

34 / 1981

Waldemar Kurowski

PROBLEMY DIAGNOSTYKI
SYSTEMÓW TECHNICZNYCH

Praca habilitacyjna

P. 269a

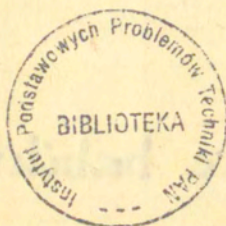


WARSZAWA 1981

Praca habilitacyjna

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 12 października 1981 r.

Zarejestrowana pod nr 34/1981



57079



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 170 egz. Ark.wyd. 9,3. Ark.druk.13,25

Oddano do drukarni w październiku 1981r.

Nr zamówienia 572/0

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul.Śniadeckich 8

Waldemar Kurowski
Zakład Układów Mechanicznych
IPP PAN

PROBLEMY DIAGNOSTYKI SYSTEMÓW TECHNICZNYCH
(ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM WIBROAKUSTYCZNEJ
DIAGNOSTYKI ŁOŻYSK TOCZNYCH) .

1. Wstęp

Intensywnie rozwijająca się w ostatnich dziesięcioleciach technika, wytwarza coraz bardziej skomplikowane urządzenia mechaniczne i zestawia je w układy produkcyjne zwane również systemami ^{*}, od których wymaga się wysokiej efektywności, niezawodności i innych cech będących warunkiem sprawnego i prawidłowego wykonania zadania eksploatacyjnego. Istnienie, funkcjonowanie i eksploatacja takich obiektów technicznych niesie z sobą wiele problemów, których rozwiązywanie ma istotne znaczenie w życiu i rozwoju społeczeństw. Jest to obecnie podstawowe zadanie nauki i techniki [80] . Wraz z postępującą politechnizacją życia, coraz większej wagi nabiera rozwiązywanie problemów badawczych dotyczących złożonych obiektów technicznych.

Zadania maksymalnego skrócenia i potaniania procesu projektowania, wytwarzania, wdrażania do produkcji i odnowy, jak również możliwie długiego utrzymania złożonych obiektów w stanie zdatności do działania, pociąga za sobą konieczność opracowania metod umożliwiających zebranie informacji o ^{*} Pojęcia: "system", "podejście systemowe", "cechy", "własności" zostaną szerzej omówione w dalszym ciągu pracy; teraz pojęcia te należy rozumieć intuicyjnie, zgodnie z ich potocznym znaczeniem.

własnościach funkcjonujących obiektów (oraz ewentualne poszukiwanie miejsc uszkodzeń), a następnie ich prawidłowe zinterpretowanie. Ogólnie biorąc można powiedzieć, że mają to być metody poszukiwania odpowiedzi na pytania: jaki jest obiekt?, i jak on się zachowuje?

Główny nacisk jest zatem położony na metody zbierania i interpretowania informacji dotyczących tych cech czy własności obiektów technicznych, które mają istotny wpływ na sposób i jakość realizacji zadań eksploatacyjnych. W praktyce najważniejszą częścią tej działalności jest wyznaczanie stanu obiektu, który jest rozumiany jako ciąg mierzalnych wielkości skalarnych charakteryzujących obiekt [56 , 58] . Przyjmuje się, że stan a częściej ich zbiór reprezentuje własności lub ogólniej cechy obiektu, ważne z punktu widzenia rozwiązywanego problemu ^{*}). Efektywna organizacja procesów poszukiwania diagnozy stanów obiektów technicznych jest podstawowym zadaniem diagnostyki technicznej.

Poszukiwanie jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych rodzajów działalności człowieka. Poszukuje się zawsze czegoś i to jest uznawane za cel poszukiwań. Nie można mówić o poszukiwaniu gdy cel jest od razu osiągalny, lub gdy wiedzie do niego tylko jedna z góry znana droga. Osiąga się cel przez poszukiwanie tylko wówczas, gdy prowadzi do niego wiele dróg, stawiających poszukiwacza przed koniecznością wyboru. W procesie rozumnego szukania, sposób wyboru kolejnych działań i podjęte decyzje muszą się opierać na pewnym planie. Jest on uwarunkowany głównie: charakterystyką celu, wiedzą z dziedziny, w której poruszamy się podczas poszukiwań, intuicją, możliwościami itp.

W diagnostyce technicznej celem poszukiwań będzie osiągnięcie (możliwie bliskiej prawdziwej) diagnozy stanów obiektów technicznych. Przy obecnych środkach badawczych nie mamy

*) Pojęcia te zostaną szeroko omówione w dalszym ciągu pracy.

możliwości stwierdzenia jaka diagnoza byłaby prawdziwa a w konsekwencji jak dobre jest uzyskanie przybliżenia. Ostateczne kryterium prawdy stanowi tu praktyka konstrukcji, technologii, eksploatacji, przechowywania i odnowy obiektu. Takie sformułowanie celu poszukiwań sprawia, że to postępowanie poszukiwawcze może być uznane za lepsze, które pozwoli uzyskać diagnozę bliższą prawdy.

Własności złożonych obiektów technicznych można w zasadzie ujmować i badać na podstawie własności ich wyodrębnionych części bez uwzględniania wzajemnych związków między tymi częściami. Ale jeśli celem poszukiwań jest diagnoza stanu obiektu jako całości, związki te muszą zostać w pełni uwzględnione. Takie podejście w sposób oczywisty implikuje konieczność i celowość stosowania analizy systemów do obiektów badanych w diagnostyce. Zagadnienie to zostanie szerzej omówione w dalszym ciągu pracy.

W procesie diagnostycznym człowiek - badacz poszukując diagnozy podejmuje działanie [80] , które pewien zbiór danych (wiedza ogólna, problem badawczy, narzędzia) przekształca na inny zbiór danych (diagnozę). Wiedza dotyczy badanego fragmentu rzeczywistości (ogólnej znajomości praw fizyki, własności badanego obiektu technicznego i zachodzących w nim procesów), problem jest narzucony przez konieczność postawienia diagnozy o pewnych stanach lub ich zbiorach, zaś narzędzia są niezbędnym czynnikiem do podjęcia poszukiwania.

Opierając się na dotychczasowych badaniach innych Autorów [1 , 59 , 68] można powiedzieć, że sam proces poszukiwania diagnozy polega na przetwarzaniu tych danych początkowych przez intelekt badacza, głównie przy wykorzystaniu metod dedukcji (ale również takich elementów działalności intelektualnej jak ośnienienie i intuicja [68]). Takie ujęcie procesu diagnostycznego sprawia, że do procesu diagnozowania należy również uznać za potrzebne i celowe podejście systemowe. W procesie tym zostaje niejako automatycznie uruchomiony system informatyczno - decyzyjny, który powinien zapewnić

prawkłdowe przeprowadzenie badań oraz opracowanie i wykorzystanie otrzymanych rezultatów dla postawienia diagnozy.

Z rozważań przeprowadzonych w publikowanych dotychczas w pracach innych Autorów [2 , 10 , 36 , 58] oraz pracach własnych [37 , 38 , 39 , 41] , można bez specjalnych zastrzeżeń przyjąć, że znane i eksploatowane obecnie obiekty techniczne, swoje istnienie i funkcjonowanie ^{ujawniają} poprzez typowy zbiór pewnych procesów. Są to procesy użytkowe (eksploatacyjne) i towarzyszące, zwane również resztkowymi lub pasożytniczymi (np. drgania, hałas, tarcie i zużycie, procesy termodynamiczne i in.). Niosą one informacje o stanach obiektu a w konsekwencji o wielu istotnych dla jego funkcjonowania własnościach i cechach. Oprócz niektórych własności, które stosunkowo łatwo można badać bezpośrednio (wymiary, ciężar, estetyka obiektu itp.), w większości spotykanych w praktyce przypadków badanie na drodze bezpośrednich obserwacji jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Dlatego przeważnie bada się łatwe do obserwacji zewnętrzne objawy procesów zachodzących w obiekcie i na tej podstawie stawia diagnozę o stanach reprezentujących te własności. Można zatem podobnie jak to uczyniono w pozycjach [12 , 26 , 37 , 38 , 45] bibliografii, w następujący sposób określić obszar zainteresowań, diagnostyki technicznej: jest to dziedzina nauki zajmująca się badaniem i oceną stanów reprezentujących cechy i własności obiektów technicznych poprzez ich bezpośrednią obserwację lub obserwację zewnętrznych objawów procesów (użytecznych, wibroakustycznych, tarcia i zużycia, termodynamicznych i in.) zachodzących podczas eksploatacji tych obiektów.

Takie ujęcie w sposób świadomy zawęża diagnostykę obiektów technicznych do przypadków kiedy obiekt funkcjonuje w sposób prawdkłdowy lub nie, pomijając zagadnienia poszukiwania uszkodzeń w klasycznym rozumieniu niezawodności z lat 60-tych.

Rozważania przeprowadzone w tej rozprawie będą dotyczyć wybranej grupy obiektów technicznych a mianowicie urządzeń mechanicznych. Pojęcie "urządzenia mechaniczne" jest tu

rozumiane tak jak w pracach [22] i [37] i całkowicie odpowiada potocznemu znaczeniu tego terminu. W tym ujęciu diagnostyka staje się działem teorii maszyn i mechanizmów.

Badania diagnostyczne mogą być prowadzone w sposób teoretyczny bądź doświadczalny. W przypadku badań teoretycznych "buduje się" model fizyczny urządzenia uwzględniający badany proces i formalizuje go przy pomocy równań matematycznych [77]. Następnie bada się równania i ich rozwiązania i wyciąga wnioski. Jest to zatem równoznaczne z rozwiązywaniem zadań z teorii maszyn i mechanizmów lub z mechaniki. W przypadku badań eksperymentalnych prowadzi się obserwację procesów zachodzących w rzeczywistym funkcjonującym urządzeniu, bądź niekiedy w jego materialnym modelu *).

W tej pracy ograniczono się do omówienia problematyki badań diagnostycznych, eksperymentalnych. W praktycznych zastosowaniach w budowie maszyn, badania eksperymentalne odgrywają znaczącą a niekiedy decydującą rolę. Ogólnie biorąc można powiedzieć, że główne kierunki badań diagnostycznych zmierzają do stawiania diagnoz w zakresie oceny jakości, nowoczesności, trafności rozwiązania konstrukcyjnego czy technologicznego, naprawialności, cech funkcjonalnych, materiałowych, obsługowych, ergonomicznych, niezawodnościowych itp. Dużą rolę odgrywa diagnostyka jako dawca informacji dla badań teoretycznych. Informacje te mogą służyć do budowy modeli matematycznych (np. model dyskretny czy ciągły w przypadku badań dynamicznych), do wyznaczania pewnych wielkości niezbędnych do matematycznego opisu modelu (np. masy, sztywności, tłumienia w modelach dynamicznych) oraz do weryfikacji modeli matematycznych.

Jedną z dziedzin budowy maszyn, w której diagnostyka pełni bardzo ważną rolę jest identyfikacja dynamiczna, rozumiana jako badanie optymalnych (z punktu widzenia przyjętego

*) W niektórych pracach jak np. [2, 3, 4, 31, 32, 33, 34, 35] mówi się o obserwacji pola zjawiskowego.

kryterium } modeli matematycznych urządzeń mechanicznych [57 , 82] . Wszelkiego rodzaju badania modeli matematycznych dają wiarygodne informacje o rzeczywistym obiekcie tylko wtedy gdy model jest dobrym odzwierciedleniem systemu. W procesie zbudowania takiego modelu, eksperymentalne badania diagnostyczne mają do spełnienia szereg zadań.

W pracy [57] Autorzy jako główne zadania wymieniają:

- 1/ badania obiektu bez wad (pomiary sygnałów wejściowych i wyjściowych),
- 2/ badania obiektów z wadami,
- 3/ opracowanie i interpretacja rezultatów badań dla celów identyfikacji modelu.

Przeprowadzone rozważania czynią oczywistym fakt, że tak rozumiana dziedzina diagnostyki staje się niezmiernie obszerna zaś charakter metod diagnostycznych bardzo skomplikowany. Z góry można przewidzieć, że badania diagnostyczne nie będą możliwe bez abstrahowania od wielu aspektów nieistotnych, nieokreślonych lub utrudniających analizę na żądanym poziomie dokładności. Stawia to przed badaczem konieczność wyboru do rozważań tego co uzna za istotne a pominięcie wszystkiego co zbędne. Taka "samowola" w procesie poznawania jest w pełni uzasadniona i ogólnie stosowana, bowiem " nie można bowiem objąć tego co nieograniczone " [84] . Istotną rolę w tym procesie odgrywa, oparte na zasadach systemowych, modelowanie badanych fragmentów rzeczywistości. Bywają to zarówno podlegające diagnozie obiekty (w omawianym przypadku urządzenia mechaniczne), jak i same procesy postępowania diagnostycznego. Właśnie modelowanie umożliwia odpowiednie do potrzeb usystematyzowanie i uproszczenie wybranego do badań fragmentu rzeczywistości, jego opis jakościowy a niekiedy również ilościowy w postaci modelu matematycznego.

Mnogość procesów zachodzących w urządzeniach mechanicznych daje możliwość wyboru do celów diagnostycznych objawów najbogatszych w informację, a równocześnie możliwych do obserwacji na drodze pomiarowej. Praktyka ostatnich lat potwierdza,

że w przypadku współczesnych urządzeń mechanicznych są ^{to} bardzo częste procesy wibroakustyczne. Bez wdawania się w szczegóły definicyjne można powiedzieć, że pod pojęciem procesu wibroakustycznego rozumie się każdy proces dynamiczny (mechaniczny lub akustyczny) zachodzący w urządzeniu mechanicznym w widmie częstotliwości od kilku do kilkudziesięciu tysięcy herców. Ocena własności urządzeń mechanicznych na podstawie badań ich procesów wibroakustycznych nosi nazwę diagnostyki wibroakustycznej [2, 10, 12]. Ten rodzaj diagnostyki charakteryzuje się całym szeregiem właściwości, które czynią zadość wspomnianym postulatom. Właściwości te będą szerzej omówione w dalszych częściach pracy. Diagnostyka techniczna rozumiana jako nauka kierująca się własnymi sposobami podejścia do badanych obiektów, metodami postępowania badawczego, modelami itp. ma szansę odegrać rolę integrującą w badaniach urządzeń mechanicznych. Takie badania zwłaszcza w przemyśle są podejmowane bardzo często na skutek doraźnej potrzeby. Na ogół ma to miejsce wtedy, gdy eksploatowany obiekt nie spełnia stawianych mu wymagań dotyczących wydajności, niezawodności, długotrwałości działania lub podobnych własności. Użytkownik żąda oczywiście szybkiego usunięcia niedomagania grożąc zazwyczaj odmową przyjęcia dalszych dostaw, zerwaniem kontraktu itp. Formuluje się więc pośpieszne zadanie badawcze, organizuje zespół, daje środki i niecierpliwie czeka rozwiązania. Po jego otrzymaniu usuwa się usterkę i przeważnie czeka na ujawnienie się następnych niedomagań. Po czym sprawa zaczyna się od nowa i ma podobny przebieg. W rezultacie, działalność badawcza we współczesnej technice jest w dużej mierze poświęcona badaniom, które zwykło się nazywać przyczynkowymi. Dotyczy to zwłaszcza obszaru, w którym konstruowanie i wytwarzanie urządzeń mechanicznych i maszyn styka się bezpośrednio z eksploatacją. Na obecnym poziomie rozwoju metod diagnostycznych istnieją możliwości wprzęgnięcia takich badań w system wzbogacania wiedzy o danym obiekcie. Realizacja tych możliwości wydaje się leżeć w sferze metodologii diagnozowania, zaś kierunkiem

działań powinno być osiągnięcie uogólnień metod badawczych i uzyskiwanych rezultatów na możliwie dużej populację obiektów takich samych jak badany, jak również na zbiór populacji i obiektów podobnych do badanego. Wydaje się, że przyjęcie jednolitego sposobu ujęcia problemu badawczego, sformułowania zadania, jego rozwiązania, stawiania diagnozy i opracowania wniosków stwarza szansę uzyskania tych uogólnień. Podstawę praktycznej realizacji tych postulatów, daje właśnie wspomiane już systemowe ujęcie rozwiązywanych problemów i badanych obiektów. Wykorzystując metody analizy systemów trzeba ze zbiorów badań przyczynkowych, odpowiednio uformowanych, budować problemy badawcze wyższej rangi i w ten sposób stwarzać możliwości uzyskania rozwiązań natury ogólniejszej. W praktyce oznacza to, że zadania badawcze będą formułowane precyzyjniej, procesy poszukiwania diagnozy będą szybsze, tańsze, bardziej niezawodne, rezultaty będą prezentowane w postaci umożliwiającej ich wzajemne porównywanie i uzupełnianie, zaś wszystko to będzie można wkomponować w system wiedzy o danym problemie.

Innymi słowy chodzi o to aby prócz rozwiązywania zagadnień, które z góry są potraktowane i zaplanowane jako integralne problemy, cała różnorodność i mnogość badań wycinkowych, niejako automatycznie również przyczyniała się do rozwoju określonych kierunków wiedzy.

Jednym z niezastąpionych mechanizmów, powszechnie stosowanym w maszynach i urządzeniach, do którego mogą się odnosić powyższe uwagi są łożyska toczne.

Łożyska toczne stanowią element stosowany w większości maszyn, mechanizmów i urządzeń. Obecnie nie można sobie wyobrazić postępu w budowie maszyn bez postępu w budowie i eksploatacji łożysk. Dokładność realizacji procesów produkcyjnych, zmniejszenie wymiarów i ciężarów urządzeń przy równoczesnym wzroście przenoszonych obciążeń i wiele innych czynników, które składają się na wysoki standard nowoczesnych maszyn i urządzeń mechanicznych, nie była by możliwa bez wysokospraw-

-nych łożysk. Podstawowym czynnikiem umożliwiającym ich budowę i efektywną eksploatację jest gruntowna wiedza o ich własnościach i sposobie funkcjonowania^{*)}. Dotyczy to przede wszystkim łożysk zabudowanych i pracujących w urządzeniach mechanicznych i maszynach. Szczególnie pożyteczne są te metody, które umożliwiają ustalenie stanu np: zużycia łożysk funkcjonujących w urządzeniu bez zakłócenia procesu funkcjonowania. Duże możliwości realizacji tego postulatu dają metody diagnostyki wibroakustycznej. Uzyskane w rezultacie takich badań wiadomości dotyczące z jednej strony umiejętności ich badania przy wykorzystaniu bogatych w informacje objawów, a z drugiej znajomości sposobu ich funkcjonowania i własności są obecnie bardzo poszukiwane przez konstruktorów, technologów i eksploataatorów produkujących i użytkujących łożyska. Odpowiednio wykonane i zaprezentowane, podając rozwiązanie konkretnego zadania badawczego, mogą one również stanowić wkład w rozwój ogólnej wiedzy o łożyskach.

2. Cel i zakres pracy

Na podstawie istniejącego stanu rzeczy można stwierdzić, że rozwój diagnostyki technicznej jako dziedziny nauki przebiega od konkretnych zastosowań [15, 16, 40, 51, 54, 55] do uogólnień mających charakter zarówno formalny jak i naukowy - metodologiczny. Potrzeba tych uogólnień wynika w dużej mierze z konieczności uporządkowania diagnostyki jako działu teorii maszyn i mechanizmów. Wymaga to najpierw osiągnięcia ogólnie zaakceptowanych sposobów rozumowania i języka, które pozwolą opracować podstawy teoretyczne diagnozowania. Podstawy te umożliwiają poczynienie wspomnianych uogólnień metodologicznych (np: zaproponowanie ogólnej metody rozwiązywania zadań diagnostycznych). Z drugiej strony coraz wyraźniej widocznie jest także zapotrzebowanie ze strony praktyki. Zagadnienie sprawnego i taniego stawiania wiarygod-
*) Jakże ono jest? , jak ono funkcjonuje?

nej diagnozy w przypadku dużych i skomplikowanych systemów technicznych staje się potrzebą nieomal odczuwalną. Trzeba się liczyć z faktem, że w niedalekiej przyszłości zaistnieje konieczność automatyzacji i optymalizacji procesów diagnozowania, dla zapewnienia stałej kontroli i podejmowania decyzji wchodzących w skład szeroko rozumianego sterowania takich systemów.

W tej pracy zostanie zaprezentowana pewna koncepcja uogólnienia, które zdaniem autora może być przydatne w diagnostyce do oceny badanych urządzeń. Przedstawiona będzie propozycja potraktowania urządzenia mechanicznego i procesu postępowania badawczego jako dwóch podsystemów tworzących system diagnostyczny. Dla podsystemu-urządzenie, zostanie zbudowany uniwersalny model (tzw. model cybernetyczny) i podjęta próba formalnego opisu tego modelu dla potrzeb diagnostyki, z uwzględnieniem jego budowy i procesów zachodzących w nim podczas funkcjonowania. Na bazie tego opisu zostanie zaproponowany uproszczony model odwzorowania poszukiwanych własności urządzenia przez możliwe do obserwacji objawy. Rozważania te prezentujące zarys teoretycznych podstaw diagnozowania, mają w zamierzeniu autora połączyć przesłanki filozoficzne podejścia systemowego z praktyką badań maszyn i mechanizmów. Umożliwiają one również, zaproponowanie uniwersalnego modelu procesu popostępowania badawczego, w postaci ogólnej metody organizacji procesów poszukiwania diagnozy. Zostanie zatem omawiane od strony metodologii to co w pozycjach [2 , 3 , 4 , 10 , 37 , 38 , 39 , 58 , 61] jest rozumiane pod pojęciem system diagnostyczny^{*)}.

W współczesnej literaturze istnieje niewiele pozycji takich jak: [3 , 10 , 12 , 26 , 32 , 49 , 56 , 58 , 61] , w których Autorzy podejmują pewne próby podobnych uogólnień, głównie w

*) Na system diagnostyczny składają się w tych pracach m.in. obiekt diagnozy, zestaw aparatury pomiarowej i przetwarzającej dane, personel prowadzący badania itp. Elementy te współpracując harmonijnie ze sobą realizują proces diagnostyczny dla danego obiektu.

sposób opisowy. Jest to materiał w stosunku do innych dziedzin, bardzo ubogi. Dlatego dla zaproponowania nowszego opracowania, należy oprócz wymienionych wyżej pozycji, wykorzystać własne doświadczenie badawcze oraz prace podstawowe dotyczące głównie teorii systemów [50, 60, 63, 64, 70, 74], cybernetyki [6, 7, 23, 29, 47, 48, 72], teorii automatycznej regulacji [25, 71, 79], naukoznawstwa [1, 59, 80], filozofii [27, 28, 77, 83] i innych dziedzin nauki.

Trzeba pamiętać, że na tym poziomie uogólnień, modelowanie urządzeń mechanicznych a tym bardziej działanie człowieka podczas realizacji procesu diagnostycznego nie dopracowały się takiego aparatu matematycznego, który umożliwiłby ich ilościową analizę. Wydaje się jednak, że brak takich możliwości, nie może być przeszkodą w staraniach ich osiągnięcia. Wydaje się również, że krokiem w tym kierunku mogą być wszelkie uogólnienia natury metodologicznej oraz próby formalnego zapisu pojęć podstawowych i ich wzajemnych relacji. Zastosowane jako "filozofia" postępowania mogą dodatkowo stanowić element integrujący diagnostykę jako naukę oraz ma być w praktyce czynnikiem zwiększającym prawdopodobieństwo osiągnięcia celu tzn. postawienia prawdziwej diagnozy przy możliwie małym wysiłku. Innymi słowy powstaną przesłanki do tego aby działanie systemu diagnostycznego było przydatne i celowe w sensie prakseologicznym. Wg. T. Kotarbińskiego [27]: "chodzi o ocenę działania z punktu widzenia walorów technicznych: przydatności, celowości lub ogólniej z punktu widzenia sprawności, która sprowadza się do dwóch głównych zalet - skuteczności i gospodarności. Skuteczność polega na tym, że robi się to co jest dobrym środkiem do realizacji postawionego celu i nie popełnia pod tym względem błędów. Gospodarność czyli ekonomiczność zasadza się na tym, że operuje się w sposób oszczędny i wydajny, posiadanymi zasobami miejsca, czasu, materiału, narzędzi i energii".

Na bazie zaproponowanej teorii oraz uogólnienia, zostaną w dalszych częściach pracy omówione i usystematyzowane podsta-

wowe problemy diagnostyki technicznej urządzeń mechanicznych ze szczególnym uwzględnieniem diagnostyki wibroakustycznej. Rozważania zostaną ograniczone do diagnostyki funkcjonujących urządzeń mechanicznych, zaś szczególny nacisk zostanie położony na zagadnienia metod pomiarów i przetwarzania danych.

Korzystając z uogólnień teoretycznych i analizy metod diagnostycznych funkcjonujących urządzeń, zostanie przedstawiona następnie, metoda badania zużywania się łożysk tocznych eksploatowanych w małych maszynach elektrycznych, oraz uzyskane tą drogą rezultaty.

Nie trzeba uzasadniać, że niezajomość stanu zużycia łożysk, która może spowodować nieprzewidzianą awarię bądź przedwczesne wycofanie urządzenia z eksploatacji z obawy przed tą awarią, przynosi straty materialne i moralne. Proponowana metoda i uzyskane rezultaty należą do grupy prac, rozważających zagadnienia diagnostowania podzespołów maszyn i urządzeń pozostających w ruchu ciągłym. W zamierzeniu autora ma ona być jednym z elementów wzbogacających system wiedzy o łożyskach i ich diagnostyce eksploatacyjnej podobnie jak prace [65, 66, 67].

Przedstawione w pracy podstawy teoretyczne i uogólnienia są rezultatem obserwacji istniejących tendencji i sposobów postępowania w badaniach interdyscyplinarnych, głównie z zakresu techniki. Opierają się one na pracach podstawowych i aplikacyjnych innych badaczy oraz są podsumowaniem poprzednich prac i doświadczeń autora zebranych głównie podczas badań eksperymentalnych różnych typów urządzeń mechanicznych i maszyn.

W tej rozprawie zamieszczono częściowo oryginalny a częściowo opracowany od nowa i poprawiony materiał publikowany w innych pracach autora głównie w poz. [45] a także w poz. [37, 38, 39, 41, 42, 43, 44].

3. Pojęcie podstawowe

3.1^{*)} Uwagi ogólne

Od kilku dziesięcioleci jesteśmy świadkami stale postępującej żywiłowej integracji różnych dziedzin nauki. W naukach ścisłych a zwłaszcza w naukach technicznych - stosowanych, integracja ta była i jest w dużej mierze powodowana koniecznością opracowywania coraz bardziej skomplikowanych problemów konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych. Istnienie i funkcjonowanie dużych i bardzo złożonych maszyn i urządzeń mechanicznych, układów kontroli i sterowania, organizacji produkcyjnych i obronnych itp., w coraz większym stopniu wymaga udziału i rozwijania różnorodnych dziedzin nauki. W przodujących krajach świata powoływane są do realizacji programy naukowo-badawcze, których celem jest rozwiązywanie szczególnie trudnych zadań, zatrudniające specjalistów z różnych, niekiedy bardzo odległych dziedzin wiedzy ^{*)}. Z drugiej strony nieustanny rozwój badań w zakresie nauk podstawowych, powoduje iż wraz ze wzrostem poziomu poznania rozpatrywane zjawiska jawią się badaczom jako coraz bardziej skomplikowane, m.in. dzięki dostrzeżeniu ich dynamicznego charakteru, coraz większej ilości czynników wpływających na ich przebieg itd. W konsekwencji tego postępu pojawiają się nowe problemy, które muszą być wszechstronnie badane z wielu, niekiedy bardzo różnych punktów widzenia. I tak jak w poprzednim przypadku wymaga to coraz częściej zaangażowania do badań jednego problemu, różnych dziedzin nauki. Taka sytuacja ma również w pewnej mierze miejsce w diagnostyce urządzeń mechanicznych.

^{*)} Jako przykład można tu wymienić: program walki z nowotworami podjęty przez ZSRR i USA, amerykański program badań kosmosu NASA, brytyjsko-francuski program budowy naddźwiękowego samolotu pasażerskiego CONCORDE, nasze krajowe programy rządowe. Jako dygresję można tu powiedzieć, że praktyka dowiodła, iż realizacja takiego programu oprócz osiągnięcia celu przynosi wielkie korzyści w innych dziedzinach życia, których wartość dorównuje niekiedy nakładom poniesionym na realizację samego programu, i tak np. w przypadku programu NASA był to wielki postęp w łączności, automatyce, cyfronice. W przypadku programu CONCORDE w kolejnictwie, metalurgii itp.

Dyscyplina ta do rozważania badanych problemów, angażuje m.in. specjalistów w zakresie fizyki obserwowanych procesów, elektroników-pomiarowców, inżynierów eksploatatorów oraz eksperymentatorów itp.

Rozwój techniki, ekonomiki, socjologii, fizjologii i innych dziedzin życia postawił do rozwiązania nowe zadania dotyczące analizy skomplikowanych i dużych obiektów. Stopień ich złożoności sprawił, że dotychczasowe środki jakimi dysponowała nauka dla ich badania okazały się niewystarczające. W tej sytuacji traktowanie obiektów, zjawisk i sytuacji jako systemów, naturalnych trafiło na wyjątkowo podatny grunt. Umożliwiło ono rozwiązanie wielu problemów i spowodowało widoczny postęp w nauce i technice. Równocześnie zastosowanie do analizy jakościowej i ilościowej funkcjonowania, regulacji i sterowania dużych systemów naturalnych tych samych schematów postępowania teorii automatycznej regulacji, które używane są do rozwiązania zagadnień sterowania klasycznych układów mechanicznych czy elektronicznych dały jakościowo nowe rezultaty a w konsekwencji także wymagania^{X)}.

3.2. System naturalny

Systemowe podejście do różnego rodzaju zjawisk badanych przez człowieka zaczęło się rozwijać kilkadziesiąt lat temu.

*-) Spowodowało to żywiołowy rozwój badań który dał w efekcie początek cybernetyce. Cybernetyka (do greckiego "kybernetes" to znaczy: sternik łodzi) została niejako oficjalnie zapoczątkowana w 1948 roku kiedy to we Francji i USA wydano książkę Norberta Wienera pt: Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine (tzn: Cybernetyka czyli sterowanie i łączność w zwierzęciu i maszynie). Ogólnie można powiedzieć, że cybernetyka jest nauką o zachowaniu się systemów naturalnych pod wpływem pewnych czynników zewnętrznych (np: regulacji). A zatem w cybernetyce można także widzieć narzędzie do analizy systemów naturalnych.

Wiąże się to z odejściem od mechanicystycznego pojmowania otaczającego nas świata. Nowy system organicystyczny odrzuca stałość struktury otaczających nas zjawisk, przyjmując jej dynamikę. Uwzględnienie właśnie dynamiki czynników wpływających na zjawisko badane oraz samego zjawiska, jest istotą podejścia systemowego. Takie podejście umożliwia między innymi również wszechstronne rozpatrywanie procesów zachodzących w urządzeniach mechanicznych, powiązań tych procesów i ich zależności od wielu czynników zewnętrznych, wynikających z faktu, że badane urządzenie funkcjonuje jako element systemu produkcyjnego. Pod tym kątem można wybrać z zachodzących w urządzeniu procesów te, które są najbardziej istotne dla funkcjonowania całego systemu.

Dotychczas nie istnieje jednoznaczna i ostateczna definicja systemu. Bez wdawania się w szczegóły można powiedzieć, że we wszystkich próbach zdefiniowania systemu, np. pozycje [63 , 64 , 70], operuje się takimi kategoriami, jak: przedmiot, cecha, relacja, należenie i całość. Ogólnie biorąc można przyjąć, że system to zbiór przedmiotów połączonych pewnymi relacjami ^{*}. Istotą rzeczy jest tu fakt należenie do zbioru

^{*} Za Wielką Encyklopedią Powszechną, PWN, Warszawa, 1968, Tom 11: "system-wszelki skoordynowany wewnętrznie i wykazujący określoną strukturę układ elementów, rozpatrywany od zewnątrz jest całością, rozpatrywany od wewnątrz-zbiorem, do którego przynależność warunkuje związki między wszystkimi jego elementami. Ogół elementów systemu (w tym rozumieniu) nazywa się składem, ogół związków (relacji) pomiędzy elementami, uwarunkowanych przez ich przynależność do systemu, jego strukturą". W tej rozprawie przyjęto dodatkowo następujące aksjomaty:
1/. Na system działa środowisko tzn. posiada on wejście, system działa na środowisko tzn. posiada wyjście oraz podlega zakłóceniom (za U. Porterem [60]).

2/. System ma przynajmniej jedną cechę, która wyróżnia go od innych systemów.

oraz tworzenie całości funkcjonującej w skoordynowany sposób. Element zakwalifikowany do zbioru musi być odpowiedni, czyli dzięki posiadaniu pewnych cech dostosowanych do innych elementów. Wybór elementów, które mają być zaliczone do tego zbioru, zależy od potrzeb i celów dla których system jest kreowany. Dla rozpatrywania systemów z jakimi spotykamy się w praktyce wygodnie jest zdefiniować za V. Sadowskim [70] element systemu jako przedmiot pozostający we wzajemnej zależności z otoczeniem. Taka definicja elementu jako składnika systemu jest użyteczna dla rozwinięcia teorii mnogościowej koncepcji systemu, na której w dalszych częściach pracy opierać się będzie objaśnienie zagadnień diagnozowania. Podobnie jak w poz. [70] należy dodatkowo zastrzec że: "własność bycia elementem nie wyklucza tego, że ten sam przedmiot może okazać się w określonych warunkach także systemem". Powoduje to, że np: elementy o złożonym charakterze budowy i funkcjonowania ^{*} mogą być przy bardziej szczegółowej analizie, traktowane jako oddzielne systemy lub podsystemy tworzące system pierwotny. Uogólniając powyższe rozważania można powiedzieć, że ważną własnością systemów jest to, że mogą one być łączone, tworząc większe systemy lub dzielone na podsystemy.

Aby utworzony zbiór elementów mógł być traktowany jako system, muszą one zostać związane relacjami, które utworzą z nich pewną organizację. Ta organizacja wewnątrz systemu determinuje mechanizm jego działania, zaś na zewnątrz zapewnia skoordynowane (niekoniecznie pozytywne) oddziaływanie systemu na jego otoczenie i czyni z niego odrębną całość. W chwili kiedy tak pojmowany system zaczyna funkcjonować pojawia się cały układ wzajemnych oddziaływań między systemem i środowiskiem. W teorii przyjmuje się, że oddziaływanie środowiska na system odbywa się tak samo jak ma to miejsce przy wspomnianym dzieleniu i łączeniu systemów. Zarówno w

^{*}) Np. łożyska toczne funkcjonujące w urządzeniach mechanicznych.

pierwszym jak i w drugim przypadku wzajemne oddziaływanie odbywa się tylko poprzez wejście i wyjście. W przypadku podziałów systemów na części taka operacja nazywa się sprzężaniem. Istotą sprzężenia jest to, że systemy lub podsystemy, które zostały sprzężone, zachowały swe indywidualne własności tzn. zostały tym czym były przed sprzężeniem. Badanie różnych obiektów zjawisk i sytuacji jako systemów daje duże możliwości porównywania bez względu na ich charakter przedmiotowy [48]. Podejście systemowe prowadzi zatem do pewnych uniwersalnych prawidłowości (głównie metodologicznych), przydatnych w różnych dziedzinach nauki.

Na obecnym etapie rozwoju techniki urządzenie mechaniczne nie może być rozpatrywane jako obiekt oderwany, istniejący i działający pojedynczo. Z reguły bowiem, pracuje ono w składzie pewnego, sterowanego przez człowieka systemu i wykonując swoją funkcję współpracuje z elementami tego systemu. W systemach rozpatrywanych w teorii maszyn i mechanizmów, elementami są z reguły maszyny i urządzenia napędowe. Maszyny i urządzenia wchodzące w skład systemu produkcyjnego muszą funkcjonować tak aby wykonywane przez nie czynności i wzajemne oddziaływanie zapewniały podczas eksploatacji wysoką jakość, efektywność, funkcjonalność i niezawodność^{*} całego systemu. Innymi słowy, powinny być w stanie zdadności oraz mieć tak dobrane parametry konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne, aby mogły sprawnie ze sobą współdziałać. Dla sprawnego działania jako element pewnego określonego systemu, urządzenie musi spełniać szereg warunków dotyczących jego walorów technicznych i społecznych, które "dopasowują" go do tego systemu, niejako determinują jego przydatność. Powyższe rozumowanie dotyczyło systemów potraktowanych w kategoriach "makro" ale identyczne rozumowanie można prze-

*] Szeroka dyskusja tych pojęć zostanie przeprowadzona w dalszych fragmentach pracy. Obecnie należy je rozumieć w sensie potocznym.

prowadzić w kategoriach "mikro", przyjmując jako rozpatrywany system pojedynczą maszynę czy urządzenie. Współpracującymi elementami takiego systemu będą wtedy podzespoły lub poszczególne części (np: skrzynka przekładniowa, stół z napędem, - - wrzeciono itp. frezarki, łożyska silnika elektrycznego itd.). Do tak pojętego systemu będą się również odnosić powyższe uwagi dotyczące funkcji, funkcjonalności i efektywności. Sposób podejścia do systemu i jego podział będzie zależał od celu rozważań. Zaś analiza wybranych zachodzących w systemie procesów umożliwi jakościowe a często także ilościowe scharakteryzowanie własności poszczególnych elementów i całego systemu.

W ten sposób dochodzi się do cybernetyki jako nauki zajmującej się zbiorami elementów lub podsystemów połączonych łańcuchami oddziaływań przyczynowo-skutkowych niezależnie od ich charakteru przedmiotowego. W takich systemach naturalnych przebiegają zmiany w określonych kierunkach, stanowiące procesy ich rozwoju. Można stwierdzić istnienie szeregu analogii w budowie i funkcjonowaniu różnych systemów. Najważniejsza z nich to analogia strukturalna procesów zachodzących w różnych systemach (np. w sposób bardzo uproszczony można to stwierdzić dla procesów zachodzących w układzie nerwowym i sieci telefonicznej, w krwioobiegu i komunikacji miejskiej itp.). To właśnie jest podstawą do stworzenia całego aparatu pojęć, schematów rozumowania i języka jakim posługuje się cybernetyka, a w rezultacie podania zasad ogólnych którym podlegają różne systemy naturalne.

Te możliwości czynią cybernetykę, bardzo pożytecznym narzędziem w wielu dziedzinach wiedzy m.in. teorii, budowie i eksploatacji maszyn i urządzeń mechanicznych w ogóle a w ich diagnostyce w szczególności. Można powiedzieć, że w tym zakresie cybernetyka świadczy usługi w trzech pozornie róż-

-nych dziedzinach a mianowicie :

- przy stawianiu i rozwiązywaniu problemów badawczych,
- przy badaniu procesów zachodzących w urządzeniach mechanicznych,
- przy odczytywaniu , opracowywaniu i przekazywaniu informacji otrzymywanych badań.

Jeśli chodzi o pierwszą dziedzinę to wiadomo, że wiele uwagi (patrz np. pozycje [1, 59, 68, 80]) poświęca się w cybernetyce badaniu i modelowaniu procesów pracy ludzkiego mózgu, leżących u podstaw czynności heurystycznych, wykonywanych przez człowieka podczas rozwiązywania różnego rodzaju zadań. Zgłębiając tajniki funkcjonowania intelektu, cybernetyka daje szereg wytycznych dla opracowania metod ich rozwiązywania. W przypadkach prostszych (np. klasy zadań dla których można jednoznacznie sformułować wszystkie dane istotne dla rozwiązywania) pozwala tworzyć teorie umożliwiające formalny opis procesu rozwiązywania, co może stanowić podstawę do automatyzacji tego procesu. Jest sprawą bezsporną, że ta gałąź cybernetyki może mieć duże znaczenie dla opracowywania procesów poszukiwania rozwiązań, mających na celu postawienie prawidłowej diagnozy funkcjonowania urządzenia mechanicznego i to zarówno od strony prawidłowości tych procesów z punktu widzenia prakseologii jak i ich ewentualnej automatyzacji.

Każda maszyna czy urządzenie mechaniczne może być traktowane jako system sprzężonych ze sobą elementów lub podsystemów oddziałujących na siebie zgodnie z zasadami fizyki. A zatem jeśli chodzi o drugą z wymienionych poprzednio dziedzin, cybernetyka jest w pewnym zakresie teorią maszyn i mechanizmów ale nie dotyczy ich konstruowania czy technologii lecz funkcjonowania czyli zachodzących w nich procesów z uwzględnieniem obsługi urządzenia przez człowieka. Próbując odpowiedzieć na pytanie: jak zachowuje się badany obiekt i jakie są inne możliwe formy jego zachowania, stwarza naukowe podstawy istnienia i rozwoju takich dziedzin nauki o urządzeniach

mechanicznych jak np: eksploatacja, diagnostyka, niezawodność i in.

Cybernetyka duży nacisk kładzie na badanie zagadnień szeroko rozumianej komunikacji i stąd jej użyteczność w trzeciej z wymienionych dziedzin. Szczególnie dużo uwagi poświęca się kodowaniu, dekodowaniu i transformacji kodowanej informacji a także przekazywaniu informacji przy uwzględnieniu zakłóceń. W tym zakresie cybernetyka bardzo ściśle wiąże się z teorią gier i teorią odczytywania obrazów.

3.3. Modelowanie cybernetyczne

Powyższe rozważania, przy założeniu istnienia w otaczającej nas rzeczywistości obiektów materialnych i niematerialnych, które można traktować jako systemy, dają podstawy do pojęcia pewnych prób ich modelowania. Systemowe ujęcie fragmentów rzeczywistości (np. maszyn, urządzeń mechanicznych, procesów fizycznych, intelektualnych itp.) ma charakter uniwersalny, ale nie wyczerpuje w pełni istniejących możliwości. Te dodatkowe możliwości daje właśnie modelowanie przy wykorzystaniu narzędzia jakim jest cybernetyka.

Podobnie jak w przypadku systemu nie ma ostatecznej definicji modelu. Ogólnie można powiedzieć, że model jest kategorią gnoseologiczną i jako środek interpretacji pomaga w poznaniu istniejącej obiektywnie rzeczywistości. Nie jest to jednak teoria, hipoteza, formalizm, pojęcie techniczne czy sposób badania ^{*)}. Model stanowi pewną analogię rozpatrywanej rzeczywistości. Podstawą tej analogii jest materialna jedność świata, przestrzennych i czasowych form ruchu i innych ogólnych cech rzeczywistości.

^{*)} Dla rozważań będących przedmiotem tej pracy wystarczająca będzie definicja podana przez Sztoffa [77] a mianowicie: "model jest to taki dający się pomyśleć lub materialnie zrealizować układ, który odzwierciedlając lub odtwarzając przedmiot badania zdolny jest zastępować go tak, że jego badanie dostarcza nam nowej informacji o tym przedmiocie". W dalszym ciągu potrzebne będą tylko modele myślowe i te będą tematem dalszego omówienia.

Model nie może być dokładnym powtórzeniem rzeczywistości. Odzwierciedla natomiast pewne cechy uproszczając lub pomijając inne. Jest to rezultat wyboru dokonanego przez badacza. To odzwierciedlenie może być co najwyżej tak dokładne jak wyczerpująca jest wiedza badacza o tych cechach i o modelowanym fragmencie rzeczywistości.

Innymi słowy model jest abstrakcyjną formą odzwierciedlenia badanego fragmentu rzeczywistości tym bogatszą i dokładniejszą im bogatsza i dokładniejsza jest wiedza badacza o tym fragmencie. Model pozwala zbudować zmysłowy obraz (w przypadku modelu myślowego będzie to wyobrażenie) wybranego fragmentu rzeczywistości, przeprowadzić analizę, uproszczenie bądź wzbogacenie, wprowadzić elementy hipotetyczne. Modelowanie ujednocila sposób obserwowania różnych fragmentów rzeczywistości [43, 83]. Jest zatem narzędziem, które może wzbogacić uniwersalizm ujęcia systemowego o nowe elementy umożliwiające przeprowadzenie w praktyce wspomnianego poprzednio abstrahowania. Zagadnienie te zostały szeroko omówione w pozycjach [42, 43, 45] bibliografii i nie będą tu ponownie przytaczane.

W celu dojścia do pojęcia uniwersalnego modelu, który umożliwiłby przeprowadzenie zamierzonych uogólnień należy przypomnieć, że działalność człowieka w procesie modelowania polega na wyodrębnieniu dwóch typów systemów. Pierwszy to wspomniany system naturalny który jest wyrażony zbiorem pojęć i ich relacji bezpośrednio związanych i opisujących pewien fragment rzeczywistości. Drugi to pomocniczy myślowy lub materialny system mający pewne obiektywne podobieństwo z systemem naturalnym i zastępujący ten oryginał pod pewnymi względami. Proces budowania drugiego systemu czyli modelu, składa się z dwóch etapów. Pierwszy to idealizacja, podczas której na podstawie obserwacji fragmentu rzeczywistości czyli znajomości systemu naturalnego, tworzy się (przeważnie myślowo) jego wyidealizowany obraz, w którym są zachowane cechy oryginału ważne z punktu widzenia prowadzonych rozważań.

Drugi etap to formalizacja, podczas której opisuje się ten idealny obraz przy pomocy języka umownego (np. znaków, symboli i relacji matematycznych lub logicznych).

W znanych obecnie metodach w modelowaniu różnych systemów naturalnych stosuje się rozmaite sposoby formalizacji zależne od dziedziny nauki, która zajmuje się badanym fragmentem rzeczywistości, poziomu wiedzy, stopnia zaawansowania badań, itp. A zatem możliwości uogólnienia należy poszukiwać jako pewnego uniwersalnego sposobu idealizacji systemów naturalnych o różnym charakterze przedmiotowym. Jako taki uniwersalny rodzaj idealizacji zostanie zaprezentowany model, który w braku lepszego polskiego określenia zostanie nazwany modelem cybernetycznym.

Podstawowym pojęciem o cybernetyce jest pojęcie różnicy [6]. W dalszym ciągu rozważań pojęcie to będziemy rozumieć tak, że jakaś rzecz (np. wielkość charakteryzująca proces) zmieniła się w czasie. Można dalej założyć, że zmiany powodujące powstawanie różnic dokonują się w świecie otaczającym człowieka, skokowo, przy czym wartości tych kolejno po sobie następujących skoków są sprawą nieistotną (mogą one być nieskończenie małe co w granicy daje ciągłą formę zmian). Takie podejście nie powinno budzić sprzeciwów jest bowiem stosowane z powodzeniem w innych dziedzinach nauki. Przeważnie rozważa się zbiory takich następujących po sobie zmian (tzw. "przejść", wg. Ashby'ego [6]), które nazywają się transformacjami. Jeżeli transformacja będzie opisywać zmianę w czasie, stanu jakiegoś systemu, to może ona być uznana za odzwierciedlenie sposobu jego zachowania się (np. funkcjonowania, zachodzących w nim procesów itp.). W rzeczywistych systemach zachodzi równocześnie wiele wzajemnie na siebie oddziaływujących procesów. Aby to uwzględnić w modelu musimy operować zbiorem transformacji oraz układem istniejących pomiędzy nimi sprzężeń. Każda transformacja ma wiele możliwości realizacji. Która możliwość zostanie zrealizowana w rzeczywistości, zależy od wymuszeń, którymi środowisko oddziałuje na system czyli od jego wejścia.

Rezultatem zachodzenia transformacji będzie oddziaływanie systemu na środowisko poprzez jego wyjście. W praktyce maszyn i mechanizmów wymuszenie na wejściu systemu jest realizowane przez istnienie procesów działających na pewne elementy lub zbiory elementów systemu. Również oddziaływanie wyjścia objawia się poprzez generację procesów przez różne elementy lub zbiory elementów systemu na ogół różne od poprzednich. Oba zbiory procesów można również wyobrazić w postaci transformacji.

W konkluzji powyższych rozważań model cybernetyczny systemu naturalnego można opisać następującymi aksjomatami:

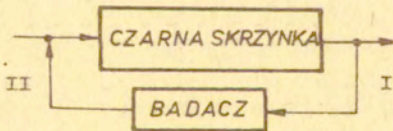
- 1/ procesy zachodzące w systemie naturalnym można wyobrazić w modelu przy pomocy zbioru transformacji stanów i sprzężeń pomiędzy nimi ;
- 2/ odzwierciedlenie wzajemnego oddziaływania systemu naturalnego i jego środowiska odbywa się w modelu poprzez wejście i wyjście ;
- 3/ oddziaływanie środowiska na system naturalny jest w modelu cybernetycznym wyrażone przez zmianę wielkości transformacji wejściowych ;
- 4/ oddziaływanie systemu naturalnego na środowisko wyobrażone jest w modelu cybernetycznym przez zmianę wielkości transformacji wyjściowych ;
- 5/ istnienie i zmiany wielkości wejściowych modelu cybernetycznego powodują zaistnienie zbioru transformacji stanów i ich sprzężeń a w rezultacie zmiany wielkości wyjściowych ;
- 6/ wejście, wyjście i zbiór transformacji podlegają zakłóceniom.

Wyodrębnienie systemu naturalnego i wzajemnego oddziaływania ze środowiskiem jest zależne od wyboru poczynionego przez badacza, od celu badań i wiedzy o systemie. To samo odnosi się również do modelu cybernetycznego odzwierciedlającego ten system naturalny. Ponieważ nie wszystkie cechy systemu naturalnego są znane (niezpełna wiedza o systemie) a także nie wszystkie należy uwzględnić w modelu cybernetycz-

-nym, wejście, wyjście i zbiór transformacji stanów nie wyobrażają wszystkiego co w rzeczywistości dzieje się w systemie i wokół niego. Model cybernetyczny podobnie jak inne modele odzwierciedla tylko pewien znany i wybrany obszar działania systemu resztę traktując jako zakłócenia.

Natura jest w rzeczywistości bardzo skomplikowana i stawia przed obserwatorem konieczność rozpatrywania dużych i bardzo złożonych systemów. W rozumieniu cybernetyki rozmiar systemu związany jest z liczbą rozróżnialnych stanów, a to z kolei wiąże się z liczbą elementów i sprzężeń występujących w systemie. Bez wdawania się w szczegóły za wielki system uważa się taki system, który swoim bogactwem zachodzących w nim transformacji stanów, przewyższa możliwości badacza odnośnie pełnej obserwacji lub sterowania. W krańcowym przypadku badacz może mieć do czynienia z systemem, w którym stany, ich transformacje i sprzężenia nie są w ogóle znane, zaś system można obserwować tylko przez wejście i wyjście zupełnie nie wiedząc o sposobie wewnętrznego funkcjonowania tego systemu i zachodzących w nim procesach. W ten sposób zostało sformułowane zagadnienie tzw. czarnej skrzynki.

Aby zbadać czarną skrzynkę obserwator sprzęga sam siebie ze skrzynką i tworzy system ze sprzężeniem zwrotnym (rys.1).



Rys. 1 . Badanie czarnej skrzynki.

System taki działa w następujący sposób : obserwując wyjście skrzynki (kanał I na rys.1), przy znanym wejściu badacz stara się dociec w jaki sposób funkcjonuje system badany i jakie transformacje stanów zachodzą w jego wnętrzu. Zdanie staje się łatwiejsze jeśli istnieje możliwość świadomej i celowej zmiany wejścia (kanał II na rys.1) tak aby obserwacja wyjścia pozwoliła uzyskać możliwie dużo wartościowych informacji o sposobie funkcjonowania obiektu potraktowanego jako czarna skrzynka. Takie podejście jest typowe dla wszelkiego rodzaju badań (również diagnostycznych) i to nie tylko w przypadkach gdy badany system jest zupełnie nieznan. Postępowanie jest także stosowane również w drugim krańcowym przypadku tzn. wtedy gdy sposób funkcjonowania systemu jest dobrze znany i opisany.

Przedstawione podstawy i zasady modelowania cybernetycznego systemów naturalnych stanowią swego rodzaju "filozofię" podejścia do obiektów, zjawisk i sytuacji, być może możliwą do zastosowania w różnych dziedzinach badań naukowych. W praktyce przy obecnym poziomie wiedzy, konsekwencją zastosowania tej "filozofii" jest pewien tok rozumowania który należy wykonać, zabierając się do badania dowolnego fragmentu rzeczywistości. Taki tok rozumowania można w dużym uproszczeniu przedstawić w następujących punktach:

- 1/ rozpoznanie fragmentu rzeczywistości, który będzie przedmiotem badania - obszerna obserwacja i analiza tego fragmentu a głównie zachodzących w nim procesów istniejących współzależności, wzajemnych oddziaływań itd.;
- 2/ wyodrębnienie systemu naturalnego - selekcja tych zjawisk lub sytuacji oraz współzależności oddziaływań, w celu wyodrębnienia zorganizowanej całości, funkcjonującej w środowisku ;
- 3/ budowa modelu cybernetycznego - zależnie od celu badań wybór wejścia, wyjścia, zbiorów transformacji (w praktyce będą to wybrane do badań procesy, wyobrażone jako transformacje stanów, które zachodzą podczas funkcjonowania systemu),

analiza sprzężeń, zakłóceń itd.

Efektom tego postępowania (przeważnie wykonywanego myślowo), jest model cybernetyczny wybranego fragmentu rzeczywistości. Taki model może być tworzycielem do dalszych badań (np. utworzenia modelu specjalistycznego i jego opisu formalnego), których techniki są przeważnie zależne od dziedziny wiedzy zajmującej się badaniem tego fragmentu rzeczywistości. W postaci modeli w dalszych częściach rozprawy ^{dotyczą} rozważany obiekt badań (urządzenie mechaniczne) oraz proces postępowania diagnostycznego.

4. Urządzenie mechaniczne

4.1. Procesy zachodzące w urządzeniach mechanicznych

Podstawą do konstrukcji i wytworzenia urządzenia jest wybór sposobu realizacji zadania, które ma ono wykonywać w systemie produkcyjnym. Na podstawie opisu zadania, które wykonuje specjalista produkcji, projektant w porozumieniu z technologicznym wykonawcą wybiera sposób realizacji zadania i projektuje urządzenie. Z jednej strony projekt musi być dostosowany do możliwości dysponowania najbardziej odpowiednimi tworzywami (ich przygotowanie jest podstawowym zadaniem inżynierii materiałowej) oraz musi uwzględniać poziom technologiczny zakładu przewidzianego do wyprodukowania urządzenia (jest to postulat technologiczności). Z drugiej strony należy dostosować konstrukcję i sposób wykonania urządzenia do struktury systemu produkcyjnego i sposobu eksploatacji, który wynika z wybranego sposobu realizacji zadania. Ujawnia się zatem nadrzędne stanowisko eksploatacji urządzenia w systemie produkcyjnym w stosunku do projektowania i wykonania urządzenia. Można powiedzieć, że eksploatacja niejako determinuje strukturę urządzenia oraz procesy, które będą w nim zachodzić w czasie pracy. Ogólnie biorąc zadaniem diagnostyki jest ocena cech lub własności urządzenia, ujawniających się podczas eksploatacji. Można tego dokonać poprzez obserwację

procesów użytkowych ale w prowadzonych w praktyce badaniach diagnostycznych coraz powszechniej wykorzystuje się do tego celu procesy towarzyszące. Ich przebieg stanowi o wielu ważnych własnościach lub je odzwierciedla. Najważniejszą rolę odgrywają tu następujące procesy towarzyszące:

1. Procesy wibroakustyczne tzn. drgania mechaniczne (oraz obciążenia dynamiczne) i hałas są powszechnym zjawiskiem występującym podczas funkcjonowania urządzeń mechanicznych [52]. Na skutek istnienia szeregu czynników zewnętrznych (np. wymuszenia od innych maszyn i urządzeń funkcjonujących w sąsiedztwie urządzenia obserwowanego itp.) oraz wewnętrznych (np. nierównoważenie elementów ruchomych, odchyłki od idealnych kształtów i wymiarów elementów tworzących pary kinematyczne, współpraca tych elementów w parach, itp.) w urządzeniu następują zaburzenia stanów równowagi, które rozchodzą się w ośrodkach sprężystych (materiale elementów, z których zbudowane jest urządzenie, powietrze, które je otacza itd.). Zaburzenia mają charakter dynamiczny i zachowują wyrunki równowagi pomiędzy stanem bezwładności, sprężystości, tłumienia i wymuszenia. Zaburzenia rozchodzą się od źródeł w postaci fal (propagacja) w sposób zależny od własności fizycznych oraz granic konfiguracji, wymiarów i kształtów ośrodków. Powoduje to w konsekwencji rozpraszanie energii fal, ich zagięcia i odbicia. Istnienie źródeł i rozprzestrzenienie się zaburzeń, powoduje występowanie drgań elementów urządzeń i otaczającego ich ośrodka (powietrza). Aczkolwiek zagadnienia drgań mechanicznych i hałasu mogą się w szczególnych przypadkach całkowicie różnić to ogólnie rzecz biorąc oba zjawiska traktuje się wspólnie jako procesy wibroakustyczne. Dzieje się tak zwłaszcza w diagnostyce technicznej. Zależąc od źródeł i warunków propagacji procesy wibroakustyczne mogą w praktyce odzwierciedlać wiele istotnych własności konstrukcyjnych, wykonawczych i montażowych elementów i par kinematycznych urządzenia oraz warunki jego funkcjo-

nowania we współpracy z innymi urządzeniami w systemie produkcyjnym. Na ogół drgania i hałas, z przyczyn które zostaną omówione w dalszych rozdziałach nie mają charakteru harmonicznego ale stochastyczny. Powoduje to konieczność zastosowania specjalnego aparatu do ich obserwacji i interpretacji.

2. Procesy tarcia i zużycia towarzyszą procesowi użytkownika [73]. W miarę upływu czasu pracy urządzenia, zakłócają one coraz bardziej proces użytkowy a w końcu uniemożliwiają do w ogóle. W praktyce można się spotkać z różnymi odmianami, typami i rodzajami tego zjawiska. I tak np. zjawiska powierzchniowe występują w ciernych parach kinematycznych urządzeń mechanicznych. Współczynnik tarcia, siła lub moment tarcia charakteryzują własności urządzenia związane ze stanem powierzchni trących (mikronierówności, falistości), stanem obróbki cieplnej tych powierzchni (ziarnistość, budowa struktury, liczba faz), stanem obróbki plastycznej (zgniot), stanem środowiska w którym tarcie ma miejsce (warunki smarowania, aktywność chemiczna, temperatura), stanem obciążeń (wartość i charakter) itd.

W urządzeniach mechanicznych mamy również do czynienia ze zjawiskami zużycia objętościowego (ziamanie, zrywanie). Postęp metod konstruowania i obliczania spowodował, że z przypadkami zużycia objętościowego występującymi podczas eksploatacji urządzeń spotykamy się nader rzadko. Dlatego nie będą one rozważane w tej rozprawie.

W świetle najnowszych badań z zakresu tribologii można powiedzieć, że zużycie powierzchniowe ma najistotniejszy wpływ na funkcjonowanie, głównie na trwałość i niezawodność całego urządzenia. Ponad 90 % urządzeń, z których jedno waży niekiedy kilkaset ton, wycofuje się z eksploatacji na skutek zużycia warstwy wierzchniej współpracujących elementów posiadającej grubość mniejszą niż 0,1 mm. W tym stanie wszystkie zagadnienia dotyczące

badania zużycia powierzchniowego, konstytuowania własności warstwy wierzchniej oraz wyznaczania warunków jej pracy (głównie obciążeń dynamicznych) nabierają pierwszorzędnej wagi.

3. Procesy termodynamiczne są również zjawiskami towarzyszącymi procesom użytkowym *). W rozumieniu zaprezentowanym w tej pracy, nie zakłócają one tego procesu w sposób bezpośredni. Wpływają jednak na inne zjawiska zakłócające proces użytkowy. Zmieniają mianowicie warunki smarowania, własności materiałów, aktywność chemiczną itp. W parach ciernych efekty cieplne charakteryzują m.in. warunki pracy (smarowanie, chłodzenie, własności powierzchni trących itp.), stopień dotarcia. Parametry pól temperatur charakteryzujące efekty cieplne bywają bardzo szeroko używane przy kontroli i sterowaniu maszyn cieplnych, np. w silnikach turboodrzutowych. Ze względu na dużą bezwładność efekty cieplne mogą być stosowane do badania procesów wolnozmiennych. Poza tym ciepło jest stosunkowo ubogim nośnikiem informacji o własnościach urządzeń mechanicznych. Pomędzy omówionymi procesami towarzyszącymi oraz procesem eksploatacyjnym istnieje skomplikowany układ wzajemnych zależności, które w szerokim zakresie bywają wykorzystane w diagnostyce technicznej.

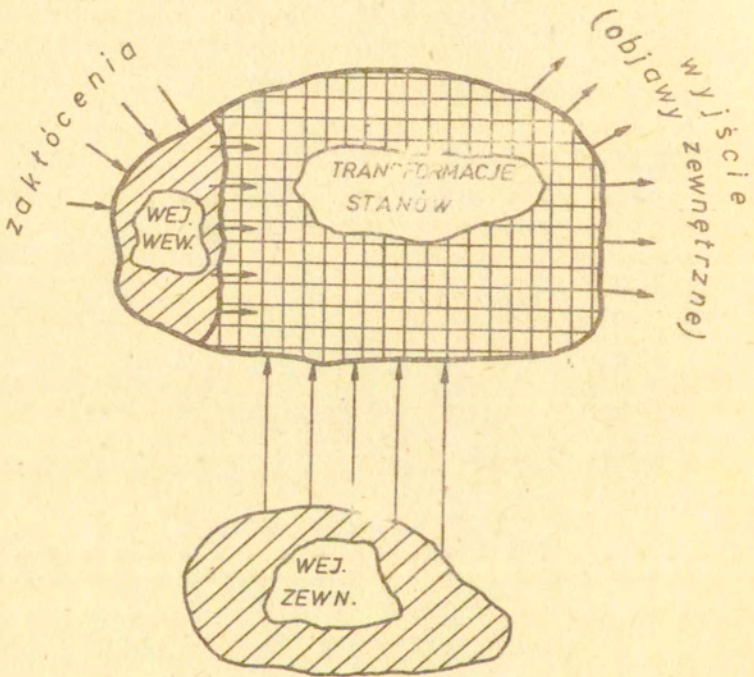
4.2. Model cybernetyczny urządzenia mechanicznego

Korzystając z rozważań przytoczonych w punkcie 3.3 i znajomości procesów można szerzej omówić zagadnienia związane z modelem cybernetycznym urządzenia mechanicznego, który ma stanowić jego uogólnioną reprezentację. Taki właśnie standardowy model posłuży do zbudowania ogólnego modelu

*) Czasem jak np. w maszynach cieplnych są one procesami użytkowymi.

procesu poszukiwania diagnozy.

Przystępując do budowy modelu cybernetycznego będącego standardowym odzwierciedleniem stosowanych obecnie urządzeń mechanicznych można łatwo zauważyć, że w każdym urządzeniu można wyodrębnić dwa rodzaje wejścia (patrz rys.2).



Rys. 2. Model cybernetyczny.

Pierwszy rodzaj to wejście wewnętrzne. W cybernetyce (patrz poz. [62] , hasło: wejście wewnętrzne) przyjmuje się, że jest to zbiór wielkości wymuszających znajdujących się wewnątrz urządzenia, niejako przez to urządzenie zapamiętanych.

Temu określeniu mogą odpowiadać w przypadku urządzenia mechanicznego wybrane wielkości wymuszeń spowodowane przez jego strukturę czyli własności konstrukcji i sposób współpracy elementów (np. kształt i sposób wykonania elementów, luzy, dokładność wykonania i montażu elementów, sposób smarowania itd.) i w sposób znaczący wpływające na sposób funkcjonowania. Wybór zależy od celu i zakresu badań diagnostycznych i dla tego samego obiektu może być różny w zależności od tych okoliczności. Można uznać, że takie wejście wewnętrzne jest rodzajem oddziaływania środowiska na urządzenie, zaprogramowanym w nim podczas wytwarzania i ujawniającym się podczas funkcjonowania.

Drugi rodzaj to wejście zewnętrzne charakteryzujące warunki współpracy urządzenia z innymi elementami systemu produkcyjnego (np. obciążenia, prędkości itd.). Podział taki zwłaszcza w odniesieniu do wejścia wewnętrznego może być dyskusyjny. Tym niemniej bywa on w praktyce w sposób świadomy bądź nieświadomy niekiedy stosowany w diagnostyce. Wiąże się on bowiem ściśle z klasyfikacją wymuszeń zjawisk zachodzących w istniejących funkcjonujących urządzeniach mechanicznych. Charakter tych wymuszeń oraz sposób w jaki przebiegają procesy przez nie generowane, stanowią z reguły o własnościach poszukiwanych w procesie diagnostycznym.

Wyodrębniając wielkości wejściowe trzeba pamiętać, że procesy zachodzące w urządzeniach mają w praktyce charakter losowy. Przyczyną tego jest losowy charakter wejścia wewnętrznego (spowodowanego losowością struktury) i wejścia zewnętrznego.

Przyczyny losowości struktury można klasyfikować w następujące główne grupy:

- 1/ wymiary elementów i sposobów montażu (długości, średnice, luzy, falistości i chropowatości powierzchni itp.) są w granicach narzuconych tolerancji, zmiennymi losowymi;
- 2/ zużycie elementów (wycieranie, powstawanie mikropełnięć wewnątrz materiału i w warstwie wierzchniej itd.) przebiega w sposób losowy;
- 3/ sposób obsługi (np. rodzaj, poziom i temperatura oleju smarującego, wody chłodzącej lub powietrza) ma w pewnych granicach charakter losowy.

Losowy charakter wymuszeń zewnętrznych jest rezultatem następujących przyczyn:

- 1/ warunki pracy np: wartość i charakter prędkości oraz obciążeń przenoszonych przez urządzenie, są losowe ;
- 2/ warunki otoczenia np. temperatura, wilgotność i zanieczyszczenie powietrza otaczającego urządzenia, są losowe .

Istnienie wielkości wejścia powoduje, że podczas funkcjonowania urządzenia będą zachodzić omówione poprzednio procesy, które mogą być wyobrażone jako transformacje stanów. W konsekwencji omówionych wyżej losowych własności wejścia, transformacje te również będą miały charakter losowy. Ten stan rzeczy wymaga zaproponowania modelu, który ujednocili sposób badania urządzeń. Do dalszych rozważań wygodnie przyjąć model deterministyczno-probabilistyczny omówiony w pozycji [32]. Składowa deterministyczna modelu opisana wektorem \bar{D} reprezentuje idealną strukturę i sposób działania urządzenia, niezbędne do realizacji zadania eksploatacyjnego i pozostaje niezmienna przez cały czas eksploatacji. Składowa probabilistyczna \bar{P} reprezentuje indeterminizm powstały w wyniku istniejących w rzeczywistości odchyłek od tego ideału, które zostały powyżej wymienione. Przyjmuje się na ogół, że obie składowe modelu są niezależne w sensie opisujących je współrzędnych. Do rozważań prowadzonych w tej rozprawie przyjmujemy, że moduły: $\|\bar{D}\| \gg \|\bar{P}\|$, co uzasadni fakt, że składowa \bar{P} będzie niekiedy pomijana.

Bogactwo możliwości losowości i istnienie zakłóceń jest przyczyną, że w modelach urządzeń mechanicznych często przyjmuje się pewne dodatkowe założenia dotyczące wejść oraz zachodzących transformacji stanów. Stanowią one niekiedy istotne odstępstwa od rzeczywistości, ale realizując w praktyce wspomniane poprzednio abstrahowanie systemu naturalnego ułatwiają a niekiedy wręcz umożliwiają jego obserwacje i analizę. Typowe założenia czynione w wielu przypadkach dotyczących badań urządzeń mechanicznych to założenia o lokalnej liniowości, stacjonarności i ergodyczności obiektów i procesów.

Pierwsze założenie przyjmuje lokalną ^{*}) liniowość transformacji reprezentujących procesy w stosunku do źródeł, które te procesy wywołują. Drugie założenie przyjmuje się, że transformacje te są lokalnie ^{*}) stacjonarne tzn. nie zależą od czasu.

Założenia o liniowości i stacjonarności transformacji nie zawsze są stosowane w badaniach urządzeń mechanicznych. Istnieje duża grupa badań, której celem jest zbadanie nieliniowości bądź niestacjonarności tych transformacji, zwłaszcza wtedy kiedy jest to równoznaczne z nieliniowością lub niestacjonarnością całego urządzenia. Dotyczy to np. badań zużycia.

Aby wnioski płynące z obserwacji pewnego procesu losowego zachodzącego w jednym urządzeniu można było uogólnić na wiele egzemplarzy tego samego urządzenia, trzeba przyjąć założenie o ergodyczności tych procesów. W niniejszej pracy pojęcie ergodyczności zostanie ograniczone do takiego zakresu, w którym jest ono stosowane w diagnostyce, zwłaszcza eksperymentalnej. Tak więc ergodyczność polega na tym, że wiele realizacji jednego procesu, zachodzącego w stacjonarnym urządzeniu mechanicznym, mierzonych w różnych chwilach czasu, zawiera te same informacje jakie miałyby taka sama ilość ^{*}) Tzn. dotyczącą wybranych podzespółów lub elementów systemu:

realizacji tego procesu, mierzona w jednej chwili w wielu dowolnie wybranych, takich samych urządzeniach. W budowie maszyn i urządzeń mechanicznych ergodyczność wyraża się powtarzalnością poszczególnych egzemplarzy danego urządzenia i wiąże z przyczynami losowości omówionymi poprzednio. Powtarzalność zapewnia się we wszystkich fazach życia urządzenia np:

- w fazie projektowania, poprzez ukształtowanie elementów o wysokiej technologiczności dających się łatwo zmontować, prawidłowy dobór tolerancji, gładkości powierzchni itp.,
 - w fazie wytwarzania, poprzez dobór takich procesów obróbki które zapewnią dotrzymanie wymagań konstrukcyjnych,
 - w fazie eksploatacji, poprzez prawidłową obsługę, itp.
- W praktyce ergodyczność będzie zatem charakteryzować urządzenie o wysokim standardzie konstrukcji, wykonania i obsługi.

W rezultacie istnienia wejścia i realizacji transformacji stanów reprezentujących procesy zachodzące w systemie naturalnym pod nazwą urządzenia mechaniczne, powstaje szereg dających się mierzyć objawów charakterystycznych dla tych procesów. Mogą to być wielkości charakteryzujące proces bezpośrednio bądź pośrednio dzięki istniejącym związkom-sprzężeniom pomiędzy procesami zachodzącymi w urządzeniu. Objawy te traktuje się w modelu cybernetycznym jako wielkości wyjścia. W zależności od fizycznego charakteru, wielkości wejścia i wyjścia mogą być również traktowane jako transformacje o charakterze losowym i można stosować do nich omówione poprzednio założenia.

Wyodrębnienie urządzenia mechanicznego jako systemu naturalnego pozostającego we wzajemnym oddziaływaniu ze środowiskiem jest zależne od wyboru poczynionego przez badacza, od celu badań i wiedzy o systemie. To samo odnosi się również do modelu cybernetycznego odzwierciedlającego ten sam system naturalny. Uwzględnienie w modelu cybernetycznym pewnych transformacji stanów, wielkości wejścia i wyjścia a pominięcie innych jest podyktowane wiedzą o systemie oraz celem,

którego osiągnięcie stwarza konieczność prowadzenia badań. Stwarza to dużą dowolność, która wszakże musi być poparta głęboką wiedzą ogólną oraz szczegółową, dotyczącą rozwiązywanego problemu. I tak często się zdarza, że wielkości przyjmowane w pewnych badaniach jako wejściowe w innych przyjmowane są jako wyjściowe (dotyczy to np. zużycia powierzchniowego, które jest zarówno objawem pewnych zjawisk a także źródłem innych) :

Rosnący stopień skomplikowania maszyn i urządzeń mechanicznych z równoczesnym wzrostem wymagań eksploatacyjnych był jedną z ważniejszych przyczyn podjęcia kompleksowych badań mających na celu ocenę ich jakości i możliwości porównywania różnych typów. Wymagało to wypracowania metod uniwersalnego podejścia i sposobów postępowania podczas badań, opracowywania rezultatów, zbierania i przetwarzania informacji, a coraz szersze zaangażowanie teorii systemów i cybernetyki wywarło istotny wpływ na sposób takiego uogólnienia. Jakich korzyści można oczekiwać z zastosowania zaproponowanego modelu cybernetycznego? W tej rozprawie model uniwersalny odzwierciedlający różne urządzenia mechaniczne posłuży jako sposób spojrzenia i metoda rozumowania dająca możliwość poczynienia prób matematycznej formalizacji takiego modelu dla potrzeb diagnostyki.

Ogólnie można powiedzieć, że przyjęcie modelowania cybernetycznego systemów naturalnych jako sposobu podejścia badaczy z różnych dziedzin nauki do badanych obiektów, mówiąc obrazowo, daje w efekcie daleko posuniętą "standaryzację mentalności" badaczy. A to wydaje się być podstawą porozumienia się specjalistów z różnych dziedzin nauki i w konsekwencji tych dziedzin.

4.3. Pojęcie własności w urządzeniach mechanicznych

Dla określenia jakości systemu - urządzenia mechanicznego i charakteru jego współdziałania ze środowiskiem używa się następujących pojęć: cecha (lub charakterystyka), własność

ogólna, własność lokalna. W rozważaniach dotychczasowych zamiast terminu "własność ogólna" mówiliśmy poprostu "własność"; zaś zamiast "własność loka/lna" używaliśmy terminów umiejscawiających tą własność w systemie. Zależnie od potrzeb mówi się np: wejście, wyjście lub stan ^{*}). Dotychczas te pojęcia używane były w znaczeniu potocznym. Dla prawidłowego przeprowadzenia rozważań dotyczących oceny urządzenia, sformułowania zadania diagnostycznego itd., niezbędne jest podanie ścisłej definicji i zaproponowanie formalnego zapisu tych wielkości i ich wzajemnej relacji, co jest równoznaczne z określeniem ich charakteru i wzajemnej zależności. Dla potrzeb tej pracy przyjęto sygnalizowany we wstępie następujący układ hierarchiczny wymienionych pojęć. Każdy system można opisać zbiorem wielkości przeważnie zmiennych, które dadzą się oszacować przy pomocy miar. Odpowiednio wybrane i pogrupowane w ciągi, podzbiory tych zmiennych określają własności lokalne systemu a w zależności od sposobu pogrupowania i fizycznego charakteru otrzymujemy własności lokalne opisujące wejście, stan lub wyjście. Skończone ciągi własności lokalnych określają własności ogólne zaś skończone ciągi własności ogólnych reprezentują cechy systemu. Wymienione ciągi mogą być wieloelementowe lub jednoelementowe. W tym drugim przypadku "sąsiednie" pojęcia utożsamiają się (ma to najczęściej miejsce w przypadku własności ogólnych i lokalnych).

Rozważania dotyczące zaprezentowanych pojęć rozpoczniemy od własności ogólnej. Pojęcie to zdefiniowane w logice ma również kilka opracowań odniesionych do diagnostyki. Znaczący wkład w dziedzinie rozwoju metod określania własności i doboru dla potrzeb diagnostyki, wnoszą prace P. Krzywoczki

*) W dotychczasowych rozważaniach mówiliśmy o stanach lub ich transformacjach w czasie. W dalszym ciągu rozważań, aby być w zgodzie z istniejącym zwyczajem będziemy używać tylko pojęcia stan, który zależnie od okoliczności będzie rozpatrywany jako niezależny lub zależny od czasu. Stan będący funkcją czasu jest pojęciem równoznacznym z pojęciem transformacji. Tak samo będą rozumiane pojęcia wejścia i wyjścia.

i T. Piwowarczyka [33, 34, 35]. W tej rozprawie zostanie dokonane uogólnienie i rozszerzenie tych rozważań dla potrzeb diagnostyki urządzeń mechanicznych. Mając określone pojęcie własności, pozostałe pojęcia można określić zgodnie z propozycją przedstawioną poprzednio...

Intuicyjnie można stwierdzić, że własność da się wyróżnić i posiadać, że można się nią charakteryzować, można ją oszacować lub zmierzyć. Załóżmy, że istnieje przedmiot (np. system) S który ma własność W , oraz zbiór tych przedmiotów \mathcal{A} posiadających tę własność. W logice określa się, że własność jest to zbiór przedmiotów, które ją posiadają. Podstawą określenia i rozważania własności obiektów jest określenie i badanie relacji równoważności umożliwiającej wyodrębnienie zbiorów tych własności. W ogólnym przypadku jest to czynność myślowa wykonywana podświadomie. Natomiast praktyczną realizację tej czynności w odniesieniu do systemów mechanicznych jest doświadczalne badanie ich własności.

Rezultatem badań systemów mechanicznych jest zaobserwowanie zbioru zjawisk:

$$(1) \quad \Omega = \{ \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n \},$$

które można ponazywać zgodnie z ich fizycznym charakterem. Na zbiorze $\Omega \times \Omega$ określamy wspomnianą relację równoważności ρ taką, że jest ona odzwierciedleniem fizycznej operacji porównywania:

$$(2) \quad \rho = \{ \langle \omega_i, \omega_j \rangle \} \subset \Omega \times \Omega.$$

Założmy teraz, że ze zbioru wybierzmy podzbiór zjawisk $\Omega^* = \{ \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n \} \subset \Omega$, które potraktujemy jako wzorcowe. Zachowany zostanie przy tym następujący warunek dotyczący wskaźników: $\alpha \ll a$. Korzystając z równoważności ρ , utworzymy jako podzbiory zbioru Ω następujące klasy abstrakcji:

$$(3) \quad [\omega_j]_{\wp} = \{ \omega_i \in \Omega : \omega_i \wp \omega_j \} \subset \Omega,$$

gdzie:

$$\omega_j \in \Omega^*.$$

Korzystając z podanej na początku rozdziału definicji, można własności ogólne systemu utożsamiać z tymi klasami abstrakcji:

$$(4) \quad W_j = [\omega_j]_{\wp}, \quad \text{gdzie: } j = 1, 2, \dots, \alpha.$$

Dla zilustrowania można powiedzieć, że np. zjawiska występujące pod wpływem obciążeń na współpracujących powierzchniach i w strukturze materiału elementów eksploatowanego urządzenia stanowią klasę abstrakcji, która utożsamia się z pojęciem własności ogólnej jaką jest zużycie. Określenie obserwowanych własności i poziom ich szczegółowości jest sprawą decyzji badacza podyktowanej przez zakres badań.

Jeżeli (jak to założono) \wp jest relacją równoważności to utworzone klasy abstrakcji:

- 1/ są niepuste,
- 2/ są rozłączne lub identyczne,
- 3/ dają w sumie cały zbiór Ω .

Można bez dowodu przyjąć, że aksjomaty te będą spełnione dla własności stanowiących klasy abstrakcji nazw zjawisk (np. "zużycie", "drgania", "hałas" itp.). Natomiast sprawa ma się nieco inaczej ze zbiorami przedmiotów (systemów lub elementów) posiadających daną własność. Jeśli \mathcal{S}'_1 - jest zbiorem przedmiotów posiadających własność W_1 , \mathcal{S}'_2 - zbiorem przedmiotów posiadających własność W_2 itd. przy czym $\mathcal{S}'_1 \in \mathcal{S}$, $\mathcal{S}'_2 \in \mathcal{S}$, ..., gdzie \mathcal{S} jest zbiorem wszystkich rozpatrywanych przedmiotów, to zbiory $\mathcal{S}'_1, \mathcal{S}'_2, \dots$, mogą ale nie muszą spełniać powyższych aksjomatów (np. niektóre przedmioty ze zbioru drgających mogą równocześnie należeć i przeważnie należą do zbioru zużywających się). Ta nieścisłość związana jest z faktem posiadania przez przedmiot jednej lub kilku własności jest istotna dla rozważań matematycznych. W tym przypadku

rozważamy model pojęciowy jest nadal słuszny a poczyniony błąd nie ma większego znaczenia.

Istotnym etapem działalności badawczej jest zmierzenie własności ogólnej. W tym celu należy: 1/ przyporządkować tej własności pewne miary (są to przeważnie liczby) charakteryzujące jej intensywność, 2/ znać miary charakteryzujące przynajmniej dwa poziomy tej intensywności. Własność ogólna scharakteryzowana miarą nazywa się własnością mierzalną. Rozumowanie przeprowadzono przy milczącym założeniu, że dla wyznaczenia wspomnianych klas abstrakcji i doboru miar dysponujemy doświadczeniem wystarczającym dla zapewnienia jednoznaczności i porównywalności własności. Przyjęta w wyniku tego założenia relacja równoważności (zwrotna, przechodnia i symetryczna) jako kryterium określenia własności, narzuca determinizm rozważanego problemu. Dla wielu przypadków spotykanych w technice jest to zbyt duże uproszczenie. W praktyce losowość własności uwzględnia się poprzez odpowiednią postać prezentowania miar. Ogólnie biorąc wyraża się je w formie charakterystyk statystycznych zmiennych losowych uzyskując punktową (nielosową) ocenę własności losowej. Indeterminizm własności opisują przydziały ufności tych miar. Uzyskuje się zatem gąsi - deterministyczne ujęcie zagadnienia mieszczące się w modelu przyjętym i omówionym w punkcie 4.2.

Odpowiedni dobór miary odwzorowującej daną własność jest zadaniem, którego prawidłowe wykonanie przyczynia się w dużej mierze do prawidłowego rozwiązania całego zadania diagnostycznego. Zagadnieniu temu poświęcono wiele opracowań m.in. wspomniane już poz. [33, 34, 35]. Prace te zmierzają do zdefiniowania metrycznej przestrzeni ogólnych własności mierzalnych, której metryka jest postacią globalnej miary rozpatrywanego zbioru własności.

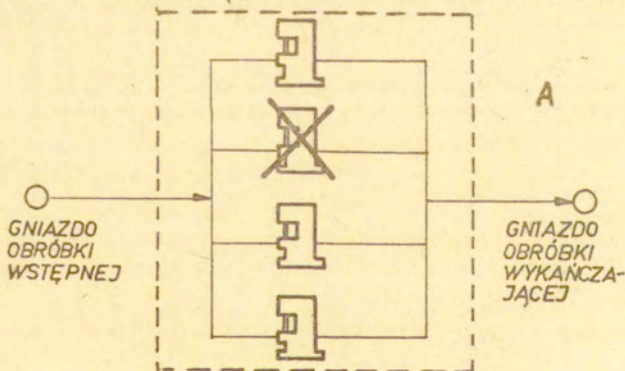
Rozważania przeprowadzone dla własności, w ogólnych zarysach dotyczą również pozostałych pojęć wymienionych na początku rozdziału. Najczęściej ocenę systemu w diagnostyce urządzeń mechanicznych rozpoczyna się od wyboru zmiennych opisujących

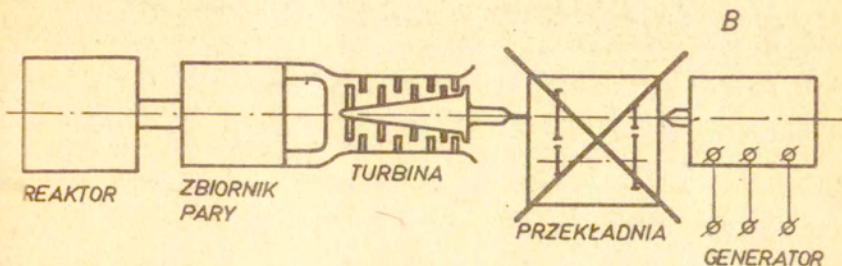
system. Zmienne wybiera się spośród wielkości, które dla potrzeb prowadzonych badań dokładnie i wszechstronnie opiszą system, a równocześnie dadzą się łatwo zmierzyć. Zmienne te wyraża się przy pomocy prostych miar zakładając na ogół, że jednemu z poziomów intensywności zmiennej odpowiada miara równa zero. Pozwala to intensywność zmiennej w danej chwili wyrazić jedną liczbą rzeczywistą. Mając wybrane zmienne buduje się pozostałe pojęcia zgodnie z podaną poprzednio receptą.

4.4. Ocena urządzenia

W diagnostyce technicznej rozumianej tak jak to podano w poprzednich rozważaniach chodzi o szeroko pojmowaną ocenę systemów technicznych tzn. wyznaczenie ich cech lub własności, reprezentujących funkcjonujące urządzenia mechaniczne. Istotną rolę odgrywa tu fakt, że traktowane jako system urządzenie jest podsystemem lub elementem większego systemu produkcyjnego.

Struktura systemu produkcyjnego i rola jaką dane urządzenie odgrywa w czasie funkcjonowania systemu, jest istotnym czynnikiem determinującym wymagania i co za tym idzie sposób oceny urządzenia. I tak np. frezarka nacinająca zęby kół będzie prawdopodobnie pracować w systemie produkcyjnym o strukturze równoległej (rys.3a) dlatego jej zle dopasowanie





Rys. 3 . Różne struktury systemów produkcyjnych .

do systemu lub stan niezdatności spowoduje wprowadzić zakłócenia procesu produkcji, ale go nie uniemożliwi. Natomiast przekładnia zębata, przenosząca napęd z turbiny do generatora, pracuje w systemie o strukturze szeregowej (rys.3b). W tym przypadku jej złe dopasowanie lub stan niezdatności uniemożliwi przeprowadzenie procesu.

Można zatem powiedzieć, że fakt należenia do zbioru stanowiącego system implikuje konieczność zachowania szeregu własności, które w omawianym poprzednio sensie uczynią dane urządzenie odpowiednim do funkcjonowania w danym systemie produkcyjnym. W praktyce cechy te ujawniają się właśnie poprzez sposób funkcjonowania urządzenia. Ponieważ odpowiedniość ta nie będzie nigdy całkowita trzeba się liczyć z faktem, że w pewnych przypadkach urządzenia tworzące system produkcyjny będą lepiej "dopasowane" a w innych gorzej. A zatem sposób funkcjonowania urządzenia mechanicznego (lub podzespołu bądź części urządzenia) w systemie ^{będzie} raz lepszy a raz gorszy.

Na podstawie aktualnego stanu wiedzy i stosowanych w praktyce metod oceny, własności ogólne ujawniające istnienie i sposób funkcjonowania urządzenia można tak jak to powiedziano w poprzednim punkcie sklasyfikować według ich podobieństwa

w uporządkowane zbiory opisujące podstawowe cechy (zwane również charakterystykami). Są to jakość, funkcjonalność, efektywność i niezawodność [⊗]). Charakterystyki mogą być przedstawione jako jednokolumnowe macierze, reprezentujące wektory ^{⊗⊗}), których współrzędnymi są na ogół miary lub ciągi miar, określające własności ogólne urządzenia. Własności mogą być wartościami stałymi lub funkcjami. Zaproponowana klasyfikacja może być przedmiotem dyskusji co do jej poprawności. Z prac przytoczonych w Bibliografii pod pozycjami [4, 20, 24, 49] wynika, że podział taki jest zgodny z panującymi obecnie tendencjami. Ponieważ nie jest celem pracy zaproponowanie i uzasadnienie kryteriów oceny urządzeń mechanicznych, klasyfikacja ta ma charakter raczej formalny i służy głównie dla zwiększenia jasności rozważań.

Jakość jest to charakterystyka lub inaczej cecha urządzenia opisująca go pod względem eksploatacyjnym (mechanicznym):

⊗) Przyjęcie niezawodności jako charakterystyki opisującej funkcjonujące urządzenie może być uznane za błąd zwłaszcza w rozumieniu wielu badaczy zajmujących się problemami poszukiwania uszkodzeń np. dużych systemów elektronicznych, które w rezultacie tego uszkodzenia znajdują się w fazie odnowy. W rozważanym przypadku niezawodność została ujęta jako charakterystyka ruchowa opisująca aktualny stan techniczny urządzenia (stopień zużycia, wystąpienie stanów przedawaryjnych itp) oraz przydatność do dalszej eksploatacji. Tak jest ona rozumiana w pozycjach [20, 73].

^{⊗⊗}) Dla ścisłości rozważań takie określenie należałoby udowodnić, dla każdego konkretnego przypadku. Ponieważ charakterystyki te służą tu do przedstawienia pewnego sposobu rozumowania i wyodrębnienia pewnej grupy własności, a z drugiej strony istnieją już w literaturze pewne tendencje do nazywania tego rodzaju twórców wektorami (patrz np. pozycje [49, 58]), dowód nie będzie tu przytaczany. W dalszych częściach pracy w podobny sposób będą zapisane wektory wejścia, wyjścia i stanu systemu. Przesłanki ogólne, które motywują przyjęcie tych zapisów podane w punkcie 5.4. są również słuszne w tym przypadku.

$$(5) \quad \bar{K} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ k_n \end{bmatrix} .$$

Poszczególne współrzędne mogą reprezentować następujące własności ogólne urządzenia:

- k_1 - parametry techniczno - eksploatacyjne (moc, wydajność, zużycie paliwa itp.);
- k_2 - poprawność i precyzja działania w systemie innych maszyn i urządzeń (mierzona wartością błędu pomiędzy efektem eksploatacyjnym zamierzonym i osiągniętym) ;
- k_3 - trafność w stosunku do przyjętego modelu teoretycznego (mierzona wartością błędu pomiędzy parametrami założonymi i rzeczywistymi) ;
- k_4 - stopień szkodliwego oddziaływania na środowisko i człowieka ;
- k_5 - stopień zakłócenia procesu eksploatacyjnego urządzenia przez procesy towarzyszące ;
- k_6 - nowoczesność rozwiązania konstrukcyjnego (mierzona różnymi wskaźnikami zależnie od rodzaju urządzenia) ; itd.

Funkcjonalność jest to charakterystyka urządzenia opisująca go pod względem praksologicznym. Jest to zespół własności opisujący urządzenie w sferze kontaktów z człowiekiem - użytkownikiem [27] ;

$$(6) \bar{P} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ p_m \end{bmatrix} \cdot$$

Poszczególne współrzędne mogą reprezentować następujące własności ogólne urządzenia :

p_1 - własności ergonomiczne (np. wibroakustyczne) ;

p_2 - łatwość sterowania ;

p_3 - estetyka urządzenia ;

p_4 - naprawialność ;

p_5 - łatwość obsługi okresowej ;

p_6 - łatwość transportu; itd .

Efektywność jest to charakterystyka urządzenia opisująca je pod względem ekonomicznym :

$$(7) \bar{C} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ c_1 \end{bmatrix} \cdot$$

Poszczególne współrzędne mogą reprezentować następujące własności ogólne urządzenia:

c_1 - koszt wyprodukowania jednostki produktu wytwarzanego przez urządzenie ;

c_2 - koszt wyprodukowania jednostki (kg lub m^3) urządzenia ;

- c_3 - koszt obsługi urządzenia ;
- c_4 - pobór energii dla wyprodukowania jednostki produktu ;
- c_5 - sprawność urządzenia wyrażająca się stratami własnymi energii przy wyprodukowaniu jednostki produktu ;
- c_6 - szybkość działania urządzenia ;
- itd.

Niezawodność jest to charakterystyka opisująca zgodność funkcjonowania urządzenia z wymaganiami dotyczącymi trwałości i bezawaryjności :

$$(8) \bar{R} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_s \end{bmatrix} .$$

Poszczególne współrzędne mogą reprezentować następujące własności ogólne urządzenia :

- r_1 - prawdopodobieństwo prawidłowego funkcjonowania urządzenia (lub jego podzespołów bądź elementów) w określonym czasie ;
- r_2 - zużywanie się elementów i połączeń urządzenia na jednostkę czasu ;
- r_3 - zmęczenie elementów i połączeń na jednostkę czasu ;
- r_4 - obciążenia elementów i połączeń występujące w czasie eksploatacji urządzenia ;
- r_5 - struktura funkcjonalna urządzenia (mierzona np. liczbą elementów lub połączeń ruchowych) ;
- r_6 - liczba elementów rezerwowych ;

r_7 - wartość części zmiennych, które muszą stanowić rezerwę istniejącą podczas funkcjonowania urządzenia ;
itd.

Własnościom ogólnym urządzeń czyli współrzędnym wektorów \bar{K} , \bar{P} , \bar{C} oraz \bar{R} mogą być przyporządkowane miary będące wartościami stałymi, bądź funkcje (przeważnie czasu). Wektory te a zatem i charakterystyki urządzenia są w pełni znane wtedy gdy znane są wartości liczbowe, bądź postacie i współczynniki funkcji opisujących poszczególne współrzędne. Obecnie w praktyce dla oceny urządzenia wyznacza się ilościowo niektóre współrzędne tych wektorów, których znajomość jest niezbędna dla prawidłowej eksploatacji urządzenia.

Współrzędne poszczególnych wektorów można podzielić na trzy grupy. Pierwsza to te, których wpływ na sposób funkcjonowania jest trudny do zmierzenia^{*)} i przedstawienia w postaci ilościowej, mieszczące się raczej w mierze odczuć człowieka, np. k_6 , p_1 , p_3 . Druga grupa to współrzędne mierzalne dla których wyznaczenie tego wpływu jest stosunkowo proste i wymaga jedynie wglądu do odpowiedniej dokumentacji, np. k_1 , p_5 , p_6 , c_1 , c_2 itp. .

Trzecia grupa to współrzędne mierzalne: k_5 , p_1 , c_5 , r_2 , r_3 , reprezentujące własności, które realizują się wyłącznie w istniejącym i funkcjonującym urządzeniu poprzez zachodzące w nim procesy. Korzystając z dotychczasowych obserwacji i doświadczeń zebranych przy budowie i eksploatacji urządzeń mechanicznych można zauważyć, że pewne parametry techniczne lub procesy znacznie lepiej ujawniają jedne charakterystyki niż inne. Te najczęściej wykorzystywane w praktyce^{**)}

*) Jest to niemierzalność w sensie praktycznym a nie teoretycznym.

^{**) W poprzednich pracach autora np. [38, 39], tabela ta była przedstawiona w nieco innej formie. Studiując zagadnienia diagnostyki wibroakustycznej autor doszedł do wniosku, że możliwości odwzorowań funkcjonalności i niezawodności przez procesy wibroakustyczne (drgania i hałas) są dość powszechnie wykorzystywane. Stąd uwzględnienie tego faktu w tej tabeli.}

odwzorowania przedstawiono poglądowo w postaci macierzy zero-jedynkowej na rys. 4. Jedynką oznaczono sytuację kiedy odwzorowanie wykorzystuje się często, a zerem - kiedy rzadko.

Cecha	Istnienie urządzenia	Funkcjonowanie urządzenia				
		proces użytkowy	procesy towarzyszące			
			dynamiczne	akustyczne	tarcia i zużycia	termodynam.
\vec{K}	0	1	1	1	1	1
\vec{P}	1	0	1	1	0	0
\vec{C}	1	1	0	0	0	0
\vec{R}	0	1	1	1	1	1

Rys. 4. Stosowane odwzorowania cech urządzeń.

Grubą linią zakreślono obszar zainteresowań diagnostyki technicznej taki jak omówiono poprzednio. Porównując omawiane wyżej cechy urządzenia i ich współrzędne z tą macierzą łatwo zauważyć, że w zakreślonym obszarze znajdują się własności zakwalifikowane do trzeciej grupy. Linią podwójną grubą i cienką zakreślono obszar zainteresowań diagnostyki wibroakustycznej.

5. Teoretyczne podstawy diagnozowania

5.1. Uwagi wstępne

Dotychczasowe rozważania jakościowe dotyczące pojęć podstawowych oraz procesów zachodzących w urządzeniach mechanicznych skłaniają do podjęcia próby ścisłego ujęcia procesu diagnozowania, która połączyłaby tę filozofię z praktyką badawczą. Wykorzystując pojęcia i język stosowany w teorii systemów, cybernetyce i teorii automatycznej regulacji, zaproponowano matematyczny model systemu - urządzenia mechanicznego uwzględniający zachodzące w nim procesy. Przy pomocy teorii mnogości, dla potrzeb diagnostyki urządzeń mechanicznych, zapisano rzeczywisty system i zachodzące w nim procesy. Wprowadzając szereg założeń upraszczających uzyskano przybliżony model odwzorowań wejścia i stanów w sygnały. Model ten skomentowano w odniesieniu do warunków rzeczywistych. Osiągnięcie odpowiedniości między relacjami matematycznymi a fizyczną realizacją urządzenia i zachodzących w nim procesów uściśla wywoływanie pozwalając jednocześnie na wprowadzenie niezbędnych uproszczeń lub wzbogaceń.

W teorii automatycznej regulacji znana jest algebraiczna teoria strukturalna maszyny zaprezentowana m.in. w poz. [21]. Aksjomaty przy pomocy których Autorzy tej pracy Hartmanis i Stearns definiują pojęcie maszyny są zbliżone do aksjomatów określających model cybernetyczny w punkcie 3.3. Definicja ta jak i cała teoria ukierunkowana jest głównie dla objaśnienia procesów zachodzących w maszynach cyfrowych, urządzeniach sterujących, cyfrowych układach elektronicznych itp., i nie nadaje się dla objaśnienia zagadnień diagnostyki urządzeń mechanicznych. Tym niemniej może ona stanowić wzór zastosowania do tego celu, pewnego sposobu rozumowania oraz narzędzia matematycznego, inspirujący do zaproponowania podobnej teorii.

Opierając się na modelu $\bar{P} + \bar{D}$ podanym w punkcie 4.2. i podtrzymując założenie, że $\|\bar{D}\| \gg \|\bar{P}\|$, teoria zostanie

podana w ujęciu deterministycznym. Występujący w praktyce indeterminizm zostanie skomentowany w trakcie prowadzenia rozważań. Podobnie jak poprzednio przyjmuje się również założenia o lokalnej liniowości, stacjonarności i ergodyczności.

5.2. System i model cybernetyczny urządzenia mechanicznego

Omawiane poprzednio kategorie przy pomocy, których opisuje się system należy teraz odnieść do grupy obiektów jakimi są urządzenia mechaniczne. Mamy do czynienia z obiektami działającymi zgodnie z prawami mechaniki, dlatego przedstawienie urządzenia jako systemu musi być dokonane na gruncie mechaniki oraz teorii maszyn i mechanizmów [75, 76]. Urządzenia mechaniczne składa się z ciał materialnych (zespołów, podzespołów, części). Z punktu widzenia mechaniki każde z tych ciał jest rozciągłe, posiada masę^{*}, może zajmować różne położenia pozostając w otoczeniu innych ciał. Z punktu widzenia teorii maszyn i mechanizmów ciałom tym nadano takie cechy, że wzajemnie ze sobą współpracując zapewniają skoordynowane i celowe działanie urządzenia. Można powiedzieć, że ciała te tworzą niepusty zbiór elementów w postaci:

$$(9) \quad V = \{ v_i : i \in I \},$$

gdzie: I - skończony ciąg indeksów.

Tak rozumiany zbiór tworzy realną przestrzeń ciał zwaną przestrzenią fizyczną. Położenia poszczególnych ciał są podzbiorami tej przestrzeni. Z punktu widzenia mechaniki newtonowskiej przestrzeń fizyczna ma charakter przestrzeni euklidesowej, której elementami są obiekty (punkty) geometryczne. Dla celów analitycznych przestrzeń tą wyraża się w postaci izometrycznej z nią przestrzeni kartezjańskiej zastępując

* W niektórych typach modeli matematycznych np. w modelach dyskretnych masę pewnych elementów pomija się.

punkty odzwierciedlającymi je liczbami lub ciągami liczb. W dalszych rozważaniach zbiór będzie rozumiany jako taka przestrzeń.

Zmiany ruchu elementów występujące podczas funkcjonowania systemu są rezultatem (oraz źródłem) oddziaływań istniejących w zbiorze i poza nim. Można innymi słowy powiedzieć, że istnieją okoliczności fizyczne (termin użyty w poz. [75], został wprowadzony przez A. Przeborskiego w pracy pt: Wykład mechaniki teoretycznej, t III, Wyd. Kasy im. Mianowskiego, Warszawa 1935 r.) objawiające się takimi zjawiskami jak np:

- obecność innego ciała lub zbioru ciał ,
- kontakt z innym ciałem ,
- lepkość, naładowanie elektryczne, nagrzanie innego ciała lub ośrodka itp .

Dla urządzeń mechanicznych okoliczności fizyczne wynikają ze sposobu ukształtowania i wzajemnego usytuowania elementów-podzespołów lub zespołów, torów po których one się poruszają, przenoszonych obciążeń itd. W praktyce okoliczności te ujawniają się w postaci więzów działających na elementy zbioru V . Te okoliczności lub więzy reprezentują zbiór relacji zachodzących pomiędzy elementami zbioru V . Termin "relacja" jest tu użyty w rozumieniu cybernetyki i teorii systemów z punktu widzenia teorii mnogości oznacza obiekt lub przedmiot. W konsekwencji powyższych rozważań można przyjąć, że istnieje niepusty zbiór relacji w postaci:

$$(10) \quad R = \{ r_j : j \in J \} ,$$

gdzie: J - skończony ciąg indeksów .

Dla ujednoczenia rozważań przyjmijmy, że okoliczności fizyczne można wyrazić w postaci liczb lub ciągów liczb. Takie podejście jest znane i stosowane w mechanice przy modelowaniu układów mechanicznych. Zbiór R można wtedy wyrazić podobnie jak zbiór V w postaci przestrzeni kartezjańskiej.

Biorąc pod uwagę interpretację fizyczną zbiorów V i R

oraz możliwości ich wyrażenia w postaci przestrzeni kartezjańskich, można powiedzieć, że iloczyn kartezjański :

$$(11) \quad S = V \times R ,$$

będzie reprezentował uporządkowaną zależność elementów i występujących pomiędzy nimi relacji. Jeżeli przyjąć, że w zbiorach V i R nie zachodzą żadne zmiany, lub że zbiory te rozpatrujemy w pewnej chwili czasu to równanie (11) można uznać za matematyczną reprezentację niefunkcjonującego ale posiadającego strukturę systemu. Zaś system ten, może stanowić reprezentację urządzenia mechanicznego a dokładniej jego struktury rozpatrywanej w ujęciu statycznym.

W rzeczywistości istotą podejścia systemowego jest uwzględnienie zmian zachodzących w czasie. Dlatego dla pełnego opisu systemu reprezentującego wybrany fragment natury należy uwzględnić czas, który istnieje niezależnie od tej natury.

Badania i obserwacje w diagnostyce urządzeń mechanicznych prowadzone są w dwóch różnych skalach czasu. Pierwsza z nich eksponuje czas umownie nazywany "krótkim" (odcinki sekundowe lub minutowe), w którym obserwuje się zjawiska szybkozmienne (np. drgania mechaniczne lub akustyczne) zakładając niezmiennosć struktury systemu. Rezultatem tych obserwacji są informacje o aktualnych cechach lub własnościach systemu.

Druga skala eksponuje czas życia systemu umownie nazywany "długim" (miesiące, lata). Powszechnie wiadomo, że podczas eksploatacji systemów mechanicznych zachodzi cały szereg powolnych nieodwracalnych zmian ich struktury (np. zużywanie, starzenie się), które stopniowo ograniczają przydatność eksploatacyjną systemów aż w końcu uniemożliwiają ją w ogóle. Te zmiany obserwowane w czasie użytkowania nazywają się trendami. Ich znajomość jest istotnym czynnikiem zapewniającym prawidłową eksploatację systemu w czasie jego życia.

Z punktu widzenia fizyki jest to oczywiście ten sam czas. Tym niemniej w diagnostyce istnieją podyktowane względami praktycznymi tendencje [10, 31] do niezależnego rozpatrywa-

nia tych czasów.

Takie podejście znacznie ułatwia badanie systemów i stawianie diagnozy nie wprowadzając równocześnie istotnych błędów.

Przyjmijmy zatem, że istnieje niepusty zbiór czasu "krótkiego" :

$$(12) \quad T = \{t_k : k \in K\},$$

i czasu "długiego" :

$$(13) \quad \Theta = \{v_{\kappa} : \kappa \in \mathcal{K}\},$$

gdzie: K i \mathcal{K} - skończone, liniowo uporządkowane ciągi indeksów.

Przedstawiony punkt widzenia podlega w konsekwencji pewien sposób zmodelowania czasu dla potrzeb diagnostyki. Zbiory (12) i (13) można zastąpić przestrzeniami a ściślej dwiema ortogonalnymi osiami liczb rzeczywistych z relacją porządku. Punkty ich przecięcia wyznaczają na osi Θ czasy v_{κ} (gdzie $\kappa \in \mathcal{K}$, zaś $v_{\kappa} \in \Theta$), w których dokonano kolejnych niezależnych obserwacji systemu; każdej obserwacji dokonywano w czasie T . Te obserwacje opisane wybraną do tego celu miarą przeważnie punktową, wyznaczają (na ogół monotoniczny) trend zmian badanej własności systemu.

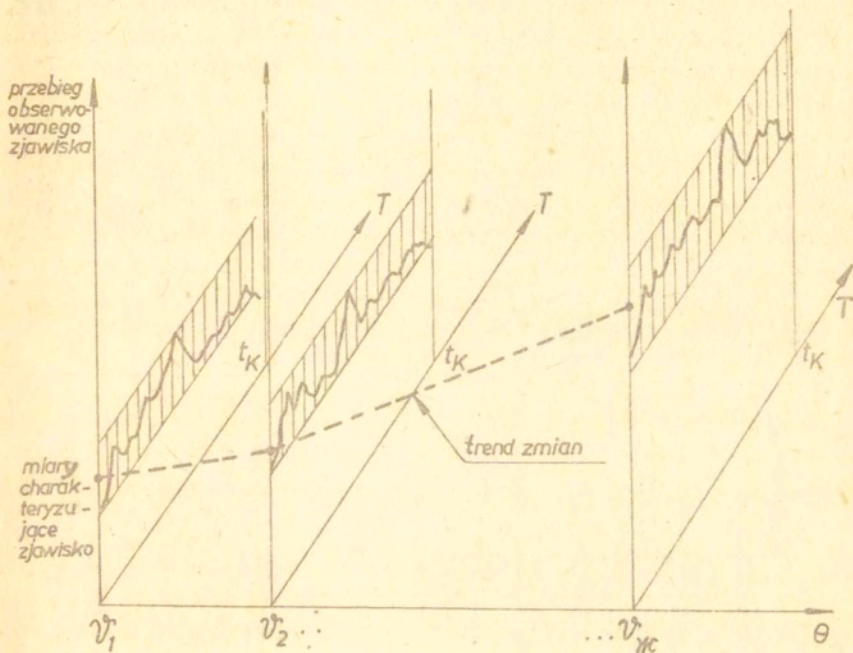
Pokazano to w sposób schematyczny na rys. 5.

W diagnostyce systemów mecha.icznych ze względów eksploatacyjnych interesują nas zazwyczaj właśnie owe powolne nieodwracalne zmiany. Wobec tego system o tak zmieniającej się strukturze można zapisać przy pomocy zależności :

$$(14) \quad S^{\Theta} = S \times \Theta = V \times R \times \Theta.$$

Jest to iloczyn kartezjański produktu S czyli struktury przez oś czasu Θ . Wielkość S jest zbiorem uporządkowanych trójek $\langle v_i, T_j, v_{\kappa} \rangle$, gdzie $i \in I, j \in J, \kappa \in \mathcal{K}$, w którym można wyodrębnić podzbiory takich trójek dla tych samych chwil

czasu : $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_{nc}, \dots, \vartheta_{\Sigma}$.



Rys. 5 . Schematyczny model czasu dla potrzeb diagnostyki.

Mamy zatem ciąg podzbiorów punktozdarzeń reprezentujących strukturę systemu, który zgodnie z własnością czasu, został chronologicznie uporządkowany.

Założenia zapisane zależnościami (9) i (12) są podstawą rozważań Mesarovica i Takahary [50] a także zostały przyjęte przez Autorów pracy [74] . W pracach tych podobnie jak w

artykule Mesarovica zamieszczonym w poz. [64] nie uwzględnia się istnienia zbiorów relacji w postaci jawnej oraz czasu życia systemu. Prace te podobnie jak wspomniana poz. [21] są ukierunkowane przede wszystkim na teoretyczne objaśnienie funkcjonowania urządzeń automatycznej regulacji, które mogą być traktowane jako czarna skrzynka. W przypadku opisu systemu dla potrzeb rozważań dotyczących urządzeń mechanicznych i maszyn, uwzględnienie zbioru relacji oraz czasu życia w postaci jawnej wydaje się konieczne. Z punktu widzenia fizyki zachodzących procesów mają one decydujące znaczenie dla sposobu funkcjonowania oraz eksploatacji systemu-urządzenia. Podobne uwagi głównie w stosunku do założenia (10) można zaobserwować u Langego [47, 48] i Sadowskiego [70].

Uwzględnienie zmian systemu przez wprowadzenie czasu do iloczynu kartezjańskiego (11), wydaje się być odpowiednim zapisem omawianych poprzednio transformacji zachodzących w modelu cybernetycznym. Ten sposób będzie również stosowany w dalszych częściach rozważań.

5.3. Funkcjonowanie systemu

Możliwości organizacyjne i aparaturowe powodują iż badanie nieodwracalnych zmian struktury systemu w czasie Θ (trendy) składa się z badań, powtarzanych niezależnie w sposób identyczny w chwilach v_1, v_2, \dots, v_m (co tydzień, miesiąc czy kwartał), zjawisk charakteryzujących funkcjonowanie systemu w czasie T . W takich badaniach a także w badaniach prowadzonych w sposób doraźny dla potrzeb konstrukcji czy technologii wspomnianych zmian struktury systemu nie uwzględnia się w ogóle. Wynika stąd, że zarówno w jednym jak i w drugim przypadku analizując pojedynczy proces diagnostyczny systemu mechanicznego, czas Θ można pominąć w początkowej fazie rozważań.

Określmy zbiory :

$$(15) \quad V_u = \{ v_{i_u} : i_u \in I_u \} ,$$

oraz:

$$(16) \quad V_y = \{v_{i_y} : i_y \in I_y\}.$$

Założmy, że spełnione są następujące zależności:

$$I_u \cap I_y = \emptyset, \quad I_u \cup I_y \subset I.$$

Rozumując tak jak przy objaśnianiu modelu cybernetycznego w punkcie 4.2., można powiedzieć, że każdy system podlega oddziaływaniu otoczenia poprzez swoje wejście, zaś sam oddziałuje na otoczenie poprzez swoje wyjście. Przyjmijmy wszystkie okoliczności fizyczne, którymi otoczenie oddziałuje na system działają jego elementy należące do zbioru V_u i dadzą się zapisać w postaci zbioru relacji:

$$(17) \quad R_u = \{r_{j_u} : j_u \in J_u\}.$$

Przyjmijmy również, że wszystkie okoliczności fizyczne, którymi system oddziałuje na otoczenie są tworzone przez jego elementy należące do zbioru V_y i dadzą się zapisać w postaci zbioru relacji:

$$(18) \quad R_y = \{r_{j_y} : j_y \in J_y\}.$$

Podobnie jak dla elementów spełnione są przy tym zależności:

$$J_u \cap J_y = \emptyset, \quad J_u \cup J_y \subset J.$$

Wtedy skończony zbiór:

$$(19) \quad U = V_u \times R_u,$$

można nazwać wejściem systemu, zaś skończony zbiór:

$$(20) \quad Y = V_y \times R_y,$$

można nazwać wyjściem systemu.

Interpretacja zależności (19) i (20) jest podobna do interpretacji zależności (11). Jest to wejście i wyjście o charakterze statycznym. Aby uwzględnić zmiany w czasie^{*}, wejście systemu należy zapisać w postaci:

$$(21) \quad U^T = U \times T = V_u \times R_u \times T,$$

zaś wyjście w postaci:

$$(22) \quad Y^T = Y \times T = V_y \times R_y \times T.$$

Zbiór czasu T był opisany zależnością (12) i omówiony poprzednio.

Załóżmy wreszcie, że istnieje niepusty i skończony zbiór:

$$(23) \quad X = \{w_{x,q} : q \in Q\},$$

wielkości charakteryzujących wewnętrzne własności systemu, przynależne mu w chwili: $t \in T$, oraz że wielkości dadzą się opisać w postaci liczb lub skończonych ciągów liczb. Można zatem przyjąć, że zbiór ten może być wyrażony w postaci przestrzeni kartezjańskiej. Wielkość X jest nazwana globalnym stanem systemu lub przestrzenią stanów. W ujęciu dynamicznym zbiór stanów można zapisać w postaci iloczynu kartezjańskiego podobnego do zależności (21) i (22) (zapis ten reprezentuje transformację stanów w modelu cybernetycznym systemu):

$$(24) \quad X^T = X \times T.$$

^{*}Zapisać zostały zmiany w czasie "krótkim" w którym będzie dokonywany ew. pomiar własności systemu.

Należy zauważyć, że wielkości tworzące przestrzeń stanów mogą się wiązać z relacjami istniejącymi pomiędzy elementami systemu. Konieczność oddzielnego uwzględnienia przestrzeni X wynika z przesłanek fizycznych i metodologicznych. Z jednej strony są to wielkości, które można obserwować w czasie "krótkim", wybrane spośród tych, które w najistotniejszy sposób wpływają na funkcjonowanie systemu we współdziałaniu z innymi systemami. Niektóre z nich wiążą się bezpośrednio z relacjami jak to ma miejsce np: w przypadku wielkości opisujących własności ekonomiczne czy estetyczne. Z drugiej strony wybór ten został podyktowany potrzebą zbadania i oceny sposobu funkcjonowania systemu w zależności od tej właśnie grupy wielkości oraz sposobem obserwacji w krótkich odcinkach czasu.

Podsumowując powyższe rozważania istnienie i funkcjonowanie systemu można zapisać przy pomocy następującej relacji odwzorowania:

$$(25) \quad \Psi^{T, \Theta} : U^T \times X^T \times S^{\Theta} \times T \times \Theta \rightarrow Y^{T, \Theta} \quad (*)$$

Jeżeli założymy absolutnie statyczny charakter zjawisk to relacja ta przyjmie postać:

$$(26) \quad \Psi : U \times X \times S \rightarrow Y.$$

Zależności (25) i (26) reprezentują dwa skrajne przypadki uwzględniania i nieuwzględniania funkcjonowania systemu.

^{*)}Dla U^T i X^T uporządkowanie względem czasu T jest już wprowadzone zgodnie z definicjami (21) i (24), zaś dla S^{Θ} uporządkowanie w czasie Θ zapewnia definicja (14). Ponowne uwzględnienie tych uporządkowań poprzez wprowadzenie czasów T i Θ do zależności (25) ma odzwierciedlać jawną postać zależności funkcjonowania systemu od czasu i nie jest błędne z punktu widzenia formalnej poprawności zapisu.

Badanie teoretyczne lub eksperymentalne zjawisk reprezentowanych przy pomocy relacji $\Psi^{T, \ominus}$ - nazywa się rozpoznaniem systemu dynamicznego, a przy pomocy relacji Ψ - rozpoznawaniem systemu statycznego. Relacja $\Psi^{T, \ominus}$ - reprezentuje sytuację bardzo bliską rzeczywistości ale trudną do praktycznego zbadania, natomiast relacja Ψ - reprezentuje sytuację która w rzeczywistości nigdy nie istnieje, ale znacznie łatwiejsza do analizy. Zależnie od potrzeb i możliwości dokonuje się uproszczeń relacji $\Psi^{T, \ominus}$ takich, że rzeczywiste badania dotyczą sytuacji znajdującej się pomiędzy tymi skrajnymi przypadkami. Badane sytuacje zależą z jednej strony od celów i zadań jakie współczesna konstrukcja, technologia i eksploatacja stawiają diagnostyce a z drugiej strony od możliwości badawczych tej dziedziny nauki.

Obserwując rozwój nauki i biorąc pod uwagę uproszczenia poczynione podczas rozważań sposobów badania trendów, można wyróżnić dwa kierunki postępowania badawczego. W pierwszym przypadku próbuje się odpowiedzieć na pytanie jak wejście zewnętrzne oraz struktura systemu wpływa na wyjście, mniejszą wagę przywiązując do stanu systemu. Odpowiedzią na te pytanie zajmuje się głównie identyfikacja. W drugim przypadku staramy się odpowiedzieć na pytanie jak wejście oraz stan systemu wpływa na wyjście mniejszą wagę przywiązując do struktury systemu. Odpowiedź na to pytanie jest głównym zadaniem diagnostyki. Można zatem powiedzieć, że dla diagnostyki najważniejsze będą następujące relacje odwzorowania (uwzględniamy przy tym poczynione poprzednio założenie, że praktyczne badanie trendów w czasie \ominus , odbywa się poprzez kolejne powtarzanie eksperymentu w czasie T):

$$(27) \quad G^T: U^T \times X^T \times T \rightarrow Y^T,$$

$$(28) \quad \Phi^T: U^T \times T \rightarrow Y^T,$$

$$(29) \quad F^T: X^T \times T \rightarrow Y^T,$$

lub :

$$(30) \quad G: U \times X \rightarrow Y,$$

$$(31) \quad \Phi: U \rightarrow Y,$$

$$(32) \quad F: X \rightarrow Y.$$

Ze względu na sposób funkcjonowania systemów mechanicznych, jest rzeczą oczywistą istnienie związku pomiędzy wejściem i stanem systemu :

$$(33) \quad H^T: U^T \times T \rightarrow X^T,$$

lub :

$$(34) \quad H: U \rightarrow X.$$

Zależności te reprezentują w praktyce - w przypadku relacji:

G^T, G - badania wyjścia systemu dla zmieniającego się wejścia i stanu systemu; jest to kompleksowe ujęcie typowego zadania współczesnej diagnostyki;

Φ^T, Φ - badania wyjścia systemu w zależności od (zmieniającego się w czasie) wejścia - w tym zakresie diagnostyki świadczy istotne usługi na rzecz identyfikacji systemu traktowanego jako czarna skrzynka;

F^T, F - badania wyjścia systemu w zależności od stanu (zmieniającego się w czasie) - jest to typowe zadanie współczesnej diagnostyki.

W dotychczasowych rozważaniach operowano pojęciem relacji.

Wiadomo, że relacja jest zbiorem uporządkowanych n -tek (par, trójek, czwórek itd) nie zaś procesem czy funkcjonowaniem. Tym niemniej relacje rozpatrywane w czasie mogą podobnie jak iloczyny kartezjańskie, stanowić matematyczną reprezentację procesów i być pomocne w formułowaniu i rozwiązywaniu zadań diagnostycznych. Do dalszych rozważań zostaną wykorzystane metody analizy odwzorowań przestrzeni wektorowych. Metody te są stosowane do analizy układów sterowania i informatyki od kilkunastu lat. Znane i stosowane w telekomunikacji i teorii informacji dorobiły się wielu poważnych pozycji bibliografii [25, 71, 79].

5.4. Przestrzenie wejścia, stanów i wyjścia

Omówione poprzednio z punktu widzenia teorii mnogości przestrzenie U , X , Y rozpatrzmy teraz od strony fizyki wielkości, które je tworzą:

Wielkości charakteryzujące obserwowany system dogodnie jest podzielić na:

- 1/ zmienne wejściowe np: u_1, u_2, \dots, u_N - przedstawiające bodźce zewnętrzne działające na badany system poprzez pewną grupę jego elementów i wpływające na jego zachowanie ;
- 2/ zmienne stanu np: x_1, x_2, \dots, x_m - przy pomocy których można opisać cechy lub własności systemu istotne z punktu widzenia prowadzonych badań dla sposobu jego funkcjonowania czyli szeroko podjętej oceny ;
- 3/ zmienne wyjściowe np: y_1, y_2, \dots, y_p - opisujące te objawy funkcjonowania systemu, generowane przez inną grupę jego elementów, które są interesujące dla obserwatora; w przypadku diagnostyki będą to sygnały diagnostyczne. Podział ten odpowiada przeprowadzonym poprzednio rozważaniom dotyczącym wejścia, wyjścia i stanów systemów i ich modeli cybernetycznych. Wszystkie zmienne można opisać

miarami którymi są liczby lub ciągami liczb uporządkowanymi w czasie (funkcjami).

Rozpatrzmy teraz własności tych zmiennych dla wybranej grupy systemów jakimi są urządzenia mechaniczne. Szczegółowo dokonana zostanie teraz analiza i dyskusja zmiennych stanu.

Stan systemu został poprzednio zdefiniowany dla potrzeb diagnostyki podobnie jak w poz. [58, 71, 79] jako zbiór wielkości skalarnych charakteryzujących wewnętrzne własności urządzenia. Niech zmienne stanu: x_1, x_2, \dots, x_Q będą traktowane jako ten zbiór. Wybór ten jest uwarunkowany przez badany system i rozpatrywany problem. Ogólnie można powiedzieć, że wielkości te powinny być tak wybrane aby gwarantowały najbardziej precyzyjny (dokładny i jednoznaczny) oraz najbardziej informatywny opis stanu systemu. Chodzi tu o przekazanie możliwie dużej ilości informacji przy pomocy najmniejszej liczby danych. W praktyce osiąga się to dzięki wysokiej wrażliwości i liniowej niezależności wybranych zmiennych stanu.

Przyjmijmy, że warunki te będzie spełniał uporządkowany zbiór zmiennych stanu:

$$(35) \quad \{ x_1, x_2, \dots, x_Q \} .$$

Zakładając, że w zbiorze istnieje punkt zerowy: $\{0, 0, \dots, 0\}$, można od tego punktu wyznaczyć układ osi współrzędnych:

x_1, x_2, \dots, x_Q Stan systemu można w tym układzie zapisać przy pomocy wektora:

$$\bar{x} = \overset{\sim}{1} x_1 + \overset{\sim}{2} x_2 + \dots + \tilde{Q} x_Q,$$

gdzie: $\overset{\sim}{1}, \overset{\sim}{2}, \dots, \tilde{Q}$ - wektory jednostkowe.

Zbiór: $\overset{\sim}{1} x_1, \overset{\sim}{2} x_2, \dots, \tilde{Q} x_Q$ - jest, z definicji współrzędnych: x_1, x_2, \dots, x_Q , liniowo niezależny i

generuje przestrzeń, jest zatem bazą tej przestrzeni, zaś zapis (35) przedstawia zbiór współrzędnych wektora \bar{x} względem

bazy \mathfrak{B}). Wektor ten można zapisać w postaci macierzy:

$$(36) \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_Q \end{bmatrix},$$

przy czym nie ma tu znaczenia czy jest to macierz typu $1 \times Q$ czy też $Q \times 1$. Struktura tak dobranej przestrzeni zapewnia możliwość dodawania wektorowego mnożenia przez stałą i wykonywania innych operacji liniowych.

Skończony zbiór wszystkich możliwych stanów systemu zapisanych w postaci wektorów utworzy przestrzeń stanów:

$$(37) \quad X = \{x_q : q \in \hat{Q}\},$$

gdzie: $Q = 1, 2, \dots, q, \dots, Q$ - skończony ciąg indeksów.

Wektorowa przestrzeń X jest utworzona z niematerialnych punktów opisanych ciągami liczb; jest zatem szczególnym przypadkiem przestrzeni kartezjańskiej. Jeśli prawdziwa będzie równoważność: $x_q \Leftrightarrow w_{x,q}$, gdzie $q \in Q$, to postać (37) przestrzeni stanów będzie szczególnym przypadkiem postaci (23), zapisanym dla wybranej grupy systemów jakimi są urządzenia mechaniczne.

Jeżeli zmienne stanów są wybrane jako funkcja czasu to zbiór (35) przyjmie postać:

$$(38) \quad \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_Q(t)\},$$

*) Takie określenie wektora jest wystarczające dla prowadzonych tu rozważań. Przy badaniu modeli matematycznych konkretnych systemów wymaga ono każdorazowo udowodnienia (patrz punkt 4.4.). Niekiedy wygodniej jest posługiwać się macierzami kolumnami lub wierszowymi nie przydając im własności wektorów.

zaś wektor stanu można zapisać jako macierz :

$$(39) \quad \bar{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_Q(t) \end{bmatrix} .$$

Zbiór wszystkich możliwych wektorów $\bar{x}(t)$ utworzy przestrzeń stanów zależną od czasu :

$$(40) \quad X^T = \{x_q(t) : q \in \hat{Q}\},$$

gdzie: \hat{Q} - skończony ciąg indeksów taki sam jak w zależności (37). Z drugiej strony wiadomo, że wielkości $w_{x,q}$ z zależności (23) i t_k z zależności (12) można dobrać tak aby zbiór uporządkowanych względem czasu par: $\{ \langle w_{x,q}, t \rangle : q \in \hat{Q}, k \in K \}$ można było zapisać w postaci: $\{ w_{x,q}(t) : q \in \hat{Q} \}$. Jeśli podobnie jak poprzednio przyjmijemy, że prawdziwa jest równoważność : $w_{x,q}(t) \Leftrightarrow x_q(t)$, gdzie: $q \in \hat{Q}$, to przestrzeń stanów zapisana w postaci (40) będzie szczególnym przypadkiem przestrzeni zapisanej w postaci iloczynu kartezjańskiego (24), obowiązującym dla urządzeń mechanicznych.

Jak już wspomniano zmienne stanu czyli współrzędne : x_1, x_2, \dots, x_Q wektora \bar{x} są miarami wybranych wielkości fizycznych lub ich przyrostów w stosunku do wartości nominalnych (np. średnica, luz, ciśnienie, temperatura itp). Eksploatacja urządzenia narzuca pewne zakresy wartości, w których te miary powinny się zawierać (np. luz nie może być mniejszy i większy od wartości przewidzianych tolerancjami wykonawczymi i montażowymi oraz dopuszczalnym zużyciem, ciśnienie powinno się zawierać w granicach zapewniających prawidłowe i efektywne funkcjonowanie urządzenia itp.). Te zakresy wyznaczają granice domkniętych przedziałów, w których będą się zawierać wspomniane

miary gwarantujące prawidłowe funkcjonowanie systemu. Można zatem powiedzieć, że z punktu widzenia eksploatacji systemu możliwe są wartości :

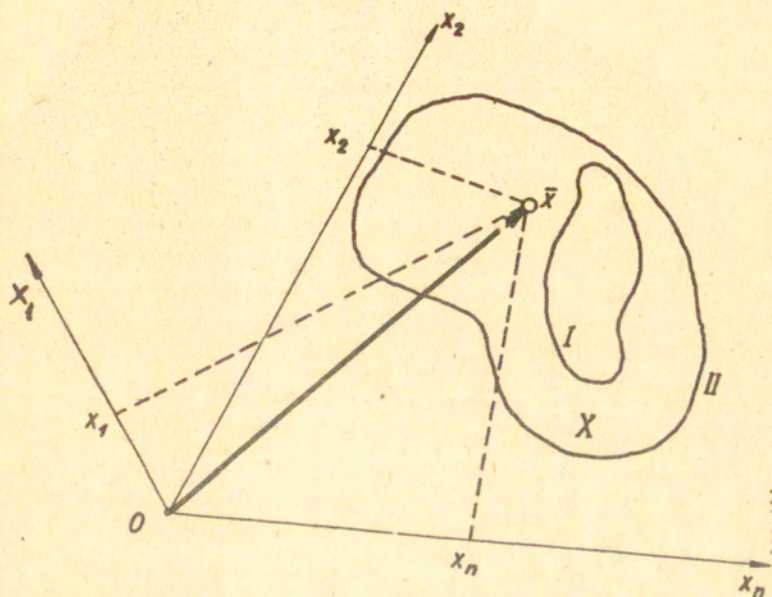
$$x_q \in \langle x_{q,\min}, x_{q,\max} \rangle, q \in \hat{Q}.$$

Z praktyki wiadomo, że urządzenie mechaniczne mogą funkcjonować w warunkach: $x_q < x_{q,\min}$ oraz $x_q > x_{q,\max}$, ale ich zdolność do wykonywania zadania eksploatacyjnego spada poniżej dopuszczalnej granicy. Z uwagi na to można powiedzieć, że wartości: $x_{q,\min}$ i $x_{q,\max}$ wyznaczają granice przedziału w sensie praktycznym a nie w sensie matematycznym. Te właśnie wartości graniczne są najbardziej interesujące dla diagnostyki. W dalszym ciągu rozważania będą prowadzone dla przedziałów $\langle x_{q,\min}, x_{q,\max} \rangle$; wychodząc z założenia, że stwierdzenie którejkolwiek z wartości granicznych jest równoznaczne z wyłączeniem systemu z użytkowania.

Teoretycznie są to przedziały ciągłe. W rzeczywistości mamy do czynienia z wielkościami mierzalnymi i w związku z tym aby rozróżnić dwie sąsiednie wartości współrzędnej x_q , muszą się one różnić od siebie o pewną wartość określoną możliwościami pomiaru. Można zatem powiedzieć, że każda współrzędna x_q przybiera wartość ze zbioru: $\{x_{q,1}, x_{q,2}, \dots,$

$x_{q,\beta}\}$, przy czym: $x_{q,1} \equiv x_{q,\min}$, $x_{q,\beta} \equiv x_{q,\max}$ oraz: $x_{q,1} < x_{q,2} < \dots < x_{q,\beta}$. Określając w podobny sposób wszystkie współrzędne:

x_1, x_2, \dots, x_q wektora stanu \bar{x} można wyznaczyć zbiór domknięty należący do przestrzeni stanów. W tym zbiorze powinien się znajdować każdy punkt reprezentujący wektor \bar{x} dopuszczalny z punktu widzenia eksploatacji systemu. Zbiory wartości \bar{x} dla wielkości granicznych minimalnych i maksymalnych tworzą w przestrzeni stanów dwie hiperpowierzchnie I i II odpowiadające eksploatacyjnym granicom użytkowania systemu. Pokazano to w sposób poglądowy na rys. 6.



Rys. 6 . Wektor i przestrzeń stanów .

Kierując się podobnymi zasadami co dla wektora stanu, można dobrać zbiór liniowo niezależnych zmiennych wejściowych:

$$(41) \quad \{ u_1, u_2, \dots, u_N \},$$

i na tej podstawie określić wektor wejścia :

$$(42) \quad \bar{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix} . \quad . \quad .$$

Rozumując dalej podobnie jak poprzednio można określić przestrzeń wejścia:

$$(43) \quad U = \{ u_n : n \in \hat{N} \},$$

gdzie: $\hat{N} = 1, 2, \dots, n, \dots, N$ - skończony ciąg indeksów. Jeżeli zmienne wejściowe dobierzemy tak aby prawdziwa była równoważność: $\langle \sum_{j_u \in J_u} v_{i_u j_u} \rangle \Leftrightarrow u_n$ przy czym: $i_u \in I_u, n \in \hat{N}, j_u \in J_u, n = i_u j_u$, to przestrzeń wejścia zapisana przy pomocy zależności (43) będzie szczególnym przypadkiem przestrzeni wejścia zapisanej przy pomocy zależności (19). Z punktu widzenia fizyki procesów wejściowych wiadomo, że pewne wymuszenia przyłożone są do pewnych elementów systemu. To uzasadnia możliwość zapisu przestrzeni wejścia przy pomocy iloczynu kartezjańskiego (19). W taki sam sposób informacja o procesach wejściowych musi być podana przy pomocy zmiennych $\{ u_n \}$ gdzie: $n \in \hat{N}$. A zatem obie strony powyższej równoważności są takiej samej natury fizycznej i nie ma istotnych przeszkód aby równoważność tą przyjąć za prawdziwą.

Jeżeli zmienne wejściowe zostały wybrane jako funkcje czasu to zbiór (41) przyjmie postać:

$$(44) \quad \{ u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t) \},$$

zaś wektor wejścia można zapisać jako macierz:

$$(45) \quad \bar{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_N(t) \end{bmatrix}.$$

Można teraz określić przestrzeń wejścia:

$$(46) \quad U^T = \{ u_n(t) : n \in \hat{N} \},$$

gdzie: \hat{N} - skończony ciąg indeksów taki sam jak w zależności (43). Zakładając możliwość zapisu w postaci funkcji, uporządkowanych względem czasu trójek będących elementami iloczynu kartezjańskiego (12), można przyjąć za prawdziwą równość: $\langle v_{i_u}, r_{j_u}, t_k \rangle \Leftrightarrow u_n(t)$, przy czym: $i_u \in I_u, j_u \in J_u, n \in \hat{N}, n = i_u j_u$, konsekwencji można powiedzieć, że przestrzeń wejścia zapisana w postaci (46) jest szczególnym przypadkiem przestrzeni zapisanej przy pomocy zależności (21) odniesionym do wybranej grupy systemów a mianowicie urządzeń mechanicznych.

W taki sposób można zbiór zmiennych wyjściowych :

$$(47) \quad \{ y_1, y_2, \dots, y_p \} ,$$

określić wektor wyjścia :

$$(48) \quad \underline{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_p \end{bmatrix} ,$$

i przestrzeń wyjścia :

$$(49) \quad Y = \{ y_p : p \in \hat{P} \} ,$$

gdzie: $\hat{P} = \{ 1, 2, \dots, p, \dots, P \}$ - skończony ciąg indeksów
Zakładając prawdziwość równość:

$$\langle v_{i_y}, r_{j_y} \rangle \Leftrightarrow y_p \quad \text{gdzie: } i_y \in I_y, j_y \in J_y, p \in \hat{P}, p = i_y j_y$$

można przyjąć, że powyższa przestrzeń wyjścia jest szczególnym przypadkiem przestrzeni zapisanej w postaci (20).

Wybierając zmienne wejściowe jako funkcje czasu, na podstawie ich uporządkowanego zbioru:

$$(50) \quad \{ y_1(t), y_2(t), \dots, y_p(t) \} ,$$

można określić wektor wyjścia:

$$(51) \quad \bar{y}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ y_p(t) \end{bmatrix},$$

oraz przestrzeń wyjścia:

$$(52) \quad Y^T = \{ y_p(t) : p \in \hat{P} \},$$

gdzie: \hat{P} - skończony ciąg indeksów, taki sam jak w zależności (49), która jest szczególnym przypadkiem przestrzeni zapisanej przy pomocy zależności (22), podobnie jak to było dla zależności (21) i (46).

W zależnościach: (19), (20), (21) i (22) zawarta jest informacja o zmianie w czasie wymuszeń wejścia i wyjścia oraz sposobie ich przyłożenia. Aby zachowane były wspomniane równoważności, identyczne informacje muszą być zawarte odpowiednio w zależnościach: (43), (49), (46) i (52). Łatwo stwierdzić, że w zależnościach tych informacje o sposobie przyłożenia wymuszeń nie występuje w postaci jawnej. Dla uniknięcia niezgodności trzeba założyć, że interpretacja fizyczna wektorów: (42), (48), (45), (51) oraz przestrzeni: (43), (49), (46) i (52), taką informację niesie. W praktyce w ten sposób podaje się wymuszenia w badaniach dynamiki układów mechanicznych, gdzie zapis wymuszeń w postaci funkcji czasu niesie informacje o sposobie (miejsce) ich przyłożenia lub informacje te podane są dodatkowo. Te same uwagi odnoszą się do stanów systemu zapisanych w postaci: (36) lub (38) i przestrzeni stanów zapisanych zależnościami: (24), (37) i (40). Przestrzenie wejścia i wyjścia podobnie jak przestrzeń stanów zawierają również hiperpowierzchnie graniczne wynikające z dopuszczalnych warunków eksploatacji.

5.5. Globalne zadania diagnostyczne

Nie jest rzeczą trudną aby od zapisów: (27), (28), (29), (30), (31), i (32) przejść do powszechnie znanych i stosowanych zapisów tych zależności w postaci funkcji. Wykorzystując możliwość zapisywania relacji w postaci funkcji oraz przyjmując, że taka możliwość istnieje również dla podawanych poprzednio iloczynów kartezjańskich, zależności: (27), (28), (29), (30), (31) i (32) można odpowiednio zapisać:

$$(53) \quad G_{\tau}[\bar{u}(t), \bar{x}(t), t] = \bar{y}(t),$$

$$(54) \quad \Phi_{\tau}[\bar{u}(t), t] = \bar{y}(t),$$

$$(55) \quad F_{\tau}[\bar{x}(t), t] = \bar{y}(t),$$

$$(56) \quad G(\bar{u}, \bar{x}) = \bar{y},$$

$$(57) \quad \Phi(\bar{u}) = \bar{y},$$

$$(58) \quad F(\bar{x}) = \bar{y}.$$

Relacje (33) można zapisać w postaci:

$$(59) \quad H_{\tau}[\bar{u}(t), t] = \bar{x}(t),$$

zaś (34) w postaci:

$$(60) \quad H(\bar{u}) = \bar{x}.$$

W zależnościach (53), (54), (55) i (59) uwzględniono możliwość zapisu w postaci funkcji również iloczynów kartezjańskich. (21), (22) i (24). $G_T, \Phi_T, F_T, H_T, G, \Phi, F, H$ - są tu operatorami, które reprezentują odwzorowanie wielkości występujących w lewych stronach równań w prawe strony.

Zadanie diagnostyczne można teraz sformułować następująco: na podstawie znanego wyjścia wyznaczyć wybrane wejście lub stan. Zależności od (53) do (58) reprezentują odwzorowania tych właśnie wielkości. W diagnostyce mówi się potocznie, że są to różne postacie ogólnego zapisu zadań diagnostycznych. Jeżeli badania mają charakter teoretyczny to dla układów dynamicznych (a takimi trzeba widzieć urządzenia mechaniczne) opisujące je zależności: (53), (54), (55) i (59) mają postać równań różniczkowych II rzędu lub układów równań różniczkowych I rzędu. W takim przypadku istotną rolę w rozważaniach odgrywają warunki początkowe. W przypadku układów równań różniczkowych I rzędu będą to wartości: $\bar{u}(t_0), \bar{x}(t_0)$, gdzie: t_0 jest elementem początkowym przedziału $\langle t_0, t \rangle \subset T$.

Przedział $\langle t_0, t \rangle$ wyznacza rzeczywisty czas obserwacji urządzenia podczas badań. Używając kategorii stosowanych w modelowaniu cybernetycznym, można stwierdzić, że w ogólnym przypadku mamy do czynienia z transformacją wejścia i stanu systemu w sygnał wyjściowy, przy czym ten stan jest równocześnie rezultatem transformacji wejścia. Przyjmując, że operatory: G_T, H_T są niezależne w sposób jawny od czasu "długiego" i "krótkiego" stacjonarność tych operatorów jest powszechnie stosowana w diagnostyce oraz uwzględniając, że wektor sygnału zależy od wektora wejścia w chwili początkowej t_0 , zależność (53) można zapisać w postaci:

$$(61) \quad \bar{y}(t) = g[\bar{u}(t_0, t), \bar{x}(t)] .$$

Wektor stanu zależności (61) można na podstawie zależności (59) przedstawić w postaci:

$$\bar{x}(t_0, t) = h^*[\bar{u}(t_0, t)] .$$

lub

$$(62) \quad \bar{x}(t) = h [\bar{u}(t_0, t), \bar{x}(t_0)] .$$

Układ równań (61) i (62) jest identyczny z podanym przez J. Tou'a [79] układem równań opisującym funkcjonowanie systemu automatycznej regulacji. W omawianym przypadku reprezentuje zapis globalny zadania diagnostycznego. Dla systemów, w których zmiany stanów w czasie są istotne dla funkcjonowania (m.in. dla urządzenia mechanicznego), operując przyrostami wektorów, równanie (61) można doprowadzić do postaci różniczkowej. Wtedy w układzie można pominąć warunki początkowe. Będą one potrzebne przy ewentualnym wyznaczeniu stałych całkowania. Układ ten przyjmie wtedy postać:

$$(63) \quad \bar{y}(t) = \Gamma [\bar{u}(t), \bar{x}(t)] ,$$

$$(64) \quad \dot{\bar{x}}(t) = \mathcal{X} [\bar{x}(t), \bar{u}(t)] .$$

Jeśli równania te są liniowe to można je doprowadzić do postaci:

$$\dot{\bar{x}}(t) = \mathcal{X}_1 \bar{x}(t) + \mathcal{X}_2 \bar{u}(t) ,$$

$$\bar{y}(t) = \Gamma_1 \bar{x}(t) + \Gamma_2 \bar{u}(t) ,$$

gdzie:

\mathcal{X}_1 - opisuje własności systemu ,

\mathcal{X}_2 - opisuje sposób sterowania systemu ,

Γ_1 - opisuje wejście systemu ,

Γ_2 - opisuje sposób transformacji wejścia w systemie.

W praktyce wielkości te mają postać macierzy.

W ten sposób wychodząc od podstawowych pojęć teorii systemów można dojść do opisu stanu systemu znanego i stosowanego w mechanice i automatycznej regulacji. Znajomość takiego opisu oraz macierzy systemu stanowi podstawę do jego teoretycznej analizy od strony obserwowalności, sterowalności i sposobu funkcjonowania.

W diagnostyce eksperymentalnej, przy obecnym poziomie wiedzy praktyczna realizacja globalnego zadania diagnostyki jest niemożliwa dla rzeczywistych urządzeń mechanicznych. Z reguły tak planuje się eksperyment diagnostyczny aby zadanie przyjęło formę reprezentowaną przez prostsze zależności np: (54), (55) lub (57), (58). Również stopień znajomości i forma prezentacji operatorów odwzorowujących jest inna niż w przypadku badań teoretycznych. Z reguły znajomość ta jest niecałkowita w dużej mierze jakościowa i wywodzi się z wiedzy ogólnej i doświadczenia nabytego uprzednio przez badacza. Tak trzeba rozumieć odwzorowania i operatory odwzorowujące występujące w podanych dotychczas zależnościach i tak będą one rozumiane w dalszym ciągu rozważań.

5.6. Odwzorowanie przestrzeni

Podstawą wyznaczenia wektora wejścia lub stanu przy znajomości wektora wyjścia jest możliwość wzajemnego odwzorowania przestrzeni U , X i Y . Każde stosowane w diagnostyce odwzorowanie ma swoją treść i formę $\{ \}$. Treść to informacja o odwzorowanej przestrzeni, forma to sposób jej podania w postaci zakodowanej, wymagającej ujawnienia. Ta konieczność oraz zapewnienie możliwości praktycznego wykorzystania informacji niesie w konsekwencji szereg warunków dotyczących formy tzn. sposobu prezentacji odwzorowania. A to z kolei wpływa na dobór zmiennych i ich miar, przy pomocy których

*) Z wystąpienia dr Piotra Krzyworzeki na V Sympozjum pt: "Wykorzystanie drgań i hałasów w badaniach diagnostycznych maszyn" w Szczyrku w 1978 roku.

wyraża się własności mierzalne zarówno te odwzorowane jak i te, które przyjęto jako sygnały. Wiadomo już, że wektor sygnału odwzorowującego np. stan systemu, niesie w rzeczywistości informacje zarówno o zmianach nieodwracalnych zachodzących w czasie Θ czyli o trendzie, oraz o zmianach odwracalnych zachodzących w czasie "krótkim" T. Zgodnie z rozważaniami przeprowadzonymi w poz. [25] odwzorowanie odwracalnych i nieodwracalnych zmian stanu przez wektor sygnału może być trojakiemu rodzaju:

- 1/ bezwarunkowe odwzorowanie zmian odwracalnych; wektor sygnału jest niewrażliwy na zmiany nieodwracalne,
- 2/ odwzorowanie warunkowe rozłączone; jeden podzbiór zbioru współrzędnych sygnału odwzorowuje zmiany odwracalne a drugi nieodwracalne,
- 3/ odwzorowanie warunkowe łączne; zbiór współrzędnych sygnału odwzorowuje równocześnie oba typy zmian.

Przyjęty poprzednio do rozważań model dwóch niezależnych czasów Θ i T, oraz sposób prowadzenia badań i stawiania diagnozy w tych dwóch czasach implikuje przyjęcie do dalszych rozważań modelu pierwszego typu odwzorowania. W praktyce bowiem proces postępowania diagnostycznego tak staramy się zorganizować, aby obserwowany sygnał odwzorowywał tylko zmiany odwracalne w czasie T i był niewrażliwy na zmiany nieodwracalne.

Dla uproszczenia rozważań przyjmijmy w tym punkcie, że wektory wejścia, stanu i wyjścia są niezależne od czasu i można je zapisać w postaci macierzy typu i x N:

$$(65) \quad \bar{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_N \end{bmatrix},$$

$$(66) \quad \bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} ,$$

$$(67) \quad \bar{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} .$$

Oznacza to, że wybrane zbiory niezależnych od czasu zmiennych stanu i wyjścia są równoliczne z uprzednio wybranym zbiorem zmiennych wejścia tzn. $\hat{Q} = \hat{P} = \hat{N}$, gdzie: \hat{Q} , \hat{P} i \hat{N} - wspomniane poprzednio skończone ciągi indeksów. Wektory te tworzą przestrzenie: wejścia U taką, że $\bar{u} \in U$, stanu X taką, że $\bar{x} \in X$ i wyjścia Y , taką, że $\bar{y} \in Y$. Interpretacja tych przestrzeni jest taka jak podano poprzednio. Istnienie liniowo niezależnych baz przestrzeni stanów, wejścia i wyjścia gwarantuje maksymalną różnorodność (ilość) informacji zawartych w wektorach \bar{u} , \bar{x} , i \bar{y} [6].

Przestrzenie U , Y , X oraz tworzące je wektory podlegają odwzorowaniom zgodnie z zależnościami (30), (31) i (32) oraz (36), (57) i (58). Z punktu widzenia diagnostyki komunikat zawarty w sygnale \bar{y} powinien być możliwie wiernym i dokładnym odzwierciedleniem stanu \bar{x} i wejścia \bar{u} .

W rzeczywistym urządzeniu mechanicznym współpracującym z innymi urządzeniami zjawiska i procesy zachodzą zgodnie z prawami mechaniki, które determinują również sposób budowy, funkcjonowania i eksploatacji urządzeń i ich systemów. A zatem wektory \bar{u} , \bar{x} i \bar{y} oraz ich wzajemne odwzorowania nie

są całkiem dowolne ale zgodne z tymi prawami. Nie oznacza to, że wszystkie prawa są znane badaczowi, tym niemniej świadomość ich działania prowadzi do ograniczenia różnorodności i prawidłowego wykorzystania tych odwzorowań. Własności, granice i sposób wzajemnego odwzorowania przestrzeni X , U i Y nie są z góry znane i w badaniach praktycznych nie mogą być zakładane w sposób dowolny. Dlatego istotną rolę w ograniczeniu istniejących tu różnorodności odgrywa proces uczenia się badacza czyli gromadzenia informacji o sposobie funkcjonowania urządzenia badanego i do niego podobnych.

Zmiana wektora wejścia lub stanu jaka dokonuje się podczas funkcjonowania urządzenia jest przekazywana na wyjście w postaci zakodowanego komunikatu. Kodowanie jest tu transformacją jednej postaci komunikatu (bezpośrednio zapisanego wektora wejścia lub stanu) w inną postać (sygnału diagnostycznego) informującą o komunikacie pierwotnym. Ten komunikat pierwotny można odczytać poprzez dokonanie transformacji odwrotnej komunikatu wyjściowego. Różnorodność informacji w takim procesie dekodowania nie powinna ulec zmianie. Ten spełnić ten postulat w diagnostyce podobnie jak w telekomunikacji [71] trzeba przedsięwziąć takie działania aby spośród różnych znanych sposobów dekodowania sygnału wybrać taki, który zapewni najlepsze odtworzenie komunikatu pierwotnego. Dodatkowa trudność pojawiająca się w diagnostyce urządzeń mechanicznych wynika z faktu, że sposób kodowania komunikatu pierwotnego w sygnał nie jest bezpośrednio zależny od woli badacza. W dużej mierze jest on narzucony przez sposób funkcjonowania urządzenia i zachodzące w nim procesy.

Dla prawidłowego podejścia do wykonania zadania diagnostycznego niezbędne jest dokonanie analizy odwzorowania przestrzeni wejścia lub stanów w przestrzeń wyjścia czyli sygnału. Rozpatrzymy zapisane relacją (32) i zależnością (58) odwzorowanie wektorowej przestrzeni stanów X w wektorową przestrzeń Y zwaną dalej przestrzenią sygnałów. Podtrzymujemy ważność przyjętego poprzednio założenia o stacjonarności (niezależności od czasu) tego odwzorowania. Zgodnie z zależnością (58) odwzorowanie to każdemu wektorowi $\bar{x} \in X$ przyporządkowuje pewien wektor $\bar{y} \in Y$.

A zatem wektor:

$$\bar{y} = F(\bar{x}) \in Y,$$

jest obrazem wektora \bar{x} w odwzorowaniu F , zaś zbiór wszystkich obrazów będzie obrazem $F(X)$ przestrzeni X w odwzorowaniu F . Załóżmy dla uproszczenia rozważań ^{*)}, że :

$$F: X \xrightarrow[1:1]{n:1} Y.$$

Biorąc pod uwagę, że w ostatecznej postaci X i Y są przestrzeniami uśrednionych miar zmiennych stanów i sygnałów można powiedzieć, że F jest relacją odwzorowania homeomorficznego. Załóżmy dodatkowo, że odwzorowanie jest liniowe, oraz że nie ma zakłóceń typu niedomiaru lub nadmiaru (redundacji) informacji. Biorąc pod uwagę, że wektory $\bar{x} \in X$ oraz $\bar{y} \in Y$ są zapisane, jako macierze typu $1 \times N$ w postaciach (66) i (67), a także uwzględniając omówione poprzednio własności zbiorów współrzędnych tych wektorów można odwzorowanie wektora stanu w sygnał zapisać przy pomocy układu równań ich współrzędnych:

$$(68) \quad \begin{aligned} y_1 &= F_{11}x_1 + F_{12}x_2 + \dots + F_{1N}x_N \\ y_2 &= F_{21}x_1 + F_{22}x_2 + \dots + F_{2N}x_N \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ y_N &= F_{N1}x_1 + F_{N2}x_2 + \dots + F_{NN}x_N \end{aligned}$$

Występujące w tym równaniu skalary można zestawzić w macierz typu $N \times N$:

$$(69) \quad \underline{F} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \dots & F_{1N} \\ F_{21} & F_{22} & \dots & F_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{N1} & F_{N2} & \dots & F_{NN} \end{bmatrix}$$

*) Odnosnik na str. następnej.

Układ równań (68) można teraz zapisać w postaci:

$$(70) \quad \bar{y} = \underline{F} \bar{x}.$$

Podobnie jak V. Sadowski w poz. [70] zamiast wartościami x_1, \dots, x_N i y_1, \dots, y_N można operować ich przyrostami $\Delta x_1, \dots, \Delta x_N$ i $\Delta y_1, \dots, \Delta y_N$. Zależność (70) przyjmie wtedy postać:

$$(71) \quad \Delta \bar{y} = \underline{F} \Delta \bar{x}.$$

Zbiór wszystkich odwzorowań wektorów \bar{x} w wektory \bar{y} , będzie stanowił odwzorowanie przestrzeni stanów w przestrzeń sygnałów. Można to zapisać w postaci:

$$(72) \quad Y = \underline{F} X.$$

Rozumując w ten sam sposób można odwzorowanie wektora wejścia w wektor sygnału zapisać w postaci:

$$(73) \quad \bar{y} = \underline{\Phi} \bar{u},$$

lub:

$$(74) \quad \Delta \bar{y} = \underline{\Phi} \Delta \bar{u},$$

a przestrzeni wejścia w przestrzeń sygnałów w postaci:

$$(75) \quad Y = \underline{\Phi} U.$$

Macierz $\underline{\Phi}$ jest utworzona w podobny sposób i ma taką samą strukturę jak macierz \underline{F} . Macierze \underline{F} i $\underline{\Phi}$ są szczególnymi przypadkami operatorów F i Φ z relacji (32) i (34) i zależności (58) i (57), używanymi w diagnostyce urządzeń mechanicznych.

*) W rzeczywistych badaniach diagnostycznych, założenie to jest postulatem, który staramy się realizować poprzez odpowiednią organizację procesu diagnozowania.

Sposób tworzenia i struktura macierzy F i Φ nie zmieni się gdy uwzględnimy, że wektory wejścia stanu i sygnały są funkcjami czasu, przyjmując nadal założenie, że samo odwzorowanie przestrzeni nie zależy od czasu.

5.7. Macierze odwzorowań

Wektory odwzorowań diagnostycznych dobiera się spośród wielu zewnętrznych objawów funkcjonowania urządzenia tak aby:

- odwzorowały badane stany,
 - były wrażliwe na ich zmiany,
 - umożliwiały postawienie diagnozy,
- oraz spełniały szereg dodatkowych postulatów dotyczących zawartości informacji, możliwości pomiaru i opracowania danych itd. Wektor sygnału lub jego współrzędną można rozpatrywać jako objaw jakiegoś wektora stanu lub jego współrzędnej jeśli istnienie i zmiana stanu jest związana z istnieniem i zmianą sygnału. Prawidłowe przyporządkowanie wektorów sygnału wektorom stanu zasada się na obszernej znajomości zjawisk zachodzących w urządzeniu oraz doświadczeniu badacza. Duża część badań prowadzonych w diagnostyce dotyczy tego właśnie przyporządkowania. Z tego punktu widzenia macierz odwzorowań F będzie określać wartość informatyczną przyjętej metody diagnostycznej.

Z poprzednio przeprowadzonych rozważań a także z rozważań innych Autorów (np. B. Pawłowa [58]), wynika również, że elementy macierzy (69) są wskaźnikami wrażliwości przyjętej metody diagnostycznej, zaś miarą tej wrażliwości jest wartość $\det[F]$. Wyznacznik ten może być równy zeru jeśli nie jest zachowany warunek liniowej niezależności kolumn i wierszy a w szczególności:

- 1/ pewne kolumny lub wiersze macierzy są równe zeru lub,
- 2/ jeśli wyrazy dwóch wierszy lub kolumn różnią się stałym mnożnikiem.

W pierwszym przypadku mamy do czynienia z brakiem odwzorowania w sensie przydatności do badań diagnostycznych, w drugim z brakiem liniowej niezależności pomiędzy składowymi stanu lub sygnału. Obie te sytuacje są niekorzystne i powinny być unikane przy formułowaniu zadania diagnostycznego.

Załóżmy, że postacie wektorów \bar{x} i \bar{y} oraz sposób odwzorowania został tak dobrany, że macierz odwzorowań przyjmuje postać diagonalną.

$$(76) \quad \underline{F} = \begin{bmatrix} F_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & F_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & & F_{NN} \end{bmatrix} .$$

B.W.Pawłow w poz. [58] twierdzi, że takie sformułowanie zadania nie stanowi istotnego uproszczenia procesu diagnozowania. W świetle ostatnich doświadczeń głównie w zakresie badań eksperymentalnych skomplikowanych systemów mechanicznych, wydaje się że może to być znacznym uproszczeniem zwłaszcza przy diagnozowaniu stanów związanych z równoczesnym funkcjonowaniem wielu źródeł zjawisk fizycznych; taką formę macierzy zaproponowano m.in. w poz. [31]. W badaniach teoretycznych gdzie system jest opisany równaniami różniczkowymi i wektory wejścia, stanu wyjścia oraz macierz odwzorowań wynikają ze sposobu opisu, istnieją metody diagonalizacji tej macierzy (patrz Graupe D. [19]) w celu ułatwienia analizy i rozwiązania tych równań.

Z typem macierzy \underline{F} wiążą się możliwości postawienia wiarygodnej diagnozy. Odwzorowanie zaproponowane przy pomocy tej macierzy musi czynić obserwowalnym, tzn. dawać możliwość określenia jego stanu na podstawie obserwacji sygnału. Możliwość ta zasada się na wspomnianej już transformacji odwrotnej przekształcającej komunikat odebrany czyli sygnał w komunikat pierwotny czyli stan. Bez wdawania się w szczegółowe rozważania można za D.Graupem [19] i T.Kaczorkiem [25] powiedzieć, że liniowy i stacjonarny system będzie obserwowalny gdy macierz \underline{F} niezależnie od jej postaci:

- będzie rzędu N , gdzie N liczba zmiennych stanu,
- ma N liniowo niezależnych i niezerowych kolumn.

Przytoczona dyskusja macierzy \underline{F} jest prawdziwa również dla macierzy $\underline{\Phi}$. Nieco inaczej należy wtedy rozumieć pojęcie

obserwowalności. Chodzi wtedy o możliwość obserwacji nieznanego wektora wejścia wykorzystując wektor sygnału.

5.8. Zakłócenia

W dotychczasowych rozważaniach dotyczących teoretycznych podstaw diagnozowania dla uproszczenia toku rozumowania przyjętego szereg założeń idealizujących rzeczywisty obiekt i zachodzące w nim procesy, a w konsekwencji rzeczywisty proces postępowania diagnostycznego. Zaprezentowane rozumowanie jest poświęcone diagnostyce eksperymentalnej gdzie badacz świadomie, zgodnie ze znajomością badanego urządzenia, posiadaną wiedzą i doświadczeniem, buduje model cybernetyczny systemu - urządzenia, wybiera przestrzeń stanów reprezentujących interesujące go cechy lub własności, łatwe do obserwacji wielkości wyjścia czyli przestrzeń sygnałów diagnostycznych i na podstawie zachodzących w systemie transformacji, sposób wzajemnego odwzorowania tych przestrzeni. Następnie planuje tok eksperymentu tak aby najlepiej i najłatwiej rozwiązać sformułowane zadanie diagnostyczne. Przedstawiona idealizacja opisuje zatem sytuację, w której badacz posiada pełną wiedzę i doświadczenie o badanym systemie a dodatkowo sam system oraz tok badań wyklucza jakiegokolwiek przypadkowości budowy i funkcjonowania. Taka idealizacja zastosowana w praktyce gwarantowałaby pełną informację o wektorze stanu lub wejścia na podstawie znajomości sygnału i macierzy odwzorowania (w zależnościach (70) i (73) lub (71) i (74) nieznanne są tylko \bar{x} i \bar{u} lub $\Delta \bar{x}$ i $\Delta \bar{u}$) i nie pozostawiałaby żadnej niepewności co do otrzymanego rezultatu. Jest to zatem wzorzec doskonały zapewniający całkowicie wiarygodną diagnozę. Bez szerszego uzasadnienia można stwierdzić, że praktyczna realizacja tego wzorca jest niemożliwa. Można jednak tak formułować zadanie diagnostyczne, planować eksperyment i opracowywać dane aby maksymalnie przybliżyć się do tego wzorca. Ta nieunikniona różnica pomiędzy idealnym a rzeczywistym procesem diagnozowania będzie miarą trafności i dokładności tego procesu. W warunkach rzeczywistych badań zakłócanie będą zarówno wektory jak i macierze odwzorowań, występujące w

zależnościach (70) i (73) lub (71) i (74).

Można założyć, że zakłócenia wektorów wejścia $\bar{u}(t)$ lub stanu $\bar{x}(t)$, dadzą się również wyrazić jako wektor np: $\bar{z}(t)$. Rzeczywiste wielkości odwzorowywane w sygnał podczas funkcjonowania systemu - urządzenia można wtedy zapisać w postaci:

$$(77) \quad \bar{x}(t) + \bar{z}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) + z_1(t) \\ x_2(t) + z_2(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ x_N(t) + z_N(t) \end{bmatrix},$$

oraz :

$$(78) \quad \bar{u}(t) + \bar{z}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) + z_1(t) \\ u_2(t) + z_2(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ u_N(t) + z_N(t) \end{bmatrix}.$$

Dla pełniejszego obrazu rzeczywistości w równaniach (77) i (78) uwzględniono, że wektory wejścia i zakłóceń stanu zależą od czasu. Dla uproszczenia rozważań przyjęto, że $\bar{z}(t)$ wchodzi do równań tylko addytywnie, jest taki sam dla obu wektorów.

W rzeczywistym procesie diagnostycznym zakłócenia badanych wektorów są rezultatem uproszczeń świadomie bądź nieświadomie poczynionych podczas postępowania badawczego a także podczas wyboru wejścia lub stanów oraz sygnałów i formułowania zadania diagnostycznego. Zakłócenia wprowadzone podczas postępowania badawczego minimalizujemy poprzez odpowiednie zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentu. Wejście lub stan, sygnał oraz ich odwzorowanie wybiera się mając do czynienia z rzeczywistymi procesami fizycznymi, które ogólnie biorąc są mniej lub bardziej

losowe, niestacjonarne, nieliniowe, wzajemnie ze sobą sprzężone itd. A zatem przyjęte poprzednio założenia są spełnione z lepszym lub gorszym przybliżeniem. Wektor zakłóceń $\bar{z}(t)$ w zależnościach (77) i (78) reprezentuje szeroko rozumiany interminizm, stanowiąc odpowiedność składowej \bar{P} w modelu $\bar{D} + \bar{P}$. Uwzględnienie tych zakłóceń w praktyce diagnostycznej dokonuje się poprzez wspomnianą w punkcie 4.3. prezentację wektorów wejścia, stanu i wyjścia w postaci ciągów miar punktowych i ich wariancji.

Rozumując nadal kategoriami zależności (70) i (73) lub (71) i (74), można powiedzieć, że zakłóceniom będą również podlegać macierze odwzorowań. Skoncentrujemy się teraz na losowości macierzy odwzorowań, bardzo ważnej z punktu widzenia diagnostyki. W krańcowym przypadku niepewności, współczynniki F_{11}, \dots, F_{NN} macierzy \underline{F} z zależności (69) i $\Phi_{11}, \dots, \Phi_{NN}$ macierzy $\underline{\Phi}$ są prawdopodobieństwami zaistnienia danego odwzorowania. Macierz \underline{F} jest wtedy macierzą prawdopodobieństw typu:

	x_1	x_2	.....	x_N
y_1	F_{11}	F_{12}	.....	F_{1N}
y_2	F_{21}	F_{22}	.....	F_{2N}
.
.
.
y_N	F_{N1}	F_{N2}	.....	F_{NN}

gdzie $F_{n,m}$ reprezentuje prawdopodobieństwo odwzorowania m -tej zmiennej stanu przez n -tą zmienną sygnału, zaś dobór zmiennych stanu i sygnału powinien gwarantować aby:

$$F_{n1} + F_{n2} + \dots + F_{nN} = 1, \text{ gdzie: } n = 1, 2, \dots, N.$$

Podobny charakter ma macierz $\underline{\Phi}$. Każda informacja uzyskana w procesie diagnozy, dotycząca wartości prawdopodobieństw F_{11}, \dots, F_{NN} i $\Phi_{11}, \dots, \Phi_{NN}$ powoduje wzrost wiarygodności

macierzy. Maleje zatem różnorodność możliwości odwzorowania zaś miarą wzrostu wiedzy badacza o odwzorowaniu jest malenie zaproponowanej przez Shannona [72] entropii, która np. dla odwzorowania stanu przez zmienną sygnału y_n wyrazi się wzorem :

$$E_{y_n} = - F_{n1} \lg F_{n1} - F_{n2} \lg F_{n2} - \dots - F_{nN} \lg F_{nN} .$$

Entropia jest największa jeśli wartości prawdopodobieństw F_{n1}, \dots, F_{nN} są równe. Ma to miejsce gdy zupełnie nie nie wiemy o zachodzących w obiekcie odwzorowaniach stanów w sygnały.

Z reguły mamy do czynienia z (określonym modelem $\bar{D} + \bar{P}$) przypadkiem pośrednim pomiędzy pełnym determinizmem a całkowitą niewiedzą. Współczynniki F_{11}, \dots, F_{NN} macierzy \underline{F} oraz współczynniki $\Phi_{11}, \dots, \Phi_{NN}$ macierzy $\underline{\Phi}$ są wartościami oczekiwanymi zaś miarą niepewności jest ich wariancja. Dodatkowo dla pomiarów prowadzonych w praktyce tak dobiera się badane wejścia lub stany i sygnały oraz tak organizuje eksperyment, aby tak jak to poprzednio założone macierze te były niezależne od czasu pomiaru, bez względu na to czy są one znane czy poszukiwane w zadaniu diagnostycznym.

Ogólnie biorąc można powiedzieć, że podobnie jak w przypadku wektorów $\bar{u}(t)$ i $\bar{x}(t)$ losowość macierzy odwzorowań wiąże się z niecałkowitą stacjonarnością, liniowością i ergodycznością rzeczywistych obiektów zachodzących w nich procesów.

Uwzględniając powyższe rozważania, zadania diagnostyczne zapisane poprzednio przy pomocy zależności (70) i (73), można teraz wyrazić w następującej postaci:

$$(79) \quad \bar{y}(t) = \underline{F} [\bar{x}(t) + \bar{z}(t)] ,$$

lub:

$$(80) \quad \bar{y}(t) = \underline{\Phi} [\bar{u}(t) + \bar{z}(t)] .$$

Na bazie dotychczasowych wywodów omówimy jedną z najważniejszych przyczyn powstawania wektorów $\bar{z}(t)$ i indeterminizmu macierzy odwzorowania oraz sposoby jej zminimalizowania.

Przyjmijmy chwilowo, że wektory są niezależne od czasu. Rozważania przeprowadzimy na przykładzie wektora \bar{x} i przestrzeni stanów.

Ważną przyczyną, na którą mamy wpływ podczas diagnozowania, wiąże się z wyborem wektora i przestrzeni stanów. Do niedawna najbardziej wrażliwe i liniowo niezależne współrzędne wektora \bar{x} wybierano na podstawie doświadczenia i intuicji. Obecnie coraz częściej dokonuje się szacowania tych własności. W tym celu należy przeprowadzić badania rozpoznawcze. Ogólnie biorąc szacowania wrażliwości polega na tym, że z jednej strony w warunkach laboratoryjnych bezpośrednio mierzy się własność, która w przyszłości ma być wyznaczona na podstawie obserwacji sygnału diagnostycznego. Z drugiej strony dokonuje się pomiaru wielkości ze zbioru $\{x_1, x_2, \dots, x_\alpha\}$ takiego, że:

$$\{x_1, x_2, \dots, x_N\} \subset \{x_1, x_2, \dots, x_\alpha\},$$

gdzie: $\alpha \gg N$.

Pomiar ten dokonywany wielokrotnie pozwala następnie na wyznaczenie metodą różnicową lub gradientową wrażliwości dla poszczególnych wielkości $x_1, x_2, \dots, x_\alpha$. Po ustaleniu wartości kryterium $W_{x_{gran}}$ można teraz wybrać zbiór $\{x_1, x_2, \dots, x_\beta\}$ tak że:

$$\{x_1, x_2, \dots, x_N\} \subset \{x_1, x_2, \dots, x_\beta : W_{x_{1,2,\dots,\beta}} > W_{x_{gran}}\} \subset \{x_1, \dots, x_\alpha\},$$

gdzie:

$$\alpha > N \quad \text{ i } \quad \beta > N.$$

Interpretacja otrzymanych wartości w_x oraz ustalenie kryterium $w_{x_{gran}}$ wymaga dużej wiedzy i doświadczenia od prowadzącego badania.

Aby uzyskać wymaganą ilość informacji, z minimalnej liczby współrzędnych wektora \bar{x} , należy tak dobrać te współrzędne aby były one od siebie niezależne. Wzajemna zależność współrzędnych jest bowiem równoznaczna z powtarzaniem tych samych informacji. Należy zatem wybrać taki zbiór:

$$\{x_1, x_2, \dots, x_N\} \subset \{x_1, x_2, \dots, x_\beta\}, \text{ gdzie: } \beta > N,$$

w którym elementy x_1, x_2, \dots, x_N będą od siebie niezależne. Biorąc pod uwagę losowy charakter wektora \bar{x} można w tym celu wyznaczyć przedstawioną niżej macierz współczynników korelacji podanych zależnością :

$$r_{n,m} = \frac{\sum_{n,m=1}^{\beta} x_n x_m}{\sum_{n=1}^{\beta} x_n^2 \sum_{m=1}^{\beta} x_m^2}, \quad n,m=1,2,\dots,\beta,$$

i przedstawioną w postaci:

	x_1	x_2	.....	x_{β}
x_1	r_{11}	r_{12}		$r_{1\beta}$
x_2	r_{21}	r_{22}		$r_{2\beta}$
⋮				
x_{β}	$r_{\beta 1}$	$r_{\beta 2}$		$r_{\beta\beta}$

Po ustaleniu wartości kryterium ε , można teraz wybrać zbiór $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ taki, że:

$$\{x_1, x_2, \dots, x_N : r_{n,m} < \varepsilon\} \subset \{x_1, x_2, \dots, x_{\beta}\}.$$

Jeśli wartość ε jest bliska zeru zaś test istotności T dla $r_{n,m}$, gdzie $n,m = 1,2, \dots, N$, wykazuje, że korelacja na przyjętym do badań poziomie prawdopodobieństwa jest nieistotna i można wielkości x_1, x_2, \dots, x_N uważać jako liniowo niezależne i przyjąć je jako zmienne stanu czyli współrzędne wektora \bar{x} spełniające postulaty dotyczące precyzyjnej informatywnej reprezentacji tego stanu. Dodatkowo można powiedzieć, że jeżeli:

$$\det [r_{n,m}] \cong 1, \quad \text{gdzie } n,m = 1,2, \dots, N,$$

to wybór ten został dokonany prawidłowo.

W najnowszych pracach badawczych ^{*}) istnieją ciekawe próby

^{*}) Prace mgr inż. Krzysztofa Kowalskiego z Instytutu Mechaniki Technicznej, Politechniki Poznańskiej.

określenia najmniejszej liczby liniowo niezależnych współrzędnych wektora stanu czy sygnału wystarczającej do uzyskania wymaganej zawartości informacji w tych wektorach. Próby te opierają się na wykorzystaniu teorii podobieństwa dynamicznego podanej przez Buckinghama, w celu uzyskania wymiarowo niezależnych miar własności systemu.

Te same uwagi dotyczą wektorów \bar{u} i \bar{y} oraz miar wektorów: $\bar{x}(t)$, $\bar{u}(t)$ i $\bar{y}(t)$.

5.9. Prowadzenie badań diagnostycznych w obecności zakłóceń

Wszystkie niedokładności modelu w stosunku do rzeczywistości uwzględnione są w zależnościach (79) i (80), zaś wysiłki czynione podczas przygotowania, przeprowadzenia badań oraz opracowywania rezultatów zmierzają do ich minimalizacji.

W omówionym poprzednio idealnym modelu odwzorowania przestrzeni stanów lub wejścia w przestrzeń sygnałów, wyznaczenie nieznanego wejścia lub stanu na podstawie znanego sygnału jest stosunkowo proste. Zakłócenia poważnie komplikują to zadanie. Jedynie w przypadku gdy istnieje możliwość stworzenia warunków badań takich, że $\|\bar{z}(t)\| \ll \|\bar{x}(t)\|$ lub $\|\bar{z}(t)\| \ll \|\bar{u}(t)\|^{PF}$, omówiony model można uznać za dobre przybliżenie rzeczywistości. Ale i wówczas poszukiwany wektor wyznacza się wielokrotnie dla uzyskania wystarczającej wiarygodności rezultatów. Jeśli zakłócenia są znaczne wyznaczenie wektora $\bar{u}(t)$ lub $\bar{x}(t)$ na podstawie znajomości wektora sygnału $\bar{y}(t)$ wtedy gdy wektory wyznaczane i znane są opisywane przez tyle samo zmiennych jest praktycznie i teoretycznie niemożliwe. Bez wdawania się w szczegółowe rozważania można zauważyć, że jeśli wartość informatyczna każdej zmiennej jest taka sama, to wektor sygnału o N zmiennych nie wystarczy do odwzorowania wektora stanu lub wejścia o N zmiennych oraz wektora zakłóceń. A zatem równoliczność zbiorów np: (38) lub (44) i (50) oraz wzajemne odwzorowanie przestrzeni X lub U oraz Y nie zapewni rozwiązania zadania diagnostycznego

*) Odpowiada to poczynionemu w punkcie 4.2. założeniu, że :

$$\|\bar{P}\| \ll \|\bar{D}\|$$

Aby to zadanie rozwiązać, w diagnostyce urządzeń mechanicznych i maszyn wykorzystuje się dodatkowe możliwości podejścia do zagadnienia.

Jeśli określimy wektory $\bar{u}(t)$, $\bar{x}(t)$ i $\bar{y}(t)$ odpowiedniozależnościami (45), (39) i (51) to pierwsza możliwość podlega na takim doborze liczby ich współrzędnych aby:

$$P \gg N \quad \text{ i } \quad P \gg Q \quad ,$$

gdzie: N , P , Q - skończone ciągi indeksów.

W takim przypadku omówiony sposób odwzorowania przestrzeni wejścia lub stanu w przestrzeń sygnału oraz przytoczone zapisy zadań diagnostycznych mają wartość jako przybliżony model, zaś do rozwiązania zadania diagnostycznego tzn. wyznaczenia $\bar{u}(t)$ lub $\bar{x}(t)$ na podstawie znajomości $\bar{y}(t)$ stosuje się metody matematyczne znane głównie w teorii rozpoznawania obrazów. Za poz. [78] zadanie można sformułować następująco. Celem zabiegów jest zbudowanie metody postępowania (przeważnie jest to algorytm dla maszyny cyfrowej), która na podstawie pokazów jest zdolna rozpoznawać wiele obiektów z różnych ustalonych poprzednio klas, wypracować kryterium rozpoznawania oraz podjąć decyzję o przynależności obiektów do danych klas. W diagnostyce, obiekt (tzn. wejście lub stan urządzenia) będzie rozpoznawany na podstawie wektora sygnału, którego współrzędne są określane miarami uzyskiwanymi na podstawie pomiaru.

Druga możliwość zasadza się na znanym w telekomunikacji przekazywaniu bezustannym. Rozwiązywane w praktyce zadania diagnostyczne można wtedy zapisać przy pomocy zależności:

$$(81) \quad \bar{y}(t) = F [\bar{x} + \bar{z}(t)],$$

$$(82) \quad \bar{y}(t) = \Phi [\bar{u} + \bar{z}(t)],$$

gdzie: $t \in \langle t_0, t_1 \rangle \subset T$.

Innymi słowy należy stworzyć takie warunki badań aby w przedziale czasu obserwacji $\langle t_0, t_1 \rangle$ można było badane wejście lub stan uznać jako niezależny od czasu. A z drugiej strony przedział

$\langle t_0, t_1 \rangle$ musi być wystarczająco długi aby odbierany w tym czasie sygnał przekazał ilość informacji wystarczającą do określenia tego stanu lub wejścia pomimo istniejących zakłóceń.

Matematyczna teoria obu wspomnianych sposobów jest dość skomplikowana i nie będzie tu przytaczana. Dużo uwag ma ten temat podano w pozycjach [30, 31, 78].

6. Ogólna metoda organizacji procesów poszukiwania diagnozy

6.1. Wprowadzenie

Ogólnie rozumiane badanie działalności naukowej i technicznej stanowi obszar zainteresowania naukowców (czyli nauki o nauce). W zakresie konkretnych opracowań może ono być użyteczne dla samych badaczy dając możliwości uprawnień (metodologicznych) prowadzonych przez nich procesów badawczych [80]. Możliwości tego mogą przynosić korzyści zarówno decydom odnośnie polityki naukowej i technicznej (tzn. problemów w skali "makro") jak i badaczom zajmującym się zagadnieniami niższego rzędu jakimi są konkretne problemy badawcze (tzn. problemy w skali "mikro", do których można także zaliczyć procesy poszukiwania diagnozy).

Biorąc pod uwagę aktualne możliwości trzeba z góry przewidzieć, że korzyści wynikające z takich usprawnień metodologicznych można upatrywać głównie w sferze praktyki. W omawianym przypadku obszarem, w którym czynione będą te usprawnienia będzie podsystem poszukiwania diagnozy stanu urządzenia mechanicznego. Jest on obok obiektu badań drugim elementem systemu diagnostycznego. Proponowana jako ten podsystem ogólna metoda organizacji procesów diagnostycznych musi spełniać szereg wymogów, które zapewnią jej praktyczną stosowalność. Jednym z głównych wymagań, które sprawia najwięcej trudności jest zdolność przystosowywania się do zmienności zadań rozwiązywanych w procesie diagnostycznym. Różnorodność tych zadań sprawia, że adaptowalność tego podsystemu musi być bardzo duża. Biorąc pod uwagę, że jego funkcjonowanie obejmuje sferę działalności ludzkiego intelektu, powyższy postulat wyklucza narazie możliwość podania metody w sposób ścisły wraz z jej formalnym zapisem.

Obok teoretycznych podstaw diagnozowania, bazą do zaproponowania ogólnej metody organizacji procesów poszukiwania diagnozy

będzie analiza elementarnego procesu badawczego zarówno od strony działalności intelektualnej jak i organizacyjnej. Pozwoli to na wyodrębnienie pewnych składników, które można uznać za typowe dla różnych procesów diagnostycznych. Można oczekiwać, że poczynione na gruncie teorii maszyn i mechanizmów oraz mechaniki klasyfikacja tych składników z punktu widzenia metodologii diagnozowania ukaże w konsekwencji pewne typowe elementy, reprezentujące podejmowane w procesie diagnostycznym podstawowe decyzje i wykonywane czynności. Tak utworzony podsystem organizacji tych procesów, stanowiąc schemat postępowania badawczego pozwoli na sterowanie procesem badawczym w określonych warunkach zewnętrznych dotyczących możliwości, celu badań i własności badanego obiektu.

Wiele uwag przemawiających za podejmowaniem tego rodzaju przedsięwzięć można znaleźć w poz. [1, 27, 28, 47, 48, 58, 68, 79]. Jako przykład takiej metody z innej dziedziny nauki można przytoczyć zaprezentowaną w poz. [59] ogólną metodę rozwiązywania zadań. Podana przez G. Poly'a metoda wyróżnia cztery etapy postępowania, opisane hasłowo przy pomocy następujących dyrektyw:

- 1/ dokładnie rozpoznaj zadanie ,
- 2/ ułóż plan postępowania prowadzący do rozwiązania ;
- 3/ zrealizuj plan ,
- 4/ pod kątem otrzymanych rezultatów prześledź cały proces postępowania.

Podstawą heurystycznej metody G. Poly'a jest założenie, że myślenie ludzkie jest zawodne. Dopuszcza to zatem możliwości popełnienia błędu i dlatego z każdego etapu do początku postępowania jest przewidziane sprzężenie zwrotne, które po stwierdzeniu, że obrana droga nie prowadzi do celu pozwala na rozpoczęcie postępowania od nowa. Dużą rolę przypisuje się tu elementowi intuicji (oślnienia) badacza. Na podstawie własnych doświadczeń autora tej rozprawy oraz obserwacji innych, wydaje się, że taki tok postępowania jest w diagnostyce uzasadniony, zarówno pod prakseologicznym jak i ekonomicznym.

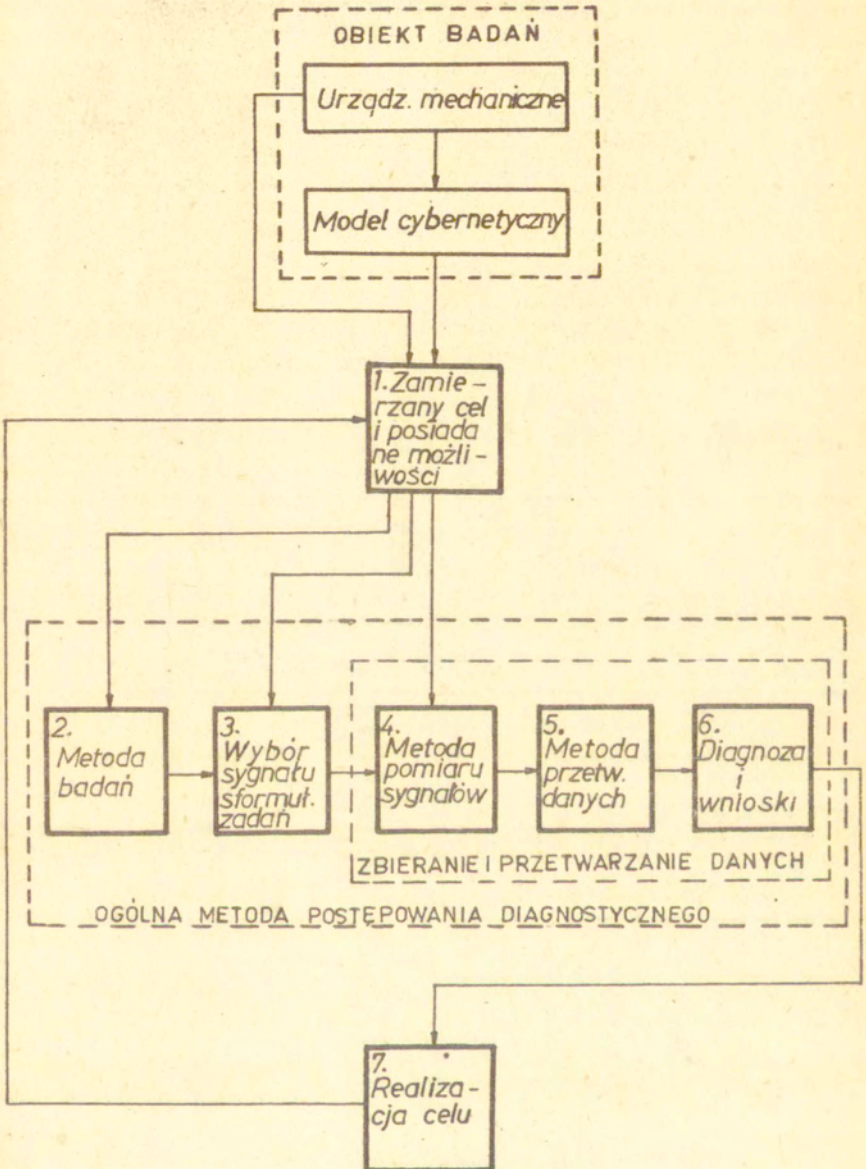
6.2. Metoda ogólna

Model cybernetyczny proponowanej metody przedstawiono w postaci graficznego schematu na rys. 7^{*)}. Metoda jest traktowana jako podsystem w systemie diagnostycznym. Poszczególne bloki schematu reprezentują podejmowane kolejno decyzje i wykonywane czynności, które są istotnymi elementami procesu poszukiwania diagnozy.

Na wejście podsystemu składają się: zamierzony cel i posiadane możliwości (blok 1). Obie te wielkości wynikają ze znajomości obiektu-urządzenia, oraz jego modelu cybernetycznego i są narzucone przez: 1/ konieczność rozwiązania jakiegoś problemu badawczego (konstrukcyjnego, technologicznego, eksploatacyjnego), który wyraża się w praktyce koniecznością wyznaczenia, którejs z omawianych cech (charakterystyk) lub własności ogólnych czy lokalnych urządzenia mechanicznego; 2/ istniejące możliwości ekonomiczne, organizacyjne, badawcze itp. 3/ specyfikę i charakter obiektu badanego; ten czynnik w sposób istotny wpływa nie tylko na metodę poszukiwania (głównie poprzez bloki 2, 3 i 4), ale także na oczekiwaną realizację celu badań.

Dalsze etapy postępowania to wybór metody badań, sformułowanie zadania diagnostycznego opracowanie i realizacja programu pomiarów, przetworzenie i opracowanie danych otrzymanych z pomiarów oraz postawienie diagnozy i wyciągnięcie wniosków. Wyjściem procesu postępowania diagnostycznego jest realizacja celu badań.

Urządzenie mechaniczne widziane jako jego model cybernetyczny nadaje zakodowany komunikat - sygnał diagnostyczny. Sygnał ten jest zakłócony i niesie informację nie tylko o wejściu lub stanie wybranym do badań ale także o innych wymuszeniach działających w urządzeniu i układzie pomiarowym. Można tu przyjąć sposób rozumowania zakładający istnienie dwóch graczy. Celem *) Schemat ten różni się od tych, które zamieszczono w pracach autora przytoczonych pod pozycjami [37, 38]. Uwzględniono tu nowe spostrzeżenia i przemyślenia, które zdaniem autora uczyniły schemat bardziej precyzyjny i odpowiadający rzeczywistości.



Rys. 7 . Schemat systemu diagnostycznego .

pierwszego - urządzenia mechanicznego jest nieujawnianie prawdy, celem drugiego tzn. badacza jest jej poznanie czyli postawienie diagnozy. Badacz musi zatem stworzyć pewną strategię, która umożliwi mu wygraną. Elementem tej strategii jest wybór metody badań i sygnałów diagnostycznych, które niosą informację o nadawanym komunikacie. Przyjmując, że wybór ten został dokonany prawidłowo dalszy ciąg batalii rozgrywa się w blokach 4, 5 i 6 ogólnej metody organizacji procesu diagnostycznego.

Przeprowadzony proces poszukiwania umożliwia w rezultacie uzyskanie diagnozy dotyczącej cechy lub własności urządzenia co w efekcie umożliwi realizację celu badań. Istotną sprawą jest to na ile cel zrealizowany odpowiada celowi zamierzonemu. Dlatego porównanie zamierzeń z dokonaniem jest konieczne.

Całe dotychczasowe rozumowanie dotyczące prezentowanej metody postępowania diagnostycznego przeprowadzono przy milczącym założeniu, że to postępowanie pozbawione jest błędów i nieuchronnie prowadzi do prawdziwej diagnozy. Przytoczone poprzednio założenia poczynione przez Polya uwzględniają zawodność ludzkiego intelektu. Fakt ten należy uwzględnić również w prezentowanej metodzie poszukiwania diagnozy. Wszystkie przedstawione na rys. 7 bloki metody reprezentują pewne etapy działalności ludzkiego intelektu. A zatem w każdym z nich możliwa jest pomyłka. Dlatego jako ostatnia czynność w każdym za wyjątkiem I bloku ogólnej metody postępowania, jest przewidziana ocena rezultatów osiągniętych w tym bloku. Konsekwencją tej oceny powinna być decyzja o przejściu do następnego bloku jeżeli rezultaty są zadowalające lub w przeciwnym przypadku powrót poprzez sprzężenie zwrotne na wejście bloku lub nawet całego procesu postępowania diagnostycznego. To ostatnie sprzężenie jako najważniejsze zostało zaznaczone na rys. 7. Na podstawie poprzednich rozważań (głównie z rozdziałów 4 i 5) omówimy prezentowaną metodę uwzględniając specyfikę zjawisk zachodzących w funkcjonującym urządzeniu mechanicznym.

6.3. Metoda badań

W zależności od tego jaki rodzaj urządzenia i jego cechy lub własności są celem badań diagnostycznych, należy wybrać odpowiednią metodę (blok 2) w ogólnym rozumieniu tego terminu. Te cechy czy własności można obserwować bezpośrednio bądź pośrednio, poprzez badania objawów zewnętrznych (sygnałów diagnostycznych) uznanych w modelu cybernetycznym jako wyjściowe.

W poprzednio prowadzonych rozważaniach wielokrotnie podkreślano istnienie fizycznych sprzężeń pomiędzy procesami zachodzącymi w urządzeniach mechanicznych umożliwiającymi odwzorowanie stanów charakteryzujących jeden proces przy pomocy sygnałów będących objawami innego procesu. Poza tym istnieje już pewna tradycja wybierania sygnałów diagnostycznych uwarunkowana względami eksploatacyjnymi i pomiarowymi. Uogólniając te możliwości i tendencje można powiedzieć, że w diagnostyce tylko pewne odwzorowania są uznane jako dokładne i jednoznaczne, co oczywiście nie wyklucza możliwości wykorzystywania innych. Przedstawiono to w postaci macierzy zerojedynkowej na rys. 8. Liczbą "1" oznaczono istnienie i wykorzystywanie odwzorowania, zaś "0" brak tych możliwości.

W kierunku pionowym uszeregowano procesy, których stany są badane dla wyznaczenia poszukiwanych własności a w kierunku poziomym procesy, które mogą być "dawcami" sygnałów diagnostycznych. Są to oczywiście te same zbiory procesów bo tylko to mamy do dyspozycji w funkcjonującym urządzeniu. Grubą linią zaznaczono obszar wewnątrz którego mieszczą się zagadnienia dotyczące drganiowej i akustycznej diagnostyki urządzeń mechanicznych. Widać, że obszar ten obejmuje dużą część wszystkich możliwości i to jest jedną z przyczyn, dla której we współczesnej diagnostyce przywiązuje się duże znaczenie do badań wibroakustycznych. Omawiana macierz wykazuje istnienie wielu odwzorowań jednego procesu przez różne objawy. Pociąga to w konsekwencji konieczność podjęcia świadomej decyzji odnośnie metody badań. Wybór metody jest uwarunkowany:

- koniecznością osiągnięcia celu tzn. podstawienia diagnozy dla danej własności na żądanym poziomie dokładności,

sygnały charakteryzujące / procesy użytkowe	procesy użytkowe	procesy dynamiczne	procesy akustyczne	procesy tarcia i zużycia	procesy termodynamiczne
procesy użytkowe	1	0	0	1	0
procesy dynamiczne	0	1	1	1	0
procesy akustyczne	0	1	1	1	0
procesy tarcia i zużycia	1	1	1	1	1
procesy termodynamiczne	0	1	0	0	1

Rys. 8 . Odwzorowanie stanów w sygnały .

- możliwościami organizacyjnymi, kadrowymi, ekonomicznymi i in., które determinują w jakich okolicznościach, kto i przy użyciu jakich środków będzie próbował cel ten osiągnąć.

Optymalne zaspokojenie tych postulatów w przypadku diagnostyki urządzeń mechanicznych jest ostatnio coraz częściej możliwe, przy zastosowaniu hadania objawów procesów wibroakustycznych. Taki pośredni sposób diagnozowania ma wiele zalet, które powodują jego coraz większą popularność. Główne z nich to nieingerencja w proces eksploatacyjny, stosunkowa łatwość pomiarów i przetworzenia danych i duża szybkość prowadzenia badań (nadaje się do bieżącej kontroli urządzeń). Zagadnienie te zostaną szerzej omówione przy okazji analizy bloku 4 ogólnej metody organizacji procesu poszukiwania diagnozy.

6.4. Sformułowanie zadania diagnostycznego

Badany obiekt i wybrana metoda badań wskazuje na to jakie powinny być badane wejście lub stany i jakie objawy mogą je odzwierciedlać (blok 3). W rozdziale 5 omawiano teoretyczne podstawy formułowania zadań diagnostycznych. Obecnie rozważymy te zagadnienia od strony praktyki badawczej uwzględniając, że badanym systemem jest istniejące i funkcjonujące urządzenie mechaniczne.

Z cybernetyki wiadomo, że informacja ogranicza różnorodność (nieokreśloność-[6]). Już sama budowa układów materialnych, np. urządzeń mechanicznych jest ograniczeniem różnorodności. Elementy urządzenia muszą mieć własności, które "dopasowują" je do funkcjonowania w składzie tego urządzenia, muszą być ze sobą powiązane więzami aby współdziałać. To samo dotyczy urządzenia funkcjonującego w systemie produkcyjnym. Dodatkowo zachodzące w urządzeniu procesy podlegają prawom natury (prawom mechaniki, wymogom eksploatacji), co również jest ograniczeniem różnorodności. Znajomość tych praw oraz wspomniane w rozdziale 5 proces uczenia się przez badacza wiadomości o urządzeniu, umożliwia ograniczenie a priori przestrzeni poszukiwanego wejścia lub stanów.

Wróćmy do rys. 1 i rozpatrzmy jakie są możliwości praktycz-

-nej realizacji sprzężenia się badacza z obiektem badanym kanałami I i II. W przypadku badania stanów rzeczywistych funkcjonujących urządzeń mechanicznych metodami diagnostyki eksperymentalnej mamy do czynienia z trzema możliwymi sytuacjami odnośnie programowania przewidywanych przestrzeni stanów i wyjścia. Wynikają one z różnic w fizycznym charakterze zmiennych wejściowych. W poz. [2] zmienne te dzieli się na: sterujące i sterowalne (nastawy) oraz sterujące i niesterowalne. Obie te grupy zmiennych są mierzalne. Pierwsza grupa, to wielkości poprzez zmianę których sterujemy urządzeniem w sposób świadomy a druga, to wielkości które wpływają na sposób jego funkcjonowania, ale których nie możemy zmieniać. W zależności od tego jakie zmienne będą wpływać na badaną podczas funkcjonowania przestrzeni stanów i wyjścia mamy mniejsze lub większe możliwości świadomej ingerencji w program eksperymentu. W zależności od tych możliwości eksperymenty dzieli się na czynne, czynno - bierne i bierne [2 ; 31] .

W eksperymencie czynnym mamy pełne możliwości wyboru wielkości wejściowych poprzez kanał I na rys.1 (są one sterująca i sterowalne) a w rezultacie tego również stanów urządzenia, które chcemy obserwować (kanał II). Pozwala to świadomie i celowo zaplanować proces badań diagnostycznych, co w efekcie prowadzi do postawienia diagnozy przy wykonaniu najmniejszej liczby prób.

Jeżeli badane stany lub wejście utworzone przez wielkości zarówno sterowalne jak i niesterowalne to możliwości takiego planowania badań znacznie się zmniejsza; ingerencja ogranicza się bowiem tylko do świadomego wyboru wielkości wejściowych sterowalnych. Wtedy mamy do czynienia z eksperymentem czynno-biernym. W przypadku skrajnym kiedy badane stany lub wyjścia są utworzone przez wielkości niesterowalne, eksperyment diagnostyczny jest bierny i polega na badaniu zachodzących procesów w takiej formie jakiej one przebiegają w warunkach naturalnego funkcjonowania urządzenia. Oczywiście liczba prób konieczna do postawienia diagnozy jest wtedy największa a ilość możliwych do zastosowania metod obróbki sygnału ograniczona.

Podział taki prezentowany m.in. w pracach [2, 31] jest uproszczeniem rzeczywistości. W praktyce sformułowanie zadania diagnostycznego (wybór przestrzeni wejścia, stanów, wyjścia i ich odwzorowań) jest podyktowany celem badań i przyjętą metodą badań. Nadrzędność celu nad sposobem jego realizacji znacznie zmniejsza możliwość wyboru rodzaju eksperymentu. Dodatkowo trzeba pamiętać o istnieniu składowej losowej \bar{P} dającej w rezultacie losowość przestrzeni i ich odwzorowań. Powoduje to, że każdy eksperyment prowadzony w warunkach funkcjonowania badanego urządzenia (a zwłaszcza podczas eksploatacji) jest w mniejszym lub większym stopniu bierny.

Przestrzeń wejścia lub stanów zostaje przekształcona w zbiór objawów jeszcze w badanym urządzeniu tak jak to pokazano przy pomocy macierzy z rys. 8. Z tych objawów wybiera się sygnały diagnostyczne. Fakt wyboru jest dokonywany poprzez świadomą decyzję podejmowaną przez badacza.

Najpełniejszy sposób informacji można uzyskać prowadząc badania urządzenia podczas eksploatacji. Przy obecnym poziomie wiedzy jest to na ogół powiązane z szeregiem istotnych trudności głównie w przypadku procesów tańcia i zużycia, efektów cieplnych, czyli bardzo ważnych procesów z punktu widzenia eksploatacji urządzeń mechanicznych. Można dokonywać pewnych badań (głównie zużycia) zatrzymując i demontując urządzenie. Jest to sposób pracochłonny, czasochłonny a w procesie eksploatacji niemożliwy do przeprowadzenia. Dlatego przeważnie korzysta się z metod pośrednich, np: wibroakustycznych.

Z powyższych rozważań widać, że sposób odwzorowania przestrzeni stanów przez przestrzeń sygnałów jest bardzo różny w zależności od przyjętej metody badań i dodatkowo bardzo skomplikowany z punktu widzenia fizyki zachodzących w urządzeniu procesów. A zatem omówione poprzednio operatory reprezentujące wspomniany sposób kodowania informacji o stanach są bardzo trudne do wyznaczenia bez względu na ich postać. I dlatego w praktyce badań diagnostycznych, duża część wszystkich prowadzonych prac dotyczy wyznaczania praw, które określają sposób tych odwzorowań. Dopiero ich znajomość daje podstawy do rozwiązywania zadań diagnostycznych w klasycznej formie tzn. kiedy znany jest \bar{y} i operator odwzorowujący, a poszukiwany \bar{x} lub \bar{u} .

6.5. Opracowanie i realizacja programu pomiarów

Ogólnie biorąc proces mierzenia sygnałów (blok 4), opracowania danych (blok 5) i stawiania diagnozy (blok 6) musi zapewnić prawidłowe zdekodowanie komunikatu o stanach lub wejściach. W praktyce trudno jest określić stopień zniekształcenia komunikatu przez zakłócenia, a zatem zawsze istnieje niepewność co do wiarygodności odebranego sygnału diagnostycznego. Z punktu widzenia telekomunikacji można powiedzieć, że urządzenie mechaniczne jest tzw. niepewnym kanałem do przekazywania informacji.

Teoretyczne przesłanki prowadzenia badań diagnostycznych w obecności zakłóceń omówiono w punkcie 5.8. Rozważając zagadnienie od strony praktycznej można powiedzieć, że proces pomiaru sygnałów diagnostycznych (blok 4), wiąże się z podjęciem szergu decyzji, które każdy badacz przy okazji każdego badania w sposób mniej lub bardziej świadomy podejmuje.

1. Ustalenie zespołu parametrów, które należy mierzyć

Jest to zadanie, które bardzo ściśle wiąże się z omawianym poprzednio zagadnieniem wyboru sygnałów diagnostycznych. Zespół mierzonych objawów powinien jak najpełniej charakteryzować wybrane sygnały a ponadto, być łatwy do zmierzenia, rejestracji, analizy itp.

2. Ustalenie punktów pomiarowych

Punkty pomiarowe powinny być tak dobrane, aby umożliwiały dokładne zamierzenia wybranych wielkości. Warunek ten w praktyce nie jest łatwy ponieważ nie wszędzie tam gdzie należałoby ulokować czujnik, można to zrobić ze względów konstrukcyjnych, eksploatacyjnych. Zadanie to bywa jeszcze trudniejsze do rozwiązania w przypadku, kiedy badania diagnostyczne są prowadzone na urządzeniach aktualnie eksploatowanych. Wtedy nie tylko sposób umieszczenia czujnika, ale cała metoda pomiarowa musi być tak dobrana, aby nie zakłócała eksploatacji i nie obniżała własności użytkowych badanego urządzenia.

3. Zestawienie układu pomiarowego

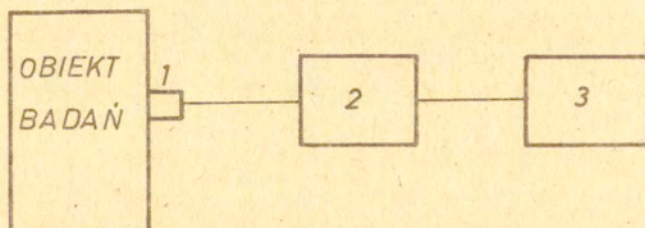
Układ pomiarowy zależy od obranej metody badań diagnostycznych. Wybrany do badań sygnał diagnostyczny, przewidywany sposób jego opracowania, wymagana dokładność z góry narzucają rodzaj aparatury, która powinna być użyta do badań.

4. Ocena błędów pomiarów

Większość znanych metod pomiarowych zwłaszcza w diagnostyce wibroakustycznej, polega na przekształceniu mierzonych wielkości na sygnały elektryczne. Każda z tych metod pomiaru wprowadza pewne błędy do badanego sygnału diagnostycznego wynikające z możliwości i sposobu ulokowania czujników, zniekształceń sygnałów elektrycznych w aparaturze w czasie przetwarzania, wzmacniania, filtrowania, modulacji i rejestracji. Należy również brać pod uwagę błędy powstające przy odczycie i opracowywaniu zapisu. Zarówno przy ocenie błędów pomiarów jak i przy zestawieniu aparatury pomiarowej, badacz powinien umieć przewidzieć w przybliżeniu charakter badanych sygnałów elektrycznych. Od tego, między innymi, zależy decyzja odnośnie wyboru odpowiednich urządzeń pomiarowych a w następstwie błędów które zostaną wprowadzone w czasie mierzenia tych sygnałów. Należy powiedzieć, że jest to druga grupa błędów, która sumuje się z błędami związanymi ze sposobem odwzorowania badanych wejść lub stanów przez wybrane sygnały.

Wymienione i skomentowane czynności i decyzje nie wyczerpują oczywiście zagadnienia. Oświetlają jedynie drogę, po której należy kroczyć poszukując diagnozy. Technika pomiarowa kryje olbrzymie bogactwo sposobów i możliwości, zaś ich szczegółowe omawianie wykracza poza zakres tej pracy. Schemat blokowy typowego układu pomiarowego pokazano na rys. 9. Z punktu widzenia metody poszukiwania diagnozy należy poświęcić trochę uwagi następującemu problemowi. Przeważnie zawsze podczas badań zachodzi konieczność wydzielenia z zakłóconego sygnału odbieranego podczas badań, jego użytecznej części bądź nawet niektórych składowych tej części. W związku z tym warto w tym miejscu wspomnieć o jednym elemencie, który jest wstawiony prawie w każdy układ pomiarowy. Niech badany będzie sygnał diagnostyczny

$\bar{y}(t)$.



Rys. 9 . Układ pomiarowy : 1 - przetwornik (czujnik),
2 - wzmacniacz, - filtr , 3 - rejestrator.

Sygnal ten składa się z dwóch składowych: $\bar{s}(t)$ - zawierającej dużo informacji o badanym wejściu $\bar{u}(t)$ lub stanie $\bar{x}(t)$, $\bar{w}(t)$ - pochodzącą od zakłóceń $\bar{z}(t)$. Omawiany element dokonuje operacji którą można wyrazić przy pomocy operatora L_y takiego, że:

$$(83) \quad L_y[\bar{y}(t)] \Leftrightarrow L_y[\bar{s}(t) + \bar{w}(t)] \Rightarrow \bar{s}(t) .$$

Jest to operacja odfiltrowania składowej pochodzącej od zakłóceń i ma ona istotne znaczenie dla dokładności diagnozy. Może ona być wykonana na różnych etapach procesu diagnozowania. Bardzo często poprzez odpowiednią organizację pomiarów i dobór układu pomiarowego, składową $\bar{s}(t)$ uzyskuje się wprost jako rezultat badań. Pozwala to na utożsamienie wektora sygnału $\bar{y}(t)$ z tą składową co w konsekwencji umożliwi pominięcie zakłóceń odwzorowaniem wejścia lub stanu w sygnał. W praktyce wykonania tej operacji wymaga posiadania dodatkowych informacji o składowej użytecznej sygnału diagnostycznego.

6.6. Przetwarzanie i opracowanie danych pomiarowych

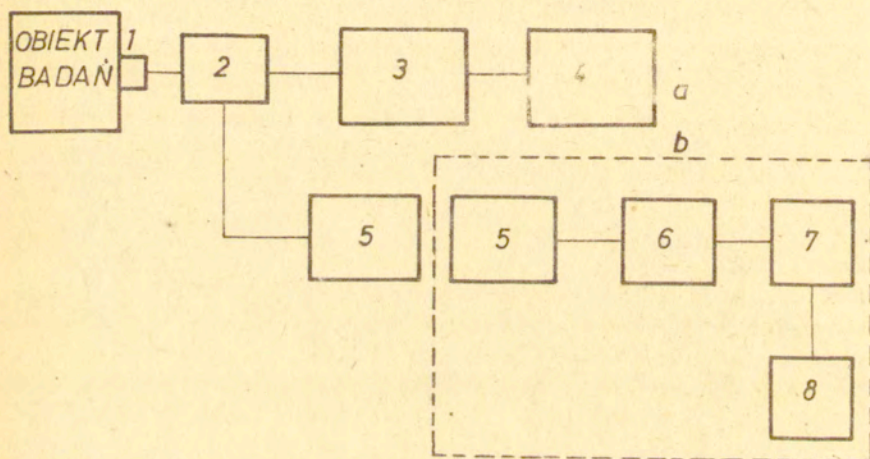
Na wyjściu układu pomiarowego takiego jaki jest pokazany na rys. 9. otrzymujemy realizację czasową lepiej lub gorzej

wyfiltrowanej składowej użytecznej sygnału diagnostycznego. Daje on pewien pogląd na badany stan lub wejście ale w praktyce nie pozwala na postawienie diagnozy. Należy zatem dokonać przetworzenia tej realizacji (blok 5) w celu uzyskania bardziej dogodnej postaci. Ogólnie biorąc ostatecznym rezultatem tego przetworzenia jest opis realizacji miarą lub zbiorem miar, które pozwolą sformułować diagnozę. Sprawa jest stosunkowo prosta jeśli mamy do czynienia z sygnałem prawie zdeterminowanym ($\|\bar{P}\| \ll \|\bar{D}\|$ jak to założono w punkcie 4.2). Natomiast znacznie trudniej jest dokonać tego przetworzenia w przypadku sygnałów stochastycznych, z którymi mamy najczęściej do czynienia w praktyce. Dużą pomocą służy tu teoria i praktyka analizy sygnałów losowych. Z grubsza biorąc metody te są stosowane w celu przetworzenia wspomnianych realizacji czasowych na pewne, wybrane estymaty nielosowe [46]. Mogą one być potraktowane jako zbiór miar opisujących komunikat, który przy pewnym doświadczeniu i wiedzy ogólnej badacza może umożliwić postawienie diagnozy. Przykłady ich zastosowania podano m.in. w poz. [8, 9]. W praktyce wspomniane metody realizuje się w sposób analogowy lub cyfrowy [46].

Analogowy sposób przetwarzania danych (typowy układ przetwarzający pokazano na rys. 10a) polega na tym, że odpowiednio skonstruowane urządzenie elektroniczne (np. spektrometr czy korelator) wykonuje pewne operacje matematyczne, oczywiście w sposób przybliżony i podaje rezultat w postaci zapisu magnetycznego, graficznego lub zbioru liczb opisujących daną funkcję. Metoda jest stosunkowo prosta i łatwa niekiedy bywa jednak mało dokładna. Przeważnie nie wiadomo z góry jaka estymata da najwięcej informacji zakodowanym komunikacie, na wymaganym poziomie dokładności. A zatem w przypadku stosowania tego sposobu przetworzenie danych wymagane jest bardzo duże i wszechstronne wyposażenie pomiarowe.

Cyfrowy sposób przetwarzania danych (typowy układ przetwarzający pokazano na rys. 10b) polega na tym, że odbierana czasowa realizacja sygnału diagnostycznego przetworzona jest na szereg charakteryzujących ją wartości dyskretnych. Szereg ten podany jako zbiór danych na maszynę cyfrową umożliwia, przy posiada-

niu odpowiedniego programu obliczenie w sposób numeryczny
żądanych estymat.



Rys. 10. Analogowy /a/ i cyfrowy /b/ sposób przetwarzania danych.
1- przetwornik, 2 - wzmacniacz, 3 - filtr, 4 - rejestrator,
5 - magnetofon pomiarowy, 6 - przetwornik analogowo-cyfrowy,
7 - EMC, 8 - rejestrator.

Przeważnie realizację czasową rejestruje się na magnetofonie
a następnie już poza obiektem badanym dokonuje się przetwarzania
analogowo - cyfrowego i wymaganych obliczeń. Sposób cyfrowy

przetwarzania danych jest obecnie coraz szerzej stosowany. Przy posiadaniu dobrze oprogramowanych maszyn cyfrowych oraz odpowiednich przetworników analogowo-cyfrowych jest on bardziej kompleksowy i wszechstronny niż analogowy. Może on w przyszłości stanowić podstawę do automatyzacji procesów diagnostycznych zwłaszcza w ich części dotyczącej przetwarzania danych.

Szczegółowy opis układów przetwarzania danych można znaleźć w wielu ogólnie dostępnych pracach i dlatego temat ten nie będzie dalej rozwijany.

6.7. Postawienie diagnozy i wyciągnięcie wniosków

Diagnoza (blok 6) może być sprawdzeniem postawionej a priori hipotezy, bądź mieć charakter rozpoznawczy. Rozpoznanie istniejących własności badanego urządzenia jest pierwszym krokiem w postępowaniu. Idąc dalej należy dokonać oceny urządzenia lub zastosować odpowiednią terapię, a w tym celu należy ustalić przyczyny, które spowodowały zaistnienie takich a nie innych własności. To właśnie jest przedmiotem zainteresowań przy poszukiwaniu genezy. Geneza jest podstawą do programowania pożądanych własności a w konsekwencji rodzajów budowanych urządzeń.

Istotnym zadaniem diagnostyki technicznej jest:

- możliwość przewidywania własności, jakie wystąpią w istniejących i pracujących urządzeniach (przewidywanie trendów),
- umiejętność takiego konstruowania, wytwarzania i eksploatacji nowych urządzeń, aby posiadały one z góry ustalone własności.

Pierwszy warunek jest podstawą do opracowania m.in. instrukcji obsługi urządzenia, planowania remontów, wychwytywania tzw. stanów ostrzegawczych, przy których należy urządzenie wycofać z eksploatacji bo grozi awarią itd. Drugi warunek jest podstawą postępu w budowie maszyn i urządzeń mechanicznych. Informacje otrzymane dzięki diagnostyce pozwalają wykonywać i wprowadzić do eksploatacji urządzenia coraz bardziej precyzyjne, niezawodne, tańsze, szybsze w eksploatacji, innymi słowy coraz nowocześniejsze.

Jeżeli oznaczamy zdania

- m_y - znam zbiór zamierzonych sygnałów diagnostycznych
- m - znam zbiór badanych wejść lub stanów ;
- A - mam ogólną wiedzę o badanym urządzeniu, to diagnozowanie D -można zapisać następującymi zdaniem logicznym (84) :

$$(84) \quad [(m_y \Rightarrow m) \wedge A] \Rightarrow D .$$

W procesie genezy należy dać odpowiedź na pytanie: jakie czynniki spowodowały zaistnienie wyznaczonych cech lub własności badanego urządzenia, zaś w procesie prognozowania trzeba ustalić jak zmienia się te cechy lub własności ze zmianą tych czynników. Są to zagadnienia bardzo istotne dla praktycznego zastosowania postawionej diagnozy. Obecnie nie jest jeszcze znana ścisła recepta na postawienie diagnozy genezy i prognozy. Tacy badacze jak Poly'a [59], Puszkin [68], dużą rolę w tym etapie procesu diagnostycznego przywiązują m.in. elementowi intuicji lub tzw. olśnieniu. W praktyce bowiem, na podstawie otrzymanych po przetworzeniu danych np. funkcji korelacji, widmowej gęstości mocy lub innych estymat, przy wykorzystaniu praw mechaniki, należy określić jedną bądź kilka wymienionych poprzednio własności urządzenia. Rezultat podaje się w postaci ilościowej (jako wskaźnik, funkcja itp.) bądź jakościowej (w postaci słownego opisu badanej własności). Transformacja otrzymanych rezultatów pomiarów (estymat) na opisaną w ten sposób własność urządzenia zasadza się na ogólnej wiedzy badacza, oraz wspomnianych wyżej elementach doświadczenia intuicji i olśnienia. Tak postawiona diagnoza musi być oczywiście porównana z zamierzonym celem (blok 7). Chodzi tu o sprawdzenie jak zbliżono się do zamierzonego celu i na jakim poziomie dokładności. Dopiero pozytywny rezultat tej oceny pozwala uznać proces diagnostyczny zakończony. Kryteria adekwatności diagnozy w stosunku do zamierzeń stanowią zazwyczaj kompromis pomiędzy wymaganiami, które pojawiają się wraz z koniecznością podjęcia badań a możliwościami ekonomicznymi, organizacyjnymi, aparatur-

wymi itd.

Zgodnie z założeniami poczynionymi na wstępie zaprezentowany podsystem reprezentujący ogólną metodę organizacji procesów poszukiwania diagnozy w systemie diagnostycznym urządzeń mechanicznych może mieć zastosowanie w sferze metodologii. Dalsze badania w zakresie ulepszania proponowanej metody powinny dotyczyć z jednej strony zwiększania precyzji podawanych wskazówek a z drugiej strony stworzenia możliwości jej ilościowego opisu. Pierwszy kierunek zapewni postęp zarówno w sferze metodologii oraz praktyki prowadzenia badań diagnostycznych. Drugi kierunek pozwoli w przyszłości ocenić proces postępowania diagnostycznego dla poruszanych przypadków, przeprowadzić jego optymalizację zależnie od kryteriów narzuconych przez warunki badań i zautomatyzować go dla poszczególnych typów badań. Trzeba się tu liczyć z dużymi trudnościami bowiem z dotychczasowej praktyki wiadomo, że postępowanie ludzkie jest bardzo trudne do zmodelowania i matematycznego opisu. Zagadnienie formalizacji procesu tzw. myślenia produktywnego poruszają m.in. Ackoff [1] i Puszkin [68], podkreślając takie właśnie trudności.

7. Wybrane zagadnienia wibroakustycznej diagnostyki urządzeń mechanicznych.

7.1. Cele i zadania diagnostyki wibroakustycznej.

W dotychczasowych rozważaniach przytoczono już sporo uwag dotyczących diagnostyki wibroakustycznej; stanowiły one egzemplifikacje wywodów ogólnych. Reasumując te uwagi można powiedzieć przyjęcie objawów zewnętrznych procesu wibroakustycznego jako źródła informacji diagnostycznej wynika z następujących przyczyn:

- zjawiska wibroakustyczne towarzyszące procesowi eksploatacyjnemu stanowią odbicie najistotniejszych procesów fizycznych zachodzących w urządzeniu, od których zależy jego prawidłowe funkcjonowanie,
- sygnał wibroakustyczny jako nośnik informacji wyróżnia się dużą pojemnością oraz dużą szybkością przekazywania informacji, {szeroki zakres zmian parametrów sygnału w układzie częstotliwości - amplituda - czas} ,

- sposób pomiaru sygnału wibroakustycznego umożliwia dokonywanie szybkich pomiarów w naturalnych warunkach pracy urządzenia bez konieczności zmian procesu eksploatacyjno - technologicznego.

W przeprowadzonych poprzednio rozważaniach uzasadniono fakt odwzorowania źródeł przez procesy drgań mechanicznych i akustycznych. Źródła tych procesów świadczą o ważnych czynnikach wejścia zewnętrznego jak sposób współpracy z innymi urządzeniami w systemie produkcyjnym (np. wymuszenie mechaniczne od napędu, fundamentowania itp) oraz wejścia wewnętrznego (np. sposób konstrukcji elementów par kinematycznych, stan powierzchni współpracujących tych par, sposób ich współpracy, odkształcenia elementów itp.). A zatem są bezpośrednim bądź pośrednim nośnikiem informacji o własnościach urządzenia, które w punkcie 4.4. zostały zakwalifikowane do trzeciej grupy.

Zakres zastosowań diagnostyki wibroakustycznej jest mocno uzasadniony faktem, że objawy zewnętrzne procesów wibroakustycznych niosą bardzo dużo informacji o badanym obiekcie. Ze wzoru Shannona [72], można wyznaczyć szybkość przekazywania informacji:

$$C = f \cdot \lg_2 (1 + N_s/N_n) \text{ bitów /s}$$

We wzorze oznaczono:

f - pasmo częstotliwości sygnału diagnostycznego,

N_s - moc sygnału użytecznego,

N_n - moc szumów zakłócających,

Bit oznacza jednostkę informacji równą przekazaniu elementarnej wiadomości typu "tak/nie". Jeśli dla przykładu obserwowany będzie sygnał drganiowy w zakresie od 0 do 10000 Hz tzn.

$f = 10^4$, zaś stosunek sygnału do szumu $N_s/N_n = 15$, to ze wzoru można wyznaczyć że:

$$C = 4 \cdot 10^4 \text{ bitów /s.}$$

Wynika z tego, że szybkość przekazywania informacji jest bardzo duża znacznie większa niż w pozostałych nieoscylacyjnych procesach uwzględnionych w macierzy na rys. 8.

Praktyka badań diagnostycznych wykazuje, że jest rzeczą nieobojętną relacja w jakiej wybrana metoda pozostaje z procesem eksploatacyjnym wykonywanym przez urządzenie. Wiadomo, że

nowoczesna diagnostyka zajmuje się urządzeniami funkcjonującymi a zatem chodzi o to aby metody badań w możliwie małym stopniu zakłócały ten proces. Diagnostyka wibroakustyczna jest jednym rodzajem badań z pośród stosowanych obecnie, który ten postulat w dużej mierze spełnia.

W zależności od celów i zadań diagnostykę wibroakustyczną można podzielić na trzy grupy [12] :

- 1/ emisyjno - kontrolna ,
- 2/ eksploatacyjna ,
- 3/ kontroli procesów eksploatacyjnych.

Badania emisyjno - kontrolne zmierzają do lokalizacji źródeł drgań i hałasu, ustalenia ich charakteru, pochodzenia, wpływu na własności wibroakustyczne całego urządzenia. Badania takie są zazwyczaj ściśle związane z kontrolą omówionych poprzednio własności konstrukcyjną - technologiczną urządzenia kreujących te źródła. Kontrola ta ma na celu sprawdzenie czy te własności (np. hałaśliwość lub poziom drgań łożysk, napędów elektrycznych itp.) mieszczą się w granicach dopuszczalnych norm. Niekiedy gdy normy takie nie istnieją informacje zebrane drogą takich badań umożliwiających ich opracowanie.

Badania eksploatacyjne mają na celu badanie trendów i tą drogą określania przydatności urządzenia, podzespołu, pary kinematycznej bądź elementu do dalszej eksploatacji. W związku z dużym rozrzutem własności eksploatacyjnych, zużyciowych, niezawodnościowych występujących w populacji tego samego typu urządzenia, staje się sprawą dużej wagi taka umiejętność oceny. Jest bowiem sprawą ekonomiczną i organizacyjnie uzasadnioną konieczność unikania nieprzewidzianych awarii, planowanie niezbędnych remontów, utrzymywania w eksploatacji sprawnych technicznie urządzeń mimo przekroczenia przez nie normatywnego czasu eksploatacji. Z uwagi na możliwość odwzorowania stanów zużycia elementów urządzeń przez procesy wibroakustyczne może to być środkiem do zrealizowania postawionych wyżej postulatów. Na tej drodze próbuje się oceniać stopień zużycia urządzeń mechanicznych, lokalizować uszkodzenia, wychwytywać stany przedawaryjne itd.

Badania kontrolne procesów eksploatacyjnych są tym rodzajem

badan, któremu w ostatnich czasach poświęca się coraz więcej uwagi. Sposób w jaki przebiega proces produkcyjny w systemie eksploatacyjnym maszyn i urządzeń powoduje pewne zjawiska wibroakustyczne. Ich znajomość daje możliwość wykorzystania ich do kontroli i automatycznego sterowania tymi procesami.

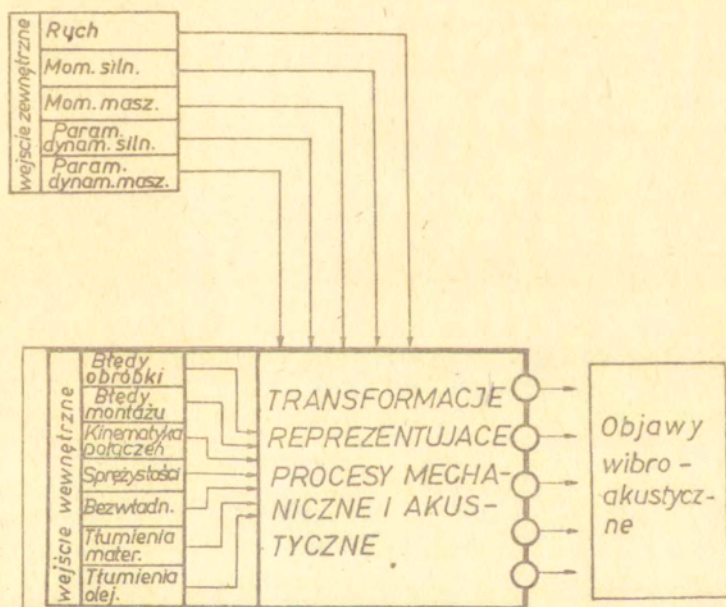
7.2. Metody wibroakustycznej diagnostyki urządzeń mechanicznych

Na zakończenie rozważań zostaną krótko omówione metody i sposoby postępowania w diagnostyce wibroakustycznej. Plan rozważań będzie stanowić ogólna metoda organizacji procesów poszukiwania diagnozy. Modele cybernetyczne urządzenia lub jego podzespołu, które są w omawianym przypadku obiektami badań zostały również omówione poprzednio.

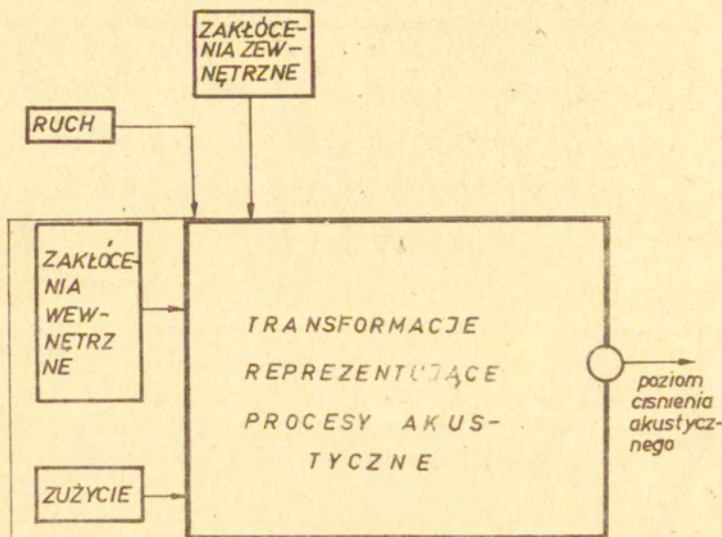
Podsumowując te rozważania z punktu widzenia diagnostyki wibroakustycznej można powiedzieć, że wejście zewnętrzne modelu będą przeważnie stanowić wymuszenia pochodzące ruchów roboczych np. od procesu napędzania przekazywania napędu do innego obiektu (ruchy i obciążenia) oraz od posadowienia obiektu badanego wśród innych w systemie eksploatacyjnym np. wibracja przenoszona przez fundament na badane urządzenie. Jako wejście wewnętrzne przyjmuje się przeważnie własności ważnych z punktu widzenia funkcjonowania elementów, połączeń, węzłów decydujących o sposobie współpracy. Granica pomiędzy stanem a wejściem wewnętrznym jest płynna i zależy od wyboru poczynionego przez badacza. Jej precyzyjne określenie nie ma większego znaczenia dla prowadzonych badań. W warunkach eksploatacji urządzenia (czyli istnienia wejścia zewnętrznego) będą one stanowić źródło drgań mechanicznych lub akustycznych towarzyszących procesowi użytecznemu. Proces rozprzestrzeniania się tych drgań w urządzeniu i jego otoczeniu odzwierciedlony jako transformacja stanów da na wyjściu szereg objawów akustycznych i mechanicznych, które będą charakteryzować własności urządzenia. Mierzalne wielkości charakteryzujące te objawy (np. amplituda czy częstotliwość) są przyjmowane jako sygnały diagnostyczne lub ich współrzędne. Ogólnie rzecz biorąc nie ma możliwości badania zmian sygnałów diagnostycznych przy uwzględnieniu wszystkich zmian wielkości

wejściowych. W praktyce model cybernetyczny upraszcza się w ten sposób, że wybiera się do badań jedną wielkość wejścia. Wpływ pozostałych wielkości, które przecież w rzeczywistości istnieją traktuje się jako zakłócenia i minimalizuje tak dobierając warunki badań żeby pozostawały one stałe podczas pomiaru oraz ich wpływ na sygnał diagnostyczny był jak najmniejszy. Biorąc pod uwagę istnienie zakłóceń oraz to, że niekiedy składowa użyteczna sygnału $\bar{s}(t)$ ze wzoru (83) może być mniejsza od składowej zakłóceń, podczas pomiarów należy przedsięwziąć cały szereg środków aby diagnoza była wiarygodna, na wymaganym poziomie dokładności.

Na rys.11 pokazano schemat modelu cybernetycznego, uwzględniającego istniejące w typowym urządzeniu mechanicznym wejścia, transformacje i objawy.



Rys.11. Schemat przeglądowy modelu cybernetycznego urządzenia mechanicznego.



Rys. 12. Schemat poglądowy uproszczonego modelu urządzenia mechanicznego do badania zużycia.

Na rys. 12 ten sam model uproszczono dla przypadku badań zużycia przy wykorzystaniu hałasu jako dawcy sygnałów diagnostycznych. Model nie uwzględnia wejścia wewnętrznego. Stan zużycia jest badany przy wykorzystaniu objawów akustycznych emitowanych przez pracujące urządzenie. Ruch będący w rzeczywistości formą wejścia jest tu potraktowany jako parametr, który zapewnia funkcjonowanie urządzenia i jest niezbędny do ujawnienia się źródeł hałasu pochodzących od zużycia.

Przechodząc do omówienia ogólnej metody postępowania można powiedzieć, że cel i możliwości badań (blok 1, rys. 7) spowodowały wybór wibroakustycznej metody badań diagnostycznych (blok 2, rys. 7). Zadanie diagnostyczne (blok 3, rys. 7) zależnie od sytuacji można formułować i zapisać przy pomocy jednej z

zależności (79), (80), (81) lub (82), przy czym wektory wejścia lub stanu oraz sygnału dobiera się tak jak objaśniono w punkcie 5.8.

Zadanie można rozwiązywać tak, że znając sygnał i operator odwzorowujący poszukujemy wektora wejścia lub stanu. Częściej jednak zachodzi konieczność wyznaczenia operatora. Należy wtedy wybrać taką parę wektorów wejścia lub stanu i sygnału, którą może zmierzyć bezpośrednio dla różnych wartości tych wektorów i w rezultacie wyznaczyć poszukiwany operator.

Metoda pomiarów (blok 4, rys. 7), jest w dużej mierze uwarunkowana koniecznością mierzenia wybranych wielkości charakteryzujących procesy drganiowe lub akustyczne. Mierzy się zatem m.in. poziom ciśnienia akustycznego, amplitudę, prędkość przemieszczania, przyspieszenie, częstotliwość ruchów drgających, odkształcenia obciążenia wywołane tymi ruchami. Pociąga to za sobą konieczność stosowania różnego rodzaju przetworników i wzmacniaczy. Wytyczne w tym zakresie są szeroko dostępne w literaturze. W każdym przypadku koniecznie należy sprawdzić powtarzalność, jednoznaczność pomiarów.

Przetwarzanie danych w diagnostyce wibroakustycznej odbywa się zarówno w sposób analogowy jak i cyfrowy. Biorąc pod uwagę, że wielkości wejścia lub stan i wyjście mają przeważnie charakter losowy, którego nie można pominąć, celem przetwarzania będzie wyznaczenie pewnych charakterystyk, które zdaniem badacza będą zawierać najwięcej informacji o badanych wielkościach. Za poz. [12] można powiedzieć, że jako nośniki informacji o realizacjach czasowych sygnałów diagnostycznych, losowych w przedziale czasu $\langle 0, T \rangle$ i częstotliwości $\langle 0, \omega \rangle$ można przyjąć wielkości nielosowe:

- wartość średnią określoną w przedziale czasu $\langle 0, T \rangle$ i częstotliwości $\langle 0, \omega \rangle$
 - wariancję określoną w przedziale czasu $\langle 0, T \rangle$ i częstotliwości $\langle 0, \omega \rangle$
 - rozkład wartościowych chwilowych amplitud sygnału,
 - widmo energetyczne $G(\omega)$ dane w przedziale $\langle 0, \omega \rangle$
 - funkcję koleracyjną $R(\tau)$ daną w przedziale $\langle 0, \tau \rangle$
- czasami dla uzyskania szczegółowych informacji zawartych w

sygnale używa się innych funkcji pochodzących od wyżej wymienionych wielkości. Przykłady podane są w poz. [8, 9]. Diagnoza i kontrola realizacji celu (blok 6 i 7 na rys.7), którą wykonuje się zgodnie z przytoczonymi poprzednio uwagami polega na odczytaniu informacji zawartych w estymatach sygnału diagnostycznego i sformułowaniu diagnozy w postaci ilościowej lub jakościowej. W diagnostyce wibroakustycznej urządzeń mechanicznych odczytanie informacji polega na przyperządkowaniu fizycznych własności źródeł (wejścia lub stanów) otrzymanym estymatom. Dotyczy to głównie struktury częstotliwościowej lub energetycznej źródeł, która na gruncie mechaniki może charakteryzować elementy i istniejące pomiędzy nimi więzy w funkcjonującym systemie - urządzeniu mechanicznym. Dużo uwag od strony aplikacyjnej na ten temat podano w poz. [2, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 30, 46, 78].

8. Badanie zużycia łożysk tocznych

8.1. Sformułowanie problemu badawczego

We wstępie do rozprawy oraz w toku rozważań wspomiano już o specyfice budowy i eksploatacji łożysk tocznych oraz o ich znaczeniu dla efektywnej eksploatacji nowoczesnych maszyn. Wszystko to i wiele innych znanych powszechnie czynników stwarza potrzeby rozwoju teoretycznych i eksperymentalnych badań łożysk. Istotną rolę odgrywają tu badania eksploatacyjne zmierzające do odpowiedzi na stawiane już pytania: jakie jest łożysko i jak ono funkcjonuje?, wykorzystujące w tym celu łatwe do obserwacji objawy wibroakustyczne.

Najpowszechniej w praktyce stosowane są typowe łożyska toczne, kulkowe. Są one produkowane w skali masowej, przez wyspecjalizowane wytwórnie, w znormalizowanych typoszeregach. Większość łożysk zwłaszcza małogabarytowych wykonywane jest w wersji

zamkniętej ^{*)}. Prawie zawsze łożyska są elementami szeregowymi ^{*)} W tym przypadku przestrzeń łożyska (koszyk i kulki) jest zamknięta specjalnymi pierścieniami uszczelniającymi, dzięki czemu można ją wypełnić odpowiednim smarem. W rezultacie tego łożysko nie wymaga smarowania podczas eksploatacji. Takie łożyska używane są we wszystkich drobniejszych maszynach i mechanizmach od młynków do kawy do giroskopów.

łańcucha kinematyczno-funkcjonalnego maszyny czy mechanizmu w rezultacie ich stan ma ^{wplyw}ważny na prawidłowe funkcjonowanie całego systemu zaś niezdatność łożyska powoduje niezdatność całego systemu - urządzenia. Znaczący wpływ stanu łożysk na własności techniczne i organizacyjne urządzenia ujawnia się zarówno wtedy gdy obiekt opuszcza wytwórnię i jest jeszcze nowy, jak również w procesie eksploatacji, kiedy cały system i wszystkie jego elementy (a więc łożyska również) zużywają się.

W rezultacie tego nowoczesny proces eksploatacji urządzenia coraz częściej wymaga efektywnej metody kontroli stanu łożysk. Przy czym chodzi tu o ocenę sposobu funkcjonowania łożyska podczas całego czasu życia systemu. Dotyczy to zarówno nowego łożyska w nowym systemie, czyli kontroli prawidłowości doboru łożyska do urządzenia, głównie z punktu widzenia dynamiki (wibroakustyki), jak również kontroli postępującego nieuchronnie procesu utraty własności mechanicznych systemu i łożyska, naskutek szeroko rozumianego procesu zużycia. Nie trzeba udawać, że nieprawidłowe dobranie łożyska powodując m.in. nadmierne drgania i hałas, obniża zdecydowanie standard techniczny całego wyrobu. Jest również znany i bardzo często w praktyce spotykany fakt, że wysoka niezawodność łożysk decyduje o wysokiej niezawodności całego obiektu. Precyzyjna i efektywna ocena funkcjonowania łożysk, nie jest praktycznie możliwa poza funkcjonującym urządzeniem. Z tych przyczyn opracowywanie metod kontroli prawidłowości doboru i stanu technicznego łożysk bez demontażu maszyny jest jedną z głównych potrzeb dla doskonalenia metod wytwarzania i eksploatacji maszyn. Dotyczy to zwłaszcza bieżącego określenia zużycia, bowiem ocena doboru łożyska jest stosunkowo łatwiejsza i możliwa do dokonania jeszcze przed wejściem urządzenia do eksploatacji, w fazie badań kontrolnych. Ta potrzeba stała się przyczyną podjęcia szeregu prac badawczych [5, 11, 17, 18, 29, 65, 66, 67], do których zalicza się również ta rozprawa.

8.2. Cel i zakres badań

Celem badań będzie opracowanie metody dla oceny zużycia łożysk zabudowanych w alternatorach samochodowych, bez ich demontażu i obniżenia wartości eksploatacyjnej oraz przedstawienie rezultatów uzyskanych przy pomocy tej metody.

Bezpośrednią przyczyną do podjęcia prac w tym kierunku była potrzeba praktycznej kontroli wytworzonych w wytwórni alternatorów do samochodów Fiat 125p, jak również projekty wdrożenia prostej, taniej i szybkiej metody oceny stanu łożysk, podczas eksploatacji alternatora przy okazji wykonywania bieżących przeglądów samochodów. Taka ocena mogłaby wchodzić w zakres tzw. "dużych przeglądów"; co 20.000 km przebiegu (raz na rok) możnaby dokonywać szybkiego i prostego pomiaru, który wykazywałby jaki jest aktualny stan łożysk alternatora. Pomiar mógłby być wykonywany na silniku bądź po zdjęciu alternatora (wymaga to odłączenia trzech śrub i wykonywane przez wykwalifikowanego rzemieślnika trwa kilka minut) i ułożeniu go na specjalnym stanowisku diagnostycznym.

Podstawy teoretyczne, zarówno od strony metodologii jak i teorii maszyn i mechanizmów, dla sposobu podejścia do problemu i zaproponowania takiej metody, zostały wyłożone w poprzedniej części pracy. W zamierzeniu autora oprócz uogólnienia sposobu podejścia do obiektu badań i postępowania diagnostycznego, stanowią one bazę, która metodzie diagnozowania stopnia zużycia łożysk i otrzymanym rezultatom może dać walor uogólnienia.

Wiele trudności następcza wybór sposobu opisu tego rodzaju badań w postaci rozprawy naukowej. Bowiem, aby opracować taką metodę i uzyskać rezultaty przynoszące praktyczne korzyści, potrzeba długiego czasu pracy i zbierania doświadczeń, kosztem udanych i nieudanych prób. Te elementy bowiem, poparte wiedzą, doświadczeniem i intuicją składają się na proces uczenia się badacza zaś końcowym efektem tego procesu może być metoda np. taka jaka będzie tematem rozważań. Ponieważ nie sposób opisać wszystkiego tego co składa się na tzw. warsztat badawczy, rozważania zostały ograniczone do opisu etapu końcowego, który jest niejako uwieńczeniem wspomnianego procesu uczenia się i

prezentuje metodę oceny stanu zużycia łożysk alternatorów gotową do zastosowania w praktyce eksploatacyjnej.

8.3. Obiekt badań

8.3.1. Własności i procesy zachodzące w urządzeniu

W tym punkcie zostaną omówione własności, specyfika badanego obiektu oraz zachodzące w nim procesy. Analiza ta zostanie przeprowadzona dla potrzeb problemu zużywania się łożysk, co następnie umożliwi wydzielenie badanego obiektu jako systemu i zaproponowanie jego modelu cybernetycznego.

W maszynach i urządzeniach mechanicznych użytkowanych w praktyce mamy do czynienia z elementem wirującym (lub kilkoma takimi elementami), który jest podparty tak aby mógł wykonywać ruch obrotowy względem bazy. W wielu przypadkach ruch ten jest podstawowym ruchem użytecznym mechanizmu, zapewniającym możliwość jego eksploatacji zgodnie z przeznaczeniem. Dla uzyskania podparcia elementu, które zapewni wymagany ruch obrotowy, używa się zazwyczaj łożysk tocznych. Obiektami omawianych badań będą małe łożyska kulkowe, zamknięte, funkcjonujące w maszynie elektrycznej. Rozważania zostaną ograniczone do procesów dynamicznych (wibroakustycznych) i zużyciowych. Przy czym przy omawianiu procesów zużyciowych zostanie przede wszystkim uwzględniony ich wpływ na eksploatację łożyska i całego urządzenia przy pominięciu przyczyn ich powstawania i mechanizmu przebiegu.

*) W konsekwencji tego faktu w dużej większości przypadków zwłaszcza dla wstępnych badań własności dynamicznych stosuje się dyskretne modele tych maszyn. Typowy skład równań opisujących ruch dla każdego modelu o n masach skupionych ma postać:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = P(t),$$

gdzie: M, C i K są macierzami opisującymi bezwładnościowe, tłumieniowe i sprężyste własności układu, zaś \ddot{q}, \dot{q}, q , są macierzami kolumnowymi reprezentującymi współrzędne uogólnione i ich pochodne względem czasu.

***) Własności bierne łożyska ujawnią się w poprzednio przytoczonym modelu w postaci mas, sprężystości, tłumień pochodzących od tego łożyska, zaś własności czynne będą wyrażone jako ich zmiany lub wymuszenia zewnętrzne (założenie od sposobu ich zmodelowania).

Jeżeli zatem ograniczymy nasze zainteresowanie do własności dynamicznych urządzeń mechanicznych i maszyn to tak jak w poz. [17] można powiedzieć, że większość z nich charakteryzuje się dużą niejednorodnością struktury ze względu na rozkład mas i sztywności elementów ^{*}). Dokonując pewnych uproszczeń jednym grupom elementów można przypisać tylko bezwładność, innym sprężystość a jeszcze innym tłumienie. Wiadomo, że w takim układzie występuje zjawisko kumulowania energii oraz jej strat. Człony bezwładnościowe kumulują energię kinetyczną, człony sprężyste - energię potencjalną. Wymiana energii między członami odbywa się najczęściej w formie drgań. Człony tłumieniowe reprezentują rozpraszanie energii. W takim układzie szczególnej wagi nabierają własności elementów powodujących powstawanie drgań. Jest bowiem sprawą oczywistą, że własności te będą się różnie realizować w zależności od własności innych elementów układu, połączeń istniejących między nimi. Ujawnia się zatem podstawowe znaczenie doboru odpowiednich własności oraz istnienie odpowiednich stanów elementów, w tym również łożysk, tak aby drgania całego urządzenia były małe. Przyjmując zaś, że proces drgań jest sprzężony z procesem hałasu można wtedy także oczekiwać niskiego poziomu hałasu. W takim układzie łożyska toczne funkcjonują w sposób dwójaki. Z jednej strony działają jako elementy bierne masowo sprężysto-dyspatywne, a z drugiej strony jako elementy czynne (czyli źródła wymuszeń ^{**}) Nie wdając się w analizę sposobu ich działania w modelu dynamicznym obszerniej omówiono ten problem w poz. [5 i 69], można powiedzieć, że zarówno czynne jak i bierne własności łożyska są powodowane przez takie cechy jego struktury jak np:

- własności geometryczne elementów (luz promieniowy, różnice w wymiarach kulek, błędy geometrii jednej bieżni względem drugiej),
- własności fraktograficzne (sposób współpracy elementów, defekty powierzchniowe, liniowe i punktowe na powierzchniach kulek i bieżni, jakościowe zmiany powierzchni),
- makro i mikrogeometria powierzchni roboczych łożysk (faliistości, chropowatości współpracujących elementów, owalizacja elementów tocznych),

^{*}, ^{**}) - patrz str. 117.

- własności materiałów współpracujących elementów (mikrotwardości struktura warstwy wierzchniej, wtrącenia innych materiałów, naprężenia własne w elementach wprowadzone podczas wytwarzania i samorzutnie z upływem czasu, histereza odkształceń sprężystych w strefie kontaktu itd.).

Dla rozważań problemu badań zużycia łożysk^{ważne} jest w jaki sposób te cechy struktury wpływają na sposób ich funkcjonowania i zachodzące w nich procesy. Istnieje wiele opracowań omawiających te zagadnienia. W poz. [69] rozważa się je z punktu widzenia dynamiki, zaś w poz. [81] z punktu widzenia eksploatacji. W obu tych pozycjach można wyróżnić następujące własności łożyska, które wynikają z nadanej mu struktury i decydują o jakości i jego sposobie funkcjonowania w urządzeniu mechanicznym. Dla łożyska nowego będą to przede wszystkim:

1. Sprężystość i tłumienie.

Zależą one od własności materiału i konstrukcji łożyska. Naskutek zmiany pozycji elementów łożyska względem przenoszonych przez nie sił własności te zmieniają się w czasie, przeobrażają w sposób okresowy z częstotliwością, zależną od prędkości obracania się łożyska, jego struktury (np. liczby kulek), odchyłek od kształtów i wymiarów założonych (falistości, chropowatości), własności tłumienia materiałów (np. histerezy w sferze kontaktu, tłumienia materiału smarującego, tarcia, toczenia i poślizgów itp.).

2. Opory tarcia.

Mechanizm funkcjonowania tych zjawisk jest bardzo skomplikowany. Bez dokonywania szczegółowej analizy, można powiedzieć, że zależą one od tarcia tocznego i poślizgów w sferze kontaktu, tarcia wewnątrz-materiałowego w sferach kontaktu stykających się elementów, oporów czynnika smarującego, momentów góroskopowych wirujących elementów, tarcia elementów ruchomych o medium w którym pracuje łożysko itd. Charakter tych zależności, struktura i sposób funkcjonowania łożyska powoduje, że opory tarcia również zmieniają się w sposób pulsujący.

Istniejące z racji charakteru współpracy elementów wędrujące obciążenia kontaktowe oraz tarcie w warstwach wierzchnich

elementów, mające z omawianych powyżej przyczyn również charakter pulsacyjny, prowadzą do zużycia zmęczeniowego i wycierania się pracujących powierzchni elementów łożyska. Występujące w rozmaitych postaciach zużycie zmęczeniowe zależy od obciążenia i własności materiału takich jak: sprężystości i plastyczności, własności fizyko - chemicznych, makro i mikrogeometrii styku współpracujących powierzchni, własności smaru itp. Zużycie cierne jest sumą procesów, zachodzących podczas wzajemnego przemieszczania się po sobie dwóch powierzchni, takich jak: odkształcanie i ścinanie występów i nierówności, tworzenie się i oddzielanie narostów, adhezyjne zczepianie się materiałów współpracujących powierzchni, mikroekrawanie itd. Z analizy stanu wiedzy dotyczącego tych procesów można powiedzieć, że zużycie cierne zależy od obciążenia, własności warstwy wierzchniej materiałów łożyskowych, kształtów powierzchni, odchyłek od kształtów i montażu idealnego, mas elementów ruchomych, jakości smarowania itp.

We wspomnianych poprzednio cechach struktury a następnie we własnościach i procesach zachodzących w łożysku, można wyróżnić dwie składowe: deterministyczną i probabilistyczną. Składowa deterministyczna jest konsekwencją tych cech struktury, które mogły zostać nadane w sposób świadomy dla osiągnięcia zamierzonych efektów eksploatacyjnych. Natomiast składowa probabilistyczna reprezentuje to co niezależnie od woli człowieka istnieje i wpływa niekiedy w sposób istotny na własności i funkcjonowanie łożyska, co nie da się z góry przewidzieć i zrealizować. Z punktu widzenia kontroli nowego łożyska zabudowanego w urządzeniu, ważna jest oczywiście znajomość obu składowych tzn. czy i na ile udało się zrealizować postawione zamierzenia konstrukcyjno-technologiczne a także jakie odstępstwa od założeń i nieprzewidziane zjawiska występują w zrealizowanym obiekcie, w stanie nowym i podczas jego eksploatacji, oraz jak obie grupy tych własności realizują się w funkcjonującej maszynie, w której łożysko zabudowano.

Dotychczasowe rozważania można w następujący sposób podsumować z punktu widzenia wymagań dotyczących stosowania łożysk tocznych w maszynach i urządzeniach mechanicznych. Dla urządzenia mechanicznego decydujące znaczenie ma właściwy dobór

łożyska i jego odpowiednia jakość. Zaś dla łożyska funkcjonującego w urządzeniu (zakładając, że jest ono prawidłowo dobrane i posiada odpowiednią jakość) najważniejsza będzie możliwość długotrwałej pracy w danych warunkach bez przekroczenia poziomu zużycia cierneego i zmęczeniowego powodującego utratę zdolności eksploatacyjnej. Z tą własnością wiąże się cały szereg innych jak np: opory tarcia, własności ergonomiczne, tym niemniej odporność na zużywanie się w procesie eksploatacji w standardowych urządzeniach codziennego użytku jest powszechnie uznane za najważniejszą.

W ten sposób została określona własność łożyska, która będzie przedmiotem badań omawianych w tej rozprawie. Nawiązując do rozważań przeprowadzonych w punkcie 4.4. można powiedzieć, że będziemy oceniać niezawodność łożysk zdefiniowaną w następujący sposób *):

$$\bar{R} = [r_2],$$

zaś ocena zużywania się elementów r_2 będzie dokonywana dla łożysk funkcjonujących w urządzeniach mechanicznych. Postulat prawidłowego, długotrwałego funkcjonowania łożyska w urządzeniu, realizuje się poprzez wykonanie łożyska, wykonanie urządzenia i eksploatację urządzenia zawierającego łożysko. Podczas wykonywania łożyska należy zapewnić dzięki odpowiedniej konstrukcji i technologii, strukturę, która da najkorzystniejsze własności. Podczas wykonywania urządzenia należy zapewnić strukturę urządzenia, w tym dobór łożyska i jego montaż, która uczyni warunki pracy łożyska maksymalnie zbliżone do optymalnych. Zaś podczas eksploatacji urządzenia należy zapewnić warunki prawidłowego funkcjonowania i obsługi.

8.3.2. Dane techniczne obiektu badań

Obiektem badań będą łożyska używane w alternatorach samochodowych typu: A12M - 12,4/12/42 montowanych na silnikach eksploa-

*) W praktyce własność r_2 będzie wyrażona w postaci trendu. Zapis wektorowy mimo, że wynika on z zależności [8] nie jest niezbędny w tym konkretnym przypadku.

towanych w silnikach Fiat 125p.

A oto ważniejsze dane techniczne alternatora:

- napięcie znamionowe 12V,
- przy 5000 obr/min alternator powinien dawać napięcie 14V i prąd minimalny 42A,
- prąd maksymalny 53A,
- maksymalna prędkość trwała 13000 obr/min.

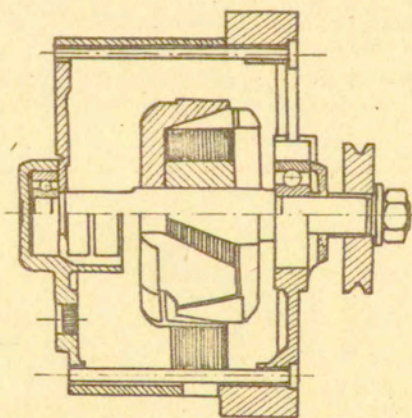
Alternator jest napędzany paskiem klinowym. Wirnik podparty jest na dwóch łożyskach: 6302zz od strony kółka pasowego i 6201 zz od strony przeciwnej.

Łożyska charakteryzują się następującymi danymi.

Typ	wymiary			Nośność ruchowa kG	Granicz. prędk. obr. 1/min	Cięż. łoż. kG	Licz. kul.	Śr. kul.
	d	D	B					
6201zz	12	32	10	540	20000	0,037	7	6,0
6302zz	15	42	13	890	16000	0,082	7	7,9

Schematyczny widok alternatora jest pokazany na rys. 13.

Łożyska są typu zamkniętego, napełnione smarem.



Rys. 13. Alternator

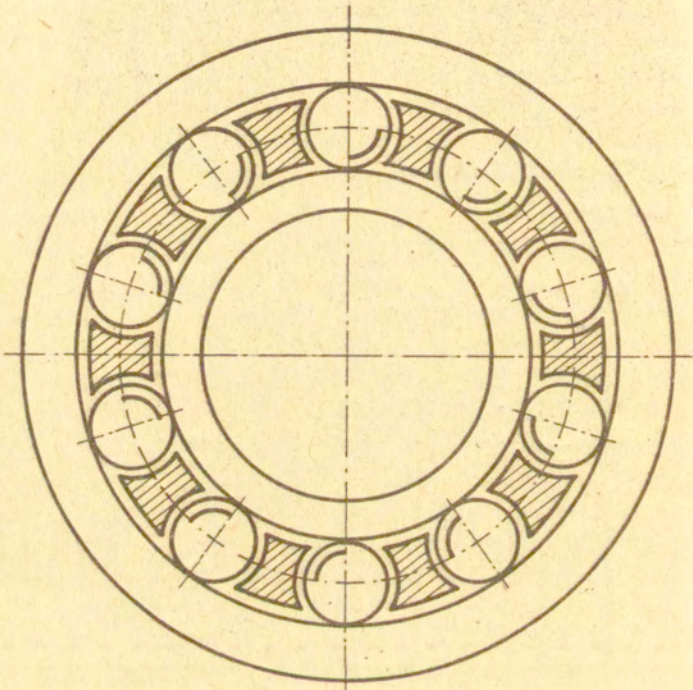
8.3.3. Model cybernetyczny

Przed podjęciem modelowania obiektu należy go wyodrębnić jako system funkcjonujący w otoczeniu. Z omówionej poprzednio specyfiki i sposobu funkcjonowania obiektu wynika, że należy tu uwzględnić dwa systemy: łożysko i alternator, dla którego system - łożysko będzie podsystemem. Aby łożysko rozpatrywane jako podsystem mogło wypełniać swoją funkcję eksploatacyjną trzeba wytworzyć elementy o własnościach zbliżonych do z góry założonych i zestawiając je w całość osiągnąć istnienie odpowiednich relacji pomiędzy nimi. Wtedy taki podsystem-łożysko będzie mógł funkcjonować w sposób skoordynowany. Łożysko toczne kulkowe można rozpatrywać jako system w skład którego wchodzi następujące elementy:

- bieżnia wewnętrzna ,
- kulki ,
- koszyk wypełniony smarem ,
- bieżnia zewnętrzna .

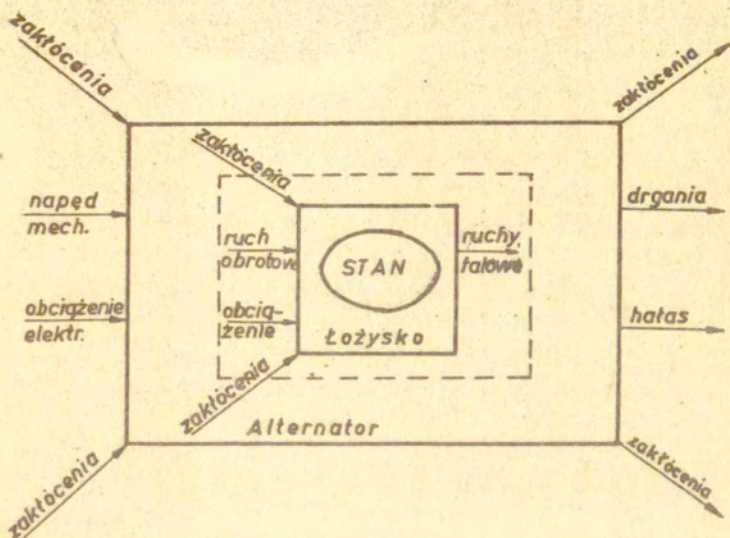
Więzy świadomie narzucane przez konstrukcję i technologię na elementy powodują, że kulki osadzone w koszyku mogą się toczyć po powierzchniach bieżni zapewniając ich wzajemne obracanie się (rys. 14).

Na skutek omówionych w punkcie 8.3.1. przyczyn, ruch elementów łożyska nie przebiega w sposób ustalony. Ruchowi temu towarzyszą zaburzenia równowagi dynamicznej, wstrząsy, zderzenia, poślizgi i inne tego rodzaju zjawiska powodujące przekazywanie (głównie w postaci impulsów) energii między elementami łożyska oraz do środowiska, w którym ono funkcjonuje czyli do systemu - alternatora i jego otoczenia. To zaś jest przyczyną występowania rozmaitych objawów na zewnątrz alternatora. Z całego szeregu tych objawów do dalszych rozważań wybierzemy procesy falowe. Są one z podsystemu-łożysko przekazywane do systemu - alternator i ujawniają się jako drgania mechaniczne i akustyczne. Pod wpływem ruchów i obciążeń wynikających z funkcjonowania mamy zatem odwzorowanie własności zużycia łożyska w drgania mechaniczne i akustyczne. Podsumowując powyższą analizę, dla celów postawionego problemu badawczego, można



Rys. 14 . Łożysko

zapropnować model cybernetyczny systemu alternatora zawierającego podsystem-łożysko taki jak przedstawiono na rys. 15. W schemacie tym można wyróżnić:



Rys. 15. Model cybernetyczny

1. Wejście systemu tzn: warunki pracy alternatora (napęd i obciążenie) ;
2. Wejście podsystemu tzn: warunki pracy łożyska w omawianym przypadku łożysk zabudowanych w alternatorach uwzględnimy tylko ruch obrotowy wirnika obciążenie elektryczne wynikające z eksploatacji urządzenia, resztę zewnętrznych czynników wpływających na funkcjonowanie łożyska traktując jako nieistotne zakłócenia (wybór taki zakłada wysoką jakość i powtarzalność konstrukcji i wykonania samego łożyska a także alternatora) ;

3. Stan badany podyktowany celem przedsięwziętym do realizacji, będzie stanem zużycia łożyska,
4. Wyjście podsystemu tzn: procesy falowe przekazywane do alternatora zależne ściśle od stanu podsystemu,
5. Wyjście systemu objawy zewnętrzne funkcjonowania, bogate w informacje o sposobie pracy i o stanie zużycia łożyska, łatwe do obserwacji bez zakłócenia procesu eksploatacji, najlepiej do tego celu będą się nadawać drgania (mechaniczne i akustyczne),
6. Zakłócenia tzn: wszystkie czynniki nieuwzględnione i nieznanne, które wpływają na odwzorowanie wybranego stanu w wyjście.

Wybrane w powyżej wejście systemu odzwierciedla działanie alternatora a to jest warunkiem koniecznym do tego aby zużycie współpracujących powierzchni łożyska, mogło funkcjonować jako źródło drgań i hałasu. Trzeba się również liczyć z tym, że objawy będą obserwowane na zewnątrz całego urządzenia a nie samego łożyska i w związku z tym będą transformacją objawów wygenerowanych przez łożysko, dokonaną przez całe urządzenie. Transformacja zależność będzie od własności systemu-urządzenia, którego łożysko jest odsystemem.

W ten sposób omówiony został obiekt badań to znaczy łożysko toczne kulkowe, zabudowane w urządzeniu mechanicznym.

8.4. Zamierzony cel i posiadane możliwości

Ogólny cel badań został omówiony we wstępie rozprawy oraz w punkcie 8.2. Reasumując to co już powiedziano na ten temat, można stwierdzić, że celem badań jest (1) opracowanie metody diagnostycznej do oceny stanu zużycia łożysk tocznych kulkowych, zabudowanych w małych prądnicach prądu zmiennego oraz (2) zbadanie zużywania się łożysk w procesie eksploatacji tych maszyn.

Mając określony cel i obiekt badań dokonajmy analizy możliwości jego przebadania.

Realizacji zadania możnaby dokonać przez bezpośredni pomiar zużycia ale ten sposób nie spełnia podstawowych wymogów o nie-

zakłócaniu procesu eksploatacji (zaś prawidłowość doboru łożysk do alternatora można określić wyłącznie na kompletnym, pracującym obiekcie). Należy zatem skorzystać z istniejących metod badania całego funkcjonującego obiektu wykorzystując możliwości oceny pośredniej.

W tym celu trzeba stworzyć warunki badania alternatorów, które umożliwiają obserwację zewnętrznych objawów ich funkcjonowania najbogatszych w informacje o badanych własnościach. W chwili obecnej istnieje wiele zaawansowanych metod badania różnych objawów funkcjonowania urządzeń mechanicznych, które mogą być wykorzystane do osiągnięcia zamierzonego celu.

8.5. Metoda badań

Metoda badań musi prowadzić do osiągnięcia zamierzonego celu. Na podstawie przeprowadzonych poprzednio rozważań można powiedzieć, że zarówno od strony teoretycznej jak i praktycznej najdogodniejszym do tego celu objawem procesów falowych będą drgania i hałas. Konsekwencją tego rozumowania będzie podjęcie decyzji o badaniu drgań i hałasu emitowanych przez pracujący alternator, w celu uzyskania informacji o stanie zużycia zabudowanych w nim łożysk. Jest sprawą oczywistą, że dla podjęcia takiej decyzji nie wystarczą same rozważania, uzasadniające możliwości takiego wykorzystania drgań i hałasu. Potrzebne są bezsporne dowody wynikające z badań rozpoznawczych, że decyzja taka jest uzasadniona dla konkretnego typu obiektów i że stwarza szansę osiągnięcia zamierzonego celu. Obecnie wspomniana decyzja zostanie podjęta na podstawie istniejącego stanu, wiedzy na ten temat. Uzasadniają ją prace wymienione w poz. [17, 65, 66, 67]. Podobną metodę stosują również Autorzy prac [11, 18, 29]. Niemniej, przed przystąpieniem do badań ostatecznych trzeba będzie przeprowadzić wnikliwe badania rozpoznawcze.

Rozważając dalej możliwości wykorzystania drgań i hałasu do oceny stopnia zużycia łożysk zabudowanych w alternatorach trzeba przyjąć, że powolnie postępujące zmiany zużyciowe będą się uwidaczniać w postaci trendów zmian tych objawów. Wracając zatem

do rozumowania zaprezentowanego w punkcie 5.2. rozprawy, można powiedzieć, że badając obiekt wielokrotnie w różnych chwilach procesu eksploatacji i wyznaczając trendy, sygnałów diagnostycznych, uzyskamy trend miary charakteryzującej objawy reprezentującą zużycie. A zatem dla czasów $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_K$, czasu eksploatacji alternatora, zostaną dokonane pomiary, każdy w czasie $T = \{t_k : k \in K\}$, miar wybranych sygnałów diagnostycznych odzwierciedlających zużycie łożysk. Wiadomo z góry, że nie będziemy mogli sterować badanym zużyciem łożysk w procesie eksploatacji, zakłócało by to proces i zmniejszałoby rezultaty, dlatego w czasach $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_K$ będą wykonywane serie eksperymentów biernych, w których trzeba będzie jedynie wyznaczyć stany zużycia. Można również założyć, że stan zużycia zależy tylko od czasu Θ , zaś nie zależy od czasu T , czyli podczas pojedynczego pomiaru (trwającego do 5 min) pozostaje niewrażliwy na zachodzące zmiany. Rozumując dalej w podobny sposób można założyć niezmienność struktury systemu - alternatora i podsystemu łożyska w czasie Θ i w czasie T . Praktyka eksploatacji alternatorów potwierdza takie założenie. Jeśli nie nastąpi uszkodzenie któregoś z elementów (głównie układu elektrycznego) takie założenie jest bliskie rzeczywistości. Można zatem oczekiwać, że rozpatrywane odwzorowanie stanu w wyjście systemu będzie zgodne z relacją (30), lub którąś z jej pochodnych.

8.6. Wybór sygnałów diagnostycznych i sformułowania zadania

8.6.1. Założenia wstępne

Określono już procesy, które w punkcie 6.3. nazwano dawcami sygnałów diagnostycznych oraz podstawowe założenie metody badań. Rozumując w sposób podany w poprzednich częściach pracy, mamy do określenia stan zużycia łożysk, który można wyrazić w postaci wektora np: \bar{x} , zaś do jego wyznaczenia zostaną wykorzystane sygnały diagnostyczne, które mogą być wyrażone jako wektory \bar{y}_1 i \bar{y}_2 , wektory \bar{x} , \bar{y}_1 , \bar{y}_2 można zapisać przy pomocy ciągów wartości liczbowych opisujących intensywności

odpowiednio zużycia drgań i hałasu. Taki ścisły opis tych wielkości prowadzi do precyzyjnego, ilościowego ujęcia zagadnienia, co na tym etapie badań nie jest jeszcze możliwe i nie jest również konieczne. Poza tym ścisły opis ilościowy stanu zużycia, które jest zjawiskiem bardzo złożonym, nastrocza wiele nierozwiązanych jeszcze trudności. Podobne trudności nastrocza ilościowy opis odwzorowania tego stanu w sygnały. Sposób odwzorowania wynika bowiem z funkcjonowania uszkodzeń i ubytków współpracujących powierzchni łożyska, jako źródeł naruszenia stanów równowagi, powodujących generację fal mechanicznych i akustycznych. Odwzorowanie to zależy również od propagacji tych fal, zarówno w łożyskach jak i w całym alternatorze oraz ich emisji do otoczenia. Dlatego proponując metodę, która ma być praktycznie stosowana w diagnozowaniu stanu zużycia łożysk w pracującym alternatorze, wydaje się celowe ujęcie problemu w sposób bardziej jakościowy niż ilościowy. Zaś stosowane w praktyce wielkości liczbowe, dotyczące głównie wartości zużycia granicznego, ocenianego poprzez obserwację drgań i hałasu, będą rezultatem uogólnień informacji empirycznych zdobytych na drodze zbierania doświadczeń badawczych i eksploatacyjnych.

Dlatego do rozwiązania zadania referowanego w tej pracy przyjęto następujące rozumowanie. Zakłócenia stanów równowagi dynamicznej podczas funkcjonowania łożyska na skutek istniejących luzów i uszkodzeń powierzchniowych, ujawniają się w postaci impulsów zderzeniowych. Wycieranie powierzchni zwiększające luzy w stosunku do wartości nominalnych, stwarza dogodny warunek do wzrostu prędkości zderzających się elementów. Rośnie również liczba defektów powierzchniowych (np: wykruszeń pochodzących od pittingu czy łuszczenia), z których każdy może być źródłem impulsów zdrzeniowych. A zatem wraz, ze zużywaniem się łożyska rośnie całkowita energia tychże impulsów. Twierdzenie takie jest powszechnie stosowane w praktyce eksploatacyjnej nie tylko łożysk.

Z prawa zachowania energii wynika, że będzie również rosła energia ruchów falowych wywołanych przez te impulsy w elementach łożyska i otaczających go ośrodkach. I te właśnie fale,

wielokrotnie przetworzone po drodze, po dojściu do czujników pomiarowych zostaną wykorzystane jako sygnały diagnostyczne.

Reasumując powyższe można postawić tezę, że wielkościami, które mogą odwzorować stopień zużycia łożyska są energia drgań i energia hałasu. Zanim jednak zostanie podjęta decyzja aby te wielkości wybrać jako sygnały diagnostyczne, trzeba odpowiedzieć na następujące pytania, które sygnalizowano już w punkcie 8,5, a mianowicie:

- 1) czy zmiany energii sygnałów diagnostycznych reprezentujące zużycie łożysk, są wystarczająco duże aby mogły być zaobserwowane przez aparaturę badawczą ?
- 2) jakie zmiany tej energii najpełniej i najlepiej reprezentują to zużycie ?

Wiadomo z innych badań łożysk [11, 17, 18, 29, 65, 66, 67], jak również z badań rozpoznawczych dla innych mechanizmów (np: przekładni zębatych [15, 16, 37, 40, 53, 54, 55]), że energia impulsów zderzeniowych pochodzących od zużycia powierzchniowego elementów maszyn jest znikoma w porównaniu z całą energią drgań i hałasu produkowaną przez inne źródła działające w funkcjonującym mechanizmie (w przypadku alternatora będzie on pochodził m.in. od wirowania: twornika, wentylatora, pola magnetycznego itp). Czujniki pomiarowe w zakresie swoich możliwości technicznych odbiorą wszystkie te i nie tylko te sygnały, które w stosunku do sygnału odwzorowującego zużywanie się łożysk, trzeba uważać za zakłócenia. Jeżeli zatem sformułujemy zadanie diagnostyczne w sposób podobny jak uczyniono to w równaniach (79) lub (81) to wektor $\bar{z}(t)$ opisuje wszystkie te zakłócenia. Odpowiadając na postawione powyżej pytania można będzie potwierdzić (lub obalić) istnienie możliwości wykorzystania drgań i hałasu od wyznaczenia stanu zużycia łożysk a zatem potwierdzić (lub obalić) istnienie operatora F , bez względu na jego postać. Będzie również można rozpoznać możliwość wydzielenia z sygnału $\bar{y}(t)$, składowej użytecznej $\bar{s}(t)$, zawierającej dużo informacji o badanym stanie $\bar{x}(t)$; patrz zależność (83).

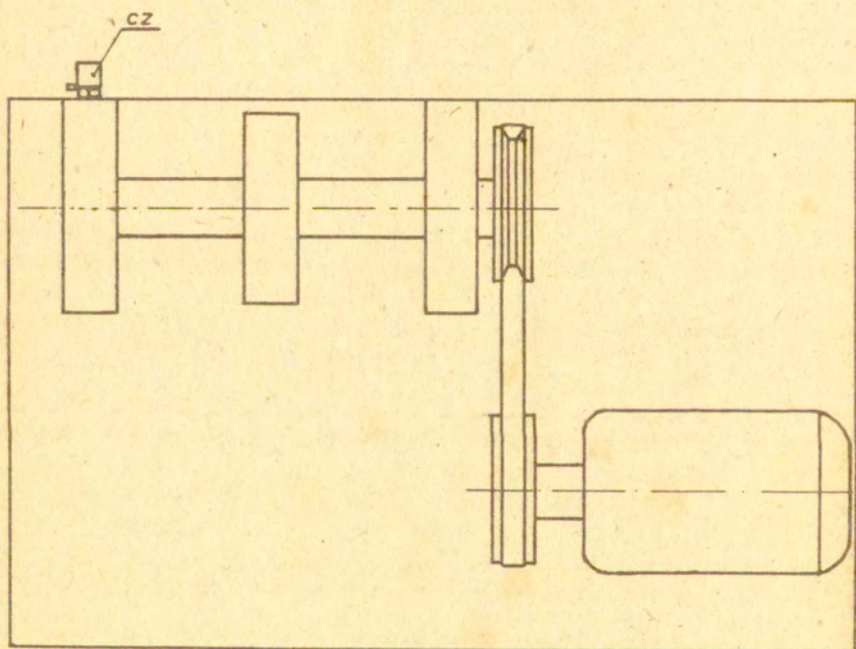
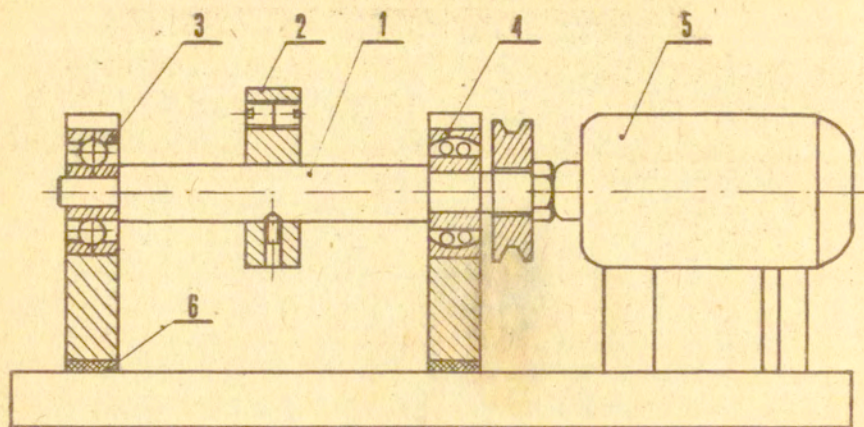
8.6.2. Eksperyment rozpoznawczy

Ponieważ eksperyment rozpoznawczy ma odpowiedzieć na z góry postawione pytania, trzeba go zaplanować tak aby był to eksperyment czynny. Jest to bowiem stosunkowo najprostsza i najpewniejsza droga do zrealizowania tego postulatu.

Do badań przyjęto łożyska podobne do tych, które pracują w alternatorze.

Przedmiotem pomiarów było handlowe łożysko toczne typu 6205. Z uwagi na konieczność badania łożyska nowego i zużytego do badań wybrano dwa łożyska tego typu i założono ich identyczność (ergodyczność obiektów i procesów). Jedno z nich było nowe a drugie eksploatowane przez długi czas w urządzeniu mechanicznym nosiło wyraźne symptomy dużego zużycia. Zarówno bieżnia wewnętrzna jak i kulki posiadały liczne jamki pittingowe. Na bieżni zaobserwowano 6 dużych obszarów stanowiących skupiska jamek pittingowych. Długość tych skupisk mierzona po obwodzie pierścienia wynosiła $8 + 10$ mm. Ośmiem (z jedenastu) kulek nosiło również wyraźne objawy zużycia powierzchniowego. Wszystkie te symptomy wskazywały na to, że łożysko to już poprzednio powinno być wycofane z eksploatacji jako całkowicie zużyte. Rozpatrując oba łożyska (nowe i zużyte) jako reprezentację jednego procesu można powiedzieć, że mamy do czynienia z dwoma krańcowymi punktami trendu zużycia: jeden dla "czasu długiego" $\mathcal{V}_1 = 0$, drugi dla $\mathcal{V}_2 = \mathcal{V}_{max}$ odpowiadającego kresowi eksploatacji gdzie: $\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2 \in \Theta$. Biorąc pod uwagę sposób przebiegu procesu zużycia i specyfikę zastosowanej metody pomiaru, dla uzyskania wyższej wiarygodności diagnozy zastosowano tu sposób bezustannego przekazywania sygnału diagnostycznego tzn: obserwowano ten sygnał przez pewien okres czasu. Zadanie diagnostyczne jest więc sformułowane zgodnie z zapisem przy pomocy zależności (81), z pominięciem zakłóceń \ast).

\ast) Dokładna analiza sposobu pomiaru zostanie przedstawiona przy opisywaniu właściwych badań w dalszych częściach pracy.



Rys. 16 . Stanowisko do badania łożysk.

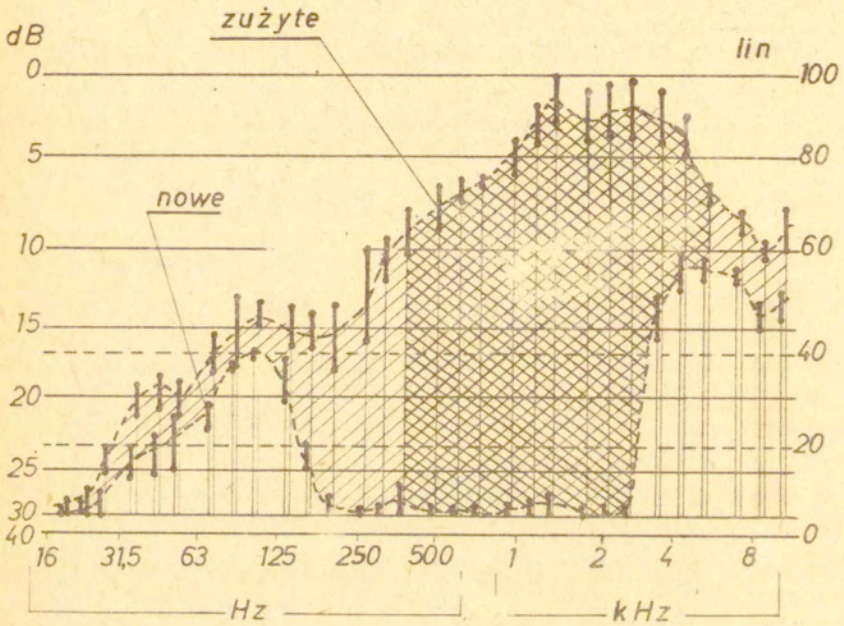
Podczas pomiarów wykorzystano znany fakt, że drgania maszyn mają strukturę częstotliwościową odpowiadającą ich własnościom kinematycznym i dynamicznym. Dlatego jako sygnał badano drgania obudowy, w której umieszczono łożysko. Sygnał ten analizowano w pasmach częstotliwościowych w szerokim zakresie częstotliwości. Przyjęto przy tym założenie omówione szerzej w poz. [46], że sygnał spełnia warunki Dirichleta niezbędne do wykonania analizy harmonicznej. Aby można było przyjąć zależność (81) jako słuszną i pominąć zakłócenia należało również odpowiednio zorganizować pomiar i przygotować stanowisko badawcze. Pomiar wykonano na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rys. 16. Stanowisko składa się z wałka (1), na którym zamocowana została niewyważona masa (2) obciążająca łożyska podczas obrotów. Wałek podparto na dwóch łożyskach kulkowym - wahlowym (4) oraz badanym (3). Wałek napędzano silnikiem elektrycznym (5) przy pomocy paska klinowego. W celu zapewnienia stałości i zminimalizowania zakłóceń pomiarowych wykonano następujące czynności. Przed umieszczeniem na stanowisku, badane łożysko dokładnie myto w benzynie ekstrakcyjnej oraz suszono. Po umieszczeniu w obudowie, łożysko smarowano smarem LT4. Pomiar przeprowadzono po czasie około 15 min. od chwili uruchomienia stanowiska osiągając w ten sposób ustalenie warunków termicznych i równomierne rozprowadzenie smaru. Silnik i wsporniki łożysk mocowano do płyty poprzez podkładki wibroizolacyjne.

Mierzono wartość skuteczną przyspieszenia drgań \ddot{x}) podpory badanego łożyska. Do pomiaru zastosowano zestawiony wg schematu podanego na rys. 10a. Czujnik do badania drgań firmy B&K typ: 4344 zamocowano do wspornika, w którym pracowało badane łożysko. Mocowania dokonano przy pomocy wkrętu, promieniowo w stosunku do osi obrotu łożyska w kierunku zbliżonym do poziomego. Sygnał z czujnika podawano na przedwzmacniacz.

Aby zapewnić praktyczną realizację zależności (81) należało odpowiednio przygotować przetwarzanie danych. Widma bieżące

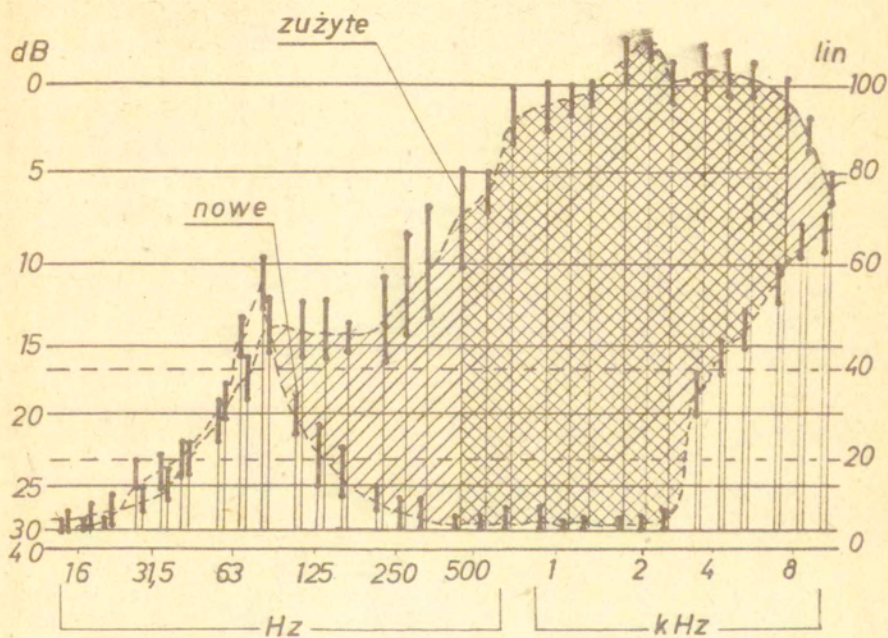
*) Dokładnie biorąc miarę energii sygnału jest kwadrat tej wielkości, ale w badaniach rozpoznawczych uwzględnienie tego faktu nie jest niezbędne.

$n = 4300 \text{ obr/min}$



Rys. 17 . Porównanie widm drgań dla łożyska nowego i zużytego.

$n = 5800 \text{ obr/min}$



Rys. 18 . Porównanie widm drgań dla łożyska nowego i zużytego

wartości skutecznej przyśpieszenia drgań wspornika łożyska uzyskano przy zastosowaniu analizatora równoczesnego firmy RFT typ FSP-80. Umożliwia on uzyskanie widma bieżącego w postaci prążków na lampie oscyloskopowej w pasmach tercjowych w zakresie od 2 Hz do 20KHz, uśrednionego wstępnie po czasie obserwacji. Obraz widma był rejestrowany poprzez fotografowanie ekranu lampy. Badano łożyska nowe i zużyte dla dwóch prędkości obrotowych $n_1 = 4300$ i $n_2 = 5800$ obr/min., przy tym samym niewyważeniu wałka wirującego (zmieniła się zatem siła obciążająca łożysko proporcjonalnie do n^2). Rezultaty pomiarów w postaci graficznych opracowań otrzymanych fotografii przedstawiono na rys. 17. i 18. Liniami ukośnymi zaznaczono różnicę pomiędzy widmami dla łożyska zużytego i nowego. Pasma, w którym różnica ta jest największa zaznaczono kratką. Widać, że dla prędkości 5800 obr/min obszary zaznaczone są na t /kresie przesunięte w prawo w stosunku do ich położenia dla prędkości 4300 obr/min.

Postawienie diagnozy oparto na następującym rozumowaniu. Częstotliwość drgań pochodzących od wymuszeń związanych z ruchem i sposobem konstrukcji łożyska (liczbą kulek) dla $n_1 = 4300$ obr/min jest mniejsza od 400 Hz a dla $n_2 = 5800$ obr/min jest mniejsza od 500 Hz. Można to łatwo obliczyć z prędkości obrotowej wałka i liczby kulek. Fale sprężyste pochodzące od uderzenia kulek i bieżni we wgłębienia pochodzące od zużycia powinny dawać drgania w zakresie wyższych częstotliwości, przy czym ze względu na nierównomierność rozkładu tych wgłębień zakres ten może być dość szeroki.

W obu przypadkach rys. 17 i 18 obserwujemy istnienie największej różnicy drgań, pomiędzy łożyskiem zużytym i nowym dla 300 obr/min w paśmie od 400 + 5000 Hz a dla 5800 obr/min w paśmie 500 + 7000 Hz ^{*}). Potwierdza to hipotezę, że sygnał niosący informacje o stanie zużycia łożyska występuje w uzyskanych rejestracjach i znajduje się w pasmach częstotliwości widma.

*) Takie same badania przy użyciu tego samego stanowiska i aparatury pomiarowej wykonano dla łożyska rolkowego NU 2205 Uzyskano rezultaty bardzo zbliżone do opisywanych; [45].

8.6.3. Sformułowanie zadania

Przeprowadzony eksperyment *) uzasadnia możliwość obserwowania i mierzenia intensywności zużycia łożysk przy wykorzystaniu zmian energii drgań emitowanej przez nie; wskazuje również metodę analizy częstotliwościowej jako możliwość odfiltrowania zakłóceń w celu otrzymania składowych energii bogatych w informacje o tym zużyciu. A zatem na postawione w punkcie poprzednim pytania można odpowiedzieć twierdząco. Zostało to potwierdzone dla drgań, ale biorąc pod uwagę wspólne fizyczne pochodzenie drgań i hałasu, stwierdzenie powyższe można rozciągnąć również na sygnały akustyczne. Dowodzą tego także liczne nie opisywane tu badania. Oczywiście, że dla wydzielenia składowej użytecznej z tak wybranych sygnałów diagnostycznych, w przypadku łożysk zabudowanych w alternatorach potrzebne będą dodatkowe informacje odnośnie pasma częstotliwości, w którym ta składowa występuje. Są to informacje typu: "know-how" , które zdobywa się poprzez gromadzenie doświadczeń badawczych,

Posiadanie takich informacji umożliwi przeprowadzenie operacji odfiltrowania zakłóceń od składowych użytecznych sygnałów diagnostycznych zapisanych zależnością (83). Rozpatrując teraz te składowe jako sygnały można powiedzieć, że drgania i hałas w pewnych pasmach częstotliwości odwzorowują zużycie łożysk z niewielkim, dopuszczalnym w technice błędem. Oczywiście w wybranych pasmach mogą również istnieć składowe sygnały pochodzące z innych źródeł niż zużycie łożysk. Ale można założyć że mają one niewielki udział w odwzorowaniu stanu w sygnały **) Można dalej założyć, że stan badany (równoważny z własnością r_2) da się zapisać przy pomocy jednej wielkości skalarnej x . Miara taka może być podporządkowana intensywności zużycia na podstawie dużej ilości informacji uzyskanych z badań i doświadczeń eksploatacyjnych.

*) Jeden z bardzo wielu pomiarów drgań i hałasu łożysk.

**) Zostanie to oczywiście sprawdzone podczas pomiarów.

Podsumowując dotychczasowe rozważania, rezultaty cytowanych badań oraz rezultat eksperymentu rozpoznawczego można przyjąć, że: (1) stan zużycia opisany miarą x jest niezależny od czasu pomiaru T , dla każdej chwili $t_k \in T$ (gdzie: $k = 1, 2, \dots, K$) i dowolnej chwili $\forall_{\mathcal{K}} \in \mathbb{R}$ (gdzie: $\mathcal{K} = 1, 2, \dots, \mathcal{K}$); (2) istnieje operator F_1 , który odwzorowuje stan zużycia łożyska w energię drgań mechanicznych i F_2 , który odwzorowuje ten stan w energię drgań akustycznych; (3) są to energie odfiltrowane od zakłóceń, istniejące w pewnych pasmach częstotliwości tych sygnałów. Dla ostatecznego sformułowania zadania trzeba przyjąć dodatkowe założenia o stacjonarności tego operatora oraz o stacjonarności zakłóceń. W pierwszym założeniu chodzi o to aby sposób odwzorowania stanu w sygnały był taki sam dla wszystkich $\forall_{t \in T}$ i $t \in T$. Ponieważ przyporządkowanie wartościom sygnałów odpowiadających stanów zużycia jest możliwe tylko na podstawie uogólnienia dużej ilości doświadczeń empirycznych operatory te nie muszą odwzorowywać stanu w sygnały w sposób liniowy. Nieliniowości będą równoznaczne z istnieniem odpowiednich funkcji wagi, natomiast zależność od czasu stwarzałaby duże trudności w porównywaniu rezultatów różnych pomiarów i podważała zasadność wyznaczonych trendów. Ponieważ w strukturze alternatora i sposobie jego funkcjonowania nie zachodzą większe zmiany, nie zmieniają się również warunki pomiarów przyjęcie założenia o istnieniu stacjonarnych operatorów F_1 i F_2 nie jest sprzeczne z fizyką procesów zachodzących w alternatorach i znajduje obszerne potwierdzenie w praktyce.

Jak już wspomniano energia sygnałów użytecznych rozpatrywana w pasmach częstotliwości jest duża w porównaniu z zakłóceniami. Tym niemniej aby można było dokładnie odczytać zmiany sygnałów pochodzące od zmiany zużycia trzeba postulować niezmiennosc zakłóceń. Poprzednio przyjęto, że struktura alternatora i łożysk pozostaje niezmienna. Jeśli zatem uda się zorganizować w odpowiedni sposób pomiary, to te postulaty można będzie praktycznie zrealizować z przybliżeniem, które zapewni wiarygodność uzyskanych rezultatów. Chodzi o to żeby sposób pomiaru zapewniał minimalne i stałe czynniki losowe wpływające na badania tzn: realizował w praktyce: $\|\bar{D}\| \gg \|\bar{P}\|$ i $\|\bar{P}\| = \|\bar{P}_{m_{i,j}}\|$.

Wartości sygnału drganiowego i sygnału akustycznego zależą od czasu pomiaru T . W rezultacie pomiaru uzyskuje się bowiem wartości amplitud sygnałów w pewnych pasmach częstotliwości, reprezentujące wartości energii. Wartości tych amplitud są rezultatem informacji zebranych w czasie i uśrednionych. Z pomiaru otrzymujemy bowiem pewne oszacowanie wartości prawdziwej, która jest zależna od czasu. Będą więc mierzone sygnały diagnostyczne przy pomocy wartości skalarnych energii zależnych od czasu. Dla sygnału drganiowego będzie to: $y_1(t) = E_k(\omega, t)$, a dla sygnału akustycznego $y_2(t) = E_d(\omega, t)$, gdzie: $E_k(\omega, t)$ i $E_d(\omega, t)$ są odfiltrowanymi wartościami proporcjonalnymi do energii kinetycznej ruchu drgającego punktu pomiarowego i energii dźwięku w punkcie pomiarowym. Te sygnały przy pomocy niezależnych od czasu operatorów F_1 i F_2 będą odwzorowywać stan zużycia łożyska x niezależny od czasu (krótkiego) pomiaru. Jeżeli założymy, że badaniom będą towarzyszyć niezależne od czasu zakłócenia z_1 i z_2 to zadanie diagnostyczne można zapisać ostatecznie w postaci skalarnej przy pomocy zależności (85) dla sygnałów drganiowych:

$$(85) \quad E_k(\omega, t) = F_1(x + z_1),$$

i zależność (86) dla sygnałów akustycznych:

$$(86) \quad E_d(\omega, t) = F_2(x + z_2).$$

Odpowiada to zatem bezustannemu przekazywaniu komunikatu diagnostycznego, zgodnie z zapisem (81). Ponieważ zakłócenia mają niewielki udział w odwzorowaniach, zależności (85) i (86)

można zapisać dla różnych chwil ν_{oc} odpowiednio w postaci:

(87) i (88) :

$$(87) \quad E_k \nu_{oc}(\omega, t) \cong F_1 \cdot x \nu_{oc},$$

$$(88) \quad E_d \nu_{oc}(\omega, t) \cong F_2 \cdot x \nu_{oc}.$$

Indeksy ν_{oc} , gdzie: $oc = 1, 2, \dots, Z$ oznaczają, że pomiary sygnałów przeprowadzono dla kolejnych chwil $\nu_{oc} \in \Theta$

Trendy zmian sygnałów można wstępnie zapisać w sposób następujący:

1) dla sygnału drganiowego będzie to trend zmian energii kinetycznej:

$$(89) \quad (TE)_{d, m} = \frac{E_{k v_m}(\omega, t)}{E_{k v_1}(\omega, t)} \approx \frac{x v_m}{x v_1},$$

2) dla sygnału akustycznego będzie to trend zmian energii dźwięku:

$$(90) \quad (TE)_{a, m} = \frac{E_{a v_m}(\omega, t)}{E_{a v_1}(\omega, t)} \approx \frac{x v_m}{x v_1},$$

gdzie: $m = 1, 2, \dots, \mathcal{Z}$.

Trendy zmian sygnałów dadzą w rezultacie (a przynajmniej dać powinny) odwzorowanie trendów zmian (tzn: zwiększenia się) zużycia łożysk alternatora.

Tak sformułowane zadanie diagnostyczne odpowiada schematowi przedstawionemu na rys. 5.

8.7. Pomiary sygnałów

Ostateczną serię badań diagnostycznych alternatora przeprowadzono w sposób następujący.

Do badań wybrano cztery łożyska 6201zz i cztery 6302zz. Łożyska dobierano z serii, tak aby w danym typie były one zbliżone jakością tzn: wymiarami geometrycznymi i ich odchyłkami oraz poziomem drgań. W tym celu dokonano pomiarów metrologicznych oraz określono wartość skuteczną prędkości drgań łożysk niezabudowanych w jednostkach VL (velocity level) na stanowisku do pomiarów MS-730A. Tak wybrane łożyska wmontowano do czterech alternatorów, które również wytypowano jako podobne *).

*-) W ten sposób próbowano zapewnić praktycznie istnienie ergodyczności obiektów (łożysk i alternatorów) i zachodzących w nich procesów. Jest to bowiem podstawowy warunek, którego spełnienie pozwala porównywać między sobą rezultatów badań osiągniętych w różnych alternatorach, pracujących z różnymi łożyskami.

Wykonano trzy serie pomiarów drgań i hałasu do których użyto:

- 1) cztery nowe alternatory ,
- 2) trzy alternatory z poprzednich czterech, które przepracowały w samochodach FIAT 125p przebieg 20.000 km, co odpowiada ok. 400 godz.pracy ^{*}).
- 3) dwa z poprzednich trzech, które przepracowały przebieg równy 70.000 km, co odpowiada ok. 1400 godz.

Z dwóch alternatorów, które przeszły cały cykl badań, jeden nie był demontowany w ogóle. Zaraz po dokonaniu pomiarów sygnałów diagnostycznych, wracał do pracy w samochodzie. Drugi zaś, po każdej serii pomiarów był demontowany, poddawany przeglądowi, łożyska zaś poddawano badaniom nieniszczącym a mianowicie pomiarom drgań w stanie nie zabudowanym i pomiarom luzów. Pozwoliło to na porównanie rezultatów otrzymanych na podstawie badań sygnałów diagnostycznych z bezpośrednio obserwowanymi zmianami zachodzącymi w samym łożysku. Dodatkowo po każdej serii demontowano jeden alternator a łożyska przeznaczono do niszczących badań zmian powierzchniowych. Alternator ten eliminowano z dalszych badań . Taki program pozwolił praktycznie zrealizować badania trendów zużywania się łożysk i dodatkowo porównać je z rezultatami osiągniętymi metodami bezpośrednimi. Wartości: $v_1 = 0 \text{ h}$; $v_2 = 400 \text{ h}$; $v_3 = 1400 \text{ h}$, są właśnie zbiorem punktów na osi czasu długiego ($v_{1,2,3} \in \mathbb{Q}$) . Można udowodnić (opisano to w poz. [46]), że sygnał reprezentujący rzeczywisty proces fizyczny spełnia warunki Dirichleta i może być poddany analizie harmonicznej oraz, że miarą energii takiego sygnału jest kwadrat jego amplitudy (lub odchylenia sygnału od wartości zerowej) w dziedzinie czasu lub częstotliwości. Dlatego mierzono wartości skuteczne sygnału (RMS), w pasmach częstotliwości uzyskując przy tym wstępne uśrednienie sygnału po czasie pomiaru. Ponieważ przy pomiarze mamy do czynienia z ruchem oscylacyjnym ciał materialnych (element, mechanizm lub powietrze), można dokonywać badań amplitudy przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia tego ciała. Współczesne metody pomiarowe zapewniają łatwe przejście z pomiaru jednej z tych wielkości do innej.

*) Liczba godzin określona szacunkowo.

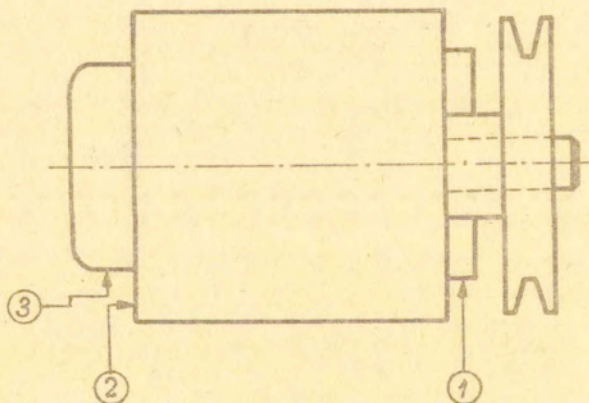
Jako poziom 0dniesienia dla wyznaczania mierzonych wartości sygnałów przyjęto:

dla drgań - położenie równowagi (stan spoczynku badanego elementu alternatora);

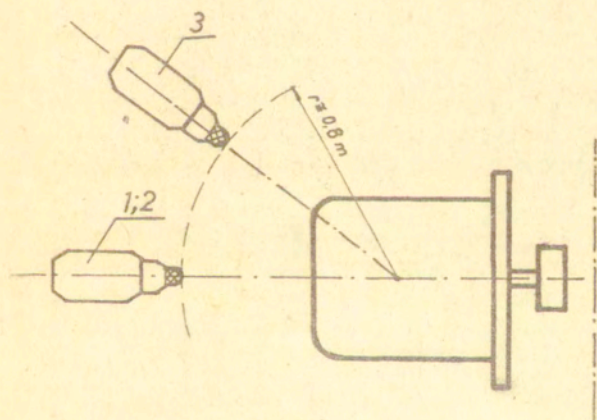
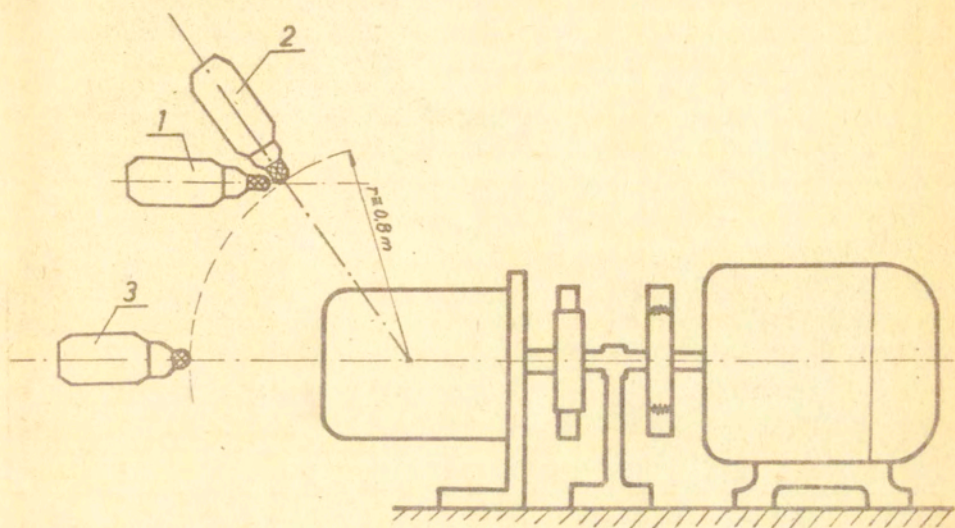
dla hałasu - poziom ciśnienia akustycznego równy: $20\mu\text{P}$. Biorąc pod uwagę uzyskane już doświadczenia, oba sygnały mierzono w dziedzinie częstotliwości stwarzając w ten sposób możliwość ^{selekcji} ich składowych, częstotliwościowych ze względu na zawartość informacji o stanie zużycia łożysk.

Wybór punktów pomiarowych musi być podporządkowany konieczności uzyskania tych informacji, przy równoczesnym zminimalizowaniu zakłóceń sygnału pochodzących od funkcjonowania innych źródeł drgań i hałasu.

Dla pomiaru drgań punkty pomiarowe wybrano możliwie blisko badanych łożysk. Czujniki pomiarowe umieszczono w punktach 1, 2 i 3 tak jak pokazano na rys. 19 przy czym kierunek strzałek wskazuje kierunki usytuowania osi głównych czujników (kierunki największej skuteczności).



Rys. 19. Punkty pomiarów drgań



Rys. 20. Punty pomiaru hałas.

Punkt 1 położony w okolicach łożyska większego 6302zz, zaś punkty 2 i 3 w okolicach 6201 zz.

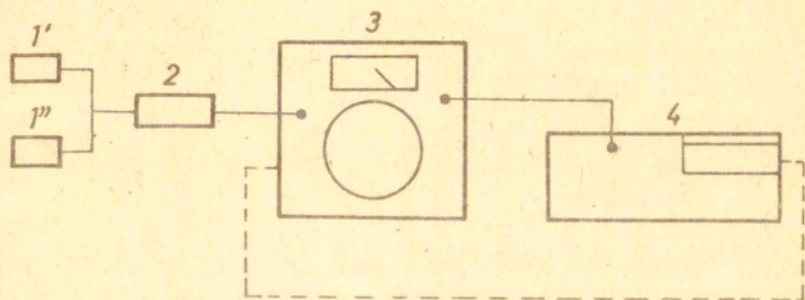
Do pomiaru hałasu punkty pomiarowe dla umieszczenia czujnika wybrano tak jak to przedstawiono na rys. 20. Przy wyborze kierowano się tym aby: (1) punkty pomiarowe znajdowały się w polu akustycznym, które w przybliżeniu spełnia podstawowe wymagania pola swobodnego; (2) były położone na tzw. półsferze pomiarowej oraz; (3) były możliwie najbardziej oddalone od innych źródeł hałasu.

Promień półsfery wynosi $r \cong 0,8$ m wymiary obiektu $\approx 0,2 \times 0,2 \times 0,2$ m. A zatem odległość punktu pomiarowego od ścianki obiektu $r' \cong 0,8 - 0,2/2 \cong 0,7$ m. Jeśli założyc, że najniższa częstotliwość składowej hałasu, która może zawierać informacje o zużyciu łożysk będzie równa 500 Hz tak jak to wynika z eksperymentu rozpoznawczego, to długość fali dla prędkości dźwięku $v = 330$ m/s gdzie:

$$\lambda = \frac{v}{\omega} = \frac{330}{500} \cong 0,66 \text{ m} .$$

A zatem dla przypuszczalnie najdłuższej fali spełniony jest wymagany dla pola swobodnego warunek.

W celu dokonania serii pomiarów alternatory po wymontowaniu z samochodu były lokowane na stanowisku badawczym. Schemat ideowy stanowiska jest identyczny jak przedstawiony na rys. 16, z tą różnicą, że zamiast wałka z łożyskami, umieszczony jest badany alternator {patrz również rys. 20}. Napęd od silnika elektrycznego umożliwiał uzyskanie prędkości obrotowej $n = 5800$ obr/min. Każdorazowo alternator obciążany był elektrycznie układem żarówek o mocy $10 \times 45 \text{ W} = 450 \text{ W}$, co powodowało przepływ generowanego prądu o natężeniu ~ 37 A. Całe stanowisko badawcze umieszczono w komorze akustycznej, której ściany i sufit wyłożono wełną mineralną, w dużym stopniu likwidującą pogłos i izolującą od hałasów z zewnątrz. Od tych ścian punkty pomiarowe były oddalone o ponad metr dla zmniejszenia zakłóceń sygnałów wynikających z niewytlumionych składowych pogłosu. Układ aparatury pomiarowej do badania zużycia został zestawiony zgodnie z zasadami przedstawionymi w punkcie 6.6. i na rys. 10a. Szczegółowy schemat układu przedstawiony na rys. 21.



Rys. 21. Zestaw aparatury do badań zużycia łożysk alternatora

1' - przetwornik BAK typ 4344

1'' - mikrofon pomiarowy BAK typ 4145

2 - przedwzmacniacz BAK typ 2623 lub BAK typ 2619

3 - analizator terejowy. typ 2113

4 - rejestrator poziomów 2305

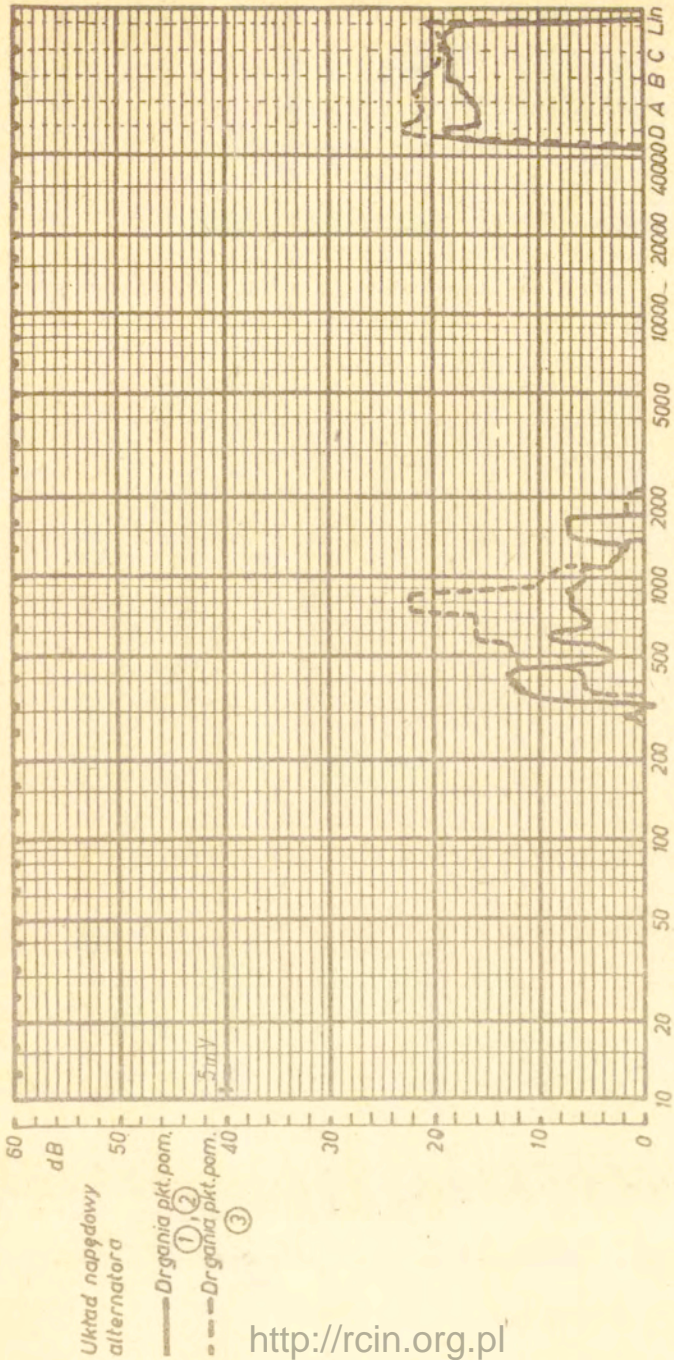
Do badań drgań zastosowano przetwornik piezoelektryczny B&K typu 4344 o skuteczności napięciowej 3 mV/1g (gdzie: $g = 10 \text{ ms}^{-2}$) i częstotliwości rezonansu własnego $\sim 60 \text{ kHz}$. Przetwornik ten, przykręcony przy pomocy wkrętu do elementów korpusu alternatora współpracując z przedwzmacniaczem B&K typ: 2623 zapewnia liniową charakterystykę przetwarzania

badanej wielkości mechanicznej na sygnał elektryczny w zakresie od 0,5 do 20.000 Hz ($\Delta = 10\%$). Do badania hałasu jako przetwornik zastosowano mikrofon pomiarowy, pojemnościowy, o średnicy 1", o czułości 50mV/Nm^{-2} . Wraz z przedwzmacniaczem B&K typu 2619 zapewnia charakterystykę liniową ($\pm 2\text{ dB}$) w zakresie częstotliwości od 2 do 20.000 Hz.

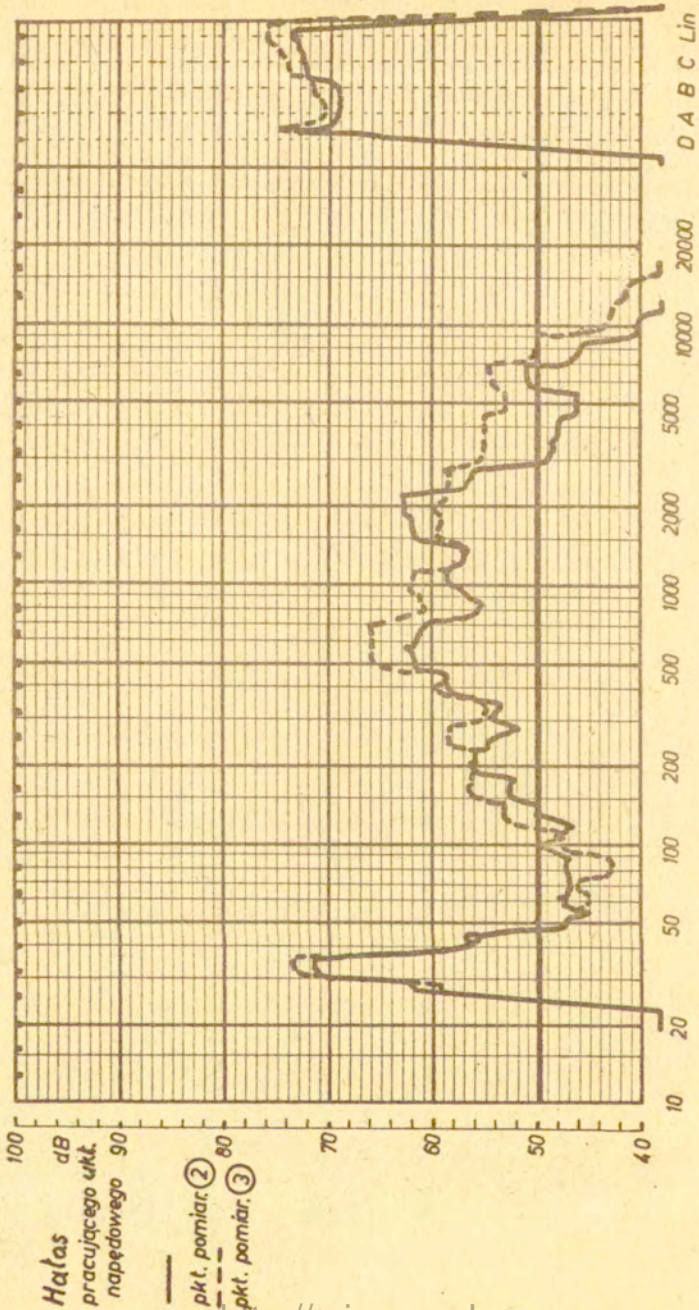
Dalsze elementy układu pomiarowego są identyczne dla pomiaru drgań i hałasu. Są to analizator częstotliwości B&K 2113, na którym dokonano analizy sygnału w tercjowych pasmach częstotliwości, oraz pisak poziomów B&K 2305, który zarejestrował rezultat tej analizy.

Organizacja, realizacja eksperymentu została przeprowadzona tak aby błędy pomiarów były możliwie najmniejsze. Zapewnione zostały: ustalone warunki pracy alternatora (poprzez wstępny rozruch przed dokonaniem pomiaru), właściwe mocowanie przetworników, prawidłowy dobór parametrów analizy i rejestracji sygnału, minimalizacja zakłócającego wpływu źródeł zewnętrznych (alternator i inne pracujące urządzenia mocowane na podkładach wibroizolacyjnych do specjalnej płyty fundamentowej całość zaś ulokowano w komorze akustycznej).

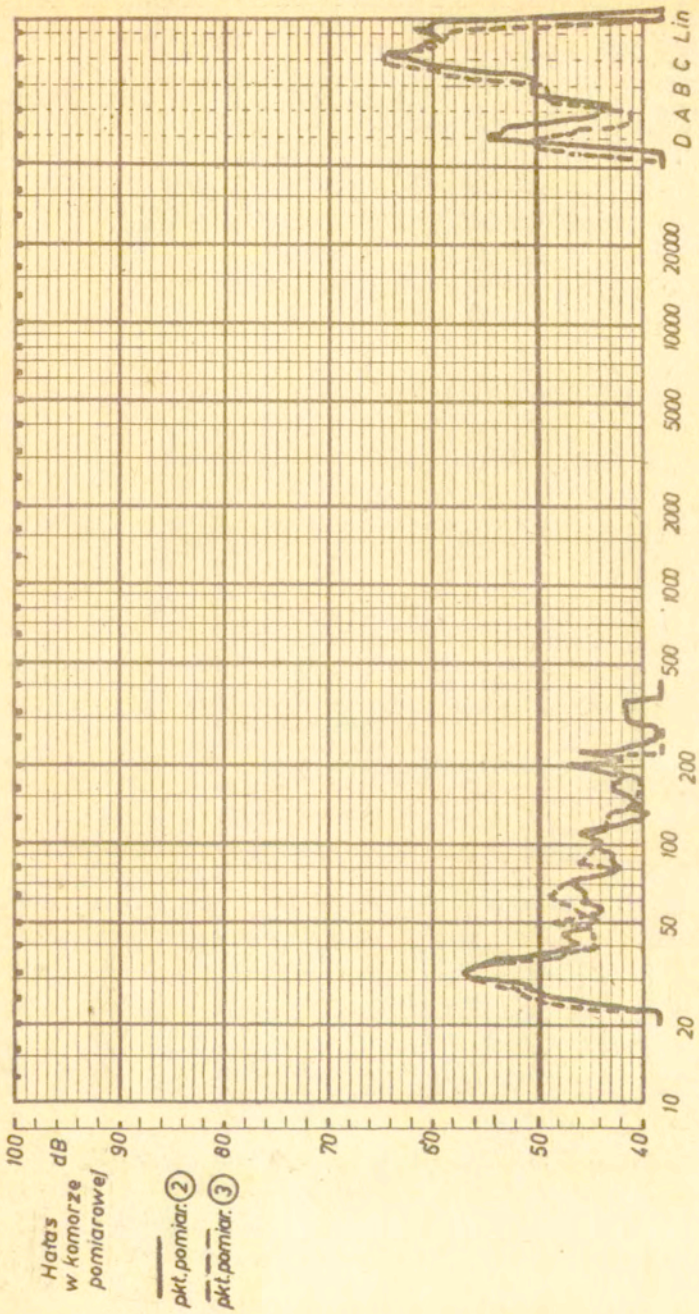
Przed przystąpieniem do badań alternatorów wykonano pomiar tzw: tła drgań i tła hałasu. Umożliwiło to skontrolowanie jaki udział w drganiach i hałasie rejestrowanych podczas pracy alternatora, mają drgania i hałas pochodzące ze źródeł znajdujących się poza badanym obiektem. Chodziło konkretnie o ustalenie jakie sygnały są generowane przez układ napędowy, oraz otoczenie badanego obiektu. W tym celu dokonano następującego eksperymentu. Na stanowisku badawczym ulokowano alternator. W punktach zaznaczonych na rys. 19 i 20 zainstalowano przetworniki drgań i hałasu. Następnie zdjęto pasek klinowy odłączając w ten sposób napęd alternatora. Uruchomiono stanowisko (silnik napędowy) i dokonano rejestracji analiz częstotliwościowych i sygnałów odebranych przez przetworniki. Na rys. 22 przedstawiono zapis analizy częstotliwościowej przyspieszeń drgań w punktach pomiarowych 1, 2 i 3 wg rys. 19. Na rys. 23 przedstawiono odpowiedni zapis analizy ciśnienia akustycznego dla punktów 2 i 3 wg rys. 20. Dodatkowo zbadano hałas w komorze pomiarowej



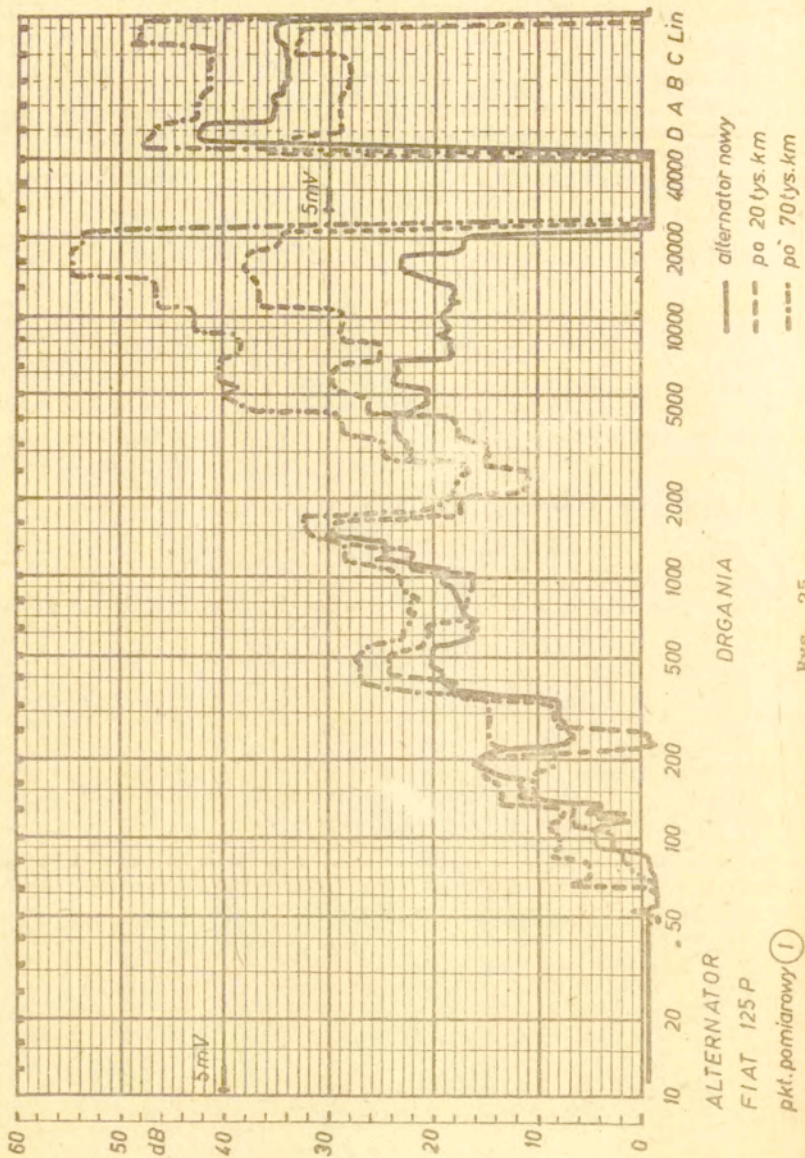
Rys. 22.



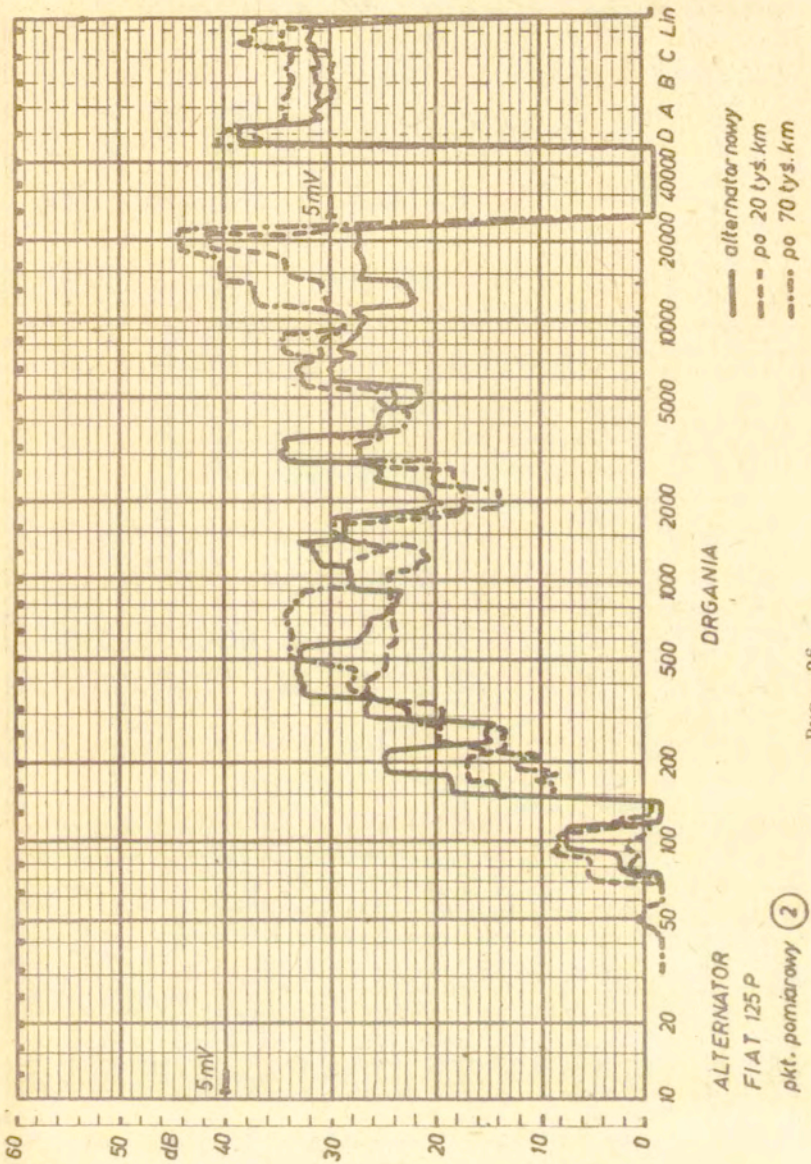
Rys. 23 .



Rys. 24 .



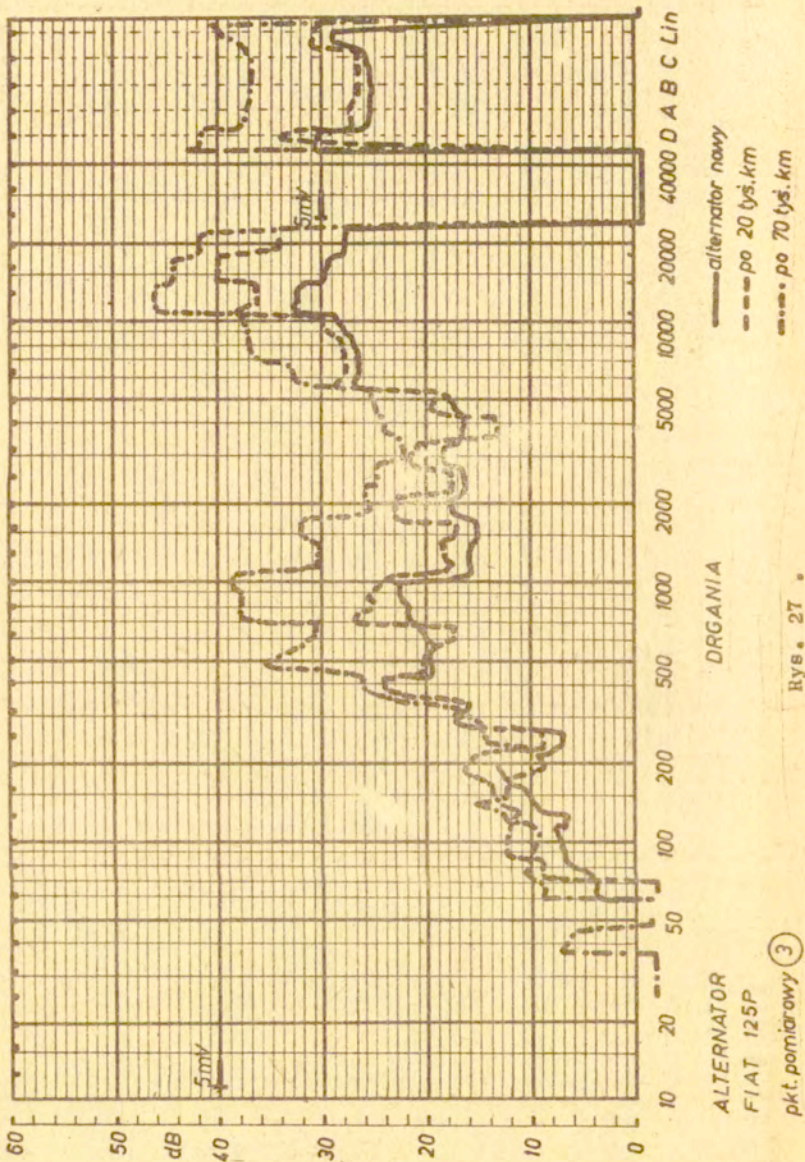
Hys. 25

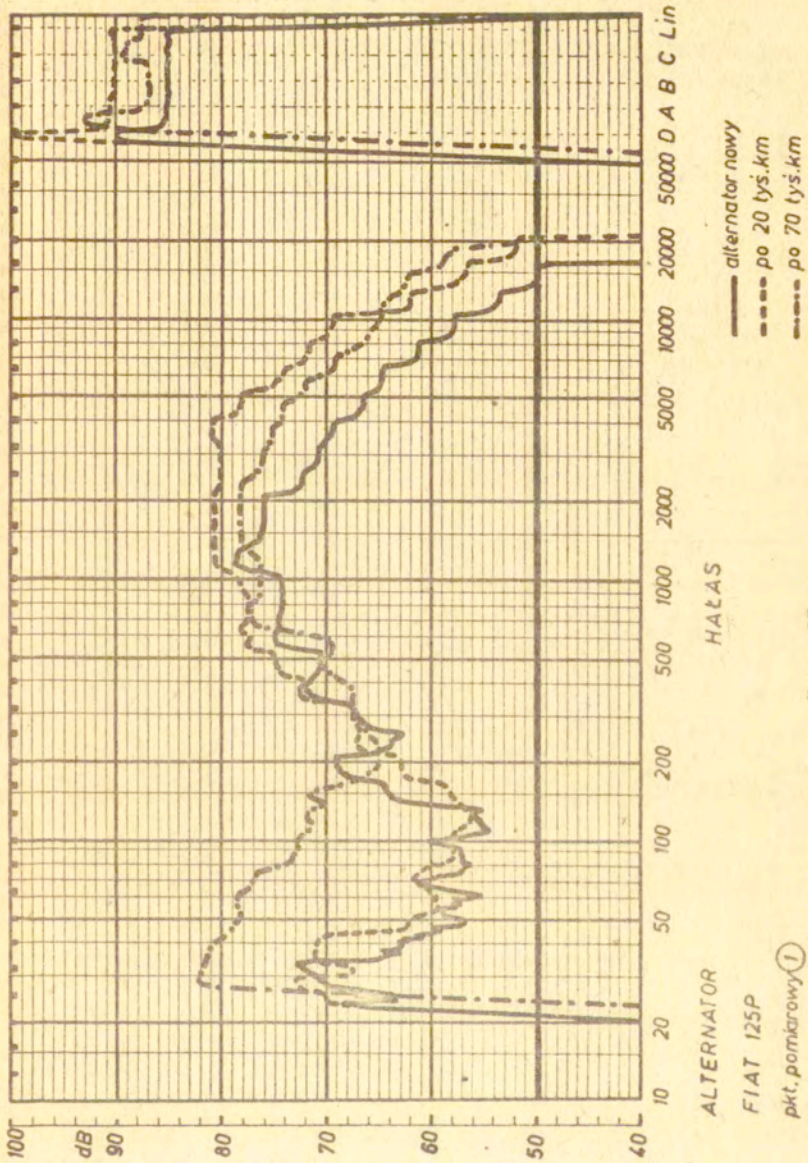


DRGANIA

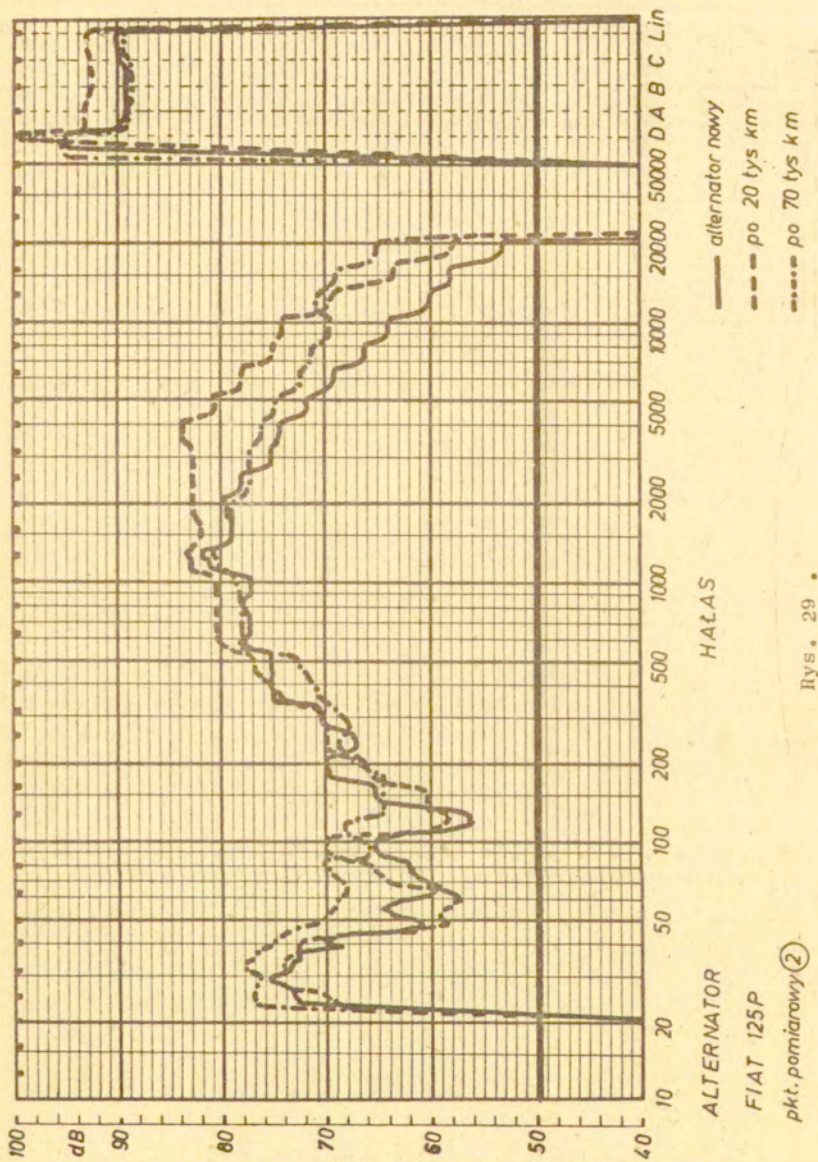
ALTERNATOR
FIAT 125 P
pkt. pomiarowy 2

Rys. 26.

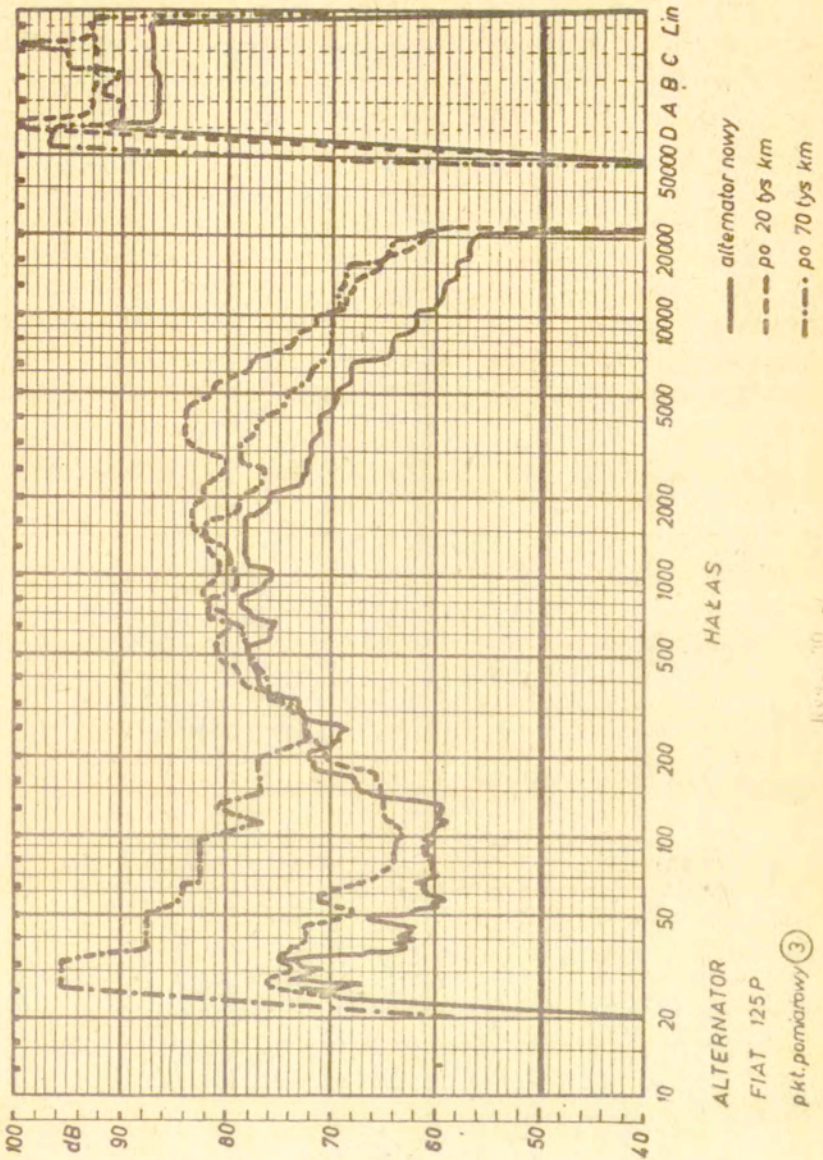




Rys. 28



Rys. 29 .



przy wyłączeniu wszystkich urządzeń. Rezultat pokazano na rys. 24. Na rys. 25, 26 i 27 przedstawiono zebrane razem rezultaty analizy drgań dla różnych czasów eksploatacji alternatora (v_1, v_2, v_3), mierzone odpowiednio w punktach pomiarowych 1, 2, 3. Na rys. 28, 29 i 30 przedstawiono rezultaty analizy częstotliwościowej hałasu mierzonego równocześnie z drganiami.

Zamieszczone przebiegi dotyczą jednego alternatora, tego który przeszedł cykl badań bez demontażu. Odpowiadające im rezultaty dla innych maszyn były bardzo zbliżone. Dlatego te, które przedstawiono na rys. 25, 26 i 27 oraz 28, 29 i 30 zostały uznane za reprezentatywne dla populacji badań i obiektów i one posłużą do dalszej analizy.

8.8. Opracowanie i przetwarzanie danych

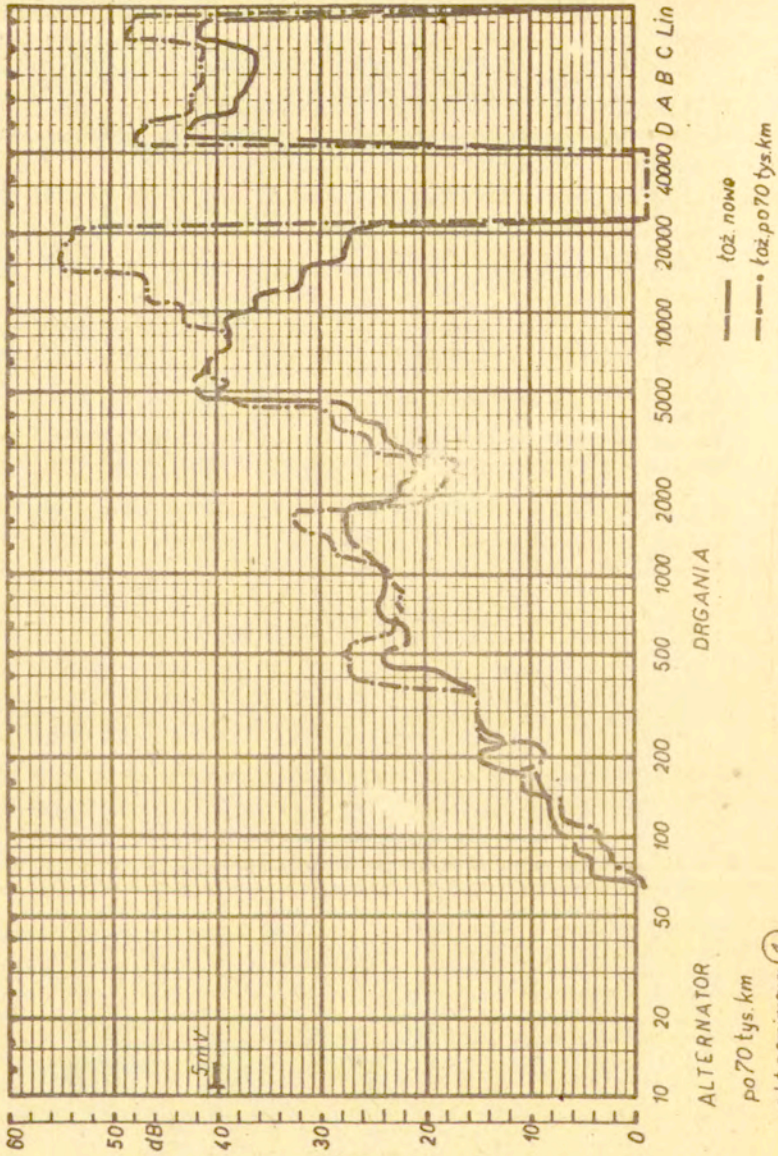
8.8.1. Identyfikacja użytecznych składowych widma

Przed przystąpieniem do opracowania uzyskanych rezultatów należy ustalić które składowe częstotliwościowe pomierzonych sygnałów odzwierciedlają zużycie łożysk. Z danych bibliograficznych [17, 29] z innych badań zużywania się łożysk w maszynach [65, 66, 67] wynika, że są to składowe dla częstotliwości powyżej 8 a często 10 KHz ^{*}). Analiza charakteru fizycznego i sposobu funkcjonowania źródeł generujących impulsy zderzeniowe

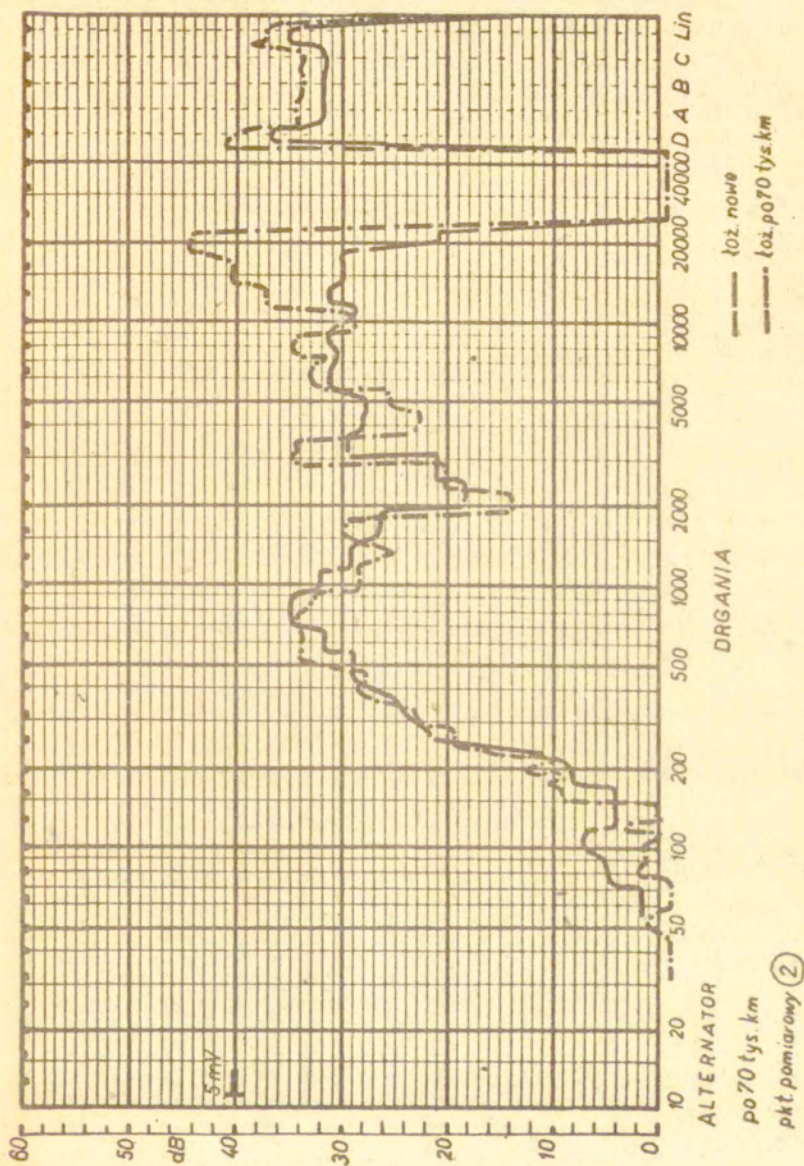
^{*}) Dane liczbowe uzyskane z eksperymentu rozpoznawczego opisanego w punkcie 8.6.2. nie mogą tu być miarodajne. Użyte tam łożyska były inne pokazały objawy bardzo zaawansowanego zużycia, które dyskwalifikowało ich przydatność eksploatacyjną w maszynach. Poza tym pracowały one w stanowisku badawczym a nie w rzeczywistej maszynie.

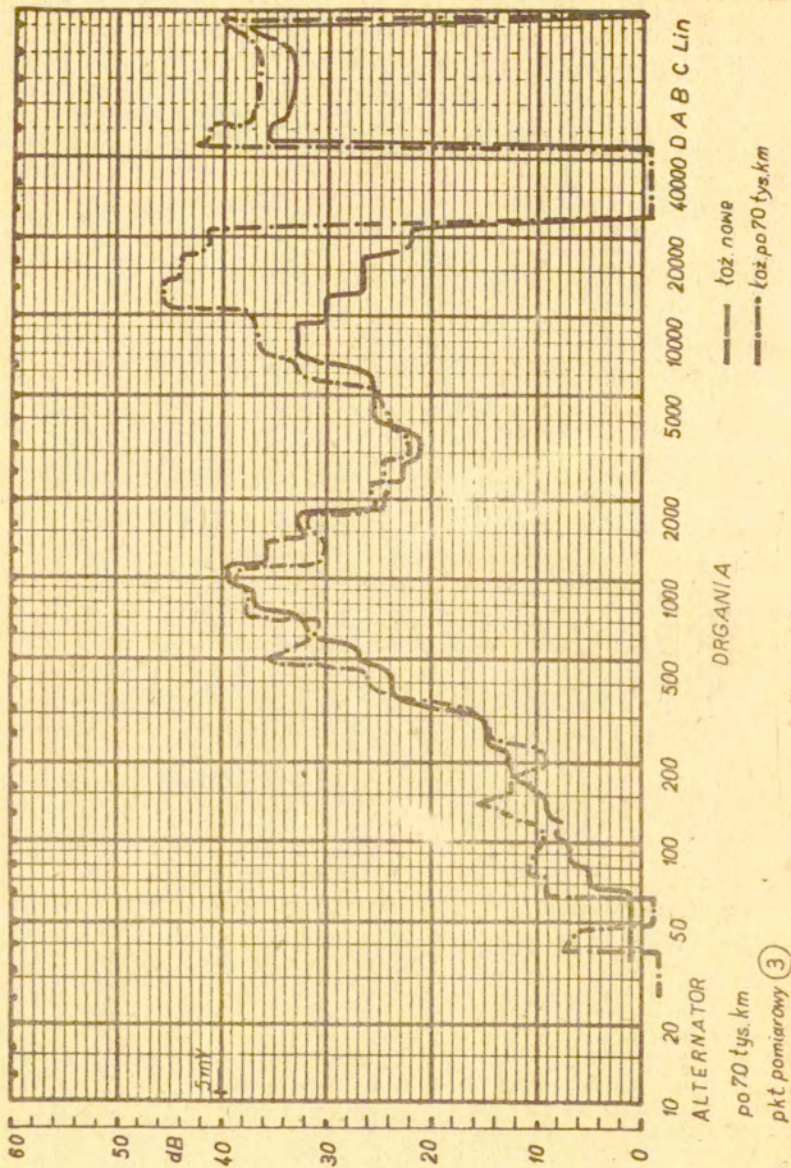
zdaje się potwierdzać *) te rezultaty. Dla ostatecznego rozstrzygnięcia tej sprawy dokonano jeszcze jednego eksperymentu. Otóż po zakończeniu ostatniej serii badań z alternatora wyjęto łożyska, które przepracowały 1400 h a następnie alternator złożono zakładając łożyska nowe o parametrach zbliżonych do tych, które miały łożyska przyjęte do badań w stanie nowości. Alternator ten został przebadany wg tego samego programu jaki obowiązywał w poprzednich badaniach. Na rys. 31, 32 i 33 mamy przedstawione rezultaty analizy częstotliwościowej drgań odpowiednio w punktach pomiarowych 1, 2 i 3 (wg rys. 19) zaś na rys. 34, 35 i 36 - analizy częstotliwościowej hałasu dla punktów pomiarowych 1, 2 i 3 (wg rys. 20). Zarówno dla drgań jak i hałasu w zakresie częstotliwości do 10 kHz różnice w zapisach widma nie przekraczają 5 dB. Natomiast wyraźne różnice sięgające 35 dB dla drgań i 15 dB dla hałasu, występują w paśmie od 10 kHz do 20 kHz. Ze względu na to do dalszego opracowania danych przyjęto, że sygnał niosący informacje o stanie zużycia łożysk znajduje się w ostatniej oktawie częstotliwości.

*) Dokonajmy prostego rachunku. Łożysko 6201zz posiada 7 kulek o średnicy 6 mm każda. Obwód kulki wynosi więc ~ 19 mm zaś obwód bieżni zewnętrznej ~ 88 mm. Uwzględniając poślizgi w ciągu jednego obrotu koszyka względem bieżni, kulka wykona ~ 4 obroty. Jeżeli na każdej kulce powstanie jeden wżer pittingowy (a takie dane otrzymano w przybliżeniu z oględzin zużywających się elementów łożyska) to w ciągu jednego obrotu koszyka ma szansę nastąpić $4 \cdot 7 = 28$ impulsów zderzeniowych wynikających z uderzenia krawędzi wżerów o bieżnię. Przy 5800 obr/min wirnika alternatora koszyk obraca się z prędkością ~ 2900 obr/min. W rezultacie 1354 impulsy na sek. Na całej bieżni zewnętrznej takich wżerów jak pokazano na fotografii (rys. 48) naliczono ok. 15. Spowoduje to, że zawierający 7 kulek koszyk, wirujący z prędkością 2900 obr/min, ma szansę spowodować dodatkowo ~ 8500 impulsów na sek. Mamy już zatem 9854 impulsy na sek. Do tego dochodzą zderzenia wynikające z powstających luzów które podwyższają tę liczbę. Rachunek ten aczkolwiek bardzo niedokładny, oparty jest na danych rzeczywistych, daje zatem pewien obraz generacji impulsów.

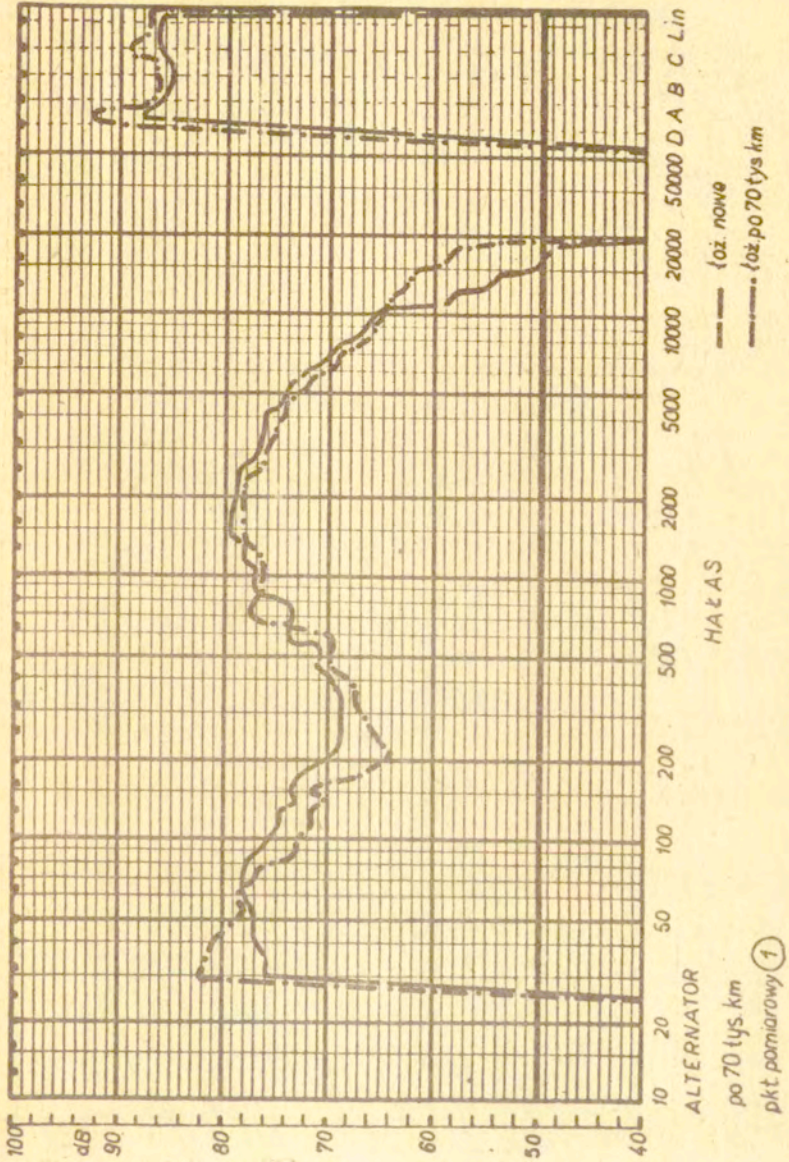


Rys. 31.

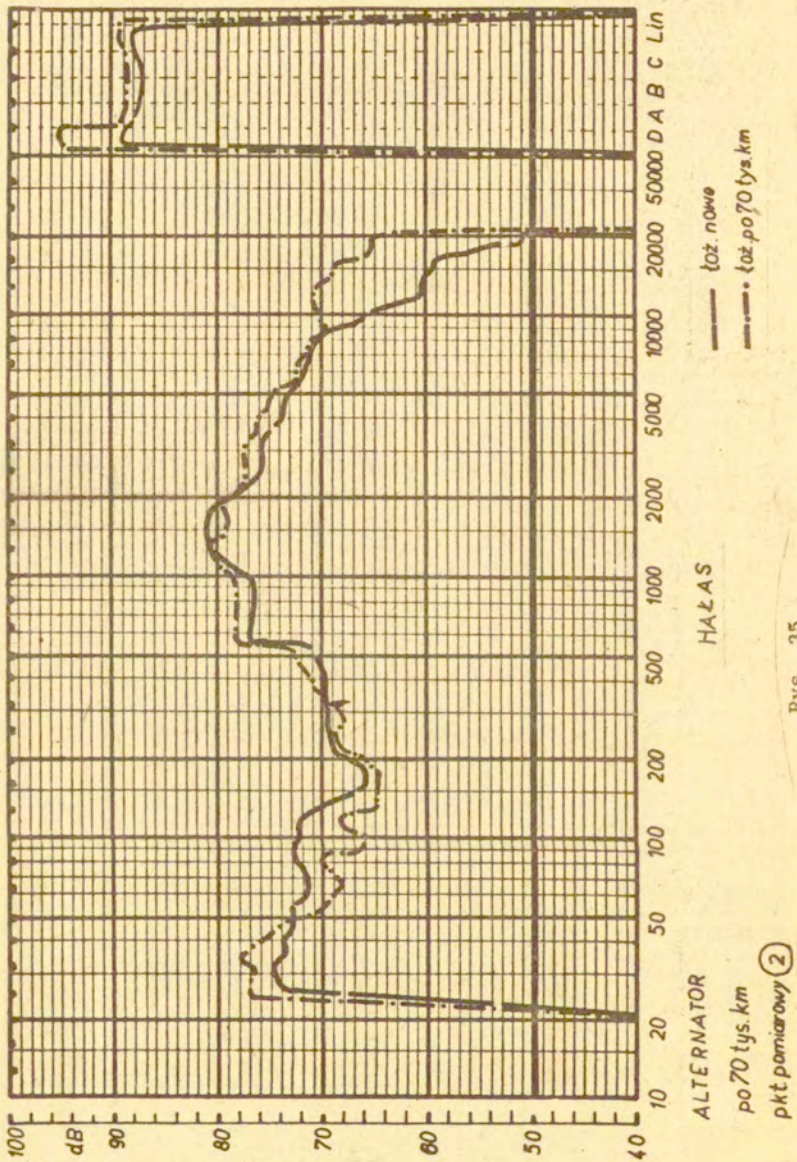




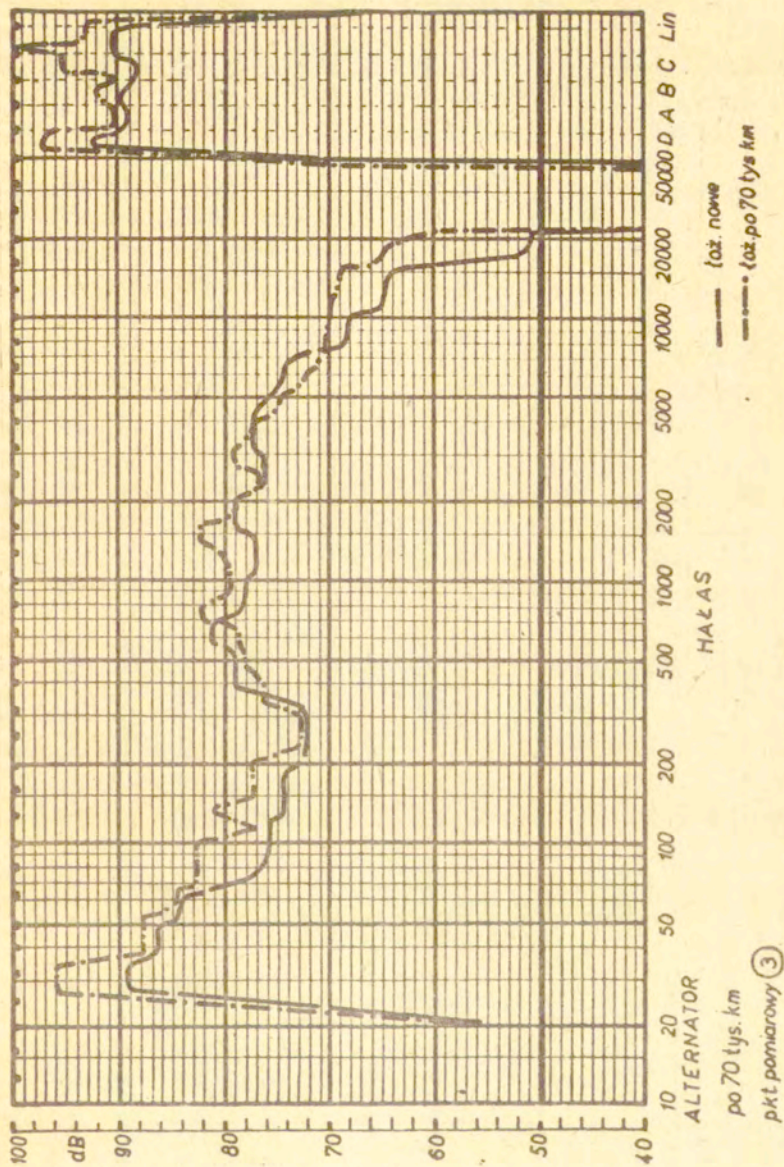
Rys. 33



Rys. 34.



Rys. 35 .



rys. 36

Dla analizatora B&K 2113 składają się na nią tercje następujące:

- 1/ o częstotliwości środkowej 12,5 kHz i paśmie przenoszenia od $\sim 11,2$ kHz do $\sim 14,1$ kHz ,
- 2/ o częstotliwości środkowej 16 kHz i paśmie przenoszenia od $\sim 14,1$ kHz do $\sim 17,8$ kHz ,
- 3/ o częstotliwości środkowej 20 kHz i paśmie przenoszenia od $\sim 17,8$ kHz do $\sim 22,3$ kHz.

Na podstawie powyższych danych, przyjęto składowe użyteczne sygnałów diagnostycznych $E_{k, \omega}(\omega, t)$ z zależności (87) oraz $E_{d, \omega}(\omega, t)$ z zależności (88), będą reprezentowane przez: (1) energię drgań, (2) energią hałasu, zmierzone w punktach pomiarowych 1, 2, 3 wg rys. 19 i 1, 2, 3 wg rys. 20, w zakresie częstotliwości od 11,2 kHz do 22,3 kHz.

W konsekwencji porównując przebiegi przedstawione na rys. 22 z przebiegami z rys. 25, 26 i 27 oraz te które przedstawiono na rys. 23 z rys. 28, 29 i 30 można oszacować wpływ zakłóceń na energię sygnału w wybranym paśmie częstotliwości. Okazuje się, że zakłócenia te są znacznie niższe w porównaniu do sygnału użytecznego. W przypadku drgań różnica ta wynosi od 20 do 55 dB a w przypadku hałasu jest ona nieco mniejsza i wynosi od 20 do 30 dB. Świadczy to, że wartość skuteczna zakłócenia przynajmniej dziesięciokrotnie niższa niż sygnału użytecznego. W eksperymentalnych badaniach maszyn i mechanizmów taki rezultat można uznać za zadawalający a przejście od zależności (85) i (86) do zależności (87) i (88) za uzasadnione.

8.8.2. Opracowanie rezultatów badań sygnałów drganiowych

Przyjęto poprzednio, że odzwierciedleniem stanu zużycia łożysk będzie, energia sygnału diagnostycznego w paśmie częstotliwości $\Delta\omega$ od 11,2 kHz do 22,3 kHz. Można założyć, że w czasie pomiaru obserwujemy drgania pewnej masy, na której ulokowano czujnik. Energia kinetyczna tej masy może być zapisana znaną zależnością:

$$E_k = \frac{m v^2}{2} = k_1 v^2,$$

gdzie: $k_1 = \frac{m}{2}$ - jest współczynnikiem proporcjonalności, zaś v - jest wartością skuteczną prędkości tej masy w ruchu drgającym. W praktyce prędkość ta jest mierzona *) dla pewnej częstotliwości $\omega \in \Delta\omega$ w $t \in T$. T - jest to czas obserwacji, zwany poprzednio "krótkim". Istota pomiaru opiera się na przetworzeniu tej prędkości dla pewnej częstotliwości i w pewnej chwili na odwzorowujący ją sygnał elektryczny co można zapisać w postaci zależności:

$$v(\omega, t) = k_2 \cdot c(\omega, t),$$

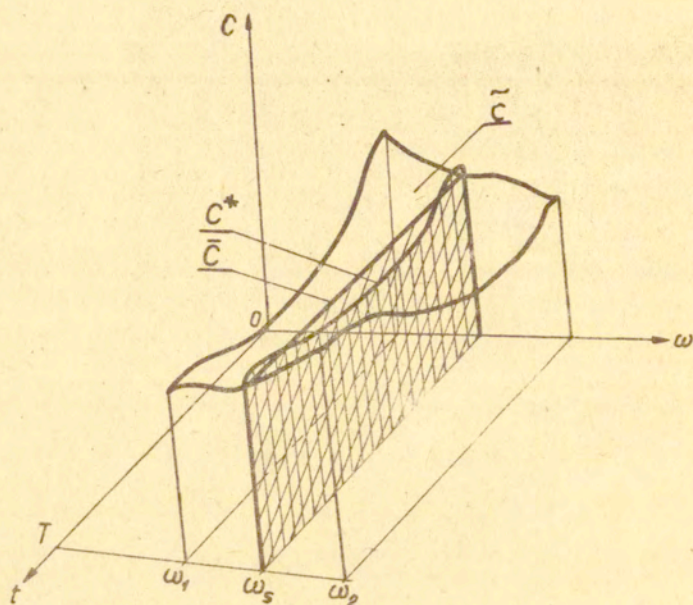
gdzie: $c(\omega, t)$ - wartość skuteczną sygnału elektrycznego (napięcia), na który jest przetworzona badana prędkość, k_2 - współczynnik proporcjonalności reprezentujący sposób odwzorowania (stały w liniowym zakresie charakterystyki układu pomiarowego). Podstawiając ten sygnał zamiast prędkości, energię kinetyczną dla pewnej chwili czasu i pewnej częstotliwości można zapisać jako zależność:

$$E_{k\omega,t} = k \cdot c^2(\omega, t),$$

gdzie: $k = k_1 \cdot k_2$ - współczynnik proporcjonalności.

Wartość $E_{k\omega,t}$ - jest wartością chwilową energii kinetycznej dla wybranej częstotliwości mierzonej w chwili $t \in T$; patrz zależność (12). W rzeczywistości analizator uśrednia sygnał w czasie pomiaru. Gdyby czas uśredniania był większy lub równy czasowi analizy w poszczególnej tercji to wartość $c(\omega, t)$ byłaby stała. Ale czas uśredniania wynosi ~ 1 sek. zaś czas analizy kilkadziesiąt sekund. W rezultacie pisak rejestruje

*) Faktycznie zmierzono wartość skuteczną przyspieszenia, ale w analizie harmonicznej między prędkością a przyspieszeniem istnieje prosta zależność, że: $v_i = p_i / \omega_i$, gdzie: v_i - prędkość w tym paśmie częstotliwości, p_i - przyspieszenie w tym paśmie zaś ω_i - częstotliwość środkowa tego pasma.

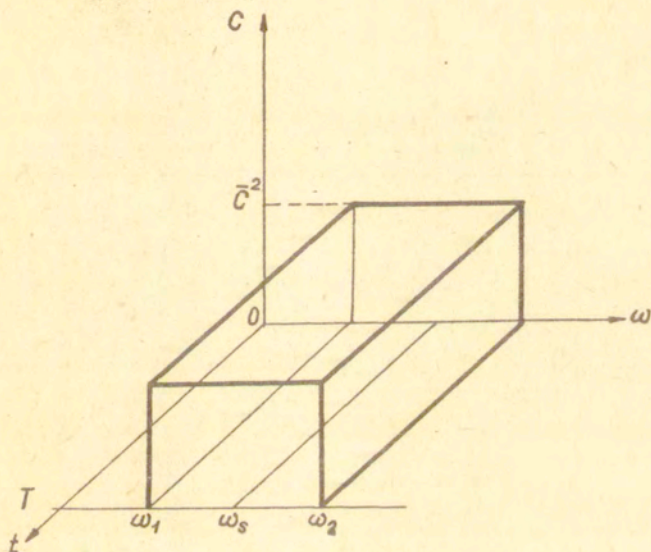


Rys. 37. Rozkłady wartości skutecznych mierzonych sygnałów.

sygnał wolnozmienny w czasie analizy. Sytuacja rzeczywista jest więc taka jak przedstawiono na rys. 37. Zbiór wszystkich wartości skutecznych sygnału w przedziałach $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ i T daje powierzchnię \tilde{c} . Całkowita energia kinetyczna, którą odwzorowuje ten sygnał, może być zapisana w następującej postaci:

$$E_k(\omega, t) = k \int_0^T \int_{\omega_1}^{\omega_2} c(\omega, t) d\omega dt.$$

Układ pomiarowy dokonuje całkowitego uśredniania sygnału po $\Delta\omega$ i częściowego, w zależności od czasu uśredniania, po T . W rezultacie to co uzyskujemy w postaci rejestracji widm bieżących ma w danej tercji postać płaszczyzny zakreskowanej pionowo ograniczonej od góry linią \bar{c}^* . Ryzykując wprowadzeniem niewielkiego błędu, można dokonać ręcznego uśredniania sygnału do postaci \bar{c} . W ten sposób można doprowadzić do sytuacji pokazanej na rys. 38. Wtedy energią kinetyczną zamiast w postaci całki podwójnej można przedstawić w postaci iloczynu:

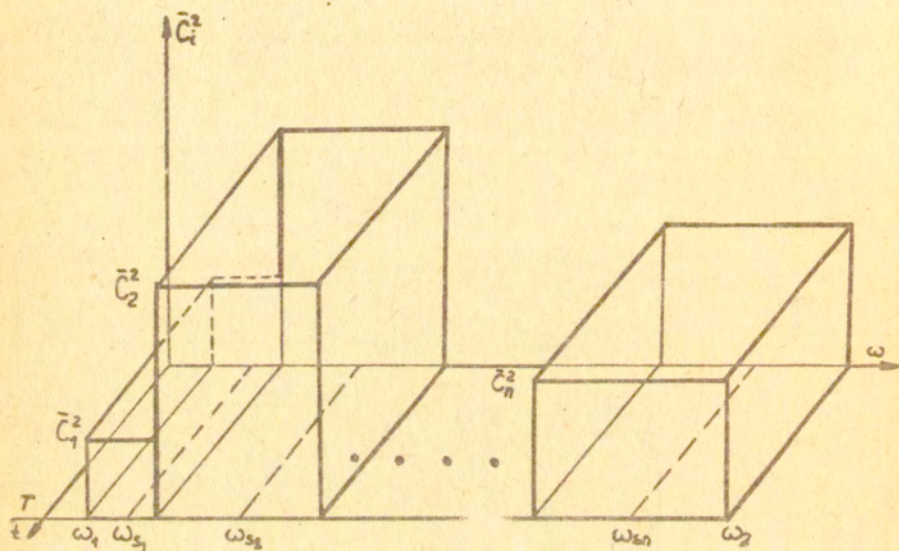


Rys. 38. Sygnał po uśrednieniu.

$$E_k(\omega, t) = k \bar{c}^2 \Delta\omega \cdot T.$$

W omawianym przypadku mamy do czynienia z analizą sygnału w kilku tercjach częstotliwości a zatem:

$$\Delta\omega = \sum_{i=1}^n \Delta\omega_i,$$



Rys. 39 , Uśredniony sygnał mierzony w n tercjach .

gdzie: i = numer tercji.

Ponieważ uśredniona wartość skuteczna sygnału w każdej tercji będzie inna, to zamiast sytuacji pokazanej na rys. 38, rozkład energii można przedstawić tak jak to zrobiono na rys. 39, zaś zapisać w postaci sumy iloczynów:

$$E_k(\omega, t) \cong \sum_{i=1}^n E_{ki}(\omega, t) = (\bar{c}_1^2 \Delta\omega_1 T_1 + \bar{c}_2^2 \Delta\omega_2 T_2 + \dots + \bar{c}_n^2 \Delta\omega_n T_n) \cdot k.$$

Pomiar zorganizowano tak, że $T_1 = T_2 = \dots = T_n = T$. Analityzator użyty do pomiaru był wyposażony w filtry o stałej procentowej szerokości pasma co oznaczało, że:

$$\Delta\omega_i = \omega_{si} \alpha,$$

gdzie: α - współczynnik szerokości pasma.

Teraz zależność powyższą można zapisać w postaci następującej:

$$E_k(\omega, t) \cong (\bar{c}_1^2 \omega_{s1} + \bar{c}_2^2 \omega_{s2} + \dots + \bar{c}_n^2 \omega_{sn}) \alpha \cdot T \cdot k.$$

W rzeczywistości mierzona i rejestrowana była wartość skuteczna sygnału elektrycznego $a(\omega, t)$ proporcjonalna do przyspieszenia drgań w punktach pomiarowych. Jeżeli sygnał elektryczny \bar{a}_i będzie tak samo przetworzony z $a(\omega, t)$ jak \bar{c}_i z $c(\omega, t)$, to między tymi sygnałami będzie istnieć identyczna relacja jak między prędkością a przyspieszeniem tzn:

$$\bar{c}_i \cong \frac{\bar{a}_i}{\omega_{si}}.$$

Podstawiając do zależności na energię mamy:

$$E_k(\omega, t) \cong \left(\frac{\bar{a}_1^2}{\omega_{s1}^2} + \frac{\bar{a}_2^2}{\omega_{s2}^2} + \dots + \frac{\bar{a}_n^2}{\omega_{sn}^2} \right) \alpha T k = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^2}{\omega_{si}^2} \right) \alpha T k.$$

Do dalszych rozważań wygodnie jest unormować tą energię do czasu pomiaru i szerokości pasma częstotliwości aby uniezależnić ją od tych wielkości. Mamy wtedy:

$$\frac{E_k(\omega, t)}{\Delta\omega \cdot T} \cong \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^2}{\omega_{si}^2} \right) \alpha \cdot T \cdot k}{\left(\sum_{i=1}^n \omega_{si} \right) \alpha \cdot T}$$

Otrzymana wielkość jako energia kinetyczna odniesiona do szerokości pasma częstotliwości i czasu pomiaru reprezentuje gęstość widmową mocy drgań alternatora w punktach pomiarowych. Można ją zapisać ostatecznie w postaci (85) :

$$(91) \quad N_d \approx \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i}{\omega_{si}}}{\sum_{i=1}^n \omega_{si}} \cdot k.$$

Nawiązując do rozważań przeprowadzonych w punkcie 8.6.3. a ściślej do zależności (87) i (89) można teraz wyznaczyć trend badanego sygnału. A więc poszukiwany trend sygnału diagnostycznego można określić jako stosunek (82) :

$$(92) \quad (TN)_{d\omega} \approx \frac{N_{\omega_{\infty}}}{N_{\omega_1}},$$

gdzie: $N_{\omega_{\infty}}$ - odpowiada gęstości mocy wyznaczonej dla różnych wartości ω_{∞} czasu "długiego" Θ . W omawianym przypadku mamy następujące wartości tych wielkości, które występują w zależnościach (91) i (92) ; $n=3$, $\omega_{s1}=12,5\text{kHz}$, $\omega_{s2}=16\text{kHz}$, $\omega_{s3}=20\text{kHz}$, $\sum_{i=1}^3 \omega_{si}=48,5\text{kHz}$, $\omega_{\infty}=3$, $\omega_1=0\text{h}$, $\omega_2 \approx 400\text{h}$, $\omega_3 \approx 1400\text{h}$.

Podstawiając te wartości do zależności (91) i (92) i zakładając że współczynnik proporcjonalności k nie zależy od $\omega_{\infty} \in \Theta$ otrzymujemy ostatecznie :

$$(93) \quad (TN)_{d\omega} = \frac{\left(\sum_{i=1}^3 \frac{\bar{a}_i^2}{\omega_{si}} \right) \omega_{\infty}}{\left(\sum_{i=1}^3 \frac{\bar{a}_i^2}{\omega_{si}} \right) \omega_1}$$

Trendy obliczone na podstawie zależności (92) i (93) będą się różnić od trendów z zależności (89), ale różnica ta ma znaczenie raczej formalne (wynika z odniesienia energii kinetycznej do przedziału czasu i częstotliwości) i nie zmienia uprzednio przyjętego ich sensu fizycznego. W Tabelicy 1. przedstawiono obliczenia trendów zmian energii sygnału drgań w punkcie pomiarowym 1, wg następującego programu. Dla poszczególnych tercji odczytano z rys. 25 uśrednione wartości skuteczne przyspieszenia \bar{a}_i w [dB]. Następnie znając poziom odniesienia można te wartości przeliczyć na wartości skuteczne sygnału elektrycznego

Tablica 1. Punkt pomiarowy 1.- Drgania
Skuteczność przetwornika 3 mV/g, 5 mV \leftrightarrow 40 dB

przyspieszenie	ω_{si} [kHz]			$\sum_{i=1}^3 \frac{\bar{a}_i^2}{\omega_{si}^2}$	$(TN)_{dB}$	$\lg(TN)_{dB}$
	12,5	16	20			
$\psi_1 = 0h$; alternator nowy						
\bar{a}_i [dB]	18,2	23,0	17,0			
\bar{a}_i [mV]	0,406	0,706	0,353			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	1,533	2,353	1,176			
\bar{a}_i^2	2,350	5,537	1,383			
$\bar{a}_i^2 / \omega_{si}^2$	0,188	0,346	0,069	0,603	1	0
$\psi_2 \approx 400 h$; alternator po przebiegu 20,000 km						
\bar{a}_i [dB]	36,5	38,0	34,7			
\bar{a}_i [mV]	3,342	3,971	2,716			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	11,14	13,24	9,05			
\bar{a}_i^2	124,1	175,3	81,90			
$\bar{a}_i^2 / \omega_{si}^2$	9,920	10,95	4,090	24,96	41,5	1,62
$\psi_3 \approx 1400 h$; alternator po przebiegu 70,000 km						
\bar{a}_i [dB]	46,5	55,0	54,0			
\bar{a}_i [mV]	10,94	28,11	25,06			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	36,46	93,70	83,53			
\bar{a}_i^2	1329	8780	6977			
$\bar{a}_i^2 / \omega_{si}^2$	106,3	548,7	348,9	1004	1699	3,22

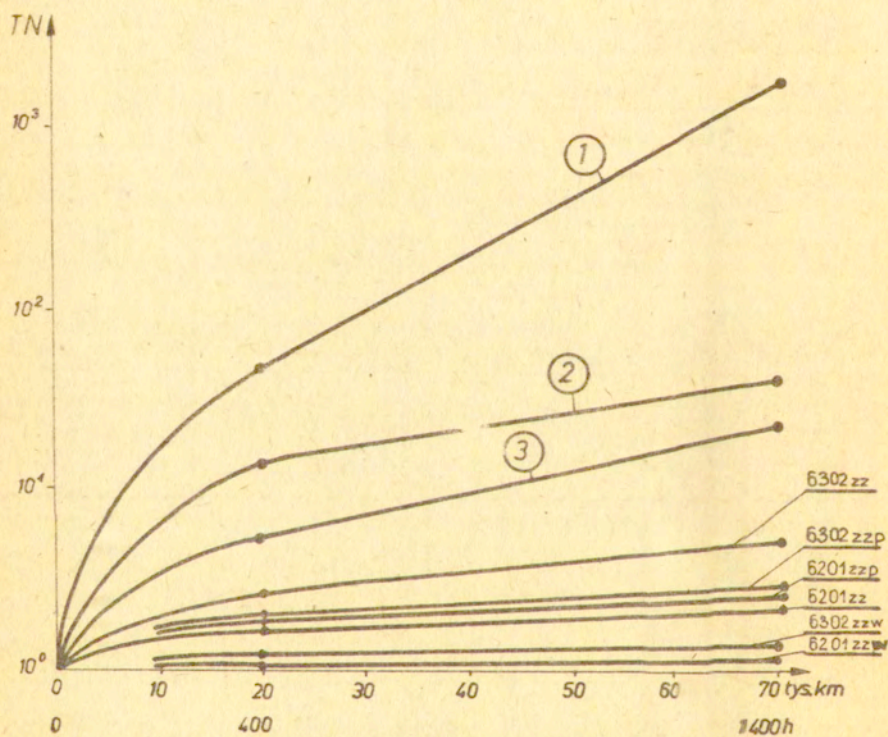
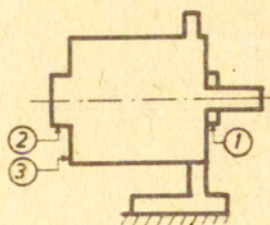
Tablica 2. Punkt pomiarowy 2 - drgania
 Skuteczność przetwornika 3 mV/g ; 5 mV ↔ 40 dB

przyśpieszenie	ω_{si} [kHz]			$\sum_{i=1}^3 \frac{\bar{a}_i^2}{\omega_{si}^2}$	(TN) _{dzw}	lg(TN) _{lim}
	12,5	16	20			
$\psi_1 = 0h$; alternator nowy						
\bar{a}_i [dB]	22,0	26,0	26,2			
\bar{a}_i [mV]	0,629	0,998	1,021			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	2,097	3,327	3,403			
\bar{a}_i^2	4,397	11,07	11,58			
$\bar{a}_i^2/\omega_{si}^2$	0,3528	0,6928	0,579	1,623	1	0
$\psi_2 \approx 400h$; alternator po przebiegu 20.000 km						
\bar{a}_i [dB]	30,4	34,0	41,0			
\bar{a}_i [mV]	1,656	2,506	5,610			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	5,520	8,353	18,70			
\bar{a}_i^2	30,47	69,73	349,7			
$\bar{a}_i^2/\omega_{si}^2$	2,438	4,361	17,48	24,28	14,96	1,18
$\psi_3 \approx 1400h$; alternator po przebiegu 70.000 km						
\bar{a}_i [dB]	37,0	40,2	44,2			
\bar{a}_i [mV]	3,538	5,023	8,110			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	11,79	16,74	27,03			
\bar{a}_i^2	139,1	280,4	730,8			
$\bar{a}_i^2/\omega_{si}^2$	11,13	17,52	36,54	65,19	40,17	1,60

Tablica 3. Punkt pomiarowy 3. - drgania.

Skuteczność przetwornika 3 mV/g; 5 mV ↔ 40 dB

przyspieszenia	ω_{si} [kHz]			$\sum_{i=1}^3 \frac{\bar{a}_i^2}{\omega_{si}}$	$(TN)_{d2k}$	$(\log TN)_{d2k}$
	12,5	16	20			
$\psi_1 = 0h$; alternator nowy;						
\bar{a}_i [dB]	32,6	29,6	27,8			
\bar{a}_i [mV]	2,133	1,510	1,227			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	7,110	5,034	4,090			
\bar{a}_i^2	50,52	25,34	16,73			
$\bar{a}_i^2 / \omega_{si}$	4,044	1,584	0,8364	6,464	1	0
$\psi_2 \approx 400h$; alternator po przebiegu 20,000 km						
\bar{a}_i [dB]	37,2	40,0	34,7			
\bar{a}_i [mV]	3,623	5,000	2,716			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	12,08	16,87	9,053			
\bar{a}_i^2	145,8	277,8	81,96			
$\bar{a}_i^2 / \omega_{si}$	11,668	17,362	4,098	32,13	5,12	0,71
$\psi_3 \approx 1400h$; alternator po przebiegu 70,000 km						
\bar{a}_i [dB]	46,0	44,2	41,6			
\bar{a}_i [mV]	9,975	8,110	6,010			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	33,25	27,03	20,03			
\bar{a}_i^2	1105	730,8	401,3			
$\bar{a}_i^2 / \omega_{si}$	88,44	45,67	20,07	154,2	23,85	1,35



Rys. 40. Trendy zmian wielkości charakteryzujących zużycie łożysk

a dalej znając skuteczność przetwornika, na przyspieszenie w $[ms^{-2}]$. Wartości te po podniesieniu do kwadratu podzielono odpowiednio przez wartości częstotliwości środkowych analizowanych tercji. Następnie zgodnie z zależnością (93) obliczano sumy i dalej trend zmian energii drgań. W celu łatwiejszego przedstawienia trendów w postaci graficznej wyrażono je w formie logarytmu o podstawie 10. Tak samo opracowano tablice 2 i 3 dla punktów pomiarowych 2 i 3. Na rys. 40 trendy te przedstawiono oznaczając numerami 1, 2 i 3, odpowiednio do oznaczeń punktów pomiarowych.

8.8.3. Opracowanie rezultatów badań sygnałów akustycznych

Sposób rozumowania i założenia ogólne są tu identyczne jak przy opracowywaniu sygnałów drganiowych. Przetwornik mikrofonowy przetwarza na sygnał elektryczny, ciśnienie akustyczne występujące w punktach pomiarowych. Energia dźwięku w pewnej chwili wyraża się następującą zależnością:

$$E_d = \frac{p^2}{\rho c^2} = K_1 p^2,$$

gdzie: p - wartość skuteczna ciśnienia akustycznego,
 ρ - gęstość ośrodka (powietrza), c - prędkość rozchodzenia się dźwięku w ośrodku, $K_1 = 1/\rho c^2$ - współczynnik proporcjonalności. Po przetworzeniu ciśnienia na sygnał elektryczny mamy następującą zależność, dla chwilowej wartości ciśnienia zmieniającego się z częstotliwością ω :

$$p(\omega, t) = K_2 c(\omega, t),$$

gdzie: $\omega \in \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$, $t \in T$, który jest czasem pomiaru, zaś K_2 - jest współczynnikiem proporcjonalności odwzorowania, stałym w liniowym zakresie charakterystyki układu pomiarowego. Całkowita energia dźwięku wytworzonego w czasie T w zakresie częstotliwości $\Delta\omega$ będzie:

$$E_d(\omega, t) = K \int_0^T \int_{\omega_1}^{\omega_2} c^2(\omega, t) d\omega dt,$$

gdzie: $K = K_1 \cdot K_2^2$ - współczynnik proporcjonalności.

Uśredniając sygnał elektryczny tak samo jak pokazano na rys. 3 otrzymujemy energię:

$$E_d(\omega, t) \cong K \bar{c}^2 \Delta \omega T.$$

Identycznie jak w przypadku drgań, pomiar hałasu był dokonywany w tercjowych pasmach częstotliwości o stałej szerokości procentowej. Stąd:

$$\Delta \omega = \sum_{i=1}^n \Delta \omega_i = \alpha \sum_{i=1}^n \omega_{si},$$

gdzie: i - numer tercji

Podstawiając tą zależność do wzoru na energię otrzymujemy:

$$E_d(\omega, t) = K \alpha T \sum_{i=1}^n \bar{c}_i^2 \omega_{si}.$$

Energia unormowana do przedziału częstotliwości i czasu pomiaru będzie reprezentować gęstość widmową mocy sygnału akustycznego:

$$(94) \quad N_a = \frac{E_d(\omega, t)}{\Delta \omega \cdot T} = \frac{K \alpha T \sum_{i=1}^n \bar{c}_i^2 \omega_{si}}{\alpha T \sum_{i=1}^n \omega_{si}}.$$

Poszukiwany trend energii sygnału akustycznego wynikający z zależności (88) i (89) można wyrazić jako stosunek (przy $n=3$):

$$(95) \quad (TN)_{\alpha \kappa} = \frac{(\sum_{i=1}^3 \bar{c}_i^2 \omega_{si})_{\psi_2}}{(\sum_{i=1}^3 \bar{c}_i^2 \omega_{si})_{\psi_1}}.$$

Obliczenia przeprowadzono podobnie jak dla drgań, dla: $\omega_{s1}=12,5$, $\omega_{s2}=16$, $\omega_{s3}=20$; $\psi_1=0$, $\psi_2=400$, $\psi_3=1400$. Rezultaty obliczeń przedstawiono w Tablicach 4, 5 i 6 odpowiednio a punktów pomiarowych 1, 2 i 3, zaś wykresy trendów pokazano na rys. 41.

8.9. Diagnoza i wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań i uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że zastosowana metoda postępowania diagnostycznego wykazała istnienie trendów zmian energii kinetycznej ruchu drgającego punktów pomiarowych oraz energii dźwięku dla funkcjonujących alternatorów. Ponieważ obie te wielkości badano w pasmach częstotliwości odpowiadających częstotliwościom generacji fal sprężystych przez funkcjonujące łożyska,

Tablica 4. Punkt pomiarowy 1. - hałas.

40 dB ↔ 2 mPa

ciśnienia	$\omega_{\delta i}$ [kHz]			$\sum_{i=1}^3 \bar{c}_i^2 \omega_{\delta i} (TN)_{ax}$	$\lg(TN)_{ax}$	
	12,5	16	20			
$\psi_1 = 0h$ alternator nowy						
\bar{c}_i [dB]	53,2	50,0	50,0			
\bar{c}_i [mPa]	9,142	6,324	6,324			
\bar{c}_i^2	83,58	39,99	39,99			
$\bar{c}_i^2 \omega_{\delta i}$	1045	639,8	799,8	2484	1	0
$\psi_2 = 400 h$; alternator po przebiegu 20.000 km						
\bar{c}_i [dB]	62,0	56,6	51,5			
\bar{c}_i [mPa]	25,18	13,37	7,516			
\bar{c}_i^2	634,0	178,6	56,49			
$\bar{c}_i^2 \omega_{\delta i}$	7925	2858	1130	11914	4,80	0,68
$\psi_3 = 1400 h$; alternator po przebiegu 70.000 km						
\bar{c}_i [dB]	64,0	62,0	58,0			
\bar{c}_i [mPa]	31,70	25,18	15,87			
\bar{c}_i^2	1005	634,0	252,4			
$\bar{c}_i^2 \omega_{\delta i}$	12561	10145	5047	27753	11,17	1,05

Tablica 5. Punkt pomiarowy 2 - hałas

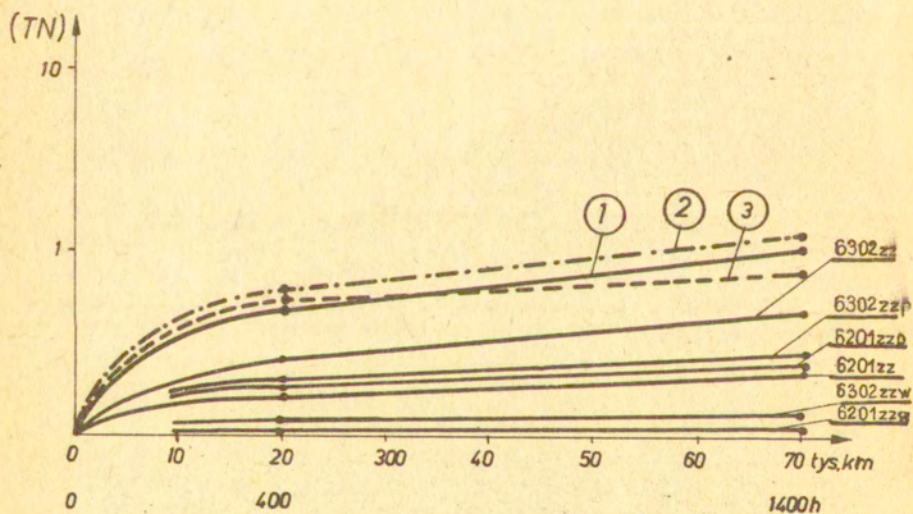
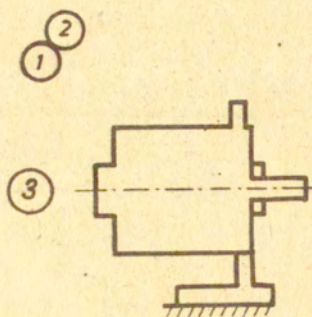
40 dB ↔ 2 mPa

ciśnienia	$\omega_{\delta i}$ [kHz]			$\sum_{i=1}^3 \bar{c}_i^2 \omega_{\delta i}$	$(TN)_{ane}$	$lg(TN)_{ane}$
	12,5	16,	20			
$\psi_1 = 0h$; alternator nowy						
\bar{c}_i [dB]	59,5	58,0	53,0			
\bar{c}_i [mPa]	18,88	15,53	8,538			
\bar{c}_i^2	356,5	240,9	72,79			
$\bar{c}_i^2 \omega_{\delta i}$	4457	3856	1455	9768	1	0
$\psi_2 = 400 h$; alternator po przebiegu 20.000 km						
\bar{c}_i [dB]	69,5	63,5	57,5			
\bar{c}_i [mPa]	59,70	29,92	15,00			
\bar{c}_i^2	3564	895,2	225,0			
$\bar{c}_i^2 \omega_{\delta i}$	44550	14323	4500	63373	6,49	0,81
$\psi_3 = 1400 h$; alternator po przebiegu 70.000 km						
\bar{c}_i [dB]	70,5	68,5	65,0			
\bar{c}_i [mPa]	67,00	53,22	35,56			
\bar{c}_i^2	4489	2832	1264			
$\bar{c}_i^2 \omega_{\delta i}$	56112	45318	25290	126720	12,97	1,11

Tablica .6. Punkt pomiarowy 3. - hałas

40 dB \longleftrightarrow 2 m Pa

ciśnienia	ω_{si} [kHz]			$\sum_{i=1}^3 \bar{c}_i^2 \omega_{si}$ (TN) _{axc}	$\lg(TN)$ _{axc}	
	12,5	16	20			
$\psi_1 = 0h$; alternator nowy						
\bar{c}_i [dB]	59,5	58,0	57,0			
\bar{c}_i [mPa]	18,88	15,89	15,16			
\bar{c}_i^2	356,5	252,4	200,5			
$\bar{c}_i^2 \omega_{si}$	4457	4038	4009	12504	1	0
$\psi_2 = 400 h$; alternator po przebiegu 20,000 km						
\bar{c}_i [dB]	68,5	65,0	61,5			
\bar{c}_i [mPa]	53,22	35,56	23,78			
\bar{c}_i^2	2832	1265	565,5			
$\bar{c}_i^2 \omega_{si}$	35405	20240	11310	66955	5,35	0,73
$\psi_3 = 1400 h$; alternator po przebiegu 70,000 km						
\bar{c}_i [dB]	69,8	68,0	64,5			
\bar{c}_i [mPa]	61,80	49,10	33,58			
\bar{c}_i^2	3819	2411	1128			
$\bar{c}_i^2 \omega_{si}$	47737	38576	22560	108873	8,71	0,93



Rys. 41. Trendy wielkości charakteryzujących zużycie łożysk.

można wnioskować, że w łożyskach zachodzą powolne nieodwracalne zmiany charakterystyczne dla zużywania się współpracujących elementów w procesie eksploatacji. Nawiązując do zależności (84) można powiedzieć tak: jeśli zmieniają się sygnały, zmieniają się także łożyska, jeśli znana jest ta zależność i znane są procesy zachodzące w eksploatowanych alternatorach (znajomość ta musi być poparta dużym doświadczeniem eksploatacyjnym), to można stwierdzić, że w łożyskach zachodzą powolne nieodwracalne zmiany zużyciowe.

Z przeprowadzonych badań wynikają również dodatkowe wnioski natury praktycznej. Z rys. 40 i 41 widać, że sygnały drganiowe "rozróżniają" łożyska pracujące w alternatorze, w zależności od punktu pomiarowego (punkt pomiarowy 1 jest położony blisko łożyska 6302zz zaś 2 i 3 blisko 6201zz), natomiast sygnały akustyczne nie "potrafią" odzwierciedlić tej różnicy. Trendy zmian energii sygnałów akustycznych są bardzo do siebie zbliżone co może świadczyć o wymieszaniu się sygnałów generowanych przez łożyska. Istnienie trendów potwierdza założoną genezę zmian sygnałów diagnostycznych. W związku z tym można wnioskować, że diagnoza jest potwierdzeniem postawionej a priori hipotezy.

Można prognozować, że zmiany energii będą w dalszym ciągu wykazywać trendy rosnące. Charakter ich powinien być podobny do znanych wykresów zużywania się par kinematycznych *) w procesie eksploatacji maszyn. Otrzymane z badań przebiegi trendów wydają się potwierdzać takie podobieństwo. Bardzo ważną rzeczą jest znajomość wartości trendu odpowiadającej

*) Wykresy takie, przedstawiają trzy fazy procesu eksploatacji: docieranie (charakteryzuje się szybkim wzrostem luzów), zużycie normalne (powolny wzrost luzów), zużycie szybkie (wykazuje duży wzrost luzów prowadzących do katastrofy).

poziomowi awaryjnemu, przy którym trzeba przerwać eksploatację i dokonać wymiany łożyska aby uniknąć katastrofy. Ale tę informacją można uzyskać tylko przez aplikację metody w praktyce i zbieranie doświadczeń eksploatacyjnych. Można przewidywać, że ten proces uczenia się będzie połączony z pomyłkami, które czasami doprowadzą do awarii niektórych alternatorów. Tego nie da się uniknąć z dwóch względów. Po pierwsze proces uczenia się nigdy nie zapewnia osiągnięcia całkowitej, absolutnej wiedzy, a po drugie zawsze będą istnieć czynniki przypadkowe (np. wady materiałowe, ukryte braki produkcyjne itp), które czasami będą prowadzić do awarii, mimo posiadania dobrze zmierzonego trendu i dobrze znanego poziomu awaryjnego. Korzyścią wynikającą z zastosowania metody może być jednak bardzo znaczne zmniejszenie ilości nieprzewidzianych awarii *).

9. Badania porównawcze łożysk tocznych

9.1. Realizacja celu badań łożysk pracujących w alternatorach

Podsumowując opis ogólnej metody poszukiwania diagnozy powiedziano, że osiągnięty rezultat powinien być porównany z zamierzeniami i że jest on z reguły przybliżeniem założonego celu osiągniętym jako kompromis pomiędzy potrzebami i możliwościami. Opisana w rozdziale 8, metoda badania stanu zużycia łożysk bez demontażu alternatorów znajduje się na etapie tworzenia i doskonalenia. Istnienie operatora odwzorowującego stan zużycia łożysk w sygnały drganiowe i hałasowe, oraz wnioskowanie o trendach zużycia na podstawie trendów tych sygnałów przyjęte zostało w dużej mierze jako hipoteza na podstawie analizy procesów zachodzących w alternatorze oraz badań rozpoznawczych.

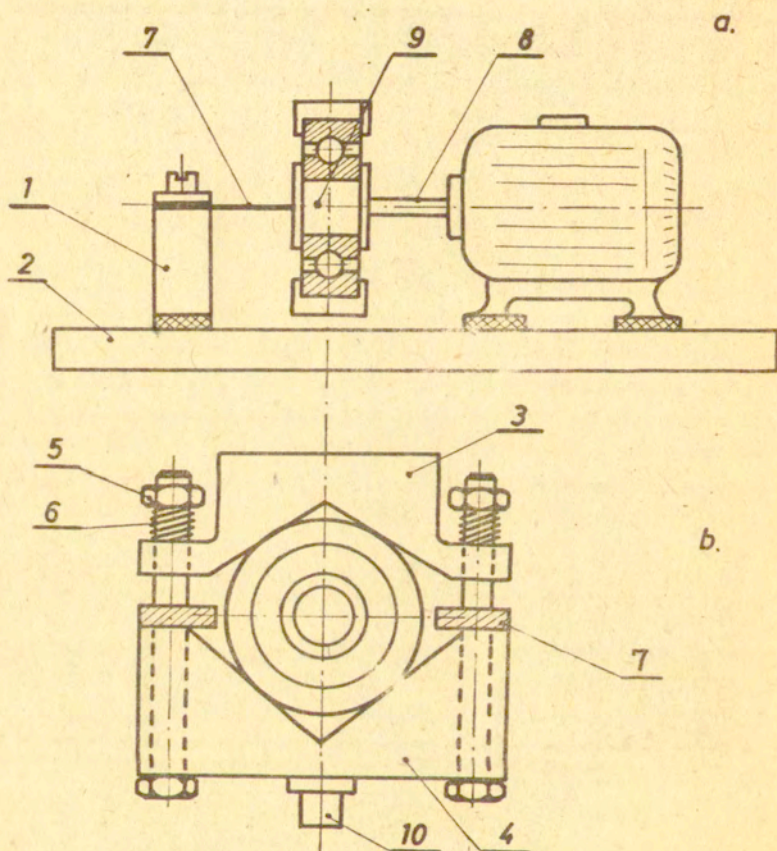
*) Na podstawie tu prezentowanych i wielu innych badań w których sygnał przetwarzano metodami cyfrowymi (chodziło o uzyskanie wielu estymat sygnału, nie tylko widma) zbudowano przyrząd, który mierzy trend i wykazuje przekroczenie wstępnie przyjętego poziomu awaryjnego. Badane rezultaty i przyrząd opisano w poz. [66] bibliografii.

Aplikacja metody w praktyce eksploatacji i alternatorów oraz gromadzenie informacji zebranych tą drogą, które były celem badań, wymagają ciągłego sprawdzania, potwierdzania i uściślenia przyjętych założeń tak aby osiągane przy pomocy tej metody rezultaty były coraz lepszym przybliżeniem rzeczywistości. W tych warunkach jedyną możliwością oceny stopnia realizacji założonego celu jest zbadanie w sposób bezpośredni zużycia się łożysk i porównanie z rezultatami uzyskanymi z badań bez demontażu.

Wykorzystując fakt, że diagnozy zużycia się łożysk w alternatorach dokonywano w laboratorium przeprowadzono równocześnie szereg badań porównawczych, które miały na celu dostarczenie informacji o tym jak zmienia się stan zużycia łożysk wraz ze wzrostem długości czasu eksploatacji alternatorów. Mając przesłanki do przyjęcia hipotezy o istnieniu odwzorowania zużycia łożysk przez sygnały drganiowe i hałasowe, oraz wyznaczwszy trendy zmian energii tych sygnałów, chodziło o sprawdzenie czy zużycie łożysk postępuje i czy jego trend jest podobny do tych trendów. Takie informacje można uzyskać badając bezpośrednio wspomniany stan zużycia łożysk, bądź pośrednio ale dla łożysk niezabudowanych w alternatorach. W tym celu po zakończeniu każdej serii badań z jednego, za każdym razem tego samego alternatora wymontowywano łożyska i dokonywano badań nieniszczących drgań i luzów. Następnie łożyska montowano w tymże alternatorze i kierowano go do dalszej eksploatacji. W tym samym celu również po każdej serii badań jeden alternator rozmontowywano i dokonywano niszczących badań łożysk. Alternator wycofywano z dalszych badań. Badania porównawcze wykonywano po każdym okresie eksploatacji tzn: dla $v_1 = 0$, $v_2 = 400$ h i $v_3 = 1400$ h.

Wykonano następujące badania porównawcze:

1. Badanie drgań na stanowisku badawczym;
2. Pomiar luzów ;
3. Mikroskopowe badanie powierzchni pracujących elementów łożysk.



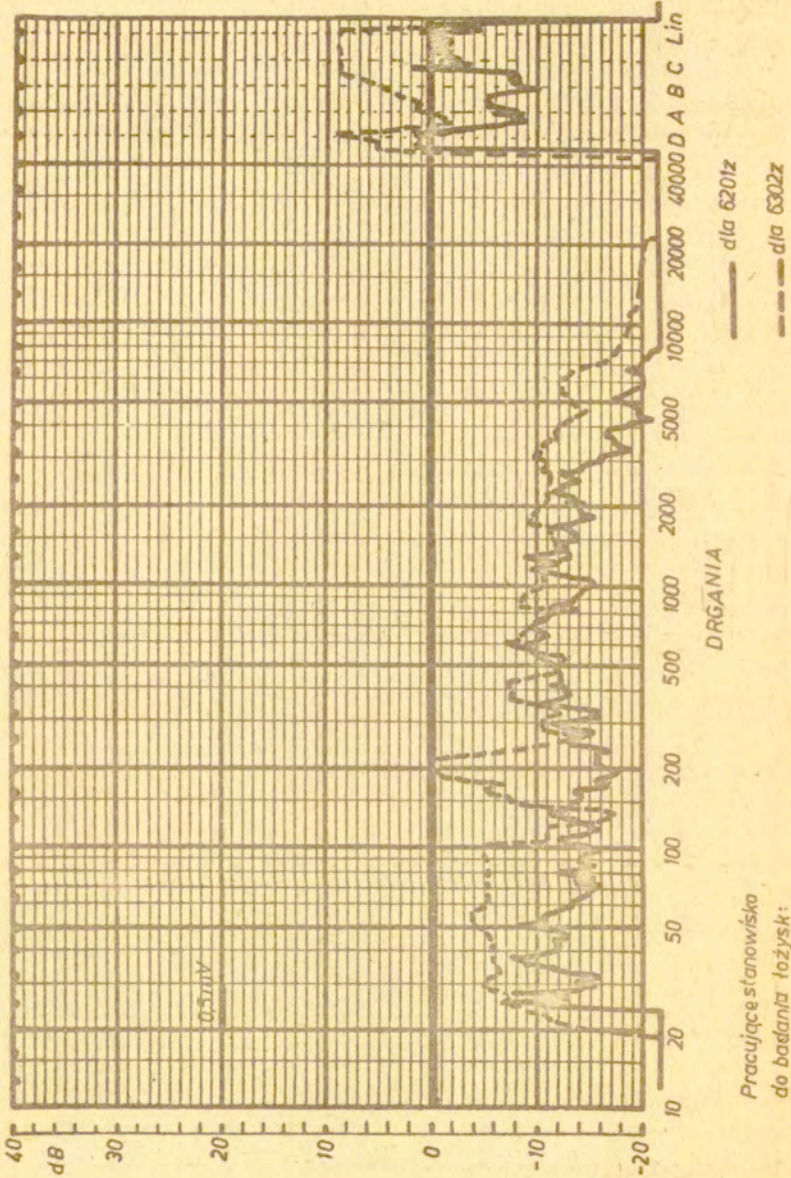
Rys. 42. Stanowiisko do badania łożysk.

9.2. Badania drgań na stanowisku badawczym

W tych badaniach mierzono sygnał drganiowy określony identycznie jak w badaniach alternatorów w tych samych pasmach częstotliwości. W celu wyznaczenia energii drgań łożysk niezabudowanych skonstruowano i wykonano proste stanowisko badawcze pokazane na rys. 42. Na wsporniku (1) przymocowanym poprzez podkładki wibroizolacyjne do podstawy (2) umieszczono uchwyt, w którym lokuje się badane łożysko. Uchwyt składa się z dwóch szczęk (3) i (4) dociskanych śrubami (5) poprzez sprężyny (6). Zapewnia to prawie stałą siłę docisku (a zatem i deformację) łożysk o podobnych średnicach bieżni zewnętrznej. Uchwyt wraz z badanym łożyskiem jest mocowany do wspornika przy pomocy dwóch sprężyn płaskich (7). Wymiary i sprężystości sprężyn dobrano tak aby rezonans własny takiego układu występował przy częstotliwości (zależnie od masy ułożonego łożyska) około stu herców, oraz żeby ugięcie statyczne było niewielkie:

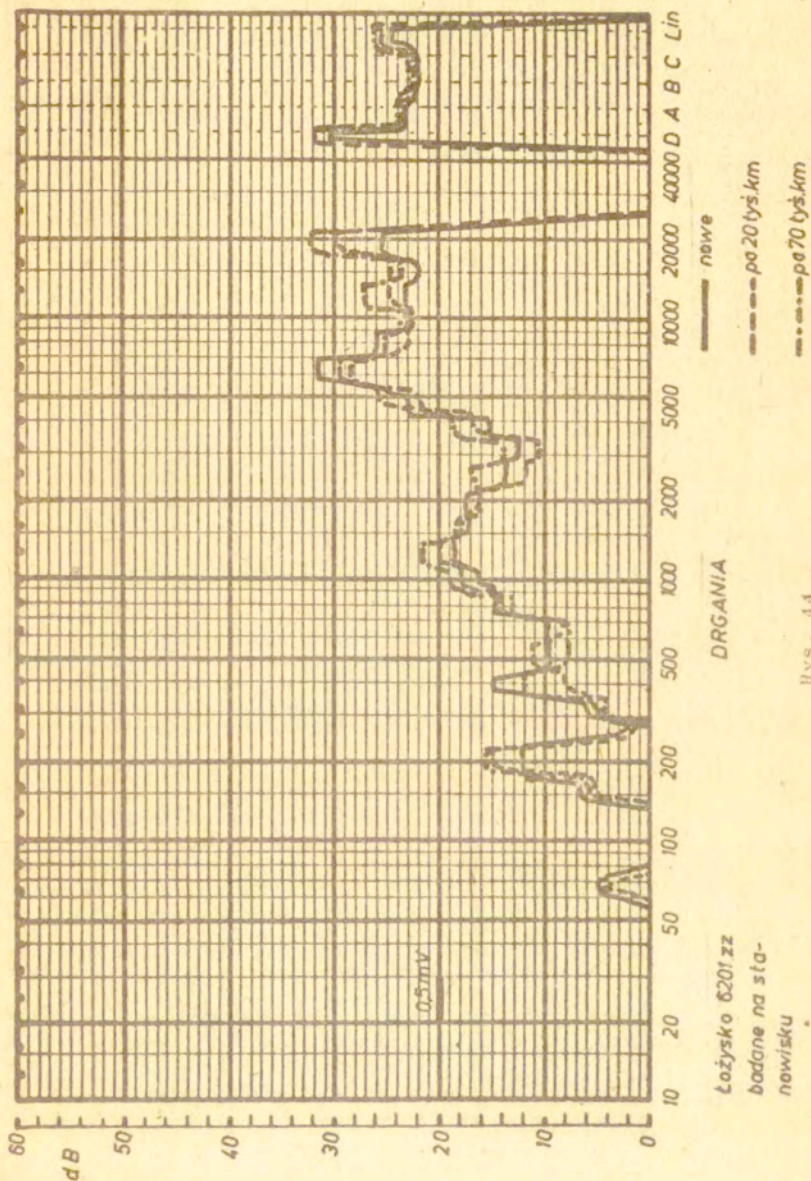
ok. 0,1 mm. Łożysko napędzane od silnika elektrycznego posadowionego na podstawie również na podkładkach wibroizolacyjnych. Napęd był przekazywany przy pomocy gętkiego wałka (8) na wewnętrzną bieżnię łożyska. Sprzęgnięcie wałka z bieżnią dokonywano przy pomocy elementu (9) zapewniający zacisk czołowych powierzchni bieżni łożyska. Konstrukcja przewidywała przylgowe pasowanie bieżni wewnętrznej badanego łożyska z cylindryczną częścią tego elementu. Silnik napędzał łożysko z prędkością obrotową 5800 obr/min. Do wykonania pomiarów drgań wirującego łożyska, użyto identycznego układu pomiarowego jak w badaniach alternatorów. Przetwornik (10) B&K typ: 4344 przymocowano przy pomocy wkrętu do dolnej części uchwyty.

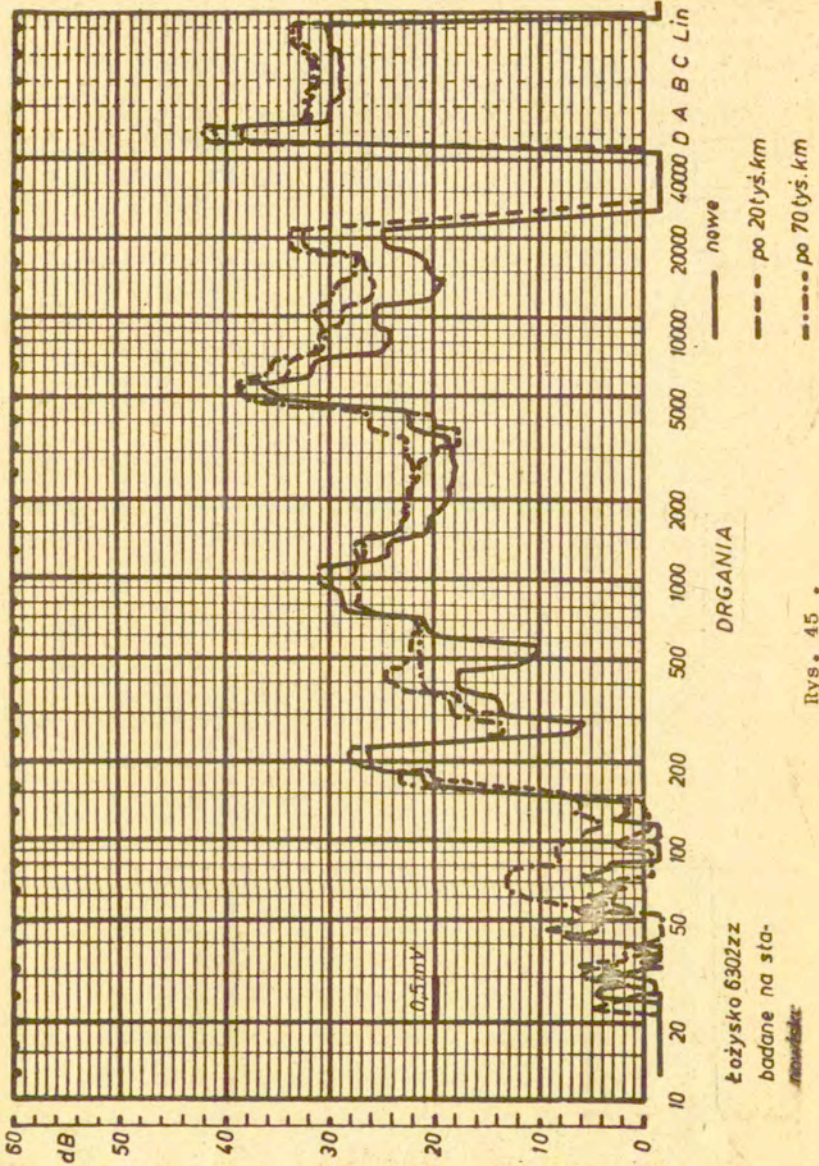
Przed przystąpieniem do właściwych badań łożysk dokonano pomiaru "tła" drgań w tym celu odłączono napęd łożyska i uruchomiono silnik. Na rys. 43 pokazano uzyskany na rejestratorze, zapis analizy przyspieszenia drgań uchwyty przy niepracującym łożysku. Na rys. 44 i 45 pokazano zapisy analizy wartości skutecznych przyspieszeń łożysk 620izz i 6302zz wtedy, kiedy łożyska te są napędzane. W celu porównania na rysunkach nanie-



Pracujące stanowisko
do badania łożysk:
bez napędu łożyska

Rys. 43.





siono po trzy przebiegi odpowiadające trzem stanom zużycia łożysk. Uzyskane widma wykazują, że poziom zakłóceń [tła] w pasmach częstotliwości od 11,2 do 22,3 kHz jest 50 dB niższy od poziomu sygnału użytecznego. Można również stwierdzić, że istnieje tendencja wzrostu przyspieszeń w tych pasmach wraz z wydłużaniem się czasu eksploatacji. W Tablicy 7 przedstawiono opracowanie rezultatów uzyskanych dla łożyska 6201zz, a w Tablicy 8 dla łożyska 6302zz. Trendy zmian energii drgań wyznaczono w sposób podany w punkcie 8.4.2. Jako graficzną postać naniesiono na rys. 40 i 41 oznaczając wykresy numerami łożysk, których one dotyczą. Trendy mają wyraźnie rosnący charakter podobny do trendów uzyskanych z badań tych łożysk zabudowanych w alternatorach.

9.3. Pomiar luzów

Pomiar luzów wykonywano w izbie pomiarów dysponującej wyspecjalizowanym sprzętem do mierzenia łożysk. Dla każdego łożyska mierzono luz poprzeczny i wzdłużny. Przy pomocy zależności (96) zdefiniowano trend zmian luzu poprzecznego i trend zmian luzu wzdłużnego w sposób następujący

$$(96) \quad (TL)_p = \frac{L_{p\psi_{zc}}}{L_{p\psi_i}} \quad ; \quad (TL)_w = \frac{L_{w\psi_{zc}}}{L_{w\psi_i}} \quad ,$$

gdzie: $L_{p\psi_i}$, $L_{w\psi_i}$ - luzy poprzeczny i wzdłużny dla czasów eksploatacji łożyska ψ_{zc} gdzie: $zc = 1, 2, 3$.
W Tablicy 9 przedstawiono rezultaty pomiarów luzów i wyznaczone trendy dla łożyska 6201zz, zaś w Tablicy 10 dla łożyska 6302zz.

Tablica 7. Łożysko 6201 zz - badanie drgań na stanowisku badawczym

Skuteczność przetwornika 3mV/g ; 0,5 mV \leftrightarrow 20 dB

przyspieszenie	ω_{Si} [kHz]			$\sum_{i=1}^3 \frac{\bar{a}_i^2}{\omega_{Si}}$	(TN) _{dmc}	lg(TN) _{dmc}
	12,5	16	20			
$\psi_1 = 0h$, łożyska nowe						
\bar{a}_i [dB]	23,0	22,0	25,5			
\bar{a}_i [mV]	0,707	0,680	0,942			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	2,357	2,267	3,142			
\bar{a}_i^2	5,554	5,138	9,870			
\bar{a}_i^2/ω_{Si}	0,444	0,321	0,493	1,259	1	0
$\psi_2 = 400 h$; łożyska po przebiegu 20.000 km						
\bar{a}_i [dB]	25,0	25,0	29,5			
\bar{a}_i [mV]	0,890	0,890	1,492			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	2,967	2,967	4,975			
\bar{a}_i^2	8,801	8,801	24,751			
\bar{a}_i^2/ω_{Si}	0,704	0,550	1,238	2,492	1,979	0,296
$\psi_3 = 1400 h$; łożyska po przebiegu 70.000 km						
\bar{a}_i [dB]	27,5	24	32			
\bar{a}_i [mV]	1,185	0,792	1,990			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	3,950	2,642	6,633			
\bar{a}_i^2	15,602	6,978	44,001			
\bar{a}_i^2/ω_{Si}	1,248	0,436	2,200	3,884	3,085	0,489

Tablica 8 . Łożysko 6302zz - badanie drgań na stanowisku badawczym.

Skuteczność przetwornika 3 mV/g ; 0,5 mV \leftrightarrow 20 dB

przyśpieszenia	ω_{si} [kHz]			$\sum_{i=1}^3 \frac{\bar{a}_i^2}{\omega_{si}}$	$(TN)_{dzc}$	$lg(TN)_{dzc}$
	12,5	16	20			
$\psi_1 = 0$; łożyska nowe						
\bar{a}_i [dB]	20,0	21,0	25,0			
\bar{a}_i [mV]	0,500	0,561	0,890			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	1,667	1,870	2,967			
\bar{a}_i^2	2,778	3,497	8,801			
$\bar{a}_i^2 / \omega_{si}$	0,222	0,219	0,440	0,881	1	0
$\psi_2 = 400$ h ; łożyska po przebiegu 20.000 km						
\bar{a}_i [dB]	26,0	27,0	32,0			
\bar{a}_i [mV]	0,997	1,120	1,990			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	3,325	3,733	6,633			
\bar{a}_i^2	11,056	13,938	44,001			
$\bar{a}_i^2 / \omega_{si}$	0,884	0,871	2,200	3,955	4,483	0,652
$\psi_3 = 1400$ h ; łożyska po przebiegu 70.000 km						
\bar{a}_i [dB]	29,5	27,5	34,0			
\bar{a}_i [mV]	1,492	1,185	2,505			
\bar{a}_i [ms ⁻²]	4,975	3,950	8,350			
\bar{a}_i^2	24,751	15,602	69,722			
$\bar{a}_i^2 / \omega_{si}$	1,980	0,975	3,486	6,441	7,297	0,863

Tablica 9. Łożysko 6201zz - luzy [μm]

i	φ_i	$L_{p\varphi_i}$	$(TL)_p$	$\lg(TN)_p$	$L_{w\varphi_i}$	$(TL)_w$	$\lg(TL)_w$
1.	40	8	1,00	0	101	1	0
2.	400	16	2,00	0,301	110	1,089	0,037
3.	1400	20	2,50	0,398	115	1,139	0,056

Tablica 10. Łożysko 6302zz - luzy [μm]

i	φ_i	$L_{p\varphi_i}$	$(TL)_p$	$\lg(TL)_p$	$L_{w\varphi_i}$	$(TL)_w$	$\lg(TL)_w$
1.	0	9	1	0	120	1	0
2.	400	19	2,11	0,324	145	1,208	0,082
3.	1400	26	2,89	0,461	156	1,300	0,114

Wykresy obliczonych trendów naniesiono na rys. 40 i 41, oznaczając je: 6201zzp i 6302zzp dla luzów poprzecznych, oraz 6201zzw i 6302zzw dla luzów wzdłużnych. Trendy te mają również wyraźnie rosnący charakter. Zwłaszcza trendy zmian luzów poprzecznych są podobne do trendów zmian energii drgań łożysk mierzonych na stanowisku pomiarowym. Pozostaje to w zgodzie z intuicyjnym odczuciem, że wzrost luzów poprzecznych jest istotnym czynnikiem zwiększającym nierównomierną pracę łożyska.

9.4. Mikroskopowe badania powierzchni

Po każdej serii badań z jednego alternatora wyjmowano łożyska, rozbierano je, a następnie wykonywano próbki umożliwiające badania mikroskopowe pracujących powierzchni. Przykłady stanu zużycia powierzchni elementów łożysk przedstawiono na fotografiach. Fotografie pokazano na rys. 46 przedstawiają powierzchnie pracujące nowego łożyska: $\psi_1 = 0h$. Na rys. 47 pokazano fotografie powierzchni dla $\psi_2 = 400 h$, zaś na rys. 48 - dla $\psi_3 = 1400 h$. Literą a oznaczono fotografie wykonane dla powiększenia $x 500$ zaś literą b - dla powiększenia $x 2000$. Fotografie na rys. 46 przedstawiają nowe powierzchnie łożysk. Można zaoobserwować ślady obróbki mechanicznej powierzchni. W postaci ciemnych plamek można zauważyć wtrącenia obcych ciał w materiale łożyska.

Na fotografiach z rys. 47 obraz jest już nieco zmieniony. Widać jeszcze ślady obróbki ale są znacznie mniejsze co świadczy o następującym ścieraniu się powierzchni. Pojawiły się liczne rysy, które mogą być rezultatem istnienia w przestrzeni roboczej łożyska twardych cząsteczek, które dostając się między współpracujące powierzchnie powodują ich rysowanie. Te twarde cząstki to być wspomniane poprzednio obce wtrącenia które zostały wyrwane z pracujących powierzchni, bądź mogły one być zawarte w czynniku smarującym, którym napelniono zamkniętą przestrzeń łożyska. Pojawiają się również skupiska zmian struktury materiału, które mogą być pierwszą widoczną fazą procesu męczenia się powierzchni. Fotografia z rys. 48 przedstawiają dalsze zmiany stanu powierzchni łożysk. Ślady obróbki mechanicznej są prawie niewidoczne. Zwiększyła się liczba rys na materiale ale w przeważającej większości nie są już tak ostre i głębokie. Mają charakter bardziej nieregularny noszą ślady rozwalcowania krawędzi. Można na tej podstawie wysnuć wniosek, że ścieranie powierzchni postępuje nadal, zaś następstwem uderzenia współpracujących elementów, rysy te zostały zdeformowane i utraciły ostrość krawędzi. Rozwijają się wykruślenia zmęczeniowe, zaś ich zawalcowane krawędzie świadczą,



a



b

Rys. 46 . Stan powierzchni nowego łożyska.



a



b

Rys. 47 . Stan powierzchni łożyska po 400 h eksploatacji.



a



b

Rys. 48 . Stan powierzchni łożyska po 1400 h eksploatacji.

<http://rcin.org.pl>

że istnieją one już od długiego czasu. Sposób w jaki w niektórych obszarach zostały rozgniecione nierówności może świadczyć o rozpoczynającym się procesie zacierania. Bez względu na to jakie rodzaje zużycia można zaobserwować na przedstawionych fotografiach i jakie mogą być ich domiemane przyczyny, badania mikroskopowe potwierdzają przyjętą w punkcie 8.2.1. tezę, że w miarę postępującego czasu eksploatacji, następuje wzrost luzów między współpracującymi elementami i wzrost liczby defektów powierzchniowych. A to z kolei musi prowadzić do zwiększenia liczby impulsów zderzeniowych i energii przekazywanej do otoczenia.

9.5. Wniosek

Wszystkie badania porównawcze wykazują istnienie trendów objawów "zużycia" badanego bezpośrednio ła łożysk. Przebieg trendów badanych rodzajów zużycia jest zbliżony do przebiegu trendów sygnałów drganiowych i hałasowych. Osiągnięte rezultaty potwierdzają przyjętą hipotezę o istnieniu odwzorowania stanu zużycia przez energię drgań i energię hałasu generowanych przez alternator w wybranych pasmach częstotliwości. A to jest argumentem potwierdzającym realizację celu badań. Jaka jest dokładność z jaką zaproponowana metoda pozwala ocenić zużycie łożysk ? Odpowiedzi na to pytanie może udzielić praktyka stosowana metody w badaniach alternatorów. Można oczekiwać, że dokładność ta będzie wzrastać wraz z doskonaleniem metody i uczeniem się zespołu badawczego.

10. Podsumowanie rozważań

Diagnostyka techniczna jest działem teorii maszyn i mechanizmów, który w ostatnich latach przeżywa intensywny rozwój. Podstawowym zadaniem diagnostyki technicznej jest organizacja efektywnych procesów diagnozy stanu technicznego urządzeń mechanicznych. Stanowi to podstawę do oceny systemu-urządzenia przy uwzględnieniu jego złożoności i systemu eksploatacyjnego,

w którym ono funkcjonuje. Dla podniesienia efektywności diagnozowania celowe jest prowadzenie badań nad lepszym poznaniem i udoskonaleniem systemu diagnostycznego, na który składają się (1) obiekt badań (2) proces postępowania diagnostycznego. Badania te są z jednej strony uogólnieniem osiągnięć praktycznych i teoretycznych uzyskanych dotychczas przy diagnostyce, a z drugiej wykorzystują i uogólniają dla potrzeb diagnostyki osiągnięcia innych dziedzin nauk podstawowych.

Dla prawidłowego uwzględnienia specyfiki obiektu badań istnieje potrzeba zaproponowania jego uniwersalnego modelu, który w omawianym przypadku mógłby być odzwierciedleniem różnych rodzajów urządzeń mechanicznych. Wydaje się, że odpowiedni do tego celu jest model cybernetyczny urządzenia zbudowany na bazie teorii systemów, teorii maszyn i mechanizmów oraz mechaniki. Formalny opis modelu i zachodzących w nim procesów ze szczególnym uwzględnieniem odwzorowania wejść i stanów w sygnały diagnostyczne daje możliwości kompleksowego ujęcia procesu diagnozowania, a tym samym pozwala zaproponować podsystem poszukiwania diagnozy.

Efektywna organizacja procesów poszukiwania diagnozy technicznego stanu złożonych urządzeń mechanicznych na wszystkich etapach (projektowania, wytwarzania, użytkowania, przechowywania, naprawy) ich życia wymaga stosowania metod badawczych, ułatwiających rozwiązywanie zadań diagnostycznych i zapewniających chociażby w sensie prakseologicznym uzyskanie możliwie dokładnej diagnozy przy możliwie małych nakładach sił i środków. W tym zakresie została zaproponowana ogólna metoda organizacji procesów poszukiwania diagnozy.

We współczesnej technice istnieje konieczność funkcjonowania systemów diagnostycznych zarówno w warunkach normalnej eksploatacji urządzenia (systemy diagnozy funkcjonalnej) jak i w warunkach laboratoryjnych przy sterowanych zmianach wielkości wejściowych (systemy diagnozy eksperymentalnej). Bez zastosowania eksperymentalnych systemów diagnozy nie można się obejść na etapach wytwarzania i napraw. Na etapie eksploatacji (użytkowania) pozytywny wynik eksperymentalnej kontroli stanu zgodności i gotowości uzyskany bezpośrednio przed wejściem urządzenia

do użytkowania podnosi jego niezawodność eksploatacyjną.

Systemy funkcjonalnej diagnozy dają możliwość bezpośredniej interwencji w przypadku stwierdzenia nieprawidłowości w funkcjonowaniu obiektu, wymiany niezdatnych węzłów, włączenie rezerwy powtórnego uruchomienia operacji, bądź przestawienia na inne parametry funkcjonowania. Takim systemem, zbudowanym na opracowanych w pierwszych rozdziałach podstawach teoretycznych, jest metoda badania łożysk tocznych stosowanych w alternatorach. Na podstawie analizy modelu cybernetycznego systemu-alternatora, w którym funkcjonują podsystemy-łożyska wykazano możliwość (1) odwzorowania stanu zużycia łożysk przy pomocy sygnałów wibroakustycznych, oraz (2) wydzielenie z tych sygnałów, użytecznych składowych częstotliwościowych, bogatych w informacje o badanych stanach. Znajduje to potwierdzenie w istniejącym stanie wiedzy, oraz w wykonanych badaniach rozpoznawczych. Dzięki wykorzystaniu sygnałów wibroakustycznych zapewnia się nicingerencję w proces eksploatacji alternatora. Powtarzając serię badań dla różnych czasów eksploatacji wyznacza się trend sygnałów, odwzorowujący zużywanie się łożysk. Badania pomocnicze uzasadniają możliwość wykorzystania drgań i hałasu do oceny stanu zużycia, wykazują podobieństwa w przebiegu trendów różnych wielkości bezpośrednio charakteryzujących zużycie oraz wybranych sygnałów. W praktyce metodę można zastosować mając dostateczną ilość wiadomości zwłaszcza o granicznych wartościach zużycia łożysk oraz odpowiadających im wartościach sygnałów. Z uzyskanych rezultatów można dodatkowo wnioskować, że sygnały drganiowe umożliwiają dokładniejszą i bardziej selektywną ocenę stanu zużycia łożysk niż sygnały akustyczne. Prezentowane badania i rezultaty uwypuklają szczególną wagę operacji filtrowania składowej użytecznej z całego sygnału diagnostycznego. Mając informacje, które umożliwiają dokonanie tej operacji można znacznie mniej uwagi poświęcać minimalizacji zakłóceń wprowadzonych przez inne źródła. Potwierdzają to zarówno rezultaty badań łożysk pracujących w alternatorze jak również na stanowisku do badania drgań. Bez znajomości pasm częstotliwości, w których znajdują się składowe użyteczne sygnałów niosące informacje o stanie zużycia

łożysk rozwiązanie zadania byłoby bardzo trudne a być może zupełnie niemożliwe, biorąc pod uwagę intensywność istniejących zakłóceń.

Metoda badań i uzyskane rezultaty mogą być uściśnione, głównie w procesie ciągłego, praktycznego diagnozowania stanu łożysk alternatorów, oraz uczenia się personelu obsługi. Metoda taka po jej zastosowaniu, staje się niezbędnym elementem procesu eksploatacji alternatorów, czyniąc ten proces bardziej efektywny.

Ulepszanie i stosowanie systemów diagnozy należy traktować jako konieczne, w tej samej mierze co projektowanie i wytwarzanie obiektu i układu jego sterowania.

Taką propozycję ulepszenia systemu diagnozowania od strony teoretycznej i metodologicznej ma w zamierzeniu autora stanowić ta praca.

11. Bibliografia

- [1] Ackoff R.L. - Decyzje optymalne w badaniach stosowanych. PWN, Warszawa 1969 r
- [2] Adamczyk J. - Wybrane zagadnienia wibroakustycznej diagnostyki maszyn. Zeszyty Naukowe AGH im.St.Staszica Nr.679. El.i Mech.Górnictwa i Hutnictwa.Zeszyt 101, Kraków 1979r.
- [3] Adamczyk J., Krzyworzeka P.: Identyfikacja diagnostyczna urządzeń mechanicznych. I Sympozjum "Diagnostyka maszyn" Zeszyt 1, Referaty, Jaszowiec 1975r,
- [4] Adamczyk J., Jaźwiński J., Sypnik R. - System techniczny jako obiekt badań diagnostycznych. Diagnostyka Urządzeń Mechanicznych. Praca Zbiorowa na kurs szkoleniowy: I Szkoła Diagnostyki Technicznej, Biały Bór 9-16 października 1977r Wyd. Ossolineum 1977r
- [5] Andrzejewski M, Cempel C, Kowalak J. - Łożysko jako układ dynamiczny. Diagnostyka łożysk tocznych; Praca Zbiorowa na kurs szkoleniowy :IV Szkoła Diagnostyki Maszyn ,Biały Bór 1980 .Wyd,Ossolineum PAN 1980.
- [6] Ashby R.W. - Wstęp do cybernetyki. PWN Warszawa 1963r.
- [7] Berg A, Kolman E.- Czy możliwości cybernetyki są nieograniczone. KiW, Warszawa 1968 r.
- [8] Cempel C. - Miary podobieństwa procesów wibroakustycznych maszyn i ich zastosowania III Sympozjum "Diagnostyka Maszyn" Zeszyt 3, Referaty, Szczyrk 1977 ,
- [9] Cempel C. - Bezwymiarowe dyskryminaty amplitudowe procesów wibroakustycznych: IV Sympozjum "Diagnostyka Maszyn" Zeszyt 4, Referaty, Szczyrk 1978 ,
- [10] Cempel C. - ABC drganiowej diagnostyki maszyn Raport IMT, Politechniki Poznańskiej Nr 73, 1978 r,
- [11] Cempel C. - Silniki elektryczne.Diagnostyka łożysk tocznych. Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy: IV Szkoła Diagnostyki Maszyn, Biały Bór 1980r Wyd. Ossolineum PAN 1980r

- [12] Cempel C., Motylewski J. - Podstawowe problemy diagnostyki wibroakustycznej. Diagnostyka Urządzeń Mechanicznych ; Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy : I Szkoła Diagnostyki Technicznej , Biały Bór 9-16 października 1977. Wyd. Ossolineum 1977 ,
- [13] Cempel C., Stepianiak Z. - Badania charakterystyk częstotliwościowych łożysk tocznych jako podstawa ich diagnostyki ; IV Sympozjum "Diagnostyka Maszyn" Zeszyt 4, Referaty, Szczyrk 1978 ,
- [14] Cempel C., Żółtowski B.- Korelacja amplitudowa dyskryminant drgań mostów tylnych z danymi eksploatacyjnymi pojazdu; IV Sympozjum "Diagnostyka Maszyn" Zeszyt 4, Referaty, Szczyrk 1978 ,
- [15] Dekert J., Kurowski W., Wicher J.- Badania korelacji między obciążeniami dynamicznymi przekładni zębatej a przyspieszeniami wybranych punktów korpusu. Sympozjum pod hasłem: Metody statystyczne w mechanice; stabilność - pomiary - modelowanie. Referaty, Gliwice 1972, oraz Prace IPPT 6/1972,
- [16] Dekert J., Kurowski W. - O możliwości wykorzystania drgań skrętnych układu koło zębate-wał, jako sygnału diagnostycznego do wyznaczania obciążeń dynamicznych na zębach. Sympozjum pod hasłem: Metody stochastyczne w mechanice: stochastyczna teoria maszyn, Zeszyt 7, Gliwice 1973 ,
- [17] Dekert J., Kurowski W., Rysiński B.- Analiza diagnostyczna sygnału wibroakustycznego łożysk tocznych zabudowanych. Diagnostyka łożysk tocznych; Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy ; IV Szkoła Diagnostyki Maszyn, Biały Bór 1980. Wyd. Ossolineum PAN 1980r,
- [18] Golec M., Cempel C.- Diagnostyka eksploatacyjna łożysk tocznych za pomocą pomiaru hałasu i napięcia wałowego. Diagnostyka łożysk tocznych. Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy IV Szkoła diagnostyki maszyn, Biały Bór 1980. Wyd. Ossolineum PAN 1980 r,
- [19] Graupe D.- Identification of Systems. Van Nostrand Renhold Company, New York, Cincinnati, Toronto, London Melbourne 1972 r.

- [20] Hawiland R.P. - Niezawodność urządzeń technicznych PWN, Warszawa 1968 ,
- [21] Hartmanis J., Stearns R.E.- Algebraic Structure Theory of Sequential Machines. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. N.J. 1966 r,
- [22] Hebda M., Konieczny J., Olearczuk - Koncepcja nauki o eksploatacji urządzeń, WNT, Warszawa 1971 r,
- [23] Iwachenienko A.G.- Cybernetyka techniczna, PWN, Warszawa 1962 r,
- [24] Jones Ch. - Metody projektowania. Prace IOK, Warszawa 1974,
- [25] Kaczorek T. - Teoria sterowania. T.I, PWN, Warszawa 1971 r,
- [26] Kamiński E., Nadolski W., Ziemia S. - Cele i zadania współczesnej diagnostyki drganiowej maszyn, Archiwum Budowy Maszyn, Nr.1 1972 ,
- [27] Kotarbiński T. - Hasło dobrej roboty. Wiedza Powszechna, Warszawa 1968 ,
- [28] Kotarbiński T. - Studia z zakresu filozofii, etyki i nauki społecznej. Wrocław - Warszawa - Kraków, Ossolineum 1970 ,
- [29] Kowalak J.- Analiza diagnostyczna drgań silników elektrycznych. Diagnostyka łożysk tocznych, Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy; IV Szkoła Diagnostyki Maszyn, Biały Bór 1980. Wyd. Ossolineum PAN 1980 ,
- [30] Kowalski K., Cempel C. - Metoda przekrojów zupełnych w diagnostyce wibroakustycznej urządzeń mechanicznych, III Sympozjum "Diagnostyka Maszyn", Zeszyt 3, Referaty, Szczyrk 1977 ,
- [31] Krzyworzeka P. - Optymalizacja przetwarzania złożonego sygnału diagnostycznego, Praca doktorska AGH, Kraków 1972,
- [32] Krzyworzeka P. - Deterministyczno-probabilistyczny model złożonego obiektu diagnostyki, IV Sympozjum "Diagnostyka Maszyn", Zeszyt 4, Referaty, Szczyrk 1978 r,

- [33] Krzyworzeka P., Piwowarczyk T. - Teoriomnogościowe przesłanki oceny parametrów informatycznych zbiorów obserwacji diagnostycznej. Raport z prac badawczych ZN AGH Kraków 1978 r ,
- [34] Krzyworzeka P., Piwowarczyk T .- Metryzowalność własności ogólnej w eksperymencie diagnostycznym. Zeszyty Naukowe AGH Nr 728 Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa z. 112 Kraków 1979 r ,
- [35] Krzyworzeka P., Piwowarczyk T.- Pojęcia własności mierzalnej statystycznej. Raport z prac badawczych ZN AGH Kraków 1978 ,
- [36] Krzyworzeka P. -Uwagi o charakterystykach odwzorowania istotnych własności obiektu diagnostyki ; Metody Cyfrowej Analizy Sygnałów Wibroakustycznych; Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy: III Szkoła Diagnostyki Technicznej, Biały Bór 1979, Wyd. Ossolineum PAN 1979 ,
- [37] Kurowski W.- Wybrane zagadnienia z dynamicznej diagnostyki urządzeń mechanicznych (ze szczególnym uwzględnieniem przekładni zębatach). Prace IPPT Nr 57, 1974 ,
- [38] Kurowski W.- Teoriopoznawcze podstawy diagnostyki technicznej. Prace IPPT Nr 76 . 1976 ,
- [39] Kurowski W.- Wybrane zagadnienia diagnostyki urządzeń mechanicznych. Zagadnienia Naukoznawstwa. Nr 3-4 (47-48) , 1976 ,
- [40] Kurowski W., Dekert J. - The theoretical and eksperimental testing of vibrations of a parallel axis single helical gearing. Proceedings of the VIII Conference Dynamics of Machines. Praha, Liblice, September 1973, Nr 29 ,
- [41] Kurowski W., Ziemia S.- Ważniejsze zagadnienia akustycznej i dynamicznej diagnostyki w urządzeniach mechanicznych ; I Sympozjum "Diagnostyka Maszyn", Zeszyt 1, Referaty, Jaszowiec 1975 r ,
- [42] Kurowski W,- Modelowanie cybernetyczne systemów naturalnych Studia Filozoficzne Nr 2/123/1976 ,

- [43] Kurowski W., Muszyńska A., Wicher J. - Modelowanie systemów technicznych. Diagnostyka Urządzeń Mechanicznych ; Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy ; I Szkoła Diagnostyki Technicznej, Biały Bór 9-16 października 1977, Wyd.Ossolineum PAN 1977 ,
- [44] Kurowski W., Ziemia S.- Wybrane zagadnienia z cybernetyki technicznej. Diagnostyka Urządzeń Mechanicznych ; Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy ; I Szkoła Diagnostyki Technicznej, Biały Bór 9-16 października 1977 Wyd.Ossolineum PAN ;
- [45] Kurowski W.- Systemy diagnostyczne urządzeń mechanicznych. Podstawy Diagnostyki Urządzeń Mechanicznych; Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy ; II Szkoła Diagnostyki Technicznej, Biały Bór 25-30 września 1978 r., Wyd.Ossolineum PAN 1978r
- [46] Kurowski W. - Matematyczne metody analizy sygnałów. Podstawy Diagnostyki Urządzeń Mechanicznych ; Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy; II Szkoła Diagnostyki Technicznej, Biały Bór 25-30 września 1978 r.,Wyd.Ossolineum PAN 1978 r,
- [47] Lange O. - Całość i rozwój w świetle cybernetyki. PWN Warszawa, 1962 r,
- [48] Lange O. - Wstęp do cybernetyki ekonomicznej. PWN Warszawa 1965 r,
- [49] Lenkiewicz W., Machowski B. - Aspekty eksploatacyjne w założeniach i procesie projektowania. Metodologia projektowania inżynierskiego. Warszawa 1973 r,
- [50] Mesarovic M;D., Takahara Y. - General Systems Theory ; Mathematical Foundations. Academic Press, New York - San Francisco-London 1975 ,
- [51] Morecki A., Dekert J., Kurowski W. - Dynamische Zahnkräfte bei Zahnradgetriebe. Zahnradgetriebe und Gleittlager-Maschinenelemente Kollgium, Dresden 1967 ,
- [52] Muster D., Davies P., Koopman G., Heckl M. - Noise Generation and Control in Mechanical Engineering. A course offerd at the International Centre for Mechanical Sciences, Udine, Italy 30 June to 9 July 1976 .

- [53] Müller L. - Analiza częstotliwościowa w dynamice maszyn. Przegląd Mechaniczny nr 7, 1969 ,
- [54] Müller L. - Badanie przekładni zębatych przy prędkościach nadrezonansowych. Przegląd Mechaniczny nr 5 , 1971 ,
- [55] Müller L., Wilk A. - Siły dynamiczne w kołach zębatych przy prędkościach rezonansowych. Przegląd Mechaniczny nr 2 , 1971 r ,
- [56] Nowicki M. - Problemy diagnostyki technicznej. Zagadnienia Naukoznawstwa Tom VI. Zeszyt 2/221 1970 ,
- [57] Osiecki J., Wicher J. - Zagadnienia identyfikacji układów mechanicznych. Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy: I Szkoła Diagnostyki Technicznej, Biały Bór 9-16 października 1970. Wyd. Ossolineum 1977. Diagnostyka Urządzeń Mechanicznych ,
- [58] Pawłow B.W. - Badania diagnostyczne w technice .WNT Warszawa 1967 ,
- [59] Poly'a G. - Jak to rozwiązać PWN, Warszawa 1964 ,
- [60] Porter U. - Sowriemiennyje osnovanija obščej teorii sistem Izd.Nauka Głównaja Riedakcja Fiz.,Mat.,Lit., Moskwa 1971 ,
- [61] Praca zbiorowa - Osnovy techničeskoj diagnostiki Uzd. "Energia", 1976 ,
- [62] Praca zbiorowa - Mały słown'k cybernetyczny, Wiedza Powszechna 1973 ,
- [63] Praca zbiorowa - Problemy metodologii badań systemowych WNT, 1973 ,
- [64] Praca zbiorowa - Ogólna teoria systemów. WNT Warszawa 1976 ,
- [65] Praca zbiorowa IMT Politechniki Poznańskiej- Sprawozdania z badań w problemie węzłowym PW.05.4 na temat opracowania metod i koncepcji układów pomiarowych do oceny stanu dynamicznego łożyska; Etapy I, II , III i IV Poznań 1977 , 1978 , 1979 , 1980 r ,

- [66] Praca zbiorowa ZUM IPPT PAN - sprawozdania z badań w problemie węzłowym PW.05.4 na temat: Badanie wpływu łożysk tocznych na drgania maszyn elektrycznych od mocy ułamkowej do dużej. Etapy: I , II , III , IV . Warszawa 1977, 1978 , 1979 i 1980 ,
- [67] Praca zbiorowa ZUM IPPT PAN - Sprawozdanie z badań na temat : Badania sygnałów wibroakustycznych generowanych przez silniki elektryczne. Warszawa 1978 ,
- [68] Puszkin B . - Heurystyka . KiW Warszawa 1970 ,
- [69] Ragulskis K.M., Jurkauskas A Yu, iin - Vibration of bearings. NASA - NSF Washington, New Dehli 1979 ,
- [70] Sadowski W , - Podstawy ogólnej teorii systemów. PWN Warszawa 1978 ,
- [71] Seidler J. - Statystyczna teoria odbioru sygnałów , PWN Warszawa- Wrocław 1963 ,
- [72] Shannon C.E., Warren W.- The Mathematical Theory of Communication, The University of Illinois Press: Urbana 1949 ,
- [73] Solski P., Ziemia S.- Zużycie elementów spowodowane tarciami PWN, Warszawa 1969 ,
- [74] Stanicki T., Szlachcic E.- Wybrane zagadnienia teorii systemów. Diagnostyka Urządzeń Mechanicznych ; Praca Zbiorowa na kurs szkoleniowy ; I Szkoła Diagnostyki Technicznej, Biały Bór 9-16 października 1977, Wyd. Ossolineum 1977 ,
- [75] Szadkowski A. - O modelowaniu oddziaływań i pojęciu siły. Prace IPPT nr 37/1978 ,
- [76] Szadkowski A. - O przestrzeni, czasie i obiektach mechaniki newtonowskiej. Prace IPPT nr 57/1978 ,
- [77] Sztoff W.- Modelowanie i filozofia. PWN , Warszawa, 1971 ,
- [78] Tadeusiewicz R.- Przykłady wykorzystania metod cybernetycznych; Metody cyfrowej analizy Sygnałów Wibroakustycznych; Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy: III Szkoła Diagnostyki

- Technicznej, Biały Bór 1979 , Wyd.Ossolineum PAN 1979 ,
- [79] Tou J.T. - Nowoczesna teoria sterowania, WNT Warszawa 1967,
- [80] Walentynowicz B. - O rozwiązywaniu problemów w nauce i technice. Zagadnienia Naukoznawstwa Nr 2/42, 1975 ,
- [81] Waligóra W. - Badanie jakości łożysk wałeczkowych. Politechnika Poznańska - Rozprawy Poznań 1980 ,
- [82] Wichler J. - Problemy identyfikacji systemów technicznych ze szczególnym uwzględnieniem układów mechanicznych. Prace IPPT nr 67/1975 ,
- [83] Wiennikow W.A. - Wybrane metodologiczne zagadnienia modelowania. Woprosy Filozofii, nr 11, 1964 ,
- [84] Ziemba S.- Rola diagnostyki technicznej. Diagnostyka Urządzeń Mechanicznych; Praca zbiorowa na kurs szkoleniowy ; I Szkoła Diagnostyki Technicznej, Biały Bór 9-16 października 1977 . Wyd. Ossolineum 1977 .

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	3
2. Cel i zakres pracy	11
3. Pojęcie podstawowe	15
3.1. Uwagi ogólne	15
3.2. System naturalny	16
3.3. Modelowanie cybernetyczne	22
4. Urządzenie mechaniczne	26
4.1. Procesy zachodzące w urządzeniach mechanicznych	29
4.2. Model cybernetyczny urządzenia mechanicznego	31
4.3. Pojęcie własności w urządzeniach mechanicznych	37
4.4. Ocena urządzenia	42
5. Teoretyczne podstawy diagnozowania	50
5.1. Uwagi wstępne	50
5.2. System i model cybernetyczny urządzenia mechanicznego	51
5.3. Funkcjonowanie systemu	56
5.4. Przestrzeń wejścia, stanów i wyjścia	62
5.5. Globalne zadanie diagnostyczne	71
5.6. Odwzorowanie przestrzeni	74
5.7. Macierze odwzorowań	80
5.8. Zakłócenia	82
5.9. Prowadzenie badań diagnostycznych w obecności zakłóceń	88
6. Ogólna metoda organizacji procesów poszukiwania diagnozy	90
6.1. Wprowadzenie	90
6.2. Metoda ogólna	92
6.3. Metoda badań	95
6.4. Sformułowanie zadania diagnostycznego	97
6.5. Opracowanie i realizacja programu pomiarów	100
6.6. Przetwarzanie i opracowanie danych pomiarowych	102
6.7. Postawienie diagnozy i wyciągnięcie wniosków	105
7. Wybrane zagadnienia wibroakustycznej diagnostyki urządzeń mechanicznych	107
7.1. Cele i zadania diagnostyki wibroakustycznej	107
7.2. Metody wibroakustycznej diagnostyki urządzeń mechanicz- nych	110

8.	Badanie zużycia łożysk tocznych	114
8.1.	Sformułowanie problemu badawczego	114
8.2.	Cel i zakres badań	116
8.3.	Obiekt badań	117
8.3.1.	Własności i procesy zachodzące w urządzeniu	117
8.3.2.	Dane techniczne obiektu badań	121
8.3.3.	Model cybernetyczny	123
8.4.	Zamierzony cel i posiadane możliwości	126
8.5.	Metoda badań	127
8.6.	Wybór sygnałów diagnostycznych i sformułowanie zadania	128
8.6.1.	Założenia wstępne	128
8.6.2.	Eksperyment rozpoznawczy	131
8.6.3.	Sformułowanie zadania	137
8.7.	Pomiary sygnałów	140
8.8.	Opracowanie i przetwarzanie danych	156
8.8.1.	Identyfikacja użytecznych składowych widma	156
8.8.2.	Opracowanie rezultatów badań sygnałów drganiowych	164
8.8.3.	Opracowanie rezultatów badań sygnałów akustycznych	175
8.9.	Diagnoza i wnioski	176
9.	Badania porównawcze zużycia łożysk tocznych	182
9.1.	Realizacja celu badań łożysk pracujących w alternatorach	182
9.2.	Badania drgań na stanowisku badawczym	185
9.3.	Pomiar luzów	189
9.4.	Mikroskopowe badania powierzchni	193
9.5.	Wniosek	197
10.	Podsumowanie rozważań	197
11.	Bibliografia	201