ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 5(77)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

OBSŁUGIWANIE MASZYN I URZĄDZEŃ OKRĘTOWYCH
O M i U O 2 0 0 5

Bogdan Żółtowski

Identyfikacja a diagnostyka

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, identyfikacja, modelowanie, analiza modalna

W pracy przedstawiono wybrane problemy diagnozowania stanu technicznego maszyn przy wykorzystaniu metod identyfikacji i diagnostyki technicznej. Wskazano na związki między metodami oceny stanu dynamicznego a metodami oceny stanu eksploatacyjnego. Przykładowe wyniki analizy modalnej obrazują złożoność problematyki odwzorowywania badań stanu dynamicznego w badania diagnostyczne stanu maszyn.

Identification versus Diagnosis

Key words: technical diagnostics, identification, modelling, modal analysis

Some problems of troubleshooting relating to the technical state of machines by methods of identification and diagnosis are introduced. Relationships are shown between methods of dynamic state evaluation and methods of operating state evaluation. Examples of the modal analysis show the complexity of problems of representing the evaluation of machine dynamic state in diagnostic examination of machine technical state.

Wstęp

Powszechnie obserwuje się wzrost zainteresowania problemami pozyskiwania informacji z badań dla potrzeb nowoczesnego konstruowania, wytwarzania i eksploatacji maszyn. Wzrost wymagań niezawodnościowych wraz z zastosowaniem wielu obiektów w nowych dziedzinach życia (zarządzanie, medycyna) spowodował rozwój komputerowych urządzeń diagnostycznych, umożliwiających detekcję i lokalizację uszkodzeń wraz z generowanymi decyzjami eksploatacyjnymi, ustalanymi przy pomocy metod sztucznej inteligencji.

Do jakościowych miar stanu dynamicznego maszyny, czyli jej dynamiczności, zalicza się poziom amplitud drgań, zarówno maszyn jako całości, jak również drgań względnych poszczególnych elementów i części. Drgania całościowe maszyny można uznać za objaw zewnętrzny, gdyż one są odpowiedzialne za poziom zakłóceń emitowanych w otoczenie. Natomiast drgania względne poszczególnych elementów rzutują przede wszystkim na stan sił wewnętrznych w maszynie, czyli na jej poziomie amplitud naprężeń dynamicznych. Z uwagi na istotny związek poziomu naprężeń dynamicznych z trwałością maszyny, dogodnie jest przyjąć je za odrębną miarę dynamiczności [1, 8, 12, 13, 20, 21, 22].

Umiejscowienie przedstawionej problematyki w życiu maszyny uzasadnia treści tego rozdziału, gdzie omówiono determinanty systemu istnienia maszyn, elementy identyfikacji i wibroakustyki jako podstawowe dziedziny opisu stanu dynamicznego maszyn oraz elementy prognozowania stanu maszyn, stanowiące podstawę nowoczesnych strategii eksploatacji.

1. Identyfikacja stanu dynamicznego maszyn

Rzeczywistość 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 jego skład wchodzą zagadnienia: modelowania, eksperymentu, estymacji i weryfikacji modelu.

Diagnostyka obiektów technicznych jest w chwili obecnej antycypowana dychotomicznie, jako wsparta modelowo i jako diagnostyka symptomowa.

Możliwości diagnozowania dają się ująć w trzy podstawowe grupy, objaśniające sens postępowania badawczego w zakresie oceny jakości stanu lub wytworu. Pierwsza z nich to diagnostyka przez obserwację procesów roboczych, polegająca na monitorowaniu ich parametrów w sposób ciągły lub prowadzeniu badań sprawnościowych maszyn (moc, moment, prędkość, ciśnienie itp.) na specjalnych stanowiskach. Przed tym rodzajem badań diagnostycznych otwarta jest przyszłość z racji coraz częściej wprowadzanych sensorów mechanotro-

nicznych, mikroprocesorów itp., przy czym w takim przypadku wymagana jest znajomość modelu funkcjonowania obiektu. Drugi sposób diagnozowania maszyn obejmuje badania jakości wytworów, zgodności wymiarów, pasowań, połączeń itp., gdyż ogólnie tym lepszy jest stan techniczny maszyny, im lepsza jakość produkcji. Trzecia możliwość diagnozowania to obserwacja procesów resztkowych, wykorzystująca różne procesy fizyko-chemiczne, zawarte w procesach wyjściowych z funkcjonującej maszyny i będąca źródłem wielu atrakcyjnych metod diagnozowania maszyn.

