

## WYKORZYSTANIE INFORMACJI DIAGNOSTYCZNEJ W ZORIENTOWANEJ NA BEZPIECZEŃSTWO EKSPLOATACJI MASZYN

Stanisław RADKOWSKI

Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska  
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, (022) 660 86 22, [ras@simr.pw.edu.pl](mailto:ras@simr.pw.edu.pl)

### Streszczenie

W pracy zaprezentowano możliwości wykorzystania metod utrzymania ruchu ze względu na zapewnienie wymaganego poziomu ryzyka w nowej strategii eksploatacji maszyn. We wprowadzeniu omówiono podstawy teoretyczne, a następnie przedstawiono przykłady detekcji uszkodzeń i ich wpływu na ocenę poziomu ryzyka technicznego. W końcowej części artykułu przedstawiono możliwość wykorzystania metod uczenia statystycznego w obliczaniu i dyskryminacji bezpiecznych i niebezpiecznych wartości parametru.

Słowa kluczowe: niezawodność, diagnostyka, ryzyko techniczne, analiza bispektralna.

### PRESUMING OF DIAGNOSTIC INFORMATION IN SAFETY ORIENTED USE OF MACHINERY

#### Summary

In the paper is explained the use of Risk Based Maintenance methods in new strategy of machinery using. At the beginning is presented a theoretical consideration on some application aspects. Next is presented an example of method failure detection and their impact on evaluation of technical risk. At the end of the paper are discussed the possibility of using the Statistical Learning methods in discrimination of the safety and unsafety values of parameter.

Keywords: reliability, diagnostics, technical risk, bispectral analysis.

## 1. WPROWADZENIE

Wczesne wykrycie uszkodzenia pozwala uniknąć degradacji wytworu w szczególności awarii systemów technicznych oraz związanych z tym konsekwencji w postaci strat materialnych i pozamaterialnych i stanowić podstawę do optymalnej decyzji w czasie umożliwiającym podjęcie działań korygujących bądź naprawczych. Bazą dla tego typu działań jest analiza ryzyka technicznego, w której do oszacowania ryzyka potrzebujemy zarówno informacji o prawdopodobieństwie wystąpienia zdarzenia niepożądanego jak i wiarygodnej prognozy hipotetycznych konsekwencji tego zdarzenia. W tym ujęciu kształtowanie wymaganego poziomu ryzyka technicznego jest rozumiane jako kluczowy czynnik sukcesów biznesowych i nieodłączny element działań technicznych. Tak rozumiane ryzyko techniczne będzie mieć progresywny i mierzalny wpływ na zmniejszenie liczby wypadków w pracy, chorób zawodowych, incydentów środowiskowych i związanych z wypadkami strat produkcyjnych.

Jednym z problemów, który jest przyczyną szerokiego zainteresowania analizą ryzyka wśród inżynierów i projektantów jest możliwość oceny niepewności procesu projektowania i podejmowania decyzji w warunkach niepewności

odnośnie określonego rozwiązania technicznego. Coraz częściej ocena niepewności jest uwzględniana w przypadkach projektowania złożonych systemów technicznych i antropotechnicznych, podejmowania problemów wymagających zastosowania nowych technologii, niekonwencjonalnych rozwiązań systemowych i nowych materiałów.

Jednym z podstawowych elementów, przyjmowanych w efekcie tak prowadzonych analiz rozwiązań, jest wykorzystanie układów diagnostyki monitoringu stanu technicznego systemów lub odpowiednio układów nadzoru procesu w celu wykrycia i identyfikacji fazy rozwoju uszkodzeń oraz uniemożliwienia wystąpienia niebezpiecznych zaburzeń funkcjonowania krytycznych elementów i zespołów systemu.

## 2. RYZYKO TECHNICZNE JAKO KRYTERIUM OPTYMALIZACJI INSPEKCJI DIAGNOSTYCZNYCH

Jednym z ważnych czynników kształtujących w strategii eksploatacji jest procedura wydłużania okresu użytkowania maszyn i urządzeń. Oznacza to konieczność opracowania metod diagnozowania i prognozowania dopuszczających wydłużenie resursów systemów technicznych ponad normatywny okres. Oprócz ekonomicznego

rachunku odnośnie użytkowania do wystąpienia zdarzenia niepożądanego, ostatnio coraz częściej jako wielkość kryterialną przyjmuje się bezpieczeństwo techniczne, którego miarą jest poziom ryzyka technicznego. Stąd analiza ryzyka stała się istotnym czynnikiem w podejmowaniu decyzji mających na celu kształtowanie bezpieczeństwa i minimalizację kosztów.

Zgodnie z definicją zawartą w normie [1] analiza ryzyka jest procesem, podczas którego identyfikuje się zarówno prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego jak i zakres związanych z tym szkód (konsekwencji) spowodowanych zarówno przez działanie, jak i urządzenie lub system.

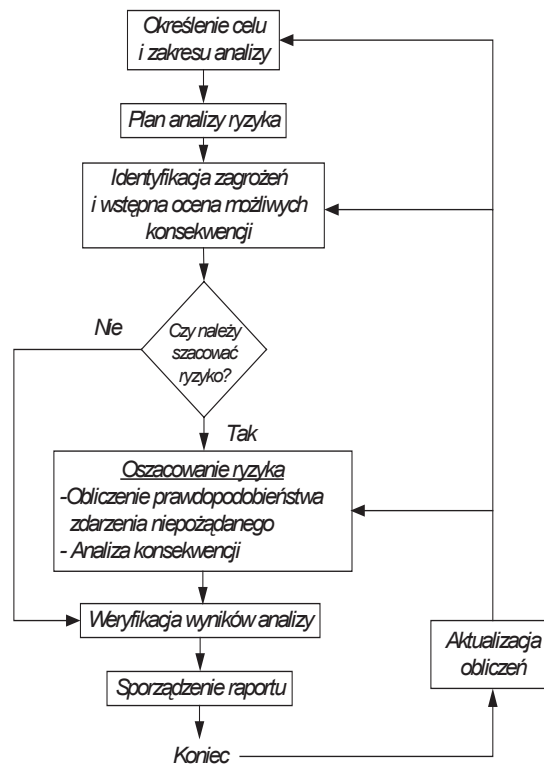
Zgodnie z zaleceniami zawartymi w normach w toku postępowania należy wyszczególnić następujące kroki:

- określenie zakresu analizy;
- identyfikację zagrożeń;
- analizę zagrożeń;
- oszacowanie ryzyka.

Wynikający z zaleceń normowych algorytm analizy ryzyka przedstawiono na rysunku 1. Pełna procedura powinna zawierać weryfikację wyników oraz sprawozdanie, które może kończyć procedurę lub być podstawą do rozpoczęcia kolejnej pętli aktualizującej obliczenia. Na wstępie zakłada się, że zespół przeprowadzający analizę ryzyka, cechuje dogłębną znajomość stosowanych metod i analizowanego systemu. Pozwala to poprawnie określać zakres analizy a szczególnie formułować cele i definiować kryteria przy równoczesnym zdefiniowaniu systemu dla określonych założeń i przyjętych ograniczeń, oraz wymagany rezultat badań umożliwiających wsparcie procesu decyzyjnego. Zaleca się, aby procedura definiowania systemu umożliwiała ogólny opis systemu z uwzględnieniem jego granic i funkcjonalnych sprzężeń, środowiska, rodzajów przepływającej energii, materiałów i informacji oraz warunków użytkowania objętych prowadzoną analizą ryzyka.

Prowadzona w następnym kroku analiza zagrożeń ma na celu określenie źródeł ryzyka, które mogą spowodować wystąpienie niepożądanego zdarzenia i prowadzić do obniżenia poziomu bezpieczeństwa. Norma zaleca określanie znanych zagrożeń z równoczesnym wykorzystaniem metod formalnych pozwalających ustalić zagrożenia wcześniej nierozpoznane, możliwe w specyficznych sytuacjach.

Zidentyfikowane zagrożenia są analizowane w trzecim kroku procedury w celu określenia wielkości ryzyka, jakie z nimi jest związane. Odwołując się do definicji ryzyka, zgodnie z którą wielkość ryzyka jest funkcją prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia niepożądanego i skutków jego wystąpienia (konsekwencji), każde zagrożenie jest analizowane pod kątem prawdopodobieństwa wypadku i związanych z nim potencjalnych



Rys. 1. Zalecany przez normę [2] algorytm analizy ryzyka

konsekwencji. Zdarzenia, które doprowadzają do wzrostu zagrożeń często mają charakter lokalny (uszkodzenie jednego z elementów), natomiast konsekwencje zdarzenia przeważnie dotyczą całego systemu i objawiają się na jego granicach, a ponadto przez sprzężenia funkcjonalne mogą zaburzać pracę innych układów. Dlatego jednym z zadań analizy zagrożeń jest ustalenie możliwych związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy określonym zagrożeniem a związanymi z nim konsekwencjami, dla dowolnego poziomu analizowanego systemu. Wynika stąd konieczność prowadzenia zarówno analizy częstości zdarzeń jak i analizy konsekwencji. W tym ostatnim przypadku musi być podjęta decyzja odnośnie rodzaju „konsekwencji”, które będą następnie analizowane. Często są to konsekwencje możliwie najgorsze lub konsekwencje, które mogą wystąpić najczęściej. Decyzja dotycząca wyboru rodzaju konsekwencji jest podejmowana w pierwszym kroku analizy ryzyka i ma wpływ na przebieg analizy zagrożeń. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na możliwość dominacji subiektywnych ocen, które jeśli nie są wsparte znajomością przedmiotu badań, mogą istotnie wypaczyć wyniki estymacji poziomu ryzyka, dokonywane na tym etapie analizy. To samo dotyczy analizy częstości i analizy niepewności. Analizując obiekt techniczny nie zawsze dysponujemy pełnym opisem zjawiska, co często prowadzi do uproszczeń i pominięć istotnych czynników procesów zużycia i degradacji. Dlatego zaleca się szczególną rozważę w doborze metody

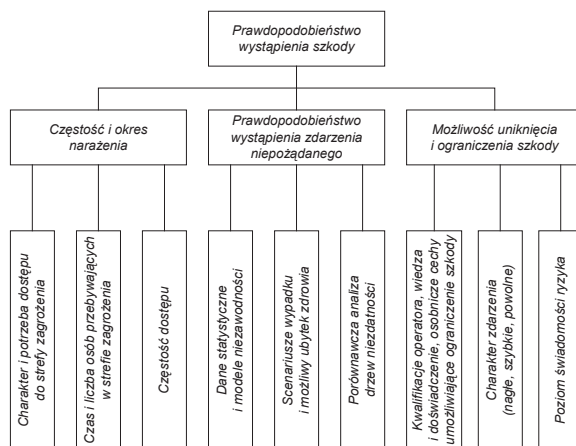
lub metod analizy, które można pogrupować w następujący sposób [3]:

- opracowania statystyczne danych pochodzących z retrospekcji;
- wykorzystanie modeli analitycznych i/lub symulacyjnych do obliczania prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń;
- wykorzystanie ocen ekspertów.

