

ELEMENTY MECHANIKI STOSOWANEJ W INŻYNIERII DIAGNOSTYKI DEGRADACJI SYSTEMÓW TECHNICZNYCH

Mariusz ŻÓLTOWSKI, Branislav HADZIMA, Bogdan ŻÓLTOWSKI

Streszczenie: W inżynierii mechanicznej rozwijane metody mechaniki stosowanej wykorzystywane są w wielu zagadnieniach technicznych obejmujących nadzorowanie zmian stanu maszyn, zagrożenie bezpieczeństwa i postępującą destrukcję w całym cyklu życia. Modelowanie, identyfikacja modeli, drgania w technice – to tematyka publikacji w ujęciu wybranych przykładów zastosowań praktycznych, przy wykorzystaniu oryginalnych narzędzi badawczych.

Słowa kluczowe: modelowanie, identyfikacja, stan, uszkodzenia, bezpieczeństwo.

1. Wprowadzenie

Konfrontacja zmienionych wymagań i nowych możliwości badawczych (techniki informacyjne) wygenerowała nowe klasy problemów badawczych, zintensyfikowała inne, a równocześnie wiele kierunków prac badawczych stało się nieistotne bez możliwości aplikacyjnych, poprzez:

- dostęp do zaawansowanych technologii światowych;
- możliwości zakupu najnowszej generacji urządzeń badawczych;
- możliwości najnowszych aplikacji informatycznych w obszarze hardware'u i software'u;
- dostęp do baz danych i szerokie możliwości powiązań kooperacyjnych.

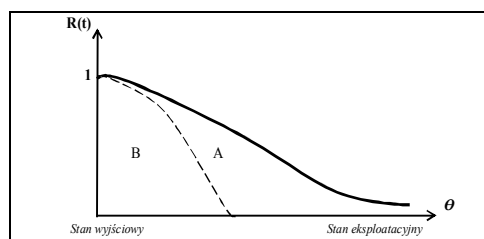
Procesy destrukcji systemów technicznych wpływające na bezpieczeństwo ruchu wymuszają potrzebę nadzorowania zmian ich stanu technicznego [1,2,3,4,10,12], przy wykorzystaniu dostępnych użytkowo wielu metod mechaniki stosowanej. Metody i środki opisu i badania stanu dynamicznego maszyn są narzędziami nadzorowania stanu systemów technicznych, co jest podstawą podejmowanych decyzji eksploatacyjnych [6,7,8,15].

To wszystko diametralnie zmienia poglądy i dokonania w obszarze wykrywania i nadzorowania zmian stanu obiektów, zaczynając od opisu stanu materii, identyfikacji stanu, wykorzystania drgań w nadzorowaniu stanu, szczególnie w obszarze kształtowania bezpieczeństwa zadaniowego obiektów technicznych. Daje to możliwość nadzorowania zmian i lokalizacji uszkodzeń i minimalizacji skutków uszkodzeń [16,17].

Przedstawiona problematyka znajduje swoje uzasadnienie w drganiowym opisie procesów destrukcji maszyn, towarzyszących każdej maszynie tuż po jej wytworzeniu, aż do likwidacji. Drganiowe deskryptory stanu dynamicznego umożliwiają tworzenie nowoczesnych strategii eksploatacji w zindywidualizowanych informatycznie systemach przedsiębiorstwa, zapewniając nowoczesne utrzymanie maszyn w ruchu. Daje to podstawy do racjonalnej eksploatacji maszyn w nowo tworzonych systemach eksploatacji [11].

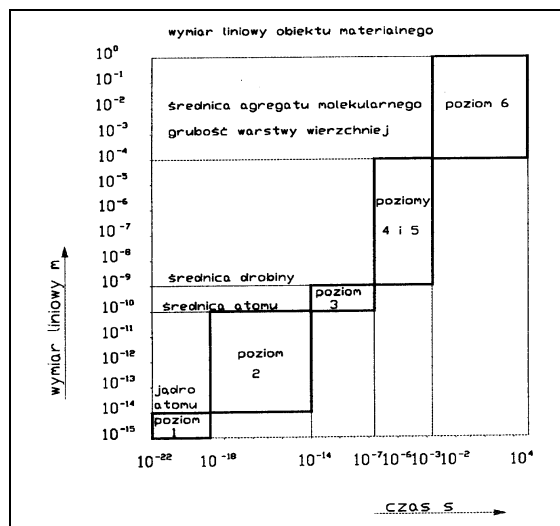
2. Degradacja stanu maszyn i konstrukcji

Stan maszyn - jako podstawowych środków produkcji i usług ulega procesowi ewolucyjnej destrukcji - rys.1 - wskutek zmęczenia materiałów, nadmiernych obciążeń, zużycia wskutek tarcia (luzy) itp. **Potencjał użytkowy** maszyny może być definiowany jako zasób materiałowo - energetyczny zapewniający jej zdolność do użytkowania. Ten potencjał maleje w czasie działania maszyny, a jednocześnie rośnie jej potencjał obsługowy. Potencjał obsługowy jest interpretowany, jako zasób materiałowo - energetyczny niezbędny do odnowienia potencjału użytkowego maszyny. Oba te rodzaje potencjału tworzą **potencjał eksploatacyjny**, który charakteryzuje właściwości maszyny do zastosowania (wykorzystania) zgodnie z potrzebami, do których została ona przysposobiona w fazach projektowania, konstruowania i wytwarzania [11,13,14].



Rys.1. Krzywe degradacji stanu maszyn i konstrukcji

Przemiany i mechanizmy zużywania się materii, prezentowane w ujęciu energetycznym zgodnie z regułami termodynamiki, opisywane są w różnych przedziałach wymiaru liniowego i czasu. Układ hierarchiczny struktury materii, wyróżniający sześć poziomów własności materii opisywany jest wymiarem liniowym i czasem trwania - rys.2.



