

# ŚWIATŁOWODOWY, INTERFERENCYJNY CZUJNIK CIŚNIENIA JAKO ŹRÓDŁO INFORMACJI O PRZEBIEGU PROCESU SPALANIA W SILNIKU SPALINOWYM O ZAPŁONIE ISKROWYM

## FIBER OPTIC, INTERFEROMETRIC PRESSURE SENSOR AS SOURCE OF INFORMATION ABOUT AN COMBUSTION PROCESS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH SPARK IGNITION

*W pracy przedstawione zostały cele i sposób pozyskiwania informacji dotyczących procesu roboczego silnika spalino-  
wego o zapłonie iskrowym. Omówiona została budowa, zastosowanego do tego celu po raz pierwszy, światłowodowego  
czujnika interferencyjnego typu „side-hole”, jak również sposób przetwarzania danych pomiarowych. Całość wieńczą  
wnioski.*

**Słowa kluczowe:** czujnik, side-hole, silnik ZI, proces spalania

*This paper describes aim and way to obtain information about working process of internal combustion engine with  
spark ignition. Paper present construction's of fiber optic pressure sensor side-hole and method of measured data  
processing.*

**Keywords:** fiber sensor, side-hole, combustion proces

### 1. Potrzeba pozyskiwania informacji o procesie spalania

Dynamiczny rozwój systemów sterowania silnikami spalino-  
wymi wymusza poszukiwanie coraz lepszych źródeł informacji  
o przebiegu procesu roboczego w nich zachodzącego. Nowe czuj-  
niki i układy wykonawcze muszą spełniać następujące wymaga-  
nia:

- możliwość pozyskiwania informacji w czasie rzeczywistym (mała bezwładność pomiaru),
- bogata zawartość informacyjna sygnału uzyskiwanego z czuj-  
nika skutkująca możliwością zmniejszenia liczby czujników  
pokładowych samochodu,
- niska cena,
- stabilność czasowa wskazań czujnika i niska awaryjność,
- poprawne działanie czujnika we wszystkich stanach pracy silni-  
ka a szczególnie w fazie nagrzewania,

Jak dotąd nie opracowano uniwersalnego czujnika, który po-  
zwoliłby na kontrolę procesu spalania tylko na podstawie pojedyn-  
czego sygnału pochodzącego z tego czujnika. Liczne publikacje  
dotyczące zastosowania pomiaru ciśnienia w komorze spalania sil-  
nika spalinowego utwierdzają w przekonaniu, że właśnie ten kieru-  
nek badań daje szerokie możliwości oceny jakości procesu robo-  
czego.

Ciśnienie panujące w cylindrze może być wykorzystane do es-  
tymowania składu mieszanki palnej (współczynnik nadmiaru po-  
wietrza -  $\lambda$ ) [1], kompleksowego nadzorowania i sterowania proce-  
sem roboczym silnika [2], modelowania emisji szkodliwych  
składników spalin [3] a także estymowania temperatury ścianek  
cylindra [4], jak również może służyć do wyznaczania parametrów  
innych modeli procesów zachodzących w komorze spalania.

Możliwe jest sterowanie pracą silnika na podstawie znajomo-  
ści przebiegu ciśnienia. Chcąc uzyskać maksymalny moment ob-  
rotowy należy utrzymywać maksimum ciśnienia ok. 16° obrotu wału  
korbowego za ZG lub sprawić aby punkt w którym 50% mieszanki  
uległo spalaniu znajdował się ok. 7° OWK za ZG.

### 2. Stanowisko badawcze

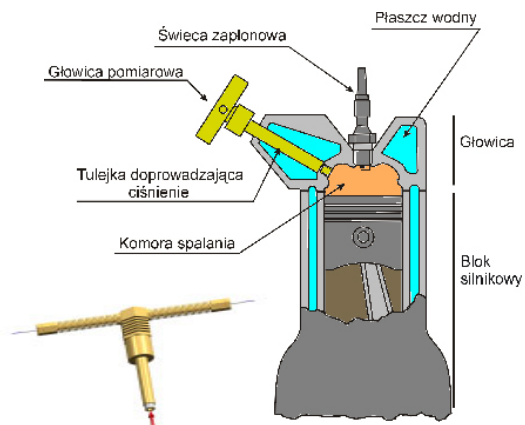
Obiektem badań jest silnik Holden 2.0 MPFI (rys. 1). Jest to  
silnik benzynowy o zapłonie iskrowym. Jego pojemność skokowa  
wynosi 1998 cm<sup>3</sup>. Jest on zainstalowany w Hamowni Silnikowej  
Katedry Silników Spalinowych Politechniki Lubelskiej. Silnik  
wyposażony jest w wielopunktowy wtrysk benzyny.

Silnik ten może być sztucznie obciążany w czasie badań przy  
użyciu hamulca silnikowego.

Głowica pomiarowa światłowodowego czujnika ciśnienia –  
side-hole zamontowana jest w głowicy silnika przy pomocy spe-  
cjalnej tulejki łączącej, doprowadzającej ciśnienie z jednej z ko-  
mór spalania silnika do włókna pomiarowego (rys. 2).

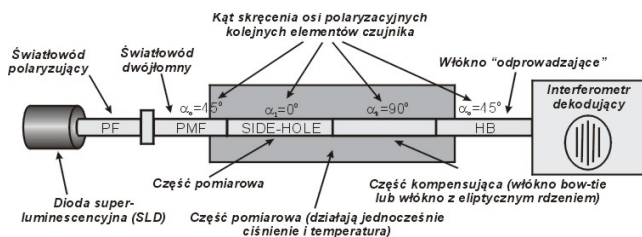


Rys. 1. Silnik Holden 2.0 MPFI



Rys. 2. Sposób montażu głowicy pomiarowej w głowicy badanego silnika oraz rysunek poglądowy głowicy pomiarowej z zaznaczonym kierunkiem doprowadzenia ciśnienia i zamontowanym poprzecznie do tego kierunku światłowodem pomiarowym

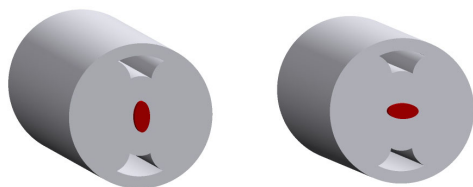
Tor pomiarowy światłowodowego czujnika ciśnienia składa się ze źródła światła (dioda superluminescencyjna), „światłowodu doprowadzającego”, głowicy pomiarowej z wbudowanym włóknem pomiarowym, „światłowodu odprowadzającego” oraz interferometru pełniącego funkcję detektora (rys. 3).



Rys. 3. Schemat toru pomiarowego

### 3. Budowa światłowodowego czujnika ciśnienia side-hole

Elementem pomiarowym światłowodowego czujnika ciśnienia jest włókno side-hole, którego przekrój poprzeczny został przedstawiony na rysunku 4. Włókno to posiada niezwykłą czułość ciśnieniową przy bardzo małej, o kilka rzędów mniejszej, czułości temperaturowej. Wysoka czułość ciśnieniowa spowodowana jest faktem, że rdzeń włókna side-hole ma przekrój eliptyczny a dodatkowo wzdłuż rdzenia, w powłoce ochronnej światłowodu, wydrążone są kanały powietrzne zwiększające tę czułość.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny dwóch odmian światłowodowego włókna „side-hole”

Źródłem światła prezentowanego czujnika jest dioda superluminescencyjna (SLD) [5]. Spolaryzowane w tej diodzie światło przesyłane jest światłowodem utrzymującym stan polaryzacji do doprowadzającego światłowodu dwójłomnego a następnie do części dwóch odcinków pomiarowych światłowodu. Pierwszy z odcinków pomiarowych jest zespawany czołowo z włóknem doprowadzającym. Jego

oś optyczna obrócona jest o kąt 45° co zapewnia pobudzenie obu modów światłowodowych w jednakowym stopniu. Druga część włókna pomiarowego połączona jest czołowo z pierwszą jednak jest ona obrócona o kąt 90°.

