

OCENA WYBRANYCH PARAMETRÓW REGULACYJNYCH TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM NA PODSTAWIE SYGNAŁU WIBROAKUSTYCZNEGO

Grzegorz BORUTA

Katedra Mechatroniki, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
ul. Heweliusza 10, 10-724 Olsztyn, g.boruta@uwm.edu.pl

Streszczenie

Przedstawiono wpływ wybranych parametrów regulacyjnych tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym (kąta wyprzedzenia i ciśnienia wtrysku oraz dawki paliwa) na wybrane parametry sygnału wibroakustycznego rejestrowanego na jego kadłubie i głowicy (wybrane składowe zawarte w widmach amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań prostopadłych do powierzchni mocowania czujników pomiarowych na kadłubie i głowicy).

Słowa kluczowe: diagnostyka wibroakustyczna, tłokowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym.

THE APPRECIATION OF SELECT REGULATIVE PARAMETERS OF THE DIESEL ENGINE ON THE BASE OF THE VIBROACOUSTIC SIGNAL

Summary

The influence of select regulative parameters of the Diesel engine (injection advance angle, injection pressure and fuel charge) on select parameters of the vibroacoustic signal measured on his crankcase and cylinder head (select spectral components of vibration accelerations perpendicular to measurement sensor clamping surfaces on crankcase and cylinder head) was presented.

Keywords: vibroacoustic diagnosing, diesel engine.

1. WPROWADZENIE

Z analizy stanu badań nad diagnostyką wibroakustyczną tłokowych silników spalinowych wynika, że badania te koncentrowały się na poszukiwaniu związków między różnymi parametrami rejestrowanych sygnałów wibroakustycznych a stanami technicznymi wynikającymi ze zużycia eksploatacyjnego tych silników [2]. Obecnie jednak, uwzględniając postęp inżynierii materiałów eksploatacyjnych i konstrukcyjnych tłokowych silników spalinowych, gdy ich trwałość jest porównywalna, a często nawet większa niż trwałość całych pojazdów, w diagnostyce tłokowych silników spalinowych obserwuje się tendencję do skupiania uwagi na zmianach stanu technicznego wynikających nie ze zużycia eksploatacyjnego, ale z mogących wystąpić rozregulowań i innych usterek wpływających na jakość eksploatacji, w tym na jakość spalania determinującą np. zużycie paliwa, toksyczność spalin czy hałaśliwość. Pod pojęciem parametrów regulacyjnych rozumie się te spośród parametrów struktury, określających dany stan techniczny badanego silnika, których wartości można zmieniać w pewnych zakresach określonych w instrukcji eksploatacji tego silnika podczas wykonywania obsługi technicznych. Parametrami regulacyjnymi klasycznego tłokowego silnika

spalinowego o zapłonie samoczynnym (o ZS) są takie parametry jak: luz zaworowy, kąt wyprzedzenia i ciśnienie wtrysku oraz dawka paliwa, napięcie pasków klinowych, luzy w układzie sterowania pompą wtryskową czy napięcie sprężyn w regulatorze prędkości obrotowej. Parametrami determinującymi jakość spalania paliwa są kąt wyprzedzenia i ciśnienie wtrysku oraz dawka paliwa. Badania niezawodności pojazdów napędzanych przez silniki o ZS pokazują jednocześnie, że właśnie te parametry są jednymi z parametrów struktury najczęściej ulegających niepożądanym zmianom w trakcie eksploatacji pojazdów [6].

Z badań procesów zachodzących podczas pracy silnika o ZS wynika [5], że zwiększenie kąta wyprzedzenia wtrysku (zwiększenie ilości paliwa spalane kinetycznie) oraz zmniejszenie ciśnienia wtrysku i dawki paliwa do części cylindrów (nierównomierność dawkowania paliwa) powoduje zwiększenie „twardości” jego pracy, przejawiającej się nie tylko zwiększeniem słuchowo odbieranej hałaśliwości tej pracy, ale również zwiększeniem poziomu drgań jego kadłuba i głowicy, szczególnie w zakresach odpowiadających częstotliwościom drgań generowanych przez pracujące elementy układu tłokowo-korbowego silnika. Z analizy źródeł generacji drgań w silniku wynika, że częstotliwości drgań związanych z pracą

elementów układu tłokowo-korbowego są równe trzem pierwszym wielokrotnościom częstości obrotów wału korbowego [1].

Celem prezentowanych badań było określenie związków między wybranymi parametrami sygnału wibroakustycznego rejestrowanego na kadłubie i głowicy tłokowego silnika spalinowego o ZS (wielkością wybranych składowych występujących w wąskopasmowych widmach amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań) i symulowanymi zmianami wartości wybranych parametrów regulacyjnych tego silnika pod kątem możliwości wykorzystania tych związków do opracowania metody wibroakustycznego diagnozowania badanego silnika w zakresie symulowanych zmian parametrów regulacyjnych.

2. EKSPERYMENT DIAGNOSTYCZNY

Obiektem badań był dotarty, rządowy, sześciocyndrowy, niedoładowany silnik o ZS typu S359. Silnik ten, o mocy nominalnej 110 kW, jest stosowany między innymi do napędu samochodów ciężarowych STAR serii 200 [3]. Silnik S359 jest zasilany w paliwo przez rządową, sześciotłoczkową pompę wtryskową typu P76-15u/M z mechanicznym dwuzakresowym regulatorem prędkości obrotowej typu R8E-20 oraz wyposażony we wtryskiwacze typu W1F-01 z rozpylaczem trzyotworowym typu D1LMK148/1.

W trakcie realizacji badań zastosowano eksperyment czynny, podczas którego zmieniano wartości trzech wybranych parametrów regulacyjnych: kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do wszystkich cylindrów, dawki paliwa do jednego cylindra i zmiany ciśnienia wtrysku paliwa w jednym wtryskiwaczu. Sygnały wibroakustyczne rejestrowano dla silnika rozgrzanego do temperatur eksploatacyjnych.

Zmianę kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa realizowano poprzez odpowiednie obracanie wałka pompy wtryskowej względem wałka sprzęgła pompy wtryskowej [3]. Ustawiano jedną z dwu wartości kąta wyprzedzenia wtrysku: wartość nominalną ($18,5^\circ$) lub wartość zmniejszoną (przyjęto 8°).

