

45/1983

J. Motylewski, D. Nitecki

WIBROAKUSTYCZNA DIAGNOSTYKA  
KONTROLNA WYBRANYCH MASZYN  
NA PRZYKŁADZIE BADAŃ ŁOŻYSKA  
ŚLIZGOWEGO SILNIKA SAMOCHODOWEGO  
ORAZ ALTERNATORA

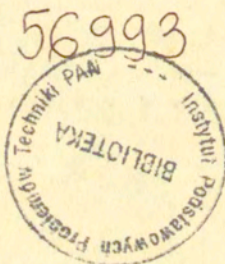
45/1983

P-269



WARSZAWA 1983

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 12 czerwca 1983 r.



N a p r a w a c h r ę k o p i s u

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
Nakład 150 egz. Ark.wyd. 3,25. Ark.druk.2.  
Oddano do drukarni w grudniu 1983 r.  
Nr zamówienia 32/84.

---

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,  
ul.Śniadeckich 8

Jerzy Motylewski  
Dariusz Nitecki  
Zakład Akustyki Cybernetycznej  
IPPT - PAN

WIBROAKUSTYCZNA DIAGNOSTYKA KONTROLNA WYBRANYCH MASZYN  
NA PRZYKŁADZIE BADAŃ ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO SILNIKA SAMOCHODOWEGO  
ORAZ ALTERNATORA

1. Wstęp

Prowadzone na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat badania teoretyczne i doświadczalne wykazały, że sygnał wibroakustyczny, który jako efekt uboczny i z reguły niepożądany towarzyszy funkcjonowaniu każdej maszyny, zawiera szereg istotnych informacji diagnostycznych, określających jej stan techniczny i umożliwiających ocenę niezawodności jej działania.

Celem pracy jest przedstawienie ogólnej metodyki badań diagnostycznych oraz założeń koncepcyjnych i funkcjonalnych aparatury pomiarowej do wibroakustycznej diagnostyki kontrolnej wybranych maszyn. Rozwiązania szczegółowe będą dotyczyły konkretnego przypadku diagnostycznych badań kontrolnych silników samochodowych /łożyska ślizgowe/ i ich podzespołów /alternatory/.

Zmianom parametrów stanu maszyny towarzyszą zmiany parametrów sygnału wibroakustycznego, które zależą od stanu technicznego i stopnia dopasowania poszczególnych elementów badanego urządzenia oraz jego warunków pracy. W większości praktycznych zastosowań znalezienie odpowiednio silnie skorelowanych, a zarazem wystarczająco prostych do uchwycenia zależności między stanem technicznym maszyny i parametrami sygnału wibroakustycznego jest zadaniem złożonym, wymagającym dużej wiedzy teoretycznej i prowadzenia wielu prac eksperymentalnych. W zależności od tego, czy urządzenie jest przedmiotem zainteresowania projektanta, produ-

centa czy użytkownika, zmienia się ilość i rodzaj analizowanych stanów technicznych, zmienia się również wymagana dokładność prowadzonych pomiarów i sposoby przetwarzania sygnału. Z tego względu, dla istotnego skrócenia czasu badań, a jednocześnie uzyskania większego prawdopodobieństwa znalezienia poszukiwanych relacji: stan techniczny - estymaty sygnału wibroakustycznego, szczególnie ważną rolę spełnia poznanie i optymalizacja całokształtu czynności i sposobów postępowania przy ustalaniu zestawów aparatury pomiarowo-diagnostycznej, metodyki pomiaru, parametrów stanu urządzenia, parametrów sygnału akustycznego i drganiowego oraz sposobu analizowania uzyskanych wyników.

W rozwiązywaniu zadań diagnostycznych pomocne są badania modelowe maszyn i systemów pomiarowych.

Według ogólnie przyjętego podziału diagnostyki wibroakustycznej [2], jednym z jej działów jest diagnostyka kontrolna. Polega ona przede wszystkim na sprawdzeniu i ocenie, czy właściwości maszyny, określane na podstawie analizy sygnału wibroakustycznego, mieszczą się w granicach norm i zaleceń ustanawianych przez warunki odbioru technicznego. Coraz większe zainteresowanie możliwościami związanymi ze stosowaniem wibroakustycznych metod badawczych w diagnostyce kontrolnej wiąże się z poszukiwaniami optymalizacyjnymi w zakresie jakości wyrobów, stawianymi przez producentów oraz odbiorców.

Szczególnie istotną cechą wibroakustycznych metod i systemów pomiarowych stosowanych w diagnostyce kontrolnej, jest to, że pozwalają one szybko i ze stosunkowo dużą wiarygodnością eliminować wadliwe egzemplarze urządzeń, przed dopuszczeniem ich do eksploatacji. Badania maszyn w warunkach przemysłowych narzucają specyficzne cechy na opracowywane systemy pomiarowe, jak na przykład łatwość obsługi urządzeń diagnostycznych, odporność aparatury na wpływ warunków otoczenia, szybkość przeprowadzania pomiaru i uzyskiwania odpowiedzi diagnostycznej. W większości zastosowań praktycznych wymaga się od systemu tylko decyzji binarnej: "zdatny/niezdatny" do eksploatacji lub dalszego montażu.

Przedmiotem pracy są badania diagnostyczne maszyn stanowiących bardzo liczną, powszechnie stosowaną w wielu różnych dziedzinach badań klasę urządzeń, której główną cechą jest fakt, iż część elementów tych maszyn wykonuje ruch obrotowy względem po-

zostałych. Konsekwencją niewyważenia statycznego i dynamicznego podzespołów wirujących jest powstanie sił wymuszających drgania i hałas maszyny. Analiza wyników badań wibroakustycznych wykazuje, że ta specyficzna cecha funkcjonalna i konstrukcyjna maszyn

ma istotny, a często dominujący wpływ na postać emitowanego sygnału akustycznego i drganiowego. Innymi podstawowymi przyczynami powstawania drgań i hałasu są ruchy punktów podparcia lub zamocowania elementów maszyny, zjawiska tarcia oraz wymuszenia pochodzące od pulsacji ośrodków gazowych i ciekłych, przepływających przez maszynę lub realizujących funkcje sterowania. Dodatkowymi czynnikami, wpływającymi na postać i wartość sygnału wibroakustycznego, są również cechy konstrukcyjne materiału, niewłaściwy montaż oraz niedopasowanie poszczególnych elementów lub podzespołów maszyny.

W ogólnym przypadku sygnał wibroakustyczny generowany podczas pracy wielu maszyn ma charakter stacjonarny lub quasistacjonarny. Jak wynika z literatury oraz dotychczasowych, wieloletnich doświadczeń, uzyskanych w rezultacie prowadzenia prac teoretycznych i eksperymentalnych w Pracowni Miernictwa Akustycznego Zakładu Akustyki Cybernetycznej IPPT-PAN, dla sygnałów tego typu i wymagań stawianych przez specyfikę diagnostyki kontrolnej szczególną przydatność do badań wykazują metody analizy widmowej.

Wiele dotychczasowych polskich i zagranicznych publikacji koncentruje się na rozwiązywaniu zagadnień teoretycznych związanych z diagnostyką wibroakustyczną, lecz w ograniczonym tylko zakresie podają one rozwiązania przydatne do praktycznych celów diagnostyki kontrolnej. Z tego względu w niniejszej pracy połączono nacisk na aspekt praktycznej możliwości wykorzystania jej rezultatów i wniosków przy opracowywaniu systemów diagnostyczno-pomiarowych w zakładach produkcyjnych.

## 2. Modele diagnostyczne

W diagnostyce technicznej maszyn celowe jest empiryczne zbadanie cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych rozpatrywanego obiektu, co może stanowić podstawę zbudowania jego modelu diagnostycznego. Niezależnie od tego czy przedmiotem badania jest maszyna jako całość, czy tylko jej podzespoły, podczas analizy

trzeba uwzględnić fakt, że w prawidłowo pracującym obiekcie zachodzi jednoczesna współpraca wszystkich elementów powiązanych ze sobą sprzężeniami zwrotnymi. Rozwiązanie zadań teoretycznych w odniesieniu do zbudowanych modeli ma istotny wpływ na procedurę dalszego badania obiektu. Najdogodniejszymi pod względem analizy są modele analityczne, w których poszczególne procesy uwzględnione są w postaci zależności matematycznych. Jednak w wielu wypadkach struktura takiego modelu jest na tyle skomplikowana, iż uniemożliwia jego praktyczne wykorzystanie. Z tego względu tworzy się bardziej proste, funkcjonalne lub topologiczne modele diagnostyczne [4],

## 2.1. Model funkcjonalny

Podstawą budowy tego typu modelu jest funkcjonalny schemat obiektu, przedstawiony jako zbiór bloków, z których każdy ma  $l$  wejść i  $r$  wyjść. Przykład schematu funkcjonalnego silnika spalinowego podano na rys. 1. Funkcje wyjściowe jednego bloku są lub mogą być funkcjami wejściowymi innych bloków. Model funkcjonalny może określać również operacje sprawdzające, które służą do wykrywania niesprawności obiektu. Głównym kryterium wyboru bloków funkcjonalnych, zależnie od metodyki pomiaru, są wymagania dotyczące dokładności rozróżniania części składowych obiektu podczas badania diagnostycznego. Tak wybrany blok traktowany jest jako element podstawowy wtedy, gdy występuje na jego wyjściu tylko jeden sygnał. Każdy z tych elementów spełnia warunek:

$$Y_i = \sum_{j=1}^l a_{ij} \cdot x_j$$

gdzie:  $a_{ij}$  - szukane współczynniki określające związki między parametrami wejścia i wyjścia,

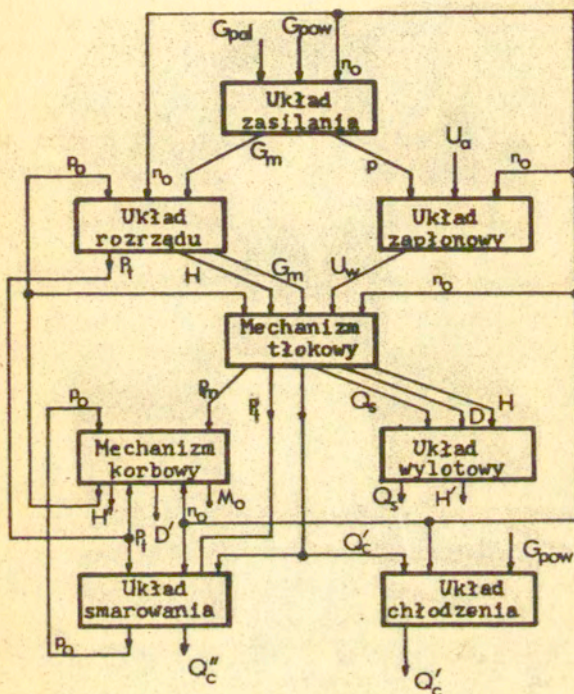
$Y_i$  - parametry wyjścia,  $i = 1, 2, \dots, r$ ,

$x_j$  - parametry wejścia,  $j = 1, 2, \dots, l$ .

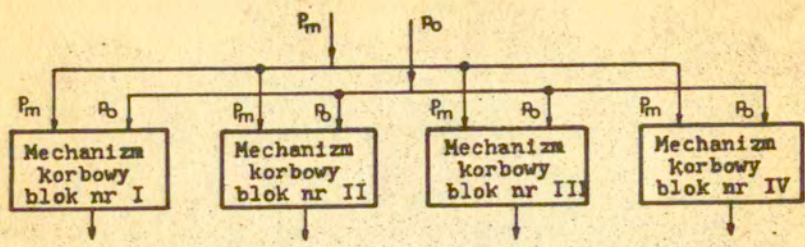
Przykład konstrukcji modelu funkcjonalnego mechanizmu korbowego silnika spalinowego podano na rys. 2.

## 2.2. Model topologiczny

Na podstawie modelu funkcjonalnego, poprzez jego odwzorowanie w przestrzeni topologicznej, można uzyskać bardziej ogólny, lecz pełniejszy i dokładniejszy model matematyczny, zwany topologicznym.



Rys. 1. Uproszczony schemat funkcjonalny silnika spalinowego o zapłonie elektrycznym [4].  
 Oznaczenia:  $G_{pow}$  - wydatek powietrza;  $G_{pol}$  - wydatek paliwa;  $n_0$  - prędkość obrotowa;  $U_a$  - napięcie akumulatora;  $U_w$  - napięcie uzwojenia wtórnego cewki zapłonowej;  $p$  - podciśnienie;  $G_m$  - wydatek mieszanki;  $H, H', H''$  - poziom hałasu;  $D$  - poziom drgań;  $Q_c, Q_c', Q_c''$  - ciepło tracone przy chłodzeniu;  $Q_s$  - ciepło odprowadzane ze spalinami;  $P_o$  - ciśnienie oleju;  $P_t$  - straty na tarcie;  $P_m$  - siły /np. gazowe/;  $M_0$  - moment obrotowy /efektywny/.



Rys. 2. Model funkcjonalny mechanizmu korbowego silnika spalinowego [4]. Oznaczenia wg. rys. 1.

