ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: TRANSPORT z. 61 Nr kol. 1704

Marek DYKIER

ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA DRGAŃ CZYNNIKA ROBOCZEGO W UKŁADZIE DOLOTOWYM SILNIKA ZI

Streszczenie. W artykule omówiono problemy związane ze stopniem napełnienia silnika o spalaniu wewnętrznym. Przedstawiono wyniki pomiarów ciśnień w układzie dolotowym silnika samochodu doświadczalnego Opel Astra 1.6 oraz zaprezentowano wyniki analizy częstotliwościowej sygnału zmiany ciśnienia absolutnego i wnioski z niej płynące.

FREQUENCY ANALISYS OF VIBRATIONS OF WORKING FACTOR IN INTAKE SYSTEM OF IC ENGINE

Summary. The problems of volumetric efficiency of IC engine were elaborated in the article. The results of measurements of pressure in intake system were presented for car's engie Opel 1.6. The results of analisys of frequency of signal pressure were presented with the cocclusions.

1. WPROWADZENIE

Zadaniem układu dolotowego silnika spalinowego jest doprowadzenie do cylindrów jak największej ilości czynnika roboczego (powietrza lub mieszanki paliwowo-powietrznej). Zapewnienie wysokiego stopnia napełnienia cylindra jest możliwe między innymi przez zminimalizowanie oporów przepływu, zapewnienie równomiernego rozdziału ładunku na cylindry oraz właściwe wykorzystanie zjawisk falowych występujących w przewodzie dolotowym.

Sam proces wymiany ładunku, w którym do cylindra dostaje się mniejsza ilość czynnika roboczego od tej jaka mogłaby wypełnić objętość roboczą cylindra w określonych warunkach termodynamicznych, zależy zarówno od tych warunków, jak i od parametrów konstrukcyjnych silnika. Czynniki te bezpośrednio lub pośrednio wpływają na wartość rzeczywistego współczynnika napełnienia – η_v.

Czynnikami konstrukcyjnymi, od których zależy proces wymiany ładunku, są: ukształtowanie układu dolotowego i wylotowego, stopień sprężania i rodzaj komory spalania, rodzaj układu zasilania, kąt wyprzedzenia zapłonu, a także geometria układu tłokowo-korbowego i rozrządu. Natomiast istotne z punktu widzenia procesu napełniania parametry termodynamiczne to przede wszystkim temperatura i ciśnienie otoczenia (p_0, T_0), temperatura i ciśnienie końca napełniania (p_a, T_a), współczynnik zanieczyszczenia ładunku spalinami (γ) oraz temperatura i ciśnienie gazów na wylocie (p_r, T_r).

O ile wpływ ww. parametrów na stopień napełniania jest ogólnie znany i szeroko opisany w literaturze [2,4,6], to, ze względu na wzajemny wpływ tych czynników na siebie, występuje zasadniczy problem z wyznaczeniem metodami symulacyjnymi rzeczywistego stopnia napełniania. Dodatkowo sprawę komplikuje fakt, że współczynnik napełnienia dla silników ZI zależy także od prędkości obrotowej i obciążenia chwilowego silnika.

Podczas pracy silnika w układzie dolotowym występują także rozmaite zjawiska falowe. Zjawiska te przy pewnych założeniach upraszczających można analizować i na podstawie teorii fal akustycznych oceniać pod kątem ich wykorzystania do poprawy stopnia napełnienia silnika.

Jak wynika z analizy czynnikowej w silniku czterosuwowym, na współczynnik napełnienia znacznie skuteczniej wpływają parametry dolotowe niż wylotowe [2,4,5] i to one kształtują charakterystykę momentu obrotowego oraz mocy silnika, przy czym decydujące znaczenie ma w tym przypadku ciśnienie końca napełniania – p_a. Wartość tego ciśnienia można w praktyce zwiększyć stosując jedną z odmian doładowania sprężarkowego, ale to zawsze związane jest z wysokim kosztem urządzeń doładowujących oraz stałymi stratami energii potrzebnej do ich napędu. Można również wykorzystać praktycznie fakt zależności ciśnienia końca ładowania od prędkości przepływu ładunku w przewodzie dolotowym i tak dobrać parametry geometryczne traktu dolotowego, aby zjawiska falowe i bezwładność słupa gazu przepływającego przez przewody i kanały dolotowe z dużą prędkością w wyniku spiętrzenia czynnika roboczego w cylindrze, doprowadziły do wzrostu ciśnienia końca napełniania.