Sposób zastosowania zależy od oceny stanu rzeczy. Jest możliwe łączne zastosowanie metod, wykorzystanie jednej z nich do przeprowadzenia analizy sprawdzającej, a nawet przeprowadzenie analiz wybranymi metodami jedynie w celu dostarczenia materiału pomocniczego dla eksperta. Ostateczne wyniki identyfikacji i analizy zagrożeń pozwalają przejść do ostatniego etapu analizy ryzyka - szacowania ryzyka.

Zgodnie z istotą definicji ryzyka, w procesie jego szacowania analizowany jest szereg aspektów podstawowych elementów ryzyka. Na przykład szacując stopień ciężkości możliwej szkody, należy przede wszystkim ustalić, czy szkody będą dotyczyć również ludzi, jakiego typu mogą być urazy (odwracalne, nieodwracalne) lub czy mogą być ofiary śmiertelne. Natomiast analizując zakres szkody należy ustalić, czy odnosi się to do wieku osób, czy też należy uwzględnić jedynie operatora. Podobna procedura ustalenia ciężkości szkody powinna być zastosowana w przypadku szacowania mienia lub degradacji środowiska.

Szczególne miejsce zajmuje ocena wpływu czynnika ludzkiego. Jak wynika z rysunku 2 szkolenie, doświadczenie i wiedza, świadomość ryzyka, zapewnienie warunków pracy minimalizujących negatywny wpływ czynników zewnętrznych i wewnętrznych na niezawodność operatora mogą istotnie przyczynić się do zmniejszenia ryzyka.



Rys. 2. Czynniki kształtujące prawdopodobieństwo wystąpienia szkody

Często procedura szacowania ryzyka wymaga wykonania dodatkowych czynności takich jak ustalenie wymaganego poziomu zaufania odnośnie przedstawionych rezultatów lub analiz

porównawczych, możliwych korzyści w stosunku do obliczonego poziomu ryzyka. Zaleca się, aby metody użyte w oszacowaniu ryzyka miały charakter ilościowy, a dopiero w przypadku braku możliwości zastosowania takich metod dopuszcza się wykonanie porównawczego rankingu ryzyka, który również powinien być wynikiem zastosowania metod ilościowych.

Oszacowanie ryzyka powinno umożliwić ustalenie rankingu scenariuszy wypadków, który może mieć charakter jakościowy. Służy temu opracowanie macierzy ryzyka, opisującej poszczególne poziomy ryzyka (tabela 1).

Tabela 1. Macierz ryzyka

Kategorie prawdopodobieństw	Częstość występowania na rok	Kategorie konsekwencji			
		Katastroficzne	Ciężkie	Poważne	Lekkie
Bardzo prawdopodobne	>10-1	H	H	H	I
Prawdopodobne	10-1 ÷ 10-3	H	H	L	L
M mało prawdopodobne	10-3 ÷ 10-5	H	H	L	L
Bardzo mało prawdopodobne	10-5 ÷ 10-7	H	I	L	T
Wyjątkowe	<10-7	I	I	T	T

Przyjęte za normą [1] oznaczenia klas konsekwencji oznaczają ryzyko:

H - wysokie, I - średnie, L - małe, T - pomijalne. Należy dodać, że kategorie konsekwencji ustalone w następujący sposób:

- *katastroficzne* - wiele ofiar śmiertelnych i praktycznie całkowite zniszczenie analizowanego systemu;
- *ciężkie* - niewiele ofiar śmiertelnych i rozległe szkody materialne w analizowanym systemie;
- *poważne* - brak ofiar śmiertelnych ale są osoby z poważnymi obrażeniami, poważną chorobą zawodową oraz znaczne szkody materialne w analizowanym systemie;
- *lekkie* - osoby z lekkimi obrażeniami lub niewielkie szkody materialne w systemie.

Ten sposób postępowania umożliwia skoncentrowanie się na ilościowej ocenie scenariuszy o najwyższym poziomie ryzyka z równoczesnym odrzuceniem tych scenariuszy, w których przewidywany poziom ryzyka jest pomijalnie niski. W celu przedstawienia obliczonego ryzyka zaleca się wybór odpowiedniej charakterystyki. Do najczęściej stosowanych należy zaliczyć:

- ryzyko indywidualne, wyrażone przez przewidywaną częstość zgonów lub zachorowań;

- wykresy  $F-N$  - przedstawiające na płaszczyźnie krzywe poziomu ryzyka w funkcji częstości -  $F$  i konsekwencji -  $N$ , przy czym  $N$  przedstawia aproksymowaną liczbę osób, które mogą doznać określonych szkód lub skumulowaną wielkość materialnych czy pozamaterialnych szkód;
- możliwą, hipotetyczną statystyczną wielkość strat, którymi mogą być: liczba ofiar śmiertelnych, wartość strat materialnych lub środowiskowych.

Integralną częścią oszacowania ryzyka jest analiza niepewności zarówno odnośnie danych, jak i metod oraz metod zastosowanych w dotychczas przeprowadzonych etapach analizy ryzyka. Analiza niepewności często jest rozumiana jako analiza wrażliwości. W rzeczywistości, celem analizy wrażliwości jest badanie wpływu zmian poszczególnych parametrów modelu na zmiany odpowiedzi modelu, natomiast celem analizy niepewności jest określenie zmienności i dokładności otrzymanych wyników w zależności od przyjętych założeń odnośnie modelu i zbioru określających go parametrów. Efektem tak prowadzonej analizy powinno być znalezienie odpowiedzi na pytanie jaki wpływ na niepewność otrzymanych rezultatów szacowania ryzyka ma przyjęcie określonego modelu i jakie źródła niepewności mają największy wpływ na końcowy wynik oszacowań.

Zgodnie z propozycjami zawartymi w literaturze [4,5,6] do podstawowych zadań zaawansowanego monitoringu bezpieczeństwa zaliczono: zdefiniowanie zakresu monitoringu oraz sposobu ograniczeń i prezentacji informacji o stanach i wartościach alarmowych; wybór metod i środków umożliwiających prowadzenie monitoringu i wnioskowanie on-line, w sposób umożliwiający wczesne wykrywanie eskalujących zaburzeń i ekstrahowanie z ogólnych sygnałów o anomalii działania cech właściwych powstającym uszkodzeniom; kontrolowanie uszkodzeń i podejmowanie działań korekcyjnych przez operatora w celu minimalizacji, w szczególności uniknięcie wystąpienia zdarzeń niepożądanych a prowadzących do wystąpienia niebezpiecznych konsekwencji; opracowanie prognozy przyszłych zdarzeń na podstawie aktualnych obserwacji i odnotowanych trwałych zmian parametrów, wykrytych za pomocą analizy rezultatów i analiz pomiarów zebranych w bazie danych. Ostatni punkt jest szczególnie ważny w przypadku monitorowania stanu elementów i zespołów mechanicznych oraz pozostałych składowych ulegających procesowi degradacji i zużycia zmęczeniowego, dla których identyfikacja wczesnych faz uszkodzeń może zapobiec wystąpieniu katastroficznej fazy uszkodzenia, w tym zniszczeniu całego systemu.

Współczesne propozycje rozwiązań techniczno-organizacyjne [4] dodatkowo uwzględniają rozwój

i aplikację technologii samoutrzymania przy zachowaniu wysokiej efektywności produkcji i możliwie niskich kosztach eksploatacji.

Stąd analiza ryzyka i zmniejszenie niepewności oszacowań niezawodności stały się krytycznymi metodami w procesie podejmowania decyzji strategicznych, których celem jest zapewnienie bezpieczeństwa technicznego i minimalizacja kosztów.

Zarówno w Europie jak i w Ameryce za najbardziej efektywne metody uznano *RBI* (Risk Based Inspection) – nadzór wsparty analizą ryzyka oraz *RBM* (Risk Based Maintenance) – eksploatacja zorientowana na bezpieczeństwo. W metodach *RBI* i *RBM* odwołujących się do identycznych pojęć i sposobów opisu systemu, podsystemów, podobnej klasyfikacji, funkcjonalnych uszkodzeń i rodzajów uszkodzeń jak w metodzie *RCM* (niezawodnościowo zorientowanej eksploatacji) podejmowane są próby obliczenia ryzyka, w odróżnieniu od metody *RCM*, w której celem jest określenie stopnia (klasy) krytyczności analizowanego obiektu lub elementu.

W metodzie *RCM* dążymy do zakwalifikowania rodzaju uszkodzenia do określonej klasy, przypisując równocześnie wszystkim rodzajom uszkodzeń danej klasy to samo znaczenie i rozległość konsekwencji.

Taki sposób postępowania można przyjąć za satysfakcjonujący jedynie wówczas, gdy wartość strat jest mała i wystarczy jedynie uwzględnić prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Podstawą obliczeniową poziomu ryzyka w metodach *RBI* i *RBM* jest jego definicja, zgodnie z którą jest to oczekiwana wartość prawdopodobnej przyszłej straty określona przez iloczyn prawdopodobieństwa zdarzenia niepożądanego i możliwych konsekwencji.

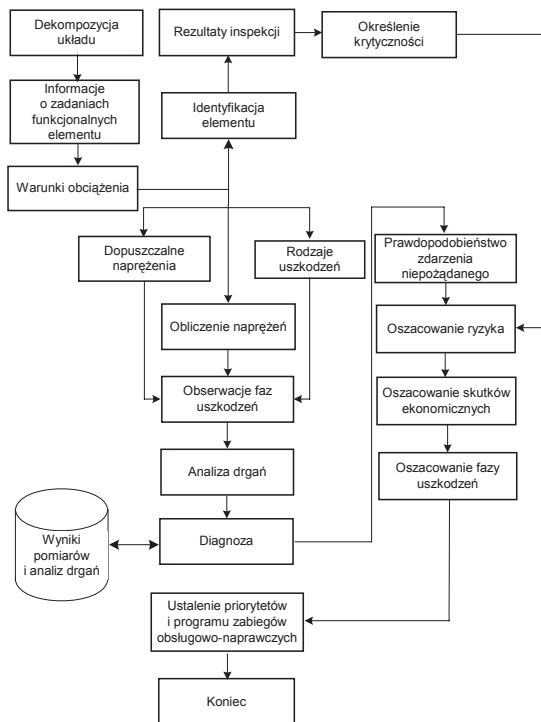
Uwzględniając rozrzut ocen czasu do wystąpienia awarii, głównym celem metod predykcji wspartych analizą ryzyka jest zmniejszenie niepewności prognozy. Jednym z istotnych sposobów rozwiązania tego problemu jest modelowanie i diagnozowanie procesów degradacyjnych i zmęczeniowych, tym samym zmniejszenie wariacji ocen residualnego życia obiektu.