Pod pojęciem przestrzeni topologicznej należy rozumieć parę

$$T = \{X, Q\}$$

gdzie: **X** - skończony zbiór wierzchołków, odwzorowujący np. elementy struktury obiektu lub parametry opisujące jego właściwości

$$X = \{\bar{x}_i\} \quad i = \overline{1, \dots, n}$$

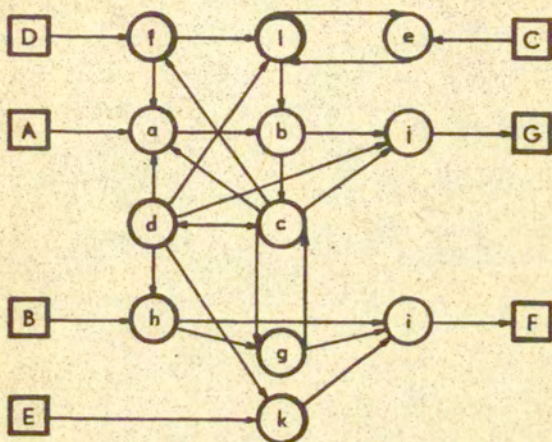
**Q** - topologia, określona w zbiorze **X**, przez założenie związków binarnych.

Biorąc pod uwagę fakt, że zbiór badanych właściwości lub parametrów maszyny wirującej jest skończony, można przedstawić model w postaci skończonego grafu skierowanego **G[X, Q]**, czyli zbioru **X** punktów połączonych zbiorem **Q = {q}** łuków. Zbiór **X** wyznacza się ze zbioru znanych właściwości istotnych dla funkcjonowania obiektu, np. dostarczania porcji paliwa, wytworzenia energii mechanicznej. Topologiczny model silnika spalinowego podano na rys. 3. Na ogół maszyny wirujące stanowią złożone obiekty, co powoduje, że dla ich szczegółowej analizy często niezbędne jest opracowywanie modeli topologicznych poszczególnych ich podzespołów.

### 3. Ogólna procedura poszukiwania diagnozy

Po zapoznaniu się ze specyfiką konstrukcyjną i funkcjonalną urządzenia, między innymi przez analizę modeli obiektu, kolejnym etapem rozwiązywania zadania diagnostycznego jest opracowanie systemu poszukiwania relacji pomiędzy stanowiącymi przedmiot zainteresowania stanami technicznymi maszyny, a estymatami sygnału wibroakustycznego. Pomimo dużej ilości publikacji z zakresu diagnos-





Rys. 3. Topologiczny model działania silnika [4].

Oznaczenia: ○ - wierzchołki charakteryzujące właściwości obiektu; □ - wierzchołki charakteryzujące otoczenie;

A - napełnianie paliwem układu zasilania;

B - napełnianie cieczą chłodzącą;

C - napełnianie akumulatora elektrolitem;

D - dopływ powietrza do silnika;

E - napełnianie układu smarowania olejem;

F - oddanie ciepła do otoczenia;

G - wydalanie spalin;

a - zassanie paliwa i wytworzenie mieszanki palnej;

b - spalanie mieszanki palnej;

c - przemieszczenie tłoka;

d - rozdzielenie energii;

e - zasilanie układu zapłonowego prądem akumulatora i ładowanie akumulatora;

f - powstanie podciśnienia i dopływ powietrza do układu zasilania;

g - powstanie i pokonanie sił tarcia;

h - funkcjonowanie układu chłodzenia;

i - powstanie i odprowadzenie nadwyżek ciepła;

j - działanie układu wylotowego;

k - działanie układu smarowania;

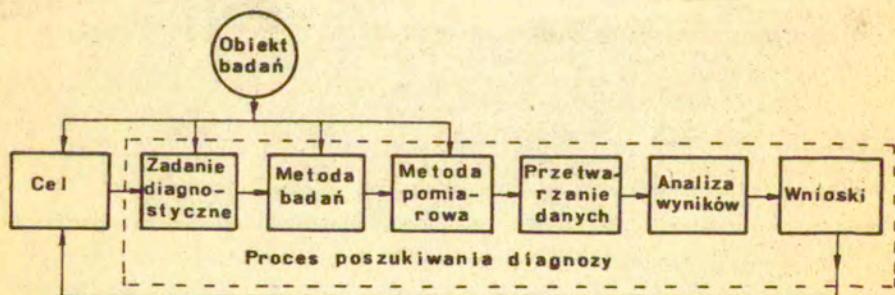
l - działanie układu zapłonowego.

tyki wibroakustycznej, tylko nieliczne prace opisują jednoznacznie relacje, stanowiące podstawę stawiania diagnozy. Z tego względu w większości praktycznych przypadków niezbędne staje się prowadzenie badań podstawowych, realizujących ten cel.

Systemowe podejście do rozwiązywania tego typu kompleksowych zagadnień, poprzez optymalizację czynników decydujących o wyborze procedury diagnostycznej, umożliwia wybranie właściwych wariantów rozwiązań metodologicznych i instrumentalizacyjnych.

Przyjmuje się, że system to zbiór przedmiotów połączonych i związanych relacjami, tworzącymi pewną organizację [3]. Element tego zbioru musi spełniać warunek odpowiedniości, czyli dostosowania ze względu na posiadane cechy do innych elementów.

Elementy o bardzo złożonym charakterze budowy i funkcjonowania mogą przy szczegółowej analizie być traktowane jako oddzielne systemy, tworzące system pierwotny /całościowy/. Wychodząc z tych podstawowych rozważań, można zaproponować ogólny schemat systemu lub podsystemu poszukiwania diagnozy, przedstawiony na rys. 4, [6].



Rys. 4. Poglądowy schemat procedury poszukiwania diagnozy [6].

Sformułowanie zadania diagnostycznego polega na określeniu i wybraniu:

- stanu urządzenia, ze względu na postawiony cel badań,
- rodzaju sygnału diagnostycznego, odwzorowującego powyższy stan /bezpośrednio lub po przetworzeniu/.

Zadanie diagnostyczne można przedstawić w postaci:

$$\bar{V} + \Delta\bar{V} = F(\bar{W} + \Delta\bar{W}, \bar{E}) \quad \bar{W} + \Delta\bar{W} = F^{-1}(\bar{V} + \Delta\bar{V}, \bar{E})$$

gdzie:  $\bar{V} = \bar{V}(s_j)$  - wektor sygnału diagnostycznego,

$\Delta \bar{V} = \bar{V}(s_j)$  - wektor zakłóceń sygnału diagnostycznego,

$\bar{W} = \bar{W}(x_j)$  - wektor stanu,

$\Delta \bar{W} = \bar{W}(x_j)$  - wektor zakłóceń stanu,

$\bar{E}_i$  - wektor innych zakłóceń,

$F, F^{-1}$  - funkcja odwzorowująca,

$s_j$  - współrzędne wektora sygnału  $i = 1, 2, \dots, n$ ,

$s_j$  - współrzędne wektora zakłóceń sygnału  $j = 1, 2, \dots, m$ ,

$x_i$  - współrzędne wektora stanu  $i = 1, 2, \dots, l$ ,

$x_j$  - współrzędne wektora zakłóceń stanu  $j = 1, 2, \dots, l$ .

Znalezienie funkcji  $F$  lub  $F^{-1}$  jest w stosunku do złożonych obiektów zadaniem trudnym, przy czym dużą pomoc daje rozwiązywanie równań regresyjnych. W praktyce, znając wektory  $\bar{V}$  i  $\bar{W}$ , poszukuje się pewnych zasad lub praw, które określają sposób tego odwzorowania.

Następnym elementem procedury poszukiwania jest metoda pomiaru, polegająca na rejestracji wybranego zespołu sygnałów diagnostycznych, dobierana głównie ze względu na następujące czynniki:

- rodzaj podlegającej rejestracji wielkości sygnału diagnostycznego /np. odmienne metody dla pomiaru sygnału drganiowego oraz hałasowego/,
- warunki przeprowadzania pomiaru /wpływ temperatury, wilgotności, dostępu do badanego obiektu, wielkości pomieszczenia pomiarowego itp./,
- metodę dalszego przetwarzania sygnału.

Badany sygnał diagnostyczny obarczony jest często błędami wynikającymi np. z niedokładności zamocowania przetwornika drgań, sposobu przetwarzania sygnału wibroakustycznego w sygnał elektryczny, niewłaściwego doboru punktów pomiarowych lub zniekształceń elektrycznych w aparaturze pomiarowej. Sumują się one dodatkowo z błędami sposobu odwzorowywania badanych stanów w sygnał diagnostyczny. Istotnym elementem układu pomiarowego, ze względu na konieczność minimalizacji wymienionych błędów jest także jego zaprojektowanie, aby umożliwiał on wyeliminowanie składowych pochodzących od podanych przyczyn. W niewielu tylko sytuacjach praktycznych rejestrowany przebieg amplitudowo-czasowy sygnału diagnostycznego jest wystarczająco przejrzysty dla postawienia poszukiwanej diagnozy.

Zazwyczaj ocenę stanu badanego obiektu uzyskuje się w wyniku analizy pomierzonych wartości wybranych estymat losowych analogowo i/lub cyfrowo przetworzonego sygnału diagnostycznego.

Najważniejszą cechą przetwarzania analogowego jest to, że teoretycznie każda z nieskończonej liczby wartości przebiegu sygnału diagnostycznego jest uwzględniona w procesie obróbki. Ten sposób znajduje szerokie zastosowanie głównie w takich sytuacjach, gdzie dla postawienia diagnozy wystarczy analiza jednej lub niewielkiej liczby estymat sygnału diagnostycznego. Wynika to z faktu, że zwykle każde analogowe urządzenie pomiarowe służy do określania wartości jednej estymaty.

Przy przetwarzaniu cyfrowym natomiast, zakodowany sygnał po zarejestrowaniu w pamięci maszyny cyfrowej daje możliwość jego wielokrotnej obróbki, w celu realizacji różnych procedur obliczeniowych. Tym samym uzyskuje się wiele informacji diagnostycznych przy zastosowaniu jednego urządzenia pomiarowego. Rozwój mikroprocesorów stwarza korzystne warunki coraz powszechniejszego stosowania metod cyfrowego przetwarzania sygnału również w diagnostyce kontrolnej.

Kolejnym etapem systemowego podejścia do rozwiązania zagadnienia diagnostycznego jest analiza wyników i wyciągnięcie wniosków końcowych, w celu ostatecznego ustalenia kryteriów oceny urządzenia. Jest to szczególnie ważny etap z uwagi na konieczność oceny a zarazem minimalizacji ilości danych uzyskiwanych z pomiarów i optymalizacji procedury pomiarowej. Do tego celu wykorzystuje się doświadczenie osób prowadzących badania, jak również - coraz powszechniej - matematyczne kryteria decyzyjne wyboru, realizowane za pomocą maszyn cyfrowych.

Wykonanie postawionych zadań badawczych może mieć miejsce w ramach opracowanych założeń koncepcyjnych praktycznego systemu diagnostyki kontrolnej.

#### 4. Założenia systemu wibroakustycznej diagnostyki kontrolnej

Ogólny system wibroakustycznej diagnostyki kontrolnej maszyn wirujących można /przyjmując za podstawę potrzeby producenta/ podzielić na:

- I - podsystem do badań ogólnych, przeprowadzanych bezpośrednio na linii produkcyjnej, na stanowisku końcowej regulacji i kontroli,
- II - podsystem szczegółowych badań maszyny na stanowisku laboratoryjnym,
- III - specjalistyczny podsystem do badań podstawowych, technologiczno-konstrukcyjnych cech maszyn u producenta lub poza zakładem produkcyjnym.

W wielu sytuacjach praktycznych wymagane jest przeprowadzenie badań diagnostycznych podzespołów maszyny wirującej oraz elementów osprzętu, traktowanych jako oddzielny obiekt badawczy. Takimi obiektami mogą być w silniku samochodowym np. alternator, rozrusznik, pompa układu chłodzenia, układ korbowodowy i inne. Badanie tych elementów sprowadza się zwykle do stwierdzenia, czy dany egzemplarz nadaje się do zamontowania, czy też powinien być odrzucony. W stosunku do podanego podziału podsystemów, postępowanie to odpowiada podsystemowi I. O ile istnieje uzasadniona potrzeba, omawiane obiekty mogą być również przedmiotem badań w podsystemach II i III.

Do opracowania teoretycznych i praktycznych założeń badawczych podsystemów, potrzebna jest ogólna znajomość zasad pracy maszyn, takich jak np. zachodzące w nich podstawowe procesy, konstrukcja mechaniczna, warunki pomiarowe istniejące u producenta /narzucające stosowanie odpowiednich do tych warunków metod pomiaru i przetwarzania sygnału/ oraz ogólne wymagania stawiane przez producenta /czas przeprowadzania pomiaru, brak konieczności zatrzymywania pracy maszyny, łatwość obsługi urządzeń pomiarowych, niewprowadzanie zmian technologicznych procesu wytwarzania itp./.

W większości prowadzonych badań kryteria oceny stanu mierzonego obiektu oparte są na porównywaniu wartości lub przebiegu którejś z wybranych estymat, odwzorowującej w najlepszy sposób stan urządzenia, z wartością wielkości uznanej za wzorcową. Ustalenie takiego wzorca jest podstawowym zadaniem badawczym podsystemu specjalistycznego /III/, gdyż dopiero określenie przedziałów wartości estymat dla statystycznie dobrego urządzenia jest punktem wyjściowym do wzajemnego ich porównywania. Stawianie diagnozy oparte na tej zasadzie jest najczęściej stosowanym sposobem oceny stanu maszyn wirujących.

#### 4.1. Badania ogólne na linii produkcyjnej

Diagnostyczne badania wibroakustyczne na linii produkcyjnej mają na celu szybkie sprawdzenie, czy każdy lub losowo wybrany z serii obiekt spełnia warunki umożliwiające jego prawidłową eksploatację. Należy pamiętać, że może to być spełnienie warunku ogólnego /np. nieprzekraczanie określonego poziomu hałasu/ lub warunków szczegółowych, dotyczących stanu wybranych podzespołów, lub obu tych kryteriów jednocześnie.

Jeżeli warunki te są spełnione, uznaje się, że obiekt jest zdalny do eksploatacji, w przeciwnym przypadku przekazuje się go do dalszej analizy. W ten sposób przeprowadza się ogólną jakościową kontrolę techniczną. Rzeczywisty czas pomiaru przy produkcji wielkoseryjnej jest krótki i może wynosić w wielu przypadkach zaledwie kilkadziesiąt sekund. Dla przykładu, przy produkcji 120 000 silników samochodowych rocznie i założeniu pracy ciągłej na cztery zmiany oraz przy czterech stanowiskach odbiorczych, zachodzi konieczność badania ok. 40 silników na godzinę. Sytuacja ta narzuca określone warunki na sposób prowadzenia badań i metodę pomiarową. Mianowicie:

- badania przeprowadza się podczas pracy urządzenia;
- maszyny podczas badań nie zawsze posiadają optymalne, ze względu na ich pracę, parametry, np. nie osiągają pożądanej temperatury pracy lub prędkości obrotowych;
- pomiar czujnikiem drgań lub mikrofonem należy ograniczyć do minimalnej ilości punktów pomiarowych;
- celowe jest stosowanie aparatury pomiarowej podającej wynik w postaci binarnej /np. sygnał wizualny - zapalająca się lampka czerwona przy diagnozie negatywnej, zielona przy pozytywnej/;
- układ pomiarowy powinien być łatwy w obsłudze, a zarazem odporny na działanie warunków otoczenia;
- układ pomiarowy powinien umożliwiać przesyłanie sygnału diagnostycznego do pozostałych elementów systemu.

Zaleca się, aby czujnik drgań, ze względu na krótki czas trwania pomiaru, mocowany był za pomocą przystawki magnetycznej, co jednakże ogranicza od góry zakres przenoszonych częstotliwości sygnału. Jeżeli istnieje możliwość wkręcania czujników w technologicznie nawiercone otwory, to uzyskuje się szersze pasmo przenoszenia, lecz

zwiększa czas przeprowadzania badania.

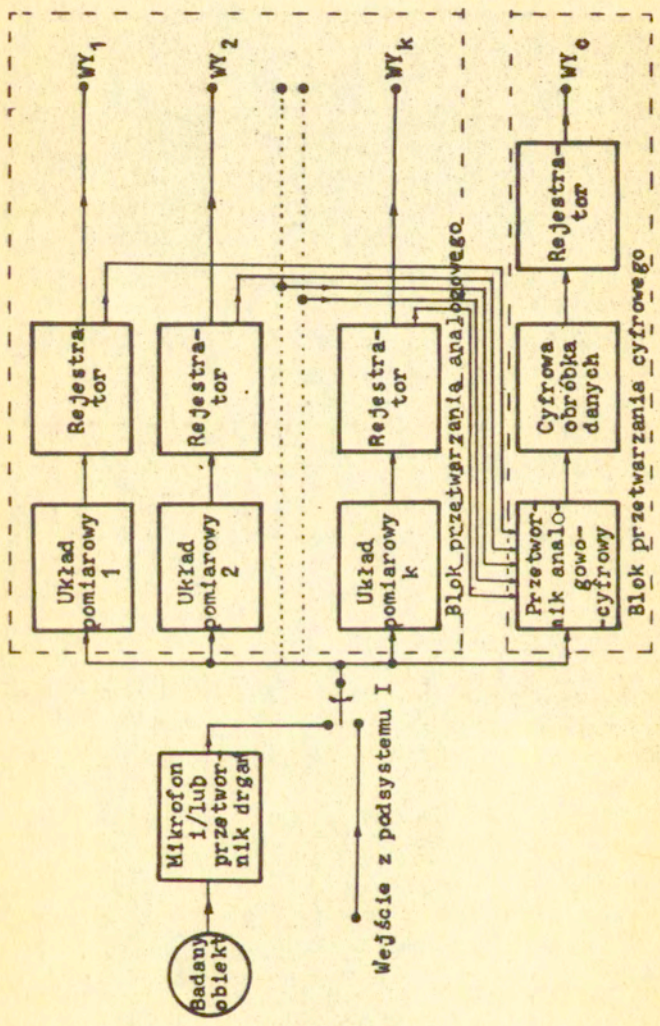
Mikrofon pomiarowy ma tę zaletę, iż w stosunku do czujnika drgań. pozwala na pomiar sygnału w szerokim zakresie częstotliwości i może być instalowany w bezpośrednim otoczeniu maszyny. Niestety, bardzo często w rzeczywistości, akustyczne warunki pomiarowe w halach produkcyjnych lub innych pomieszczeniach pomiarowych, ze względu na wysoki poziom hałasu utrudniają bądź uniemożliwiają przeprowadzanie badań przy zastosowaniu tego typu przetwornika. Rozwiązaniem tej sytuacji jest akustyczna adaptacja hali produkcyjnej lub chociażby tej części, w której przeprowadza się pomiary. Jednym z praktycznych sposobów umożliwiających przeprowadzanie pomiarów sygnału akustycznego w warunkach przemysłowych jest zastosowanie przenośnej komory pomiarowej o odpowiedniej izolacyjności akustycznej ścian /np. akustycznej przenośnej komory pomiarowej - wzór użytkowy Nr. 30744 [11] /.

Jak podano uprzednio, system przetwarzania sygnału diagnostycznego może być realizowany analogowo, cyfrowo lub w układzie mieszanym. Jednak ze względu na fakt, że w aktualnych warunkach dostępna aparatura analogowa jest na ogół odporniejsza na działanie czynników zewnętrznych i łatwiejsza w obsłudze, w podsystemie diagnostycznym na linii produkcyjnej stosuje się zwykle tego typu aparaturę. W zależności od potrzeb producenta należy dobierać liczbę równoległe działających podsystemów I, która będzie gwarantowała odpowiednią do wielkości serii szybkość kontrolowania maszyn.

#### 4.2. Badania na stanowisku laboratoryjnym /stacji prób/

Celem badań na stanowisku laboratoryjnym, to znaczy na stacji prób i kontroli, jest umożliwienie dokonania bardziej szczegółowej i wszechstronnej oceny stanu technicznego maszyny. Schemat podsystemu pomiarowego, proponowanego dla takiego stanowiska podano na rys. 5. Istotną cechą tego podsystemu, jest to, że w tym układzie diagnostyczno-kontrolnym istnieje możliwość podania diagnozy w formie binarnej, jak również określenie dokładnych wartości poszczególnych estymat sygnału diagnostycznego i na tej podstawie postawienia diagnozy jakościowej.

Podsystem umożliwia przekazywanie sygnału diagnostycznego bezpośrednio lub po przetworzeniu analogowym, na wejście bloku anali-



Rys. 5. Schemat blokowy podsystemu badań silnika samochodowego na stanowisku laboratoryjnym. Podsystem II.



zy cyfrowej. Jeżeli nie ma możliwości stosowania urządzeń cyfrowych w tym podsystemie, to po rejestracji sygnału, dalsza jego obróbka może być realizowana w specjalistycznych ośrodkach cyfrowego przetwarzania danych.

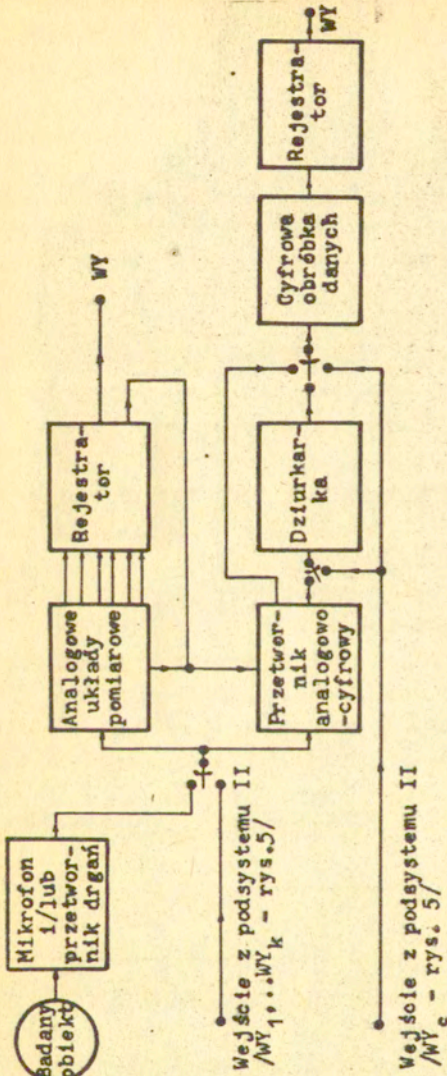
Typowe urządzenia pomiarowe, stosowane w omawianym układzie to:

- miernik poziomu hałasu i drgań,
- zestaw filtrów oktawowych lub tercjowych, przy czym odczyt może być otrzymywany kolejno, bądź we wszystkich pasmach jednocześnie, z ewentualną wizualizacją widma sygnału na ekranie monitora,
- zestaw filtrów specjalistycznych, których pasma częstotliwościowe są dobierane do każdego rodzaju badań oddzielnie, przy czym poziomy w poszczególnych pasmach, tak jak poprzednio, mogą być również wyświetlane na ekranie monitora kontrolnego,
- mierniki innych parametrów, np. współczynnika szczytu, kształtu.

Istotnym elementem tego podsystemu jest również możliwość badania maszyn kontrolowanych na stanowiskach pomiarowych na linii produkcyjnej. Założeniem takiego podsystemu pomiarowego jest badanie maszyn w optymalnych warunkach pracy. Ze względu na mniejsze ograniczenia czasowe, istnieje możliwość precyzyjnego ustalenia takich wielkości jak prędkość obrotowa, obciążenie, temperatura maszyny. Rejestracja danych, stanowiąca ostatni element układów pomiarowych, umożliwi zebranie bogatego materiału statystycznego, który po analizie pozwala na określenie zależności pomiędzy określonymi stanami maszyn wirujących a mierzonym sygnałem diagnostycznym.

#### 4.3. Specjalistyczne badania podstawowe

Badania prowadzone w specjalistycznym podsystemie, którego schemat blokowy podano na rys. 6, służą do dalszego dokładniejszego określania stanu urządzeń, a jednocześnie mają charakter badań podstawowych, których celem jest poszukiwanie i wdrażanie nowych metod przetwarzania i pomiaru oraz optymalizacja warunków pomiarowych, umożliwiającą usprawnienie działania pozostałych podsystemów. Jednym z zadań jest również określanie parametrów sygnału diagnostycznego i granicznych wartości tolerancji, charakteryzujących urządzenie wzorcowe.



Rys. 6. Schemat blokowy podsystemu specjalistycznego badań podstawowych silnika samochodowego. Podsystem III. Oznaczenia według rys. 5.

#### 4.4. Ogólny algorytm działania systemu akustycznej diagnostyki kontrolnej

Uwzględniając zadania realizowane przez każdy z omówionych podsystemów diagnostycznych, na rys. 7 podano ogólny algorytm działania całego systemu diagnostycznego wraz z powiązaniem pomiędzy poszczególnymi jego elementami. Jak wynika z przedstawionego schematu, każdy z trzech podsystemów może działać oddzielnie lub w połączeniu z pozostałymi. Prawidłowe funkcjonowanie każdego z elementów systemu oddzielnie i odpowiednia współpraca pomiędzy nimi zapewnia warunki kompleksowego prowadzenia diagnostyki kontrolnej w zakładach przemysłowych. W wielu przypadkach, na skutek braku realnych możliwości bądź potrzeb, nie jest celowe tworzenie pełnej struktury systemu, lecz zlecenie wykonania zadań II i/lub III podsystemu jednostkom zewnętrznym.