Rys.2. Zakresy wymiaru liniowego i czasu odpowiadające różnym strukturom materii

Modelowe przedstawianie procesów starzenia i zużywania się winno uwzględniać:

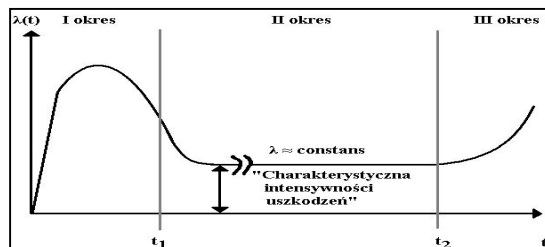
- możliwości matematycznego opisu różnych przemian wobec faktu występowania poziomów hierarchicznych;
- sposób rozstrzygnięć o przejściach pomiędzy poziomami, szczególnie przejście na poziom makroskopowy – umożliwiający opis realnych węzłów materialnych.

Opis matematyczny wszelkich przemian fizycznych zależy od poziomu hierarchicznego struktury materii. Na każdym z poziomów organizacji materii istnieją odrębne własności każdego poziomu strukturalnego, a pozorne granice między nimi określają zawsze nową jakość w stosunku do poziomu niższego.

Podczas działania maszyny następuje **zmniejszanie potencjału użytkowego**, a jednocześnie narasta jej potencjał obsługowy. Odnowa potencjału użytkowego jest celem działania jej użytkownika, natomiast obsługiwanie - sposobem odtworzenia potencjału użytkowego. Potencjał eksploatacyjny można określić bardziej szczegółowo, jako:

- **potencjał użytkowy**: zasób godzin poprawnej pracy maszyny, moc największa możliwa do uzyskania, jego maksymalna prędkość obrotowa, zapas części (elementów podzespołów) wymiennych, maksymalny zasób zakumulowanej energii, maksymalny zasób czynników energetycznych, jakimi trzeba zasilać maszynę, itp.;
- **potencjał obsługowy**: zasób pracy niezbędny do odnowienia stanu maszyny, poziom uzupełnienia zapasu części wymiennych, poziom uzupełnienia zasobu energii, poziomy uzupełnień zapasów czynników energetycznych, itp.

Własności początkowe maszyn jak i eksploatacyjne czynniki wymuszające mają charakter losowy, tak i intensywności uszkodzeń maszyn ($\lambda(t)$) - jako miara degradacji stanu, jest losowa. Obserwując większą zbiorowość maszyn zaobserwować można pewne prawidłowości w przebiegu funkcji intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ – rys.3.



Rys.3. Typowy przebieg intensywności uszkodzeń maszyn

Przebieg zmian intensywności uszkodzeń zależy w dużym stopniu od rodzaju i intensywności oddziaływania eksploatacyjnych czynników wymuszających, a ta zależy od sposobu wykorzystania tych obiektów oraz od tego jak są realizowane procesy eksploatacji. Najsilniej na $\lambda(t)$ oddziałują procesy użytkowania, a także wpływ jakości obsługi maszyn [11,12].

Najwięcej wymagań wiąże się ze sferą eksploatacji wyrobów. Jest to zrozumiałe, gdy za rację bytu obiektu uznamy jego użytkowanie. W tym zakresie można wyróżnić :

- wymagania trwałościowo - niezawodnościowe,
- wymagania związane z efektywnością stosowania wyrobów (sprawność, wydajność, niskie koszty eksploatacji),
- wymagania związane bezpośrednio z użytkowaniem (uniwersalność, łatwość obsługiwań, podatność odnowy, automatyzacja),
- wymagania związane z oddziaływaniem na otoczenie (cichobieżność,

bezpieczeństwo, ergonomia, zanieczyszczenie środowiska).

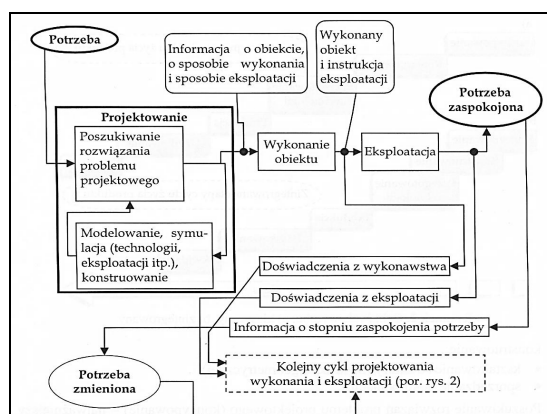
Powstanie narzędzi ułatwiających komunikację i pozwalających na natychmiastowy dostęp do informacji ma ogromny wpływ na społeczeństwo XXI wieku. Informacja stała się dobrem niematerialnym, ale niezwykle cennym dla gospodarki, kultury i polityki. Wiedza stała się coraz bardziej powszechna, jak również jest przekazywana w coraz przyjaźniejszy sposób. Nie uczestniczenie w wyścigu technologicznym powoduje zejście na boczny tor życia.

Wirtualna rzeczywistość wygląda realnie, jest odczuwane realnie, działa lub zachowuje się realistycznie, aczkolwiek w rzeczywistości realne nie jest i polega na multimedialnym kreowaniu komputerowej wizji przedmiotów, przestrzeni i zdarzeń nieistniejących w naturze. W tym świecie funkcjonują: techniki informacyjne, chmura obliczeniowa, serwery wirtualne i techniki CAD – wspomagające modelowanie, opis i badania jakości funkcjonowania maszyn i obiektów [2,7,12].

Chmura obliczeniowa jest usługą polegającą na zdalnym udostępnieniu mocy obliczeniowej urządzeń IT oferowaną przez zewnętrzne podmioty, dostępną na żądanie w dowolnej chwili oraz skalująca się w miarę zapotrzebowania. Chmura obliczeniowa zapewnia zazwyczaj znacznie większy poziom bezpieczeństwa i dostępności danych w stosunku do wykorzystania własnych zasobów, ponieważ profesjonalne firmy świadczące takie usługi inwestują znaczne środki na odpowiednie zaprojektowanie i wybudowanie bezpiecznego i niezawodnego centrum danych.

Serwery wirtualne. Rozwiązanie to polega na logicznym wydzieleniu pamięci, procesora i dysku z fizycznej infrastruktury. Klient ma dostęp do niemal nieograniczonej mocy obliczeniowej, nieograniczonej powierzchni dyskowej i zaawansowanej, regularnie aktualizowanej platformy programistycznej.

Techniki CAD umożliwiają bardzo wydajne skrócenie cyklu życia wyrobu przez integrację etapów konceptowania, konstruowania i przygotowania technologii. Duże systemy oprogramowania inżynierskiego CAD/CAM/CAE, przeznaczone do pełnej komputeryzacji procesu opracowywania i produkowania wyrobu, umożliwiają dodatkowo integrację projektowania, przygotowania produkcji oraz produkcji. Dotychczasowe czasochłonne czynności sekwencyjne, takie jak przedstawione na rys.4: konceptowanie, konstruowanie i przygotowanie technologii z zadań krytycznych, stały się zadaniami, które można ze sobą częściowo zintegrować, a dodatkowo czas realizacji każdego z tych zadań uległ wydatnemu skróceniu [14]



Rys.4. Proces projektowania a proces zaspokajania potrzeb [2]

Wytyczne do projektowania, konstrukcji i wytwarzania maszyn i złożonych konstrukcji budowlanych płyną głównie z planowanego sposobu realizacji zadania, które ma ona wykonywać w zaprojektowanym cyklu życia (systemie produkcyjnym). Z drugiej strony należy dostosować konstrukcję do struktury systemu produkcyjnego i sposobu eksploatacji, który wynika z wybranego sposobu realizacji zadania [5,13,15,17,20]. Metody i techniki mechaniki stosowanej szeroko wspomagają różne działania badawcze i optymalizacyjne – szczególnie zagadnienia identyfikacji i dynamiki - na każdym etapie działania.

Do badań dynamiki zmian stanu i degradacji obiektów stosuje się następujące metody:

- *Metoda elementów skończonych (MES)*. Cechą charakterystyczną MES jest modelowanie i obliczanie własności dynamicznych obiektu oraz możliwość szybkiego wprowadzania zmian w konstrukcji obudowy i oceny ich wpływu na drgania.
- *Metoda sztywnych elementów skończonych (MSES)*. Metoda ta w porównaniu z MES jest metodą uproszczoną, ale znacznie szybszą i mniej pracochłonną. Może ona być stosowana przy użyciu małych komputerów, dając konstruktorowi pewien pogląd na zachodzące zależności. Główną jej zaletą jest łatwość interpretacji i obliczeń, gdyż za pomocą metody SES można w sposób prosty badać jakościowo wpływ niektórych zabiegów konstrukcyjnych na poziom generowanego hałasu. Opracowany program umożliwia porównanie poziomu hałasu wytwarzanego przez płyty gładkie lub uźebrowane o żądanej masie i sztywności. Płytę modeluje się, stosując sztywne elementy skończone (SES) i elementy sprężysto - tłumiące (EST).
- *Analiza modalna*. Celem analizy modalnej jest pobudzenie obiektu do drgań za pomocą wibratora lub młotka i pomiar odpowiedzi (przyspieszenia drgań) w wielu punktach badanego obiektu, służącej ustaleniu struktury modelu oraz wyznaczeniu jego parametrów. Parametry modelu modalnego: *częstości własne, tłumienie oraz wektory własne* (zwane postaciami drgań) określane są podczas identyfikacji w eksperymencie. Cechą charakterystyczną analizy modalnej jest animacja postaci drgań obiektu, umożliwiającą optymalizację dynamiki funkcjonowania.
- *Interferometria laserowa (VPI)*. Metoda ta umożliwia szybkie seryjne sprawdzanie dynamiki maszyn, poprzez uzyskanie kolorowego - trójwymiarowego obrazu drgań obudowy. Wykonanie pomiaru możliwe jest dzięki wykorzystaniu zjawiska interferencji fal, przy czym jako źródło promieniowania stosuje się laser. Promień laserowy sprawdza bezstykowo stan przemieszczeń drgań obudowy.
- *Holografia akustyczna*. Holografia akustyczna zajmuje się sporządzaniem i wykorzystaniem zapisu informacji o amplitudzie i fazie promieniowania spójnego odbitego od danego obiektu. Stosując dwie wiązki promieniowania i wykorzystując zjawisko interferencji uzyskuje się stan przemieszczeń powierzchni obudowy utrwalony na hologramie.

Przedstawione treści są próbą wyjaśnienia w możliwie prosty sposób pewnej liczby zasad, metod i wytycznych postępowania - w obszarze projektowania racjonalnej i bezpiecznej eksploatacji maszyn - o wartości uznanej przez wielu badaczy [11,12,14].

3. Modelowanie zmian stanu

Modelowanie pozwala z określonym przybliżeniem odtworzyć zasady organizacji i funkcjonowania obiektu, co dalej umożliwia uzyskanie informacji o samym modelowanym obiekcie. Celem modelowania jest uzyskanie wiarygodnego modelu matematycznego, który umożliwia prześledzenie sposobów zachowania się obiektu w różnych warunkach

(holizm). Model obiektu nie jest odbiciem rzeczywistego obiektu, lecz tylko odbiciem aktualnie posiadanej o nim wiedzy, stąd nigdy nie może być traktowany jako coś trwałego i nie podlegającego zmianom.