Realizacja tego celu wymaga oceny strukturalnej niezawodności systemu z uwzględnieniem detekcji i analizy procesów degradacji wszystkich składowych w uprzednim i aktualnym okresie użytkowania. Na tej podstawie możliwe jest zmniejszenie niepewności odnośnie oceny okresy czasu do awarii oraz prognozy wystąpienia i rozwoju innych typów uszkodzeń.

Takie ujęcie wymaga dostępu do odpowiedniej bazy danych o możliwych uszkodzeniach składowych systemu oraz wiedzy zgromadzonej na podstawie doświadczeń zdobytych przez odpowiednio przygotowanych pracowników.

Ogólnie w omawianej metodzie wyróżnia się następujące etapy [7]:

1. Dekomponowanie analizowanego systemu na podukłady i elementy a następnie oszacowanie i ich krytyczność w najbardziej niekorzystnych scenariuszach zdarzeń.
2. Określenie czasu i zakresu kolejnej inspekcji.
3. Oszacowanie poziomu ryzyka każdego podukładu i elementu.
4. Wyznaczenie priorytetów utrzymania elementów zgodnie z ustalonym rankingiem poziomu ryzyka technicznego.



Rys. 3. Schemat procedury RBI wspartej diagnostyką wibroakustyczną

Ogólnie, ocena ryzyka powinna uwzględniać każdy rodzaj uszkodzenia, którego wystąpienia można oczekiwać, odnośnie poszczególnych elementów i podzespołów i obejmować zarówno oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia jak rozległości i wysokości strat (konsekwencji). Procedury estymacji prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego powinny uwzględniać rzeczywisty stan rozwoju uszkodzenia, ważniejsze uszkodzenia, rezultaty inspekcji i możliwe przyszłe uszkodzenia.

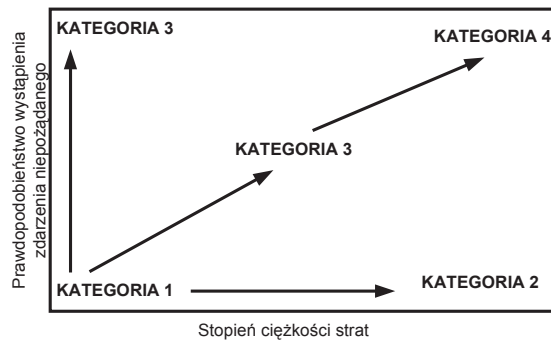
Podobnie oszacowania powinny uwzględniać zarówno aspekty bezpieczeństwa jak i zagadnienia strat ekonomicznych spowodowanych uszkodzeniami wtórnymi, w tym koszty napraw, straty spowodowane przerwą w produkcji i wypłatą rekompensat za utracone zdrowie lub życie.

Otrzymane rezultaty oszacowań ryzyka powinny być zestawione w postaci macierzy ryzyka, która w naturalny sposób pozwala określić kategorie scenariuszy i ustalić priorytety. Schemat przedstawiający możliwość zastosowania metody RBI wspartej diagnostyką wibroakustyczną zaprezentowano na rysunku 3.

Z tego punktu widzenia powinien być analizowany każdy z procesów degradacji i zmęczenia, które mogą spowodować powstanie uszkodzenia w analizowanym węzle układu. Chodzi zarówno o prawdopodobieństwo powstania uszkodzenia jak i związane z tym konsekwencje tak dla analizowanego węzła jak i całego układu.

Przedstawiając tok postępowania należy zwrócić uwagę na znaczenie i różnorodność zadań, jakie mają do spełnienia procedury odpowiednio analizy jakościowej i ilościowej. W pierwszym przypadku, odwołując się do doświadczeń ekspertów z dziedzin projektowania, utrzymania, użytkowania i prac badawczo-rozwojowych ustalane są czynniki, które mogą mieć największy wpływ na poziom bezpieczeństwa technicznego i na podstawie analizy porównawczej ustalana jest ich względna waga i pozycja w macierzy ryzyka.

W szacowaniu prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia uwzględnia się wpływ warunków eksploatacji na możliwość wystąpienia uszkodzenia, wpływ wcześniejszych uszkodzeń, jakości i zakresu inspekcji eksploatacyjnych, prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia w określonej przyszłości. Podobnie szacowane są konsekwencje, szczególnie ciężkość strat i prawdopodobieństwo wystąpienia najgorszego scenariusza. Utworzona w ten sposób macierz ryzyka stanowi podstawę do ustalenia kategorii ryzyka, priorytetu i zakresu inspekcji oraz o sposobu i kierunku zmian, jakim powinny być poddane procedury utrzymania ruchu. Przykładowy podział na kategorie przedstawiono w pracy [4].



Rys. 4. Kategorie ryzyka wg [4]

Odpowiednio każdej kategorii przypisywany jest następujący zakres działań:

**KATEGORIA 1** – (akceptowalna) nadzór eksploatacyjny nie jest niezbędny, oprócz inspekcji przewidzianych odrębnymi regulacjami.

**KATEGORIA 2** – (akceptowalny, wymagana kontrola) należy prowadzić właściwe inspekcje z zakresu utrzymania ruchu i nadzór diagnostyczny.

**KATEGORIA 3** – (niepożądana) poziom ryzyka powinien być obniżony przy następnej inspekcji; rozważyć: poprawę procedur inspekcyjnych, metod zarządzania operacyjnego, wprowadzenie monitoringu,

środków i metod redukcji możliwości powstawania i rozwoju uszkodzeń.

KATEGORIA 4 – (nieakceptowalna) poziom ryzyka natychmiast obniżyć do KATEGORIA 2 lub KATEGORIA 1.

Zauważmy, że generalnie oszacowanie ryzyka wykonane zostało na podstawie jakościowych ocen ryzyka (bardzo małe, małe, średnie i wysokie prawdopodobieństwo oraz bardzo małe, średnie, poważne i krytyczne straty) bez nadawania rozważanym odpowiednich wartości.

To zadanie realizowane jest w ramach oceny ilościowej, która w inżynierii bezpieczeństwa dokonywana jest na podstawie rozwiązania równania bezpieczeństwa określającego minimalne prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia [3]:

$$Z = R - S \quad (1)$$

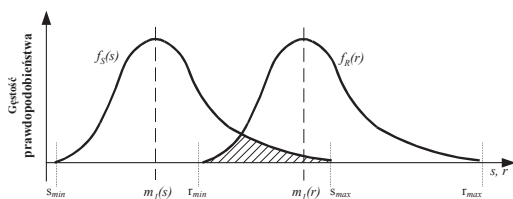
gdzie:

$R$  - obciążalność, np. wytrzymałość,

$S$  - obciążenie, np. naprężenia.

Zakładając, że zarówno obciążenie  $S$ , jak i obciążalność  $R$  są zmiennymi losowymi można określić ich funkcje gęstości rozkładu prawdopodobieństwa  $f_R(x)$ ,  $f_S(x)$ .

Sposób wyznaczenia funkcji  $Z$  schematycznie przedstawiono na rysunku 5, gdzie obszar zakresowany oznacza możliwość wystąpienia  $Z < 0$ , interpretowanego jako prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego.



Rys. 5. Przykładowe funkcje gęstości prawdopodobieństwa obciążeń i obciążalności

Zauważmy, że prawdopodobieństwo to zależy od następujących parametrów:

- względnego usytuowania obu krzywych, - parametrami, które mogą reprezentować to położenie są wartości oczekiwane i odchylenia standardowe naprężeń i wytrzymałości;
- wpływu skośności i spłaszczenia w funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla rozkładów niegausowskich

Jednym z elementów procedury zmniejszenia poziomu ryzyka jest minimalizacja prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia. Wyznaczenie prawdopodobieństwa uszkodzenia  $P_f$  można przedstawić w różny sposób, na przykład [8]:

$$P_f = \int_{-\infty}^{s_{\max} + \infty} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f_{R,S}(r, s) dr ds \quad (2)$$

gdzie:

$r$ ,  $s$  - odpowiednio zmienne.

Przy założeniu, że  $f_S$  i  $f_R$  są niezależne oraz uwzględnieniu technicznych ograniczeń odnośnie minimalnych obciążeń i maksymalnej obciążalności zależność (2) zapiszemy:

$$P_f = \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f_R(r) f_S(s) dr ds \quad (3)$$

Stąd zdarzenie odpowiadające uszkodzeniu wystąpi wówczas, gdy:

$$Z = (R, S) \Rightarrow P_f = P(Z(R, S)) \leq 0 \quad (4)$$

Przy założeniu, że zmienne opisujące obciążalność i obciążenie mają rozkłady normalne, rozważmy możliwość wyznaczenia krzywej rozgraniczającej obszar zagrożony uszkodzeniem od pozostałego:

$$Z = 0 \quad (5)$$

W ogólności granicę rozdzielającą obszar rozwiązań bezpiecznych od obszaru prawdopodobnych uszkodzeń rozwiązuje się aproksymując powszechnie odpowiedzi [9]

$$\hat{z}(x) = Q_0 + \sum_{i=1}^d Q_i + \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^d Q_{ij} x_i x_j \quad (6)$$

Zagadnienie wyznaczenia wartości zapewniających właściwe dopasowanie do rzeczywistej powierzchni odpowiedzi stało się impulsem do rozwoju wielu nowych metod uczenia statystycznego. Jako przykład sieci neuronowej stosowanej w tego typu zagadnieniach należy wskazać perceptron wielowarstwowy, który implementuje funkcję:

$$\hat{z}(x) = \hat{h} \left( \sum_{k=0}^m w_k h \left( \sum_{i=1}^d w_{ki} x_i \right) \right) \quad (7)$$

gdzie:  $h(t)$  najczęściej ma postać funkcji

$$\text{sigmoidalnej } h(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}}.$$

Z drugiej strony wykorzystując metodę wektorów podpierających (SVM – Support Vector Machine) podejmowane są próby separacji obszarów bezpiecznego i niebezpiecznego. Odpowiedni model ma postać:

$$\hat{z}(x) = \sum_{i=1}^m w_i K(x, x_i) - b \quad (8)$$

gdzie:

$K(x, x_i)$  jest jądrem funkcji

$b$  – parametr.