Zmianę ciśnienia wtrysku paliwa realizowano dla jednego wtryskiwacza, zasilającego wybrany (drugi) cylinder silnika, poprzez zmianę napięcia sprężyny dociskowej iglicy [3]. Ustawiano jedną z dwu wartości ciśnienia wtrysku: wartość nominalną (21,5 MPa) lub zmniejszoną (przyjęto 10 MPa).

Zmianę dawki paliwa realizowano dla wybranej (drugiej) sekcji tłoczącej poprzez całkowite odłączenie wtryskiwacza od sekcji tłoczącej. Ustawiano jedną z dwu wartości dawki: wartość nominalną lub zerową w całym zakresie prędkości obrotowych wału korbowego.

Badania przeprowadzono na stanowisku hamownianym, przy czym silnik był wyposażony

w oryginalny osprzęt pracujący w podobny sposób jak w pojeździe. Ponieważ uzyskane wyniki badań miały potencjalnie służyć do budowy nowej metody diagnostycznej silnika, zdecydowano się na prowadzenie badań przy prędkościach obrotowych do osiągnięcia podczas diagnozowania eksploatacyjnego pojazdów (bez demontażu silnika z pojazdu) w warunkach braku zewnętrznego obciążenia, to jest przy prędkościach biegu jałowego i maksymalnej regulowanej. Ustalenie braku obciążenia wynikło z faktu, że stosowanie stałych i ściśle określonych obciążeń układu napędowego samochodu podczas stacjonarnych, warsztatowych badań diagnostycznych wymaga wyposażenia stacji diagnostycznej w hamownię podwoziową, co jest rzadkością. Przyjęcie wybranych prędkości obrotowych wału korbowego wyniknęło z faktu, że przy stosowanych dwuzakresowych regulatorach prędkości obrotowej nie jest możliwe ustalenie, w warunkach braku zewnętrznego obciążenia silnika, pośrednich prędkości obrotowych. Fabryczne nastawy regulacyjne pomp wtryskowych zapewniają utrzymywanie przez badany silnik wartości prędkości obrotowej biegu jałowego w szerokim zakresie 500÷650 obr/min oraz wartości maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej na poziomie ok. 3100 obr/min [3].

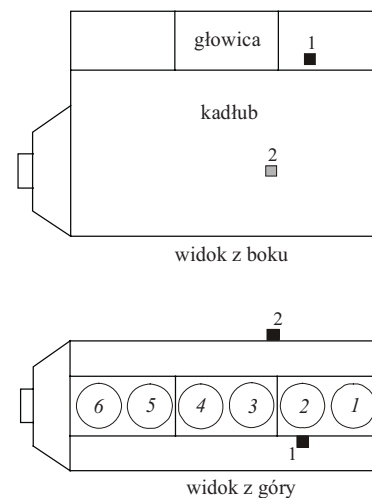
Opisane symulacje zmian parametrów regulacyjnych oraz sposobu działania badanego silnika, pozwala przewidzieć niektóre wyniki realizowanego eksperymentu. W warunkach symulowanej zerowej dawki paliwa do drugiego cylindra wtryskiwacz drugiego cylindra nie będzie pracował i bez znaczenia będzie ciśnienie wtrysku paliwa do tego cylindra, a więc sygnały wibroakustyczne zarejestrowane w danym punkcie pomiarowym dla tego samego sposobu mocowania czujnika do powierzchni silnika powinny być do siebie bardzo podobne. Otrzymanie innych wyników może być spowodowane istotnym wpływem zakłóceń, związanych np. z brakiem możliwości utrzymywania stałej ustalonej prędkości obrotowej wału korbowego. Zmiany chwilowych wartości ustalanych prędkości obrotowych wału korbowego, wynikające z pracy kolejnych cylindrów, są absolutnie typowe dla tłokowych silników spalinowych. Z kolei zmiany uśrednionych za kolejne obroty wału korbowego wartości chwilowych prędkości obrotowej wału korbowego mogą wynikać z jakości pracy układu zasilania silnika, szczególnie w paliwo. W efekcie obserwowanych wahań wartości prędkości obrotowej wału korbowego, prądków w widmach amplitudowo-częstotliwościowych rejestrowanych sygnałów wibroakustycznych mogą ulegać zniekształceniom, co z kolei może utrudnić, a nawet uniemożliwić opracowanie wibroakustycznej metody diagnozowania badanego silnika.

Powszechnie stosowanym sposobem ograniczania wpływu zmian prędkości obrotowej wirującego elementu na analizowane parametry sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych dla maszyn z takim wirującym elementem (np. kołem napędzającym w przekładni zębatej, rotorem w silniku elektrycznym czy wałem korbowym w tłokowym silniku spalinowym) jest uśrednianie synchroniczne zarejestrowanego sygnału wibroakustycznego [4]. Uśrednianie to polega na analizie sygnału wibroakustycznego uśrednionego dla kolejnych jego fragmentów o długości równej przyjętemu w trakcie uśredniania czasowi trwania jednego obrotu wirującego elementu (tu wału korbowego). Aby można było wykonać uśrednianie synchroniczne, potrzebne jest pewne urządzenie, które w dodatkowym torze pomiarowym (do torów pomiaru sygnałów wibroakustycznych) wysyłałoby informację (sygnał strobulujący) do układu analitycznego (procesora systemu diagnostycznego), potrzebną do odpowiedniego podzielenia rejestrowanego sygnału wibroakustycznego na fragmenty odpowiadające pojedynczym obrotom wału korbowego. Pewną wadą tej metody jest występowanie w otrzymywanych widmach niezerowych składowych tylko dla częstotliwości będących całkowitymi wielokrotnościami przyjętej częstości obrotów wirującego elementu.

