

MAREK DYKIER, MAREK FLEKIEWICZ*

**ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA DRGAŃ
CZYNNIKA ROBOCZEGO W UKŁADZIE
DOLOTOWYM SILNIKA ZI**

**ANALYSIS OF VIBRATION FREQUENCY OF A WORKING
FACTOR IN THE SI ENGINE INLET SYSTEM**

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 wstępnej analizy częstotliwościowej sygnału zmiany ciśnienia absolutnego i wnioski z niej płynące.

Słowa kluczowe: układ dolotowy, analiza częstotliwościowa

Abstract

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 engine Opel 1.6. The results of analysis of frequency of signal pressure were presented with the conclusions.

Keywords: intake system, frequency analysis

* Mgr inż. Marek Dykier, dr inż. Marek Flekiewicz, Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych, Wydział Transportu, Politechnika Śląska w Gliwicach.

1. Wstęp

Zadaniem układu dolotowego silnika spalinowego jest doprowadzenie do cylindrów jak największej ilości czynnika roboczego (powietrza lub mieszanki paliwowo-powietrznej). Uzyskanie wysokiego stopnia napełnienia cylindra jest możliwe m.in. przez zminimalizowanie oporów przepływu w układzie dolotowym i wylotowym, 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 .

Czynniki 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 parametrów na stopień napełniania jest ogólnie znany i szeroko opisany w literaturze, 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 chwilowego obciążenia 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 i to one kształtują charakterystykę momentu obrotowego i mocy silnika, przy czym decydujące znaczenie ma w tym przypadku ciśnienie końca napełniania – p_a . Wartość tego ciśnienia można w praktyce zwiększać, 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,

np. 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, wskutek czego może nie występować znaczący efekt doładowania dynamicznego.

Niezależnie od tego, czy układ dolotowy jest 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 ma układy dolotowe zoptymalizowane przez producenta pod kątem paliwa bazowego. Zasilając te silniki alternatywnymi paliwami gazowymi, takimi jak LPG czy CNG, liczyć się należy ze zmianą parametrów pracy silnika spowodowaną głównie innymi ich własnościami, takimi jak niższa w porównaniu z benzyną wartość opałowa tych paliw, inna prędkość spalania i temperatura zapłonu, ale także w większości przypadków z niższym stopniem napełniania cylindra. O innym stopniu napełniania silnika paliwami gazowymi decydują głównie stan skupienia, gęstość i lepkość tych paliw, łatwość mieszania się z powietrzem oraz ich rozszerzalność cieplna. Nie zostało jednoznacznie określone, czy paliwa gazowe o innych niż benzyna stanie skupienia, gęstości i lepkości mają wpływ na pulsacje ciśnienia w układzie dolotowym, tzn., 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. 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 stanowisko pomiarowe

Pomiar i rejestrację zmian ciśnienia absolutnego w układzie dolotowym przeprowadzono na silniku doświadczalnego samochodu marki Opel Astra. Był to silnik ZI czterocyldrowy, ośmiozaworowy, o objętości 1600 cm³ i mocy 55 kW. Silnik przystosowany fabrycznie do zasilania wtryskowo benzyną został wyposażony w aparaturę umożliwiającą zasilanie także paliwami gazowymi LPG i CNG.

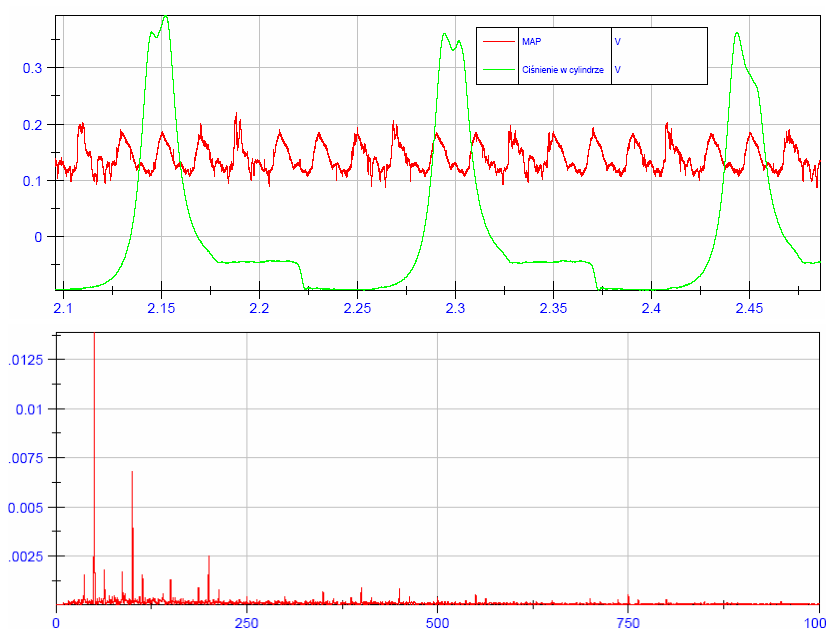
Badania wykonano w Laboratorium Badawczym Katedry Pojazdów Samochodowych, na atestowanej hamowni podwoziowej FLA 203 firmy Bosch. W trakcie badań poza rejestracją zmian ciśnienia absolutnego w układzie dolotowym mierzone były także inne parametry stanu pracy silnika, w tym m.in. ciśnienie w cylindrze, 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 za pomocą specjalistycznego oprogramowania Lab View i dSpace.