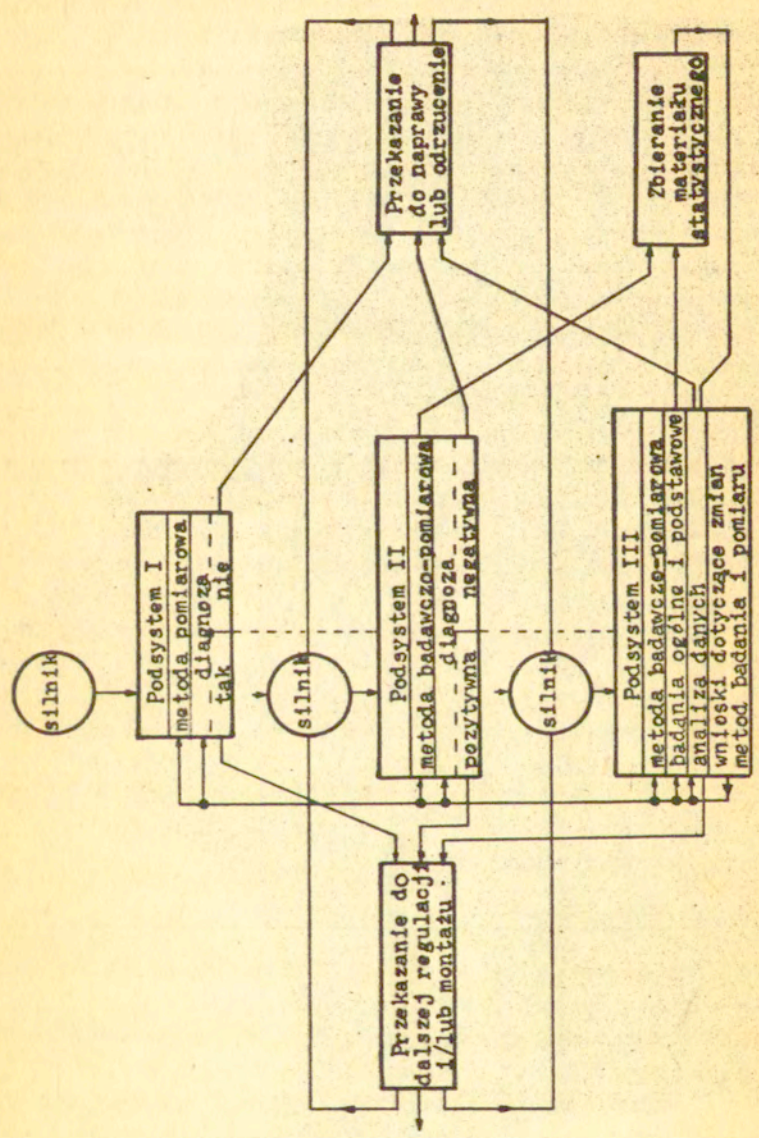
Istnieje także możliwość przekazywania do kolejnych podsystemów sygnału pochodzącego od maszyny, w stosunku do której postawiono diagnozę negatywną w systemie poprzedzającym /linia przerywana na schemacie/. Jest to celowe w przypadku przeprowadzania kontroli lub zbierania materiału statystycznego do dalszych badań.

Dla pełniejszego zrozumienia problematyki diagnostyki kontrolnej i kolejności postępowania w praktycznej działalności badawczej, w następnych rozdziałach omówione będą przykłady badań kontrolnych silników samochodowych oraz alternatorów. Celowo wybrano przykłady różniące się w istotny sposób postawionym do rozwiązania zadaniem diagnostycznym. W przypadku silników samochodowych przedmiotem zainteresowania była konkretna niesprawność podzespołu, natomiast w badaniach alternatorów celem była ocena ogólnego stanu technicznego urządzenia.

#### 5. Diagnostyczne badania kontrolne silników samochodowych

Przy rozpatrywaniu procesu pracy silnika pod kątem generacji sygnału wibroakustycznego, można wyróżnić:

- hałasy i drgania mechaniczne, wynikające ze współpracy elementów i podzespołów, np. układu tłokowo-korbowego i rozrządu;
- hałasy o charakterze turbulencyjnym, wynikające z procesów aero-, hydro- i termodynamicznych, takich jak ssanie, spalanie, wydech, przepływ oleju.



Rys. 7. Ogólny algorytm działania systemu wibroakustycznej diagnostyki kontrolnej silników samochodowych.

Dużą zawartość informacyjną sygnału wibroakustycznego wykorzystuje się powszechnie w praktyce przy przeprowadzaniu subiektywnej oceny prawidłowości pracy silników na stanowiskach kontrolnych u producenta, przez osoby o wysokich kwalifikacjach zawodowych. Jednak ze względu na różnorodność i niejednoznaczność interpretacji wyników badań odsłuchowych, zależność słyszenia od takich czynników jak zmęczenie, brak koncentracji, otaczający hałas itp., ocena taka jest często obarczona błędami.

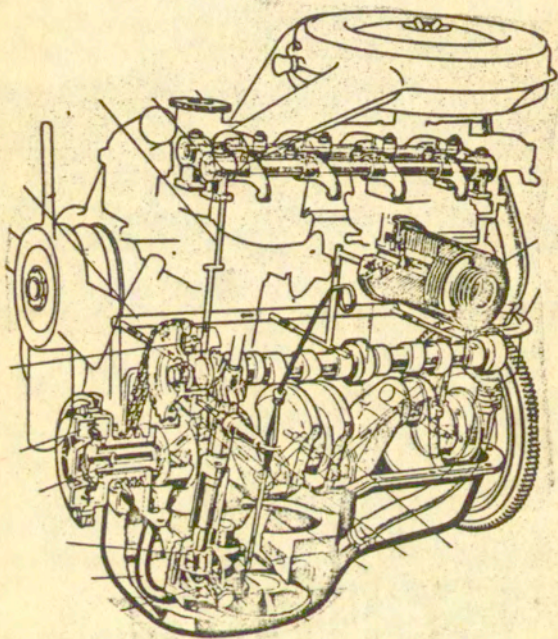
W obecnej pracy zastosowano obiektywne metody badawcze, oparte na pomiarze, analizie i przetwarzaniu analogowo-cyfrowym sygnału wibroakustycznego silników sprawnych oraz z symulowanymi usterkami. W pracy uwzględniono również wyniki wcześniej prowadzonych badań, dotyczących oceny hałaśliwości i wstępnej diagnostyki akustycznej silników samochodowych na stacjach diagnostycznych, zakończonych opracowaniem prototypu aparatury pomiarowej AS [5].

#### 5.1. Obiekt badań

Biorąc pod uwagę aktualne potrzeby diagnostyczne, wynikające z doświadczeń praktycznych na stanowisku kontroli jakości silników, zajęto się niesprawnościami układu korbowo-tłokowego, a głównie stanem technicznym łożyska ślizgowego /panewki korbowej/, ponieważ usterka ta występuje często przy montażu i wstępnych próbach rozruchowych silników stosowanych w samochodach typu Fiat 125p /1500 cm<sup>3</sup>/. Badania przeprowadzono w ramach zadań III Podsystemu, według uprzednio stosowanej klasyfikacji pomiarów diagnostycznych, pod kątem opracowania metody i aparatury do diagnostyki kontrolnej stosowanej w I i/lub II Podsystemie.

Zbudowanie i analiza modelu matematycznego, aproksymującego w praktycznie przydatny sposób zależności pomiędzy procesami zachodzącymi w silniku, a drganiami korpusu lub hałasem jest trudna. Ogólne modele - funkcjonalny i topologiczny, ułatwiające poznanie zasad pracy takiego obiektu podano na rys. 1 i 3.

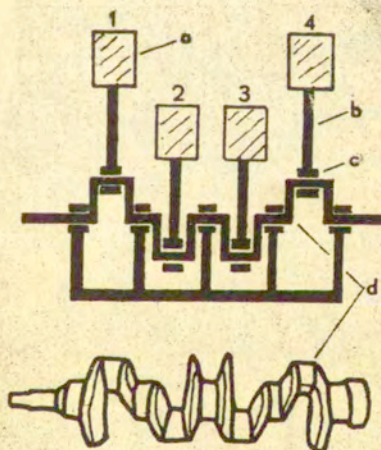
W silniku spalinowym elementem wirującym, pobudzonym okresowo do ruchu posuwisto-obrotowego jest układ korbowo-tłokowy, pokazany schematycznie na rys. 8. Najsilniej obciążoną częścią tego układu jest wał korbowy. W tej sytuacji, podstawowymi czynnikami gwarantującymi prawidłową pracę silnika jest wyważenie wału



Rys. 8. Schemat układu korbowo-tłokowego silnika samochodu Fiat 125<sub>p</sub>.

/czynność wykonywana automatycznie z dużą dokładnością, przed zamocowaniem w silniku/ oraz zachowanie odpowiedniego luzu pomiędzy poszczególnymi elementami ślizgowymi układu korbowo-tłokowego. Powiększaniu się luzu, na skutek niszczenia mechanicznego, niszczenia zmęczeniowego wynikającego ze zjawiska kawitacji stopu łożyskowego lub niewłaściwych wymiarów, towarzyszy powstanie słyszalnych nieregularnych stuków. Zjawisko to występuje szczególnie wyraźnie przy nagłym zwiększaniu lub zmniejszaniu prędkości obrotowej silnika oraz powiększaniu się luzu ponad ustaloną dla każdego układu wartość.

Omawiane badania dotyczą głównie jednego z elementów układu korbowo-tłokowego, jakim są łożyska ślizgowe na korbowodach. Ze względu na fakt, że niezależnie od tego, która z panewek jest niesprawna, słyszalny efekt stukania jest podobny, w początkowej fazie eksperymentów ograniczono się do badania panewki korbowej w czwartym cylindrze /rys. 9/.



Rys. 9. Schemat i budowa wału korbowego silnika czterocylindrowego.

Oznaczenia: a - tłok; b - korbówód; c - badana panewka;  
d - wał korbowy;  
1, 2, 3, 4 - numery cylindrów.

## 5.2. Metoda pomiarowa

Biorąc pod uwagę ogólne założenia docelowe metody pomiarowej, a głównie jej przydatność w warunkach przemysłowych oraz istniejące warunki akustyczne w pomieszczeniach pomiarowych w zakładach produkcyjnych, w których zwykle poziom ciśnienia akustycznego sygnału zakłócającego jest wyższy od lub zbliżony do poziomu sygnału akustycznego emitowanego przez pracujący silnik, w badaniach oparto się przede wszystkim na rejestracji i analizie sygnału drganiowego. Dla określenia założeń do metody pomiarowej i kryteriów oceny zastosowano procedurę pomiarowo-decyzyjną podsystemu III, przedstawioną szczegółowo na rys. 10.

Podczas pomiaru silniki zainstalowane na specjalnym stanowisku pomiarowym w Fabryce Samochodów Osobowych na Żeraniu, pracowały bez obciążenia. Przed badaniami dokonywano kontroli i regulacji podzespołów. W odróżnieniu od metody odsłuchowej, w której silniki bada się w układzie dynamicznych zmian prędkości obrotowej wału, ze względu na trudność praktycznej realizacji takiego układu, pomiary wykonano przy stałej prędkości obrotowej, wynoszącej: 1000, 2000 i 3000 obr/min. Zasilanie silnika w paliwo, wodę układu chłodzącego itp., odbywało się centralnie ze stanowiska kontroli.

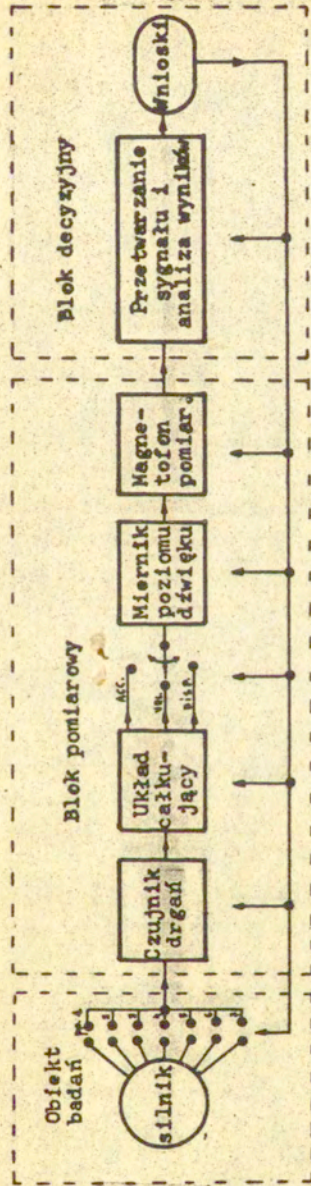
Przy wyznaczaniu poszczególnych punktów pomiarowych na korpusie i innych elementach silnika uwzględniono przede wszystkim następujące czynniki:

- bezpośrednią bliskość od miejsca, w którym występowała usterka,
- wybór miejsca gwarantujący powtarzalność pomiaru w warunkach przemysłowych,
- łatwość dostępu,
- stopień gładkości powierzchni metalowej, ze względu na zależność od tego czynnika pasma częstotliwości przenoszonych przez zamocowany za pomocą przystawki magnetycznej czujnik drgań.

## 5.3. Pomiar, analiza i przetwarzanie sygnału

Do pomiaru, analizy i przetwarzania analogowo-cyfrowego sygnału drganiowego silników samochodowych, zastosowano układy elektroniczne pozwalające na rejestrację przebiegów amplitudowo-czasowych sygnału oraz jego analizę widmową w tercjowych pasmach częstotliwości z jednoczesnym odczytem wartości skutecznej, im-





Rys. 10. Schemat procedury pomiarowo-decyzyjnej podsystemu III, zastosowany podczas badań silników samochodowych.

pulsowej i szczytowej sygnału miernikiem poziomym, w dowolnie wybranym paśmie w zakresie od 20 do 20000 Hz.

Silniki badane były dwukrotnie, z panewkami w dobrym stanie technicznym, a następnie z panewkami wadliwymi, przekraczającymi dopuszczalne tolerancje wykonania. W drugim przypadku luz między panewką a czopem korbowodu przekraczał katalogową wartość nominalną 0,1 mm.

Dla silników sporządzono zestawy wyników składające się m.in.

z:

- a/ widma sygnału wibroakustycznego, uzyskane metodą analizy wąskopasmowej;
- b/ widma sygnału wibroakustycznego, uzyskane metodą analizy tercjowej;
- c/ przebiegu amplitudowo-czasowego sygnału w paśmie tercjowym o częstotliwości środkowej  $f_{sr} = 800$  Hz;
- d/ tabeli średnich poziomów wartości skutecznej przyspieszeń drgań korpusu, w pełnym zakresie mierzonych częstotliwości;
- e/ tabeli średnich wartości współczynnika impulsowości I oraz szczytu C, określonych jako:

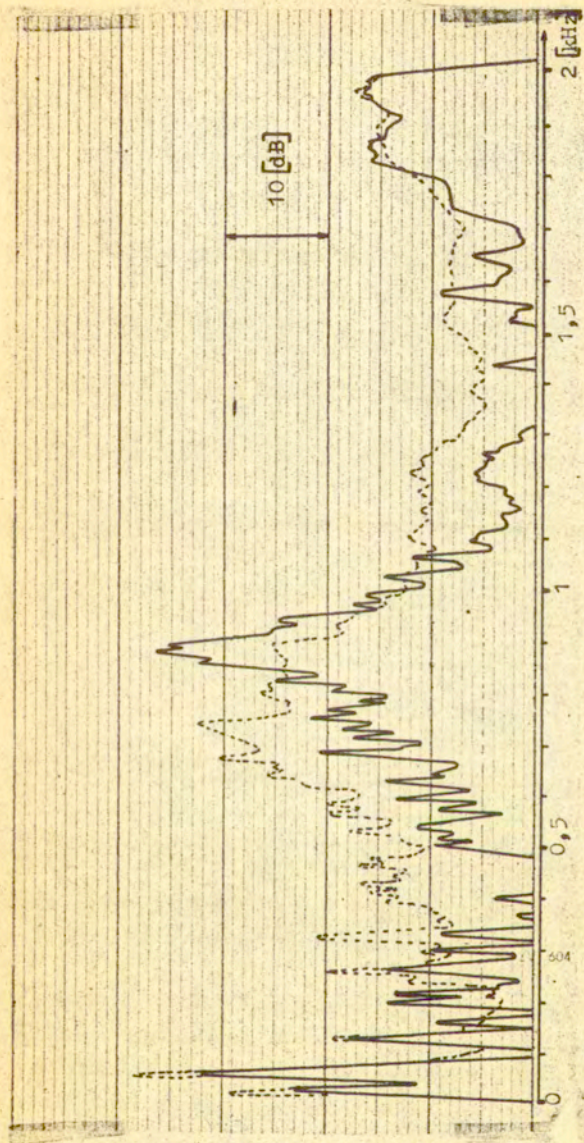
$$I = \frac{\hat{U}}{U} \quad C = \frac{\hat{U}}{U_{RMS}}$$

gdzie:  $\hat{U}$  - wartość maksymalna sygnału,  
 $U$  - wartość średnia sygnału,  
 $U_{RMS}$  - wartość skuteczna sygnału;

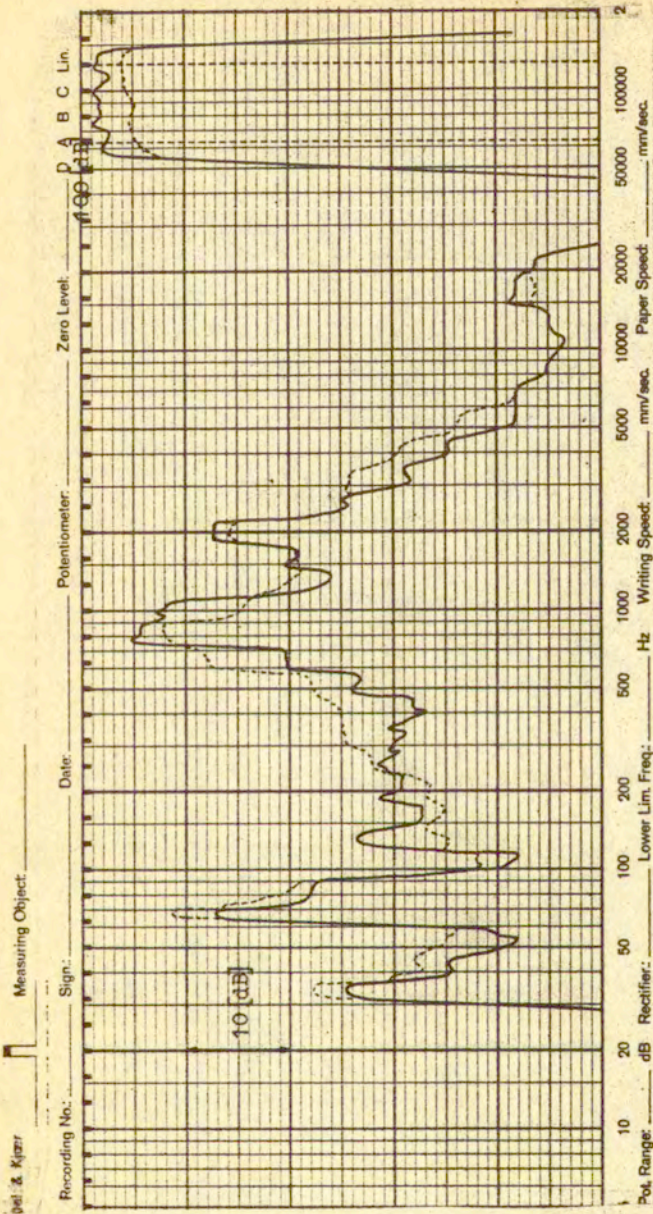
- f/ tabeli średnich poziomów wartości skutecznej przyspieszenia drgań korpusu w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych  $f_{sr} = 800, 1000, 1250$  Hz;
- g/ tabeli maksymalnych i minimalnych wartości skutecznej, impulsowej i szczytowej sygnału w paśmie tercjowym o częstotliwości środkowej  $f_{sr} = 800$  Hz.

Przykład jednego z zestawów obejmują rysunki 11, 12 i 13 oraz tabele I, II, III i IV. Ze względu na sposób mocowania czujnika drgań, poprzez przystawkę magnetyczną, rozpatrywany efektywny zakres częstotliwości wynosi 20 + 2000 Hz. Wyniki pomiarów przyspieszenia podawane są w decybelach dB, względem poziomu odniesienia:

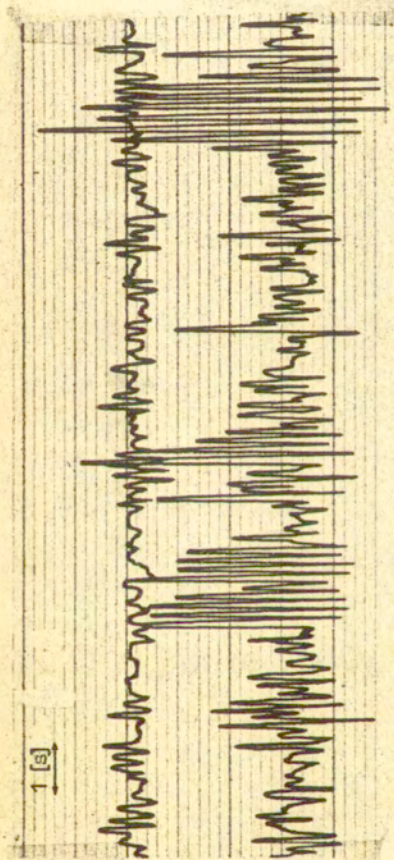
$$a_0 = 2 \cdot 10^{-6} [g]$$



Rys. 11. Widmo sygnału przyspieszenia drgań korpusu silnika, uzyskane metodą analizy wąskopasmowej, przy stałej szerokości pasa  $\Delta f = 8$  Hz. Silnik nr. 2.  
Linia ciągła - silnik sprawny, linia przerywana - silnik z usterką.  
Miejsce pomiarowe mp 4.



Rys. 12. Widmo sygnału przyspieszenia drgań korpusu silnika, uzyskane metodą analizy trójowej. Silnik nr. 2.  
Linia ciągła - silnik sprawny, linia przerywana - silnik z usterką.  
Miejsce pomiarowe mp 4.



Rys. 13. Przebieg amplitudowo-czasowy sygnału przyspieszenia drgań korpusu silnika, w paśmie tarczowym o częstotliwości środkowej pasma  $f_{sr} = 800$  Hz. Silnik nr. 2. Przebieg górny - silnik sprawny, dolny - z usterką. Miejsce pomiarowe mp 4.

Tabela I. Średnie poziomy wartości skutecznej przyspieszenia drgań korpusu  $L_{RMS}$  [dB] w pełnym zakresie mierzonych częstotliwości.

Oznaczenia:  $\Delta = L_{RMS}/max/ - L_{RMS}/min/$ , dla każdego miejsca pomiarowego;  
 $\sigma$  - odchylenie standardowe.

Miejsce pomiarowe	$L_{RMS}$ [dB]										$\Delta$	$\bar{x}$	$\sigma$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
mp 1	95	97	99	98	99	99	99	99	98	100	5	98	2	sprawne
mp 2	94	96	96	98	97	98	98	99	99	99	5	97	2	
mp 3	100	99	100	101	101	99	100	100	100	100	2	100	1	
mp 4	98	100	99	98	96	99	99	99	100	96	4	98	2	
mp 5	92	91	93	94	94	99	97	95	90	92	9	94	3	
mp 6	97	100	98	99	98	100	101	98	97	97	4	99	2	
mp 7	96	95	94	94	94	99	96	99	98	94	5	96	2	
mp 1	97	99	97	101	100	100	100	100	102	95	6	99	2	niesprawne
mp 2	96	98	95	99	98	97	96	97	97	100	5	97	2	
mp 3	99	100	99	99	100	100	100	99	102	100	3	100	1	
mp 4	98	95	99	98	99	97	98	98	99	98	4	98	1	
mp 5	95	91	91	97	93	98	95	94	94	96	7	94	3	
mp 6	98	97	98	100	99	95	97	97	98	96	5	98	2	
mp 7	95	95	94	95	92	95	95	95	98	94	6	95	2	

Tabela II. Średnie wartości współczynników impulsowości I oraz szczytu C, sygnału przyspieszenia drgań korpusu silnika w miejscu pomiarowym mp 4.

$\sigma$  - odchylenie standardowe.

Współczynniki	Wartość współczynników dla kolejnych silników										$\bar{x}$	$\sigma$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
I	1,36	1,18	1,21	1,21	1,21	1,34	1,17	1,15	1,12	1,24	1,22	0,07	spr.
C	1,45	1,84	1,88	2,08	1,98	1,91	1,97	2,16	2,05	2,00	1,93	0,18	
I	1,21	1,28	1,41	1,33	1,11	1,44	1,17	1,01	1,19	1,22	1,22	0,15	niespr.
C	2,30	2,00	2,12	1,98	1,91	2,54	2,12	1,59	2,29	1,94	2,09	0,23	

Tabela III. Średnie poziomy wartości skutecznej przyspieszenia drgań korpusu  $L_{RMS}$  [dB], w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych  $f_{sr} = 800, 1000, 1250$  Hz, silnika nr 2.

$f_{sr}$ tercji Hz	$L_{RMS}$ [dB]							
	mp 1	mp 2	mp 3	mp 4	mp 5	mp 6	mp 7	
800	79	78	79	95	85	83	89	spr.
1000	83	76	86	93	95	89	96	
1250	80	76	82	76	81	76	78	
800	89	78	85	95	97	77	88	niespr.
1000	86	80	80	86	71	77	70	
1250	88	83	85	82	89	70	80	

Tabela IV. Wartości napięcia wyjściowego  $U_{wy}$  [mV] układu pomiarowego zastosowanego przy odczycie wartości maksymalnej, minimalnej przyspieszenia drgań korpusu, przy zastosowaniu trzech charakterystyk czasowych miernika: RMS, PEAK i IMP, dla silnika nr. 2 i częstotliwości środkowej  $f_{sr} = 800$  Hz.

Rodzaj stałej czasowej odczytu	$U_{wy}$ [mV]								
	mp 1	mp 2	mp 3	mp 4	mp 5	mp 6	mp 7		
RMS	max	16	6	8	86	44	66	22	sprawne
	min	12	5	7	74	34	54	16	
PEAK	max	28	14	16	165	98	140	42	
	min	18	10	12	130	60	100	29	
IMP	max	19	8	10	105	56	88	25	
	min	14	7	8	85	44	70	19	
RMS	max	11	9	16	62	32	16	18	niesprawne
	min	8	8	10	46	26	10	14	
PEAK	max	24	30	34	140	102	40	42	
	min	12	15	18	80	58	20	28	
IMP	max	15	15	18	82	42	18	24	
	min	10	9	14	58	32	16	18	

#### 5.4. Analiza wyników

Analiza uzyskanego materiału pomiarowego wykazała, że ze względu na występowanie w widmie sygnału obszarów o zwiększonej gęstości energii, całkowity zakres częstotliwości pomiarowej można podzielić na dwa podzakresy. Podzakres pierwszy obejmuje pasmo od 20 do 200 Hz i zawiera głównie składowe pochodzące bezpośrednio od prędkości obrotowej wału, wynoszącej  $2000 \pm 150$  obr/min., czyli  $33,3 \pm 2,5$  Hz oraz drugiej i czwartej harmonicznej. Zakres ten charakteryzuje się dużymi i nieregularnymi zmianami poziomu amplitudy, wynoszącymi ponad 10 dB. Drugi podzakres obejmuje pasmo od 200 do 2000 Hz, przy czym zmiany poziomów poszczególnych składowych widma są bardzo niewielkie, a względne stosunki poziomów pomiędzy kolejnymi składowymi sygnału w pasmach tercjowych są stałe zachowane, niezależnie od tego, jaki jest ogólny poziom sygnału całkowitego. Maksimum gęstości energetycznej tego podzakresu występuje w obszarze  $600 \div 2000$  Hz.

