywny	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
3	Sprężyste	A/B	3,5
		B/C	7,1
		C/D	11
4	Sztwywny	A/B	1,4
		B/C	2,8
		C/D	4,5
4	Sprężyste	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1

Tabela 2. Klasyfikacja stref dla maszyn o mocy znamionowej poniżej 15 kW – drgania bezwzględne [2.34]

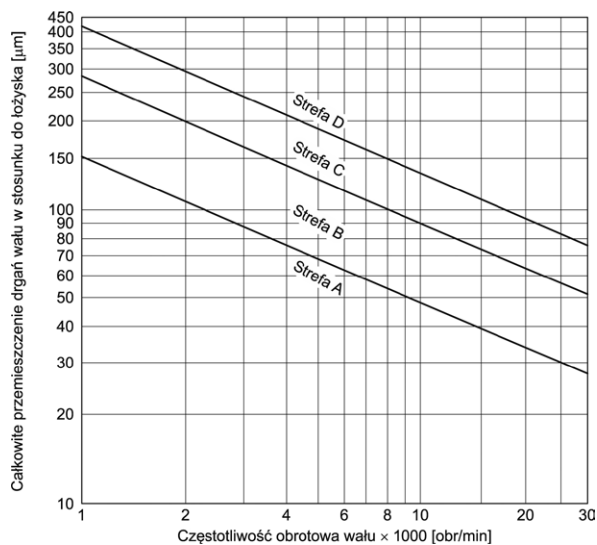
GRANICE STREFY	PRĘDKOŚĆ DRGAŃ, WARTOŚĆ SKUTECZNA V_{RMS} [mm/s]
A/B	0,71
B/C	1,80
C/D	4,50

- **D – STAN NIEDOPUSZCZALNY.** Na rys. 9 kolor czerwony. Wartości poziomu drgań w tej strefie są uważane za zbyt duże i wskazują na możliwość wystąpienia uszkodzenia maszyny. Po osiągnięciu takiego poziomu drgań maszynę należy wyłączyć.

Podział maszyn na grupy dynamiczne

Ze względu na grupy dynamiczne maszyn w praktyce przyjmuje się najczęściej podział przeprowadzony stosownie do typu maszyny, mocy znamionowej lub wzniosu osi wału, zgodnie z normą ISO 10816:

- **Grupa 1:** Wielkie maszyny o mocy znamionowej ponad 300 kW; maszyny elektryczne o wzniosie osi wału $H \geq 315$ mm (maszyny te mają zazwyczaj łożyska ślizgowe, zakres prędkości obrotowych rozciąga się od 120 obr./min do 15000 obr./min).
- **Grupa 2:** Maszyny o średniej mocy znamionowej powyżej 15 kW aż do 300 kW włącznie; maszyny elektryczne o wzniosie osi wału $160 \text{ mm} \leq H < 315 \text{ mm}$ (maszyny te mają zazwyczaj łożyska toczne i prędkości obrotowe powyżej 600 obr./min).

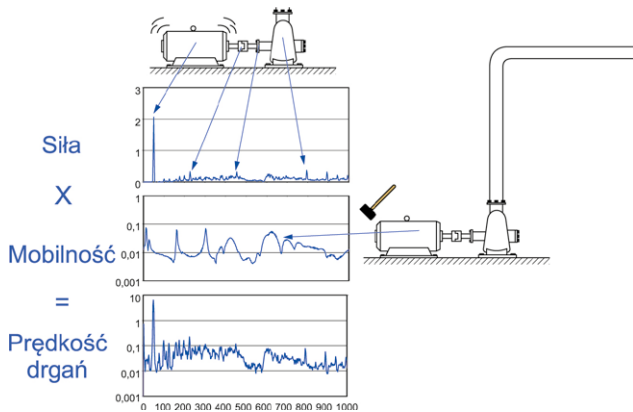


Rys. 10. Klasyfikacja stref dla poszczególnych maszyn - drgania względne [2.35]

- **Grupa 3:** Pompy z wirnikami wielołopatkowymi i z oddzielnym napędem (odśrodkowe, o mieszanym przepływie lub o przepływie osiowym) o mocy znamionowej powyżej 15 kW (maszyny tej grupy mogą mieć łożyska ślizgowe lub łożyska toczne).
- **Grupa 4:** Pompy z wirnikami wielołopatkowymi i z wbudowanym napędem (ośrodkowe, o mieszanym przepływie i o przepływie poosiowym) o mocy znamionowej powyżej 15 kW (maszyny tej grupy mogą mieć łożyska ślizgowe lub łożyska toczne).
Dodatkowo, do czasu ukazania się stosownej części ISO 10816:
- **Grupa maszyn** o mocy znamionowej poniżej 15 kW.
Wymagania drganiowe wobec maszyn przedstawiono w tabeli 1, tabeli 2 i na rys. 10.

4. Podstawy badań diagnostycznych

Wynik pomiaru drgań w punktach pomiarowych na powierzchni maszyny (rys. 7, rys. 8) jest odbiciem sił powstających w maszynie, a transmitowanych do tych punktów. Bieżąca wartość prędkości drgań w danym punkcie jest proporcjonalna do intensywności tych sił i do mobilności konstrukcji maszyny w tym punkcie – rys. 11 [2.7, 2.20, 2.22]. Mobilność jest odwrotnością impedancji mechanicznej w danym punkcie i jest miarą łatwości wprawienia konstrukcji maszyny w ruch [2.7, 2.20, 2.22]. Zależność pomiędzy siłą, mobilnością i prędkością drgań dla przykładowego punktu w przykładowym zespole maszynowym przedstawiono na rys. 11. Stosując skale logarytmiczne, można dodać do siebie widma siły oraz mobilności i uzyskać wypadkowe widmo prędkości drgań. Charakterystyka mobilności maszyn z reguły zmienia się w czasie nieznacznie. Można w związku z tym z dużym stopniem prawdopodobieństwa założyć, że zwiększenie intensywności drgań maszyny jest spowodowane zwiększeniem intensywności sił w tym samym stopniu [2.7, 2.20, 2.22].