Własności dynamiczne maszyn mają bezpośredni wpływ na poziom generowanych drgań, emitowany hałas, wytrzymałość zmęczeniową, sterowalność i stabilność konstrukcji. Analizę własności dynamicznych maszyn identyfikuje się na podstawie budowanych modeli strukturalnych (diagnostyka holistyczna) lub na podstawie eksperymentów na rzeczywistym obiekcie (diagnostyka symptomowa). Przy budowie modelu korzysta się głównie z praw i aksjomatów fizyki, wyrażających równowagę sił, momentów, opisujących bilans sił, wydatków, przepływów, z równań ciągłości i z zależności geometrycznych. Są one wyrażane równaniami różniczkowymi zwyczajnymi, zazwyczaj trudnymi do rozwiązania zarówno analitycznego jak i przybliżonego (numerycznego).

Nieliniowości są powszechnym zjawiskiem występującym w konstrukcjach mechanicznych. W układach nieliniowych występuje wiele zjawisk, które nie występują w układach liniowych, na przykład: drgania samowzbudne, zmiana częstości własnych wraz ze zmianą amplitudy, występowanie w odpowiedzi układów nieliniowych prążków widma niewystępujących w wymuszeniu. Przyczyn występowania nieliniowości jest bardzo wiele, zaliczyć tutaj można takie zjawiska jak: tarcie, luzy, zjawiska kontaktowe, powstające w konstrukcji pęknięcia, zastosowane elementy dyskretne (sprężyny, amortyzatory) o charakterystykach nieliniowych, itp. W praktyce inżynierskiej takie elementy modelowane były za pomocą modeli liniowych, z zastosowaniem metod linearyzacji, które stanowiły tylko aproksymacje opisu dynamicznego zachowania obiektu [3,5,8].

W wielu współczesnych zastosowaniach taka aproksymacja opisu nie jest wystarczająca. Do tych zastosowań należą: diagnostyka konstrukcji oparta o model, analiza drgań i stabilności ruchu pojazdów szynowych, analiza zjawiska flatteru w samolotach, rakietach, czy łopatkach turbin, analiza drgań konstrukcji budowlanych, analiza i eliminacja zjawiska charteru w obrabiarkach i wiele innych [2,3].

Identyfikacja modeli nieliniowych konstrukcji jest zadaniem bardzo złożonym, realizowanym najczęściej wieloetapowo. Pierwszym etapem tego procesu jest stwierdzenie czy obiekt ma własności liniowe czy nieliniowe, jeśli stwierdza się występowanie nieliniowości należy w kolejnym kroku procedury identyfikacji określić rodzaj występującej nieliniowości. W kolejnym kroku dokonuje się estymacji parametrów modelu jak również weryfikacji zidentyfikowanego modelu. Poprawne przeprowadzenie procesu identyfikacji modeli nieliniowych wymaga zastosowania specjalizowanych metod pomiaru i przetwarzania sygnałów. Stosowanie metod klasycznych opartych na przekształceniu Fouriera i metodzie najmniejszych kwadratów (klasycznej) może doprowadzić do niepoprawnych wyników.

Do najczęściej stosowanych metod linearyzacji dla celów identyfikacji modeli należą linearyzacja ekwiwalentna [11] i linearyzacji stochastyczna [12].

Istnieje duża klasa obiektów mechanicznych, które z dopuszczalną dla praktyki dokładnością mogą być reprezentowane przez modele liniowe. Istotą modelu zdeterminowanego jest jednoznaczna zależność pomiędzy cechami stanu i parametrami sygnału (lub odwrotnie), dobrze opisywana liniowymi równaniami różniczkowymi.

W praktycznych zastosowaniach modeli symptomowych dla obiektów prostych, przy małym poziomie zakłóceń, są najczęściej stosowane następujące modele: typu regresyjnego, typu "obrazu", binarna macierz diagnostyczna, model topologiczny [3,7,14].

Dla obiektów złożonych konstrukcyjnie i funkcjonalnie, z wielowymiarową przestrzenią uszkodzeń, zastosowanie praktyczne znajdują *złożone modele symptomowe*

oraz *modele strukturalne*. W tej grupie modeli znajdują się: probabilistyczna macierz obserwacji, regresja wielokrotna, modele rozmyte, lingwistyczne modele typu obrazu, modele ekspertowe, modele holistyczne [6,10,12]. Tak duża liczba możliwych do wykorzystania modeli diagnostycznych daje całą gamę narzędzi interpretacji i sposobów opisu dla obserwowanych zjawisk, służących do wyjaśniania przeszłości i teraźniejszości, a także do przewidywania przyszłości. Modelowanie dla potrzeb diagnostyki obejmuje modelowanie fizyczne, matematyczne i energetyczne, co daje podstawy: diagnostyki symptomowej, holistycznej i energetycznej [1,7,10,12].

4. Identyfikacja stanu dynamicznego

Rzeczywistości techniczna to wynik analizy modeli, które ją mniej lub bardziej poprawnie opisują. Proces, którego celem jest zbudowanie najlepszego modelu operacyjnego (matematycznego lub empirycznego) nazywany jest procesem identyfikacji. W skład jego wchodzi zadania: modelowania, eksperymentu, estymacji i weryfikacji modelu. W wielu badaniach konstrukcji mechanicznych pomiar sił wymuszających drgania jest trudny lub wręcz niemożliwy, dotyczy to obiektów o bardzo dużej masie lub sztywności, gdzie zapotrzebowania na energię przy wzbudzeniu ruchu jest zbyt duże, aby można było ją doprowadzić dysponując klasycznym sprzętem do badań dynamiki strukturalnej. Dla układów liniowych zostały opracowane metody identyfikacji oparte o wymuszenia eksploatacyjne (np. w eksploatacyjnej analizie modalnej), ale dalej brak jest takich metod dla obiektów nieliniowych [11,13].

Algorytmy klasycznych metod identyfikacji układów nieliniowych obejmują zazwyczaj realizację dwóch podstawowych kroków. Pierwszy krok algorytmu polega na estymacji liniowych parametrów układu poprzez wymuszenie układu w wybranym zakresie częstotliwości w pobliżu „punktu pracy”, w którym dynamiczne zachowanie układu jest nominalnie liniowe. W drugim kroku algorytmu, na podstawie parametrów „nominalnie” liniowych wyznaczonych w kroku pierwszym, dokonywana jest estymacja nieliniowych parametrów układu.