Istotną cechą charakteryzującą sygnał wibroakustyczny emitowany przez silniki spalinowe, w porównaniu na przykład z silnikami elektrycznymi, są stosunkowo duże różnice pomiędzy wartościami estymat sygnału dla poszczególnych egzemplarzy tak w ramach klasy silników sprawnych, jak z usterkami. Wynika to z zasady funkcjonowania tych maszyn, jak również ze szczególnie dużej roli prawidłowości montażu dużej liczby elementów i podzespołów oraz właściwej regulacji /ustawienie zapłonu, gaźnika itp./. Warunki te narzucają konieczność stosowania statystycznych metod oceny stanu urządzenia. Analizując wyniki podane w tabeli I, stwierdzono brak możliwości stawiania diagnozy o stanie technicznym panewek, bezpośrednio na podstawie oceny wartości poziomu przyspieszenia drgań korpusu silnika. Wynika to z faktu, że usterka panewki nie powoduje wystarczająco dużej zmiany całkowitej wartości poziomu sygnału wibroakustycznego, a odchylenia wzajemne w ramach klas silników sprawnych oraz z usterką, znacznie przekraczają wartości zmian poziomu drgań wynikające z powodu rozpatrywanej usterki.

Porównanie wartości poziomu przyspieszenia drgań korpusu silnika sprawnego, oznaczonego jako  $L_{RMS+}$ , z analogicznie mierzonym poziomem silnika niesprawnego, oznaczonego jako  $L_{RMS-}$ , daje następujące wyniki:



$$\begin{aligned}
 L_{RMS+} < L_{RMS-} &= 49 \% \text{ \textit{przebadanych przypadków,}} \\
 L_{RMS+} = L_{RMS-} &= 14 \% \quad \text{ " " ,} \\
 L_{RMS+} > L_{RMS-} &= 37 \% \quad \text{ " " }
 \end{aligned}$$

Porównanie wartości współczynników impulsowości i szczytu nie wykazuje również wystarczająco dużych, potwierdzonych statystycznie różnic, które stanowiłyby podstawę stawiania diagnozy.

Rozpatrując wyniki analizy wąskopasmowej oraz tercjowej stwierdzono, że nie można wnioskować o stanie łożyska na podstawie oceny wartości bezwzględnej sygnału wibroakustycznego w pasmach. Analiza matematyczna, uzyskanych dla silników sprawnych oraz z usterką, wykazuje istnienie potwierdzonej eksperymentalnie relacji między wartością względnych poziomów przyspieszenia drgań korpusu silnika w poszczególnych pasmach częstotliwości, w obszarze 600 + 1500 Hz a stanem panewki. W tabeli V podano średnie poziomy wartości skutecznej przyspieszeń drgań korpusu silnika w pasmach tercjowych o  $f_{\text{śr}} = 800$  i 1250 Hz.

Tabela V. Średnie poziomy wartości skutecznej przyspieszenia drgań korpusu silnika [dB], w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych  $f_{\text{śr}} = 800$  i 1250 Hz oraz różnice tych poziomów  $\Delta L$ , wyznaczone w miejscu pomiarowym mp 4. Oznaczenia:

$L_{800+}$  - poziom sygnału w tercji o  $f_{\text{śr}} = 800$  Hz, dla silnika sprawnego,

$L_{800-}$  - poziom sygnału w tercji o  $f_{\text{śr}} = 800$  Hz, dla silnika z usterką,

$L_{1250+}$  i  $L_{1250-}$  - jak wyżej lecz dla  $f_{\text{śr}} = 1250$  Hz,

$$\Delta L_{+} = L_{800+} - L_{1250+}, \quad \Delta L_{-} = L_{800-} - L_{1250-}, \quad L_{\text{śr}} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} L_i$$

Poziom	Wartość poziomu [dB] dla i-tego silnika										$L_{\text{śr}}$ 6	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
$L_{800+}$	97	95	99	98	92	92	86	96	92	91	94	4
$L_{800-}$	88	95	91	95	92	88	95	95	91	90	92	3
$L_{1250+}$	77	76	79	82	78	75	72	76	80	75	77	3
$L_{1250-}$	86	82	83	87	83	84	83	85	81	78	83	3
$\Delta L_{+}$	20	19	20	16	14	17	14	20	12	16	17	3
$\Delta L_{-}$	2	13	8	8	9	4	12	10	10	12	9	3
$\Delta L_{+} - \Delta L_{-}$	18	6	12	8	5	13	2	10	2	4	8	5

Jak wynika z podanej tabeli, różnice poziomów  $\Delta L$ , między pasmami tercjowymi o  $f_{\text{śr}} = 800$  Hz i  $f_{\text{śr}} = 1250$  Hz wynoszą średnio 17 dB dla silników sprawnych, a 9 dB dla silników z symulowaną usterką.

### 5.5. Kryterium oceny diagnostycznej

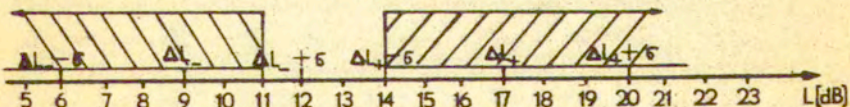
Otrzymane w ten sposób rezultaty umożliwiają opracowanie metody diagnostycznej oceny stanu technicznego korbowodu łożyska ślizgowego silnika samochodowego, polegającej na pomiarze różnicy poziomów wartości skutecznej przyspieszenia sygnału drganiowego  $\Delta L$  w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych wynoszących 800 i 1250 Hz, przy prędkości obrotowej wału silnika wynoszącej 2000 obr/min., w miejscu pomiarowym znajdującym się na korpusie w pobliżu badanego czwartego cylindra.

Sposób oceny, przy spełnieniu warunku, że silniki poddane były przed pomiarem regulacji parametrów pracy, opiera się na spełnieniu dwóch kryteriów:

1. Ogólny poziom przyspieszenia drgań korpusu nie może przekraczać wartości progowej ustalonej dla danego typu silnika. Dla badanego silnika Fiat 125<sub>p</sub> /1500cm<sup>3</sup>/, przyjęto wstępnie wartość progową 102 dB.
2. Stan techniczny panewki korbowodowej uznaje się za:
 

zadawalający,	jeśli	$\Delta L > 14$ dB;
nieokreślony,	"	$11 \text{ dB} \leq L \leq 14$ dB;
niezadawalający,	"	$\Delta L < 11$ dB.

Na rys. 14 przedstawiono proponowane w punkcie 2 kryterium w formie graficznej.



Rys. 14. Proponowane kryterium oceny stanu technicznego panewki korbowodowej. Oznaczenia według tabeli V.

## 5.6. Statystyczna weryfikacja kryterium oceny diagnostycznej

Podstawowym celem przeprowadzonych obliczeń jest zweryfikowanie proponowanej metody pomiarowej oraz przedziałów wartości krytycznych, na podstawie których z założonym prawdopodobieństwem można będzie oceniać stan techniczny panewki korbowodowej w silniku samochodowym. Opisane obliczenia, ze względu na stosunkowo małą liczbę przebadanych obiektów, należy traktować jedynie jako przykład postępowania. W rzeczywistych warunkach liczba ta powinna wynosić co najmniej 30.

Dla zweryfikowania hipotezy statystycznej posłużono się testami:

- rozkład t-Studenta,
- rozkład  $\chi^2$ .

Dla oceny przedziałów krytycznych pasma pośredniego zastosowano rozkład t-Studenta. W badaniach oparto się na wartościach poziomów przyspieszenia drgań korpusu w pasmach tercjowych, podanych w tabeli V. Wyniki obliczeń i zastosowanych wzorów podano w tabeli VI. Uzyskane wyniki oznaczają, że rozpatrywana hipoteza poprawności kryterium jest słuszna.

## 5.7. Koncepcja aparatury diagnostycznej

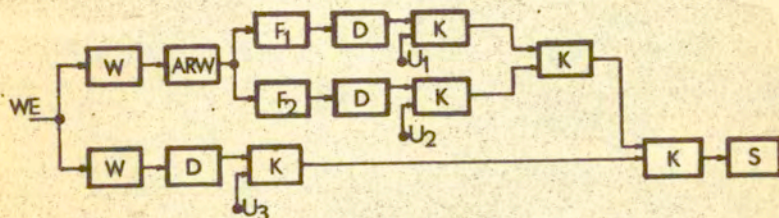
Przyjmując kryteria omówionej metody za podstawę sposobu oceny, opracowano założenia koncepcyjno-techniczne aparatury do wibroakustycznej diagnostyki łożysk ślizgowych w procesie kontroli jakości produkcji silników samochodowych. Schemat blokowy aparatury podano na rys. 15, [8].

Urządzenie umożliwia przeprowadzanie selekcji silników samochodowych, dzieląc je na dwie grupy, z których pierwsza obejmuje silniki z panewkami o zadawalającym stanie technicznym, a druga o stanie niejednoznacznym lub niezadawalającym. Przez zastosowanie zróżnicowanej kolorystycznie sygnalizacji optycznej, aparatura pozwala na podjęcie szybkiej i jednoznacznej decyzji, co jest podstawowym wymaganie stawianym urządzeniom diagnostycznym na linii produkcyjnej. Urządzenie w wersji z sygnalizacją optyczną i filtrami tercjowymi o częstotliwościach środkowych pasm wynoszących 800 i 1250 Hz stanowić może wyposażenie stosowane w ramach I Podsystemu diagnostycznego. Zastosowanie miernika wartości  $\Delta L$ , wy-

Tabela VI. Wyniki obliczeń statystycznej weryfikacji kryterium oceny diagnostycznej, wykonane na podstawie danych z tabeli V i [10] przy założeniu, że rozkład jest normalny, poziom ufności  $\alpha = 1 - p = 0,1$ , ilość próbek  $n = 10$ .

Rodzaj wielkości	Wzór obliczeniowy	Wyznaczone wartości dla silników sprawnych z usterką
Wartość średnia $\bar{x}$	$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} L_i$	16,8      8,8
Wariancja $\sigma^2$	$\sigma^2 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (L_i - \bar{x})^2$	7,56      11,2
Odczylenie standardowe $\sigma$	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	2,8      3,3
Wartość krytyczna rozkładu $t \{ \alpha, n-1 \}$	$t \{ 0,1; 9 \}$	1,833      1,833
Przedziały ufności	$\bar{x} \pm \frac{1,833 \cdot \sigma}{3}; \bar{x} \pm \frac{1,833 \cdot \sigma}{3}$	15,1; 18,5      6,8; 10,8
Przyjęte wartości graniczne		17      9
Wartości obliczone rozkładu $t \{ \alpha, n-1 \}$	$t \{ 0,1; 9 \} = \frac{\bar{x} - \Delta L}{\sigma} \sqrt{n-1}$	0,22      0,15

rażanej liczbowo oraz możliwość zmian zakresów częstotliwości filtrów diagnostycznych lub zwiększenie ich ilości, pozwoli na wykorzystanie aparatury w II lub III Podsystemie.



Rys. 15. Schemat blokowy aparatury do wibroakustycznej diagnostyki łożysk ślizgowych silników samochodowych.  
Oznaczenia: W - wzmacniacz wejściowy, ARW - automatyczna regulacja wzmocnienia,  $F_1$ ,  $F_2$  - filtry diagnostyczne, D - detektor, K - komparator,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  - napięcia odniesienia, S - układ sterowania sygnalizacji optycznej.

Po uprzednim ustaleniu wartości granicznych parametrów wibroakustycznego sygnału diagnostycznego, omawiana metoda i aparatura może być zastosowana do oceny stanu łożysk korbowodowych silników innych typów. Duża uniwersalność aparatury pozwala także na wykorzystanie jej do diagnostyki innego typu usterek, przy spełnieniu warunku ustalenia zakresów częstotliwości i ich poziomów.

### 5.8. Podsumowanie

Proponowana metoda diagnostyki kontrolnej łożyska ślizgowego silnika samochodowego, stosowanego w pojazdach Fiat 125<sub>p</sub>, zakłada w ramach I Podsystemu diagnostycznego:

- pomiar przyspieszenia drgań korpusu silnika w jednym miejscu pomiarowym, w celu ustalenia wartości sygnału w pasmach tercjowych o  $f_{\text{śr}} = 800$  i 1250 Hz, przy prędkości obrotowej 2000 obr/min;
- mocowanie czujnika drgań za pomocą przystawki magnetycznej;
- zastosowanie aparatury pomiarowej, której koncepcję podano w podrozdziale 5.7, przy zastosowaniu kryterium oceny z podrozdziału 5.5;
- konieczność przeprowadzenia przed pomiarem sygnału wibroakustycznego, wstępnej regulacji silnika.

## 6. Wibroakustyczne badania diagnostyczne alternatorów

Prądnicą prądu przemiennego - alternator, stosowana w pojazdach samochodowych, z uwagi na swoje cechy konstrukcyjno-eksploatacyjne, stanowi przykładowy obiekt wibroakustycznych badań maszyn wirujących.

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie projektu stanowiska pomiarowego w zakładzie produkcyjnym, przeznaczonego do oceny stanu technicznego alternatorów w ramach II Podsystemu diagnostycznego.

