

METROLOGY PROPRIETIES OF OPTICAL FIBRE SENSOR OF THE PRESSURE OF THE SIDE - HALL TYPE

Tomasz Kamiński¹
Izabella Mitraszewska¹
Gabriel Nowacki¹
Mirosław Wendeker²
Andrzej Wojciechowski¹
Artur Godula²

¹ Instytut Transportu Samochodowego
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa
tel.: +48 22 8113231 w. 129, fax: +48 22 8110906
e-mail: tomasz.kaminski@its.waw.pl, tk42@o2.pl

² Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36, Lublin
tel. +48 81 5381272
e-mail: m.wendeker@pollub.pl

Abstract

In this paper we described cause of experimentation about new combustion progress sensors. We wrote about fibre-optic sensor. We showed construction of interferometric side-hole pressure sensor and laboratory station used to making of the measurement. In chapter number 3 we described metrological property of side-hole pressure sensor and next showed ambiguous estimation and indication deviation of measurement instrument. Also the laboratory-stand used operable of research describing short it each elements is introduced in paper. Chosen metrology proprieties connected with transducers and measuring-sensors are described. Chosen metrology properties of the sensor of optical fibre interferential sensor side-hole are also described. Then the method estimation of the in equivalence of the measurement and the error of the indication of the gauge is introduced. In the tabular seizure of the value of results of measurement of the in equivalence, obtained for rotational speeds of the crank-shaft of the engine $n = 1000, 2500$ and 4000 RPM and pressures in the inlet channel of the engine $p_d = 40, 60$ and 80 kPa.

Keywords: combustion engine, pressure sensor, fiber optic, side-hole, metrology

WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNE ŚWIATŁOWODOWEGO CZUJNIKA CIŚNIENIA TYPU SIDE-HOLE

Streszczenie

W artykule omówiono przyczynę prowadzenia prac nad nowymi czujnikami przeznaczonymi do pomiarów związanych z przebiegiem procesu spalania. Opisano zastosowany światłowod, zwracając uwagę na jego szczególne właściwości wykorzystane do zbudowania czujnika ciśnienia. Przedstawiono budowę interferencyjnego, światłowodowego czujnika ciśnienia typu side-hole. Przedstawiono również stanowisko laboratoryjne użyte do przeprowadzenia badań opisując pokrótce jego poszczególne elementy. W rozdziale 4 opisano wybrane właściwości metrologiczne związane z przetwornikami i czujnikami pomiarowymi. Opisano także wybrane własności metrologiczne czujnika światłowodowego czujnika interferencyjnego side-hole. Następnie przedstawiono metodę oceny niejednoznaczności pomiaru i błędu wskazania przyrządu pomiarowego. W ujęciu tabelarycznym przedstawiono

wartości wyników pomiarów niejednoznaczności, uzyskane dla prędkości obrotowych wału korbowego silnika $n = 1000, 2500$ i 4000 obr/min oraz ciśnienia w kanale dolotowym silnika $p_d = 40, 60$ i 80 kPa. Całość artykułu podsumowano wnioskami.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, czujnik ciśnienia, światłowód, side-hole, metrologia

1. Wprowadzenie

Współczesny silnik samochodowy jest urządzeniem wyposażonym w elektroniczne zespoły sterujące, które uwzględniają obserwacje dostarczane przez przetworniki pomiarowe oraz wartości zadawane przez kierowcę i na tej podstawie generują wielkości sterujące, takie jak stopień napełnienia cylindrów (elektroniczna przepustnica), dawka paliwa, czy też kąt wyprzedzenia zapłonu, w celu uzyskania określonego stanu pracy. Konieczne jest zatem zdefiniowanie i ocena charakterystyk lub też kryteriów jakości pracy silnika. Jest to problem w wielu przypadkach bardzo złożony głównie z powodu obserwowalności (wnioskowania o stanie procesu lub oceny określonych wielkości fizycznych). Przedstawiony w sposób ogólny proces sterowania przebiega zgodnie z przyjętymi w syntezie kryteriami jakości. Ze względu na złożoność i wynikający z tego koszt sterowania, osiągnięcie pewnych postulatów nie zawsze jest możliwe. Świadczą o tym liczne wyniki badań zamieszczone w literaturze, wskazujące na przykład na: zmienność niektórych właściwości silnika [1, 2]. Wspomniana zmienność, typowa dla sterowań bez elementów adaptacji powoduje, że wyznaczone podczas syntezy sterowania nastawy muszą być korygowane w warunkach eksploatacji [3]. Usunięcie tego rodzaju niedostatków wymaga stosowania układów sterowania wyposażonych w moduły śledzące aktualne właściwości procesów. Ze względu na zróżnicowany stopień zaawansowania układu sterowania ta sama konstrukcja silnika może charakteryzować się odmiennymi charakterystykami jakości. To z kolei wiąże się z koniecznością pomiaru dodatkowych wielkości fizycznych składających się na identyfikację właściwości procesu spalania.

Najważniejszą wielkością jest ciśnienie gazów w komorze spalania. Na podstawie tej wielkości mogą być obliczane inne ważne wielkości: ciśnienie indykowane p_i , współczynnik nadmiaru powietrza λ , moc użyteczna N_e , współczynnik napełnienia cylindra η_v , poziom emisji toksycznych składników spalin TOX , temperatura ścian komory spalania, itp. Na podstawie analizy przebiegu ciśnienia w cylindrze można wnioskować również o stopniu poprawności spalania, nazywanym spalaniem stukowym lub też o zjawisku wypadania zapłonów [4].

2. Właściwości światłowodu side-hole

Podczas badań, które zostały opisane w dalszej części pracy zastosowany został światłowód specjalny typu side-hole, należący do światłowodów o wysokiej dwójłomności. Włókno side-hole, w przeciwieństwie do innych znanych włókien dwójłomnych ma ujemny współczynnik czułości na ciśnienie. Daje to nowe możliwości związane z kompensacją wpływu temperatury na wynik pomiaru. Dzięki umieszczeniu odcinków: pomiarowego i kompensującego efekt temperaturowy w obszarze działania ciśnienia, czujniki wykorzystujące światłowód side-hole nadają się lepiej do pomiarów szybkozmiennych ciśnień niż czujniki stosowane dotychczas. Zakres pomiarowy czujnika można łatwo zmieniać w przedziale 1 - 10 MPa przez dobór włókien dwójłomnych o odpowiednich parametrach. W tabeli 1 przedstawiono wartości czułości temperaturowej i ciśnieniowej przykładowych światłowodów.

Na uwagę zasługuje bardzo wysoka czułość ciśnieniowa światłowodu side-hole wyprodukowanego przez Pracownię Technologii Światłowodów UMCS, który przy zachowaniu wysokiej selektywności, rozumianej tutaj jako wysoka czułość na wpływ mierzonego czynnika posiada jednocześnie wysoką odporność na wpływ innych czynników mogących zakłócić pomiaru. Światłowód side-hole produkcji PTŚ UMCS ma współczynnik czułości ciśnieniowej do czułości temperaturowej (K_p/K_T) o dwa rzędy większy w stosunku do światłowodów innych