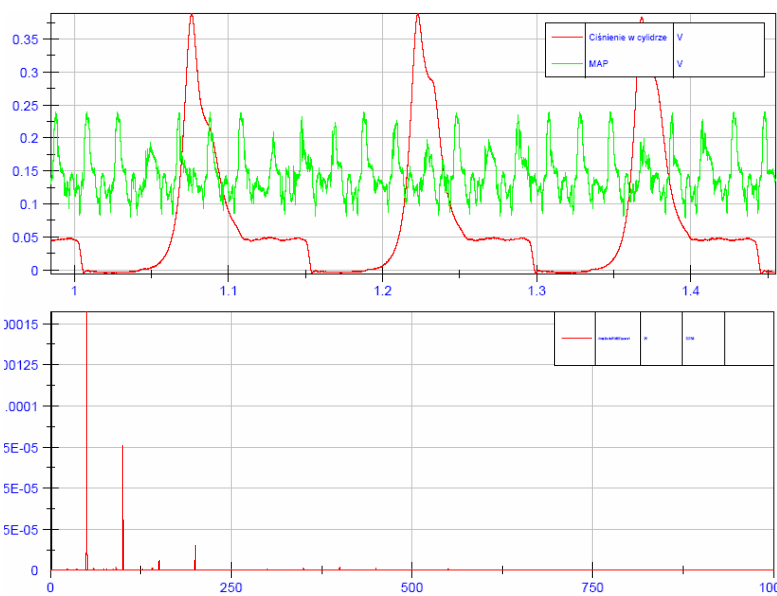
3. Analiza drgań czynnika roboczego w układzie dolotowym

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. Ponadto na rysunku 5 przedstawiono wyniki analizy zmian ciśnienia dla



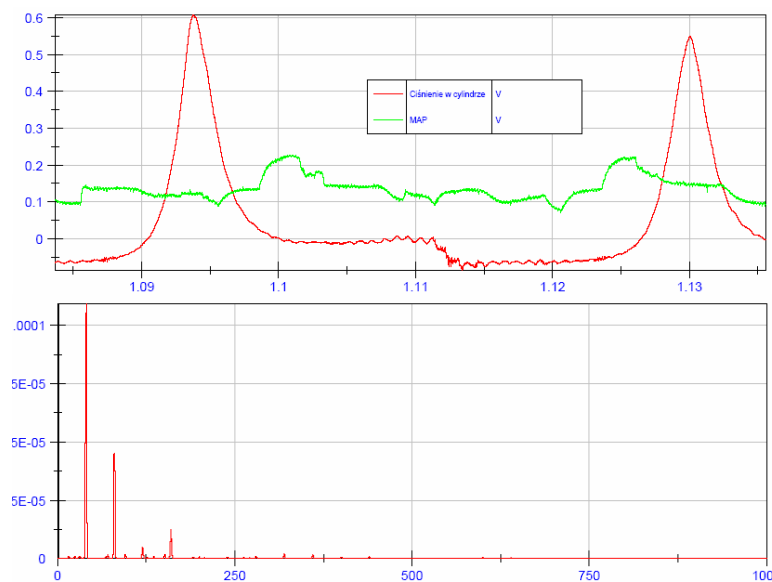
Rys. 1. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa ($n = 750$ obr./min; LPG)

Fig. 1. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency ($n = 750$ rpm; LPG)