Efektom zastosowania odpowiednich kątów obrotu jest fakt, że w pierwszej części odcinka pomiarowego światłowodu, pod wpływem ciśnienia następuje wzajemne przesunięcie grupowe modów światłowodowych. Jest ono tym większe, im większe jest działające ciśnienie. Drugi odcinek włókna pomiarowego ma za zadanie skompensować niepożądany efekt działania temperatury, która w niewielkim ale znaczącym stopniu wpływa na pomiar. Kompensację działania temperatury uzyskuje się przez, wspomniane wcześniej obrócenie drugiej części włókna pomiarowego o kąt 90° co powoduje wzajemne przesunięcie (opóźnienie grupowe) modów o tą samą wartość o którą zostały przesunięte pod wpływem działania temperatury na pierwszą część włókna pomiarowego. Dalej światło biegnie wzdłuż światłowodu „odprowadzającego” do interferometru dekodującego.

Miarą mierzonego ciśnienia jest przesunięcie modów światłowodowych, które odpowiednio przetworzone w interferometrze na analogowy sygnał napięciowy można przesłać do komputera klasy PC w celu dalszej obróbki. Przedstawione na rysunku 5 interferometry posiadają zarówno źródło światła jak i interferometr dekodujący.



Rys. 5. Analogowy układ pomiarowy (na górze zdjęcia) i cyfrowy układ pomiarowy (na dole zdjęcia)

### 4. Zasada pomiaru i sposób przetwarzania danych pomiarowych

Zasada pomiaru opiera się na pomiarze przesunięcia fazowego pomiędzy dwoma ortogonalnie spolaryzowanymi modami światłowodowymi. Przesunięcie to spowodowane jest w rozpatrywanym przypadku przez ciśnienie działające na pomiarową część światłowodu i jest miarą tego ciśnienia. Sygnał każdego z czterech kanałów pomiarowych opisany jest następującą zależnością:

$$I_i = I_0 \left[ 1 + V \cdot \cos \left( \delta(p) + \left( (i-1) \frac{\pi}{4} \right) \right) \right] \quad (1)$$

gdzie:  $i$  – numer kanału,  $V$  – stała zależna m.in. od własności włókna światłowodowego.

w której  $I_0$  to średnia wartość sygnału, zaś  $V$ -stała zależna od cech zastosowanego światłowodu.

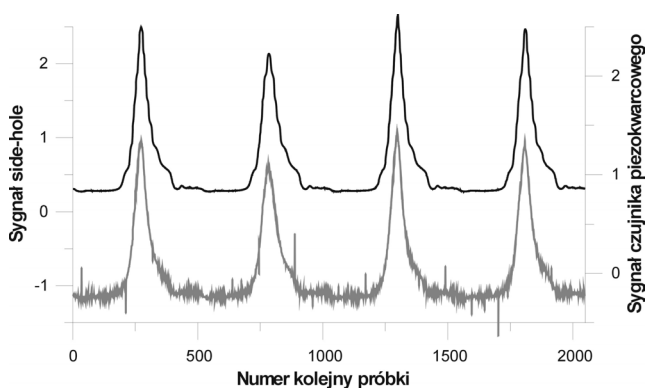
Kanały 1 i 3 opisane są następującymi zależnościami:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 [I + V \cdot \cos \delta(p)] \\ I_3 &= I_0 [I + V \cdot \sin \delta(p)] \end{aligned} \quad (2)$$

Odpowiedni sposób przetwarzania sygnałów opisanych powyższymi wzorami pozwala na odtworzenie przebiegu ciśnienia procesu spalania zachodzącego w silniku. Przykładowy przebieg ciśnienia klasycznego czujnika piezokwarcowego i czujnika side-hole przedstawiony został na rysunku 6.