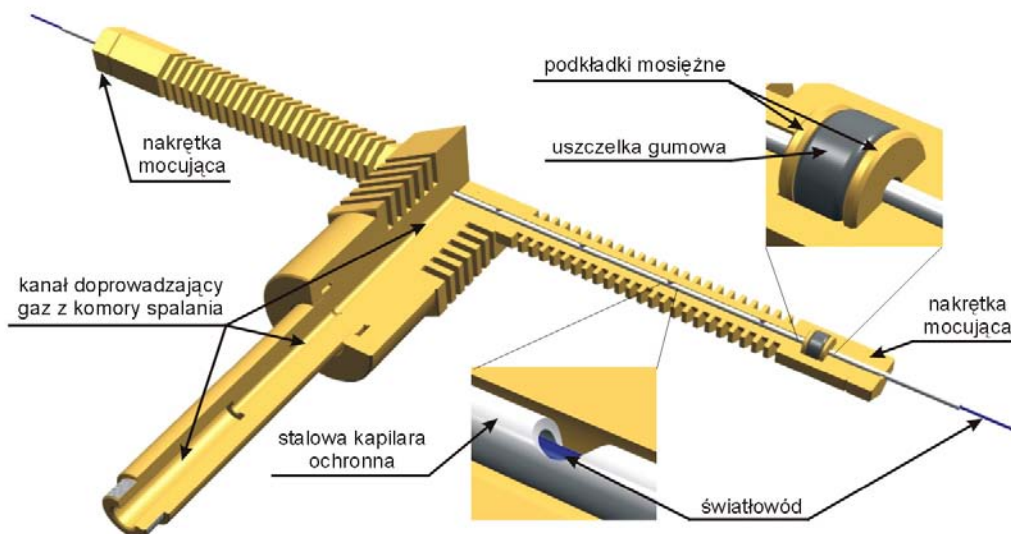
producentów. Wynosi on $K_P/K_T = 214,23$. Kierunki polaryzacji modów własnych w światłowodach HB (o wysokiej dwójłomności) są równoległe do osi symetrii światłowodu.

Tab. 1. Przykładowe wartości czułości światłowodów
 Tab. 1. Examples sensitivity values of the fibre-optic

Nazwa światłowodu	York HB Bow-tie	Andrew E-type	Panda	SMPM Typu-D (PTS UMCS)	Side-hole (PTS UMCS)
Długość fali [nm]	820	820	633	633	820
Czułość temperaturowa K_T [rad/°C·m]	-4,75	-0,97	-5,23	-0,56	-0,22
Czułość ciśnieniowa K_P [rad/MPa·m]	9,23	0,65	9,5	–	47,13
Stosunek K_P/K_T [-]	2,24	0,67	1,83	–	214,23

3. Budowa czujnika i stanowiska pomiarowego

Zaproponowana konstrukcja głowicy pomiarowej, w której umieszczony został światłowod side-hole wymaga zastosowania specjalnej tulei doprowadzającej ciśnienie. Tuleja ta umieszczona jest w zakończonym gwintem otworze wykonanym w głowicy silnika (rys. 1). Gorąca mieszanka palna pod wpływem wysokiego ciśnienia panującego w komorze spalania dostaje się do wnętrza głowicy przez wspomniany otwór. Następnie przemieszcza się kanałem doprowadzającym gaz do zasadniczej części głowicy, w której znajduje się światłowod pomiarowy.



Rys. 1. Budowa głowicy pomiarowej
 Fig. 1. Measurement head construction

Silnikiem badawczym był czterocylindrowy C20LE firmy Holden o pojemności skokowej 1998 cm³. Silnik wyposażony jest w wielopunktowy układ wtryskowy MB 950, bezrozdzielczowy układ zapłonowy DIS i sterownik ACDS firmy Delphi Delco Electronics.

Dodatkowo zastosowano:

- miernik szerokozakresowej sondy lambda DTS 120A współpracujący z szerokozakresową sondą BOSCH LSU 4,
- hamulec silnikowy SAK-N-760 firmy VEB Elbtalwerk o maksymalnej mocy 80 kW i maksymalnej prędkości obrotowej 6500 obr/min,
- mikroprocesorowe urządzenie AMX 231 firmy Automex, pozwalające na sterowanie momentem, prędkością obrotową i położeniem przepustnicy,
- moduł utrzymywania zadanej temperatury cieczy oparty o sterownik ADVANTECH ADAM 5510, pozwalający na regulację z dokładnością do 1 °C,
- piezokwarcowy czujnik 601A firmy Kistler, osadzony w oprawce 6511sp tejże firmy, wraz ze wzmacniaczem ładunku 3057-A01 firmy AVL,
- optoelektroniczny przetwornik obrotowo-kodowy MH420-6 firmy Megatron z 10-cio bitowym przetwornikiem umożliwiającym określenie położenia wału korbowego, z rozdzielczością 512 punktów na obrót,
- siłownik AMX-201 produkcji firmy Automex S.A. umożliwiający zmianę położenia przepustnicy silnika.

Sterowanie silnikiem odbywało się przy użyciu sterownika AMX 200 CAN opracowanego w Laboratorium Silników Spalinowych Politechniki Lubelskiej. Dane były rejestrowane przez kartę przetworników analogowo-cyfrowych PCI-9118HG firmy ADLink Technology o rozdzielczości 12-u bitów.

4. Własności metrologiczne czujnika side-hole

Zgodnie z Polską Normą PN-71/N-02050 „Metrologia Nazwy i określenia” oraz z *Międzynarodowym słownikiem podstawowych i ogólnych terminów metrologii* [6] charakterystyki przyrządów pomiarowych obejmują następujące, główne własności metrologiczne:

- **zakres nominalny** – zakres podziałki otrzymywany przy danej pozycji przełączników przyrządu pomiarowego,
- **zakres pomiarowy** – zbiór wartości wielkości mierzonej, dla których przyjmuje się, że błąd przyrządu pomiarowego jest zawarty w określonych granicach,
- **przedział wskazań** – moduł różnicy między dwiema granicami zakresu nominalnego,
- **stała przyrządu** – współczynnik przez, który należy pomnożyć bezpośrednie wskazanie przyrządu pomiarowego, aby uzyskać wartość wielkości mierzonej lub wielkości, którą należy zastosować w obliczaniu wartości wielkości mierzonej,
- **czułość** – iloraz przyrostu odpowiedzi przyrządu pomiarowego i odpowiadającego mu przyrostu sygnału wejściowego,
- **rozdzielczość** – najmniejsza różnica wskazania urządzenia wskazującego, która może być zauważona w wyraźny sposób,
- **pełzanie, dryft** – powolna zmiana charakterystyki metrologicznej przyrządu pomiarowego,
- **błąd (wskazania) przyrządu pomiarowego** – wskazanie przyrządu pomiarowego minus wartość prawdziwa odpowiedniej wielkości wejściowej,

- **powtarzalność (przyrządu pomiarowego)** – właściwość przyrządu pomiarowego polegająca na tym, że jego wskazania są zbliżone do siebie w przypadku wielokrotnego pomiaru tej samej wielkości mierzonej w tych samych warunkach pomiaru.

Przetwornik pomiarowy side-hole składa się z: czujnika głowicowego (głowicy pomiarowej), źródła światła (diody superluminescencyjnej), układu przetwarzania danych (detektora interferencyjnego) i układu akwizycji danych, którym w istocie jest karta pomiarowa współpracująca z komputerem klasy PC. W detektorze interferencyjnym mierzone jest wzajemne przesunięcie przewodzonych przez światłowód modów światłowodowych, które jest proporcjonalne do mierzonego ciśnienia.

Założony zakres nominalny przetwornika uzyskiwany jest przez dobór włókien światłowodowych o odpowiednich parametrach. W opisywanym przypadku zakres nominalny i zakres pomiarowy są sobie równe i wynoszą $0,1 \div 10$ MPa. Przedział wskazań jest wobec tego równy 9,9 MPa.

Stała przyrządu (oznaczona literą k) została wyznaczona przez porównanie wartości uzyskanych podczas pomiaru wykonanego badanym czujnikiem z wartościami ciśnienia uzyskanymi przy użyciu czujnika piezokwarcowego. Każdy z zastosowanych podczas badań czujników posiadał inną stałą k , która w opisywanym przypadku wynosiła $k = 0,435$. Wyznaczona doświadczalnie czułość wynosi $c = 4,44 \cdot 10^{-4}$ [1/Pa].