W literaturze znaleźć można wiele propozycji klasycznych metod identyfikacji układów nieliniowych o jednym lub wielu stopniach swobody, jedno- lub wielo-wejściowych, realizowanej w dziedzinie czasu lub częstotliwości [1, 2, 4, 5, 6]. Istotną wadą metod klasycznych jest wymóg znajomości wymuszenia działającego na układ lub przynajmniej jego estymatora. W praktyce istnieje wiele układów, dla których pomiar siły wymuszającej jest trudny lub wręcz niemożliwy do przeprowadzenia (np. siły oddziaływania jezdni z bieżnikiem opony lub szyny z kołem pojazdu szynowego).

Stosowanie klasycznych metod do identyfikacji parametrów układów nieliniowych dodatkowo komplikuje fakt, że wiele rzeczywistych układów nie zachowuje się w sposób liniowy w dostatecznie szerokim paśmie częstotliwości wokół punktu pracy. Do estymacji parametrów układu nieliniowego stosowana jest kombinacja metody sił resztkowych metody zaburzeń brzegowych oraz metody bezpośredniej identyfikacji parametrów. Nieliniowa siła resztkowa występująca w układzie odtwarzana jest na podstawie zmierzonych przyspieszeń drgań wybranej masy, a następnie dopasowywana do sparametryzowanej krzywej tłumienia będącej funkcją różnic prędkości lub różnic poszczególnych mas. Wyznaczona w ten sposób nieliniowa siła resztkowa jest odejmowana od całkowitej siły oporów występujących w układzie, umożliwiając w ten sposób wyznaczenie liniowej składowej siły oddziaływań. Na podstawie liniowej składowej

siły oddziaływań, przy użyciu metody bezpośredniej identyfikacji parametrów estymowane są „nominalnie” liniowe parametry układu.

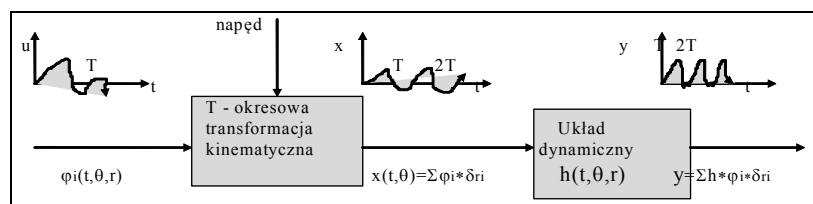
Metoda estymacji liniowych parametrów układu na podstawie nieliniowej siły resztkowej wymaga jedynie znajomości odpowiedzi badanego układu, natomiast siła wymuszająca działająca na układ nie jest mierzona. W takim przypadku liczba poszukiwanych parametrów układu jest większa od liczby możliwych do sformułowania dynamicznych równań ruchu, a metoda bezpośredniej identyfikacji parametrów umożliwia estymację jedynie stosunków parametrów układu.

W celu wyznaczenia absolutnych wartości poszukiwanych 'nominalnie' liniowych parametrów układu stosowana jest metoda zaburzeń brzegowych, polegająca na wprowadzeniu do układu dodatkowej masy zmieniającej jego własności dynamiczne. Postępowanie takie umożliwia sformułowanie dodatkowego dynamicznego równania ruchu, gdzie liczba poszukiwanych parametrów układu jest równa liczbie możliwych do sformułowania dynamicznych równań ruchu. Rozwiązanie sformułowanego układu równań prowadzi do wyznaczenia wartości poszukiwanych, nominalnie liniowych parametrów układu. Ograniczone możliwości analizy nieliniowych równań różniczkowych skłaniają do stosowania modeli liniowych lub wykorzystania procedur linearyzacji. Istnieje duża klasa obiektów mechanicznych, które z dopuszczalną dla praktyki dokładnością mogą być reprezentowane przez modele liniowe.

Systemy diagnostyczne posiadają zdolność pobierania informacji z badanego obiektu. Posiadają też zdolność przetwarzania postaci pobranych informacji, aż do uzyskania diagnozy o stanie obiektu włącznie. W praktyce funkcjonowania przedsiębiorstw problemy eksploatacji i diagnostyki wkomponowane są w specjalizowane informatyczne systemy funkcjonowania [7,11,12].

5. Drgania w identyfikacji degradacji stanu

Fizyka zjawisk towarzyszących pracy każdej maszyny oparta na modelu generacji sygnałów – rys.5 - jest podstawą dobrej **diagnostyki drganiowej** i opiera się na znajomości opisu dynamiki maszyny, co ułatwia łagodne przejście do obszaru diagnostyki nadzorującej zmiany stanu degradacji obiektu [11].

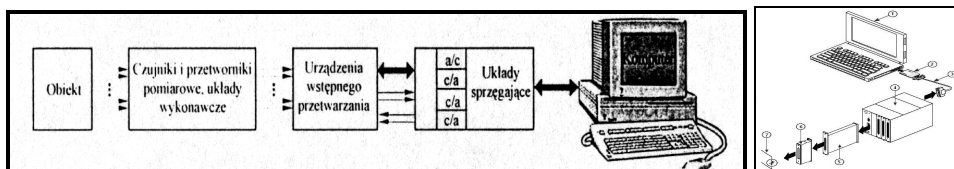


Rys.5. Model generacji sygnału diagnostycznego maszyny

Każdy stan degradacji maszyny i konstrukcji budowlanej może być wyrażony przez liczny (wielowymiarowy) zbiór wartości liczbowych zmiennych fizycznych (parametry drgań) charakteryzujących jego strukturę oraz intensywność procesów zachodzących podczas funkcjonowania (istnienia). Te liczne zbiory pozyskiwane w badaniach degradacji stanu są pozyskiwane i opracowywane zgodnie z zasadami statystyki [10,16,17].