### 5. Przykładowe wyniki pomiarów

Rysunek 6 przedstawia przykładowe wyniki pomiarów ciśnienia spalania wykonane przy użyciu czujników: piezokwarcowego i side-hole. Pomiar przeprowadzono w warunkach niewielkiego obciążenia silnika (ciśnienie w kanale dolotowym  $p_{dol} = 40kPa$ ), ką-



Rys. 6. Przykładowe przebiegi ciśnienia uzyskane przy użyciu czujnika piezokwarcowego (krzywa na dole) i czujnika side-hole (krzywa powyżej)

### 7. Literatura

- [1] Tunestal P., Hedrick J. K.: *Cylinder air/fuel ratio estimation using net heat release data*, SAE Papers.
- [2] Leonhardt S., Muller N., Isermann R.: *Methods for Engine Supervision and Control based on Cylinder Pressure Information*, SAE Papers.
- [3] Arsie I., Pianese C., Rizzo G.: *Identification of Emission Models in a Spark Ignition Engine for Control Applications*, SAE Papers.
- [4] Arsie I., Flauti G., Pianese C., Rizzo G.: *Cylinder Thermal State Detection from Pressure Cycle in SI Engine*, SAE Papers.
- [5] Nawrocka M.: *Światłowodowy czujnik interferencyjny do pomiaru szybkich zmian ciśnienia* – Politechnika Wroclawska, Instytut Fizyki.

cie wyprzedzenia zapłonu  $\alpha_z = 20^\circ$  przez zwrotem głowicowym tłoka oraz współczynnikiem nadmiaru powietrza  $\lambda = 1,0$ .

Na rysunku 6 widoczne są zakłócenia sygnału, stosowanego powszechnie w badaniach silników, czujnika piezokwarcowego (zakres ujemnego ciśnienia) oraz brak takich zakłóceń w przypadku sygnału side-hole. Analiza korelacyjna przebiegu sygnałów uzyskanych przy pomocy obu czujników wykazała ich dużą zgodność.

### 6. Podsumowanie

Pierwsze wyniki pomiarów przeprowadzone w hamowni silnikowej przy zastosowaniu interferencyjnego czujnika ciśnienia wykazały, że czujnik ten jest w stanie mierzyć ciśnienie panujące w cylindrze silnika spalinyowego. Dalsze badania powinny być skoncentrowane na analizie jakości tego sygnału, tzn. sprawdzeniu jego powtarzalności, sprawdzeniu występowania zjawiska histerezy, czy też dryfu temperaturowego. Konieczne jest także zwiększenie trwałości czujnika.

Pomimo wad czujnika jakimi są mała wytrzymałość włókna światłowodowego side-hole, stosunkowo drogi tor pomiarowy i cena jednostkowa czujnika, uprawnione jest stwierdzenie, że sygnał pomiarowy uzyskany przy jego pomocy jest nośnikiem informacji, które pozwolą na diagnostykę czy też sterowanie procesem spalania silnika i przyczynią się do rozwoju samochodowych czujników pokładowych.

Pozostają do rozwiązania kwestie dużych rozmiarów głowicy pomiarowej a także jej chłodzenia. Ważne jest zmniejszenie rozmiarów układu detekcyjnego oraz obniżenie jego ceny. Wyzwaniem jest jednoczesny pomiar ciśnienia we wszystkich cylindrach silnika. Jest to teoretycznie możliwe przy użyciu jednego włókna światłowodowego.

Dalsze wyniki badań, w kontekście dotychczas przeprowadzonych, oceniam bardzo optymistycznie.

**Mgr inż. Tomasz Kamiński**

Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Silników Spalinowych

**Mgr inż. Przemysław Filipek**

Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin