

4.40 — zagadnienia ogólne i varia

5.50 — zagadnienia ogólne i varia

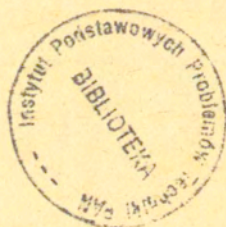
Kazimierz Sobczyk

**O IDENTYFIKACJI  
UKŁADÓW**

26/1986

WARSZAWA 1986

56881



Na prawach rękopisu

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 150 egz. Ark.wyd. 1,2. Ark. druk.1,75

Oddano do drukarni w maju 1986 r.

Nr zamówienia 300/86.

---

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,  
ul.Śniadeckich 8

## O IDENTYFIKACJI UKŁADÓW

### Streszczenie

W chwili obecnej istnieje ogromna literatura dotycząca identyfikacji układów obejmująca wiele książek, wiele artykułów o charakterze przeglądowym i setki artykułów poświęconych problemom szczegółowym. Pojęcie "identyfikacja" nie ma jednak ciągle jednoznacznie określonego zakresu znaczeniowego a w formułowaniu problemów określanych jako problemy identyfikacji istnieje duża swoboda. Na przykład, często utożsamia się identyfikację z modelowaniem matematycznym lub - w przypadku identyfikacji parametrycznej - z analizą problemów odwrotnych czy z metodami estymacji. Istotny jest więc wysiłek w celu lepszego zrozumienia istoty identyfikacji, jej zakresu i jej miejsca wśród innych kierunków i metod badawczych.

Celem niniejszej pracy jest próba usystematyzowanego spojrzenia na podstawowe pojęcia i problemy dziedziny określanej jako "identyfikacja" a także na jej związki z innymi kierunkami badań naukowych. W szczególności, podkreślona została rola planowania eksperymentu oraz istota problemów diagnostyki akustycznej.

---

Niniejszy tekst jest głosem w dyskusji inspirowanym przez spotkanie dyskusyjne nt. "Identyfikacja w mechanice" zorganizowanym przez Sekcję Teorii Konstrukcji Komitetu Inżynierii Łączowej PAN i Sekcję Mechaniki Ciała Stałego Komitetu Mechaniki PAN w Janowicach, 16-18 styczeń, 1986 r.

## 1. UWAGI WSTĘPNE

Słowo "identyfikacja" używane w językach nowożytnych /ang. identification, fr. identification, niem. Identifikation, ros. identifikacija/ ma swój pierwowzór w słowie łacińskim "identificare", które oznacza: utożsamianie, ustalanie, stwierdzanie tożsamości.

W języku angielskim, z którego - jak się wydaje - słowo "identyfikacja" weszło do nauki "identify" oznacza: 1/ recognize /tj. tell or show what something is, np. I can not identify your signature/; 2/ consider to be the same /np. wealth can not be identified with happiness/. A zatem można przyjąć, iż angielskie słowo "identification" oznacza: 1/ rozpoznawanie, 2/ utożsamianie.

W nauce pojęcie "identyfikacja" nie ma jednoznacznie określonego zakresu znaczeniowego. Z literatury przedmiotu wynika, że istnieje duża swoboda w formułowaniu problemów określanych jako problemy identyfikacyjne.

Celem niniejszego artykułu jest próba usystematyzowanego spojrzenia na podstawowe pojęcia i problemy dziedziny określanej jako identyfikacja a także na jej związki z innymi kierunkami i metodami badań naukowych.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU

Przez układ /lub system/ rozumie się najczęściej dowolny zbiór powiązanych ze sobą elementów /dowolnej natury/. Ze względu na metodologiczną przejrzystość celowe jest wyróżnienie dwóch podstawowych rodzajów układów: układy realne i układy abstrakcyjne.

Układ realny lub empiryczny jest zbiorem powiązanych ze sobą elementów materialnych. Układ abstrakcyjny lub formalny jest zbiorem elementów /lub obiektów/ abstrakcyjnych /np. znaków/ powiązanych ze sobą przez relacje lub funkcje.

Układem realnym /empirycznym/ jest więc dowolna interesująca nas część otaczającego świata, organizm człowieka, maszyna, budowla itp.

W zależności od natury elementów i wzajemnych między nimi powiązań używamy często pojęć: układ biologiczny, układ mechaniczny,

układ elektryczny itp.

Ważnym pojęciem jest "układ dynamiczny", który można rozumieć jako - wszelki układ w którym ma miejsce inercja i skończona prędkość przebiegu procesów w czasie. Inaczej /por. [1], str.3/ "A dynamical system in one which changes in time. The capitalist system is dynamical /according to Marx/, while the decimal system is /we hope/ not dynamical".

Istnieją trzy podstawowe sposoby zdobywania informacji o układach realnych i zjawiskach w nich zachodzących.

- 1/ Bezpośrednie badania empiryczne układu realnego (obserwacje, doświadczenia, eksperymenty\*) - np. istniejąca obecnie wiedza o układach biologicznych została w większości otrzymana tą drogą.
- 2/ Badania materialnych odpowiedników /lub reprezentatów/ układu realnego.
- 3/ Analize abstrakcyjnych /najczęściej - matematycznych/ odpowiedników /reprezentatów/ układu realnego.

Odpowiednik materialny układu realnego dobrany lub wykonany z zachowaniem określonych /podstawowych/ cech układu realnego i z celem empirycznego badania zjawisk zachodzących w układzie realnym będziemy nazywać modelem doświadczalnym lub laboratoryjnym układu realnego.

Aby można było zastosować metody matematyczne do badania zachowania się /czy funkcjonowania/ dowolnego układu realnego /sposób 3/ należy wprowadzić jego odpowiednik lub model matematyczny. W tym celu należy przede wszystkim określić wielkości mogące służyć jako ilościowe charakterystyki zachowania się układu oraz scharakteryzować oddziaływanie układu z otoczeniem.

Fakt oddziaływania układu z otoczeniem wyraża się zwykle mówiąc, iż układ doznaje określonego wymuszenia /na "wejściu"/ i charakteryzuje się pewną reakcją /na "wyjściu"/.

Pierwszym etapem w budowaniu matematycznego modelu układu jest matematyczny opis wymuszenia i reakcji. Sprowadza się to do określenia dwóch zbiorów: przestrzeni wymuszeń  $X$  i przestrzeni reakcji  $Y$ .

\* W dalszym ciągu (mimo różnicy znaczeniowej) wymienione pojęcia będą, dla uproszczenia, używane zamiennie.

Następnie należy określić /na podstawie odpowiednich praw fizycznych lub faktów doświadczalnych/ relacje między elementami należącymi do  $X$  i elementami należącymi do  $Y$ . Te relacje nazywają się operatorem układu; Operator układu charakteryzuje strukturę układu realnego, a więc, przede wszystkim, wzajemne związki między jego elementami /z zachowaniem relacji podobieństwa - por.[2]/.

W zależności od rodzaju środków matematycznych użytych w budowaniu modelu wyróżniamy różne modele. Na przykład, modele deterministyczne lub stochastyczne, modele liniowe lub nie-liniowe itp.

W sytuacjach bardzo skomplikowanych trudno jest wprowadzić model wystarczająco adekwatny, który charakteryzowałby wszystkie funkcje układu realnego. W takich przypadkach, dla jednego skomplikowanego układu realnego można wprowadzić różne modele opisujące różne cechy układu czy różne zjawiska w nim zachodzące.

Każdy model matematyczny zawiera /oprócz wielkości wejściowych i wyjściowych/ pewne parametry występujące w hipotetycznym operatorze układu. Aby model jaknajlepiej charakteryzował zachowanie się /funkcjonowanie/ układu realnego parametry modelu powinny być wyznaczone na podstawie odpowiedniego eksperymentu; taki eksperyment można nazywać eksperymentem identyfikacyjnym. Ma on na celu takie wybranie wartości parametrów modelu aby najlepiej/w sensie przyjętego kryterium jakości/ przybliżyć układ realny.

Proces budowania modelu matematycznego danego układu realnego nazywa się powszechnie modelowaniem. Zgodnie z tym co powiedzieliśmy wyżej /por. także [9]/ proces ten zawiera:

- /a/ charakteryzację przestrzeni wymuszeń  $X$  i przestrzeni reakcji  $Y$ ;
- /b/ określenie matematycznej postaci operatora odwzorowującego elementy  $X$  w elementy  $Y$ ;
- /c/ wybór kryterium jakości modelu, na podstawie którego można zweryfikować wielkość odchylenia reakcji /obliczonej/ modelu od reakcji układu realnego /wyznaczonej eksperymentalnie/ przy tym samym wymuszeniu;

/d/ eksperyment i wybór odpowiedniej procedury "dopasowywania" parametrów.

Wszystko co powiedzieliśmy wyżej dotyczy układów dowolnej natury fizycznej, a więc również układów mechanicznych, czyli ośrodków materialnych i konstrukcji.

Uwaga 1.

Modele matematyczne /ogólniej: modele abstrakcyjne/ układów realnych charakteryzują zazwyczaj owe układy realne w przybliżeniu, którego stopień jest zależny albo od celu budowy modelu albo jest uwarunkowany naszą niedostateczną wiedzą o modelowanych układach. Za [2] możemy więc powiedzieć, iż modele matematyczne są /jedynie/ narzędziami poznawania, projektowania i doskonalenia układów realnych.

Uwaga 2.

Często istnieją sytuacje, w których język /lub system/ formalny aczkolwiek dostarcza informacji /najczęściej - liczbowych/ o układzie realnym, to jednak nie charakteryzuje jego struktury i w związku z tym taki "odpowiednik" formalny nie może być uznany za model. Z takimi sytuacjami mamy do czynienia gdy pewne własności badanych układów realnych opisujemy za pomocą wzorów empirycznych /reprezentujących np. zbiory wyników pomiarów/; można też w tym kontekście wymienić różne reprezentacje statystyczne informacji uzyskanych z empirycznych badań układów realnych. Tego rodzaju opis układu realnego nazywany jest w [2] modelem informacyjnym. Sądzimy, iż nie jest to termin najważniejszy /choćby z tego względu, iż sugeruje model w języku teorii informacji/; wydaje się, że lepiej jest mówić w tej sytuacji /co często czyni się w różnych dziedzinach nauki/ o prawach lub zależnościach empirycznych, gdyż są oparte bezpośrednio na danych doświadczalnych.

Uwaga 3.

Posieważ modelowanie jest dość zasadniczym aspektem każdego badania naukowego, to ważne jest możliwie najgłębsze zrozumienie jego istoty.

Co właściwie /poza tym o czym krótko powiedzieliśmy wyżej/ oznacza stwierdzenie, że pewien układ /system/ formalny jest mo-

delem czy reprezentację układu realnego? Kiedy mamy prawo uznać, że jakieś zdanie logiczne wynikające z takiego modelu jest twierdzeniem o rzeczywistości?

System formalny jest uważany za model rzeczywistości, jeśli - mówiąc ogólnie - odzwierciedla on strukturę tej rzeczywistości, lub - innymi słowy - jeśli istnieje odpowiedniość między empirycznym i formalnym systemem relacyjnym.

Bardziej precyzyjna charakteryzacja natury związku między rzeczywistością i jej modelem opiera się na teorii systemów relacyjnych /por.np. [2]/. Godna polecenia jest też książka [3] omawiająca różne aspekty modelowania układów.

### 3. IDENTYFIKACJA UKŁADÓW

#### 3.1. Pojęcie identyfikacji układu

W chwili obecnej istnieje ogromna literatura dotycząca identyfikacji układów. Obejmuje ona setki artykułów poświęconych problemom szczegółowym, wiele artykułów o charakterze przeglądowym i wiele książek. Dla przykładu przytaczamy tutaj książki: [4, 5, 6, 7, 8, 9] oraz artykuły przeglądowe: [10, 11, 12]; dla informacji Czytelnika dodajmy, że praca [10] zawiera odniesienia do 230 ważnych prac szczegółowych, zaś autor pracy [12] cytuje 87 aktualnych prac - ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień identyfikacji układów mechanicznych.

Co rozumie się przez termin "identyfikacja układu"?

Istniejąca literatura poświęcona identyfikacji układów nie daje przejrzystej i jednoznacznej odpowiedzi na postawione pytanie.

A oto kilka wybranych określeń pojęcia "identyfikacja".

Określenie podane przez Zadeha w pracy [13] i powtórzone przez autorów pracy [10] brzmi:

"Identification is the determination, on the basis of input and output, of the system within a special class of systems, to which the system under test is equivalent".

Jak stwierdzają Astrom i Eykhoff w [10] aby skorzystać z powyższego określenia należy określić klasę układów  $\{M\}$ , klasę wymuszeń  $U$  oraz nadać sens słowu "equivalent". Zgodnie z wymienionymi wyżej autorami, elementy klasy  $\{M\}$  to po prostu mo-



dele, zaś równoważność jest - jak zwykle - definiowana przy pomocy kryterium jakości, które wyraża się poprzez funkcjonalę określony na reakcji rzeczywistej  $y$  i reakcji modelu  $y_m$ , tj.  $Q = Q(y, y_m)$ .

Bekey w pracy przeglądowej [1] rozpoczyna od stwierdzenia, iż problemy inżynierskie mogą być podzielone na dwie klasy: problemy proste i odwrotne. Charakteryzując różne typy problemów odwrotnych stwierdza:

- /a/ "Given an input and output, find a system description which fits such a physically realizable relationship as closely as possible. This is the design or synthesis problem, which usually has additional constraints placed upon it, such as weight, size, cost etc. Clearly, there is no unique solution to the design problem".
- /b/ "Given a system description and a response, find the input which caused it ... If the system is known a desired response is specified, the problem of finding the inputs necessary to produce such a response is known as the control problem".
- /c/ "Given a set of inputs and corresponding outputs from a system, find a mathematical description /model/ of the system. This problem which is probably the most difficult of the three inverse problems is known as the modelling or identification problem".

Spójrzmy do książki G.C. Goodwin'a i R.L. Payne'a [5].

Autorzy nie zadają sobie trudu sprecyzowania co rozumieją przez pojęcie "identification" zawarte w tytule książki. Ich rozumienie tego pojęcia ma wynikać z pierwszego zdania Przedmowy, które brzmi: "This book is devoted to the theory of mathematical model building using experimental data".

Dodajmy, iż autorzy rozpatrują problemy modelowania na podstawie obserwacji z szumami losowymi w związku z czym ich analiza jest oparta na statystyce matematycznej.

A co rozumie przez identyfikację J.Z. Cypkin [6] ?

Pierwsze zdanie Wstępu cytowanej książki [6] orzeka, iż problem identyfikacji układu polega na określaniu struktury i parametrów układu na podstawie obserwacji.

W.J. Katkownik w książce [7] pisze: "Przez identyfikację rozumie się bardzo szeroki krąg problemów związanych z rekonstrukcją zależności funkcjonalnych". Należy się domyślać, iż owej rekonstrukcji zależności funkcjonalnych dokonuje się na podstawie danych doświadczalnych.

Na podstawie istniejącej literatury /w szczególności, na podstawie przytoczonych wyżej - wybranych - określeń/ można stwierdzić, iż najczęściej identyfikacja jest rozumiana jako modelowanie, tj. tworzenie modelu matematycznego układu realnego na podstawie danych doświadczalnych.

Ale czy identyfikacja ma być tożsama z modelowaniem? Jeśli używanie pojęcia "identyfikacja" ma być uzasadnione, to nie może ono mieć tego samego zakresu znaczeniowego co pojęcie "modelowanie". Tę terminologiczną kwestię można rozwiązać w sposób następujący.

Pojęcia "modelowanie" i "identyfikacja" oraz problemy modelowania i identyfikacji mają ze sobą bardzo wiele wspólnego ale nie należy ich utożsamiać.

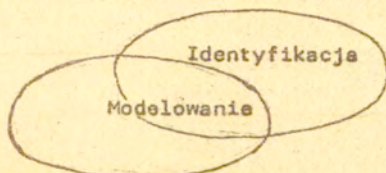
Po pierwsze, wydaje się iż identyfikacja może służyć budowaniu modelu /modelowaniu/ ale nie musi obejmować wszystkich jego etapów (etapów /a/ - /d/ podanych w p.2).

Sądźmy, że - mając na uwadze tworzenie modelu - identyfikacja ma cele skromniejsze niż modelowanie. Identyfikacja nie musi obejmować pełnej charakteryzacji przestrzeni wymuszeń  $X$  i przestrzeni reakcji  $Y$  - (etap /a/ w modelowaniu). Wydaje się także, iż określanie struktury układu /por. określenie Cypkina/ nie musi w identyfikacji odbywać się koniecznie poprzez określenie matematycznej postaci operatora odwzorowującego  $X$  w  $Y$ ; może to być tylko pewna "częściowa" charakteryzacja struktury układu, pewnych wybranych jej cech itp.

Z drugiej strony, sądźmy iż identyfikacja nie zawsze musi się łączyć z modelowaniem /tworzeniem modelu matematycznego/. Często identyfikację należy przeprowadzać w innych celach; na przykład, w celu rozpoznania jakości /np. zużycia, stabilności itp/ układu którego model matematyczny jest znany lub nie. Taką identyfikacją jest np. stwierdzanie przeszkód i ich lokalizacja w przestrzeni przy pomocy fal radiowych /radiolokacja/;

będziemy o tym jeszcze mówili w p.5.

Tak więc relację między modelowaniem i identyfikacją można przedstawić schematycznie w sposób następujący:



Określenie, które wydaje się nam najwłaściwsze i które dopuszcza taką interpretację jak podaliśmy wyżej jest następujące.

Identyfikacja - to postępowanie mające na celu charakteryzowanie struktury układu i parametrów jego modelu na podstawie danych dotyczących reakcji układu na dane wymuszenia.

### 3.2. Klasyfikacja metod identyfikacji

Podstawowy podział problemów i metod identyfikacji jest związany z zakresem informacji jaką apriori posiadamy o badanym układzie. Nawiązując do określenia Zadeh'a ten podział wiąże się też z klasą możliwych /lub hipotetycznych/ modeli  $\{S\}$ , w której poszukujemy właściwego reprezentanta układu realnego.

Jeżeli zakres naszej apriorycznej wiedzy o układzie /jego naturze, zachowaniu się itp./ jest niewielki, lub dokładniej - jeżeli nie istnieje żaden hipotetyczny model układu, to identyfikacja jest nieparametryczną. Problem identyfikacji dotyczy w tym przypadku poszukiwania najlepszej reprezentacji układu w języku funkcji, funkcjonałów itp. Takimi - nieparametrycznymi - charakterystykami układu mogą być np. odpowiedź impulsowa, funkcja przenoszenia /transmitancja/, szeregi Volterry czy też - ogólniej - operator układu.

Jeżeli apriori znana jest postać modelu układu /np. odpowiednie różniczkowe równanie ruchu/ a zadanie polega na najwłaściwszym doborze jego nieznanych parametrów /na podstawie danych z obserwacji/ to mówimy o identyfikacji parametrycznej.

W chwili obecnej większość istniejących i efektywnych metod identyfikacji /szczególnie, dotyczących problemów mechaniki/ to metody parametryczne.

Warto podkreślić, iż w poszukiwaniu właściwych metod identyfikacji ważny też jest rodzaj używanych wymuszeń. Na przykład, wymuszenia "testujące" w postaci: funkcji impulsowych, funkcji schodkowej, funkcji okresowej czy w postaci białego szumu losowego prowadzą do istotnych uproszczeń w analizie.

Oczywiście, z punktu widzenia zastosowań jest ważne aby procedura identyfikacyjna nie była uzależniona od typu wymuszenia zewnętrznego<sup>(\*)</sup>. Wyłania się istotny problem: w jaki sposób należałoby wybierać wymuszenia aby metoda identyfikacyjna była wystarczająco ogólna i metodycznie zadawalająca? W literaturze ten problem był podejmowany i sformułowane zostały pewne ogólne warunki wystarczające /odnoszące się do klasy wymuszeń/ do tego aby otrzymać estymatory zgodne parametrów układu /por. [14] /.

W budowaniu metody identyfikacji układu ważną rolę odgrywa również postać kryterium jakości, tj. postać funkcjonału  $Q(y, y_m)$ .

Ogólnie, metodę identyfikacji można określić w sposób następujący /por. Ljung L, "Identification methods" - [15] /.

Niech  $\mathcal{M} = \{ \mathcal{M}(\theta); \theta \in D_{\mathcal{M}} \}$  oznacza symbolicznie klasę możliwych /hipotetycznych/ modeli. Załóżmy, że dane /doświadczalne/ dotyczące układu mają postać:  $z^N = [z_1, z_2, \dots, z_N]$  gdzie  $z(t)$  oznacza parę  $[x(t), y(t)]$  charakteryzującą wejście-wyjście układu w chwili  $t$ . Wtedy problem identyfikacji jest następujący: w jaki sposób wykorzystać informację zawartą w  $z^N$  w celu określenia właściwego modelu  $\mathcal{M}(\hat{\theta}_N)$  w klasie modeli  $\mathcal{M}$  który byłby "zdolny" opisywać dane  $z^N$ ?

Powyższy problem sprowadza się, formalnie, do określenia odwzorowania:  $z^N \rightarrow \mathcal{M}(\hat{\theta}_N)$ . Konstrukcję takiego odwzorowania można nazwać metodą identyfikacji (w/g Ljunga).

Uwaga 1.

#### Dokładność identyfikacji

Dokładność identyfikacji może być określana w różny sposób /zależnie od przyjętej postaci funkcjonału  $Q(y, y_m)$  /. Oczywiście, identyfikacja która jest dokładna w jednym sensie może być bardzo niedokładna przy przyjęciu innego kryterium.

---

(\*) Mówimy tutaj o eksperymencie czynnym.

Na przykład, w przypadku układu liniowego dokładność można określać poprzez wielkość różnicy funkcji przenoszenia /układu i modelu/, różnicy odpowiedzi impulsowych lub różnicy poszczególnych parametrów. Ponieważ jednak transformata Fouriera jest operatorem nieograniczonym to małe błędy w odpowiedzi impulsowej mogą generować duże błędy w funkcji przenoszenia i vice versa /funkcja przenoszenia układu liniowego i jego odpowiedź impulsowa są związane transformacją Fouriera/.

#### Uwaga 2.

##### Identyfikacja jakościowa

Najczęściej proces identyfikacji układu rozumie się jako proces wnioskowania prowadzący do ilościowych informacji o badanym układzie. Istnieje jednak ważna klasa zagadnień identyfikacyjnych, w których chodzi o uzyskanie informacji typu jakościowego.

Identyfikację jakościową można określić jako proces rozpoznawania różnych typów układów i działających na nie /lub w nich/ wymuszeń na podstawie obserwacji pewnych zjawisk związanych z funkcjonowaniem układu. W przypadku układów, których struktura jest a priori nie znana tego rodzaju identyfikacja powinna poprzedzać identyfikację ilościową. Identyfikacja jakościowa może często dostarczyć istotnych informacji praktycznych. Tak jest, na przykład, w sytuacji kiedy trzeba na podstawie obserwacji procesu wibracyjnego ocenić jakie jest główne źródło drgań.

#### 3.3. Związek z innymi metodami

Z literatury wynika, iż istnieje duża swoboda w formułowaniu problemów określanых jako problemy identyfikacyjne. Te sformułowania głównie zależą - jak już wskazywaliśmy - od naszej a-priorycznej wiedzy o układzie, od celu identyfikacji, od rozważanej klasy sygnałów wejściowych i wreszcie od kryterium jakości.

W ujęciu teoretycznym identyfikacja jest bardzo ściśle związana z optymalizacją. Istotnie, problem identyfikacji można sformułować jako następujący problem optymalizacji /por. [10]/: znaleźć

model  $M_0 \in \{M\}$  układu taki, że funkcjonał jakości przyjmuje wartość minimalną.

Takie /optymalizacyjne/ sformułowanie problemu identyfikacji ma istotne zalety metodyczne; pozwala bowiem przejrzyściej dostrzegać ważne niebezpieczeństwa, które można wyrazić np. w następujących pytaniach:

- a/ czy w danym problemie minimum /funkcjonału jakości/ jest osiągalne?
- b/ czy istnieje rozwiązanie jednoznaczne?
- c/ czy /ewentualna/ jednoznaczność jest uzależniona od doboru wymuszeń?
- d/ jeżeli problem nie prowadzi do jednoznacznego rozwiązania to w jaki sposób należy ograniczyć klasę hipotetycznych modeli  $\{M\}$  aby jednoznaczność zapewnąć?

Jeżeli problem optymalizacyjny ma jednoznaczne rozwiązanie to mówi się, iż klasa modeli  $\{M\}$  jest identyfikalna /por. [10]/. Niektóre problemy wyrażone w powyższych pytaniach były dla układów liniowych rozważane w literaturze /por. [16]/.

Sformułowanie problemu identyfikacji jako problemu optymalizacji wskazuje też na ścisłe związki między teorią identyfikacji i teorią aproksymacji /por. [17]/.

Proces identyfikacji opiera się na danych doświadczalnych /otrzymanych z badania reakcji układu/, które są zwykle obarczone błędami losowymi. Ważną klasę zagadnień identyfikacyjnych stanowią też problemy dotyczące "rozpoznawania" układów, których własności /parametry fizyczne/ powinny być opisywane w sposób probabilistyczny.

W takich /i analogicznych/ sytuacjach problemy identyfikacji są problemami statystycznej teorii estymacji. Takie sformułowanie daje możliwość wykorzystania metod teorii estymacji i teorii decyzji: w szczególności - metody największej wiarygodności /por. [18]/.

Warto podkreślić, że w przypadku stochastycznym pojęcie identyfikowalności można określać w terminach teorii estymacji. Zwykle układ określany jest jako identyfikowalny jeżeli odpowiednie estymatory są zgodne /por. [18, 19] a także [20]/.

Analiza problemów identyfikacji - jej metodyczna jakość i aplikacyjna przydatność - zależą w istotny sposób od umiejętności uwzględnienia wpływu błędów i innych "nieokreślonych" czynników. Błędy są nierozłącznie związane z wyborem modelu, z pomiarem reakcji układu, z zastosowaną /często przybliżoną/ metodą szacowania parametrów itp. Z tych względów analiza wrażliwości powinna być nieodłącznym składnikiem analizy identyfikacyjnej. Dodajmy, iż badanie wrażliwości nabiera w przypadku problemów identyfikacji znaczenia szczególnego, gdyż problemy te - jako problemy odwrotne - są z natury niestabilne, w związku z czym należy oczekiwać, iż nawet małe błędy w "danych wejściowych" spowodują duże niedokładności w wielkościach identyfikowanych.

#### 3.4. Teoria i eksperyment w identyfikacji

A. Identyfikacja jest z istoty swojej /z definicji/ związana z eksperymentem, dotyczy bowiem charakteryzowania układów /w przypadku identyfikacji parametrycznej - parametrów modelu/ na podstawie informacji otrzymanych z pomiarów. Więcej, jeśli w szczególności identyfikacja dotyczy tego etapu w modelowaniu, który ma na celu maksymalne zbliżenie modelu do układu realnego, to jest ona wprost eksperymentem /identyfikacyjnym/.

Z powyższego nie wynika jednak, iż identyfikacja miałaby być dziedziną wyłącznie doświadczalną lub należącą do eksperymentalnictwa.

Podobnie jak w przypadku innych dziedzin nauki najważniejsze jest to co jest przedmiotem i celem identyfikacji. Przedmiotem są układy i ich matematyczne modele, zaś celem - wypracowywanie metod oceny lub charakteryzacji struktury układów i parametrów ich modeli na podstawie obserwacji reakcji na różne wymuszenia. Jest oczywiste, że metody te mogą być zarówno teoretyczne /matematyczne/ jak i doświadczalne.

Identyfikacja matematyczna dostarcza ogólnych i logicznie konsekwentnych metod wnioskowania identyfikacyjnego stosowanych do rozwiązywania różnych konkretnych zadań. Podstawowy problem identyfikacji matematycznej można sformułować w następujący sposób:

dana jest określona informacja o ruchu układu /np. w postaci funkcji czasu na przedziale obserwacji  $[0, T]$  wywołanym przez wymuszenie należące do pewnej klasy; - należy podać matematyczną metodę wyznaczania charakterystyk układu /w szczególności - parametrów jego modelu/, przy których dany ruch jest realizowalny.

Jak już wspominaliśmy, w przypadku gdy matematyczny model układu jest apriori znany i jest zadany np. przez równanie różniczkowe, to powyższy problem identyfikacji jest matematycznym problemem odwrótnym dla danego równania różniczkowego /skalarne, wektorowe, cząstkowe itp./ Dlatego też można powiedzieć, że matematyczna identyfikacja parametryczna - to po prostu teoria określonej klasy problemów odwrótnych /por. przytoczony w p.3.1 cytat z pracy Bekey'a [11] /.

Nie ulega wątpliwości, że tworzenie takich ogólnych matematycznych metod identyfikacji stanowi podstawowe - z metodologicznego punktu widzenia - zadanie w zakresie identyfikacji układów.

Z drugiej strony - podobnie jak w innych dziedzinach nauki - identyfikacja eksperymentalna ma również bardzo istotne znaczenie. Przede wszystkim modelowanie matematyczne zjawisk realnych z którym identyfikacja wiąże się w sposób zasadniczy nie może obejść się bez eksperymentu identyfikacyjnego. Poza tym weryfikacja doświadczalna rezultatów identyfikacji matematycznej jest zawsze bardzo cenna.

B. Nasuwa się następujące pytanie: jakie badania eksperymentalne dotyczące układów realnych /np. konstrukcji i materiałów w mechanice/ należy zaliczać do identyfikacji a jakie nie?

Jednoznaczna odpowiedź na postawione pytanie jest trudna, gdyż identyfikacja nie jest jeszcze dziedziną w pełni skryształizowaną, a poza tym - jak wskazywaliśmy wyżej - w literaturze istnieje dość duża swoboda w formułowaniu problemów nazywanych jako problemy identyfikacji.

Mimo wskazanych trudności proponujemy następującą odpowiedź. Konkretne badanie doświadczalne jest identyfikacją lub nie zależy od tego jaki jest jego cel i metodyka. Jeżeli eksperyment



jest zaplanowany i przeprowadzony zgodnie z istotą pojęcia identyfikacji /wyżej sprecyzowanego/ to odpowiedź na postawione pytanie jest "tak", w przeciwnym przypadku - oczywiście "nie".

Przykład. Eksperymentalne badanie wzrostu szczeliny zmęczeniowej.

Jeżeli wzrost szczeliny zmęczeniowej generowany przez obciążenie konkretnego typu jest obserwowany bezpośrednio - np. przy pomocy mikroskopu elektronowego i jest to "typowo zmęczeniowe" badanie, tj. jego celem jest rejestrowanie przyrostu długości szczeliny w funkcji czasu, to nie ma powodu aby takie badanie nazywać identyfikacją wzrostu szczeliny. Jeżeli jednak eksperyment jest zaplanowany w taki sposób, że rozważana próbka materiału wraz z zainicjowaną w niej szczeliną jest traktowana jako układ, którego ewolucja w czasie /zmiany stanów zmęczeniowych charakteryzowane przez długość szczeliny/ jest opisana np. przez równanie różniczkowe /por. [18, 21]/ i pomiary wzrostu szczeliny mają służyć weryfikacji owego różniczkowego modelu lub ocenie jego parametrów, to taki eksperyment ma wszelkie znamiona identyfikacji.

#### 4. PLANOWANIE EKSPERYMENTU IDENTYFIKACYJNEGO

A. Zasadniczą cechą identyfikacji - wynikającą z określenia - jest to, iż charakteryzacji układu dokonujemy na podstawie obserwacji zachowania się układu, czyli na podstawie pomiarów. Fakt ten sprawia, iż pomiar a ogólniej - eksperyment stanowi ważny element identyfikacji. Jeżeli bowiem eksperyment będzie maksymalnie informatywny to większe są szanse na dobrą identyfikację.

Jednym z pierwszych zagadnień metodologicznych jakie się w tym kontekście pojawiają jest problem pomiaru - rozumianego zwykle jako postępowanie służące do reprezentowania właściwości za pomocą liczb. Pewne własności, takie jak długość czy ciężar mierzymy od stuleci i wydają się nam dzisiaj całkiem naturalne. Przy mierzeniu innych własności sprawa nie jest tak prosta. Powstaje np. pytanie: jakie właściwości można mierzyć?

Nie wnikając w szczegóły zaznaczymy tylko, iż ogólnie pomiar jest reprezentacją pewnego empirycznego systemu relacyjnego przez liczbowy system relacyjny. Istotą takiej reprezentacji jest przyporządkowanie elementom systemu empirycznego liczb w taki sposób aby obserwowane relacje pomiędzy elementami były odzwierciedlane przez odpowiednie relacje pomiędzy liczbami przypisanymi tym elementom. Pytanie jakie postawiliśmy wyżej jest po prostu problemem istnienia reprezentacji liczbowej i jej jednoznaczności. Zauważmy, że problem istnienia reprezentacji liczbowej /w teorii pomiaru/ jest szczególnym przypadkiem ogólnego zagadnienia reprezentacji czy modelowania. Mierzenie jakiejś własności jest zawsze tworzeniem prostego modelu liczbowego badanej właściwości.

Dodajmy, że możliwe są sytuacje, w których ustala się związki między empirycznymi systemami relacyjnymi a nieliczbowymi, formalnymi systemami relacyjnymi. Czytelnika zainteresowanego teorią pomiaru odsyłamy np. do [2, 22].

B. Ważną okolicznością przy przeprowadzaniu eksperymentu jest fakt, iż zwykle przedmiotem obserwacji /pomiaru/ jest nie cała populacja /charakteryzująca określoną właściwość zjawiska/ lecz jej próbka. Sądy o całej populacji oparte na badaniu próbki mogą być, w ogólności, prawdziwe lub fałszywe. Możliwość otrzymania sądów prawdziwych jest tym większa im stosunki panujące w próbce są bliższe stosunkom w całej populacji. Zgodnie ze statystyką matematyczną - próbka powinna być reprezentatywna. Z drugiej strony /niezależnie od reprezentatywności próbki/ wyniki pomiaru są zawsze obarczone losowym błędem, który ma wpływ na jakość informacji. Wynika z powyższego, iż w istocie wszędzie tam gdzie jest eksperyment jest też statystyka matematyczna, ta zaś wpływa na strategię eksperymentu. Chodzi o takie planowanie eksperymentu aby dawał on możliwie maksymalną informację o badanym zjawisku; jest to zadanie i cel teorii planowania /projektowania/ eksperymentu.

Zgodnie ze słowami G.C.Goodwin'a w [15] "Experiment design is concerned with the selection of conditions during an experiment so that it is maximally informative about those properties

of a system that are pertinent to a particular application".

Problemy jakie pojawiają się przy planowaniu optymalnego eksperymentu w mechanice są między innymi:

- a/ jaka powinna być optymalna liczba czujników przy pomiarze przemieszczeń, naprężeń /itp./ konkretnych elementów konstrukcji?
- b/ jakie jest optymalne rozmieszczenie czujników?  
/the measurement ports/
- c/ jak często /przy pomiarze procesów/ należy dokonywać pomiaru /the sampling times/

W ostatnich latach problemy wymienione powyżej przyciągają uwagę wielu badaczy /por. [23 , 24] /. W pracy [23] autor rozważa układ drgający o jednym stopniu swobody z celem identyfikacji jego parametrów. Przedmiotem analizy jest "informatywność" pomiarów reakcji i wymuszenia w zależności od częstości. Okazuje się, że optymalne częstości pomiarowe zależą tylko od charakteru wymuszenia zewnętrznego /i nie zależą od konkretnych wartości estymowanych parametrów/. Jest interesujące również, że może istnieć taki zbiór częstości  $\{\omega_i\}$  iż dane otrzymane z pomiarów odpowiadającym tym częstościom nie mają wpływu na estymatory parametrów.

W pracy [24] rozważany jest problem optymalnego rozmieszczenia czujników na drgających konstrukcjach /wymuszanych siłami losowymi/ w celu rekonstrukcji pola obciążeń. Zawarta w tej pracy analiza zasługuje na uwagę wszystkich, których celem jest przeprowadzanie eksperymentów identyfikacyjnych na konstrukcjach obciążonych siłami o charakterze losowym.

Inny problem polega na przedstawieniu rezultatów eksperymentów w zwartej postaci. Najczęściej nie wszystkie wyniki pomiarów są wystarczająco informatywne i naturalne jest dążenie do redukcji danych. Ważne znaczenie w redukcji danych ma ich selekcja. Zachodzi pytanie: jakimi zasadami powinniśmy się kierować przy redukowaniu danych?

Naturalnym wymaganie jest aby przy redukcji /i selekcji/ danych doświadczalnych zachowane było maksimum zawartej w nich informacji. W istocie można powiedzieć, iż podstawowe zadanie statystyki matematycznej polega na tym aby wybór próbki losowej

z populacji oraz wybór danych do opracowywania wyników czyniły zadość warunkowi maksimum informacji.

Inne zagadnienie teorii planowania eksperymentu - szczególnie ważne w kontekście identyfikacji - dotyczy sytuacji kiedy eksperymentator ma kilka/hipotetycznych/ modeli zjawiska i problem polega na tym aby jak najwłaściwiej eliminować modele nieadekwatne. Dla informacji Czytelnika powiemy, że np. Box i Hill w pracy [25] podają kryterium rozróżniania modeli otrzymane przy użyciu teorii informacji; dokładniej - używają oni entropii jako miary nieokreśloności związanej z rozróżnianiem modeli.

## 5. ZAKRES TEMATYCZNY IDENTYFIKACJI

W naukach empirycznych istnieje szereg kierunków badań, które mogą być /i często są/ określane przy użyciu pojęcia "identyfikacja".

Na pierwszym miejscu wymienimy chemię analityczną, która jednocześnie jest najstarszym kierunkiem eksperymentalnych badań identyfikacyjnych gdyż sięga swymi początkami daleko w starożytność. Istotnie, zgodnie z [26] "chemia analityczna jest to dział chemii zajmujący się ustaleniem składu jakościowego i ilościowego wszelkiego rodzaju materiałów spotykanych w przyrodzie lub wytwarzanych przez człowieka. Obejmuje ona wszystkie fazy procesu, którego rezultatem jest wynik analizy pozwalający zidentyfikować lub sklasyfikować badany materiał. Zajmuje się ona zagadnieniami: pobierania próbek, przygotowania wstępnego próbek, opracowania metod rozdzielania i wydzielenia oznaczonego składnika, jego identyfikacji, oznaczania ilościowego i w końcu metodami oceny wyników".

Zauważmy, że przedmiot i cel chemii analitycznej jest bliski przytoczonemu w p.3.1 określeniu identyfikacji przez Cypkina, dla którego identyfikacja - to określanie struktury i parametrów układu na podstawie obserwacji. Szczególnie bliski identyfikacji /w rozumieniu punktu 3.1/ jest dział chemii analitycznej zwany chemiczną analizą jakościową, której celem jest [26]: "wykrywanie /identyfikacja/ pierwiastków, jonów i cząsteczek metodami chemicznymi". Dodajmy, że metody

chemicznej analizy jakościowej /przynajmniej ich szeroka klasa/ polegają - podobnie jak metody identyfikacji innych układów - na tym, iż badaną /identyfikowaną/ substancję poddaje się określonym wymuszeniom /np. ogrzewaniu/ i obserwuje się jej reakcję.

Inną szeroko znaną dziedziną badań, którą tutaj należy wymienić jest radiolokacja - której celem jest wykrywanie /lub identyfikacja/ obiektów /przeszkód/ w przestrzeni i ich lokalizacja na podstawie obserwacji odbitych fal radiowych.

Metodycznie analogiczną do radiolokacji jest defektoskopia /ultradźwiękowa lub rentgenowska/; jest to dziedzina zajmująca się wykrywaniem i lokalizacją wad w materiałach konstrukcyjnych na podstawie obserwacji odbitych sygnałów /akustycznych lub elektromagnetycznych/ o odpowiedniej częstotliwości.

Inną pokrewną dziedziną badań jest diagnostyka akustyczna maszyn, której celem jest otrzymywanie informacji i orzekanie o stanie wewnętrznym maszyny /lub jej wydzielonej części/ na podstawie obserwacji sygnałów akustycznych generowanych przez pracującą maszynę.

Problemy i metody diagnostyki akustycznej są bardzo różnorodne /por. [27]/. Na przykład, często należy ocenić ilościowo pewne parametry stanu wewnętrznego maszyny lub też określić "stopień" zużycia części. Inne problemy dotyczą klasyfikowania stanów urządzenia technicznego, tj. określania, na podstawie sygnałów akustycznych, do którego z możliwych stanów należy badany obiekt; w sformułowaniu teoretycznym są to w istocie zagadnienia teorii rozpoznawania obrazów /por. [28]/.

Jest oczywiste, że niezależnie od konkretnych zadań diagnostyki, jej problemy i metody są z istoty swojej - identyfikacyjne. To samo należy powiedzieć o analizie chemicznej, radiolokacji, defektoskopii ultradźwiękowej itp. Czy jednak wymienione kierunki badań należy włączyć do dziedziny określanej jako "identyfikacja"? Odpowiedź na postawione pytanie <sup>xxx</sup> może być różna w zależności od tego jak szeroko chcemy rozumieć identyfikację jako dziedzinę badań naukowych.