Przetwornik pomiarowy jest urządzeniem analogowym a jedynym elementem, który powoduje kwantowanie sygnału wpływające na jego rozdzielczość, jest karta pomiarowa. Przy zastosowanym zakresie pomiarowym karty wynoszącym $-5 \div 5$ V i rozdzielczości pomiarowej karty równej $r_p = 12$ bitów, rozdzielczość pomiaru jest równa $r_t = 0,002441$. Uwzględniając przedział wskazań równy 9,9 MPa, rozdzielczość jest równa $r = 0,02417$ MPa.

Jednym z mankamentów opisywanych światłowodowych czujników interferencyjnych jest niska trwałość. Jest ona jedną z podstawowych wad, które muszą być poprawione w przyszłości. Ze względu na trwałość czujnika równoważną jego około 40 minutowej pracy silnika badawczego, przy średnim obciążeniu (ciśnienie w kanale dolotowym $p_d = 60$ kPa i prędkość obrotowa $n = 2500$ obr/min) nie udało się stwierdzić czy czujnik podlega długoczasowemu dryftowi. Podczas wspomnianego okresu nie stwierdzono dryftu sygnału.

Niejednoznaczność i błąd wskazania przyrządu pomiarowego zostały wyznaczone przy zastosowaniu poniższej procedury.

5. Ocena niejednoznaczności i błędu wskazania przyrządu pomiarowego

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi wartości ciśnienia przetwornika światłowodowego i piezokwarcowego dla dziesięciu kolejnych cykli sprężania (przy braku zapłonu mieszanki). Pomiaru wykonano dla prędkości obrotowej wału korbowego silnika $n = 2500$ obr/min i ciśnienia w kanale dolotowym silnika $p_d = 40, 60$ i 80 kPa.

Widoczna jest zgodność obu sygnałów pomiarowych. Przetworniki ciśnienia reagują w podobny sposób na zmiany ciśnienia w komorze spalania silnika, jednak w celu określenia liczbowych wartości pozwalających na ocenę zgodności sygnałów obliczona została niejednoznaczność wskazania przyrządu pomiarowego. Na rysunku 3 przedstawiono dziewięć wykresów na których wykreślone zostały wartości ciśnienia zmierzonego czujnikiem światłowodowym w funkcji ciśnienia zmierzonego czujnikiem piezokwarcowym, przy czym wartość ciśnienia zmierzona drugim z czujników została przyjęta jako wartość umownie prawdziwa, to znaczy uznano, że jest ona wartością wyznaczoną z niepewnością akceptowalną w danym zastosowaniu.

Największe różnice między wartościami ciśnień zarejestrowano przy dużej prędkości obrotowej wału korbowego silnika $n = 4000$ obr/min i przy dużym obciążeniu, które odpowiadało ciśnieniu w kanale dolotowym $p_d = 80$ kPa.

Niejednoznaczność pomiaru obliczono zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 4, na którym wykreślone zostały wartości zmierzone badanym czujnikiem w funkcji wartości umownie prawdziwych. Poszukiwaną wartość obliczono zgodnie ze wzorem:

Uzyskane wartości przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wartości niejednoznaczności pomiaru
Tab. 2. Dubious measurement values

Lp.	n	p _d	ΔNz[Mpa]	z _p	ΔNz
1.	1000	80	0,09	1,63	5,63
2.	2500	80	0,18	1,75	10,08
3.	4000	80	0,33	1,76	18,78
4.	1000	60	0,07	1,24	5,63
5.	2500	60	0,15	1,32	11,13
6.	4000	60	0,26	1,35	19,46
7.	1000	40	0,06	0,84	6,60
8.	2500	40	0,11	0,88	12,52
9.	4000	40	0,13	0,85	15,13

Największą niepewność pomiaru uzyskano dla prędkości obrotowej n = 4000 obr/min i podciśnienia p_d = 80 kPa.