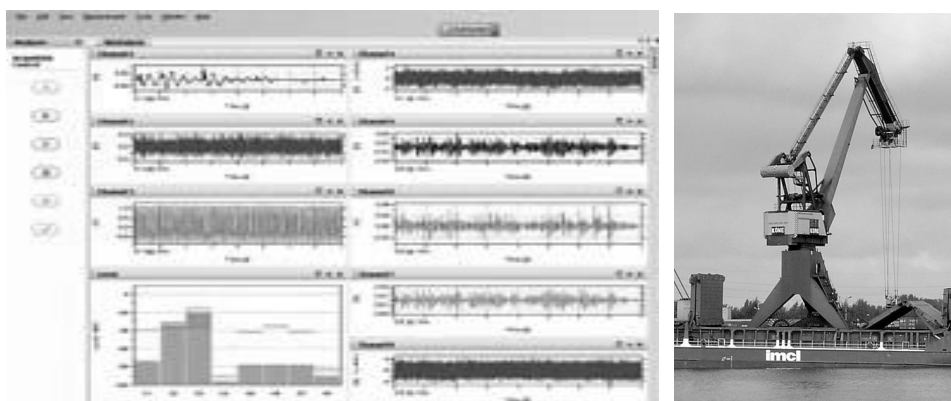
Konieczność oceny stanu jest uwarunkowana potrzebą podejmowania decyzji związanych z eksploatacją danego obiektu oraz sposobem dalszego postępowania z obiektem. Ocena stanu realizowana jest na podstawie przeprowadzonych badań

diagnostycznych, polegających na dokonaniu pomiarów i przeprowadzeniu analizy statystycznej otrzymanych wyników (rys.6) [8,9].



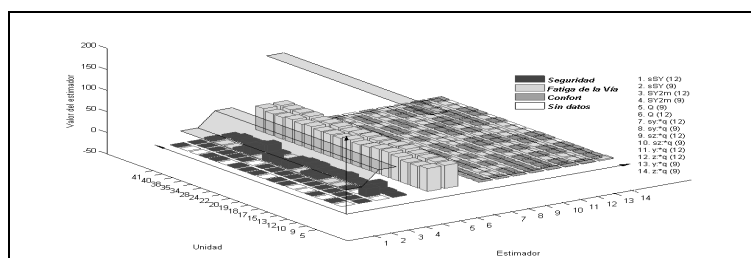
Rys.6. System akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych

Wykorzystanie informacji zawartych w obrazie *drganiowym* (opisanym przez estymatory drganiowe) interesującego nas fragmentu lub całej *konstrukcji budowlanej* jest obszarem zainteresowań drganiowej diagnostyki konstrukcyjnej – rys.7 [12,14].



Rys.7. Widok dźwigu portowego oraz zapisu stanu dynamicznego przy pomocy drgań

Ustalone w różnych badaniach operacyjnych związki pomiędzy cechami stanu a parametrami sygnałów stanowią podstawę budowanych modeli ocenowych degradacji. Z relacji zachodzących pomiędzy nimi wyznaczane są wszystkie niezbędne wielkości kryterialne dla systemu oceny bezpieczeństwa, komfortu i zmian stanu technicznego badanego systemu. Wypracowane elementy postępowania metodycznego w zakresie badania *drgań pojazdów szynowych* dla potrzeb oceny bezpieczeństwa i komfortu jazdy (prędkość pojazdu, stan szyny, stan statyczny i dynamiczny obiektu) są przykładem (rys.8) *drganiowej identyfikacji* stanu obiektów złożonych [1,11,15].

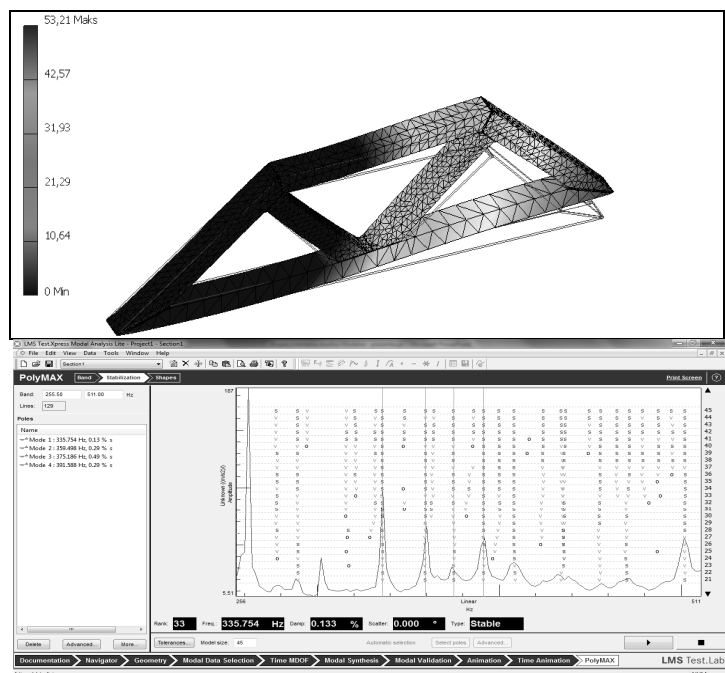


Rys.8. Implementacja normy UIC-518 na badanych odcinkach [11]

Ogromna ilość informacji diagnostycznej z badań torowiska, badań hałasowych oraz drganiowych systemu kolejowego poddana została opracowaniu statystycznemu (BEDIND, PCA, SVD, modelowanie relacji przyczynowo - skutkowych) w zakresie ekstrakcji informacji użytecznej oraz dla potrzeb wyznaczania wskaźników charakteryzujących jakość eksploatacji [6,11]. W wyniku implementacji normy UIC-518 powstały raporty dla oceny bezpieczeństwa i komfortu jazdy pojazdów pasażerskich oraz zużycia toru. Wyniki badań cech stanu technicznego torowiska i wielu parametrów drganiowych i hałasu są rezultatem zastosowania specyficznych procedur i algorytmów diagnostyki technicznej. Wyniki badań statystycznych bogatego materiału informacyjnego z badań pociągów dały podstawowe relacje i wartości stanowiące bazę zbudowanego wielokryterialnego systemu oceny bezpieczeństwa i komfortu jazdy pociągów [11].

