ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985
Seria: TRANSPORT z. 3 Nr kol. 829

Jacek MAĆKOWSKI

Instytut Transportu Samochodowego
Politechniki Śląskiej

PRÓBA WYKORZYSTANIA METOD WIBROAKUSTYCZNYCH DO OCENY PRAWIDŁOWOŚCI DOBORU NASTAWÓW REGULACYJNYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

Streszczenie. W pracy podjęto próbę zastąpienia metod badawczych dotyczczas stosowanych do oceny procesu spalania metodami akustycznymi.

Wynikiem pracy było ustalenie wpływu niektórych reprezentatywnych nastawów eksploatacyjnych na wartość parametrów sygnałów akustycznych.

1. Wprowadzenie

Ponieważ w czasie eksploatacji większość parametrów struktury silnika ulega zmianie, pociąga to za sobą potrzebę prawidłowego doboru parametrów podlegających regulacji, których optimum nie zawsze pokrywa się z wartościami zalecanymi przez wytwórcę a dotyczącymi w większości silników nowych. Dobór tych wielkości bez kompleksowej oceny procesu spalania jest niemożliwy.

Dotychczasowe metody diagnostyczne umożliwiają wprawdzie bardzo dokładnie pomiar ale tylko poszczególnych parametrów silnika, a ponieważ dopiero metody umożliwiające uchwycenie wszystkich czynników wpływających na proces spalania, równocześnie stwarzają możliwości prawidłowego doboru wartości regulowanych, dlatego im należy poświęcić szczególnie dużo miejsca, jako metodom przyszłościowym.

Celowe więc okazało się podjęcie próby opracowania takiej metody diagnozowania silników, która umożliwiłaby określenie procesu spalania w warunkach diagnostyki warsztatowej. Jednym z sygnałów, który może być brany pod uwagę w takich warunkach jest sygnał akustyczny.

Celem pracy było zatem podjęcie próby zastąpienia metod badawczych dotychczas stosowanych do oceny procesu spalania w silnikach metodami akustycznymi.

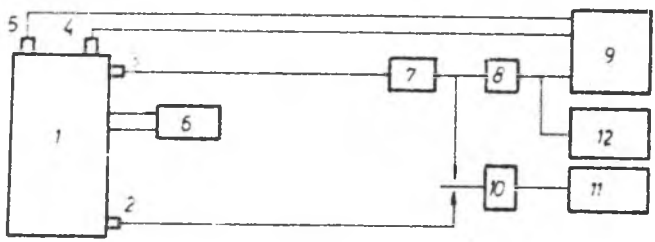
Ponadto celem pracy było ustalenie wpływu niektórych nastawów eksploatacyjnych na wartość parametrów sygnałów akustycznych oraz opracowanie odpowiedniej metody ustalania doboru miejsc pomiarowych.

W naszym przypadku obiektem badań był silnik z samochodu Polski Fiat 126p.

Realizację celu badań wykonano w dwóch etapach. Badanie rozpoznawcze przeprowadzono w laboratorium. Dla oceny wpływu stanu technicznego silnika na proces spalania w badaniach laboratoryjnych wykorzystano dwa silniki będące w różnych stanach technicznych. Natomiast badania zasadnicze wykonano u użytkowników na populacji 50 silników wybranych losowo.

2. Badania laboratoryjne

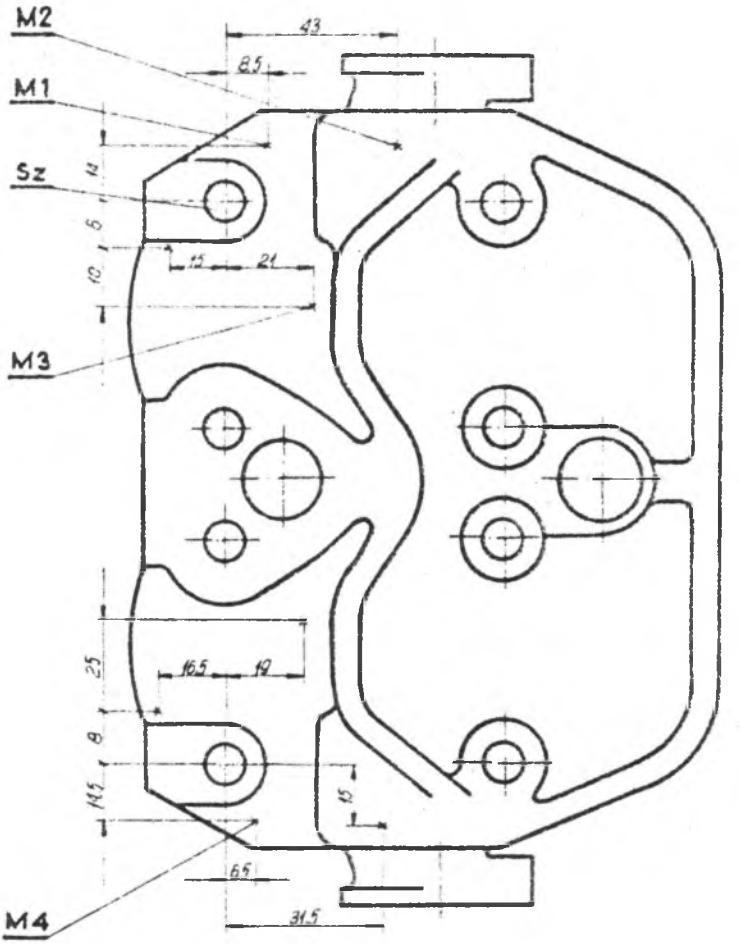
Badania laboratoryjne przeprowadzono na specjalnie do tego celu wykonanym stanowisku badawczym wyposażonym we wszystkie niezbędne instalacje i przyrządy. Do oceny procesu spalania zbudowano układ pomiarowy, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 1. Przetwornik piezoelektryczny wbudowano do komory spalania zmieniał ciśnienie na sygnał elektryczny. Otrzymane w ten sposób sygnały po wzmocnieniu rejestrowane były na oscylografie pętlicowym. Ponadto na taśmie oscylografu rejestrowano położenie ZZ i chwilę zapłonu.



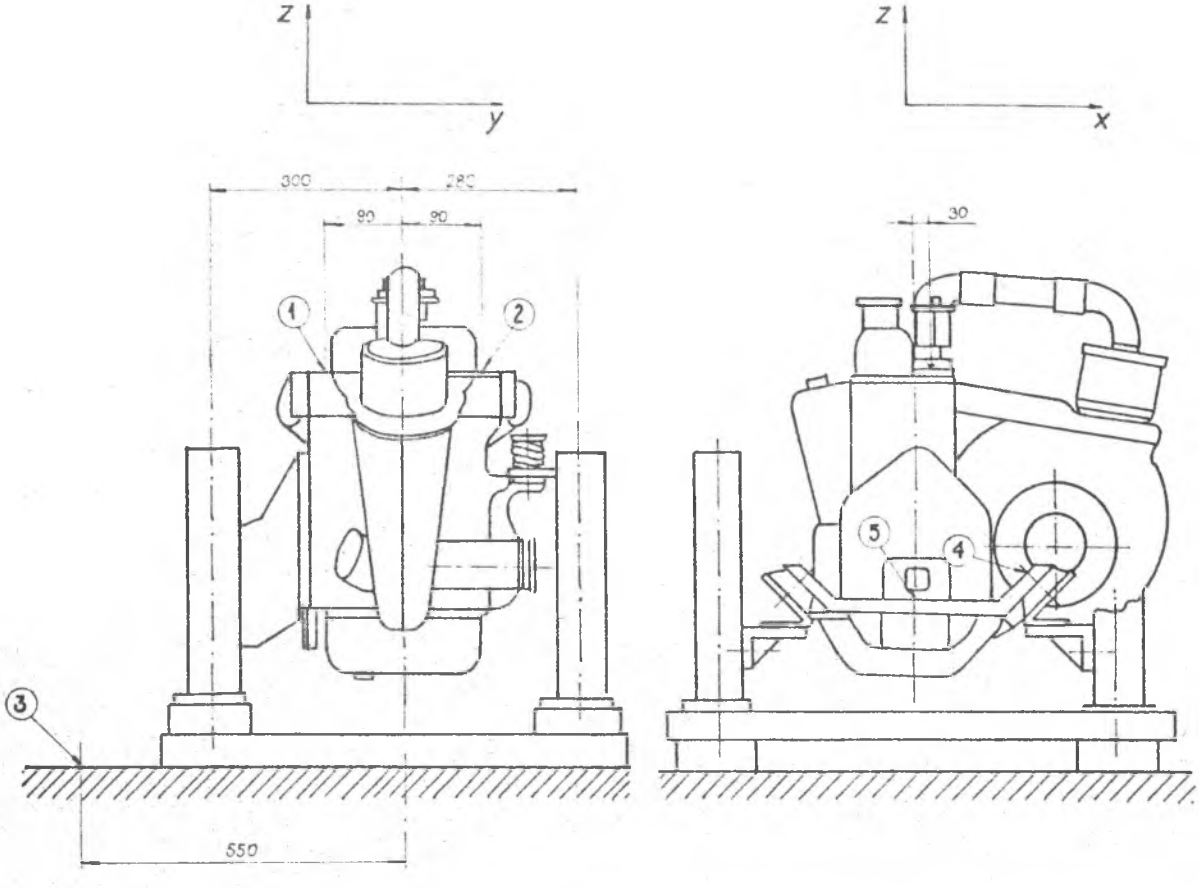
Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego

1 - badany silnik, 2 - piezoelektryczny przetwornik przyspieszeń firmy BK typ 4340, 3 - piezoelektryczny przetwornik ciśnienia PD firmy RFT, 4 - czujnik chwili zapłonu, 5 - czujnik położenia tłoka, 6 - stroboskopowy obrotomierz 2607 firmy Yokogawa, 7 - elektrometr typ 219A, 8 - wzmacniacz Accdata 174 firmy Philips, 9 - oscylograf pętlicowy Visicorde 2206 AC marki Honeywell, 10 - analizator częstotliwości firmy BK typ 2107, 11 - pisak poziomu firmy BK typ 2305, 12 - oscyloskop OKD 505

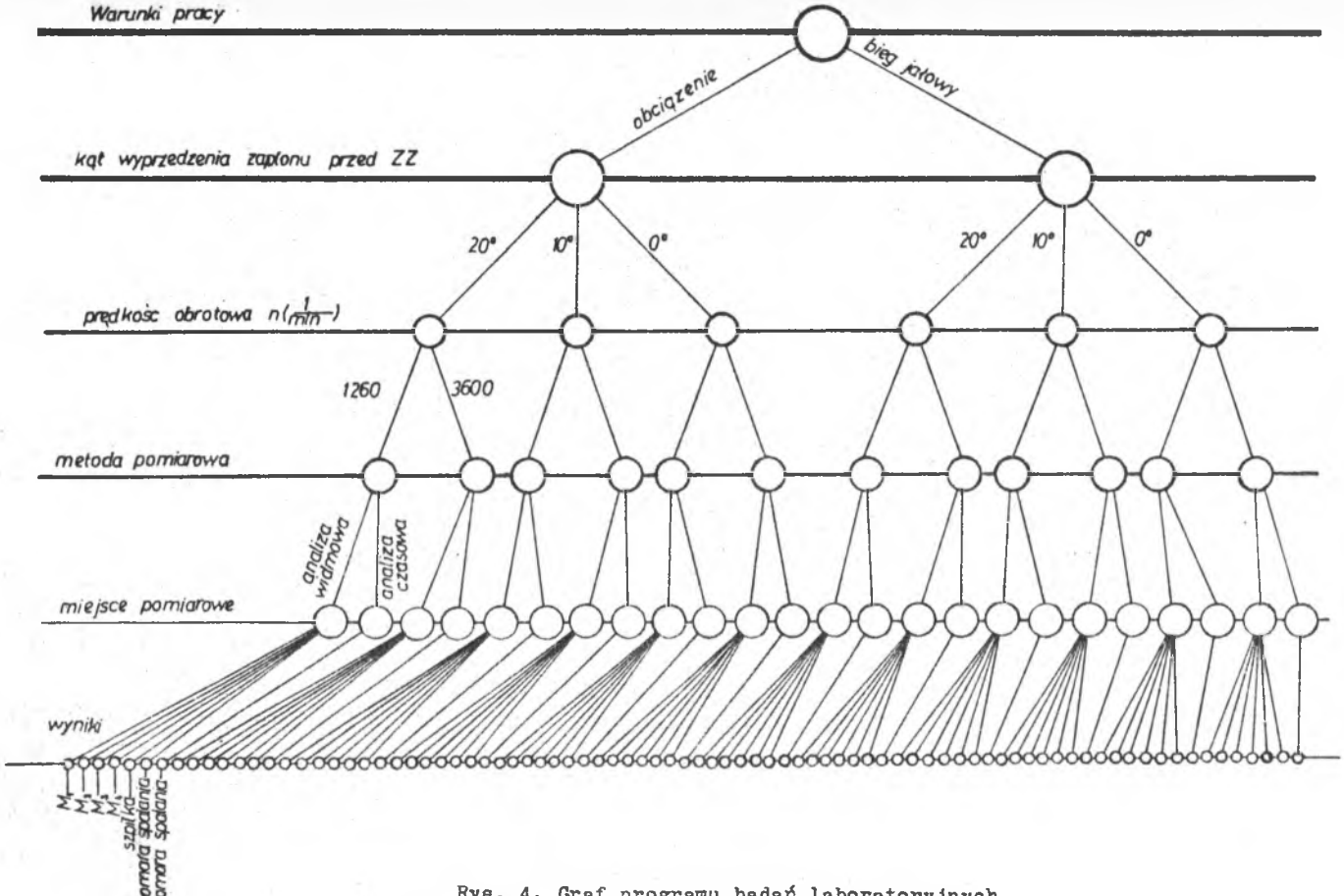
Analizy widmowe ciśnienia spalania wykonano analizatorem sprzęgniętym z pisakiem poziomu otrzymując w wyniku zapis poziomu wartości skutecznej sygnału w funkcji częstotliwości. Natomiast poziom przyspieszeń drgań głowicy mierzono za pomocą piezoelektrycznego przetwornika drgań przyjmowanego do powierzchni głowicy wkrętem w pobliżu komory spalania. Sygnał z przetwornika po wzmocnieniu poddany został analizie za pomocą tego samego zestawu analizującego, ponieważ podatność obiektu w każdym jego punkcie jest inna. Należało zatem spodziewać się, że w różnych punktach głowicy różna będzie transmitacja przyjścia między impulsem ciśnienia spalania a przyspieszeniem drgań. W związku z tym zachodziła potrzeba wytypowania do pomiarów punktów najlepiej nadających się do odbioru sygnału.



Rys. 2. Rozkład miejsc pomiarowych w głowicy



Rys. 3. Rozkład miejsc pomiarowych na stanowisku badawczym



Rys. 4. Graf programu badań laboratoryjnych

Niektóre z 17 punktów wziętych do analizy przedstawiono na rys. 2. Po analizie wyników pomiarów wybrano 5 najlepiej nadających się do odbioru sygnału. Dla ustalenia dróg rozchodzenia się sygnału i dla określenia charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej stanowiska, badania przeprowadzono w różnych miejscach obiektu badanego. Punkty zamocowania przedstawiono na rys. 3. Wynikiem tych analiz było poszukanie takich parametrów w pracy silnika, przy których stanowisko było najbardziej spokojne.

Istotą badań laboratoryjnych było wywołanie zmian w procesie spalania poprzez zmiany kąta wyprzedzenia zapłonu oraz rejestrowanie odpowiadających tym stanom sygnałów diagnostycznych. Ze względu na dużą ilość punktów pomiarowych ograniczono w pierwszym etapie badań stanowiskowych ilość stanów modelowych do trzech odpowiadających trzem kątom wyprzedzenia zapłonu 20°, 10°, 0° przed ZZ tłoka.

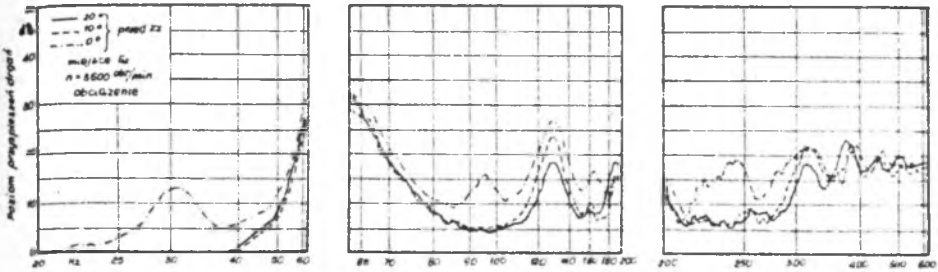
Dla wybranych prędkości i obciążeń zdjęto charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe otrzymując w efekcie 72 analizy widmowe i 12 wykresów przebiegów ciśnienia, co schematycznie przedstawiono na rys. 4.

Wyniki badań laboratoryjnych zgrupowano w trzech częściach. W części pierwszej przedstawione zostały wyniki badań przyspieszeń drgań głowicy. W części drugiej analiza częstotliwości ciśnienia spalania, a w części trzeciej - wykresy indykatowe przebiegu spalania.

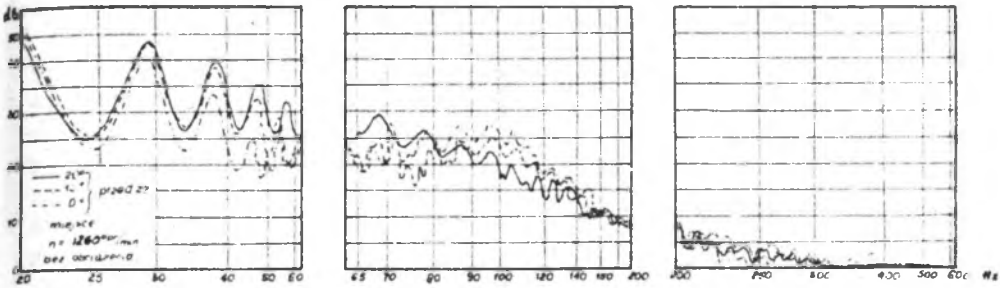
Analizując poziomy całkowite przyspieszeń drgań głowicy można stwierdzić, że poszczególne miejsca pomiarowe wykazują różną wrażliwość na zmianę wartości parametrów nastawczych. Przy małej prędkości obrotowej na biegu jałowym występuje dość duża niepowtarzalność wyników. Maleje ona ze wzrostem prędkości obrotowej. Największe różnice w poziomach przyspieszeń drgań przy prędkości obrotowej 3600 obr/min, zarówno przy braku jak i przy pełnym obciążeniu, wystąpiły w punkcie pomiarowym M 3. Jest on położony bezpośrednio nad komorą spalania.

Przy pełnym obciążeniu i prędkości obrotowej 3600 obr/min we wszystkich punktach pomiarowych występuje zjawisko spadku wartości poziomów wraz ze zmniejszeniem kąta wyprzedzenia zapłonu. Największe różnice poziomów wystąpiły w punktach M 2, M 3 i na śrubie głowicy. Otrzymane charakterystyki wskazały na brak symetrii drgań w punktach równo oddalonych od osi symetrii głowicy. Natomiast analiza częstotliwościowa przyspieszeń drgań (rys. 5) wykazała, że wszystkie zmiany strukturalne zachodzą w paśmie do 300 Hz, przy czym najsilniejsze zmiany dało się zauważyć w przedziale 200 - 250 Hz. Szczególnie wysokie poziomy amplitud wystąpiły przy opóźnionym zapłonie. Związane to jest z wydłużeniem w czasie impulsu pochodzącego do przebiegu spalania.

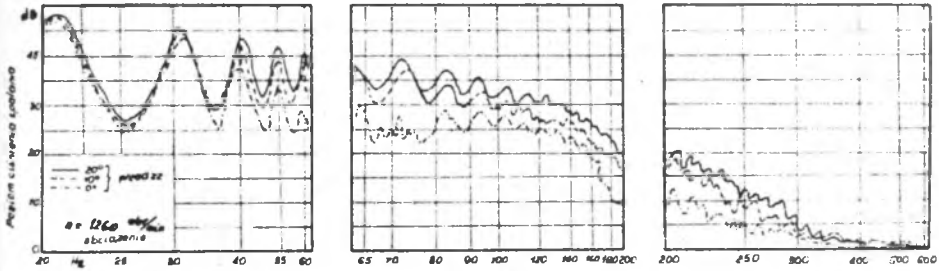
Analiza częstotliwości sygnałów ciśnienia spalania również wykazała wpływ obciążenia silnika na zmianę obwiedni widma przy badanych prędkościach obrotowych (rys. 6 i 7).



Rys. 5. Przebieg widm drgań szpilki mocującej głowicę



Rys. 6. Widmo częstotliwości przebiegu ciśnienia spalania przy braku obciążenia



Rys. 7. Widmo częstotliwości przebiegu ciśnienia spalania zarejestrowane w czasie pracy silnika pod obciążeniem

Wartości skuteczne poziomu ciśnień zmierzone na zakresie liniowym rosną wraz ze wzrostem kąta wyprzedzenia zapłonu (tabl. 1). Rosną one znacznie wraz ze wzrostem obciążenia i prędkości obrotowej, przy czym obciążenie wpływa znacznie intensywniej niż prędkość obrotowa.

Można zatem stwierdzić, że zarówno analiza częstotliwości sygnałów pochodzących od ciśnienia spalania jak i przyspieszeń drgań głowicy wywołanych tymi impulsami pozwalają na ocenę dynamiki procesu spalania. Ponieważ różnice występujące w sygnałach przy pracy silnika bez obciążenia i przy małej prędkości obrotowej są mniejsze, a właśnie takie warunki byłyby

najbardziej optymalne w diagnostyce warsztatowej sprawdzono jak oprócz zmierzonych już zmian kąta wyprzedzenia zapłonu na zmianę sygnału wpływa zmiana następujących stanów silnika: luzu zaworowego, poziomu paliwa w komorze pływakowej, stanu cieplnego itd.

Tabela 1

Wartości skuteczne poziomów ciśnień panujących w komorze spalania zmierzone na zakresie liniowym (0,02 - 20 kHz)

R M S (dB)							
Obciążenie		bieg jałowy			pełne obciążenie		
Kąt wyprzedzenia zapłonu		20°	10°	0°	20°	10°	0°
Pręd. obrot. obr/min	1260	102,5	102,5	101,5	113,5	112	109,5
	3600	112	111	110	127	124	121

Wytypowanie szpilki głowicy jako miejsca nadającego się do odbioru sygnału wymagało ustalenia wpływu jej naciągu wstępnego na przenoszony sygnał. W tym celu przeprowadzono dwa doświadczenia, pierwsze miało na celu ustalenie wpływu różnych naciągów wstępnych na przenoszony sygnał, drugie zaś ustalenie powtarzalności sygnałów przy dokręceniu głowicy tym samym momentem zalecanym przez producenta, lecz mierzonym powszechnie dostępnym w zakładach naprawczych kluczem dynamometrycznym w zakresie od 0 do 60 Nm i działce elementarnej 2,5 Nm. Doświadczenie wykazały, że szpilka musi być dociągnięta co najmniej momentem 50 Nm a ewentualne zmiany tego dociągnięcia leżą w granicach 1 dB.

Z analizy przeprowadzonych badań dotyczących luzu zaworowego wynika, że zmiana wartości luzu powoduje istotne zróżnicowanie wartości średniej amplitud drgań w zakresie od 700 do 2000 Hz a zwiększenie wartości luzu powoduje znaczne podniesienie poziomu w tym całym badanym zakresie. Podwyższenie poziomu paliwa w komorze pływakowej spowodowało nieznacznie podniesienie poziomu drgań w zakresie od 120 Hz do 630 Hz. W tym samym zakresie widmo odpowiadające poziomowi obniżonemu przebiega najniżej, w pozostałych zaś zakresach zmiany leżą w granicach błędu pomiarowego.