### 6.1. Obiekt badań

Zasada działania alternatora polega na tym, że prąd wzbudzenia, pobierany z akumulatora, przepływając przez uzwojenie wirnika powoduje powstanie pola magnetycznego, które obracane wewnątrz stojana wytwarza w jego uzwojeniach trójfazowy prąd przemienny. Na rysunku 16 pokazano podstawowe elementy konstrukcyjne alternatora. Dodatkowym w stosunku do silnika samochodowego źródłem hałasu i drgań, są w alternatorach zjawiska elektromagnetyczne.

Jednym z podstawowych elementów wywołujących hałas i wibracje jest niewyważenie podzespołów wirujących, istotne ze względu na bardzo duże prędkości obrotowe alternatorów, przekraczające niekiedy 10 000 obr/min., jak również stosunkowo duży stosunek masy elementów wirujących do stałych. Siła wymuszająca drgania  $F$  jest zależna od stopnia niewyważenia wirnika. W obliczeniach uwzględnia się niewyważenie statyczne [3], zgodnie ze wzorem:

$$F = m\omega^2 r = 4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot m \cdot r \quad [\text{N}]$$

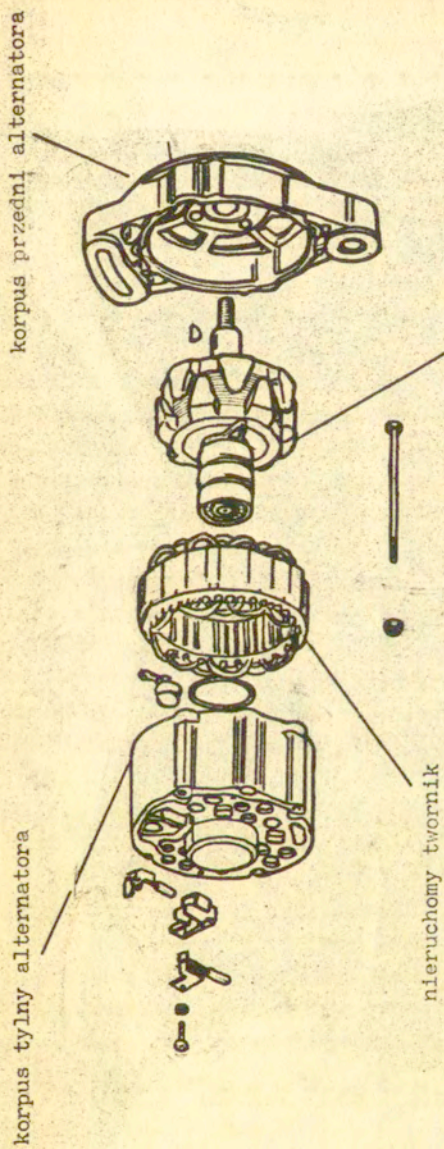
gdzie:  $m$  - masa wirującego elementu [kg],  
 $r$  - mimośród wirującego elementu [m],  
 $f_0$  - częstotliwość [Hz].

Wartość siły wymuszającej drgania alternatora badanego typu wynosi w przybliżeniu:

$$F = 4\pi^2 \cdot 100^2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \approx 160 \quad [\text{N}]$$

gdzie:  $m = 2$  [kg],  $r = 2 \cdot 10^{-4}$  [m],  $f_0 = 100$  [Hz].

Częstotliwość podstawowa  $f_0$ , związana z prędkością obrotową waha się w granicach od 15 do 250 Hz.



Rys. 16. Elementy konstrukcyjne alternatora samochodowego, stosowanego w pojazdach Fiat 125p.

## 6.2. Pomiary i analiza wyników

Przeprowadzono rejestrację sygnału wibroakustycznego w tercjowych pasmach częstotliwości w zakresie częstotliwości środkowych filtrów od 40 do 10 000 Hz, w trzech punktach pomiarowych, przy prędkości obrotowej 3000 obr/min. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe sygnału akustycznego i drganiowego podano na rys. 17 i 18. Na podstawie tak uzyskanych danych określono:

- wartość średnią i odchylenie standardowe w 25 pasmach tercjowych sygnału hałasu i drgań /tabela VI/;
- maksymalne wartości poziomu sygnału akustycznego.

Z ogólnej analizy wyników badań wynika, że w przypadku alternatorów można wyodrębnić cztery obszary gęstości widmowej, związane z określonymi cechami funkcjonalnymi i konstrukcyjnymi alternatora. Zakresy te, stanowiące podstawę wibroakustycznej oceny badanych urządzeń mają następujące cechy:

Zakres Z 1 :  $f_d = 40$  Hz,  $f_g = 250$  Hz. Obejmuje częstotliwość podstawową oraz jej trzy pierwsze harmoniczne, dominujące w zakresie dolnych częstotliwości widma;

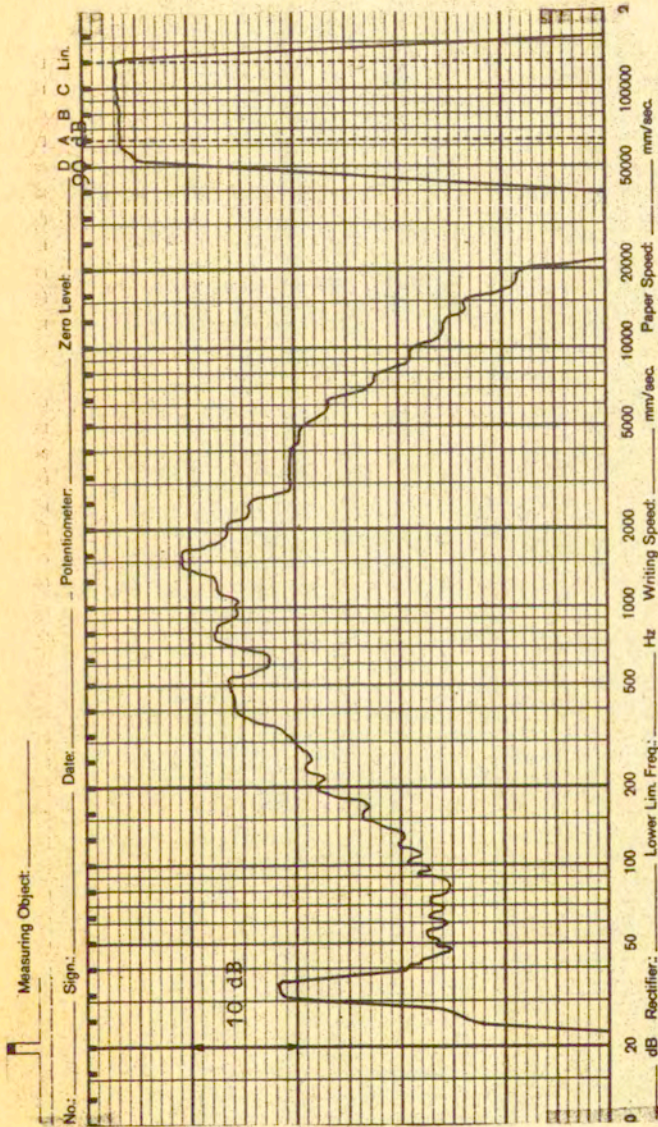
Zakres Z 2 :  $f_d = 400$  Hz,  $f_g = 1600$  Hz. Obejmuje częstotliwości środkowe pasma związane przede wszystkim z rezonansami mechanicznymi konstrukcji, sposobem montażu oraz wpływem pola elektromagnetycznego;

Zakres Z 3 :  $f_d = 2500$  Hz,  $f_g = 10000$  Hz. Obejmuje górną część widma, w której dominującą rolę odgrywa stan łożysk i zjawiska aerodynamiczne;

Zakres Z 4 :  $f_d = 250$  Hz,  $f_g = 10000$  Hz. Obejmuje wszystkie składowe widma pozostałe po wyeliminowaniu dominujących składowych harmonicznych częstotliwości podstawowej obrotów wirnika.

Charakterystyki częstotliwościowe filtrów Z 1 + Z 4, podano na rys. 19. Dla czterech obszarów widma gęstości mocy akustycznej wyznaczono poziom sygnału wibroakustycznego /tabela VII/. Porównanie wyników uzyskiwanych podczas pomiarów różnych egzemplarzy alternatorów z wartościami podanymi w tabeli VII, daje podstawę do wstępnej oceny ogólnego stanu technicznego alternatora.





Rys. 17. Widmo sygnału akustycznego alternatora, uzyskane metodą analizy trójczwójnej.

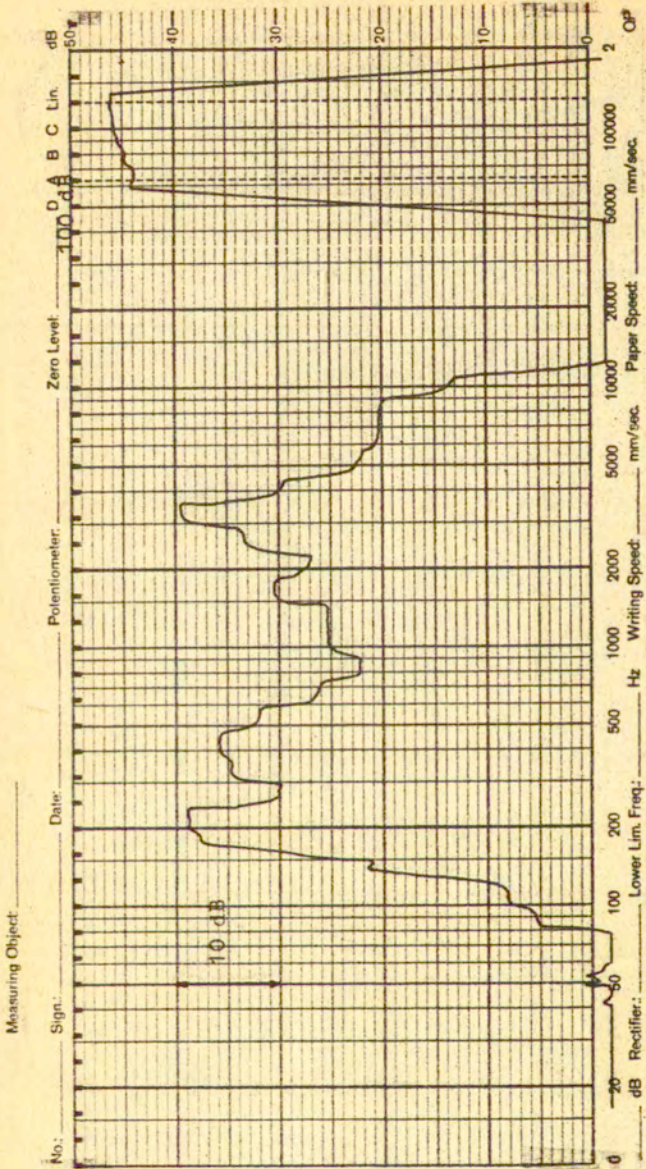
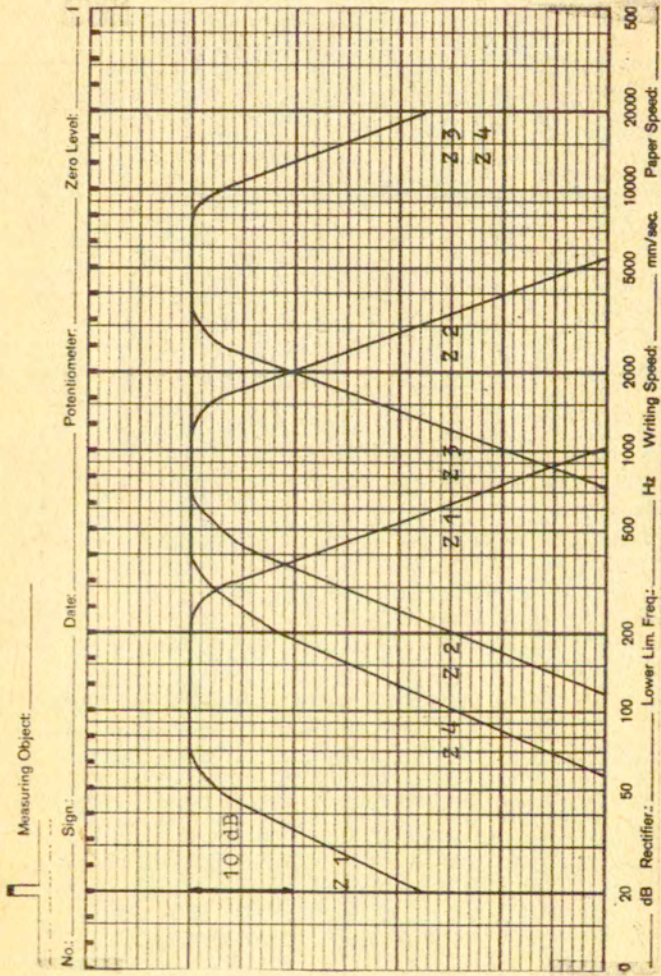


Рис. 18. Widmo sygnału przyspieszeń drgań alternatora, uzyskane metodą analizy trójczłowej.

Tabela VI. Wartość średnia L [dB] i wartość odchylenia standardowego  $\sigma$  [dB] sygnału hałasu i drgań korpusu alternatora w pasmach tercjowych, wyznaczone dla 12 egzemplarzy alternatorów.

Częstotliwość środkowa tercji [Hz]	Poziom hałasu		Poziom drgań	
	L	$\sigma$	L	$\sigma$
	[dB]		[dB]	
40	59	2	-	-
50	57	2	-	-
63	56	2	-	-
80	57	3	-	-
100	58	2	68	11
125	57	2	63	7
160	62	2	72	5
200	67	3	77	5
315	70	2	74	5
400	75	2	81	3
500	75	3	80	4
630	74	3	80	4
800	77	4	82	6
1000	75	2	85	9
1250	75	2	82	7
1600	77	2	82	2
2000	75	1	79	3
2500	72	1	81	5
3150	70	2	81	4
4000	70	2	77	4
5000	68	1	79	6
6300	66	1	87	6
8000	62	3	85	8
10000	58	1	79	9

Uwaga: miejsca w tabeli oznaczone symbolem "-", oznaczają, że wartość w danym paśmie tercjowym była niższa od dolnej granicy dynamiki układu pomiarowego.



Rys. 19. Charakterystyki częstotliwościowe filtrów diagnostycznych Z 1 + Z 4, zastosowanych w mierniku poziomu dźwięku i drgań MPD - 4F.

Tabela VII. Wartości poziomu L i odchylenia standardowego  $\sigma$  sygnału wibroakustycznego [dB], wyznaczone dla zakresów diagnostycznych Z 1 + Z 4.

Punkt pomiarowy	Rodzaj wielkości	Z 1	Z 2	Z 3	Z 4	L <sub>LIN</sub>
pp 1	L	72	85	77	86	86
	$\sigma$	2	2	1	2	2
pp 2	L	79	101	91	102	103
	$\sigma$	6	7	3	6	7
pp 3	L	82	91	93	95	95
	$\sigma$	6	4	3	3	4

### 6.3. Stanowisko do oceny hałaśliwości i wstępnej wibroakustycznej diagnostyki kontrolnej alternatorów

Biorąc za podstawę uzyskane dane o własnościach alternatorów, wartościach granicznych i cechach poszczególnych parametrów sygnału wibroakustycznego, opracowano i wykonano stanowisko pomiarowe, umożliwiające seryjne badania i kontrolną diagnostykę techniczną produkowanych w kraju alternatorów samochodowych. Prototyp stanowiska, realizującego zadania w ramach II i III Podsystemu diagnostycznego oddano do eksploatacji w Fabryce Samochodów Osobowych na Żeraniu. Stanowisko typu DKA - 1 /Diagnostyka Kontrolna Alternatorów/, składa się z trzech głównych części:

- układu mechanicznego napędu alternatora;
- układu elektrycznego ładowania i obciążania alternatora wraz z pozostałymi elementami elektrycznymi stosowanymi w instalacjach samochodowych /akumulator, regulator napięcia/;
- specjalistycznej aparatury elektronicznej:
  - a/ miernika poziomu dźwięku i poziomu drgań - typ MPD-4 F, posiadającego charakterystykę korekcyjną A, C i LIN oraz cztery filtry diagnostyczne Z 1 + Z 4;
  - b/ miernika obrotów alternatora - typ MOA;
  - c/ układu sterowania silnika napędzającego układ mechanicznego napędu alternatora.

Stanowisko badawcze umożliwia wszechstronne badania alternatorów w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. Istotną cechą układu jest możliwość płynnej regulacji obrotów, co pozwala wykrywać te prędkości obrotowe, przy których występują szczególnie silne rezonanse elementów konstrukcyjnych alternatora.

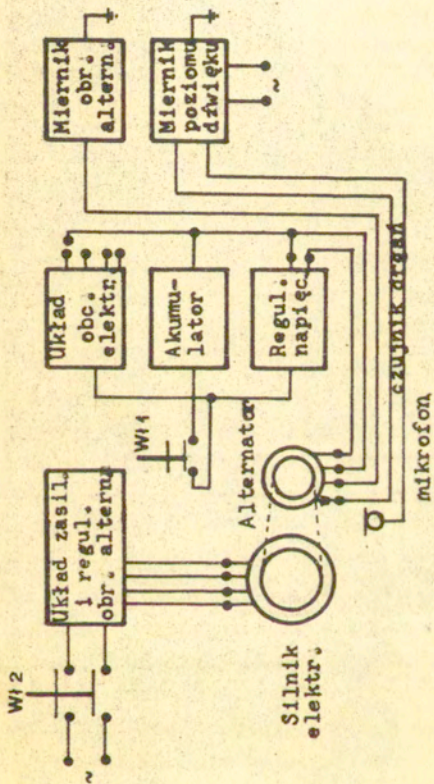
Porównanie wartości poziomów sygnału badanego urządzenia z wartościami wzorcowymi /tabela VII/, pozwala na wstępną ocenę stanu urządzenia. Ze względu na swoje cechy konstrukcyjne i funkcjonalne, np. możliwość zmiany prędkości obrotowej, obciążenia elektrycznego, typu badanego obiektu i jednocześnie obserwację wpływu tych zmian na wartości parametrów sygnału drganiowego i akustycznego, stanowisko może znaleźć zastosowanie przy badaniach podstawowych dotyczących opracowania wzorców statystycznych, kryteriów decyzyjnych itp. oraz przy opracowywaniu konstrukcji nowych typów alternatorów. Schemat blokowy stanowiska DKA - 1 oraz jego widok ogólny podano na rys. 20 i 21.

### 7. Zakończenie

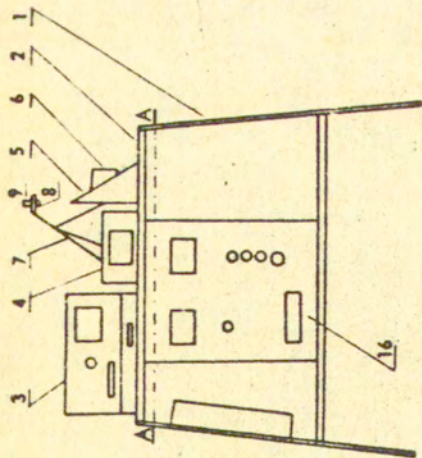
Omówione w niniejszej pracy ogólne zasady, dotyczące stosowania metod wibroakustycznej diagnostyki kontrolnej maszyn są wynikiem badań prowadzonych w Zakładzie Akustyki Cybernetycznej IPPT-PAN, w ramach problemu MR.I.24. Rozpatrywane przykłady potwierdzają przydatność wykorzystywania sygnału wibroakustycznego jako nośnika informacji o stanie technicznym urządzeń.

W zastosowaniach praktycznych w przemyśle, szczególnie przy produkcji wielkoseryjnej, z uwagi na specyficzne wymagania dotyczące sposobu przeprowadzania badań diagnostycznych, użyteczne okazały się metody analizy widmowej sygnału, generowanego podczas pracy maszyn. W widmie sygnału wibroakustycznego maszyn wirujących wyróżnić można obszary koncentracji energii akustycznej, związane zarówno z cyklicznym charakterem funkcjonowania tych urządzeń, jak również z pracą poszczególnych podzespołów. Fakt ten stanowi podstawę opracowywania metod i aparatury do wibroakustycznej diagnostyki w procesie kontroli produkcji. Prowadzone prace wykazały celowość opracowywania kryteriów oceny stanu technicznego przy wykorzystaniu statystycznych metod określania parametrów wzorców.

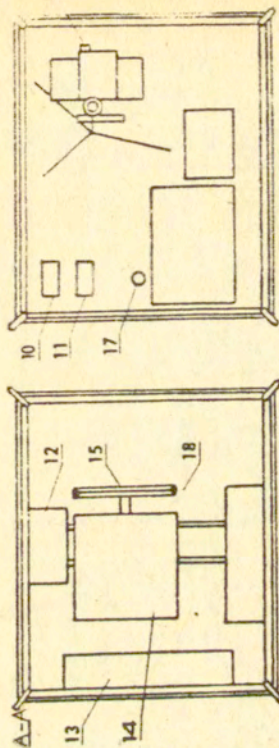
Opisane przykłady, dotyczące zarówno wybranego podzespołu maszyny /łożysko ślizgowe silnika samochodowego/, jak i kompletnego urządzenia /alternator/, mogą stanowić wytyczne sposobu postępowania w rozwiązywaniu zagadnień diagnostycznych innych typów maszyn wirujących.



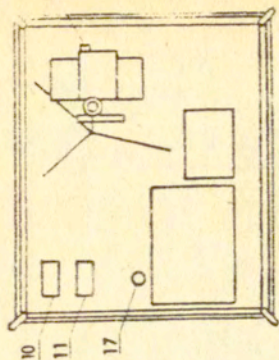
Rys. 20. Schemat blokowy stacji DKA - 1.



a/ widok z boku



b/ widok od dołu



c/ widok z góry

Rys. 21 Widok ogólny stanowiska pomiarowego DKA - 1.

Oznaczenia: 1 - stół montażowy, 2 - blat stołu, 3 - miernik poziomu, 4 - dźwięku, 5 - podstawa alternatora, 6 - alternator, 7 - stawy mikrofonu, 8 - uchwyty mikrofonu, 9 - mikrofon, 10 - regulator napięcia Poloneza, 11 - regulator napięcia Fiat 125p, 12 - akumulator, 13 - obciążenie elektryczne, 14 - silnik elektryczny, 15 - koło pasowe, 16 - regulator płynnej zmiany obrotów silnika, 17 - gniazdo sieciowe, 18 - pasek klinowy, 19 - czujnik drgań.



Bibliografia

1. CEMPEL C.: Diagnostyczne modele generacji procesów wibroakustycznych. W: Diagnostyka urządzeń mechanicznych. Ossolineum, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk, 1977.
2. CEMPEL C., MOTYLEWSKI J.: Podstawowe problemy diagnostyki wibroakustycznej. W: Diagnostyka urządzeń mechanicznych. Ossolineum, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk, 1977.
3. CEMPEL C.: Wibroakustyka stosowana. PWN, Warszawa-Poznań, 1978.
4. HEBDA M., MAZUR T., PELC F.: Teoria eksploatacji pojazdów. WKŁ, Warszawa, 1978.
5. KACPROWSKI J., MOTYLEWSKI J., MIAZGA J.: An objective method of noise control and acoustic diagnostics of motorcars. W: Proc. 8th International Congress on Acoustics, ICA, London 1974, vol. I.
6. KUROWSKI W.: Systemy diagnostyczne urządzeń mechanicznych. W: Diagnostyka urządzeń mechanicznych. Ossolineum, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk, 1977.
7. MOTYLEWSKI J.: Metody i systemy pomiaru, przetwarzania i analizy sygnału akustycznego do celów zastosowań w akustycznej diagnostyce maszyn i urządzeń technicznych. W: Akustyka mowy i diagnostyka akustyczna /red. J. Kacprowski/, IPPT-PAN, 1980.
8. NITECKI D., MOTYLEWSKI J.: Wibroakustyczna diagnostyka łożysk ślizgowych w procesie kontroli jakości produkcji silników samochodowych. W: Prace XXVI Otwartego Seminarium z Akustyki, Puławy, 1980, tom III.
9. PAWŁOW B.: Badania diagnostyczne w technice. WNT, Warszawa, 1967.
10. SADOWSKI W.: Tablice statystyczne. Warszawa, 1956.
11. MOTYLEWSKI J., NITECKI D.: Akustyczna przenośna komora pomiarowa. Wzór użytkowy nr. 36908, Urząd Patentowy PRL, Warszawa, 1979.

Pracę wykonano w ramach problemu MR.I.24:  
Metody akustyczne w technice i medycynie

## Spis treści

1. Wstęp . . . . .	str.	3
2. Modele diagnostyczne . . . . .	"	5
2.1. Model funkcjonalny . . . . .	"	6
2.2. Model topologiczny . . . . .	"	6
3. Ogólna procedura poszukiwania diagnozy . . . . .	"	8
4. Założenia systemu wibroakustycznej diagnostyki kontrolnej . . . . .	"	12
4.1. Badania ogólne na linii produkcyjnej . . . . .	"	14
4.2. Badania na stanowisku laboratoryjnym . . . . .	"	15
4.3. Specjalistyczne badania podstawowe . . . . .	"	17
4.4. Ogólny algorytm działania systemu akustycznej diagnostyki kontrolnej . . . . .	"	19
5. Diagnostyczne badania kontrolne silników samochodowych . . . . .		19
5.1. Obiekt badań . . . . .	"	21
5.2. Metoda pomiarowa . . . . .	"	24
5.3. Pomiar, analiza i przetwarzanie sygnału . . . . .	"	24
5.4. Analiza wyników . . . . .	"	32
5.5. Kryterium oceny diagnostycznej . . . . .	"	34
5.6. Statystyczna weryfikacja kryterium oceny diagnostycznej . . . . .	"	35
5.7. Koncepcja aparatury diagnostycznej . . . . .	"	35
5.8. Podsumowanie . . . . .	"	37
6. Wibroakustyczne badania diagnostyczne alternatorów . . . . .	"	38
6.1. Obiekt badań . . . . .	"	38
6.2. Pomiary i analiza wyników . . . . .	"	40
6.3. Stanowisko do oceny hałaśliwości i wstępnej wibroakustycznej diagnostyki kontrolnej alternatorów . . . . .	"	45
7. Zakończenie . . . . .	"	46
Bibliografia . . . . .	"	49