Rys. 2. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa ($n = 750$ obr./min; benzyna)

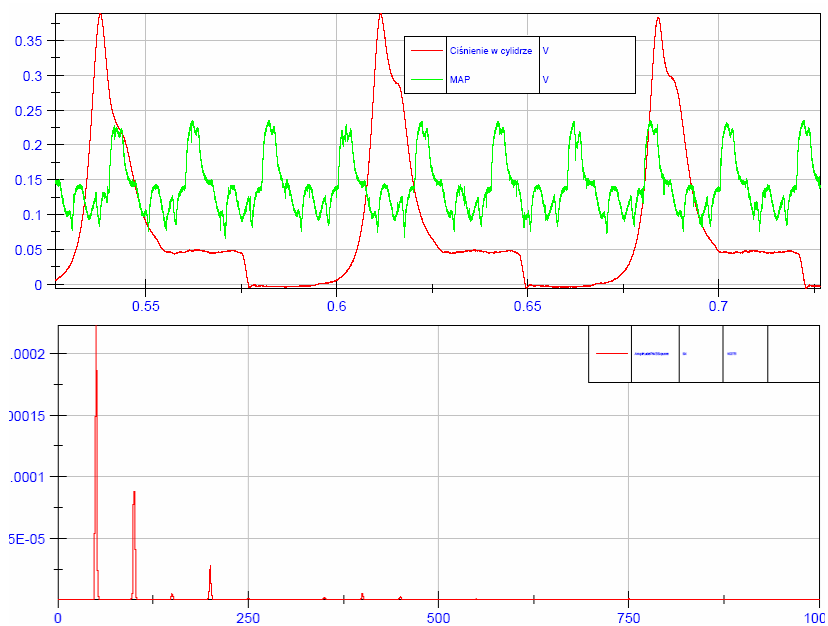
Fig. 2. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency ($n = 750$ rpm; petrol)



Rys. 3. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa ($n = 4000$ obr./min; LPG)

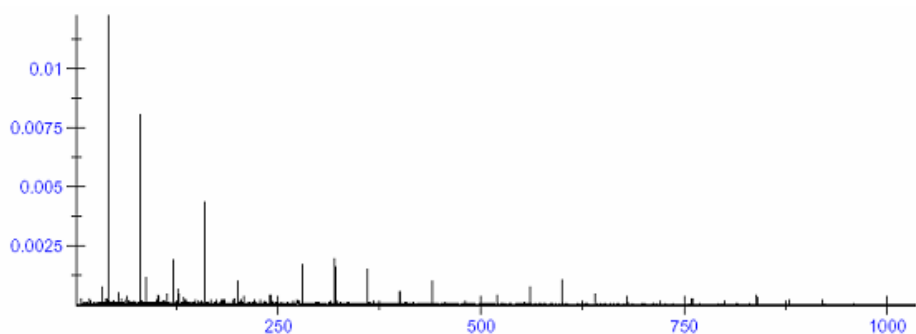
Fig. 3. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency ($n = 4000$ rpm; LPG)

wyższej prędkości obrotowej, zdjęte przy pełnym obciążeniu. Natomiast uzyskane tymi samymi metodami wyniki analizy dla innego paliwa gazowego, jakim były mieszanki metanu i wodoru, przedstawiono na rys. 6–11. Wykonano je dla trzech różnych składów chemicznych tego paliwa (CH_4 , $\text{CH}_4 + 5\% \text{H}_2$, $\text{CH}_4 + 15\% \text{H}_2$) przy prędkości biegu jałowego równej 800 obr./min oraz przy podwyższonej prędkości obrotowej i pełnym obciążeniu silnika.