$$\delta_N = \frac{|y_2 - y_1|_{\max}}{z_p} \cdot 100 \%$$

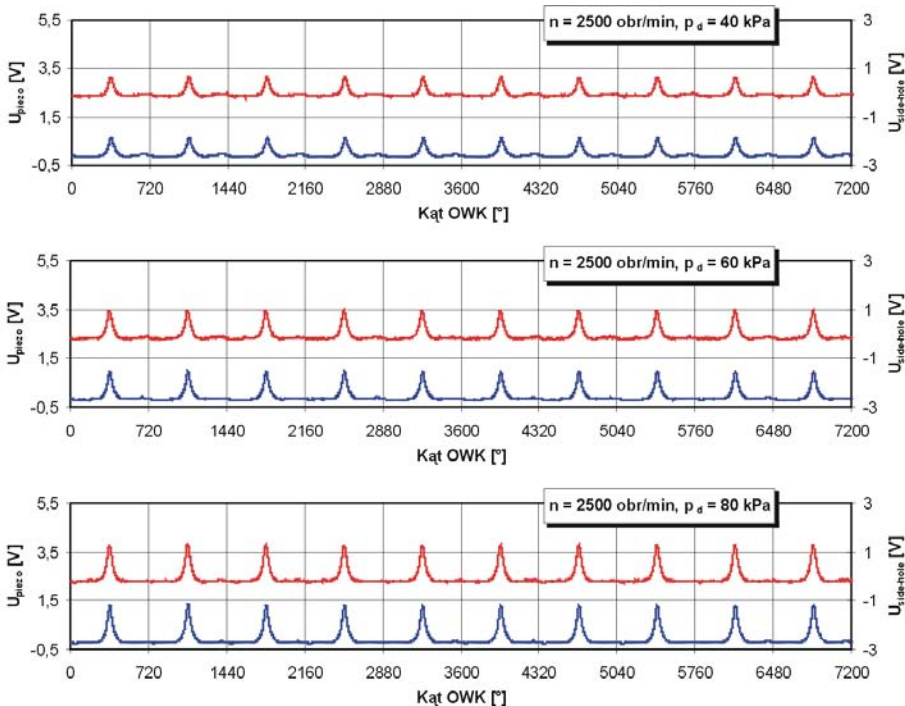
gdzie:

δ_N – niepewność pomiaru [%],

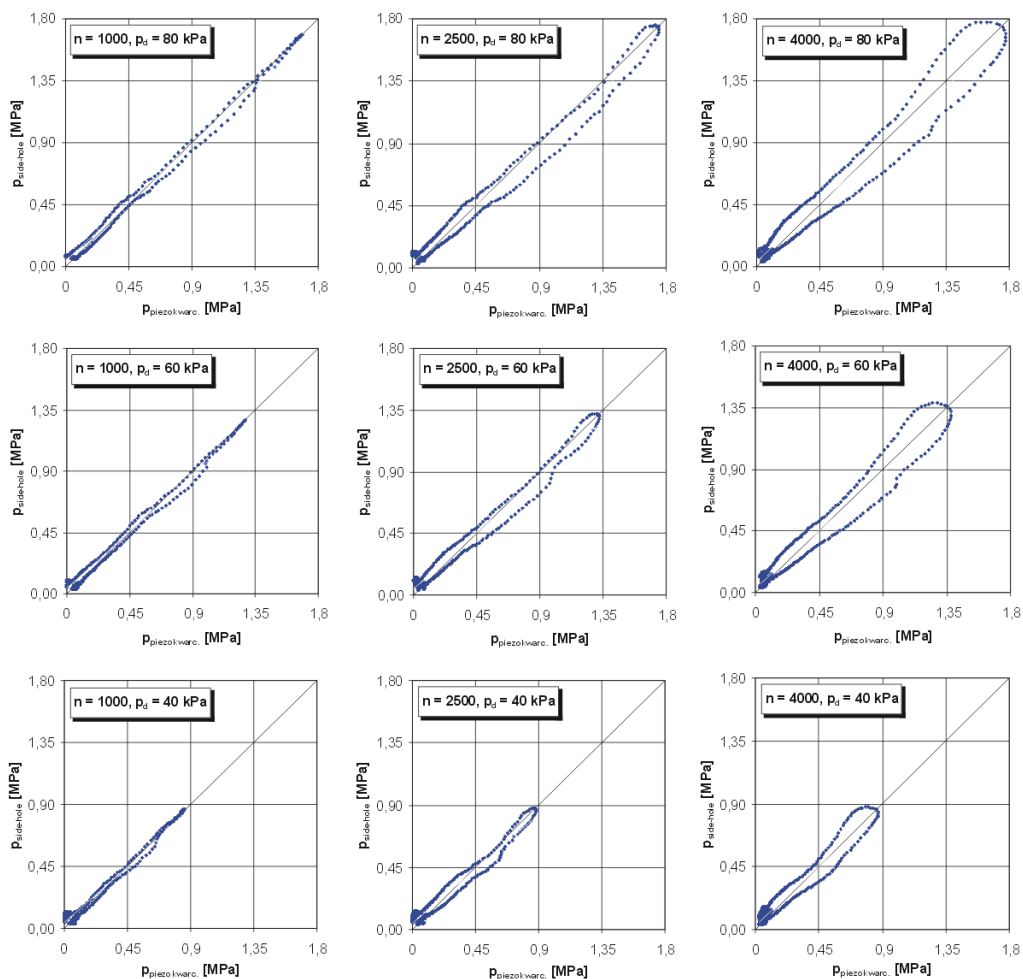
y₂ – wartość ciśnienia zmierzona czujnikiem side-hole,