Nowym narzędziem w opisie stanu dynamicznego maszyn jest coraz częściej wykorzystywana **analiza modalna** (teoretyczna, eksperymentalna, eksploacyjna). Analiza modalna jest metodą badania własności dynamicznych konstrukcji i jest realizowana, jako teoretyczna lub doświadczalna (eksperymentalna lub eksploacyjna analiza modalna). W wyniku przeprowadzenia analizy modalnej otrzymuje się model modalny, który stanowi uporządkowany zbiór **częstotliwości własnych**, odpowiadających im **współczynników tłumienia** oraz **postaci drgań** własnych. Z modelu modalnego można przewidzieć reakcje obiektu na dowolne zaburzenie w dziedzinie czasu i częstotliwości [7,16].

Wyniki pomiarów oraz model geometryczny kratownicy (rys.9) wykorzystano w systemie LMS CADA-PC do estymacji parametrów modelu modalnego, a dalej pokazano, jako przykład efektywnej i nowej metodyki badań drganiowych obiektów złożonych [15].



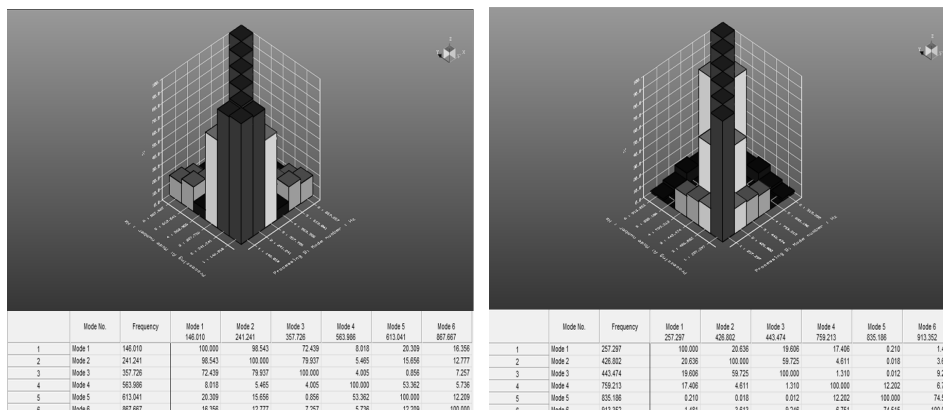
Rys.9. Model kratownicy i jej diagram stabilizacji w badaniach EAM

Ostateczna analiza uzyskanych częstości drgań własnych sprowadza się do przeprowadzenia walidacji metodą AutoMAC, co ma na celu sprawdzenie warunku ortogonalności wektorów własnych dla analizowanego modelu modalnego.

Przeprowadzając metodą AutoMAC walidację (rys.10) uzyskanych wyników pomiarów, zawężono wyestymowane postacie drgań do zaledwie dwóch dla stanu zdatnego przy częstości 357,726 [Hz] i 563,986 [Hz] oraz również do dwóch postaci drgań (835,186 [Hz], 913,352 [Hz]) w przypadku stanu uszkodzenia części nadwozia.

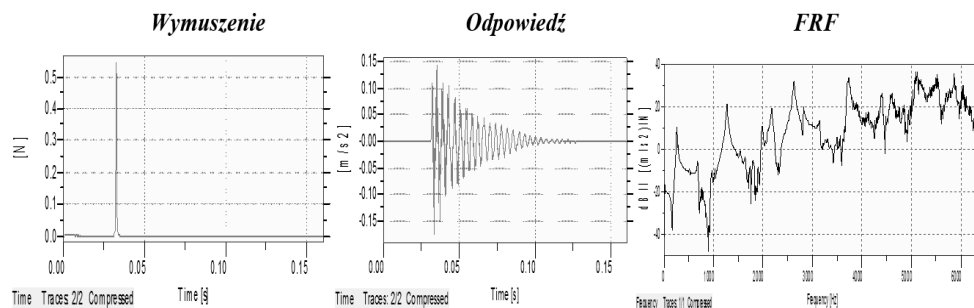
Analizując uzyskane wyniki po walidacji zaobserwowano znaczną różnicę pomiędzy stanami nadwozia. Różnice te widoczne są w pierwszej kolejności w postaci wyraźnych zmian częstości drgań własnych pomiędzy dwoma stanami. Dodatkowym i zarazem kolejnym wyraźnym wskazaniem różnicy pomiędzy stanami są wizualizacje postaci drgań własnych, które dla uszkodzonego elementu objawiają się drganiami giętno – skrętnymi.

Taka postać wskazuje na znaczną różnicę we własnościach mechanicznych materiału konstrukcyjnego. Dzięki analizie przeprowadzonej metodą AutoMAC odrzuca się część biegunów, które są wybierane w sposób subiektywny, doprowadzając do ostatecznej formy modelu modalnego opisującego stan dynamiczny obiektu badań.



Rys.10. Wykres AutoMAC dla postaci drgań elementu zdatnego i uszkodzonego

W badaniach modelu fragmentu kratownicy (rys.11) rejestrowano wymuszenia i odpowiedzi oraz programowo wyznaczano funkcje przejścia FRF, a także diagramy stabilizacji. Pozyskane pomiarowo częstości drgań własnych oraz postacie tych drgań porównywano z wynikami badań teoretycznej analizy modalnej [11,15,16].