Jeśli identyfikację rozumieć - jak to proponowaliśmy w p.3.1 - jako ogólną metodykę określania /charakteryzowania/ struktury i parametrów układów na podstawie obserwacji ich zachowania się,

to wymienione kierunki - obejmujące specyficzne procedury praktyczne określania struktury badanych układów - można uważać jako zastosowania metod identyfikacji lub jako specjalne kierunki identyfikacji /rozumianej jako dziedzina badań naukowych/. Należy mieć nadzieję, iż w przyszłości owe zastosowania staną się jednolitą i logicznie spójną egzemplifikacją ogólnej teorii identyfikacji.

## 6. PROBLEMY DIAGNOSTYKI AKUSTYCZNEJ

W poprzednim punkcie wymieniliśmy diagnostykę akustyczną maszyn jako jeden z kierunków zastosowań metod identyfikacji w mechanice. Tutaj chcemy poświęcić temu kierunkowi więcej miejsca aby wskazać z jednej strony - jego specyfikę i trudności, z drugiej zaś - atrakcyjność występujących problemów - por. [27, 29, 30].

Krąg zagadnień diagnostyki akustycznej ciągle się rozszerza. Oprócz problemów "tradycyjnych" dotyczących diagnozowania obiektów technicznych takich jak maszyny i mechanizmy ważne i aktualne są także problemy charakteryzowania stanu wewnętrznego układów różnej natury, np. biologicznych.

Ogólnie, przez diagnostykę akustyczną układów można rozumieć dziedzinę, której celem jest otrzymywanie informacji /i orzekanie/ o stanie wewnętrznym układu na podstawie generowanych przez ten układ wibracji i szumów.

Podstawowym zagadnieniem diagnostyki jest:

ocena strukturalnych parametrów układu /wewnętrznych parametrów stanu/. Jest to też - w szczególności - najbardziej charakterystyczny problem diagnostyki maszyn. Oceny tej dokonuje się na podstawie odpowiednich charakterystyk sygnału akustycznego; te charakterystyki noszą nazwę symptomów diagnostycznych. Oczywiście, warunkiem możliwości oceny jest aby oceniane parametry "brały udział" w generacji sygnału akustycznego a ich zmiany powinny powodować zmianę symptomów.

U podstaw sformułowanego wyżej problemu diagnostyki leży założenie o istnieniu odwracalnej zależności funkcjonalnej między parametrami stanu wewnętrznego układu:  $a_1, a_2, \dots, a_n$  i sympto-

mami  $P_1, P_2, \dots, P_m$

$$P_i = f_i(a_1, a_2, \dots, a_n), \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Jeżeli symptomy  $P_i$  - otrzymane w wyniku obróbki sygnału akustycznego - są dane, to problem polega na wyznaczeniu wielkości  $a_1, a_2, \dots, a_n$ . Jest oczywiste, że rozwiązywanie zależy od postaci funkcji  $f_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), które konstruuje się na podstawie analizy mechanizmów tworzenia generacji dźwięku w układzie i /lub/ danych doświadczalnych. Istotne pytanie jakie się wyłania jest następujące: jaka jest konieczna liczba symptomów dla określenia parametrów  $a_1, a_2, \dots, a_n$  przy znanych zależnościach  $f_i$ ? W przypadku gdy  $f_i$  są monotonicznymi funkcjami parametrów  $a_1, a_2, \dots, a_n$  wystarcza  $n$  symptomów. W przypadkach bardziej skomplikowanych liczba symptomów wzrasta.

Jest oczywiste, że istotnym /i trudnym/ problemem jest wybór symptomów diagnostycznych. Jeżeli wybrane symptomy są zbyt mało wrażliwe na zmiany parametrów  $a_i$  to istnieje możliwość, że nieokreślone - losowe - błędy pomiarów mogą być przyjęte jako oznaka zmiany parametrów wewnętrznych. Takie symptomy są mało informatywne.

Dla określenia najbardziej informatywnych symptomów należy znać strukturę sygnału akustycznego i zależność jego różnych charakterystyk od wewnętrznych parametrów układu. Prowadzi to do konstrukcji modelu diagnostyki, tj. schematu w którym charakterystyki sygnału są jednoznacznie związane z parametrami odpowiedzialnymi za jego generację.

Budowanie modelu diagnostyki jest problemem trudnym, gdyż w większości sytuacji /szczególnie w przypadku układów skomplikowanych/ proces generacji dźwięku jest zbyt złożony. W wielu sytuacjach sygnały akustyczne opisuje się przez procesy stochastyczne i poszukuje się takich ich charakterystyk, które byłyby informatywnymi symptomami stanu wewnętrznego układu. Wśród tych charakterystyk są takie wielkości jak momenty amplitud i gęstości widmowe ale także tzw. cepstrum i gęstości rozkładu prawdopodobieństwa.

Drugim ważnym zagadnieniem /lub lepiej klasą zagadnień/ akustycznej diagnostyki jest:

ocena jakości układu na podstawie wibracji i szumów tj. przede wszystkim - ocena takich charakterystyk jak: niezawodność, zużycie i stateczność.

Załóżmy, że w przestrzeni parametrów układu  $a_1, a_2, \dots, a_n$  istnieje pewna granica, która wyznacza zadowalającą jakość układu. Wtedy warunek dobrej jakości można zapisać w postaci

$$F(a_1, a_2, \dots, a_n) > 0.$$

Problem polega na tym aby na podstawie sygnału akustycznego generowanego przez funkcjonujący układ oszacować wielkość  $F$ . Zwykle aktualne wartości parametrów  $a_1, a_2, \dots, a_n$  są nieznanymi, mamy jednak model rozważanego układu dynamicznego, który określa postać zależności  $F$  od  $a_1, a_2, \dots, a_n$ . Oczywiście, można wybierać różne miary jakości układu /różne postacie funkcji  $F$  / - por. [31]. Na przykład, jeśli układ /drgający/ jest opisany liniowym równaniem różniczkowym o stałych współczynnikach a jakość układu rozumiana jest jako jego stateczność to  $F = \alpha_m$  gdzie  $\alpha_m$  - oznacza najmniejszą część rzeczywistą pierwiastków  $\sum_k$  równania charakterystycznego układu. Wielkość  $\alpha_m$  można oszacować w drodze korelacyjnej /lub widmowej/ analizy procesu  $Y(t)$  na wyjściu układu.

Jeżeli jakość układu technicznego będziemy charakteryzować wielkością zużycia elementów w procesie funkcjonowania, to zagadnienie jest trudniejsze. Zużycie jest bowiem rezultatem szeregu złożonych zjawisk natury mechanicznej, chemicznej itp. w związku z czym trudno jest określić w sposób zadowalający funkcję parametrów  $F(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , która charakteryzowałaby zużycie. Jeśli jednak jakość /lub zużycie/ układu charakteryzować przez wielkość jego zniszczenia zmęczeniowego, a to z kolei przez długość dominującej szczeliny zmęczeniowej to, wydaje się iż tego rodzaju modele jak te zaproponowane w pracy [21] mogą okazać się pożyteczne w omawianym tutaj kontekście.

Następnym problemem diagnostyki akustycznej jest: klasyfikacja możliwych stanów układu, które w ujęciu teoretycznym sprowadzają się do problemów rozpoznawania obrazów. Istota



tych problemów jest następująca. Zbiór symptomów  $[P_1, P_2, \dots, P_m]$  tworzy tzw. obserwację, w odróżnieniu od obrazu, któremu odpowiada stan układu /obiektu/. W m-wymiarowej przestrzeni obserwacji obrazom odpowiadają zbiory zwarte. Problem polega na tym aby na podstawie odpowiedniej miary podobieństwa /zgodności/ obserwacji określić owe zbiory zwarte. Inne podejście do klasyfikowania stanów układu polega na przekształceniu sygnałów akustycznych w informacje wizualne i zastosowanie procedur opracowanych dla klasyfikacji obrazów wzrokowych.

Innym interesującym problemem diagnostyki jest:

rozpoznawanie źródeł wibracji.

Polega on na wydzieleniu źródeł drgań a także na ilościowej ocenie wkładu każdego z możliwych źródeł do obserwowanego, sumarycznego pola akustycznego.

Jednym z interesujących zagadnień jest, na przykład, rozpoznanie, na podstawie analizy reakcji układu drgającego, czy źródłem wibracji są wymuszenia zewnętrzne czy parametryczne. Zagadnienie to można rozwiązywać analizując specyficzne cechy gęstości rozkładu prawdopodobieństwa reakcji układu na losowe wymuszenia parametryczne i na losowe wymuszenia zewnętrzne. Można to jednak czynić tylko w pewnych konkretnych przypadkach szczególnych.

Podstawowym zagadnieniem dotyczącym rozpoznawania źródeł wibracji mającym istotne znaczenie praktyczne jest określanie wkładu poszczególnych /jednocześnie istniejących/ źródeł drgań w ogólne pole sumaryczne. W literaturze istnieją metody rozwiązywania tego problemu dla pewnych uproszczonych sytuacji.

Dodajmy, iż zwykle sygnały charakteryzujące poszczególne źródła są otrzymywane z czujników umieszczonych na korpusie maszyny lub ze wskazań mikrofonu umieszczonego na zewnątrz maszyny. Istotny jest wtedy problem właściwego wyboru punktów pomiaru; wspominaliśmy już o tym w p.4 przy omawianiu planowania eksperymentu.

LITERATURA CYTOWANA

1. Hirsch M.W., Dynamical systems approach to differential equations, Bull.AMS, Vol.11, No 1, July 1984.
2. Pabis S., Metodologia i metody nauk empirycznych, PWN, Warszawa, 1985.
3. Klir J., Valach M., Cybernetic Modelling, Illife Books Ltd. London, SNTL-Publ.Techn.Lit., Prague, 1966.
4. Eykhoff P., System Identification - Parameter and State Estimation, J.Wiley, N.York, 1974.
5. Goodwin G.C., Payne R.I., Dynamic System Identification: Experiment Design and Data Analysis, Academic Press, N.York, 1977.
6. Cypkin J.Z., Osnovy informacijonnoj teorii idientifikacji, Nauka, Moskwa, 1984 /w jęz.rosyjskim/.
7. Kotkownik W.J., Nieparametriczieskaja idientifikacija i sglaszivanie danych, Moskwa, Nauka, 1985 /w jęz.rosyjskim/.
8. Bubnicki Z., Identyfikacja obiektów sterowania, PWN, Warszawa, 1974.
9. Mańczak K., Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania, Wyd.2, WNT, Warszawa, 1979.
10. Astrom K., Eykhoff P., System Identification - A Survey Automatica /Journal of the IFAC/, Vol.7, No 2, March 1971.
11. Bekey G.A., System identification - an introduction and a survey, Simulation, Vol.15, No 4, October 1970.
12. Podolak K., System identification in structural mechanics - A survey, Prace IPPT PAN, Warszawa, 1982.
13. Zadeh L.A., From circuit theory to system theory, Proc. IRE 50, pp.856-865, 1962.
14. Aoki M., Staley R.M., On input signals synthesis in parameter identification, Automatica, 6, 431-440, 1969.
15. Bekey G.A., Saridis G.N. /Eds/, Identification and system parameter estimation, Proc.Sixth IFAC Symp. /1982/, Pergamon Press, 1983.
16. Bellman R., Astrom K.J., On structural identifiability Math.Biosci., 1, 329-339, 1969.

17. Górecki H., Turowicz A., The approximation method of identification, Proc.IV-th IFAC Congress, Warsaw, paper 5.5., 1969.
18. Kazimierczyk P., Identyfikacja parametryczna stochastycznych układów dynamicznych opisanych dyfuzyjnymi procesami Markowa, Praca doktorska, IPPT PAN, 1986.
19. Astrom K.J., Buhlin T., Numerical identification of linear dynamical systems from normal operating records: in: Theory of Self-Adaptive Control Systems /Ed. P.H.Hammond/ Plenum Press, N.York, 1966.
20. Staley R.M., Yue P.C., On system parameter identifiability, Inform.Sci., 2, 127-138, 1970.
21. Sobczyk K., Modelling of random fatigue crack growth, Eng. Fract.Mech., /w druku/.
22. Pfanzagl J., Theory of measurement, N.York, Wiley, 1968.
23. Udvardia F.E., Some results on the optimal spacing of measurements in the identification of structural systems, Quart.Appl.Math., Vol.43, No 3, 1985.
24. Bołotin W.W., Planirowanie wibrozmierzenia na konstrukcjach ispytywanych w warunkach losowych /w jęz.rosyjskim/, Izv.AN CCCP - Mech. Tw.Teża, No 1, 1970.
25. Box G.E.P., Hill W.J., Discrimination among mechanistic models, Technometrics, Vol.9, No 1, 1967.
26. Minczewski J., Marczenko Z., Chemia analityczna, PWN, Warszawa, 1965.
27. Cempel Cz., Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn, WNT, Warszawa, 1982.
28. Kanal L., Patterns in pattern recognition: 1968-1974; IEEE Trans. on Inform.Theory, No 6, 1974.
29. Pawłow E.B., Akusticzeskaja diagnostika mechanizmow, Mszinostrojenije, Moskwa, 1971 /w jęz.rosyjskim/
30. Artoboliewskij I.I., Bobrownickij J.I., Gienkin M.D., Wwiedienije w akusticzeskiju dinamiku maszin, Nauka, Moskwa, 1979 /w jęz.rosyjskim/.
31. Kotulski Z., Sobczyk K., Quality measures of vibratory systems with random parameters /w przygotowaniu/.

## SPIS TREŚCI

1. Uwagi wstępne
2. Model matematyczny układu
3. Identyfikacja układów
  - 3.1. Pojęcie identyfikacji układu
  - 3.2. Klasyfikacja metod identyfikacji
  - 3.3. Związek z innymi metodami
  - 3.4. Teoria i eksperyment w identyfikacji
4. Planowanie eksperymentu identyfikacyjnego
5. Zakres tematyczny identyfikacji
6. Problemy diagnostyki akustycznej

Literatura cytowana