

Analiza możliwości opisu procesów silnikowych za pomocą charakterystyk sygnału drganiowego

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących identyfikacji procesów silnikowych (zjawisk zachodzących w komorze spalania), w sygnale drganiowym głowicy silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym. Przedstawiono możliwości detekcji poszczególnych procesów silnikowych oraz efekty zastosowania uśredniania synchronicznego sygnału drgań do obiektywizacji kolejnych realizacji procesu spalania.

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój motoryzacji oraz rosnące wymagania co do ograniczenia uciążliwości transportu dla środowiska i niezawodności silników spalinowych, wyznaczyły kierunek rozwoju ich konstrukcji [6]. Nowoczesny silnik spalinowy jest jednostką składającą się z dwóch bloków funkcjonalnych:

- wykonawczego (mechanicznego), którego funkcjonowanie zapewnia efektywną konwersję energii chemicznej zawartej w paliwie na pracę mechaniczną obracającego się wału,
- sterującego (elektronicznego), którego zadaniem jest nadzorowanie przebiegu poszczególnych procesów w tym dynamicznego dostosowywania parametrów pracy silnika do bieżącego obciążenia oraz lokalizowanie i sygnalizowanie uszkodzeń w poszczególnych podsystemach silnika.

Wykorzystanie najnowocześniejszej technologii do nadzorowania pracy silnika spalinowego w systemach OBD (On Board Diagnostics) jest możliwe tylko w przypadku nowokonstruowanych silników. Istnieje jednak konieczność objęcia diagnostyką silników, które nie zostały wyposażone w nowoczesne układy diagnostyki pokładowej. Przykładem mogą być silniki lokomotyw spalinowych lub pomocnicze silniki okrętowe. W takim przypadku istnieje konieczność opracowania metody diagnozowania silnika spalinowego, która zapewni:

- łatwość pozyskania reprezentatywnego sygnału diagnostycznego,
- łatwą implementację metody do obiektów bez wprowadzania zmian konstrukcyjnych,
- możliwość przeprowadzenia badań diagnostycznych w czasie normalnej eksploatacji,
- pełne odwzorowanie stanu technicznego silnika.

Wymagania te spełnia diagnostyka drganiowa, która bazuje na sygnale drgań generowanym przez zespoły silnika spalinowego i procesy w nim zachodzące. Wykorzystanie drgań generowanych przez pracujący silnik spalinowy do oceny poprawności jego funkcjonowania oraz stanu technicznego posiada wiele zalet. W pracy [1] pokazano, że procesy wibroakustyczne są dobrym nośnikiem informacji diagnostycznej, ponieważ:

- charakteryzują się dużą pojemnością informacyjną,
- wykazują dużą szybkość przekazywania informacji – składowa sygnału opisująca zmianę stanu obiektu uwiadcza się w chwili powstania niesprawności,
- sygnał drganiowy (oraz wtórnie hałas) odzwierciedla

wszystkie istotne procesy zachodzące w silniku spalinowym,

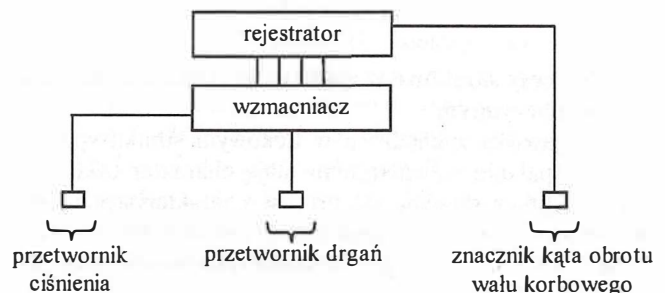
- pomiar drgań i hałasu nie wymaga specjalnego przygotowania obiektu technicznego do badań i może być przeprowadzony w czasie normalnej eksploatacji.

Ze względu na liczne zalety sygnału drganiowego, jako symptomu diagnostycznego, celowe było podjęcie prac nad identyfikacją procesów silnikowych w sygnale drgań. Przeprowadzona analiza dotychczasowych wyników badań pozwala określić stopień przydatności sygnału drgań do diagnozowania przebiegu procesów silnikowych [1,3 i 4].

2. Metodyka i obiekt badań

Akwizycji poddano sygnały przyspieszeń oraz prędkości drgań w kierunku prostopadłym do denka tłoka, sygnał ciśnienia panującego w cylindrze oraz sygnał ze znacznika kąta obrotu wału korbowego. Do rejestracji przebiegów czasowych wymienionych wielkości użyto zestawu pomiarowego, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 1, składającego się z:

- piezoelektrycznego przetwornika drgań Brüel & Kjaer typ 4391,
- oscyloskopu,
- wzmacniaczy ładunku (NEXUS 2692 A OI4 dla sygnałów drgań oraz AVL 3057A01 dla sygnału ciśnienia w cylindrze),
- znacznika kąta obrotu wału korbowego typu AVL 364,
- rejestratora cyfrowego TEAC RD 135T.

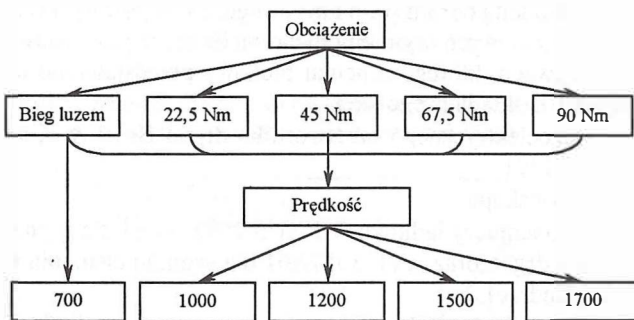


Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego

Przetwornik drgań zamocowano do głowicy silnika na wkręt, wykorzystując otwór technologiczny. Obiektem badań był silnik spalinowy typu SB 3.1, którego dane techniczne są następujące:

rodzaj zapłonu	samoczynny
rodzaj pracy	4-suwowy
maksymalna moc użyteczna	$N_e = 23,2$ [kW] przy $n = 2200$ obr/min
maksymalny moment obrotowy	$M_o = 109,8$ [Nm] przy $n = 1600$ obr/min
średnica cylindra	$D = 0,127$ [m]
skok tłoka	$S = 0,146$ [m]
stopień sprężania	$\epsilon = 15,75$
iloraz długości korby do korbowa	$r/l = 0,262$
pojemność skokowa silnika	$V_{ss} = 1,852 \cdot 10^{-3}$ [m ³]
liczba cylindrów	$i = 1$
system spalania	bezpośredni wtrysk paliwa do cylindra
rodzaj pompy wtryskowej	rzędowa tłoczkowa, typ P 51T2 – 10.03 II RVO
ilość zaworów/1 cylinder	2
otwarcie zaworu dolotowego	4° przed GMP
zamknięcie zaworu dolotowego	57° po DMP
otwarcie zaworu wylotowego	42° przed DMP
zamknięcie zaworu wylotowego	24° po GMP
rodzaj wtryskiwacza	W1B-01 z rozpylaczem D1LMK 140/2
ciśnienie otwarcia wtryskiwacza	$p_{wtr} = 17,5 \pm 0,5$ MPa
geometryczny początek tłoczenia paliwa	$\alpha_{ptl} = 26^\circ$ przed GMP

Zakres warunków pracy silnika podczas realizowanych badań przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat zadawanych zmian warunków pracy silnika spalinowego

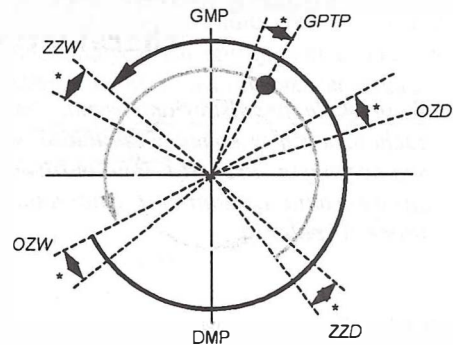
3. Procesy silnikowe w cyklu pracy silnika o zapłonie samoczynnym

Zjawiska zachodzące w tłokowym silniku spalinowym o spalaniu wewnętrznym mają charakter cykliczny. Na cykl pracy składają się procesy charakterystyczne dla silnika spalinowego i dlatego zostały nazwane silnikowymi. Cykl pracy silnika o zapłonie samoczynnym obejmuje [2 i 7]:

- napełnienie cylindra powietrzem,
- sprężenie ładunku w suwie sprężania,
- wtrysnięcie paliwa do sprężonego i rozgrzanego powietrza – tworzenie palnej, niejednorodnej mieszanki paliwowo-powietrznej,
- indukcja samozapłonu,
- spalanie paliwa i rozprężanie spalin w suwie rozprężania,

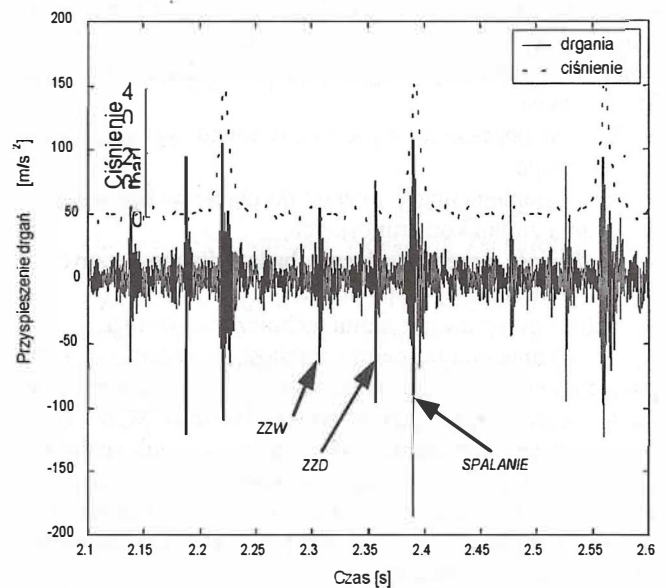
– usunięcie spalin z cylindra.

Cykl pracy silnika spalinowego najłatwiej można scharakteryzować wykresem fazowym. Przykładowy wykreś fazowy dla silnika kolejowego 2112SSF przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wykres faz rozrządu silnika kolejowego 2112SSF
GMP, DMP – górny i dolny martwy punkt,
OZD, ZZD – otwarcie i zamknięcie zaworu dolotowego,
OZW i ZZW – otwarcie i zamknięcie zaworu wylotowego,
GPTP – geometryczny początek tłoczenia paliwa,
* –zakres działania regulatora

Na podstawie tak opisanego cyklu pracy silnika można wnioskować o wymuszeniach działających w obrębie głowicy silnika. Główne wymuszenia pochodzą od: uderzeń podczas zamykania zaworu wylotowego i zaworu dolotowego oraz impulsu ciśnienia w czasie spalania ładunku w cylindrze. Wszystkie trzy procesy są łatwo identyfikowalne w przebiegu czasowym sygnału przyspieszeń drgań głowicy, mierzonych w kierunku prostopadłym do denka tłoka. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg czasowy sygnału odpowiedzi głowicy silnika spalinowego na wymienione wymuszenia. Dla łatwiejszej identyfikacji poszczególnych procesów naniesiono przebieg zmian ciśnienia w cylindrze.

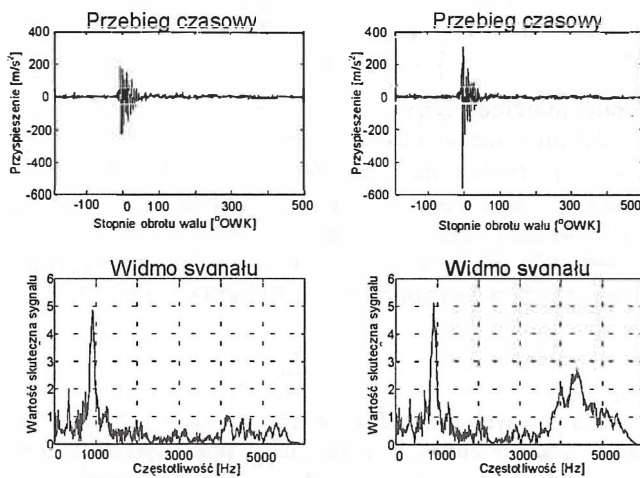


Rys. 4. Przebieg czasowy sygnału drgań – odpowiedź głowicy silnika spalinowego

Przeprowadzona ocena jakościowa dowiodła, że istnieje możliwość oceny podstawowych procesów silnikowych za pomocą sygnału drgań. Jednocześnie wykazano, że przeprowadzenie analizy ilościowej jest możliwe dopiero po odpowiednim przetworzeniu sygnału drgań. Konieczność przetwarzania sygnału przed jego ostateczną oceną wynika z faktu, że procesy silnikowe są zsynchronizowane z częstotliwością obrotową wału korbowego (nakładanie się częstotliwości wymuszeń od różnych elementów silnika). Dlatego też zaproponowano zastosowanie selekcji czasowej w ocenie poprawności pracy zaworów silnika spalinowego [3], oraz sumowanie synchroniczne w ekstrakcji sygnału pochodzącego od spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrze [4].

4. Analiza wyników badań

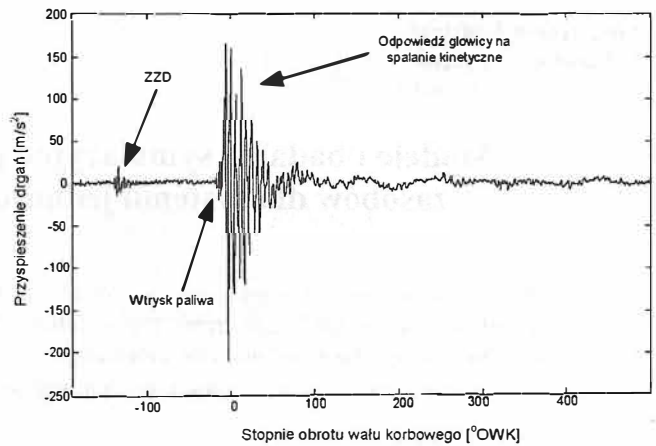
Proces spalania ma bardzo skomplikowany przebieg, zwłaszcza w silnikach o zapłonie samoczynnym. Przebieg procesu indukowania samozapłonu składa się z części fizycznego i chemicznego opóźnienia samozapłonu oraz inicjacji kinetycznego utleniania paliwa [5 i 8]. Różny udział poszczególnych składowych samozapłonu w kolejnych cyklach pracy oraz wpływ wielu czynników na przebieg pojedynczego procesu spalania (jakość paliwa i jego rozpylenie, stopień zawirowania powietrza w cylindrze, zmienne warunki termodynamiczne w komorze spalania itp.) powodują jego niepowtarzalność. Porównanie przebiegu przykładowych procesów spalania przy stałych warunkach pracy silnika przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Różnice w wybranych sygnałach drgań i widmach przykładowych cyklach spalania

Dla wykorzystania sygnału drganiowego do dokładniejszego opisu procesu spalania, pochodzącego od kolejnych zapłonów, poddano go procedurze uśredniania synchronicznego [1]. Sygnałem synchronizującym kolejnych uśrednień sygnału w dziedzinie czasu był znacznik kąta obrotu wału korbowego. Wynikiem uśredniania kolejnych realizacji jest sygnał odpowiedzi głowicy, który przedstawiono na rysunku 6.

W tak przetworzonym sygnale przyspieszeń drgań można wyróżnić składowe procesów związanych z wtryskiem paliwa, tworzeniem mieszanki palnej i spalaniem kinetycznym, które zaznaczono na rysunku 6.



Rys. 6. Sygnał przyspieszeń drgań głowicy po sumowaniu synchronicznym

W tak przetworzonym sygnale przyspieszeń drgań można wyróżnić składowe procesów związanych z wtryskiem paliwa, tworzeniem mieszanki palnej i spalaniem kinetycznym, które zaznaczono na rysunku 6.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że sygnał drgań zawiera informacje o przebiegach poszczególnych procesów silnikowych. Wykazano, że istnieje możliwość bardzo szczegółowej identyfikacji procesów silnikowych zachodzących w komorze spalania. Ustalenie ilościowych związków pomiędzy jakością przebiegu wybranego procesu a parametrami sygnału drgań wymaga kontynuowania badań w tej dziedzinie.

Literatura

- [1] Cempel Cz., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1982.
- [2] Cichy M., *Silniki o działaniu cyklicznym. Podstawy teorii i działania*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1989.
- [3] Czechyra B., Szymański G., Tomaszewski F., *Ocena luzu zaworów silnika spalinowego w oparciu o parametry drgań – założenia metodyczne*. *Silniki Spalinowe nr 1/2004(118)*.
- [4] Czechyra B., Szymański G., Tomaszewski F., *Odwzorowanie procesu spalania w sygnale drganiowym tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym*. *DIAGNOSTICS'2004 - 3rd International Congress Of Technical Diagnostics, Poznań 2004*.
- [5] Kowalczyk M., *Wybrane zagadnienia wymiany ciepła w silnikach wysokoprężnych-wymiana przez promieniowanie*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
- [6] Merkisz J., *Tendencje rozwojowe silników spalinowych*. *Silniki Spalinowe nr1/2004 (118)*.
- [7] Niewiarowski K., *Tłokowe silniki spalinowe*. WKiŁ Warszawa 1983.
- [8] Zabłocki M., *Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych*. WKiŁ Warszawa 1976.