Stan cieplny silnika oceniono na podstawie pomiaru temperatury oleju w misce olejowej. Pierwszy stan odpowiadał temperaturze 393 K (120°C). Następne stany osiągnięto przez podnoszenie temperatury co 20 deg. aż do osiągnięcia temperatury 433 K (160°C). Z analizy przeprowadzonych badań

wynika, że zmiana stanu cieplnego silnika nie powoduje istotnych zmian w niskich zakresach częstotliwości. Do około 2000 Hz widmo odpowiadające temperaturze 393 K (120°C) posiada najmniejsze udziały energetyczne ale mieszczące się w granicach błędu pomiarowego. Natomiast powyżej 2000 Hz zaczyna ono nieznacznie dominować, a widmo odpowiadające temperaturze 433 K (160°C) posiada najniższe udziały a zatem zwiększenie temperatury powoduje zmniejszenie luzów, a to odzwierciedla się w wyższych zakresach częstotliwości. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych można było uzyskać następujące rezultaty stanowiące podstawę dalszych działań. Szpilka mocująca głowicę okazała się najlepszym punktem odbioru sygnałów, a analiza sygnałów otrzymanych z tej szpilki odzwierciedla zmiany zachodzące w procesie spalania.

Ponadto etap badań laboratoryjnych zakończony został wyciągnięciem wniosków dotyczących konieczności wyznaczenia dokładnej charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej stanowiska, doboru prędkości obrotowej, wpływu obciążenia, sposobu mocowania przetwornika a także wpływu kąta wyprzedzenia zapłonu, składu mieszanki, luzu zaworowego, stanu cieplnego, niesprawności pracy świec, wpływu naciągu wstępnego szpilki i powtarzalności wyników itd. Na przykład w czasie wyznaczania charakterystyki stanowiska (rys. 8) okazało się, że na krzywej przedstawiającej wzrost drgań w funkcji prędkości obrotowej w zakresie n = 1200 ... 3000 obr/min występuje załamanie, a zatem w tym zakresie prędkości obrotowej stanowisko jest najmniej wrażliwe na zmiany pochodzące od prędkości obrotowej. Dlatego też do dalszych badań podniesiono minimalne prędkości obrotowe do 1260 obr/min.

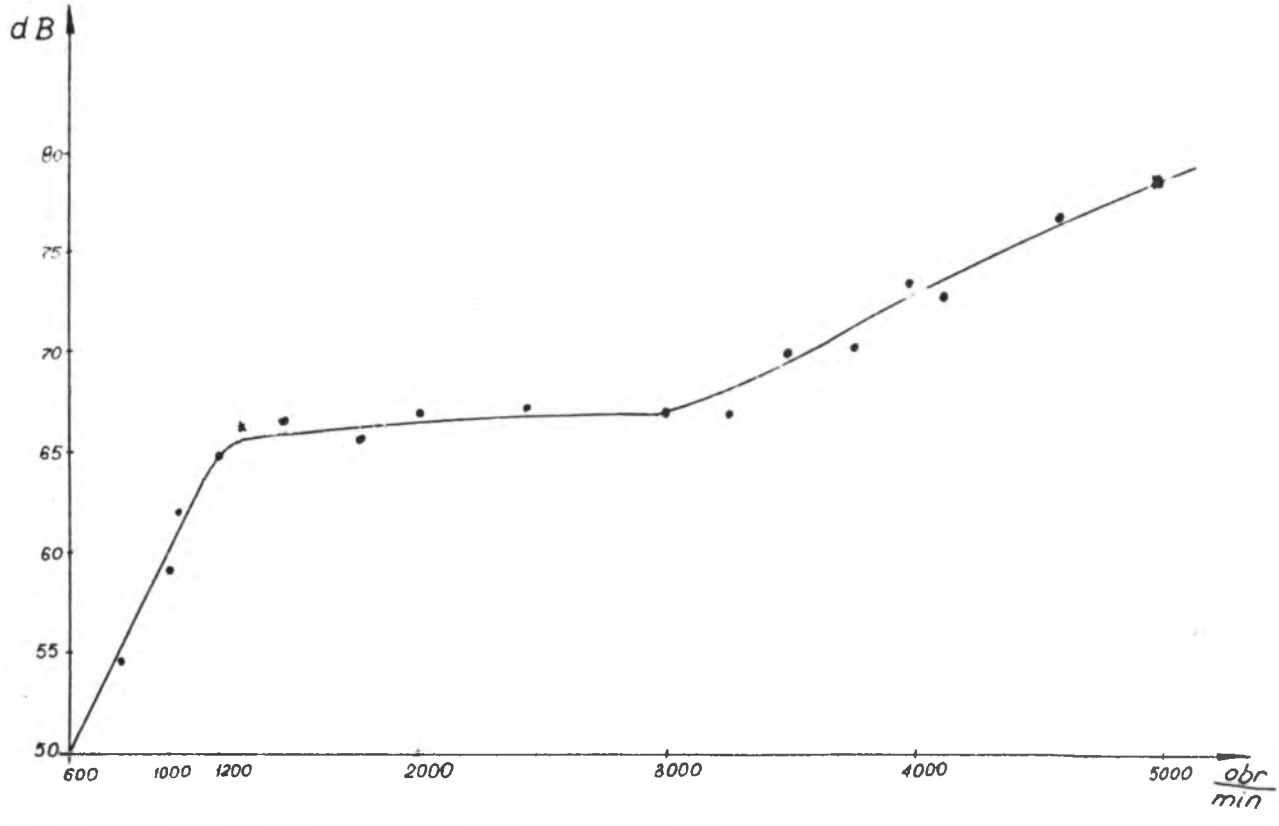
Celem tych badań było sprawdzenie w jakim stopniu warunki pracy silnika wpływają na zmianę wartości parametrów sygnału oraz określenie w jakich zakresach częstotliwości należałoby spodziewać się odpowiedzi układu po zmianie wybranych parametrów stanu.

Wyniki tych badań były dość obiecujące i pozwoliły na przejście do badań eksploatacyjnych w warunkach użytkowych.

3. Badania eksploatacyjne

Druga seria badań miała na celu sprawdzenie otrzymanych wyników na większej populacji silników. Badania te wykonano na 50 losowo wybranych samochodach Polski Fiat 126p i polegały na rejestracji otrzymanych widm przed i po dokonaniu czynności regulacyjnych. Otrzymane w ten sposób różnice stanowiły podstawę do sklasyfikowania występujących niesprawności regulacyjnych silników.

Do badań wykorzystano aparaturę pomiarową, którą wcześniej sprawdzono w warunkach laboratoryjnych. Emitowany sygnał dostarczony z zamocowanego na szpilce głowicy silnika piezoelektrycznego przetwornika drgań pobierano po ustaleniu się równowagi cieplnej silnika.



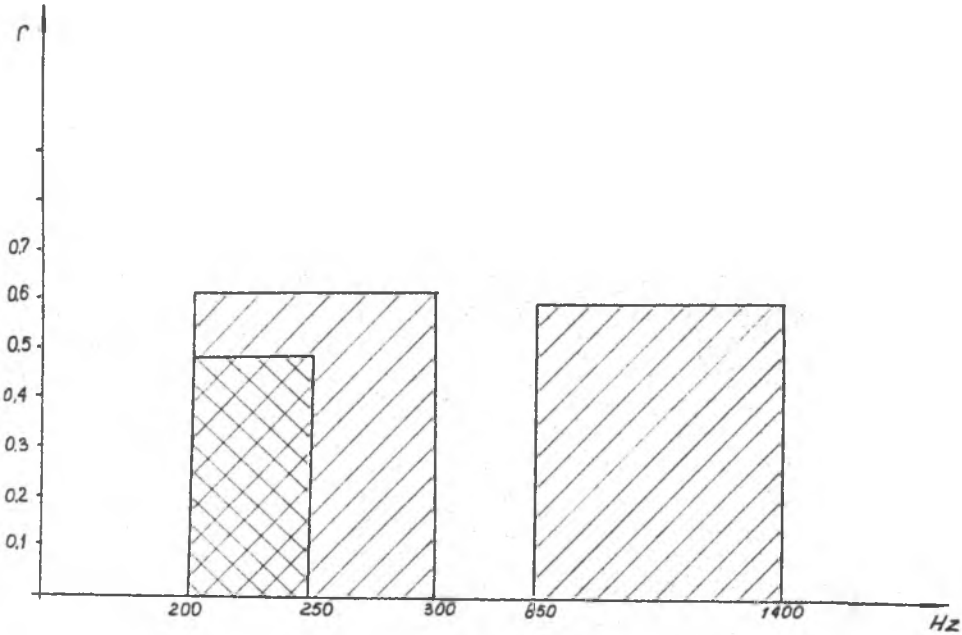
Rys. 8. Poziom drgań płyty stanowiska w pkt. pomiaru 3 (rys. 3) na zakresie liniowym przyrządu. Silnik bez obciążenia

W czasie badań eksploatacyjnych regulowano według potrzeby kąt wyprzedzenia zapłonu, skład mieszanki i luz zaworowy oraz stosowano różne ich kombinacje. Otrzymane wyniki wykazały tak jak w badaniach laboratoryjnych wyraźne i powtarzalne zmiany w zakresach częstotliwości 200 ... 300 Hz i 850 ... 1400 Hz w pozostałych zakresach częstotliwości nie stwierdzono powtarzalności zmian w przypadku regulowania któregokolwiek z nastawów a sporadycznie występujące w tych zakresach zmiany widma przpisać należało innym czynnikom.

Z powyższych badań eksploatacji można wnioskować, że najsilniejszy wpływ pochodzący od kąta wyprzedzenia zapłonu na różnice w widmie wynoszące 1 ... 6 dB występuje w okolicach 220 Hz.

W przypadku regulacji samego składu mieszanki oraz składu mieszanki i luzu zaworowego zauważono jednakową powtarzalność zmian w zakresie 200 ... 300 Hz. Wielkość zmian waha się w granicach 2 ... 7 dB, ekstremum różnic występowało w okolicach 270 Hz. Taki rozkład zmian sugerował, że wpływ składu mieszanki na widmo drgań jest dość silny w całym zakresie 200 ... 300 Hz i może to powodować, że w przypadku regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu i składu mieszanki wystąpią trudności z identyfikacją sygnału wibroakustycznego pochodzącego od kąta wyprzedzenia zapłonu. Jednak w większości przypadków można było zauważyć, że ekstrema różnic znajdują się w okolicach 220 lub 270 Hz i świadczą one o dominacji jednego czynnika regulowanego. Podobnie podczas regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu i składu mieszanki nie zauważono zmian widma w zakresie 850 ... 1400 Hz, zauważono je natomiast w przypadku luzu zaworowego. Na 26 przypadków, w których dokonano tych regulacji, co wskazuje na jednoznaczny wpływ wartości istniejącego luzu zaworowego na przebieg widma drgań w tym zakresie. Po wstępnej analizie uzyskanych widm możliwe było statystyczne ich opracowanie. Polegało ono na obliczeniu współzależności pomiędzy poziomami amplitud przyspieszeń drgań a wartościami regulacyjnymi i określeniu poziomu tej istotności. Na rys. 9 przedstawiono obliczony współczynnik korelacji dla niektórych nastawów regulacyjnych.

Zrealizowane badania eksploatacyjne w warunkach typowej diagnostyki silników miały charakter wdrożeniowy i pozwalały potwierdzić przydatność tej metody do praktyki użytkowej. Możliwość wykorzystania sygnałów wibroakustycznych przy wystarczającej ich rozdzielności w przypadku regulacji nastawów silnika w czasie pracy na biegu jałowym była wprawdzie mniej wyraźna, niż to wykazano w badaniach laboratoryjnych szczególnie pod obciążeniem, lecz zarówno w tych warunkach sprzyjających do diagnostyki utylitarnej, okazała się ona zdatna do dalszych działań aplikacyjnych. Ponadto metoda ta umożliwia uwzględnienie wypadkowego wpływu na proces spalania takich czynników jak stan techniczny silnika, zastosowane paliwo, sposób eksploatacji i w zależności od tych czynników umożliwia dobranie właściwej regulacji silnika. Jednak mimo tego stwierdzenia należy zdać sobie sprawę z tego, że wprowadzenie diagnostyki wibroakustycznej do diagnostyki użytkowej w obecnej fazie jest bardzo ryzykowne.



Rys. 9. Zakresy częstotliwości występowania zmian w widmach drgań spowodowanych różnicami w nastawach regulacyjnych i odpowiadające im współczynniki korelacji
200 - 250 Hz zmiany spowodowane różnymi nastawami kąta zapłonu
200 - 300 Hz zmiany spowodowane różnymi nastawami składu mieszanki
850 - 1400 Hz zmiany spowodowane różnymi nastawami luzu zaworowego

Mimo, że badania laboratoryjne rokują duże nadzieje to jednak w praktyce duża tolerancja produkcji silników ich odchyłki wykonawcze, brak obciążenia oraz inne zakłócenia sprawiają, że otrzymane wyniki nie są tak jednoznaczne, aby mogły być wykorzystane do seryjnej diagnostyki silnika.

LITERATURA

[1] J. Maćkowski: Ocena dynamiki procesu spalania w silnikach z zapłonem iskrowym metodami wibroakustycznymi. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1982.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Czesław Kordziński

Wpłynęło do Redkacji w maju 1984 r.

ПОПЫТКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
К ОЦЕНКЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПОДБОРА УСТАНОВИТЕЛЕЙ
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Р е з ю м е

В работе предпринято попытку заменить исследовательские методы, применяемые до сих пор, к оценке процесса сгорания акустическими методами.

Результатом работы было определение влияния некоторых представительных эксплуатационных установителей на стоимость параметров акустических сигналов.

THE ATTEMPT OF MAKING USE OF THE WIBRO-ACOUSTIC METHODS IN THE EVALUATION OF THE APPROPRIATE CHOICE IN REGULATION ADJUSTMENTS IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

S u m m a r y

The attempt of replacing the experimental methods which were used so far for the evaluation of the combustion process, tested by the acoustic methods were discussed in this paper.

As a result of that experiment it was established that there is an influence of some representative adjustments upon the value of the acoustic signals parametres!