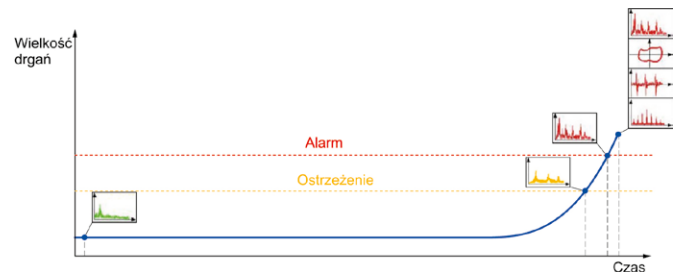


Rys. 11. Mechanizm fizyczny powstawania drgań [2.7, 2.20]

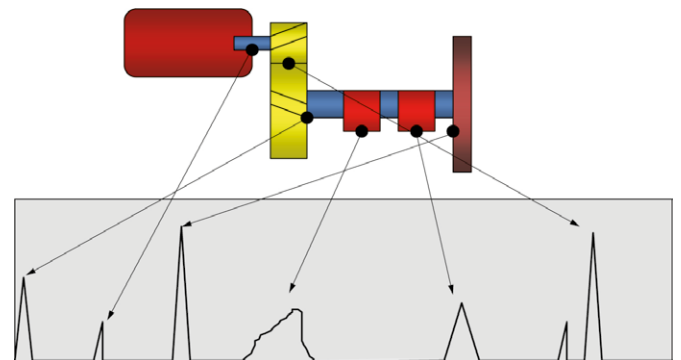
Z badań nad mobilnością maszyn [2.20, 2.22] wynika, że dla podobnych maszyn mobilność w określonym punkcie pomiarowym może różnić się nawet 1000 razy. Oznacza to, że stosowanie tych samych bezwzględnych wartości granicznych drgań do oceny stanu dynamicznego maszyn jest wątpliwe. Znacznie wiarygodniejsze jest ocenianie na podstawie względnych zmian w czasie.

W praktyce w diagnostyce drganiowej maszyn podstawą oceny ich stanu jest śledzenie trendu zmian poziomów drgań maszyn w czasie oraz analiza widmowa drgań zorientowana na znalezienie fizycznych przyczyn występowania określonych dominant w widmie drgań. Ilustrują to rys. 12–14. Od chwili pierwszego uruchomienia maszyn powinno się prowadzić systematyczne pomiary drganiowe. Pomiary należy wykonywać aparaturą przenośną lub stacjonarną. Mierzy się szerokopasmowe poziomy drgań (V_{RMS} , A_{RMS}), celem jest również wykonanie analizy częstotliwościowej sygnału. Otrzymane widma są widmami wzorcowymi dla maszyny w stanie dobrym. Staramy się ustalić przyczyny występowania poszczególnych dominant w widmie – rys. 13. Mamy do wyboru: własny eksperyment diagnostyczny na specjalnym stanowisku diagnostycznym – rozdział 10, eksperyment na badanym zespole maszynowym lub specjalistyczną literaturę [2.1–2.33].

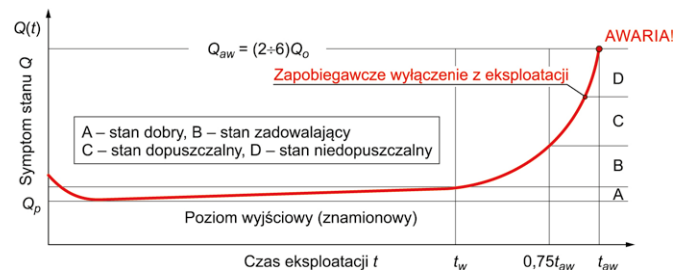
Na specjalistycznym stanowisku diagnostycznym można w miarę dowolnie eksperymentować. Wprowadzamy celowo poszczególne „wady i niesprawności”, na przykład: niewyważę, określonego rodzaju nieosiowość, określonego rodzaju luz, uszkodzenie łożyska tocznego, określone uszkodzenie łożyska ślizgowego itd. Mierzymy drgania w punktach pomiarowych (głównie na łożyskach we wszystkich kierunkach) i obserwujemy charakterystyczne zmiany w widmie drgań. Stwierdzamy, że występują charakterystyczne dominanty i obszary w widmie, które wyróżniają określony przypadek diagnostyczny – rys. 15, rys. 16, rys. 18. Przy braku specjalistycznej aparatury możemy się zdecydować na najprostszą, tzw. subiektywną, ocenę diagnostyczną przez eksperta. Przykład najprostszego sposobu diagnozowania łożyska tocznego przez jednego z autorów przedstawiono na rys. 17. Wynik specjalistycznych pomiarów diagnostycznych analizatorem drgań tego samego łożyska pokazano na rys. 18. Jest to detekcja obwiedni przyspieszenia drgań,



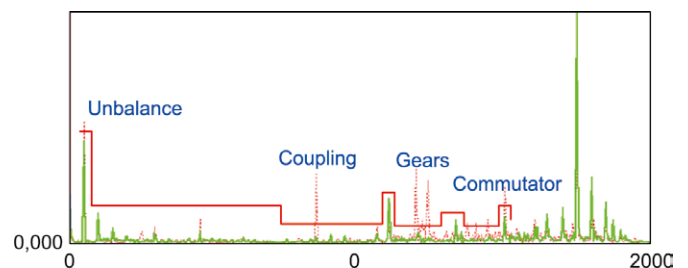
Rys. 12. Trend zmian w czasie poziomów drgań dla przykładowej maszyny [2.19–2.22]