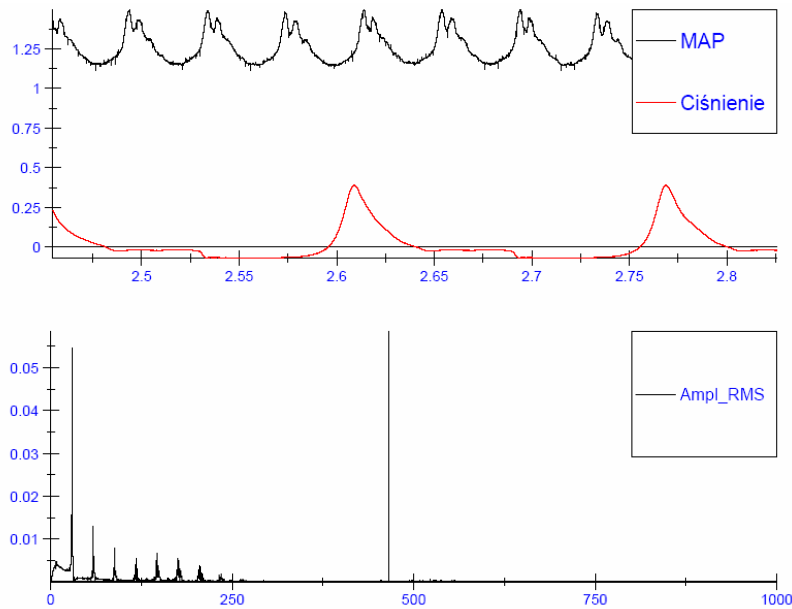
Rys. 4. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa ($n = 4000$ obr./min; benzyna)

Fig. 4. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency ($n = 4000$ rpm; petrol)



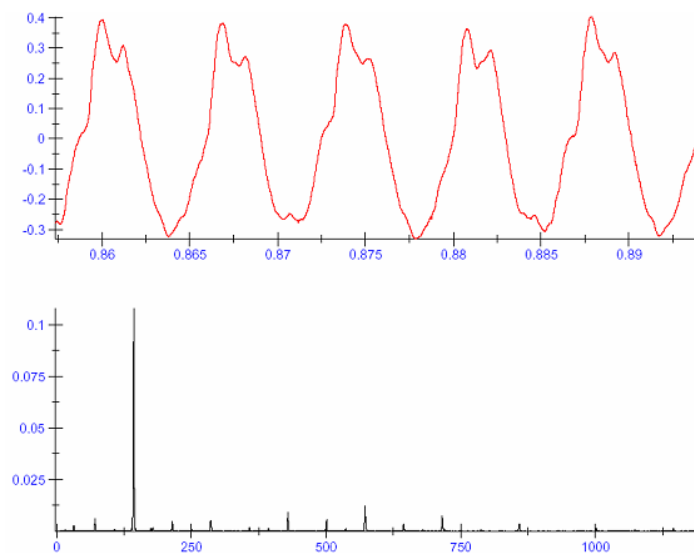
Rys. 5. Charakterystyka częstotliwościowa sygnału napięciowego zmiany ciśnienia w układzie dolotowym ($n = 4760$ obr./min; 100% obciążenia; LPG)

Fig. 5. Characteristics of frequency of signal of change pressure in intake system ($n = 4760$ rpm; full load; LPG)



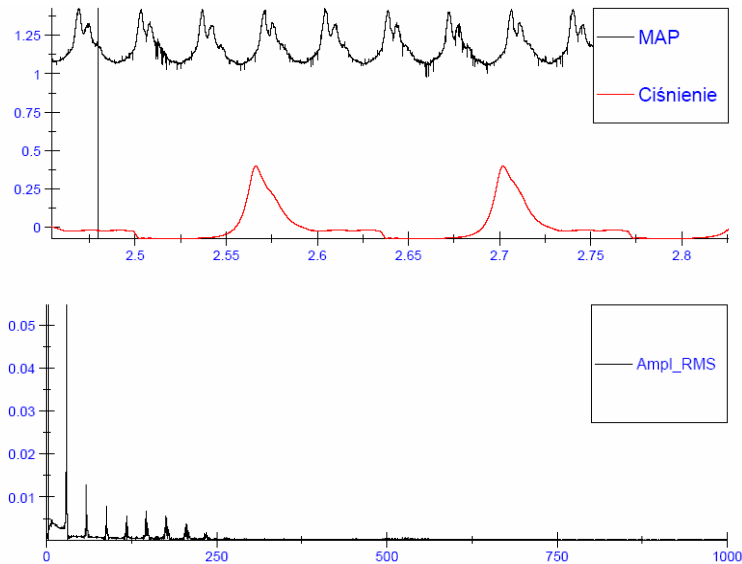
Rys. 6. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa ($n = 800$ obr./min; CH_4)

Fig. 6. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency ($n = 800$ rpm; CH_4)



