

## ODWZOROWANIE PROCESU SPALANIA W SYGNALE DRGANIOWYM TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Bartosz CZECHYRA, Grzegorz SZYMAŃSKI, Franciszek TOMASZEWSKI

Instytut Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Poznańskiej,  
Zakład Pojazdów Szynowych  
ul. Piotrowo 3, 60-695 Poznań,  
Tel: (+48-061) 665-20-23, Fax: (+48-061) 665-22-04  
Bartosz.Czechyra@doctorate.put.poznan.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono istotę wykorzystania diagnostyki wibroakustycznej do oceny procesu spalania w tłokowym silniku spalinowym o zapłonie samoczynnym. W pracy przedstawiono wyniki badań związku pomiędzy jakością procesu spalania odwzorowywanym zmianami ciśnienia w cylindrze a sygnałem drganiowym rejestrowanym na głowicy silnika badawczego.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, proces spalania, diagnostyka drganiowa

### PROJECTION OF COMBUSTION PROCESS IN VIBRATION SIGNAL OF DIESEL ENGINE

#### Summary

Article includes an essence of using vibrations' parameters for assessment of combustion process in Diesel engine. The paper shows results of research a connection between changes combustion pressure inside cylinder and vibration of engine's head.

Keywords: internal combustion engine, combustion process, vibration diagnostics

## 1. WSTĘP

Silnik spalinowy, jako źródło napędu urządzeń stacjonarnych oraz środków transportu zawdzięcza swoją techniczną i technologiczną ewolucję dynamicznemu rozwojowi motoryzacji oraz nauk związanych z konstrukcją maszyn. W związku z postępem w metalurgii, inżynierii materiałowej oraz trybologii osiągnięto bardzo wysoki poziom trwałości i niezawodności samej konstrukcji silnika spalinowego. Dalszy jego rozwój jest uwarunkowany względami poza materiałowymi.

Rzeczony silnik spalinowy jest stymulowany dwoma aspektami eksploatacyjnymi:

1. Rosnącymi wymaganiami, co do minimalizacji uciążliwości transportu dla środowiska (emisja związków toksycznych) [4].
2. Ograniczeniami energochłonności obiektów technicznych na etapie eksploatacji (ograniczone zasoby nieodnawialnych paliw kopalnych) [1].

Oba uwarunkowania wskazują na konieczność opracowania skutecznych metod sterowania przebiegiem pierwotnego procesu silnikowego, jakim jest spalanie paliwa w cylindrze, a także opracowania technik dynamicznej oceny tego procesu.

## 2. PROCES SPALANIA PALIWA W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Proces spalania paliwa w cylindrze jest wielofazowym i bardzo skomplikowany procesem fizykochemicznym.

Specyfiką silnika o zapłonie samoczynnym jest tworzenie mieszanki paliwowo-powietrznej wewnątrz cylindra [2]. Do sprężonego powietrza zostaje wtrysnięta odpowiednia dawka paliwa tworząc ładunek palny. Pomiędzy momentem rozpoczęcia wtrysku paliwa a zainicjowaniem procesu spalania upływa czas  $\tau_f$  zwany czasem opóźnienia zapłonu (lub indukcji samozapłonu), a który może być opisany następującym równaniem [7]:

$$\tau_s = \tau_f + \tau_{ch} \quad (1)$$

gdzie:

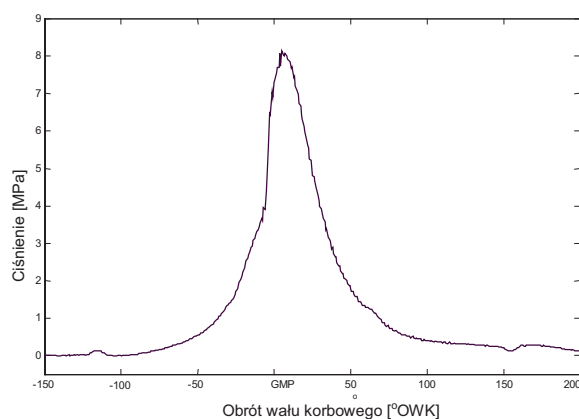
- $\tau_s$  – czas opóźnienia samozapłonu,
- $\tau_f$  – część fizyczna czasu opóźnienia samozapłonu,
- $\tau_{ch}$  – część chemiczna czasu opóźnienia samozapłonu.