W literaturze wskazuje się wiele różnych metod wyznaczenia funkcji  $K(x, x_i)$ . Dla przybliżeń tego problemu rozważamy funkcję w postaci wielomianu  $K(x, y) = \langle x, y \rangle^2$ .

Przy założeniu, że rozważane wielkości  $x$ ,  $y$  są wektorami o wymiarze  $d=2$  otrzymamy:

$$K(x, y) = x_1^2 y_1^2 + x_2^2 y_2^2 + 2x_1 y_1 x_2 y_2 \quad (9)$$

W praktyce unikając wielu trudności obliczeniowych, wielomianowa funkcja  $K(x, y)$  stosowana jest w postaci

$$K(x, y) = (\langle x, y \rangle + Q)^p \quad (10)$$

Rozwiązanie tej funkcji dla  $p=2$  będzie miało postać:

$$K(x, y) = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^d x_i x_j y_i y_j + 2Q \sum_{i=1}^d x_i y_i + Q^2 \quad (11)$$

Dodatkowym problemem, który w tym zadaniu powinien być uwzględniony jest wpływ procesów degradacji na szczegółowe zadania klasyfikacji, ustalania zależności regresyjnych i ewolucji rozkładów prawdopodobieństwa.

### 3. EWOLUCJA ROZKŁADÓW PRAWDOPODOBIENSTWA OBCIĄŻEŃ I OBCIĄŻALNOŚCI

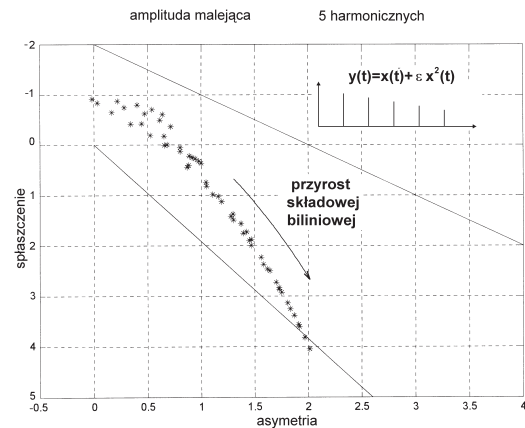
W dotychczas rozważanych modelach określano prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia przy założeniu niezmienności badanych rozkładów w czasie eksploatacji. W rzeczywistości, w wyniku zachodzących procesów zużycia i związanych z tym zmian warunków współpracy elementów i węzłów kinematycznych można zaobserwować ewolucję rozkładów prawdopodobieństwa zarówno w sensie ilościowym (zmiana parametrów funkcji gęstości prawdopodobieństwa) jak i jakościowym (zmiana funkcji opisującej rozkład). Dodatkowo, procesy degradacyjne towarzyszące wykonaniu zadań funkcjonalnych mogą wywołać podobną zmienność rozkładów prawdopodobieństwa opisującego obciążalność. W tym przypadku można oczekiwać, że położenie linii rozgraniczającej oraz prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia będą zależały od czasu eksploatacji. W ostatnich latach opracowano szereg metod badania i analizy funkcji niezawodności zależnej od czasu [3].

Postać gęstości prawdopodobieństwa uwzględniająca wystąpienie zaburzeń związanych z występowaniem dodatkowych sprzężeń nieliniowych przedstawiono na rysunku 6, wiąże się to z koniecznością analizy momentów trzeciego i czwartego rzędu, a w dziedzinie częstotliwości odpowiednio bispektrum i trispektrum [11].

Cenność informacji zawartej w bispektrum polega na tym, że pozwala ono badać statystyczne zależności pomiędzy poszczególnymi składowymi widma oraz wykrywać składowe powstałe w wyniku występowania efektów nieliniowych i dodatkowych sprzężeń zwrotnych związanych

z powstającymi uszkodzeniami. Wynika to z faktu, że w odróżnieniu od widma mocy, które jest dodatnie rzeczywiste, funkcja bispektrum jest wielkością zespoloną, zachowującą informację zarówno

o rozkładzie mocy względem poszczególnych składowych widma jak i o zmianach fazy.



Rys. 6. Przykład zmian wartości wyższych momentów wywołanych nieliniowym zaburzeniem

Ogólnie można powiedzieć, że bispektrum może być interpretowane jako miara „ilości” sprzężenia pomiędzy składowymi częstotliwościowymi, wyznaczona na dwuwymiarowej płaszczyźnie o odpowiednich współrzędnych częstotliwościowych.

Przy założeniu, że analizowany przez nas sygnał, został poddany dyskretyzacji, odpowiednie podstawowe estymatory dla wyrazu liniowego i biliniowego przyjmą postać:

$$C_{2x}(k) = E\{x^*(n)x(n+k)\} \quad (13)$$

$$C_{3x}(k, l) = E\{x^*(n)x(n+k)x(n+l)\} \quad (14)$$

Z kolei zależności określające spektrum i bispektrum otrzymamy w postaci:

$$S_{2r}(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{2x}(k) e^{-j2\pi f k} \quad (15)$$

$$S_{3r}(f_1, f_2) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} C_{3x}(k, l) e^{-j2\pi f_1 k} e^{-j2\pi f_2 l} \quad (16)$$

Zauważmy, że bispektrum pozwala określić zależności pomiędzy istotnymi częstotliwościami badanego układu dynamicznego. Duża wartość bispektrum dla określonych para częstotliwości i kombinacjami ich sum lub różnic, wskazuje na istnienie sprzężenia częstotliwościowego pomiędzy nimi. Może to oznaczać, że rozważane częstotliwości, będące składowymi sum mają wspólny generator, co w obecności nieliniowości wyższych rzędów może prowadzić do syntetyzowania wspomnianych nowych składowych częstotliwościowych.