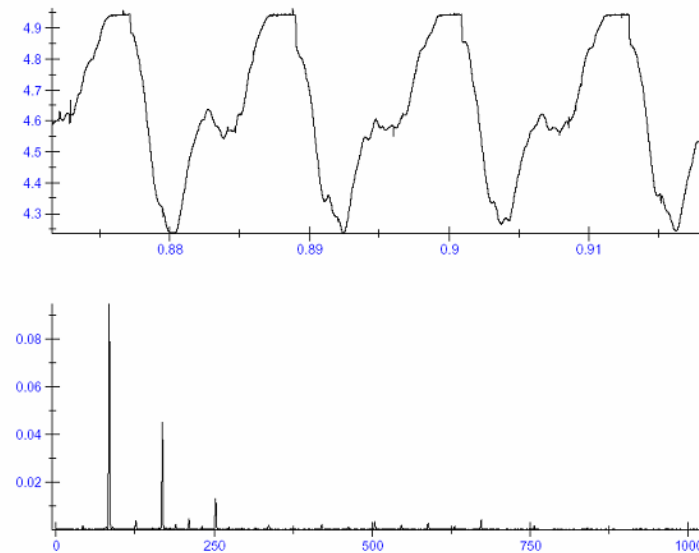
Rys. 7. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa ($n = 4270$ obr./min; CH_4)

Fig. 7. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency ($n = 4270$ rpm; CH_4)



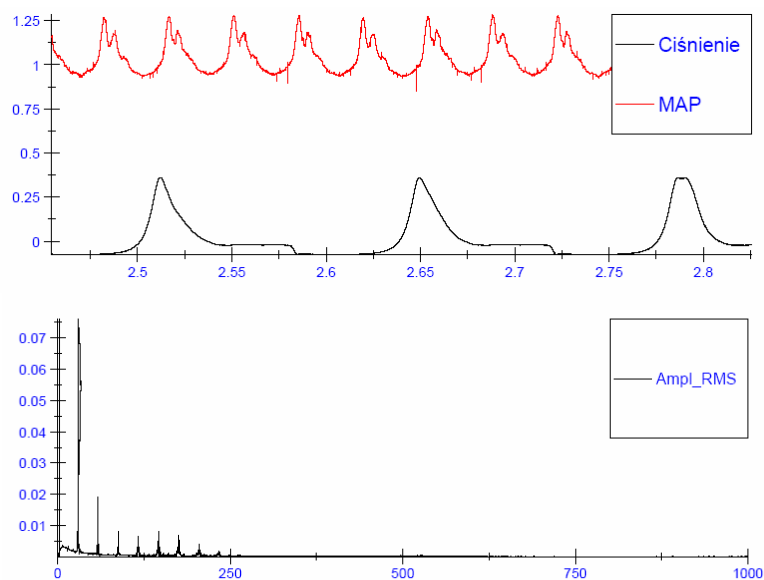
Rys. 8. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa ($n = 800$ obr./min; $\text{CH}_4 + 5\% \text{H}_2$)

Fig. 8. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency ($n = 800$ rpm; $\text{CH}_4 + 5\% \text{H}_2$)



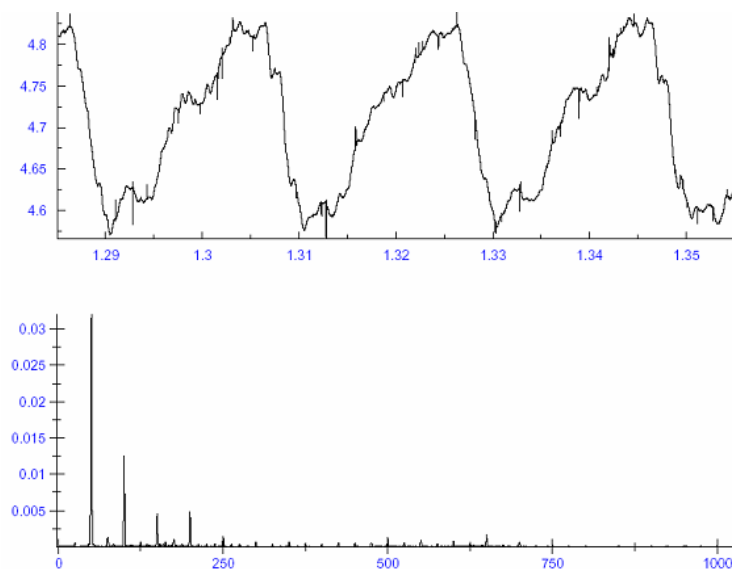
Rys. 9. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa ($n = 2536$ obr./min; 100% obciążenia; $\text{CH}_4 + 5\% \text{H}_2$)