Część fizyczna czasu opóźnienia samozapłonu paliwa  $\tau_f$  to okres, w którym formowana przez wtryskiwacz struga paliwa rozpada się na pojedyncze krople tworząc mgłę paliwową. W wyniku intensywnego mieszania się z gorącym powietrzem

paliwo częściowo odparowuje tworząc niejednorodną mieszaninę palną, której parametry termodynamiczne osiągają poziom aktywacji procesu utleniania węglowodorów.

Na skutek procesów fizycznych związanych z dostarczeniem ładunkowi palnemu energii aktywacji, następuje uwolnienie wolnych rodników i zainicjowanie procesu spalania w wielu miejscach jednocześnie. Jest to część chemiczna czasu opóźnienia samozapłonu  $\tau_{ch}$ .

Po upływie czasu  $\tau_s$  następuje pierwsza faza spalania mieszanki paliwowo-powietrznej – fazą spalania płomieniowego, która przebiega bardzo gwałtownie (spalanie kinetyczne) [3]. Efektem tego jest nagły wzrost temperatury i ciśnienia w cylindrze warunkujący dalszą część przebiegu procesu utleniania paliwa (spalanie dyfuzyjne). Efektem realizacji procesu spalania jest wzrost ciśnienia czynnika roboczego w cylindrze a tym samym wygenerowanie siły gazodynamicznej oddziałującej na denko tłoka. Siła ta poprzez układ korbowo-tłokowy przenoszona jest na wał korbowy. Przykładowy przebieg ciśnienia w cylindrze silnika spalinowego o ZS przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg ciśnienia spalania w cylindrze silnika spalinowego o ZS

Z wykresu przebiegu ciśnienia spalania (rys. 1) można odczytać początek spalania mieszanki. Duży przyrost ciśnienia przed GMP świadczy o przebiegu kinetycznej fazy spalania. Wygenerowany w ten sposób impuls ciśnienia czynnika roboczego w cylindrze pobudza do drgań strukturę silnika – szczególnie głowicę. Czas trwania impulsu oraz jego amplituda zależy od czasu opóźnienia samozapłonu, czyli od chwilowych warunków panujących w cylindrze.

Zakładając stałe warunki przebiegu fazy chemicznej czasu opóźnienia zapłonu, silnie związanej z jakością paliwa, główną rolę na przebieg fazy kinetycznego spalania będzie miało przygotowanie mieszanki. Oznacza to, że kluczową rolę dla dynamiki przyrastania ciśnienia w cylindrze, a w konsekwencji obciążenia układu korbowo-tłokowego, ma sprawność układu wtryskowego – głównie wtryskiwacza.

Postanowiono więc zbadać związki pomiędzy procesem spalania odzworowanymi zmianami ciśnienia w cylindrze a drganiami głowicy silnika spalinowego.

### 3. OBIEKT BADAŃ

Badania nad odzworowaniem procesu spalania w sygnale drgań głowicy silnika spalinowego zostały przeprowadzone na silniku badawczym o zapłonie samoczynnym SB3.1.

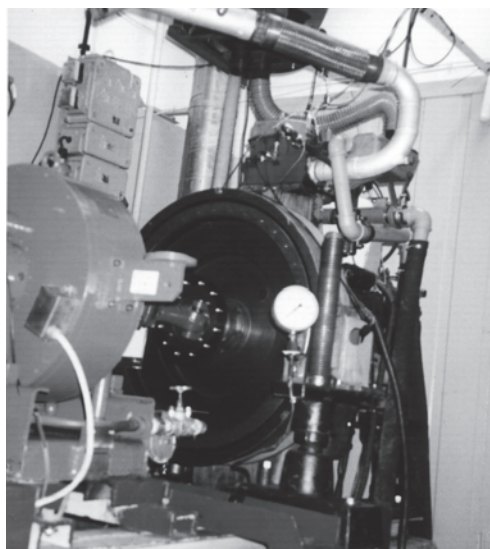
Wybrano ten silnik ze względu na podobieństwa konstrukcyjne pomiędzy SB3.1 a docelowym obiektem badań silnikiem kolejowym. Cechami wspólnymi są: bezpośredni wtrysk paliwa, toroidalna komora spalania umieszczona w tłoku, indywidualna głowica, podobny zakres użytecznych prędkości obrotowych. Widok silnika SB3.1 na stanowisku badawczym zamieszczono na rysunku 2.