Jednym z powodów występowania efektów nieliniowych jest kwadratowe sprzężenie fazy (Quadratic Phase Coupling – QPC). QPC może być w ten sposób rozpatrywane jako wskaźnik

zależności pomiędzy dwoma składowymi harmonicznymi procesu nieliniowego. Własność ta może wykryć pewien związek fazowy pomiędzy sumą lub różnicą dwóch częstotliwości (Swami i inni 1995). Jest to różnica pomiędzy analizą bispektralną a typowym podejściem do widma mocy, przy pomocy którego nie jest możliwe wykrycie istnienia QPC.

Inną drogą do poznania nieliniowej struktury częstotliwościowej sygnału wibroakustycznego jest intermodulacja jako podstawowy mechanizm określający strukturę charakterystycznych składowych drgań.

#### 4. PODSUMOWANIE

W każdym ujęciu w centrum uwagi staje problem wydobycia odpowiedniej informacji diagnostycznej. Rezultaty badań potwierdzają fakt, że w wyniku zachodzących procesów eksploatacyjnego zużycia następuje jakościowa zmiana warunków współpracy poszczególnych elementów i węzłów kinematycznych, czego efektem jest ewolucja rozkładów prawdopodobieństwa obciążeń. Spostrzeżenie to dotyczy zarówno zmian wartości parametrów funkcji gęstości jak i klasy samego rozkładu. Podobnie zachodzące procesy degradacji mogą wywoływać zmiany w rozkładach prawdopodobieństwa dopuszczalnej obciążalności.

Oznacza to, możemy zastosować iteracyjne procedury zwiększania dokładności prognozy przez uaktualnianie funkcji gęstości prawdopodobieństwa dopuszczalnych wartości obciążeń i obciążalności. Szczegółowy sposób postępowania zależy od zakresu przyjętej diagnozy jak i typu obserwowanego uszkodzenia. Ogólnie można zauważyć, że największe możliwości poprawnego rozwiązania tak sformułowanego zadania wiążą się z faktem dotarcia do takiej informacji diagnostycznej, dla której daje się zbudować model diagnostyczny odwołujący się w swej istocie do procesu powstawania i rozwoju uszkodzenia.

W tak zarysowanym zadaniu istotnym problemem staje się wybór wielkości progowych, określających wybór przedziałów i klas zmienności, odpowiednio dla parametrów rozkładu i funkcji gęstości prawdopodobieństwa.

Podsumowując można zwrócić uwagę na fakt, że za główne przyczyny występowania niepewności ocen i analiz można uznać:

- procedury wyznaczania wartości parametrów, przykładowo mała liczebność próbek może wpływać na szerokość przedziałów ufności, ekstrapolacja danych z jednego obiektu na drugi, zaburzenia w obserwacji danych;
- procedury modelowania, które skierowane na ustalenie istotnych zmiennych przeważnie w niedostateczny sposób uwzględniają ich wzajemne szczegółowe związki;

- natura zjawiska; stan wiedzy nie zawsze pozwala uwzględnić wszystkie istotne czynniki, w szczególności przebieg procesów uszkodzeń.

„Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy”

Autor dziękuje mgr inż. Robertowi Gumińskiemu za pomoc w ostatecznej redakcji publikacji.

#### LITERATURA

1. PN - IEC 60300-3-9, *Analiza ryzyka w systemach technicznych*, 1999.
2. PN - EN 1050, 1999, *Zasady oceny ryzyka*.
3. Radkowski S., *Podstawy Bezpiecznej Techniki*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
4. Yatomi M. At all: *Application of risk Based Maintenance on Materiale Handling Systems*; IHI Engineering Review vol. 37, No 2 str. 52÷58, (2004).
5. Troy V. Ngugen, Harold W. Nelson: *A system Approach to Machinery Condition Monitoring and Diagnostic*.
6. Drozyner P., Veith E., *Risk Based Inspection Methodology Overview*; Diagnostyka Vol. 27, str. 82÷88.
7. Papadopoulos Y., McDermid J., *Automated Safety Monitoring: A Review and Classification of Methods*, International Journal of COMADEM No. 4 str. 14÷32, 2001.
8. Cruse T. A., *Reliability Based Mechanical Design*, Marcel Dekker Inc., New York 1997.
9. Hurtado J. E., *Structural Reliability*, Springer-Verlag, Berlin 2004.
10. Radkowski S.: *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2002.
11. Dybała J., Mączak J., Radkowski S., *Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego w analizie ryzyka technicznego*, ITE, Radom 2006 (w przygotowaniu do druku).



**Stanisław RADKOWSKI** – profesor Instytutu Podstaw Budowy Maszyn PW, kierownik zespołu Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka. Prezes Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.

W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką wibroakustyczną i analizą ryzyka technicznego.