Identyfikacja może dotyczyć zarówno budowy modeli obiektu, jak i odtworzenia stanu badanego obiektu, co prowadzi wprost do problematyki diagnostyki technicznej.

Proces identyfikacji diagnostycznej obejmuje więc [1, 12, 18, 19, 22]:

- modelowanie (symptomowe lub strukturalne),
- eksperyment identyfikacyjny (symulacyjny i/lub rzeczywisty),
- estymację parametrów diagnostycznych (cech stanu lub symptomów),
- wnioskowanie diagnostyczne.

Specyfika zadań identyfikacji diagnostycznej różni się od identyfikacji ogólnej tym, że zawiera szereg dodatkowych elementów wspomagających ten proces. Są to:

- budowa modeli generacji sygnałów diagnostycznych,
- wybór cech stanu i zorientowanych uszkodzeniowo symptomów stanu,
- modele relacji diagnostycznych,
- ocena trafności doboru zmiennych do modelu diagnostycznego,
- wartości graniczne symptomów stanu,
- specyfika realizowanych eksperymentów diagnostycznych.

Istniejące metody identyfikacji można podzielić na metody identyfikacji własności statycznych i dynamicznych. W badaniach diagnostycznych jak dotychczas rozwinęły się głównie metody identyfikacji własności statycznych, oparte na modelach symptomowych.

Metody identyfikacji można podzielić ze względu na: rodzaj identyfikowanego modelu, rodzaj eksperymentu, zastosowane kryterium identyfikacji, czy też zastosowaną procedurę estymacji. W ogólności są to: metody analityczne, czasowe, częstotliwościowe, korelacyjne, regresyjne, analizy czynnikowej i metody iteracyjne, omówione w pracach szeregu autorów [2, 4, 6, 15, 18, 19, 22].

Dla obiektów prostych dobrym narzędziem oceny zmieniającego się ich stanu dynamicznego są metody identyfikacji prostej, wykorzystujące widmo amplitudowo-częstotliwościowe. Poszukiwanie częstości rezonansowej i wartości amplitudy w tej częstotliwości za pomocą testów: impulsowego, harmonicznego i przypadkowego są stosunkowo dobrze opanowane w technikach badawczych naszych przedsiębiorstw.

Innym sposobem opisu i analizy stanu dynamicznego maszyn jest analiza modalna, stosowana jako teoretyczna, eksperymentalna i eksploatacyjna analiza modalna. Wykorzystuje ona częstości drgań własnych i postaci drgań do opisu zmieniającego się stanu maszyn oraz służy do doskonalenia metody elementów skończonych.

2. Studium dynamiki maszyn

Dynamika jest nauką o tym, jak rzeczy zmieniają się w czasie, i o siłach, które są przyczyną tych zmian [14, 18, 19, 20, 22]. Celem studium dynamiki układu jest zrozumienie zasad funkcjonowania, zmian stanu obciążeń dynamicznych i przewidywanie poprawnego zachowania się układu. Potrzeba znajomości dynamiki układu wynika z coraz większych wymagań stawianych maszynom. Wraz ze wzrostem prędkości ich ruchu i wartości obciążeń, zwiększeniem wymagań dotyczących trwałości i niezawodności, a także konieczności stosowania sterowania automatycznego rośnie znaczenie analizy dynamiki konstrukcji.