Efekt bezwładnościowy związany z pędem osiąganym przez gaz dopływający do cylindra jest do pewnego stopnia wykorzystywany we wszystkich silnikach, a opisane zjawisko jest istotą tzw. doładowania dynamicznego. Samo doładowanie dynamiczne można jednak wykorzystać tylko w ograniczonym zakresie. Zwykle w silnikach trakcyjnych doładowanie to ogranicza się do jednej lub dwóch wybranych prędkości obrotowych (n_M lub n_N). Oczywiście jest możliwe doładowanie silnika w pełnym zakresie zmian prędkości obrotowych, na przykład dzięki połączeniu doładowania dynamicznego ze sprężarkowym. W praktyce efektywne doładowanie dynamiczne najłatwiej zrealizować w odniesieniu do silników stacjonarnych, pracujących ze stałą prędkością i obciążeniem, lub silników pojazdów wyczynowych. W silnikach pojazdów użytkowych długość i kształt przewodów dolotowych ograniczone są zwykle różnymi względami konstrukcyjnymi, w efekcie czego może nie występować znaczący efekt doładowania dynamicznego.

Niezależnie od tego, czy układ dolotowy był projektowany z założeniem wykorzystania efektów falowych i bezwładnościowych czy nie, okresowo powtarzająca się wymiana ładunku generuje w układzie dolotowym nakładające się na siebie fale, które wynikają z cyklicznych pulsacji ciśnienia doładowania i rozgałęzionej konstrukcji przewodów dolotowych.

Większość silników trakcyjnych posiada układy dolotowe dobrane przez producenta dla paliwa bazowego. Zasilając te silniki alternatywnymi paliwami gazowymi, takimi jak LPG czy CNG, należy się liczyć ze zmianą parametrów pracy silnika spowodowaną głównie innymi własnościami, takimi jak: niższa wartość opałowa tych paliw, inna prędkość spalania i temperatura zapłonu, ale także, dla większości przypadków, niższym stopniem napełniania. O innym stopniu napełniania silnika paliwem gazowym decydują głównie gęstość i lepkość tego paliwa, łatwość mieszania się go z powietrzem oraz jego rozszerzalność cieplna. Nie zostało jednoznacznie określone, czy paliwa gazowe o innym niż benzyna stanie skupienia, gęstości i lepkości mają wpływ na pulsacje ciśnienia w układzie dolotowym, to znaczy, czy zaprojektowany dla paliwa płynnego układ dolotowy będzie równie skutecznie spełniał swoją funkcję przy zasilaniu silnika paliwami gazowymi, czy też będzie wymagał wprowadzenia zmian w swej konstrukcji.

Wszelkie próby obliczeniowego ujęcia procesu napełniania silnika spalinowego opierają się na założeniach upraszczających bądź dotyczą szczególnych przypadków, co powoduje, że uzyskanych wyników nie udało się dotąd uogólnić i zastosować do celów praktycznych. Brak jest nadal uzgodnionych poglądów co do zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi napełniania i brak powszechnie przyjętej ilościowej oceny tych procesów [3]. Stąd za celowe

uznano zbadanie na rzeczywistym obiekcie ewentualnego wpływu rodzaju paliwa na zjawiska falowe zachodzące w układzie dolotowym oraz określenie, czy w widmie sygnału ciśnienia absolutnego występują częstotliwości rezonansowe, które mogą skutecznie poprawić stopień napełnienia silnika.

2. OBIEKT BADAŃ I STANOWSKO POMIAROWE

Pomiar i rejestrację zmian ciśnienia absolutnego w układzie dolotowym przeprowadzono na silniku doświadczalnego samochodu marki Opel Astra. Był to silnik ZI czterocylindrowy, ośmiozaworowy, o objętości 1600 cm^3 i mocy 55kW. Silnik przystosowany fabrycznie do zasilania wtryskowo benzyną został wyposażony w aparaturę umożliwiającą zasilanie także paliwami gazowymi LPG i CNG.

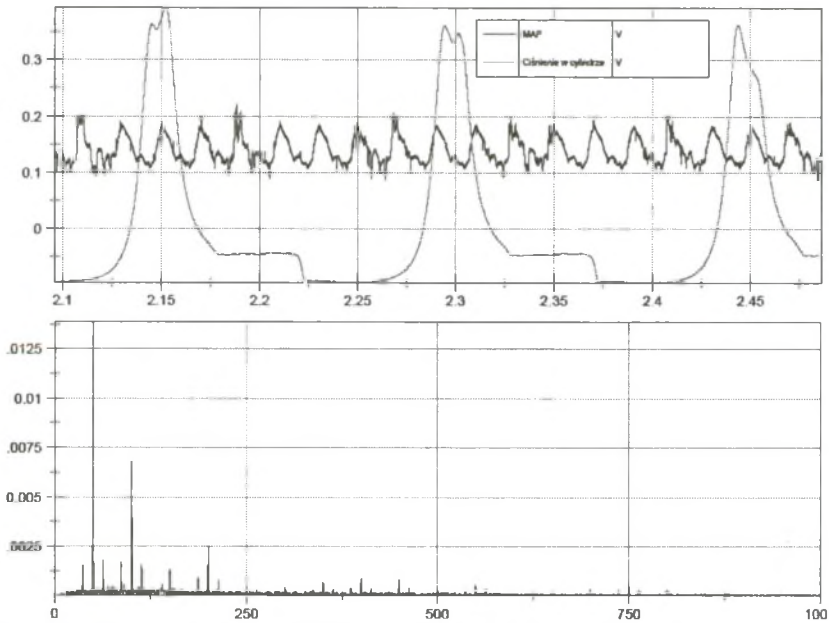
Badania wykonano w Laboratorium Badawczym Katedry Pojazdów Samochodowych, na atestowanej hamowni podwoziowej FLA 203 firmy Bosch. W trakcie badań poza rejestracją zmian ciśnienia absolutnego w układzie dolotowym mierzone były także inne parametry stanu pracy silnika, w tym między innymi ciśnienie w cylindrze, moc, moment i prędkość obrotowa silnika oraz siła napędowa na kołach i przyspieszenie pojazdu.

W celu sprawdzenia, czy i w jakim stopniu rodzaj paliwa może wpływać na zjawiska falowe, wykonano wstępną analizę częstotliwościową sygnału napięciowego, pochodzącego od zmian ciśnienia absolutnego w układzie dolotowym silnika pracującego w podobnych warunkach obciążenia i prędkości obrotowej, ale zasilanego różnymi paliwami (benzyną, LPG, CNG). Sygnał czasowy zmian ciśnienia w układzie dolotowym, rejestrowany w trakcie pracy silnika, jest sygnałem złożonym. Analiza częstotliwościowa pozwala ujawnić dominujące w widmie częstotliwości i ich energie, które wpływają na charakter zjawisk falowych występujących w układzie dolotowym.

Analizę taką wykonano przy pomocy specjalistycznego oprogramowania Lab View i dSpace.