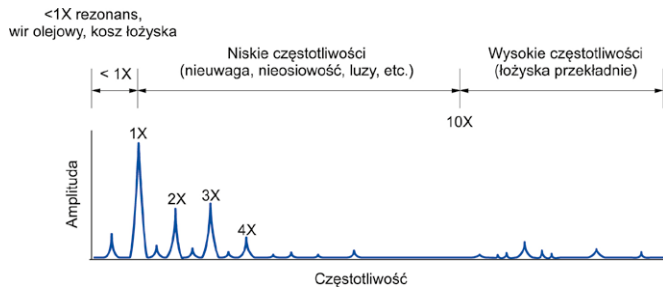
Rys. 13. Widmo drgań dla przykładowej maszyny. W uproszczony sposób wskazano fizyczne pochodzenie poszczególnych dominant w widmie [2.19–2.22]



Rys. 14. Zalecane decyzje diagnostyczne i działania zapobiegawcze [2.19–2.22]



Rys. 15. Widmo drgań dla przykładowego zespołu maszynowego składającego się z silnika i przekładni. Wskazano pochodzenie poszczególnych dominant w widmie (unbalance – niewyważa; coupling – sprzęgło; gears – koło zębate; commutator – komutator) [2.20]



Rys. 16. Widmo drgań dla przykładowego zespołu maszynowego składającego się z silnika na łożyskach tocznych, przekładni, pompy na łożyskach ślizgowych. Wskazano fizyczne pochodzenie poszczególnych dominant w widmie [2.14]

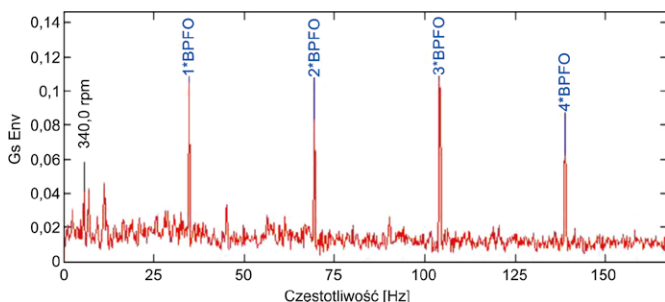


Rys. 17. Najprostszy sposób diagnozowania łożyska tocznego – osłuchanie łożyska przez jednego z autorów

a właściwie zmodyfikowana metoda detekcji obwiedni [2.23]. Opinia eksperta o łożysku była bardzo negatywna, podobnie jak wynik specjalistycznych badań analizatorem. Silnik zatrzymano, łożysko zdemontowano. Uszkodzenie łożyska było bardzo poważne – rys. 19.

W czasie eksploatacji maszyny, hipotetycznie, po względnie długim czasie następuje wzrost szerokopasmowych poziomów drgań maszyny. Zbliża się stan określany jako OSTRZEŻENIE

(ALERT). W celu właściwego przebiegu procesu diagnozowania poszczególnych rodzajów maszyn Zespół Diagnostów w danym zakładzie przemysłowym powinien w porozumieniu z producentem danej maszyny ustalić wartości graniczne drgań określane jako OSTRZEŻENIE (ALERT). OSTRZEŻENIE informuje, że osiągnięto określoną wartość poziomu drgań, że nastąpiła znaczna niekorzystna zmiana stanu dynamicznego maszyny, który wymaga podjęcia środków zaradczych.



Rys. 18. Wynik specjalistycznych pomiarów diagnostycznych łożyska z rys. 19 – detekcja obwiedni wskazuje na uszkodzenie łożyska



Rys. 19. Łożysko toczne, którego awarię wykrył ekspert oraz specjalistyczna aparatura

Jeśli pojawi się OSTRZEŻENIE, to na ogół można kontynuować pracę w okresie, w którym jest prowadzona eksploatacja maszyny lub jej badania w celu określenia przyczyn zmiany charakteru drgań i ustalenia środków zaradczych. Wykonuje się wtedy analizę sygnału drganiowego i ustala przyczyny wzrostu drgań. Następnie zwiększa się częstotliwość pomiarów, przy każdym pomiarze wykonuje się analizę diagnostyczną sygnału. Jeżeli dostępnymi prostymi zabiegami technicznymi (np. wyważanie w łożyskach własnych, osiowanie, wyczyszczenie, przesmarowanie, dokręcenie, wymiana drobnych elementów) nie można obniżyć poziomu drgań, to należy przygotować się logistycznie i technicznie do zatrzymania maszyny i wykonania remontu. Jeżeli z różnych względów nie można maszyny zatrzymać, to z konieczności eksploatujemy ją dalej. Zwykle w niedalekim czasie dochodzimy do stanu ALARM – NIEBEZPIECZEŃSTWO. ALARM jest wartością graniczną poziomu drgań, powyżej której dalsza praca maszyny może spowodować awarię, uszkodzenie. Jeśli wartość ALARMU zostanie przekroczona, to należy niezwłocznie podjąć działania w celu radykalnego zmniejszenia poziomu drgań lub wyłączyć maszynę. Dla różnych miejsc i kierunków pomiarowych można określić różne wartości graniczne, które uwzględniają różnice w obciążeniu dynamicznym zespołów maszynowych i w sztywności fundamentu i konstrukcji wsporczej [2.23, 2.34, 2.35].

● **Nastawianie wartości granicznych OSTRZEŻENIA**

Wartości graniczne OSTRZEŻENIA różnych rodzajów maszyn mogą się znacznie różnić. Wybrane wartości nastawia się zwykle względem wartości podstawowej określonej

doświadczalnie dla danego położenia lub kierunku pomiaru maszyny. Jeśli nie określono wartości podstawowej, na przykład dla nowej maszyny, to OSTRZEŻENIE należy początkowo nastawić na podstawie doświadczeń z innymi podobnymi maszynami lub w odniesieniu do uzgodnionych wartości stosowanych przy odbiorze. Po pewnym czasie można będzie określić wartość podstawową, którą należy uwzględnić przy wyznaczaniu nowej wartości alarmu. Dla różnych łożysk maszyny można stosować różne nastawy alarmów odpowiadające różnym obciążeniom dynamicznym i sztywnościom stojaków łożyskowych.