y₁ – wartość ciśnienia zmierzona czujnikiem piezokwarcowym (umownie prawdziwa),

z_p – zakres pomiarowy,



Rys. 2. Wartości ciśnienia przetwornika światłowodowego i piezokwarcowego dla dziesięciu kolejnych cykli sprężania
Fig. 2. Pressure value of fibre-optic and piezoelectric converter for following 10 compression cycle



Rys. 3. Wartość ciśnienia czujnika side-hole w funkcji wartości ciśnienia czujnika piezokwarcowego. Charakterystyki quasi-statyczne

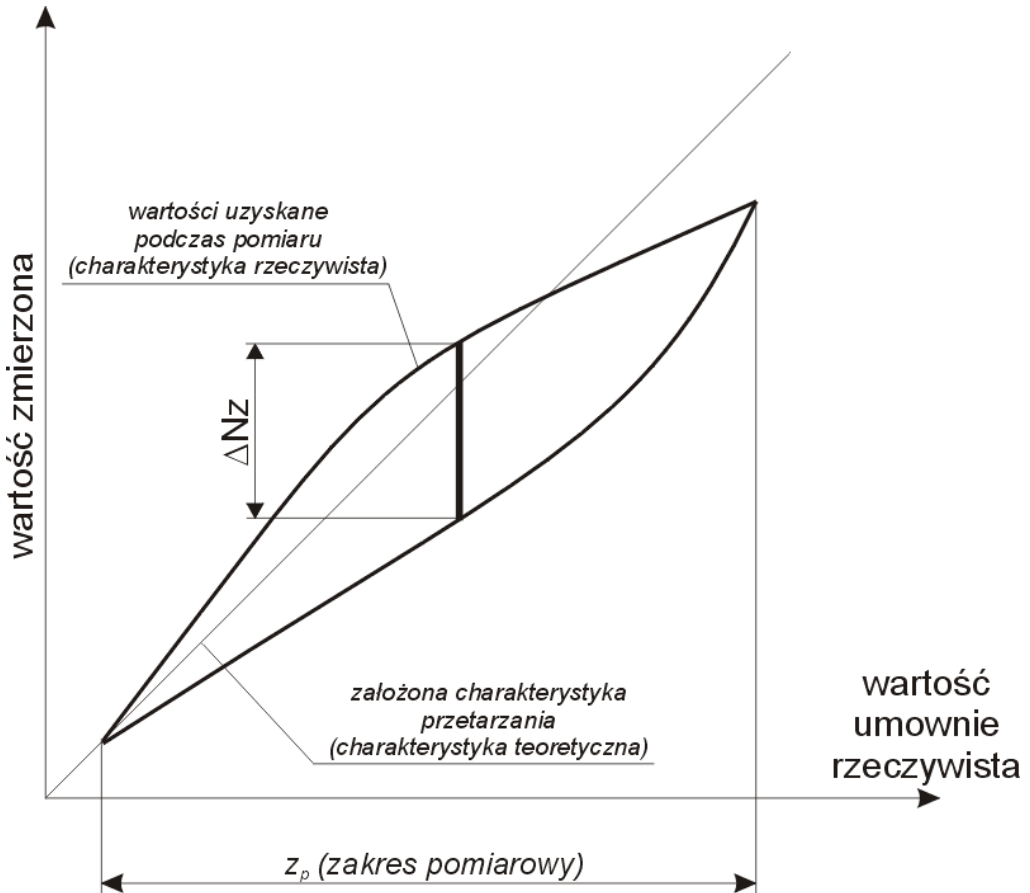
Fig. 3. Pressure value of side-hole sensor versus piezoelectric pressure sensor value. Quasi-static characteristics

Czujnik cechuje istotna niejednoznaczność pomiaru ciśnienia, przy czym na wykresach zauważyć można dużą zgodność ciśnienia maksymalnego obu czujników. Obliczony maksymalny błąd wskazania maksymalnego ciśnienia cyklu roboczego wynosi 0,15 % dla przypadku $n = 4000$ obr/min i $p_d = 80$ kPa.

6. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza własności metrologicznych światłowodowego czujnika ciśnienia wykazała, że pomimo zalet jakie są związane z zastosowaniem światłowodu jako elementu pomiarowego istnieje istotna niejednoznaczność wskazania wartości ciśnienia. Na uwagę zasługuje jednak wysoka zgodność wartości ciśnienia maksymalnego zmierzone przez światłowodowy i piezokwarcowy przetwornik ciśnienia. Właściwe byłoby zatem wzorcowanie przetwornika światłowodowego jedynie dla ciśnień maksymalnych i użycie czujnika jedynie do

oceny maksymalnego ciśnienia obiegu. Badania przeprowadzone podczas realizacji pracy [5] wykazały, że istnieje istotna korelacja pomiędzy maksymalnym ciśnieniem obiegu i kątem obrotu wału korbowego silnika, przy którym występuje maksymalne ciśnienie a wybranymi wartościami wielkości opisujących proces roboczy silnika. Wykazano, że możliwa jest ocena momentu użytecznego M_e na podstawie znajomości ciśnienia maksymalnego lub kąta występowania tego ciśnienia.



Rys. 4. Wykres przedstawiający sposób wyznaczania niepewności pomiaru

Fig. 4. Determine method of measurement dubious

Konieczne są dalsze prace nad polepszeniem trwałości czujnika oraz nad zmniejszeniem niejednoznaczności pomiaru, która może być spowodowana zbyt dużą objętością wewnętrzną głowicy pomiarowej.

Literatura

- [1] Ribbens, W., Rizzoni, G., *Onboard diagnosis of engine misfires*. SAE Transactions Sect. 6, pp. 1615-1624 1990.

- [2] Sohma, K., Yukitake, T., Azuhata, S., Takakku, Y., *Application of Rapid Optical Measurement to Detect the Fluctuations of the Air-Fuel Ratio and Temperature of a Spark Ignition Engine*. SAE Techn. Pap. 910489, 1991.
- [3] Kainz, J., Smith, J., *Individual Cylinder Fuel Control with a Switching Oxygen Senso*. SAE Special Publications, Electronic Engine Controls, 1999-01-0546, 1999.
- [4] Wendeker, M., *Sterowanie wtryskiem benzyny w silniku samochodowym*. Wydawnictwo Lubelskiego Towarzystwa Naukowego, LTN, Lublin 1999.
- [5] Kamiński T., Dysertacja nt.: *Ocena procesu roboczego silnika spalinowego z zastosowaniem światłowodowego czujnika interferencyjnego*. Politechnika Lubelska, 2005.
- [6] *Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii*. Wydanie Polskie. Główny Urząd Miar, 1996.