Z analizy konstrukcji badanego silnika pod kątem wytypowania urządzenia mogącego służyć jako źródło sygnału strobulującego możliwego do wykorzystania w jego diagnozowaniu eksploatacyjnym i bez konieczności dokonywania w nim większych zmian konstrukcyjnych wynika, że najbardziej dostępnymi elementami mogącymi służyć do tego celu są oba końce wału korbowego (to jest koło zamachowe z wieńcem zębatym lub tłumik drgań skrętnych wału korbowego z kołem pasowym napędu pompy wody i alternatora) oraz przewody wtryskowe. W trakcie realizacji pracy wykorzystano jeden z końców wału korbowego – na wyjściu z silnika zamocowano tarczę z nacięciem, którego przejście przed czujnikiem fotoelektrycznym wyzwalalo sygnał strobulujący co jeden obrót wału korbowego. Co prawda chwilowa prędkość obrotowa wału korbowego zmienia się w trakcie jednego obrotu wału korbowego trzykrotnie w związku z przyspieszaniem wału korbowego przez kolejno pracujące w tym czasie trzy cylindry, liczono jednak na zminimalizowanie wpływu zmian ustalonej (uśrednionej za obrót) prędkości obrotowej wału korbowego, spowodowanych pracą regulatora prędkości obrotowej i pompy wtryskowej, na wyniki analizy sygnałów wibroakustycznych.

Czujniki pomiarowe mogą być przytwierdzone do powierzchni kadłuba lub głowicy w różny sposób, jednak w przypadku mocowania czujników do pracującego silnika spalinowego jedynymi możliwymi sposobami są przykręcenie za pomocą

śruby (po wcześniejszym wykonaniu odpowiedniego gwintowanego otworu) lub przyłączenie za pomocą magnesu trwałego (ale tylko do kadłuba żeliwnego (ferromagnetycznego)). Obie te metody wymagają płaskiej powierzchni o średnicy ok. 2÷3 cm. Takie powierzchnie, technologicznie wykonywane w badanym silniku, znajdują się na wysokości łożysk głównych wału korbowego oraz na ścianach głowicy. W związku z tym, jako miejsca rejestracji sygnałów wibroakustycznych wybrano nadlew technologiczny w osi wału korbowego po prawej stronie silnika oraz płaską powierzchnię głowicy w osi drugiego cylindra tuż przy połączeniu głowicy z kadłubem po lewej stronie silnika. Miejsca mocowania czujników schematycznie pokazano na rys. 1. W trakcie realizacji eksperymentu zdecydowano się na zastosowanie połączeń gwintowanych wykonanych w obrębie tych wybranych płaskich powierzchni, gdyż w fazie przygotowawczej do badań stwierdzono, że siła, z jaką magnes wiąże czujnik drgań z powierzchnią pracującego silnika, zwłaszcza z prędkością obrotową maksymalną regulowaną, jest niewystarczająca dla zapewnienia mocowania, które nie powoduje występowania zakłóceń związanych z chwilowym odrywaniem się magnesu od silnika.



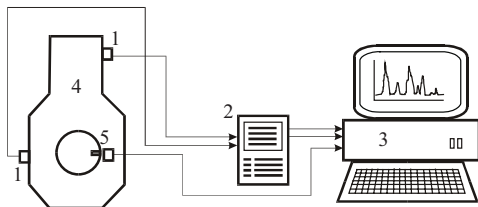
Rys. 1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na silniku:

- 1 – punkt mocowania czujnika na głowicy silnika,
2 – punkt mocowania czujnika na kadłubie silnika,

① ÷ ⑥ – cylindry silnika

Rejestracji sygnałów wibroakustycznych – przebiegów czasowych przyspieszeń drgań prostopadłych do powierzchni montażu czujników, dokonywano za pomocą piezoelektrycznych ładunkowych czujników drgań typu B&K 4384 (użyteczny zakres pomiarowy 0÷6 kHz oraz poprawna praca w zakresie od -70 do +250°C). Otrzymane sygnały ładunkowe były przetwarzane

na sygnały napięciowe i wzmacniane we wzmacniaczu ładunku typu B&K NEXUS. Rejestracji sygnału strobuującego dokonywano za pomocą czujnika fotoelektrycznego produkcji Zakładu Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nieelektrycznych. Za pomocą czterokanałowego układu analityczno-pomiarowego typu Roadrunner firmy Skalar Instruments przez 30 s cyfrowo rejestrowano jednocześnie oba sygnały wibroakustyczne i sygnał strobujący, próbkując je z częstotliwością 10 kHz w zakresie 0÷2000 Hz. Następnie korzystając z algorytmów uśredniania synchronicznego i FFT wykonywano dyskretne widma amplitudowo-częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów wibroakustycznych zarówno nieuśrednionych jak i uśrednionych synchronicznie. Konfigurację układu pomiarowego przedstawiono schematycznie na rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego sygnałów wibroakustycznych

- 1 – czujniki przyspieszeń drgań B&K 4384,
 2 – wzmacniacz ładunku B&K NEXUS,
 3 – układ pomiarowo-analityczny Skalar Instruments „Roadrunner”, 4 – silnik,
 5 – czujnik prędkości obrotowej wału korbowego silnika

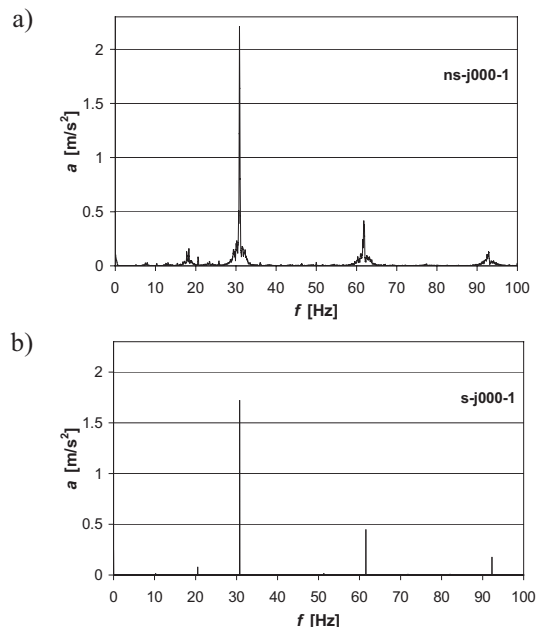
W celu jednoznacznej identyfikacji, plikom zawierającym wyniki pomiarów i obliczeń nadano nazwy o postaci A-BXYZ-C, gdzie:

- A = ns – dla sygnałów nieuśrednionych synchronicznie,
 s – dla sygnałów uśrednionych synchronicznie,
 B = j – dla badań silnika przy prędkości obrotowej biegu jałowego,
 m – dla badań silnika przy prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej,
 X = 0 – dla badań silnika z nominalną wartością kąta wyprzedzenia wtrysku,
 1 – dla badań silnika ze zmniejszoną wartością kąta wyprzedzenia wtrysku,
 Y = 0 – dla badań silnika z nominalną wartością ciśnienia wtrysku,
 1 – dla badań silnika ze zmniejszoną wartością ciśnienia wtrysku dla jednego (drugiego) wtryskiwacza,
 Z = 0 – dla badań silnika z nominalną wartością dawki paliwa,
 1 – dla badań silnika ze zmniejszoną do zera wartością dawki paliwa w jednej (drugiej) sekcji tłoczącej,
 C – jest numerem punktu pomiarowego.