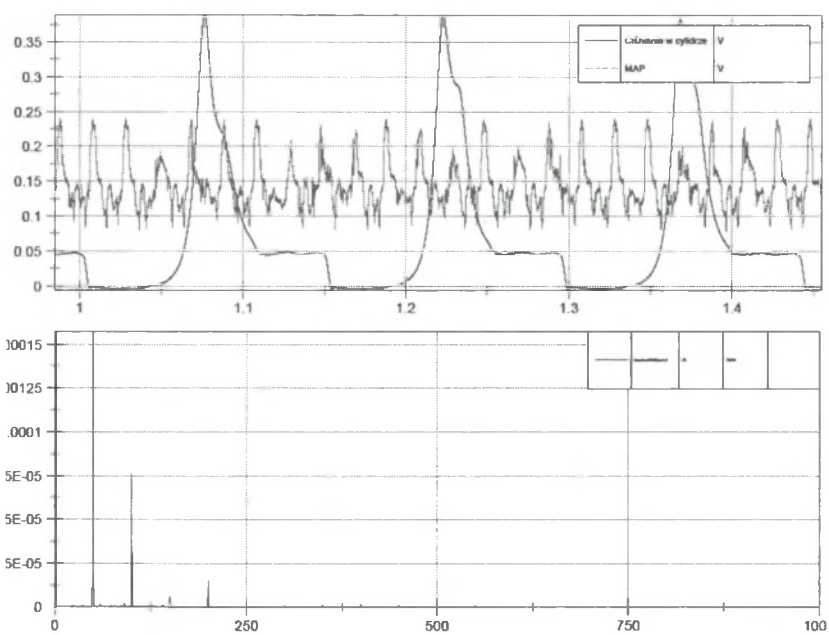
3. ANALIZA DRGAŃ CZYNNIKA ROBOCZEGO W UKŁADZIE DOLOTOWYM

Z posiadanej bazy danych pomiarowych do wstępnej analizy porównawczej wybrano przebiegi zmian ciśnienia w układzie dolotowym dla dwóch paliw: benzyny i paliwa gazowego – LPG. Wybrane przebiegi były rejestrowane przy prędkości obrotowej biegu jałowego silnika równej 750 $^{obr}/_{min}$ i podwyższonej prędkości równej 4000 $^{obr}/_{min}$. Przedstawione na wykresach przebiegi są uśrednieniem ze 100 cykli roboczych silnika. Wyniki pomiarów i analizy częstotliwościowej sygnałów dla tych przypadków przedstawiono na rysunkach 1-4. Natomiast uzyskane tą samą metodą wyniki analizy dla innego paliwa gazowego, jakim były mieszanki metanu i wodoru, przedstawiono na rysunkach 5-7. Wykonano je także dla prędkości obrotowej biegu jałowego silnika równej 800 $^{obr}/_{min}$, ale dla trzech różnych składów chemicznych tego paliwa (CH_4, CH_4+5%H_2, CH_4+15%H_2). Na rysunku 8 zestawiono uzyskane wyniki analizy częstotliwości zmian ciśnienia absolutnego w układzie dolotowym dla ww. mieszanek metanowo-wodorowych.



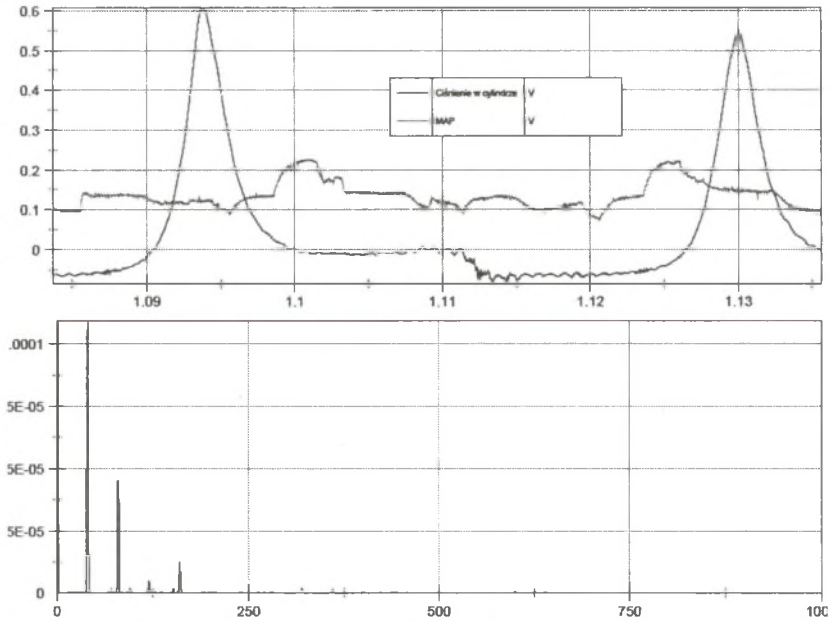
Rys. 1. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa [n = 750 1/min; LPG]

Fig. 1. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency



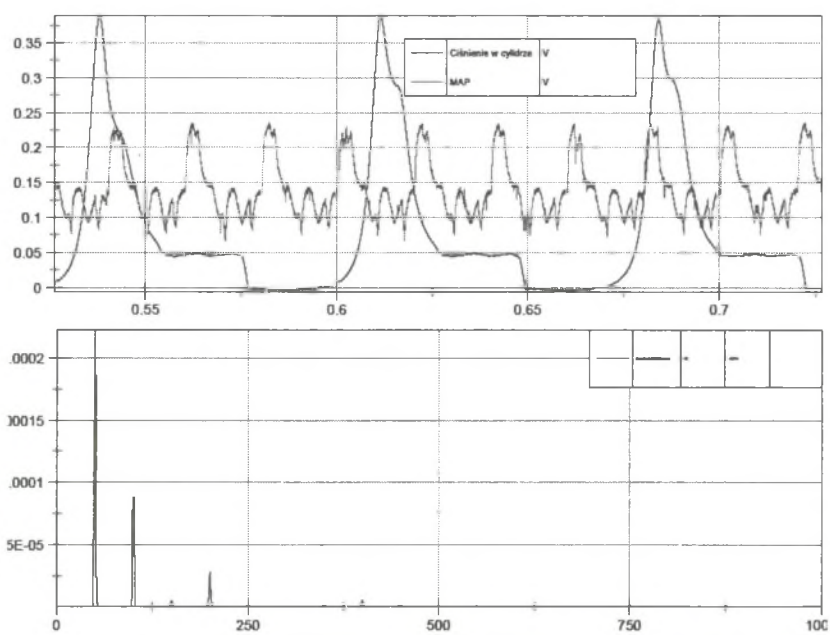
Rys. 2. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa [n = 750 1/min; benzyna/petrol]

Fig. 2. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency



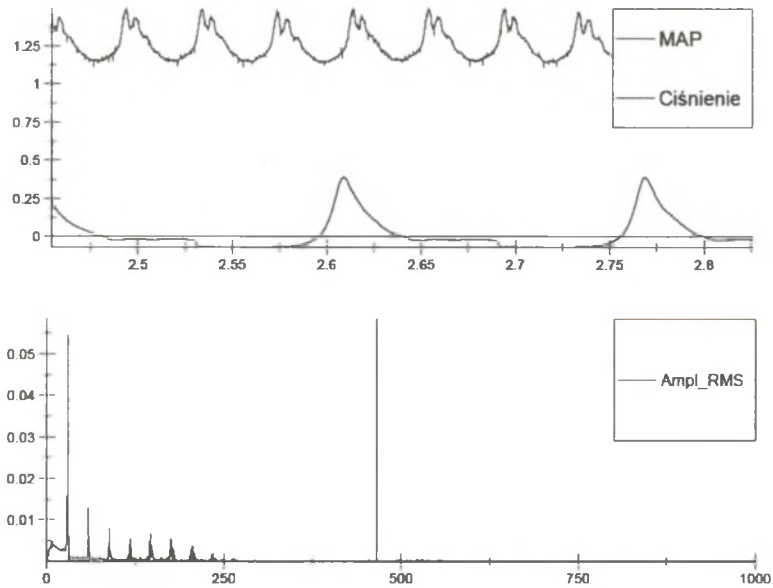
Rys. 3. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa [n = 4000 1/min; LPG]

Fig. 3. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency



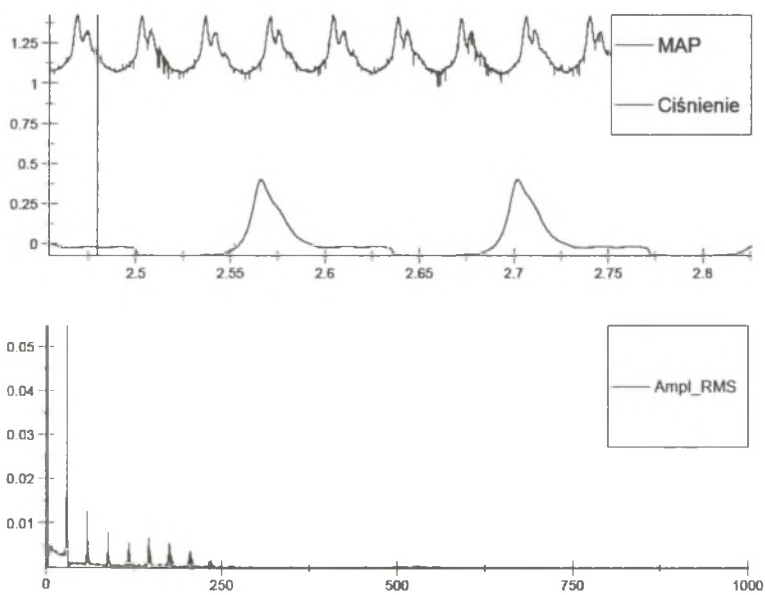
Rys. 4. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa [n = 4000 1/min; benzyna]

Fig. 4. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency



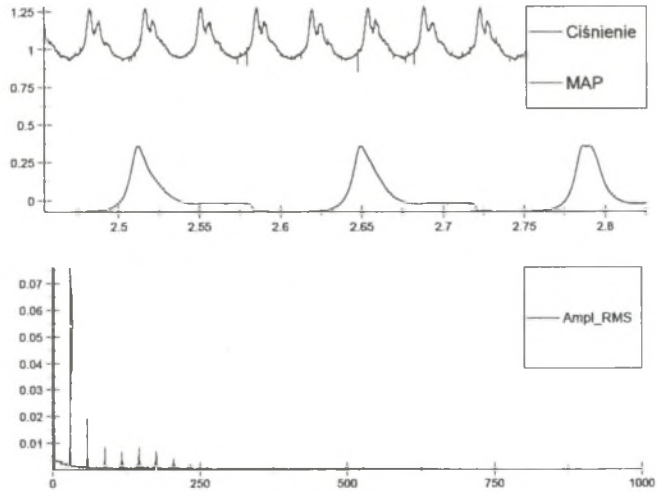
Rys. 5. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa [n = 800 1/min; CH_4]

Fig. 5. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency



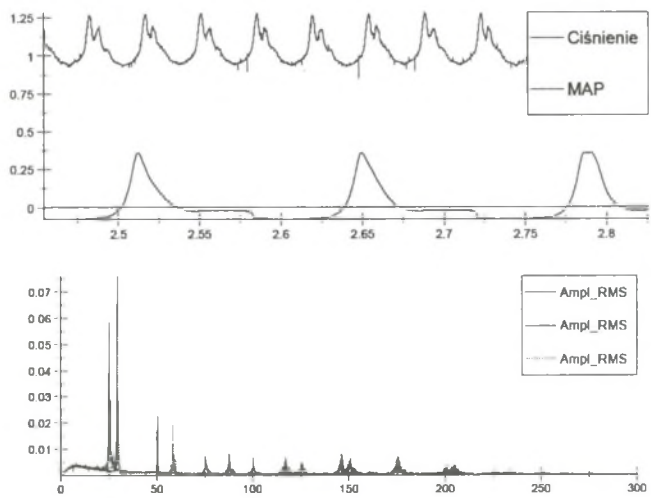
Rys. 6. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa [n = 800 1/min; (CH_4 + 5%H_2)]

Fig. 6. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency



Rys. 7. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa [n = 800 1/min; [(CH_4 + 15%H_2)]

Fig. 7. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency



Rys. 8. Zbiorcza charakterystyka częstotliwościowa sygnału zmiany ciśnienia w układzie dolotowym dla mieszanek metanowo-wodorowych (CH_4 - czerwony; CH_4 + 5%H - zielony; CH_4 + 15%H_2 - czarny)

Fig. 8. Characteristics of frequency of signal of change pressure (CH_4 - red; CH_4+5%H_2 - green; CH_4+15%H_2 - black)

Ponieważ przeprowadzona analiza dotyczyła częstotliwości, a nie dziedziny amplitudy sygnału, więc na wszystkich przedstawionych wykresach amplitudy zmian ciśnienia wyrażone zostały w jednostkach napięcia – [V], zmiana czasu w sekundach – [sec], a zmiana częstotliwości w hercach – [Hz].

Ponieważ na podstawie warunków rezonansu możliwe jest określenie częstotliwości rezonansowej dla każdej prędkości obrotowej silnika, więc analiza częstotliwościowa drgań czynnika roboczego w układzie dolotowym umożliwia stwierdzenie faktu występowania lub

niewystępowania pożądanych częstotliwości rezonansowych w widmie sygnału zmian ciśnienia W rozpatrywanych przypadkach dla prędkości obrotowych 750, 800 i 4000 $^{obr}/_{min}$ częstotliwości rezonansowe wynoszą odpowiednio 25, 26,6 i 133 Hz.

Na podstawie wykresów 1-4 można stwierdzić, że zarówno dla niskiej, jak i wysokiej prędkości obrotowej silnika, przy zasilaniu go benzyną, występują w porównaniu z zasilaniem propanem-butanem znacznie większe pulsacje ciśnienia w układzie dolotowym, ale charakterystyki częstotliwościowe są bardzo podobne.

Trzy główne składowe harmoniczne, przy niskiej prędkości obrotowej, dla obu paliw są takie same i wynoszą odpowiednio 49,99 Hz, 99,98 Hz, oraz 149,97 Hz. Główna harmoniczna (49,99 Hz) o najwyższej amplitudzie (energii) występuje poza zakresem częstotliwości rezonansowej, a to oznacza, że w obu przypadkach zjawiska falowe nie wpływają na zwiększenie stopnia napełnienia. Dla wyższej prędkości obrotowej silnika widma sygnałów zmian ciśnienia w układzie dolotowym są podobne, z tą jednak różnicą, że główne składowe harmoniczne dla benzyny są przesunięte nieznacznie w kierunku wyższych częstotliwości. W widmach nie występuje także harmoniczna o częstotliwości rezonansowej 133 Hz.

Analiza częstotliwościowa sygnału zmian ciśnienia, przy zasilaniu silnika mieszankami metanu i wodoru, wykazała bardzo mały wpływ składu chemicznego tych mieszanin na zjawiska falowe. Zwiększenie procentowe zawartości wodoru w paliwie przesuwa jedynie nieznacznie składowe harmoniczne w kierunku wyższych częstotliwości (rysunek 8). Także w tych przypadkach w widmie nie występuje harmoniczna rezonansowa.

Wyniki wstępnej analizy częstotliwościowej pozwalają na stwierdzenie, że rodzaj paliwa, jego stan skupienia i gęstość nie wpływają znacząco na zjawiska falowe, jakie występują w układzie dolotowym oraz że badany układ dolotowy silnika samochodu Opel Astra 1.6 nie był projektowany pod kątem wykorzystania zjawiska rezonansu do doładowania dynamicznego silnika zarówno w zakresie niskich, jak i wyższych prędkości obrotowych.

Wydaje się też, że o ile metody symulacyjne mogą dobrze służyć do wstępnego doboru parametrów konstrukcyjnych układu dolotowego lub wprowadzania w nim zmian, to poszerzając wiedzę z zakresu analizy częstotliwościowej pulsacji ciśnienia o wpływ parametrów konstrukcyjnych i termodynamicznych na widmo sygnału można zbudować narzędzie do efektywnej i szybkiej oceny zmian wprowadzanych do konstrukcji tego układu.

Literatura

1. Kordziński C., Środulski T.: Układy dolotowe silnika spalinowego. WKŁ, Warszawa 1968.
2. Matzke W.: Projektowanie rozrządu czterosuwowych silników trakcyjnych. WKŁ, Warszawa 1989.
3. Mysłowski J.: Doładowanie bezsprężarkowe silników samoczynnych. WNT, Warszawa 1995.
4. Mysłowski J.: Doładowanie silników. WKŁ, Warszawa 2006.
5. Wendeker M.: Sterowanie napełnieniem w silniku samochodowym. LTN, Lublin 1999.
6. Zieliński T.: Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów. AGH, Kraków 2002.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Sławomir Luft

Artykuł stanowi sprawozdanie z badań statutowych BW-489/2007