Fig. 9. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency ($n = 2536$ rpm; full load; $\text{CH}_4 + 5\% \text{H}_2$)



Rys. 10. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa ($n = 800$ obr./min; $\text{CH}_4 + 15\% \text{H}_2$)

Fig. 10. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency ($n = 800$ rpm; $\text{CH}_4 + 15\% \text{H}_2$)



Rys. 11. Sygnał napięciowy zmiany ciśnienia w układzie dolotowym i jego charakterystyka częstotliwościowa ($n = 3000$ obr./min; 100% obciążenia $\text{CH}_4 + 15\% \text{H}_2$)

Fig. 11. Signal of change pressure in intake system and its characteristics of frequency ($n = 3000$ rpm; full load; $\text{CH}_4 + 15\% \text{H}_2$)

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].

4. Podsumowanie

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 niskich prędkości obrotowych 750 i 800 obr./min częstotliwości rezonansowe wynoszą, odpowiednio – 25 i 26,6 Hz, a dla wyższych prędkości obrotowych, np. 3000, 4000 lub 4760 obr./min, odpowiednio – 100, 133 i 158,6 Hz.

Na podstawie przedstawionych wykresów 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 podobne (rys. 1–4).

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 pracującego bez obciążenia widma sygnałów zmian ciśnienia w układzie dolotowym są podobne, z tą 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.

Korzystniejsze warunki napełnienia pojawiają się dopiero przy obciążeniu i wyższej prędkości obrotowej silnika (rys. 5). W widmie pojawia się częstotliwość rezonansowa, jest to jednak nie główna, lecz trzecia, znacząca harmoniczna.

Podobne rezultaty uzyskano w wyniku analizy częstotliwościowej sygnału zmian ciśnienia w układzie dolotowym silnika pracującego na wolnych obrotach i zasilanego mieszankami metanu i wodoru. Zwiększenie procentowe zawartości wodoru w paliwie przesuwają jedynie nieznacznie składowe harmoniczne w kierunku wyższych częstotliwości. Także w tych przypadkach w widmie nie występuje harmoniczna rezonansowa.

Jednak przy wyższych prędkościach obrotowych silnika pracującego zarówno bez, jak i przy pełnym obciążeniu pojawiają się częstotliwości rezonansowe będące głównymi harmonicznymi lub jedną z głównych harmonicznych widma zmiany ciśnienia w układzie dolotowym (rys. 7, 9 i 11). W tych stanach pracy silnika zasilanego czystym metanem oraz mieszanką o niskiej zawartości wodoru (5%) występuje pełny efekt doładowania dynamicznego, poprawiający wskaźniki jego pracy.

Na podstawie uzyskanych wyników można zaryzykować stwierdzenie, że wzrost zawartości wodoru w mieszance paliwowej wpływa na zjawiska falowe w przewodzie dolotowym, obniżając częstotliwości rezonansowe dominant i tym samym przesuwają

przez silnik maksymalny moment obrotowy w kierunku niższych prędkości obrotowych oraz że wzrost zawartości wodoru już powyżej 10%, korzystny z innych względów (technicznych, ekonomicznych czy ekologicznych), zmniejsza efekt doładowywania dynamicznego.

Przeprowadzone wstępnie dla wybranych punktów pracy silnika analizy częstotliwościowe pozwalają na stwierdzenie, że rodzaj paliwa, a także jego skład chemiczny wpływają 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 projektowania w nim zmian, to poszerzając wiedzę z zakresu analizy częstotliwościowej pulsacji ciśnienia również o wpływ parametrów konstrukcyjnych i termodynamicznych na widmo sygnału, można zbudować narzędzie do efektywnej i szybkiej oceny zmian wprowadzonych do konstrukcji tego układu.

Literatura

- [1] Kordziński C., Środulski T., *Układy dolotowe silnika spalinowego*, WKiŁ, Warszawa 1968.
- [2] Matzke W., *Projektowanie rozrządu czterosuwowych silników trakcyjnych*, WKiŁ, Warszawa 1989.
- [3] Mysłowski J., *Doładowanie bezsprężarkowe silników samoczynnych*, WNT, Warszawa 1995.
- [4] Mysłowski J., *Doładowanie silników*, WKiŁ, 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.