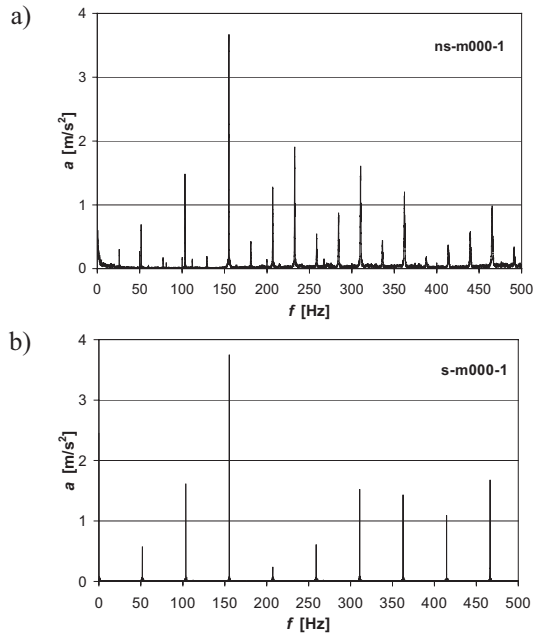
3. WYNIKI BADAŃ

Na rys 3 i 4 przedstawiono fragmenty przykładowych widm amplitudowo-częstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych o długości ok. 10-krotnie dłuższej niż wartość częstości obrotów wału korbowego f_w . Na rys. 3a przedstawiono przykładowe widmo sygnału nieuśrednionego synchronicznie, a na rys. 3b sygnału uśrednionego synchronicznie zarejestrowanego na silniku pracującym z prędkością obrotową biegu jałowego. Na rys. 4a i 4b przedstawiono przykładowe widma odpowiednio dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej.

W widmach amplitudowo-częstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową biegu jałowego najwyższe składowe widmowe, mające postać wyraźnie zarysowanych, ostrych prążków, występują dla częstości odpowiadających trzy- i sześciokrotnej częstości obrotów wału korbowego f_w . Z analizy źródeł generacji sygnałów wibroakustycznych w silniku [1] wynika, że z częstością $3f_w$ generowane są drgania w wyniku przekładania wszystkich tłoków w zwrocie zewnętrznym, pracy zaworów i spalania we wszystkich cylindrach. Częstość $6f_w$ to wielokrotność częstości $3f_w$, ale także



Rys. 3. Widmo do 100 Hz sygnału wibroakustycznego zarejestrowanego w punkcie pomiarowym nr 1 dla silnika pracującego z prędkością obrotową biegu jałowego ($f_w \approx 10$ Hz) i nominalnych wartości wszystkich zmienianych parametrów regulacyjnych:
 a) nieuśrednionego synchronicznie
 b) uśrednionego synchronicznie



Rys. 4. Widmo do 500 Hz sygnału wibroakustycznego zarejestrowanego w punkcie pomiarowym nr 1 dla silnika pracującego z prędkością obrotową maksymalną regulowaną ($f_w \approx 50$ Hz) i nominalnych wartości wszystkich zmienianych parametrów regulacyjnych:
 a) nieuśrednionego synchronicznie
 b) uśrednionego synchronicznie

częstotliwość wymuszeń związanych z przekładaniem wszystkich tłoków (zarówno w zwrocie zewnętrznym, jak i wewnętrznym). Oprócz nich zauważalny jest jeszcze cały szereg składowych, powtarzających się co $0,25 f_w$. Wyraźnie wyższe są składowe rzędu $0,75 f_w$, $1 f_w$ (tylko dla punktu pomiarowego na kadłubie), w pobliżu 18 Hz (rzędu $1,5 f_w$, $1,75 f_w$ lub $2 f_w$ zależnie od wartości ustalonej częstości obrotów f_w) oraz $9 f_w$ i $12 f_w$. Z analizy źródeł generacji sygnałów wibroakustycznych w silniku [1] wynika, że z częstotliwością $1 f_w$ generowane są drgania w wyniku przekładania tłoka w jednym cylindrze i niewyważenia wału korbowego w ruchu obrotowym, a z częstotliwością $2 f_w$ w wyniku niewyważenia tłoka w ruchu posuwisto-zwrotnym i uderzeń czopów wału korbowego w łożyskach ślizgowych.

W widmach amplitudowo-częstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową biegu jałowego, podobnie jak w widmach sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie, najwyższe prążki występują dla częstotliwości 3 i $6 f_w$. Wyraźnie są też prążki rzędu $2 f_w$, $9 f_w$, $12 f_w$ i $15 f_w$ oraz $1 f_w$ dla punktu pomiarowego na kadłubie. Dla wyższych częstotliwości interesujący jest prążek rzędu $124 f_w$. Prążek ten, ale tylko dla stanów technicznych z niezmiennymi ciśnieniem wtrysku i dawką

paliwa do drugiego cylindra, jest wyraźnie wyższy niż wszystkie pozostałe, niewielkie prążki występujące w widmach dla wyższych częstotliwości i osiąga wielkość prążka rzędu $6 f_w$ w widmach sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na głowicy oraz dwukrotną wielkość prążka rzędu $6 f_w$ (a więc połowę wielkości najwyższego prążka rzędu $3 f_w$) w widmach sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na kadłubie silnika.