- **Nastawianie wartości granicznych NIEBEZPIECZEŃSTWA**
Wartości graniczne NIEBEZPIECZEŃSTWA dotyczą w zasadzie stanu dynamicznego maszyny. Zależą od określonych właściwości konstrukcyjnych maszyny. Dla maszyn o różnej konstrukcji mogą występować różnice i nie można podać wytycznych dotyczących bezwzględnych wartości NIEBEZPIECZEŃSTWA. Wartość NIEBEZPIECZEŃSTWA znajduje się na ogół w strefie C lub D.

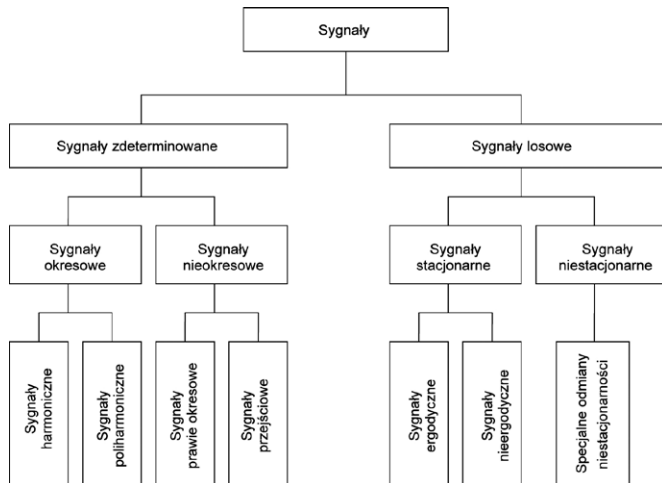
5. Analiza sygnałów diagnostycznych – zagadnienia wybrane

Przystępując do pomiarów diagnostycznych, należy określić rodzaj obiektów, które będziemy badać, a ściślej rodzaj maszyn i urządzeń, które są przedmiotem badań. Jak już wspomniano w podrozdziale 2, określenie sposobu diagnozowania eksploatacyjnego maszyn musi być poprzedzone bardzo dokładną analizą mechanizmu powstawania danego uszkodzenia, które prowadzi do awarii. Trzeba prześledzić możliwą drogę powstawania uszkodzenia i określić symptomy towarzyszące eksploatacji maszyn i urządzeń, które sygnalizują możliwość pojawienia się uszkodzenia w najbliższym czasie. Określenie wielkości, które reagują na uszkodzenie, pozwala określić rodzaj sygnałów, które będą przedmiotem badań i analiz.

6. Elementy analizy sygnałów

Sygnał to przebieg dowolnej wielkości fizycznej mogący być nośnikiem informacji. Każdy sygnał będący nośnikiem informacji o stanie technicznym maszyny jest nazywany sygnałem diagnostycznym [2.46–2.50]. W analizie wszystkich badanych sygnałów, które opisują zjawiska fizyczne, można wydzielić sygnały zdeterminowane i sygnały niezdeterminowane, czyli losowe. Analizę sygnałów zdeterminowanych można opisać ścisłymi zależnościami matematycznymi [2.46–2.50]. Z kolei sygnały niezdeterminowane występują w sposób przypadkowy, losowy i nie mogą być opisane w ścisłej zależności matematycznej. Opisu sygnałów niezdeterminowanych można dokonać jedynie za pomocą pewnych uśrednionych charakterystyk statycznych. Na rys. 20 przedstawiono ogólną klasyfikację sygnałów.

Podstawowa analiza sygnału diagnostycznego w praktyce odbywa się w dziedzinie czasu – przebieg sygnału, wykres funkcji w czasie – oraz w dziedzinie częstotliwości – widmo sygnału, wykres wartości skutecznych dla poszczególnych składowych sygnału w funkcji częstotliwości. Najczęściej analizuje się widmo wartości skutecznej danego sygnału, nazywane



Rys. 20. Ogólna klasyfikacja sygnałów [2.46]

w literaturze widmem amplitudowym (nieśluszenie) [2.46–2.50] oraz rzadziej widmo tzw. fazowe – wykres fazy dla poszczególnych składowych sygnału w funkcji częstotliwości.

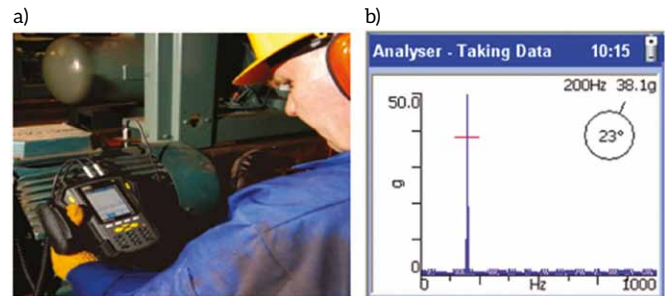
Analiza procesów dynamicznych, takich jak drgania materiałowe i drgania akustyczne maszyn, dowodzi, że tworzą je łącznie procesy zdeterminowane i procesy niezeterminowane – losowe [2.51]. W związku z tym, z punktu widzenia analizy ogólnej uważa się, że procesy wibroakustyczne mają charakter procesów losowych [2.46–2.50]. Tym samym sygnał wibroakustyczny towarzyszący pracy powyższych maszyn jest sygnałem losowym [2.46–2.50]. Wynik każdej obserwacji jest jednym z możliwych wyników, jakie mogą mieć miejsce. Implikuje to sposób analizy sygnałów wibroakustycznych maszyn [2.46–2.50]. Podobny charakter jak procesy wibroakustyczne maszyn mają sygnały wyładowań niezupełnych emitowane przez maszyny elektryczne. Są to procesy losowe. Pozostałe sygnały towarzyszące pracy maszyn elektrycznych mają w zdecydowanej większości charakter sygnałów zdeterminowanych.

6.1. Sygnały zdeterminowane

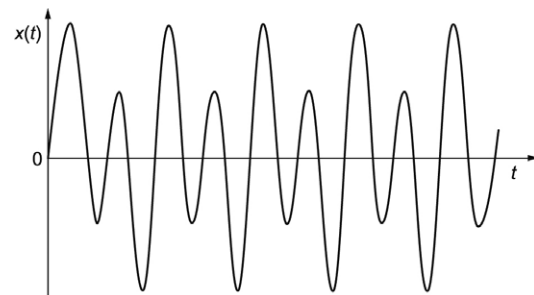
Sygnały zdeterminowane występują w praktyce w postaci zjawisk fizycznych opisujących różnego rodzaju mechanizmy, na przykład drgania niewyważonego wirnika, drgania akcelerometru usytuowanego na wzbudniku drgań pobudzanego z generatora sinusoidalnego itp. W praktyce technicznej spotyka się bardzo wiele zjawisk fizycznych, które z dużą dokładnością można opisać ścisłymi zależnościami matematycznymi. Podział sygnałów zdeterminowanych przedstawiono na rys. 20 [2.46].

Sygnały harmoniczne

Sygnały harmoniczne są to sygnały z grupy sygnałów okresowych. W analizie sygnałów stanowią jedną z najprostszych postaci funkcji czasu. Występują jako zjawiska fizyczne, na przykład wibracja źle wyważonego wirnika, drgania napięcia. Na rys. 21 przedstawiono przykład pomiaru sygnału drganiowego silnika w warunkach przemysłowych analizatorem



Rys. 21. Przykład pomiaru sygnału drganiowego silnika w warunkach przemysłowych (a) oraz widmo wartości skutecznej i fazy mierzonego sygnału dla składowej podstawowej (b)



Rys. 22. Przebieg przykładowego sygnału poliharmonicznego

oraz widmo wartości skutecznej i fazy mierzonego sygnału dla składowej podstawowej. Składowa podstawowa ma częstotliwość 200 Hz, wartość skuteczna przyspieszenia równa się 38,1 g ($38,1 \times 9,81 \text{ m/s}^2$, gdzie g – przyspieszenie ziemskie), a faza 23° . Dla sygnału harmonicznego widmo amplitudowe i fazowe ma kształt pojedynczego prążka. Przebieg sygnału sinusoidalnego opisuje następująca funkcja czasu:

$$x(t) = X(2\pi f_0 t + \vartheta) \quad (2)$$

gdzie: $x(t)$ – przebieg funkcji w czasie t ; X , $|-X|$ – amplituda, wartość szczytowa dodatnia, ujemna; $X + |-X|$ – wartość międzyszczytowa; f_0 – częstotliwość; ϑ – faza początkowa wyrażona w radianach; $\frac{1}{f_0} = T_p$ – okres.

W uproszczonych rozważaniach teoretycznych często pomija się początkową fazę występującą we wzorze (2), wówczas wzór ma postać (3) i może być przedstawiony graficznie jako funkcja czasu lub interpretacja amplitudowo-częstotliwościowa:

$$x(t) = X \sin 2\pi f_0 t \quad (3)$$

Sygnały poliharmoniczne

Na rys. 22 przedstawiono przebieg przykładowego sygnału poliharmonicznego. Sygnały poliharmoniczne należą do grupy sygnałów okresowych, które są opisane funkcją czasu (4), przy czym wartości funkcji powtarzają się w jednakowych odstępach czasu. Funkcję tę można opisać zależnością:

$$x(t) = x(t \pm nT_p), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Przedział czasu, w którym zachodzi jeden pełny cykl, jest nazywany okresem T_p . Liczba cykli w jednostce czasu to częstotliwość podstawowa f_0 . Sygnały harmoniczne są szczególnym przypadkiem sygnałów poliharmonicznych. Zjawiska fizyczne opisywane przez sygnały poliharmoniczne występują znacznie częściej niż zjawiska opisywane za pomocą prostych funkcji harmoniczných.

Sygnały poliharmoniczne można poza nielicznymi wyjątkami rozwinąć w szereg Fouriera wg wzoru [2.40]:

$$x(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n f_0 t + b_n \sin 2\pi n f_0 t) \quad (5)$$

gdzie:

$$f_0 = \frac{1}{T_p} \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T_p} \int_0^{T_p} x(t) \cos 2\pi n f_0 t dt, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T_p} \int_0^{T_p} x(t) \sin 2\pi n f_0 t dt, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

W praktyce często faz początkowych nie bierze się pod uwagę i można wtedy zastosować wzór:

$$x(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \cos(2\pi f_n t - \vartheta) \quad (9)$$

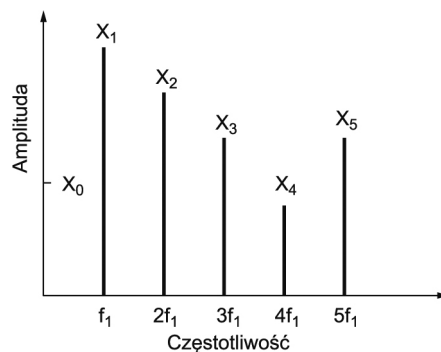
gdzie:

$$X_0 = \frac{1}{2}a_0 \quad (10)$$

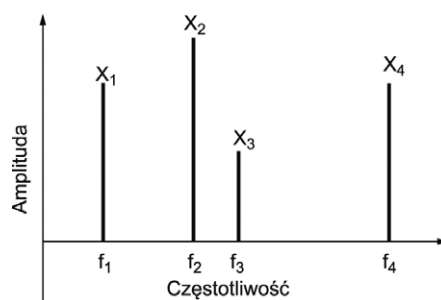
$$X_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

$$\vartheta_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

W zapisie wzoru (9) widać, że składowe poliharmoniczne składają się ze składowej stałej X_0 i nieskończonej liczby składowych sinusoidalnych, określonych jako harmoniczne o amplitudach X_n i fazach początkowych ϑ_n . Częstotliwości wszystkich harmoniczných to całkowite wielokrotności częstotliwości podstawowej f_0 . Na rys. 23 przedstawiono widmo amplitudowe sygnału poliharmonicznego. W widmie sygnałów poliharmoniczných w praktyce diagnostycznej można najczęściej zaobserwować tylko kilka harmoniczných f_n , bardzo często nie ma składowej stałej.



Rys. 23. Widmo amplitudowe sygnału poliharmonicznego [2.40]



Rys. 24. Widmo amplitudowe sygnałów prawie okresowych [2.40]

Sygnały prawie okresowe

Sygnały prawie okresowe można opisywać szeregiem fal sinusoidalnych, których częstotliwości są współmierne. Suma dwóch lub więcej fal sinusoidalnych tworzy sygnał prawie okresowy tylko wtedy, gdy stosunki wszystkich możliwych par częstotliwości wyrażają się liczbami wymiernymi [2.46].

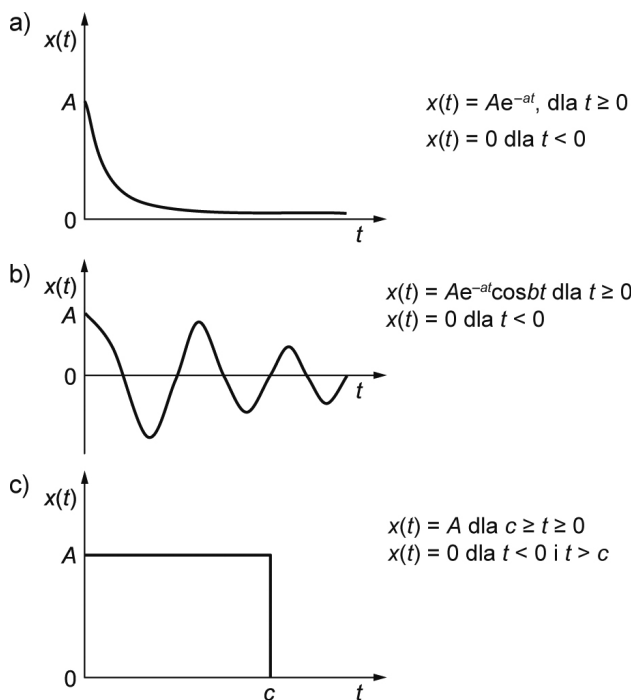
Sygnały prawie okresowe należą do grupy sygnałów nieokresowych i są opisywane matematycznie za pomocą zależności [2.46]:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin(2\pi f_n t + \vartheta_n) \quad (13)$$

Cechą sygnałów prawie okresowych jest ich widmo dyskretnie, które jest analogiczne do widma sygnału poliharmonicznego z tą różnicą, że częstotliwości prążków nie są względem siebie współmierne, przynajmniej jeden iloraz częstotliwości składowych f_n/f_m jest liczbą niewymierną. Okres podstawowy tego sygnału równa się nieskończoności.

Sygnały przejściowe

Na rysunku 25 przedstawiono trzy przykłady sygnałów przejściowych – niestabilnych. Sygnał z rys. 25 a przedstawia wykres temperatury cieczy w naczyniu względem temperatury otoczenia po wyłączeniu grzejnika. Na rys. 25 b są opisane drgania swobodne tłumione układu mechanicznego po ustaniu działania siły wymuszającej, a na rys. 25 c – naprężenia w linie, która



Rys. 25. Przebiegi przykładowych sygnałów przejściowych niestabilnych [2.46] (opis w tekście)

zrywa się w chwili c pod wpływem przyłożonego obciążenia. Do sygnałów przejściowych (niestabilnych) zalicza się wszystkie sygnały nieokresowe, które nie są sygnałami prawie okresowymi opisanymi wcześniej. Różnica występująca między sygnałami przejściowymi a sygnałami okresowymi lub prawie okresowymi jest taka, że pierwsze z nich nie mogą być przedstawiane za pomocą widma dyskretnego w przeciwieństwie do drugich.

W większości sygnałom przejściowym można przyporządkować widmo ciągłe, stosując całkę Fouriera – transformatę Fouriera, według wzoru:

$$X(f) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (14)$$

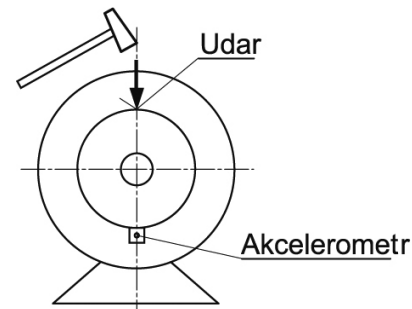
Funkcja $X(f)$ nazywa się funkcją gęstości widmowej.

W ogólnym przypadku widmo Fouriera jest funkcją zespoloną o następującej postaci biegunowej [2.46]:

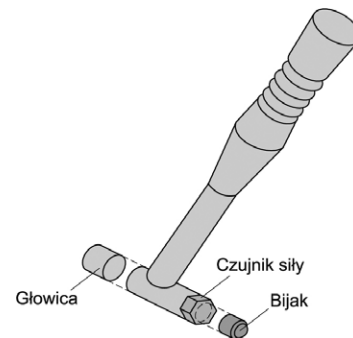
$$X(f) = |X(f)|e^{-j\theta(f)} \quad (15)$$

gdzie: $|X(f)|$ – moduł funkcji; (f) – argument funkcji $X(f)$.

Oto przykład analizy sygnału przejściowego, jaki stosuje się w praktyce diagnostycznej [2.23]. Określenie częstotliwości drgań własnych węzłów łożyskowych powinno być standardem w ocenie diagnostycznej danej maszyny. W warunkach przemysłowych można to wykonać podczas postoju maszyny elektrycznej, mierząc drgania węzła łożyskowego w punkcie pomiaru drgań przy pobudzeniu do drgań węzła łożyskowego



Rys. 26. Pobudzenie do drgań węzła łożyskowego przykładowego silnika – szkic



Rys. 27. Budowa młotka udarowego

bardzo krótkim uderzeniem, najkorzystniej specjalistycznym młotkiem (rys. 26) [2.19]. Uderzenie krótkie w czasie zapewnia wzbudzenie do drgań w szerokim zakresie częstotliwości [2.46–2.50]. Należy uderzyć młotkiem (rys. 27) w obudowę łożyska (w tarczę łożyskową) po przeciwnej stronie usytuowania akcelerometru (rys. 26). Schemat blokowy układu do pomiaru drgań własnych węzła łożyskowego przy wymuszeniu do drgań udarem mechanicznym poprzez uderzenie młotkiem w badany obiekt przedstawiono na rys. 28.

Impuls siły uderzenia można opisać połówką sinusoidy:

$$F(t) = F_m \sin \frac{\pi}{t_0} t \quad \text{dla } 0 \leq t \leq t_0 \quad (16)$$

gdzie: F_m – amplituda siły uderzenia w węzeł łożyskowy; t_0 – czas trwania uderzenia. Przedstawiona na rys. 29b odpowiedź drganiowa węzła łożyskowego silnika jest odpowiedzią dla impulsu w kształcie połówki sinusoidy o czasie trwania $t_0 = 0,2$ ms przy amplitudzie $F_m = 137,1$ N.

6.2. Sygnały losowe

Sygnały opisujące losowe zjawiska fizyczne nie mogą być opisane dokładnymi zależnościami matematycznymi, wynik każdej obserwacji sygnału jest jedyny. Wynik każdej obserwacji jest tylko jednym z wielu możliwych wyników, jakie mogą się zdarzyć [2.46]. Klasyfikację sygnałów losowych przedstawiono na rys. 20.

Pojedyncza funkcja czasu opisująca zjawisko losowe nazywa się funkcją losową lub realizacją przy skończonym przedziale czasu – sygnałem obserwowanym. Zbiór wszystkich funkcji

losowych stanowiących realizację danego zjawiska losowego nazywa się *procesem losowym* lub *procesem stochastycznym*. Sygnał uzyskany w wyniku obserwacji losowego zjawiska można zatem uważać za odcinek jednej fizycznej realizacji procesu losowego [2.46].

Stacjonarne procesy losowe

Zjawisko fizyczne mające charakter losowy można opisać w dowolnej chwili, obliczając wartości średnie w zbiorze funkcji losowych, reprezentujących dany proces [2.46]. *Wartość średnią* (pierwszy moment) procesu losowego w pewnej chwili t_1 można wyznaczyć za pomocą sumowania wartości chwilowych każdej funkcji losowej zbioru w chwili t_1 i podzielenia tej sumy przez liczbę funkcji losowych. W analogiczny sposób korelację (moment łączny zmiennej losowej) między wartościami procesu losowego w dwóch różnych chwilach (zwaną *funkcją autokorelacji*) wyznacza się metodą uśredniania w zbiorze iloczynów wartości chwilowych procesu w chwilach t_1 i $t_1 + r$. Inaczej mówiąc, wartość średnią $\mu_x(t)$ i funkcję autokorelacji $R_x((t_1, t_1 + r))$ $R_x(t_1, t_1 + t)$ procesu losowego $x(t)$ wyznacza się z zależności [2.46]:

$$\mu_x(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) \tag{17}$$

$$R_x(t_1, t_1 + t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + t) \tag{18}$$

przy czym sumując, zakłada się, że występowanie każdej funkcji losowej jest jednakowo prawdopodobne. W ogólnym przypadku, gdy wartości funkcji $x_x(t_1)$ i $R_x(t_1, t_1 + t)$ są określone równaniami (17) i (18) i zmieniają się wraz ze zmianą czasu, wówczas proces losowy $x(t)$ nazywa się *niestacjonarnym*. W szczególnym przypadku, gdy $\mu_x(t_1)$ i $R_x(t_1, t_1 + t)$ nie zależą od czasu t_1 , proces losowy $x(t)$ nazywa się *slabo stacjonarnym* i *stacjonarnym w szerszym sensie*. Średnia wartość slabo stacjonarnych procesów jest stała, a funkcja autokorelacji zależy tylko od przesunięcia τ , tj. $\mu_x(t_1) = \mu_x$ i $R_x(t_1, t_1 + t) = R_x(\tau)$ [2.46].

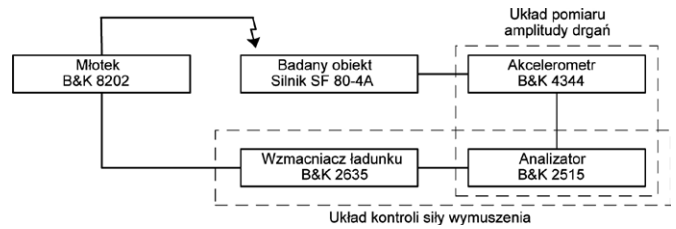
Dla procesu losowego $x(t)$ można obliczyć nieskończony zbiór momentów wyższych rzędów i momentów łącznych; ich pełny zbiór opisuje rozkład probabilistyczny procesu. Gdy wszystkie możliwe momenty oraz momenty łączne nie zależą od czasu, wówczas proces $x(t)$ nazywa się *ściśle stacjonarny* lub *stacjonarny w węższym sensie*. Dla wielu praktycznych przykładów stwierdzenie słabej stacjonarności procesu usprawiedliwia przyjęcie wniosku o ścisłej stacjonarności [2.46].

Ergodyczne procesy losowe

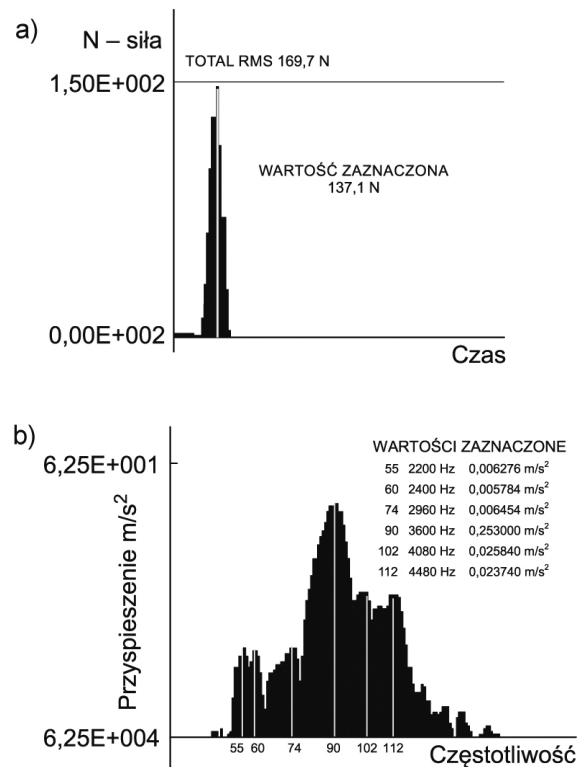
W poprzednim punkcie rozpatrzone było zagadnienie określania właściwości procesu losowego metodą uśredniania w zbiorze w poszczególnych chwilach czasu. Jednak w większości przypadków można również opisywać właściwości stacjonarnego procesu losowego metodą uśredniania w czasie poszczególnych funkcji losowych zbioru. Średnią wartość $\mu_x(k)$ i funkcję autokorelacji $R_x(\tau, k)$ k -tej funkcji losowej określa się następującymi wyrażeniami [2.46]:

$$\mu_x(k) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) dt \tag{19}$$

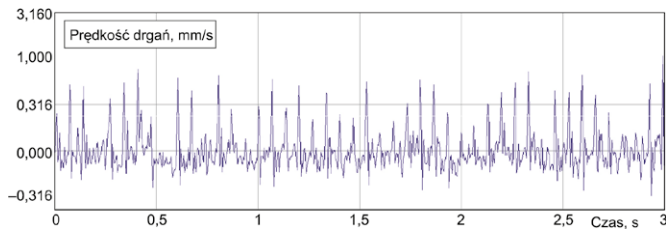
$$R_x(\tau, k) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) \cdot x_k(t + \tau) dt \tag{20}$$



Rys. 28. Schemat blokowy układu do pomiaru drgań własnych wężła łożyskowego przy wymuszeniu do drgań udarem mechanicznym poprzez uderzenie młotkiem w badany obiekt



Rys. 29. Drgania własne wężła łożyskowego przykładowego silnika: a) pobudzenie, uderzenie młotkiem, siła w dziedzinie czasu; b) odpowiedź, widmo przyspieszenia drgań



Rys. 30. Sygnał prędkości drgań dla badanego silnika

6.3. Identyfikacja sygnałów

Aby dany sygnał zmierzyć i analizować, należy najpierw go zidentyfikować, czyli przypisać do danej klasy sygnałów – rys. 20. Przykładowo niech to będzie sygnał prędkości drgań dla danego silnika elektrycznego – rys. 30. Sygnał zmierzono w układzie z rys. 21.

Pomiary te, a także obserwacje oscyloskopowe pozwoliły na wyciągnięcie wniosków ogólnych. Na wartość chwilową prędkości drgań składają się przebiegi sinusoidalne o różnych częstotliwościach i przebiegi przypadkowe. Stwierdzono również w sygnale drganiowym modulację amplitudy. Taki wynik badań jest podstawą do zakwalifikowania sygnału drganiowego silników jako sygnału losowego.

W dalszym etapie badań postawiono hipotezę o stacjonarności tych sygnałów. Zweryfikowania tej hipotezy dokonano za pomocą badań dostępnych realizacji sygnałów, korzystając z testu na stacjonarność, opartego na teorii serii [2.46]. Test przebiegał następująco:

- podzielono dany sygnał na 20 jednakowych przedziałów czasowych 10-sekundowych, uważając, że w każdym przedziale sygnał jest niezależny;

- zmierzono dla każdego przedziału wartość skuteczną ΣV_{RMS} ;
- zbadano ciąg wartości skutecznych metodą nieparametryczną, stosując test oparty na teorii serii pod względem obecności podstawowego trendu; wyznaczono serię w ciągu wartości skutecznych w odniesieniu do mediany, a ich liczbę porównano z danymi tablicowymi [2.46] przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$; z danych tablicowych wynika, że liczba serii winna się mieścić w przedziale 6–15, i tak było, co dowodzi stacjonarności sygnału drganiowego.

Po stwierdzeniu stacjonarności sygnału przyjęto założenie o ergodyczności sygnałów. Ten krok usprawiedliwia praktyka. Ogólnie określono więc sygnał drganiowy silników jako sygnał losowy stacjonarny ergodyczny. Podobnie postąpiono z sygnałem akustycznym silników. Stwierdzenie to pozwala na wyznaczenie charakterystyki całego procesu losowego – sygnału wibroakustycznego na podstawie badań jednej realizacji. Zakwalifikowanie sygnału wibroakustycznego silników jako sygnału losowego stacjonarnego ergodycznego implikuje analizę częstotliwościową tychże sygnałów, zważywszy na błędy spowodowane skończoną wartością czasu całkowania. W badaniach założono dopuszczalny unormowany błąd standardowy $\epsilon \leq 10\%$.

Bibliografia dostępna pod linkiem: nis.com.pl/bibliografia.html

Fragment pochodzi z książki:

Eksploatacja i diagnostyka maszyn elektrycznych i transformatorów,

Tadeusz Glinka, Sławomir Szymaniec,

Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019

reklama

Napędzaj z nami przemysł

www.nis.com.pl