Analiza dynamiki układu składa się z następujących etapów [18, 22]:

- **etap I** – dokładne określenie układu, jego istotnych cech i budowa modelu fizycznego, którego własności dynamiczne będą w dostatecznym stopniu zgodne z własnościami rzeczywistego obiektu;
- **etap II** – analityczny opis zjawisk dynamicznych odzwierciedlanych modelem fizycznym, czyli znalezienie modelu matematycznego, równań różniczkowych opisujących ruch modelu fizycznego;
- **etap III** – przestudiowanie własności dynamicznych modelu matematycznego na podstawie rozwiązania równań różniczkowych ruchu, ustalenie przewidywanego ruchu układu;
- **etap IV** – podjęcie decyzji projektowych, tj. przyjęcie fizycznych parametrów układu, z modernizacją przystosowaną do oczekiwań. Synteza i optymalizacja prowadząca do osiągnięcia wymaganych własności dynamicznych konstrukcji.

Przedstawiona procedura opiera się na znajomości modelu układu, a wnioski płynące z działań na modelach zależą od ich jakości. Budową modeli zajmuje się identyfikacja, która utożsamia systemy rzeczywiste z ich modelami.

W zależności od celu prowadzonej analizy dynamicznej obiektu stawia się różne wymagania budowanym modelom, a ich ocenę przeprowadza się różnymi metodami eksperymentalnymi.

3. Identyfikacja prosta i złożona

Zmiany stanu maszyn opisywane sygnałem drganiowym odzwierciedlają się w zmiennych wartościach poziomu (parametrów) drgań lub w zmianie transmitancji od punktu uszkodzenia do punktu odbioru. Każdy układ mechaniczny w zakresie niskich częstotliwości można modelować układami dyskretnymi (m, k, c), w najprostszym przypadku o jednym stopniu swobody. W praktyce układ taki może być modelem [19, 21]:

- wirnika maszyny w łożysku ślizgowym z warstwą oleju (c) zamocowanym na korpusie o dużej masie (m) i sztywności (k);
- maszyny o masie (m) przytwierdzonej sztywno do fundamentu o własnościach sprężystych (k, c);
- maszyny (m) na amortyzatorach (k, c) zamocowanej do fundamentu o dużej masie;
- wirnika maszyny (m) w łożysku tocznym (k, c) zamocowanym w korpusie o dużej masie i sztywności;
- wysokiej konstrukcji (platforma wiertnicza, komin, wieża) poddanej działaniu fal morskich lub wiatru.

Identyfikacja prosta

W większości zastosowań korzysta się z **identyfikacji prostej**, gdzie wyznacza się zmiany wartości m, k, c, albo zmiany parametrów charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych (widma). Do zadań identyfikacji prostej w diagnostyce technicznej należy:

- wyznaczanie struktury modelu, czyli wartości i wzajemnych połączeń między elementami masowymi (m), sprężystymi (k) i dyssypacyjnymi (c);
- wyznaczanie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych układów lub tylko pewnego zbioru ich parametrów.

W zakresie częstotliwości niskich maszyny można modelować układami dyskretnymi o kilku stopniach swobody, a często o jednym stopniu swobody. Układ dyskretny, w odróżnieniu od ciągłego, cechuje się punktowym rozkładem mas, sztywności tłumienia i wymiary tych elementów nie odgrywają roli. Dla układów mechanicznych, zwłaszcza mających więzy sprężyste ustalające ich położenie w przestrzeni, przyjmuje się zwykle liczbę stopni swobody równą liczbie mas w układzie.

Badania zmian transmitancji odzwierciedlającej własności dynamiczne obiektu można przeprowadzić trzema metodami:

- za pomocą testu impulsowego (uderzenie młotkiem),
- za pomocą testu harmonicznego (sygnał z generatora),
- za pomocą testu przypadkowego (pobudzanie wielu rezonansów jednocześnie).

Przedstawione podejścia i uzyskane zależności obrazują ruch drgający obiektu (modelu) i wynikające z niego parametry procesu drganiowego, co pozwala na zaniechanie trudnego opisu analitycznego (szczególnie dla wielu stopni swobody) i zastąpienie go bezpośrednimi pomiarami drgań. Stan obiektu można więc opisywać zamiennie, zamiast modelowania w kategoriach (m, k, c) stosować opis drganiowy w kategoriach (a, v, x).

Identyfikacja złożona

Dla układów złożonych, często nieliniowych, używa się dla potrzeb identyfikacji złożonej **analizy modalnej** (**teoretycznej, eksperymentalnej lub eksploatacyjnej**). W wyniku przeprowadzenia analizy modalnej otrzymuje się model modalny, który stanowi uporządkowany **zbiór częstości własnych**, odpowiadających im **współczynników tłumienia** oraz **postaci drgań własnych**. Na podstawie znajomości modelu modalnego można przewidzieć reakcje obiektu na dowolne zaburzenie, zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości.

Analiza modalna w diagnozowania stanu obiektów mechanicznych może zatem znaleźć zastosowanie w następujących obszarach:

- wyznaczanie wymuszeń działających na układ i ich widm częstotliwościowych na podstawie parametrów modelu modalnego i zmierzonej odpowiedzi układu; badanie podobieństwa charakterystyk częstotliwościowych: drganiowych i modalnych;
- wyznaczenie parametrów modelu modalnego eksploatowanego obiektu i śledzenie ich zmian w czasie eksploatacji;
- dostrojenie, na bazie modelu modalnego, modelu elementów skończonych konstrukcji w stanie zdatności oraz śledzenie zmian tego modelu w czasie eksploatacji; dostrojony model elementów skończonych jest podstawą do modyfikacji konstrukcji.

Model modalny otrzymany w wyniku analizy modalnej jest opisany zbiorem częstości własnych, postaci drgań oraz współczynników tłumienia. Odwzorowuje on zatem zmiany stanu dynamicznego reprezentowane przez zmiany masy, sztywności oraz tłumienia występujące w równaniach opisujących funkcjonowanie maszyn. Znajomość zachowania się modelu w określonych sytuacjach pozwala na określenie możliwych miejsc uszkodzeń oraz przeciwdziałanie im przez wprowadzanie modyfikacji: masy (w jednym lub wszystkich kierunkach drgań układu), tłumienia oraz sztywności (pomiędzy poszczególnymi punktami modelu lub pomiędzy danym punktem a ziemią).

Tak widziane możliwości zastosowań pozwala wyróżnić następujące rodzaje analizy modalnej:

- **teoretyczną**, która wymaga rozwiązania zagadnienia własnego dla przyjętego modelu strukturalnego badanego obiektu,
- **eksperymentalną**, wymagającą sterowanego eksperymentu identyfikacyjnego, podczas którego wymusza się ruch obiektu (np. drgania) oraz dokonuje pomiaru wymuszenia i pomiaru odpowiedzi w wielu punktach pomiarowych, rozmieszczonych na badanym obiekcie,
- **eksploatacyjną**, opierającą się na eksperymencie eksploatacyjnym, w którym dokonuje się pomiarów tylko odpowiedzi układu w wielu punktach pomiarowych, podczas gdy ruch obiektu spowodowany jest rzeczywistymi wymuszeniami eksploatacyjnymi.

Stosowana coraz częściej analiza modalna pozwala na rozwiązanie szeregu zagadnień, m.in.[18]:

- analiza modalna jest metodą rozwiązania zagadnienia własnego dla konstrukcji (nie dla modelu),
- analiza modalna jest metodą rozprzęgania układu równań ruchu opisujących dynamikę modelu,
- analiza modalna jest metodą identyfikacji własności dynamicznych obiektu,
- analiza modalna jest metodą dyskretyzacji konstrukcji o ciągłym rozkładzie parametrów,
- analiza modalna jest metodą redukcji modelu.

Eksperymentalna analiza modalna

Eksperymentalna analiza modalna jest często stosowaną w praktyce techniką badania własności dynamicznych obiektów mechanicznych, zarówno na etapie konstruowania jak i w eksploatacji maszyn.

Eksperyment identyfikacyjny w eksperymentalnej analizie modalnej polega na wymuszeniu drgań obiektu przy jednoczesnym pomiarze siły wymuszającej i odpowiedzi układu, najczęściej w postaci widma przyspieszeń drgań.

Metoda eksperymentalnej analizy modalnej opisuje własności maszyny za pomocą macierzy charakterystyk dynamicznych. Metoda ta pozwala dokonać rozłożenia zachowania się układu na zbiór równań ruchu (wyznaczonych w przestrzeni modalnej) lub zbiór postaci własnych dla poszczególnych częstotliwości drgań własnych.

Estymacja parametrów w eksperymentalnej analizie modalnej polega na aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej, uzyskanej z pomiarów, przez wyrażenie analityczne. Jeśli wyrażenie analityczne jest wynikiem rozważań

dotyczących odpowiedzi częstotliwościowej modelu, wtedy parametry modalne (częstości drgań własnych, tłumienie i przemieszczenie modalne) mogą być estymowane na bazie danych pomiarowych.

Eksploatacyjna analiza modalna

Do identyfikacji obiektów mechanicznych o dużych rozmiarach przestrzennych i dużych masach stosowana jest metoda eksploatacyjnej analizy modalnej, oparta o pomiar odpowiedzi na wymuszenia eksploatacyjne, będące wynikiem działania sił procesu technologicznego, bądź wymuszeń kinematycznych oraz procesu destrukcji elementów maszyny [18, 19].

Eksploatacyjna analiza modalna:

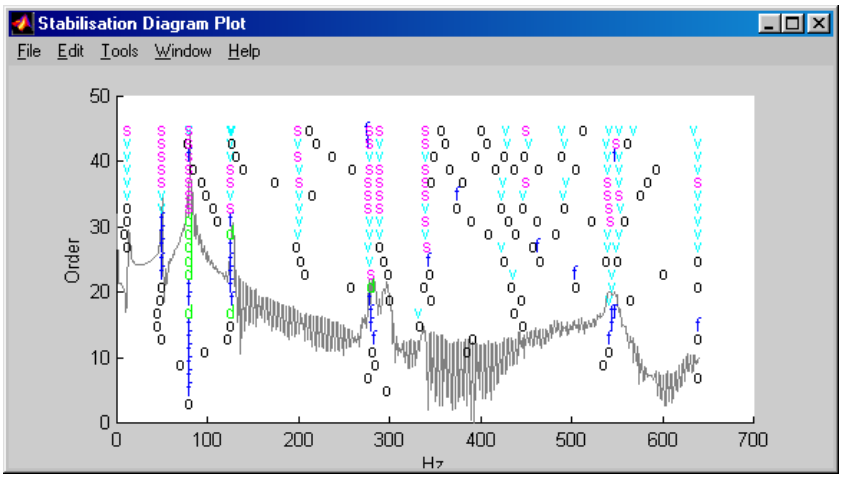
- umożliwia analizę modalną obiektów o dużych rozmiarach, dla których testy laboratoryjne byłyby utrudnione;
- modeluje poprawniej obiekty, gdyż wymuszenia odpowiadają obciążeniom rzeczywistym ze względu na ich przebieg czasowy, rozkład przestrzenny oraz amplitudy, a także warunki brzegowe;
- umożliwia identyfikację modeli nieliniowych.

Zaletą metod eksploatacyjnej analizy modalnej w zastosowaniu do identyfikacji charakterystyk dynamicznych obiektów jest zachowanie warunków brzegowych oraz wymuszeń, charakterystycznych przy eksploatacji tych obiektów.

Właściwa analiza modalna

Proces właściwej analizy modalnej rozpoczyna się od wczytania danych do modułu „Analysis". Dane powinny być w postaci funkcji korelacji wzajemnej lub gęstości widmowej mocy. Algorytm LSCE wykorzystywany do przeprowadzenia analizy modalnej składa się z dwóch kroków: w pierwszym zidentyfikowane zostają bieguny układu, w drugim na ich podstawie estymowane są postacie drgań własnych układu. Początkowo badany obiekt zostaje zamodelowany wielomianami o określonych rzędach: minimalnym i maksymalnym oraz określonym krokiem estymacji. Im większy maksymalny rząd wielomianu, tym lepiej model będzie oddawał rzeczywistą konstrukcję, ale także znacznie wzrośnie złożoność i czas wykonania obliczeń. Po estymacji uruchamiane jest narzędzie „Stabilisation Diagram", wyświetlające diagram stabilizacyjny i umożliwiające wybór biegunów badanego układu.

Diagram stabilizacyjny dla omawianego przykładu [19] został przedstawiony na rysunku 1. Przyjęto następujące wartości współczynników: maksymalny rząd wielomianu: 45, rząd minimalny: 2, krok estymacji: 2.

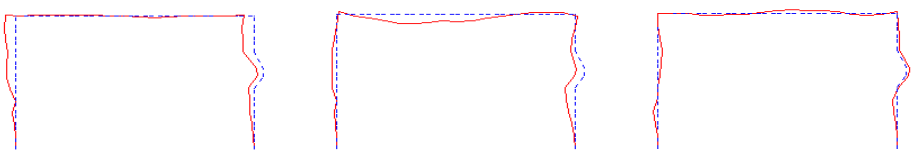


Rys. 1. Diagram stabilizacyjny [19]: o – biegun niestabilny, f – biegun ma stałą częstość, v – biegun ma stałą częstość i wektor modalny, s – biegun stabilny
Fig. 1. Stabilization diagram

Wybiera się tylko te bieguny, które są stabilne ze względu na częstotliwość, współczynnik tłumienia i wektor modalny (zaznaczone na diagramie literą „s"), występujące przy częstotliwości, dla której na charakterystyce częstotliwościowej znajduje się maksimum. Przy wyborze stosuje się zasadę wyboru biegunów z poziomu, dla którego występują wszystkie bieguny spełniające powyższe wymagania (biegun stabilny i maksimum). W omawianym przykładzie wybrano bieguny z poziomu 39. Po wybraniu wszystkich biegunów następuje estymacja postaci drgań.

Wizualizacja wyników

Dane otrzymane w wyniku analiz można przedstawić graficznie za pomocą modułu „Visualization" – „Mode Shapes". Możliwa jest obserwacja animowanych drgań modelu dla wybranych częstości własnych. Na rysunku 2 przedstawione są przykładowe postacie drgań dla wybranych częstości własnych.



12,47 Hz 80,85 Hz 340,43 Hz

Rys. 2. Przykładowe postacie drgań modelu ramy stalowej [19]
Fig. 2. Forms of the vibrations of a steel frame model

Nowoczesne oprogramowanie inżynierskie pozwala w pełni wykorzystać zalety wykonywania pomiarów w warunkach normalnej eksploatacji maszyn.

Zakończenie

Przedstawione w tym opracowaniu rozważania dotyczą nowoczesnego podejścia do modelowania stanu dynamicznego obiektów, przy wykorzystaniu opisu i badań z zakresu identyfikacji, z wyróżnieniem analizy modalnej i zagadnień wspierających bezpośrednio różne sposoby kształtowania dynamiki maszyn. Powstające w ten sposób ewolucyjne modele dynamiczne winny doskonalić metodologię i wnioskowanie w ocenie stanu dynamicznego, coraz częściej wykorzystywanego do optymalizacji konstrukcji oraz wspomagającego decyzje eksploatacyjne.

Modelowanie zmian stanu dynamicznego i zasobu funkcjonowania obiektów, z uwzględnieniem zmiennego obciążenia oraz indywidualne podejście do zmian stanu każdego elementu to dopiero początek w zakresie wykorzystania modeli ewolucyjnych. Modele takie musza mieć podstawę analityczną, a jednocześnie dobrze odzwierciedlać zmiany konstrukcyjne i eksploatacyjne zachodzące w czasie życia maszyny.

Znajomość stanu dynamicznego i struktury systemu pozwala opisać jego zachowanie, a także umożliwia budowanie modeli prognostycznych zachowania się systemu w funkcji czasu ewolucji dynamicznej, opartych o model wzrostu symptomów stanu technicznego. Najczęściej jednak nie są znane równania opisujące zachowania systemu w funkcji czasu ewolucji dynamicznej, co uzasadnia potrzebę stosowania nowych narzędzi badania stanu dynamicznego. Istnieje zatem wymóg weryfikacji eksperymentalnej modeli analitycznych obiektów technicznych, gdyż poprawnym jest model, który weryfikuje się w praktyce. Eksperyment jest więc często tylko inspiracją do dalszych badań, prowadzących do optymalizacji konstrukcji.

Literatura

1. Bendat J. S., Piersol A. G., *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, PWN, Warszawa 1996.
2. Bishop R. D., Gladwell G. M., Michaelson S., *Macierzowa analiza drgań*, PWN, Warszawa 1972.
3. Broch J.T., *Mechanical Vibration and Shock Measurements*, Brüel & Kjaer, 1980.
4. Cempel C., *Wibroakustyka stosowana*, PWN, Warszawa 1989.

5. Cempel C., *Modele diagnostyki wibroakustycznej*, DMRiP, Borówno 1994, s. 25 – 44.
6. Cempel C., *Vibroacoustical Condition Monitoring*, Ellis Hor. Ltd., Chichester, New York 1991.
7. Cempel C., *Teoria Inżynierii Systemów*, skrypt, Zakład Dynamiki i Wibroakustyki Systemów, Politechnika Poznańska, 2000.
8. Cholewa W., Kiciński J., *Diagnostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
9. Eykhoff P., *Identyfikacja w układach dynamicznych*. BNInż., Warszawa 1980.
10. Giergiel J., Uhl T., *Identyfikacja układów mechanicznych*, PWN, Warszawa 1990.
11. Giergiel J., *Drgania mechaniczne*, AGH, Kraków 2000.
12. Kaczmarek J., *Podstawy teorii drgań i dynamiki maszyn*, Wyższa Szkoła Morska, Szczecin 1993.
13. Kurowski W., *Modelowanie obiektów technicznych*, Rękopis opracowania, Płock 2001.
14. Kaźmierczak H., Kromulski J., *Metody identyfikacji parametrycznej w zastosowaniu do diagnostyki konstrukcyjnej*. Problemy Eksploatacji 6/93, MCNEMT, Radom 1993.
15. Kromulski J., *Badanie charakterystyk dynamicznych drgań źródeł akustycznych o złożonej strukturze mechanicznej metodą analizy modalnej*, praca doktorska, Poznań 1997.
16. Morrison F., *Sztuka modelowania układów dynamicznych,* WNT, Warszawa 1996.
17. Tylicki H., *Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych*, Rozprawa habilitacyjna nr 86, ATR Bydgoszcz, 1999.
18. Uhl T., Lisowski W., *Praktyczne problemy analizy modalnej konstrukcji*, CCATIE, Kraków 1996.
19. Uhl T., *Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych*, WNT, Warszawa 1997.
20. Żółtowski B., *Identyfikacja diagnostyczna obiektów technicznych*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 1 (105), PAN, 1996.
21. Żółtowski B., *Komputerowe wspomaganie identyfikacji*, ZN P. Św. nr 49, 1996, s. 55 – 71.
22. Żółtowski B., *Podstawy diagnostyki maszyn*, Wyd. ATR, Bydgoszcz 1996.

Wpłynęło do redakcji w marcu 2005 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Piotr Bielawski, prof. AM
dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM

Adres Autora

prof. dr hab. inż. Bogdan Żółtowski
Akademia Techniczno-Rolnicza
Zakład Diagnostyki Technicznej
al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz