

Czesław KORDZIŃSKI
Mieczysław REIMAN
Bronisław SENDYKA
Henryk TRAJDOS

ANALIZA HAŁASU W KOMORZE SPALANIA SILNIKA O ZAPŁONIE ISKROWYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę hałasu w komorze spalania silnika o zapłonie iskrowym, poprzez rozkład wykresu indykatorowego na składowe harmoniczne za pomocą szeregu Fouriera. W powyższy sposób otrzymane widmo ciśnienia akustycznego porównano z widmem otrzymanym bezpośrednio w czasie pomiarów.

1. Wstęp

Wykres indykatorowy jest często głównym nośnikiem informacji o przebiegu procesu spalania. Stąd jest on przedmiotem wielu analiz. Na jego podstawie określa się przebieg zmian temperatury, przemiany energii, składowych sił stycznych a nawet toksyczności spalin.

Jedną z takich analiz jest analiza harmoniczna wykresu indykatorowego. Poprzez rozkład wykresu indykatorowego na składowe harmoniczne oraz odpowiednie przetworzenie otrzymanych wyników można określić widmowy rozkład ciśnień w komorze spalania. Istnieje szereg prób wnioskowania o głośności silnika na podstawie wykresu indykatorowego [1, 2, 3, 4], jedną z nich przedstawiono poniżej.

2. Podstawy analizy harmonicznej wykresu indykatorowego

Analizę poziomu ciśnienia akustycznego w komorze spalania przeprowadzono w oparciu o rozkład wykresu indykatorowego na składowe harmoniczne za pomocą szeregu Fouriera.

W opisie matematycznym zastosowano kilka uproszczeń:

- zakłada się, że wykres indykatorowy jest funkcją okresową i ciągłą w przedziale $0 \dots 4\pi$, aby było możliwe stosowanie wzorów na rozkład Fouriera. Zakłada się dużą powtarzalność przebiegów spalania,
- założono liniowy przebieg między zadanymi punktami. Opis ten wystarczająco dokładnie odzwierciedla przebieg krzywych wykresu indykatorowego

oraz pozwala odtworzyć jego zmiany. Dokładność opisu można zwiększyć poprzez zagęszczenie liczby punktów.

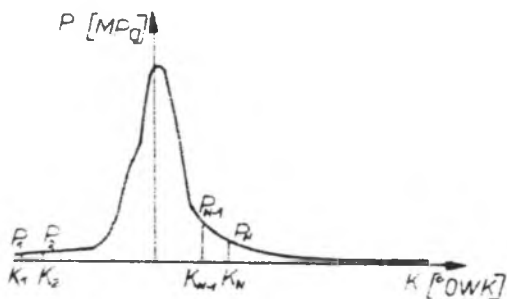
Równanie linii aproksymującej wycinek wykresu indykatorowego ma postać:

$$P(K) = \frac{P_N - P_{N-1}}{K_N - K_{N-1}} \cdot (K - K_N) + P_N \quad K \in (K_{N-1}, K_N) \quad (1)$$

gdzie:

- K - kolejny punkt wykresu indykatorowego,
 K_N, P_N - odpowiednio kąt i ciśnienie w N -tym punkcie.

Schemat opisu wykresu indykatorowego odcinkami linii prostej z dowolnym krokiem przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat wykresu indykatorowego

Suma powyższych równań określa wykres indykatorowy opisany równaniami:

$$P(K) = \sum_{N=2}^{NN} \left[\frac{P_N - P_{N-1}}{K_N - K_{N-1}} \cdot (K - K_N) + P_N \right] \quad (2)$$

Wobec przyjętych uproszczeń funkcję $P(K)$ można rozwinąć w szereg trygonometryczny jednostajnie zbieżny postaci:

$$P(K) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{L=1}^{LL} \left[A_L \cos \left(\frac{L\pi K}{1} \right) + B_L \cdot \sin \left(\frac{L\pi K}{1} \right) \right] \quad (3)$$

gdzie:

- 1 - połowa długości okresu ($l = 2$),
 L - numer kolejnej harmonicznej,
 A_0, A_L, B_L - współczynniki Fouriera określone ze wzorów:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-1}^1 P(K) dk \quad (4.1)$$

$$A_L = \frac{1}{T} \int_{-1}^1 P(K) \cos \left(\frac{L\pi K}{T} \right) dk \quad (4.2)$$

$$B_L = \frac{1}{T} \int_{-1}^1 P(K) \sin \left(\frac{L\pi K}{T} \right) dk \quad (4.3)$$

$$L = 1, 2, 3 \dots LL$$

Po scałkowaniu i przekształceniu powyższych wzorów 4.1 - 4.3 uzyskano je w postaci, w której zostały wykorzystane w dalszych obliczeniach:

$$A_0 = \frac{1}{360} \sum_{N=2}^{NN} (P_N - P_{N-1}) (K_N - K_{N-1}) \quad (5.1)$$

$$A_L = \sum_{L=1}^{LL} \left\{ \frac{1}{\pi L} \sum_{N=2}^{NN} \left[P_N \sin \left(\frac{\pi L}{360} K_N \right) - P_{N-1} \sin \left(\frac{\pi L}{360} K_{N-1} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{360}{\pi L} \left(\frac{P_N - P_{N-1}}{K_N - K_{N-1}} \right) \left(\cos \left(\frac{\pi L}{360} \cdot K_N \right) - \cos \left(\frac{\pi L}{360} K_{N-1} \right) \right] \right\} \quad (5.2)$$

$$B_L = \sum_{L=1}^{LL} \left\{ \frac{1}{\pi L} \sum_{N=2}^{NN} \left[\frac{360}{\pi L} \left(\frac{P_N - P_{N-1}}{K_N - K_{N-1}} \right) \left(\sin \left(\frac{\pi L}{360} K_N \right) - \right. \right. \right. \\ \left. \left. - \sin \left(\frac{\pi L}{360} K_{N-1} \right) + P_{N-1} \cos \left(\frac{\pi L}{360} K_{N-1} \right) - P_N \cos \left(\frac{\pi L}{360} K_N \right) \right] \right\} \quad (5.3)$$

$$L = 1, 2, 3 \dots LL$$

$$N = 1, 2, 3 \dots NN$$

Wartości poziomu w określonych częstotliwościach charakteryzują dwa współczynniki A_L i B_L , którymi można posłużyć się przy analizie widmowej wykresu ciśnienia. Jednak do analizy procesu spalania jako źródła dźwięku bardziej korzystne jest posługiwanie się jednym współczynnikiem. Wówczas po zsumowaniu wektorowym obu współczynników A_L i B_L dla danej częstotliwości otrzymujemy okresowy przebieg funkcji K_L .

$$\bar{K}_L = \bar{A}_L + \bar{B}_L$$

$$K_L(K) = A_L \cos\left(\frac{\pi}{180} KR \cdot i\right) + B_L \sin\left(\frac{\pi}{180} KR \cdot i\right) \quad (6.1)$$

gdzie:

KR - krok całkowania $KR = 180/ii$,

ii - liczba punktów, na które została podzielona połowa okresu wykresu indykatorowego.

Parametrem charakterystycznym może być oprócz częstotliwości, np. maksymalna wartość przebiegu (6.1). Jednak do badań przebiegu pod względem akustycznym najodpowiedniejsze jest obliczenie jego wartości skutecznej, bowiem w oparciu o tę wielkość działają również mierniki poziomu ciśnienia. Poniżej przedstawiono tok rozumowania przy tego typu obliczeniach. Wzór na wartość skuteczną E_L dla danej częstotliwości ma postać:

$$E_L = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [e(t)]^2 dt} \quad (7)$$

gdzie:

$e(t)$ - jest funkcją $K_L(K)$ (6.1)

Całkę $K_L(K) dK$ policzono metodą trapezów, tak więc końcowy wzór (7) na E_L będzie miał postać:

$$E_L = \sqrt{\frac{1}{360} \sum_{i=1}^{ii} KR [K_L^2(i) + K_L^2(i-1)]} \quad (7.1)$$

3. Określenie poziomu ciśnienia akustycznego

Poziom ciśnienia akustycznego C_L określony jest następującym wzorem:

$$C_L = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad [dB] \quad (8)$$

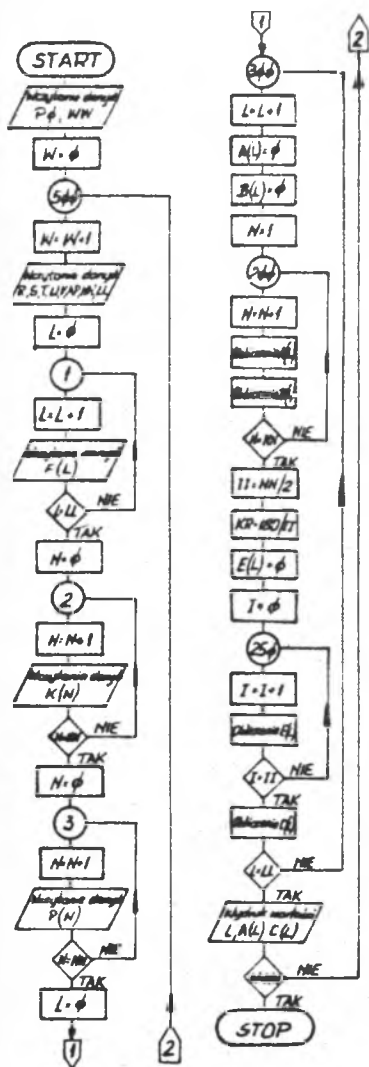
gdzie:

p - wartość skuteczna ciśnienia dla danej harmonicznej,

p_0 - ciśnienie odniesienia $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ [2].

Po zastosowaniu przekształceń i użytych oznaczeń wzór (8) przyjmuje postać:

$$C_L = 20 \lg \left(\frac{1}{2} \cdot 10^5 E_L\right) \quad [dB] \quad (8.1)$$



P, ϕ - ciśnienie odniesienia
 NN - ilość wykresów
 R, S, T, U, V - parametry dla danego wykresu
 AP - pozycja harmoniczna
 NN - ilość punktów, na które został podzielony jeden okres wykresu indykatorowego.
 LL - ilość harmonicznych
 $F(L)$ - czułość danej harmonicznej
 $K(N); P(N)$ - kąt i odpowiadające mu ciśnienie z wykresu indykatorowego.
 $A(L), B(L)$ - współczynniki rozwinięcia w szereg Fouriera.
 $E(L)$ - wartość skuteczna ciśnienia dla danej harmonicznej
 $C(L)$ - poziom ciśnienia akustycznego
 W - kolejny numer wykresu
 L - kolejny numer harmonicznej
 N - kolejny numer punktu podzielu 1-go okresu wykresu indykatorowego

Rys. 2. Schemat algorytmu obliczeń

Każdej harmonicznej odpowiada ściśle określona wartość częstotliwości zależna od prędkości obrotowej silnika

$$f_L = L \cdot \frac{n \cdot i}{z} \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

gdzie:

$L = 1, 2, 3 \dots LL$,

n - prędkość obrotowa ($\frac{1}{s}$),

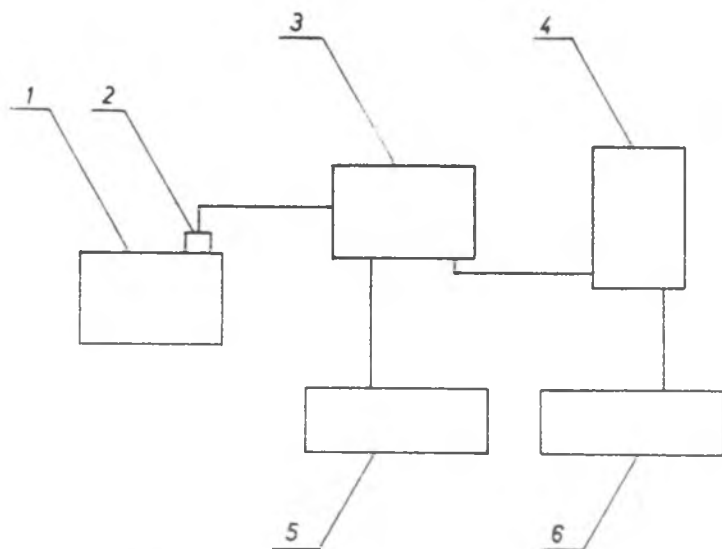
$z = 2$ dla silnika czterosuwowego

i - liczba cylindrów.

Dla takiej analizy matematycznej opracowano program na maszynę cyfrową, którego algorytm przedstawiono na rys. 2.

4. Badanie stanowiskowe

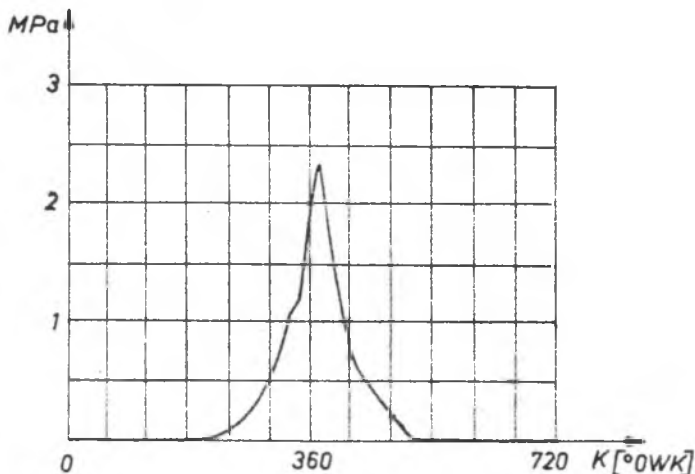
W celu otrzymania odpowiedniego wykresu indykatorowego przeprowadzono badania na typowym stanowisku hamownianym, przystosowanym do indykowania, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 3. Jednocześnie zarejestrowano przebieg amplitudowo-częstotliwościowy pulsacji gazów w komorze spalania.



Rys. 3. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

1 - silnik 126 AB.076, 2 - piézokwarcowy przetwornik ciśnienia PD 100/14-1, 3 - wzmacniacz ładunku typ 219A, 4 - analizator częstotliwości firmy B & K typ 2305, 5 - oscylograf pętlicowy Visicorde 2206 firmy Honeywell, 6 - pisak poziomy firmy B & K typ 2107

Do analizy harmonicznej wybrano jeden wykres indykatorowy z przebiegu rozwiniętego, zarejestrowanego przy prędkości $21 \frac{1}{8}$, którego średnia wartość ciśnienia spalania wynosi $2,39 \text{ MPa}$ (rys. 4).

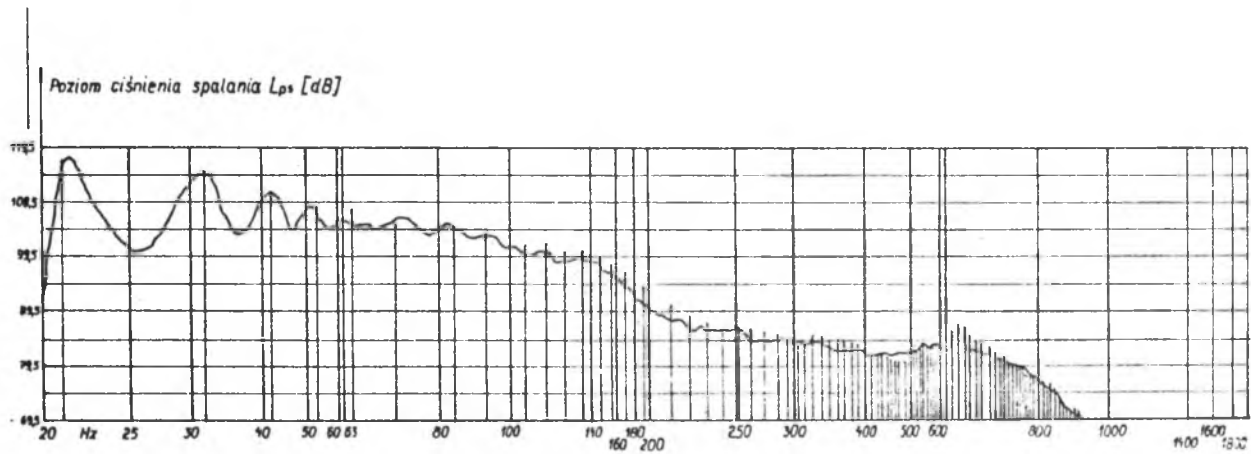


Rys. 4. Wybrany wykres indykatorowy do analizy harmonicznej

Na rys. 5 przedstawiono zarejestrowane widmo amplitudowo-częstotliwościowe w komorze spalania (linia ciągła), które zostało porównane z obliczonym widmem z analizy harmonicznej (pionowe linie).

5. Wnioski

Analiza harmoniczna wykresu indykatorowego wystarczająco dokładnie odzwierciedla zjawiska akustyczne wewnątrz komory spalania, co potwierdza zgodność widma zarejestrowanego z obliczonym w szerokim zakresie częstotliwości. Niewielkie różnice w porównywanych widmach wynikają z załączonych uproszczeń w analizie matematycznej oraz przyjęcia do analizy jednego wykresu indykatorowego o średniej wartości ciśnienia spalania, podczas gdy w czasie pomiarów zarejestrowano kilkadziesiąt przebiegów.



LITERATURA

- [1] Anderton D., Lalor N., Grover E., Priede T.: Assessment and control of combustion - induced noise in I.C. engines. Comb.Eng.Progress 1969.
- [2] Cempel Cz.: Wibroakustyka stosowana. PWN, Poznań 1978.
- [3] Jakubowski J., Januła I.: Wybrane zagadnienia metody indykowania silników spalinowych i analizy wykresów indykatorowych. Silniki Spalinowe nr 3/74.
- [4] Wajand J.A.: Pomiarzy szybkozmiennych ciśnień w maszynach tłokowych. WNT, Warszawa 1974.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Stanisław Jarnuszkiewicz

Wpłynęło do Redakcji w czerwcu 1984 r.

АНАЛИЗ ШУМА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ
С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

Р е з ю м е

В статье представлен анализ шума в камере сгорания двигателя с искровым зажиганием путем разделения индикаторной диаграммы на гармонические составные с помощью ряда Фурье. Полученный, таким образом, спектр акустического давления сопоставлен со спектром записанным непосредственно во время измерений.

THE NOISE ANALYSIS IN THE SPARK-IGNITION ENGINE COMBUSTION CHAMBER

S u m m a r y

The work presents the analysis of the noise which occurs in the combustion chamber of the spark-ignition engine and it was possible when the indicator diagram was harmonic decomposed by means of the Fourier number. The acoustic spectra were then compared with ones measured immediately during the investigations.