Badania zostały przeprowadzone w dwudziestu jeden punktach pracy silnika SB3.1. Punkty pracy silnika wyznaczone są przez prędkości obrotowe wału korbowego oraz odpowiednie obciążenia wartości obciążenia mechanicznego. Pozwoliło to zarejestrować efekty pracy silnika wyznaczających siatkę obciążeń częściowych i maksymalnych.

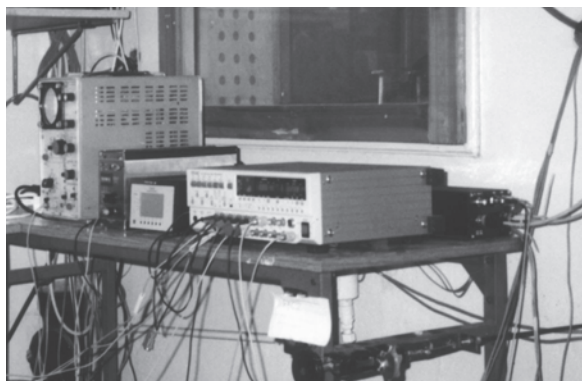
Sygnal przyspieszeń drgań rejestrowany na głowicy był analizowany w paśmie do 3 Hz do 6 kHz.

Dla identyfikacji procesów zachodzących w silniku oraz faz rozrządu, rejestracji podlegały również sygnały znacznika kąta obrotu wału korbowego z rozdzielczością jednego obrotu oraz jednego stopnia obrotu wału korbowego ( $^{\circ}$ OWK).

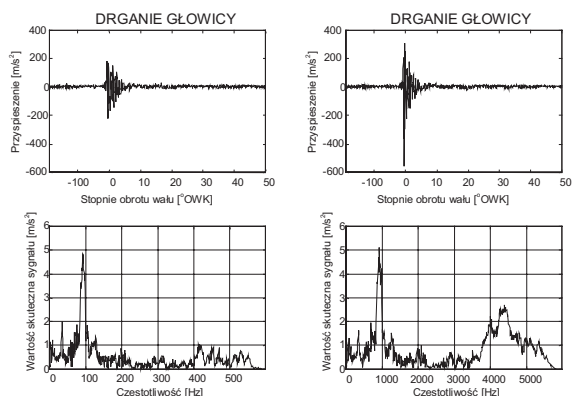
Wygląd silnika badawczego na stanowisku hamowni silnikowej zamieszczono na rysunku 2 a zestaw pomiarowy na rysunku 3.



Rys. 2. Silnik SB3.1 na stanowisku badawczym



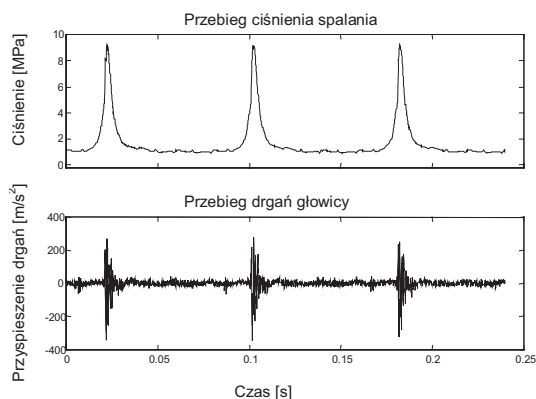
Rys. 3. Zestaw pomiarowy użyty w badaniach silnika spalinowego SB3.1



Rys. 5. Odzworowanie przykładowych cykli spalania w sygnale drganiowym (stałe warunki pracy silnika)

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg sygnału drgań głowicy w kierunku pionowym prostopadle do denka tłoka oraz ciśnienia w cylindrze.



Rys. 4. Przebieg sygnałów ciśnienia spalania i drgań głowicy

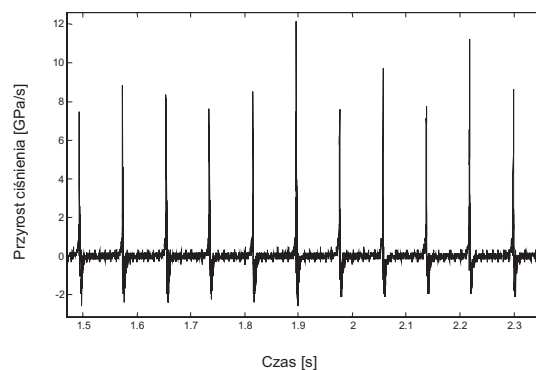
Porównując przebiegi obu wielkości zauważono, że przy stałych warunkach pracy silnika przebiegi ciśnienia w poszczególnych cyklach nie różnią się od siebie więcej niż 5%. Natomiast w przypadku odpowiadającym im przebiegom drgań zmiany są bardzo istotne. Przykładowe zestawienie dwóch cykli roboczych przy stałych warunkach pracy silnika pokazano na rysunku 5.

Dokonując analizy poszczególnych cykli pracy silnika stwierdzono znaczne różnice w ich realizacji. Różnice dotyczą maksymalnych amplitud sygnału analizowanego w dziedzinie czasu (nawet dwukrotnie większe) oraz składowych sygnału. Analiza widmowa obu sygnałów drgań głowicy (rysunek 5) wykazała, że:

- dominująca składowa sygnału jest związana z częstotliwością drgań własnych głowicy (ok. 1kHz),
- udział składowych wysokoczęstotliwościowych w sygnale jest zmienny,
- charakter drgań pozostaje niezmienny.

Zauważone różnice pomiędzy poszczególnymi realizacjami procesów spalania i ich odzworowaniem w sygnale drgań należy tłumaczyć różnicami w pobudzeniu głowicy do drgań. Różnice wynikają z małej powtarzalności przebiegu pierwszej fazy spalania – spalania kinetycznego.

Czas trwania impulsu ciśnienia oraz jego amplituda zależy od warunków pracy silnika. Niepowtarzalność przyrostu ciśnienia ( $dp/d\alpha$ ) w kolejnych cyklach pracy jest powodowana zmienną prędkością obrotową wału korbowego oraz wahaniami obciążenia mechanicznego i cieplnego silnika [6]. Przykładowe przebiegi przyrostów ciśnienia w cylindrze przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Przykładowe przebiegi przyrostów ciśnienia spalania w silnika SB3.1

Niepowtarzalność poszczególnych cykli pracy silnika spalinowego sprawia, że istnieje konieczność uśrednienia sygnału pochodzącego od poszczególnych cykli pracy. Sposób uśrednienia sygnału (w dziedzinie czasu czy częstotliwości) oraz kryterium oceny reprezentatywności uzyskanego przez uśrednienie sygnału drgań wymaga dalszych badań.

Szczegółowym badaniom należy również poddać wpływ stanu regulacji oraz typowych uszkodzeń wtryskiwacza na sygnał drganiowy silnika spalinowego. Wymienione elementy będą realizowane w kolejnych etapach pracy nad diagnostyką drganiową procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym.

**LITERATURA**

- [1] Gronowicz J., Ochrona środowiska w transporcie lądowym, Zapol Szczecin 1996.
- [2] Kasedorf J., zasilanie wtryskowe olejem napędowym, WKiŁ Warszawa 1990.
- [3] Kowalczyk M., Wybrane zagadnienia wymiany ciepła w silnikach wysokoprężnych - wymiana przez promieniowanie, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000
- [4] Merkisz J., Tendencje rozwojowe silników spalinowych, Silniki Spalinowe nr1/2004 (118).
- [5] Serdecki W., Badania układów silników spalinowych: laboratorium, Wydaw. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000
- [6] Wajand J. Pomiary szybkozmiennych ciśnień w maszynach tłokowych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1974.
- [7] Zabłocki M., Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych, WKiŁ Warszawa 1976.