Widma amplitudowo-częstotliwościowe sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową maksymalną regulowaną składają się z całego szeregu składowych powtarzających się co $f_w/6$, przy czym wyraźnie wyższe, tworzące wyraźne prążki, powtarzają się co $0,5 f_w$ (z częstotliwością $0,5 f_w$ generowane są drgania związane z pracą pojedynczego cylindra [1]). Widoczne są wyraźne różnice między widmami sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na głowicy i na kadłubie silnika, szczególnie w paśmie do 200 Hz (do składowej odpowiadającej czterokrotnej częstości obrotów wału korbowego). Dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych w punkcie pomiarowym na głowicy, najwyższa w widmach jest składowa dla częstotliwości $3 f_w$ (podobnie jak dla prędkości obrotowej biegu jałowego). Wyraźne są też składowe dla częstotliwości 1 i $2 f_w$. Dla sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych w punkcie pomiarowym na kadłubie najwyższa w widmach jest składowa dla częstotliwości $2 f_w$ a składowe dla częstotliwości 1 i $3 f_w$ prawie jej dorównują. Od częstotliwości około 200 Hz w widmach sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie występuje cały szereg niezerowych składowych powtarzających się co $0,5 f_w$.

Dla sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie, zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową maksymalną regulowaną, podobnie jak sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie, widać wyraźne różnice między widmami tych sygnałów zarejestrowanych w punkcie pomiarowym na głowicy i na kadłubie silnika – dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na głowicy najwyższy jest prążek rzędu $3 f_w$ i wyraźne są też prążki rzędu $1 f_w$ i $2 f_w$, zaś dla sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych na kadłubie najwyższy jest prążek rzędu $2 f_w$ i wyraźne są też prążki rzędu $1 f_w$ i $3 f_w$. Od częstotliwości 200 Hz w widmach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie występują co f_w wyraźne prążki o zróżnicowanej wielkości, której zmiany trudno powiązać z symulowanymi zmianami parametrów regulacyjnych. Dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej częstotliwość prążka rzędu $124 f_w$ wynosi około

6430 Hz i ponad trzykrotnie przekracza górną granicę analizowanego przedziału częstotliwości.

Częstotliwość występowania składowych widmowych, związanych z maksymalną regulowaną prędkością obrotową wału korbowego, wynosi około 51,8 Hz. Jest więc bardzo bliska wartości 50 Hz, czyli częstotliwości ewentualnego sygnału zakłócającego pochodzącego od zmian napięcia zasilającego aparaturę pomiarowo-analityczną w energię elektryczną. W widmie sygnału wibroakustycznego nieuśrednionego synchronicznie, przedstawionym na rys. 4a widać wyraźnie, że zakłócenia te rzeczywiście występują w rejestrowanym sygnale wibroakustycznym, co przejawia się obecnością prążków dla częstotliwości 50 i 100 Hz. Są one jednak zawsze wyraźnie oddzielone i mniejsze od prążków rzędu $1f_w$ i $2f_w$. W pobliżu prążka rzędu $3f_w$, czyli dla częstotliwości 150 Hz żadnego prążka w widmie nie ma. W widmie sygnału wibroakustycznego uśrednionego synchronicznie, przedstawionym na rys. 4b, brak prążków dla częstotliwości 50 i 100 Hz.

W tabelach 1 i 2 przedstawiono względne zmiany wielkości składowej rzędu $3f_w$ w widmach sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych i uśrednionych synchronicznie, zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową odpowiednio biegu jałowego i maksymalną regulowaną, odpowiadające kolejno: zmniejszeniu kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, zmniejszeniu ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra i zmniejszeniu dawki paliwa do drugiego cylindra. Wartości te są różnicami między wielkościami analizowanej składowej widmowej dla stanów po i przed zmianą danego parametru regulacyjnego, odniesionymi do wielkości analizowanej składowej dla stanów sprzed zmiany danego parametru regulacyjnego. Np. wartość względna dla zmiany stanu X00 została wyznaczona z zależności

$$\frac{a_{100} - a_{000}}{a_{000}} * 100\%, \text{ a dla zmiany stanu 01Z}$$

z zależności $\frac{a_{011} - a_{010}}{a_{010}} * 100\%$. Dla prędkości

obrotowej maksymalnej regulowanej wyznaczono również względne zmiany wielkości składowych widmowych rzędu $1f_w$ i $2f_w$.

3.1. Prędkość obrotowa biegu jałowego

Wyznaczone zmiany wielkości analizowanej składowej widmowej sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie, odpowiadające różnym zmianom parametrów regulacyjnych, są bardzo zróżnicowane i trudno określić jakiegokolwiek zależności między zmianami wielkości analizowanej składowej widmowej a symulowanymi zmianami parametrów regulacyjnych. Zaobserwowano także różnice między wyznaczonymi zmianami wielkości analizowanej składowej widmowej przy zmianie

ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra w warunkach zmienionej (zerowej) dawki paliwa do tego cylindra. Stwierdzono również około dwudziestoprocentowe zmiany wielkości analizowanej składowej dla stanów 000 i 000k – stanów z takimi samymi symulowanymi wartościami zmienianych parametrów regulacyjnych. Wyjaśnieniem obserwowanych zmian mogą być różne ustalone wartości prędkości obrotowej wału korbowego i zmiany chwilowej wartości tej prędkości, których wpływ na widma nie jest eliminowany przez uśrednianie synchroniczne sygnałów wibroakustycznych.

Tabela 1. Procentowe zmiany wielkości składowej rzędu $3f_w$ w widmach sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową biegu jałowego

Zmiana stanu	dla sygnałów nieuśrednionych synchronicznie		dla sygnałów uśrednionych synchronicznie	
	Punkt pomiarowy			
	nr 1	nr 2	nr 1	nr 2
X00	-20	-9	-2	-3
X01	-8	+4	-3	-3
X10	+11	+11	-3	-3
X11	-8	+1	-2	-3
0Y0	-27	-25	+2	+3
0Y1	-1	0	-1	0
1Y0	+1	-8	+2	+2
1Y1	-1	-2	0	+1
00Z	-19	-6	+3	+2
01Z	+10	+26	-1	0
10Z	-7	+7	+2	+1
11Z	-8	+14	0	-1
000 → 000k	-13	+13	-1	+1

Z przeprowadzonej analizy wynika, że ze względu na duże wahania prędkości obrotowej wału korbowego, nie można jednoznacznie stwierdzić, czy zmiany wartości wybranych parametrów regulacyjnych wpływają na wielkość wybranej składowej widmowej sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych na jego kadłubie i głowicy i nieuśrednionych synchronicznie. Nie można więc opracować odpowiedniej metody wibroakustycznego diagnozowania silnika.

Wyznaczone zmiany wielkości analizowanej składowej widmowej sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie z okresem wyznaczonym przez kolejne obroty wału korbowego, odpowiadające różnym zmianom parametrów regulacyjnych, pozwoliły na określenie

jednoznacznych zależności między zmianami wielkości analizowanej składowej widmowej a symulowanymi zmianami parametrów regulacyjnych.

Tabela 2. Procentowe zmiany wielkości składowej rzędu $3f_w$ w widmach sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na silniku pracującym z prędkością obrotową maksymalną regulowaną

Zmiana stanu	dla sygnałów nieuśrednionych synchronicznie		dla sygnałów uśrednionych synchronicznie	
	Punkt pomiarowy			
	nr 1	nr 2	nr 1	nr 2
X00	-13	+4	-9	-6
X01	-8	+3	-9	-7
X10	-4	-3	-10	-7
X11	-3	0	-11	-5
0Y0	+16	+19	+21	+26
0Y1	-2	0	0	0
1Y0	+28	+21	+20	+25
1Y1	+4	-2	-1	+1
00Z	+16	+20	+20	+25
01Z	-2	+1	-1	-1
10Z	+22	+29	+20	+24
11Z	-1	+4	-2	+1
000 → 000k	-5	-4	-1	+1

Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do silnika spowodowało niewielkie (o 2-3%) ale powtarzalne zmniejszenie wielkości składowej widmowej rzędu $3f_w$, niezależnie od wartości ciśnienia wtrysku i dawki paliwa do drugiego cylindra.

Zmniejszenie ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra spowodowało bardzo niewielkie (o 2-3%) zwiększenie wielkości składowej widmowej rzędu $3f_w$, ale tylko przy nominalnej dawce paliwa do tego cylindra. Przy zerowej dawce paliwa (gdy wtryskiwacz drugiego cylindra nie pracował i nieistotne było ustalone dla niego ciśnienie wtrysku) zgodnie z oczekiwaniem nie zaobserwowano istotnych zmian wielkości analizowanej składowej.

Odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej (zmniejszenie dawki paliwa do zera) spowodowało również bardzo niewielkie (o 1-3%) zwiększenie wielkości składowej widmowej rzędu $3f_w$, ale tylko przy nominalnym ciśnieniu wtrysku paliwa do drugiego cylindra. Przy zmniejszonym ciśnieniu wtrysku paliwa do drugiego cylindra odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej nie

wywołało istotnych zmian wielkości analizowanej składowej.

Jednoczesne zmniejszenie ciśnienia wtrysku i dawki paliwa do drugiego cylindra spowodowało taki sam, niewielki (o 1-2%) wzrost wielkości składowej widmowej rzędu $3f_w$.

Zauważono także, że obserwowane niewielkie zmiany wielkości składowej rzędu $3f_w$ w analizowanych widmach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie są bardzo podobne dla obu punktów pomiarowych.

Obserwowane zmiany składowej rzędu $124f_w$ w widmach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie są o wiele bardziej wyraźne. Zarówno zmiana ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra jak i odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej, niezależnie od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do silnika, spowodowały praktycznie zaniknięcie tej składowej widmowej na tle sąsiednich niezerowych składowych:

- w widmach amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla stanów z nominalnymi wartościami ciśnienia wtrysku i dawki paliwa składowa widmowa rzędu $124f_w$ jest wyraźnie (około dwukrotnie dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na głowicy i około trzykrotnie dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na kadłubie silnika) wyższa od wszystkich pozostałych składowych rzędu większego niż $6f_w$,
- w widmach amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla stanów z symulowanymi zmniejszonymi wartościami ciśnienia wtrysku lub dawki paliwa składowa widmowa rzędu $124f_w$ nie jest odróżnialna od innych składowych rzędu większego niż $6f_w$, przy czym nie można jednoznacznie stwierdzić, które z tych rozregulowań spowodowało zaniknięcie analizowanej składowej.

W widmach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy wielkościami składowych analizowanych rzędów dla stanów z takimi samymi symulowanymi wartościami zmienianych parametrów regulacyjnych (stanów 000 i 000k).

Z przeprowadzonej analizy wynika, że dla silnika pracującego z prędkością obrotową biegu jałowego wpływ symulowanych zmian parametrów regulacyjnych na wielkość analizowanych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych na jego kadłubie i głowicy i uśrednionych synchronicznie jest jakościowo wyraźny. Obserwowane zmiany wielkości składowych widmowych tych sygnałów, zawierających się w paśmie do kilkukrotnej wielokrotności częstości obrotów wału korbowego f_w (np. składowej rzędu $3f_w$) są jednak na tyle małe, że trudno oprzeć na nich wiarygodną i pewną metodę wibroakustycznego diagnozowania

badanego silnika. Obserwowane zmiany wielkości składowej widmowej rzędu $124f_w$ są jednak na tyle duże, że można na nich taką metodę oprzeć. Metoda ta pozwalała by jednak tylko na wykrycie zmniejszenia się ciśnienia wtrysku lub dawki paliwa do któregoś z cylindrów bez możliwości wzajemnego rozróżnienia tych rozregulowań i wskazania cylindra, dla którego te rozregulowania wystąpiły.

3.2. Prędkość obrotowa maksymalna regulowana

Wyznaczone zmiany wielkości analizowanych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie, odpowiadające różnym zmianom parametrów regulacyjnych, są zróżnicowane, jednak w znacznie mniejszym stopniu niż dla prędkości obrotowej biegu jałowego. Można też, podobnie jak dla sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie zarejestrowanych dla prędkości obrotowej biegu jałowego, określić pewne zależności między zmianami wielkości analizowanych składowych a symulowanymi zmianami parametrów regulacyjnych.

Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do silnika spowodowało zmniejszenie wielkości składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów dla obu punktów pomiarowych. Obserwowany stopień zmniejszania się wielkości analizowanych składowych różni się dla różnych składowych i punktów pomiarowych – waha się od wartości zbliżonych do 0% aż do -50% (spadek dwukrotny).

Zmniejszenie ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra spowodowało wyraźne, choć zróżnicowane (od kilkunastu do około 40%) zwiększenie wielkości analizowanych składowych widmowych, ale tylko przy nominalnej dawce paliwa do tego cylindra. Przy zerowej dawce paliwa zgodnie z oczekiwaniem nie zaobserwowano istotnych zmian wielkości analizowanych składowych widmowych.

Odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej (zmniejszenie dawki paliwa do zera) spowodowało również bardzo wyraźne i zróżnicowane (od około 20 do około 40%) zwiększenie wielkości analizowanych składowych widmowych, ale tylko przy jednoczesnym nominalnym ciśnieniu wtrysku. Przy zmniejszonym ciśnieniu wtrysku paliwa do drugiego cylindra odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej nie wywołało istotnych zmian wielkości analizowanych składowych widmowych.

Otrzymano więc, dla widm sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie zarejestrowanych dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej, jakościowo podobne a ilościowo o wiele większe zmiany niż dla widm sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie, zarejestrowanych dla prędkości

obrotowej biegu jałowego. Zależności te są widoczne dla obu punktów pomiarowych.

Pomimo określenia jakościowych zależności między zmianami wielkości analizowanych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie a symulowanymi zmianami wartości parametrów regulacyjnych silnika, bardzo trudno jest opracować odpowiednią metodę wibroakustycznego diagnozowania tego silnika. Po pierwsze, wszystkie uzyskane zmiany wielkości analizowanych składowych widmowych są bardzo zróżnicowane i nie jest możliwe jednoznaczne przypisanie danej zmiany wielkości tych składowych do konkretnej zmiany konkretnego parametru regulacyjnego i wykluczenie dwóch pozostałych, z wyjątkiem ogólnej reguły, że zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku powoduje bardziej „miękką”, a zmniejszenie ciśnienia wtrysku lub dawki paliwa do jednego cylindra (nierównomierność dawkowania) bardziej „twardą” pracę silnika. Po drugie, podobnie jak dla prędkości obrotowej biegu jałowego, także i teraz, dla stanów 000 i 000k (stanów z takimi samymi wartościami zmienianych parametrów regulacyjnych) stwierdzono zmiany wielkości analizowanych składowych widmowych wahające się od 10 do 50%, czyli takie jak opisane zmiany dla kolejnych symulowanych wartości parametrów regulacyjnych.

Wyznaczone zmiany wielkości analizowanych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie z okresem wyznaczonym przez kolejne obroty wału korbowego, odpowiadające różnym zmianom parametrów regulacyjnych, pozwoliły na określenie podobnych zależności między zmianami wielkości analizowanych składowych widmowych a symulowanymi zmianami parametrów regulacyjnych jak dla sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie zarejestrowanych dla prędkości obrotowej biegu jałowego (są tylko od nich o wiele wyraźniejsze) i dla sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie zarejestrowanych dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej (są tylko od nich o wiele bardziej regularne).

Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do silnika spowodowało zmniejszenie wielkości składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów o 9-16% dla punktu pomiarowego nr 1 i o 4-9% dla punktu pomiarowego nr 2, niezależnie od wartości ciśnienia wtrysku i dawki paliwa do drugiego cylindra.

Zmniejszenie ciśnienia wtrysku paliwa do drugiego cylindra silnika spowodowało zwiększenie wielkości składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów o 20-25% dla punktu pomiarowego nr 1 i o 13-26% dla punktu pomiarowego nr 2, ale tylko przy nominalnej dawce paliwa do tego cylindra. Przy

zerowej dawce paliwa, zgodnie z oczekiwaniem, nie zaobserwowano istotnych zmian wielkości analizowanych składowych widmowych.

Zmniejszenie dawki paliwa do drugiego cylindra (do zera przez odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej) silnika spowodowało zwiększenie wielkości składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów o 20-24% dla punktu pomiarowego nr 1 i o 12-25% dla punktu pomiarowego nr 2, ale tylko przy nominalnym ciśnieniu wtrysku paliwa do tego cylindra. Przy zmniejszonym ciśnieniu wtrysku paliwa do drugiego cylindra odłączenie wtryskiwacza drugiego cylindra od pompy wtryskowej nie wywołało istotnych zmian wielkości analizowanych składowych widmowych.

Jednoczesne zmniejszenie ciśnienia wtrysku i dawki paliwa do drugiego cylindra spowodowało wzrost wielkości składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów o 18-23% dla punktu pomiarowego nr 1 i o 13-26% dla punktu pomiarowego nr 2, czyli podobny do wywołanego zmianami tych parametrów oddzielnie przy nominalnych wartościach parametru niezmiennianego.

W widmach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie zarejestrowanych dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej nie stwierdzono też istotnych różnic pomiędzy wielkościami składowych widmowych wszystkich trzech analizowanych rzędów dla stanów z takimi samymi symulowanymi, wzorcowymi wartościami zmienianych parametrów regulacyjnych (stanów 000 i 000k).

Z przedstawionej analizy wynika, że dla silnika pracującego z prędkością obrotową maksymalną regulowaną, zmiany wartości wybranych parametrów regulacyjnych wpływają na wielkość wybranych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych na jego kadłubie i głowicy, zarówno nieuśrednionych jak i uśrednionych synchronicznie. Jednak ze względu na duże nieregularności obserwowanych zmian określonych na podstawie wielkości wybranych składowych widmowych sygnałów wibroakustycznych nieuśrednionych synchronicznie, metodę wibroakustycznego diagnozowania badanego silnika można oprzeć tylko na zmianach sygnałów wibroakustycznych uśrednionych synchronicznie. Metoda ta pozwalała by na jakościowe odróżnienie od siebie stanów:

- z nominalnymi wartościami rozważanych parametrów regulacyjnych,
- ze zmniejszonym kątem wyprzedzenia wtrysku paliwa do cylindrów,
- ze zmniejszonym ciśnieniem wtrysku lub dawką paliwa do któregoś z cylindrów, jednak bez możliwości wzajemnego rozróżnienia tych dwóch ostatnich parametrów regulacyjnych i wskazania cylindra, dla którego wykryta zmiana nastąpiła.

4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że analiza zmian wielkości wybranych składowych widm amplitudowo-częstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych:

- nieuśrednionych synchronicznie nie dostarczyła informacji diagnostycznej,
- uśrednionych synchronicznie, z okresem określonym przez czasy trwania kolejnych obrotów wału korbowego, dostarczyła informacji diagnostycznej,

niezbędnej do opracowania metody wibroakustycznego diagnozowania badanego tłokowego silnika spalinowego o ZS w zakresie symulowanych zmian parametrów regulacyjnych.

Zastosowanie tej metody będzie możliwe w efekcie wykorzystania odpowiedniego układu pomiarowo-analitycznego do jednoczesnej rejestracji przyspieszeń drgań i do wyznaczania czasów trwania kolejnych obrotów wału korbowego, potrzebnych do uśrednienia synchronicznego zarejestrowanych przyspieszeń drgań, oraz dzięki odpowiedniemu przystosowaniu silnika do badań (polegającemu na wykonaniu w nim gwintowanych otworów do mocowania czujników drgań i wykonaniu odpowiednich mocowań dla układu do pomiaru czasów trwania kolejnych obrotów wału korbowego). Stosując opracowaną metodę wibroakustycznego diagnozowania silnika, uzyska się informację, że:

- parametry regulacyjne silnika są nominalne,
- zmniejszył się (rozregulował) kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa do cylindrów silnika w przypadku stwierdzenia w trakcie kolejnych badań diagnostycznych wyraźnego, przynajmniej kilkuprocentowego zmniejszenia się pierwszych trzech składowych widmowych, występujących w widmach amplitudowo-częstotliwościowych uśrednionych synchronicznie przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej, w stosunku do ich wielkości odpowiadającej nominalnemu kątowi wyprzedzenia wtrysku,
- zmniejszyły się (rozregulowały) ciśnienie wtrysku lub dawka paliwa do któregoś cylindra (bez możliwości stwierdzenia, który z tych parametrów regulacyjnych uległ zmniejszeniu i bez możliwości wskazania, dla którego cylindra to zmniejszenie zaszło) w przypadku stwierdzenia w trakcie kolejnych badań diagnostycznych:
 - wyraźnego, kilkunastoprocentowego zwiększenia się pierwszych trzech składowych widmowych, występujących w widmach amplitudowo-częstotliwościowych uśrednionych synchronicznie przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla prędkości obrotowej maksymalnej regulowanej w stosunku do ich wielkości

odpowiadającej nominalnym wartościom ciśnienia wtrysku i dawki paliwa,

- zmniejszenia się składowej widmowej rzędu $124 f_w$ do poziomu niewyróżniającego jej na tle składowych sąsiednich występujących w widmach amplitudowo-częstotliwościowych uśrednionych synchronicznie przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla prędkości obrotowej biegu jałowego.

Uzyskana diagnoza („parametry regulacyjne są nominalne” albo „kął wyprzedzenia wtrysku paliwa do cylindrów jest mniejszy od nominalnego” albo „ciśnienie wtrysku lub dawka paliwa do któregoś cylindra są mniejsze od nominalnych”) jest diagnozą jakościową. Opracowanie odpowiedniej metody diagnozowania dającej informacje ilościowe (tzn. jak duże są te rozregulowania) wymaga prowadzenia dalszych badań. Wydaje się też, że w sytuacji dostępności na rynku całej gamy stacjonarnych (warsztatowych) urządzeń diagnostycznych, bardziej lub mniej prostych w obsłudze i podających podobne albo bardziej szczegółowe informacje o parametrach regulacyjnych, diagnozy nie będą w swojej praktyce warsztatowej korzystać z przedstawionej tu metody wibroakustycznego diagnozowania silnika w zakresie identyfikowania rozpatrywanych parametrów regulacyjnych. Przedstawiona metoda diagnozowania jest jednak stosunkowo prosta i można ją łatwo zaimplementować w systemach diagnostyki pokładowej pojazdów napędzanych przez silniki o ZS, wykorzystując już obecne w takich systemach elementy śledzące prędkość obrotową wału korbowego i uzupełniając te systemy o odpowiednie elementy pozwalające na pomiar sygnałów wibroakustycznych (podobne do czujników spalania stukowego) i ich uśrednienie synchroniczne. Odpowiedni monitor pokładowego systemu diagnostycznego podejmował i sygnalizował by kierowcy decyzje diagnostyczne o konieczności zgłoszenia pojazdu do serwisu w celu dokładnego, warsztatowego diagnozowania i wykonania ewentualnych regulacji wymagających

odpowiednich czynności demontażowo-montażowych.

LITERATURA

- [1] Boruta G.: *Teoretyczne widmo drgań silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym*, Biul. WAT, rok XLVI, 9, 1997, str. 13-26.
- [2] Cempel Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, Wyd. Pol. Pozn., Poznań 1985.
- [3] Kocia B., Kukliński Z., Łukowski Z., Pałacha R., Zapłoński W.: *Budowa i naprawa samochodów STAR 266 i pochodnych*, WPM „WEMA”, Warszawa 1988.
- [4] Mączak J.: *Wykorzystanie zjawiska modulacji sygnału wibroakustycznego w diagnozowaniu przekładni o zębach śrubowych*, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1998.
- [5] Zabłocki M.: *Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych*, WKiŁ, Warszawa 1976.
- [6] Zespół IPM WAT: *Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy naukowo-badawczej na temat „Badania eksperymentalne samochodów produkcji FSC – Starachowice. Wyniki eksploatacyjnych badań niezawodności samochodów skrzyniowych STAR-200 z serii próbnej*, WAT, Warszawa 1980.



dr inż. **Grzegorz BORUTA** adiunkt w Katedrze Mechatroniki, Wydziału Nauk Technicznych, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. W pracy naukowej i dydaktycznej zajmuje się zagadnieniami związanymi z eksploatacją pojazdów, w tym z diagnostyką techniczną.