Rys.11. Przebiegi wymuszenia i odpowiedzi oraz funkcji FRF dla fragmentu kratownicy

Zakres badań analizy modalnej wnosi oryginalny wkład w udoskonalenie procesu projektowania maszyn poprzez opracowanie szeregu nowych procedur badawczych i wdrożenie nowoczesnych metod eksploatacyjnej analizy modalnej do korygowania modeli analitycznych maszyn, co daje pełny, zamknięty cykl modelowania dynamicznego konstrukcji. Uzyskane wyniki badań wstępnie potwierdzają możliwość wykorzystania analizy modalnej w diagnozowaniu wielu obiektów.

6. Wnioski

Różnorodność własności systemu eksploatacji maszyn i realizowanych zadań implikuje różnorodność metod i środków badawczych, w tym także narzędzia i metody rozwiązań informatycznych systemów nadzoru zmian stanu degradacji.

Kształtowanie i ocena jakości degradacji stanu maszyn metodami mechaniki stosowanej i diagnostyki technicznej wiąże się ściśle z koniecznością utrzymania na odpowiednim poziomie ich cech użytkowych w określonych warunkach eksploatacji. Cechy te, spełniające wymogi bezpieczeństwa i reprezentatywne dla stanu pojazdu (zespołu, elementu), winny być określone już na etapie konstruowania a weryfikowane podczas wytwarzania i eksploatacji.

Do wyróżnienia, oceny i podtrzymywania cech użytkowych wykorzystuje się:

- metody i środki mechaniki stosowanej, możliwości diagnostyki technicznej, w tym konstruowanie diagnostyczne, drganiową ocenę jakości wytworów, wspomaganie badań techniką informacyjną;
- badania niezawodności w fazach: przedprodukcyjnej, produkcyjnej i poprodukcyjnej przy wykorzystaniu badań stanowiskowych, modelowania deterministycznego i stochastycznego czynników wymuszających, wspomaganie komputerowe badań;
- metodykę kształtowania jakości, przez jakościowy system sterowania przedsiębiorstwem z uwzględnieniem kryteriów norm jakości EN serii 29 000;
- badania technologiczności obsługowej i naprawczej obiektów, kształtowanie intensywności starzenia i zużywania się elementów, kształtowanie podatności oraz ocenę efektywności eksploatacji systemów technicznych.

Powyższe grupy tematyczne stanowią obszar zainteresowań szerokiego grona społeczności eksploatacyjnej, przyczyniając się do rozwoju metod i metodologii kształtowania i podtrzymywania zdolności obiektów.

Poznanie zjawisk fizycznych zachodzących w czasie funkcjonowania maszyny umożliwia określenie związków jakościowych między zachodzącymi procesami destrukcyjnymi a stanem maszyny.

Literatura

1. Cempel C., Natke H.G.: An introduction to the holistic dynamics of operating systems. Progress Report No.2, CRI - B - 2/92, 1996.
2. Ďurica P., Juráš P., Gaspierik V., Rybarik J.: Long-term monitoring of thermo-technical properties of lightweight construction of external walls being exposed to the real conditions. In *Procedia Engineering*, 111 (2015) pp.176-182.
3. Eykhoff P.: Identyfikacja w układach dynamicznych. BNInż., Warszawa 1980.
4. Findeisen W. ii: Analiza systemowa - podstawy i metodologia. PWN, Warszawa 1985.
5. Hadzima B., Vičan J.ii: Influence of tempering on the deformation level of the multi-layer hard faced samples. In *Procedia Engineering*, 111 (2015) pp. 49-56.

6. Niziński S., Michalski R.: Diagnostyka obiektów technicznych. ITE, Radom 2002.
7. Uhl T., Giergiel J.: Identyfikacja układów mechanicznych. PWN, Warszawa 1990.
8. Vičan J., Jošt J., Gocál J.: Analysis of the stringer-to-cross-beam riveted joints behaviour, In: Civil and environmental engineering, vol. 10, no. 1 (2014), s. 50-60.
9. Zeigler B.: Teoria modelowania i symulacji. PWN, Warszawa 1984.
10. Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. ATR, Bydgoszcz 1996.
11. Żółtowski B., Castaneda Heredia L.F.: Badania pojazdów szynowych. Transport. Wydawnictwo UTP, Bydgoszcz, 2009 s.220.
12. Żółtowski M.: Informatyczne systemy zarządzania w inżynierii produkcji. ITE - PIB, Radom 2011.
13. Żółtowski M.: Investigations of harbour brick structures by using operational modal analysis. Polish Maritime Research, No.1/(81), v.21, ISSN-1233-2585, 2014, pp.42-54.
14. Żółtowski M.: Assessment State of Masonry Components Degradation. Applied Mechanics and Materials Vol. 617(2014), Trans Tech Publications, Switzerland 2014, ISSN 1662-7482. pp. 142-147.
15. Żółtowski B., Żółtowski M.: Vibrations in the Assessment of Construction State. Applied Mechanics and Materials Vol. 617(2014), Trans Tech Publications, Switzerland 2014, ISSN 1662-7482. pp. 136-141.
16. Żółtowski M.: Badanie niezawodności elementów infrastruktury murowej z użyciem operacyjnej analizy modalnej. Materiały Niezawodności, Szczyrk 2013, pp.127-129.
17. Żółtowski M. ii.: Study of the state Francis Turbine. Polish Maritime Research, No.2/(78), vol.20, ISSN 1233-2585, 2013, pp. 41-48.

Dr inż Mariusz ŻÓŁTOWSKI
 Prof. dr hab. inż. Bogdan ŻÓŁTOWSKI
 Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy w Bydgoszczy
 85-225 Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20
 e-mail: mazolto@utp.edu.pl
 bogzol@utp.edu.pl

Doc. Ing. Branislav HADZIMA, Phd.
 Výskumné Centrum Žilinskej Univerzity, Slovakia
 Univerzitná 8215/1,010 26 Žilina
 e-mail: branislav.hadzima@rc.uniza.sk