

THE ESTIMATING OF CYLINDER TIGHTNESS ON THE BASIS OF CRANKSHAFT MOMENTARY ROTATIONAL SPEED MEASUREMENT

Andrzej Piętaś, Grzegorz Trawiński

Wojskowa Akademia Techniczna

00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2,

tel./fax: 0-22-6837602, e-mail: apietak@wat.edu.pl, gtrawinski@wat.edu.pl

Abstract

There are presented the results of experimental research of the combustion chamber tightness change influence on the rotational speed (and angular acceleration) of the AD 4.236 diesel engine crankshaft. On the basis of results there are suggested new diagnostic method for compression pressure in cylinder evaluating.

OCENA SZCZELNOŚCI CYLINDRÓW NA PODSTAWIE POMIARÓW CHWILOWEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ WAŁU KORBOWEGO SILNIKA

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu modelowanej zmiany szczelności przestrzeni nadłokowej cylindrów na przebieg chwilowej prędkości obrotowej (przyspieszenia kątownego) wału korbowego silnika AD 4.236. W oparciu o uzyskane wyniki zaproponowano nową metodę diagnostyczną określania ciśnienia sprężania w cylindrach.

I. Wprowadzenie

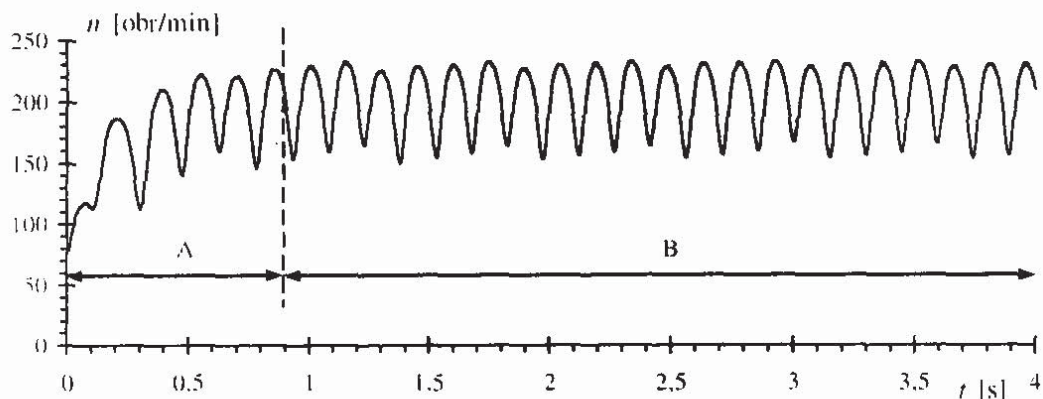
Podczas eksploatacji tłokowego silnika spalinowego zachodzą w nim procesy zużycia elementów tworzących przestrzeń roboczą które sprawiają, że zmiana ulega szczelność cylindra. Proces utraty szczelności powoduje między innymi zmianę napełnienia cylindrów, obniżenie ciśnienia sprężania i wzrost zużycia oleju, co prowadzi do pogorszenia głównych parametrów i wskaźników pracy silnika. Trwałość współczesnych silników do momentu osiągnięcia granicznej wartości zużycia (ciśnienia sprężania) wynosi dla samochodów osobowych 250÷400 tys. km, a dla samochodów ciężarowych nawet od 800 tys. do 1 mln km [2, 3].

Stosowane powszechnie klasyczne metody oceny szczelności przestrzeni nadłokowej (pomiar ciśnienia sprężania za pomocą manometrów, pomiar względnego ubytku sprężonego powietrza czy pomiar ilości i ciśnienia spalin w skrzyni korbowej) charakteryzują się dużą pracochłonnością, spowodowaną koniecznością demontażu wtryskiwaczy (świec zapłonowych) przed wykonaniem pomiarów i ich montażem po wykonaniu pomiarów oraz stosunkowo małą dokładnością (około 5%) . Ich wadą jest również mała powtarzalność wyników pomiarów, zależnych od warunków pracy silnika (stanu cieplnego silnika oraz stanu technicznego akumulatora i rozrusznika). Także metody nowocześniejsze, takie jak rejestracja zmian napięcia na zaciskach akumulatora lub natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania za jego pomocą wałem korbowym silnika (w czasie 6÷10 s) przy odciętym dopływie paliwa dostarczają przede wszystkim informacji o względnej szczelności poszczególnych cylindrów. W obu metodach oceny wyników pomiarów dokonuje się najczęściej poprzez porównanie przebiegu zmian rejestrowanych wielkości z danymi

wzorcowymi dla danego silnika, co umożliwia uzyskanie oceny jakościowej (dobrze – źle), a nie ilościowej (wartość ciśnienia sprężania).

Problem oceny szczelności cylindra podczas eksploatacji silnika jest bardzo istotny. Przy czym jak się wydaje istotniejszą kwestią, zwłaszcza dla silników o zapłonie samoczynnym, wydaje się ocena względnej, a nie bezwzględnej szczelności cylindra (ciśnienia sprężania). Jeśli różnica ciśnienia sprężania między cylindrami jest zbyt duża, jest ona przyczyną powstawania dodatkowych wymuszeń powodujących zwiększenie drgań skrętnych wału korbowego, powodujących istotne zmniejszenie trwałości silnika [1]. Wieloletnie prace prowadzone w Instytucie Pojazdów Mechanicznych i Transportu Wojskowej Akademii Technicznej nad wykorzystaniem pomiarów chwilowej prędkości obrotowej do diagnostyki silnika wskazały na możliwość ich wykorzystania także do oceny szczelności cylindrów.

Napędzanie silnika rozrusznikiem, przy braku możliwości podjęcia przez silnik samodzielnej pracy (poprzez odcięcie dawki paliwa), powoduje obracanie wału korbowego (także ruch korbowodów i tłoków) wraz z całym osprzętem mechanicznym i elektrycznym silnika napędzanym od wału (pompa wtryskowa, alternator itd.). W pierwszej fazie tego procesu (narastanie prędkości – zakres A na rys. 1) opory, które musi pokonać rozrusznik są największe. Składają się na nie opory tarcia między pierścieniami a gładzią cylindrów oraz ułożyskowania elementów silnika i jego osprzętu, opory bezwładności ruchomych elementów (mas) oraz opory sprężania. W drugiej fazie (zakres B na rys. 1) wał korbowy obracany jest z quasiustaloną prędkością obrotową – chwilowa prędkość obrotowa zmienia się wokół pewnej ustalonej wartości średniej z częstością zależną od liczby cylindrów silnika.



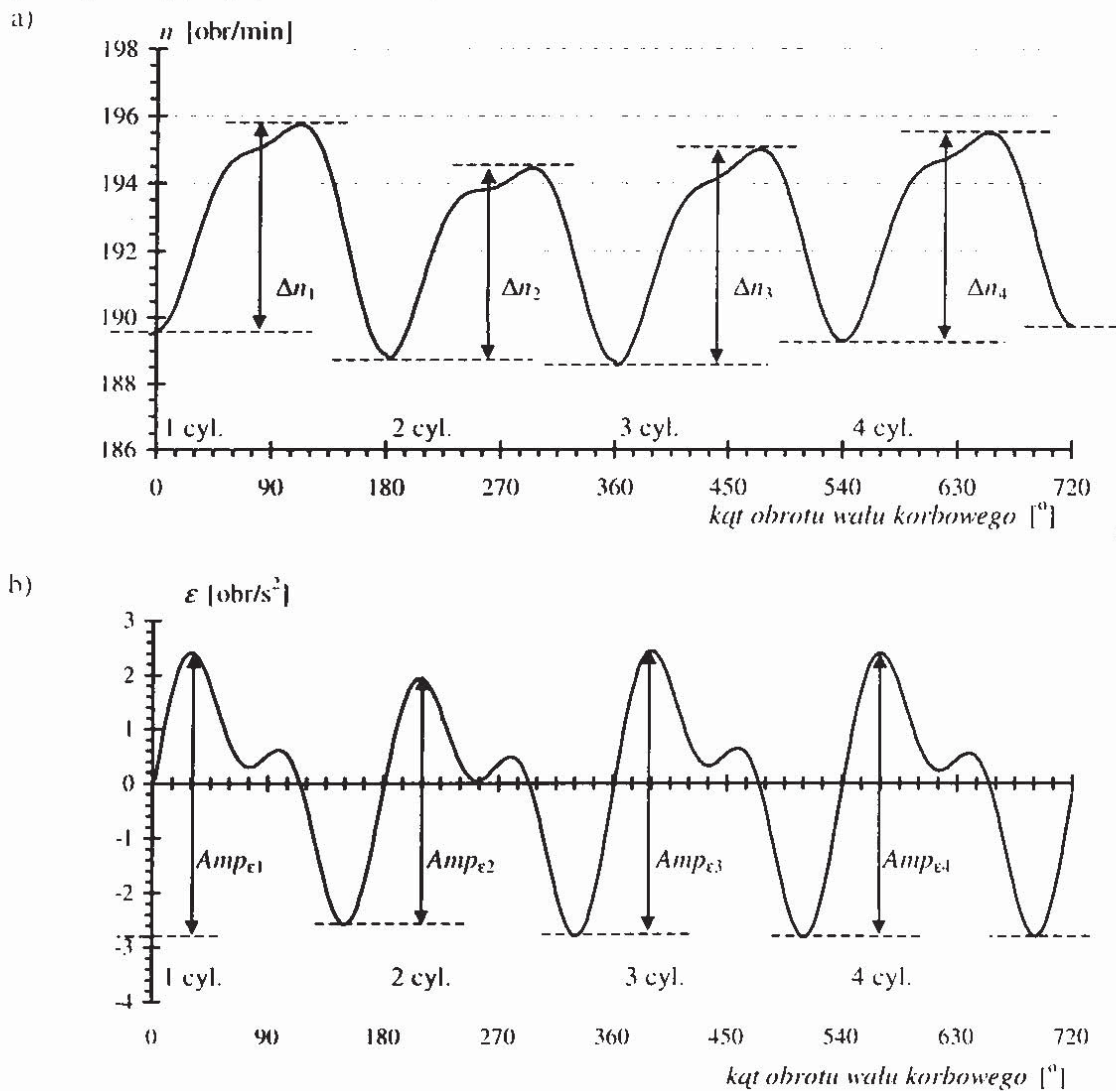
Rys. 1. Przykładowy przebieg chwilowej prędkości obrotowej czterocyldrowego silnika AD 4.236 podczas napędzania wału korbowego za pomocą rozrusznika bez podania paliwa

Fig. 1. An example of AD 4.236 engine crankshaft momentary rotational speed during its driving.

Badania przebiegu chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego wykonane dla silnika jednocylindrowego SB 3.1 (dla różnych modelowanych nieszczelności cylindra) wykazały istnienie zależności pomiędzy szczelnością cylindra a przebiegiem prędkości obrotowej. Zależność ta polega na tym, że im większa szczelność cylindra tym większy przyrost prędkości (w okresie od położenia tłoka w GMP w suwie sprężania do około 60° obrotu wału korbowego po nim) wywołany wspomaganiami pracy rozrusznika przez sprężone w przestrzeni nadłokowej powietrze. W wyniku nałożenia czterech przebiegów uzyskanych dla silnika jednocylindrowego z przesunięciem fazowym pomiędzy kolejnymi o 180° obrotu wału korbowego wyznaczono przewidywany przebieg chwilowej prędkości obrotowej (przyspieszenia kąowego) wału korbowego silnika dla jednakowej szczelności wszystkich cylindrów i dla przypadku spadku szczelności w jednym z cylindrów.

Badania modelowe potwierdziły zależność przebiegu prędkości obrotowej (przyspieszenia kąowego) wału korbowego silnika od szczelności cylindrów. Dla przypadku obniżenia

szczelności pojedynczego cylindra (rys. 2) dla cylindra o obniżonej szczelności zmiana prędkości wynosiła 5,68 obr/min, a wartość amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia wału korbowego 4,51 obr/s². Dla pozostałych cylindrów uzyskano zbliżone przyrosty prędkości chwilowej Δn_i (od 6,10 do 6,46 obr/min) oraz praktycznie takie same wartości amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia Amp_{ϵ_i} (od 5,19 do 5,23 obr/s²).



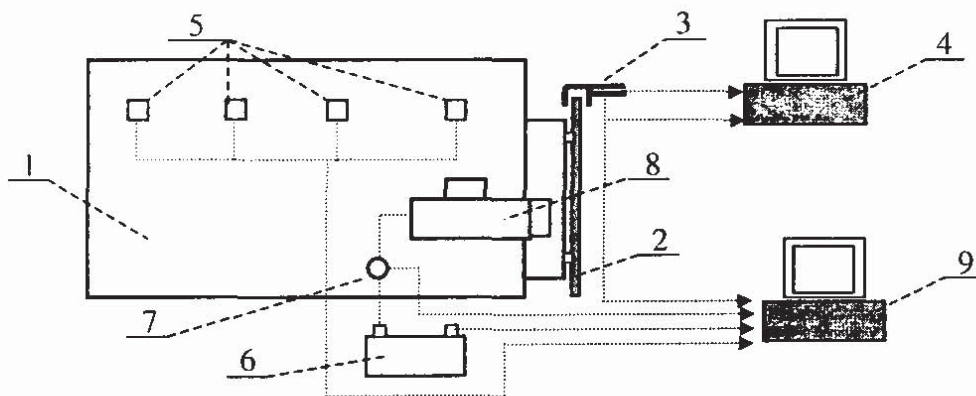
Rys. 2. Przewidywane przebiegi prędkości obrotowej [a] oraz przyspieszenia kąowego [b] wału korbowego silnika 4-ro cylindrowego o obniżonej szczelności w jednym z cylindrów (oznaczenia cylindrów odpowiadają kolejności ich pracy)

Fig. 2. Predicted courses of crankshaft rotational speed [a] and angular acceleration [b] the four-cylinder AD 4.236 diesel engine with decreased tightness in one of cylinders (designations of cylinders meet sequence running)

2. Stanowisko i metodyka badań

Badania eksperymentalne, mające zweryfikować opisane wyżej zależności wykonano na stanowisku silnika AD 4.236 (rys. 3). Polegały one na precyzyjnym pomiarze prędkości kątowej wału korbowego silnika podczas jego napędzania za pomocą rozrusznika bez podania paliwa. Tor pomiarowy prędkości obrotowej składał się z czujnika fotooptycznego oraz układu rejestrującego własnej konstrukcji, opisanego szczegółowo w [4]. Jako nadajnik impulsów pomiarowych zastosowano tarczę (o dużej dokładności wykonania) ze 180-zębami prostokątnymi, co zapewniło możliwość rejestracji pomiarów z krokiem co 2^o obrotu wału korbowego. Błąd względny pomiaru prędkości był mniejszy niż 0,1 %, natomiast błąd

pomiaru przyspieszenia kąowego mniejszy niż 1 % [5]. W trakcie pomiarów rejestrowano równocześnie (częstotliwość próbkowania 1000 Hz) przebieg ciśnienia w poszczególnych cylindrach oraz przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Pomiar wielkości analogowych i prędkości obrotowej synchronizowano z położeniem wału korbowego z wyko-



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 - silnik AD 4.236, 2 - nadajnik impulsów pomiarowych, 3 - zintegrowany czujnik prędkości obrotowej i położenia wału korbowego, 4 - komputerowy układ pomiarowy prędkości obrotowej, 5 - zestaw piezoelektrycznych czujników ciśnienia, 6 - akumulator, 7 - hallotronowy czujnik natężenia prądu, 8 - rozrusznik, 9 - komputerowy układ pomiarowy wielkości analogowych.

Fig. 3. Diagram of measuring stand: 1 - engine AD 4.236, 2 - measurement pulse transmitter, 3 - integrated angular-rate crankshaft and position sensor, 4 - computer unit for rotational speed measurement, 5 - piezoelectric pressure sensors system, 6 - starting battery, 7 - Hall-effect sensor of current intensity, 8 - starter, 9 - computer unit for analogue quantity.

rzystaniem znacznika położenia wału korbowego (GMP tłoka). Rejestrowane przebiegi pomiarowe prędkości obrotowej, a zwłaszcza przebiegi jej pochodnej - przyspieszenia kąowego, zawierały niewielkie zniekształcenia wynikające z zakłóceń i błędów pomiaru. Eliminowano je poprzez filtrację sygnału pomiarowego za pomocą filtra dolnoprzepustowego o częstotliwości granicznej (powyżej czwartej harmonicznej) wyznaczonej oddzielnie dla każdego przebiegu na podstawie analizy gęstości widmowej mocy rejestrowanego sygnału. Z uwagi na niepowtarzalność kolejnych obiegów silnika do analizy brano wartości średnie z 10-ciu kolejnych cykli „pracy” (20-stu obrotów wału korbowego).

Wykonane badania eksperymentalne składały się z dwóch zasadniczych etapów. Podczas badań wstępnych określono wpływ stanu cieplnego silnika oraz stanu technicznego (stopnia rozładowania) akumulatora rozruchowego na przebieg chwilowej prędkości obrotowej (przyspieszenia kąowego). W zasadniczym etapie badań określono wpływ modelowanej nieszczelności cylindra (cylindrów) na przebieg tych wielkości.

3. Badania eksperymentalne

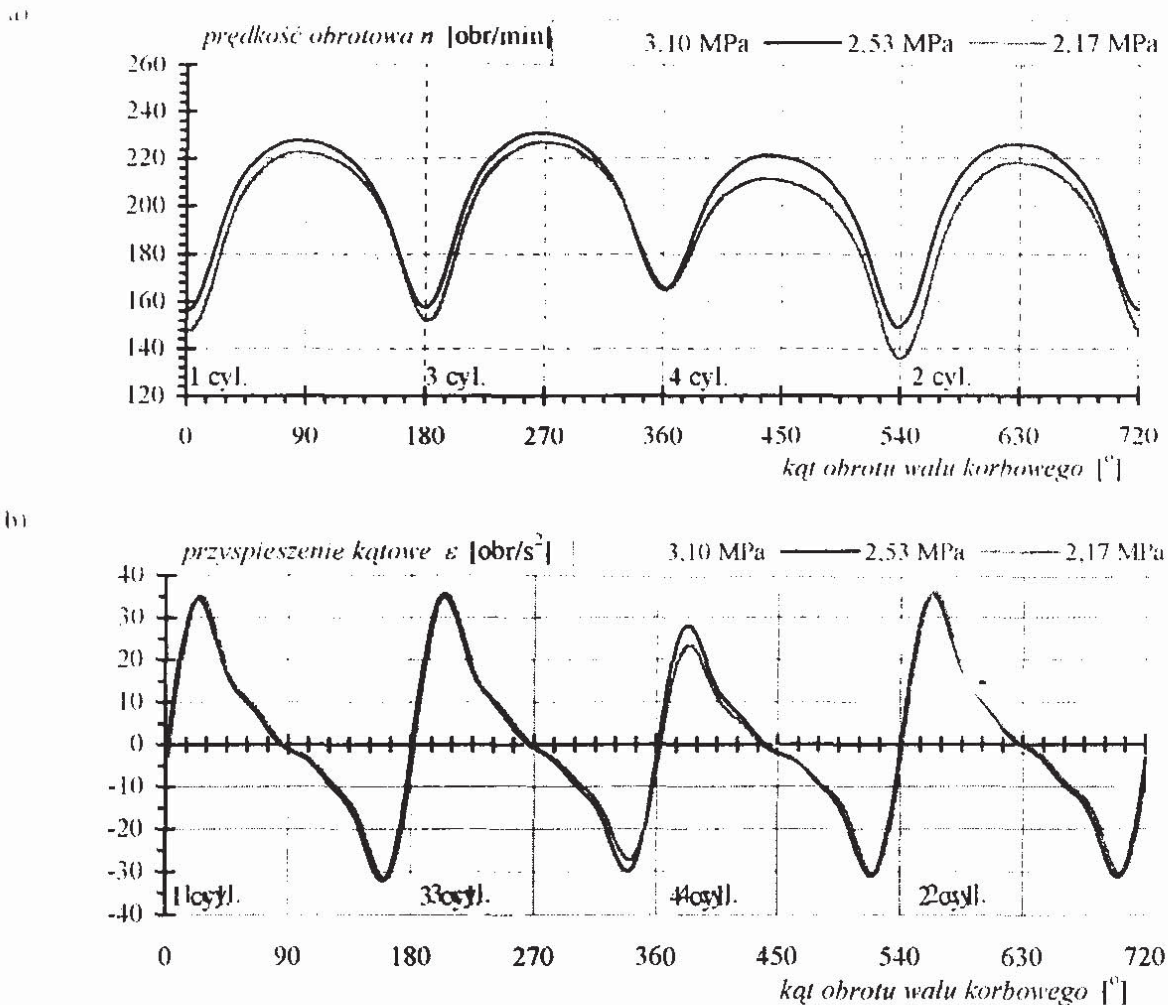
W początkowym etapie badań określono wpływ stanu cieplnego silnika oraz stanu technicznego akumulatora, a ściślej stopnia jego rozładowania (naładowania) na przebieg prędkości obrotowej wału korbowego dla stosowanej metodyki wykonywania pomiarów (obraca- nie wałem korbowym za pomocą rozrusznika bez podania paliwa).

Stan cieplny silnika określano poprzez temperaturę cieczy chłodzącej (t_{cc}) i oleju silni- kowego (t_{ol}), przy zastosowaniu do badań w tym etapie akumulatora w pełni naładowanego. Wykonane badania wykazały, że dla akumulatora w pełni naładowanego wzrost temperatury oleju i cieczy chłodzącej powodował wzrost średniej (quasiustalonej) wartości prędkości obrotowej silnika, przy podobnym charakterze (amplitudzie zmian) przebiegu wartości chwi- lowej prędkości dla tego samego położenia wału korbowego. Poza przypadkiem napędzania wału korbowego silnika „zimnego” (t_{ol} i t_{cc} równe w przybliżeniu temperaturze otoczenia)

uzyskiwano zbliżone przebiegi chwilowej prędkości obrotowej. Stwierdzono również niewielki wzrost amplitudy przyspieszenia kąтового wraz ze wzrostem stanu cieplnego silnika.

W dalszej kolejności badania prowadzono dla silnika rozgrzanego (t_{cc} i t_{ot} wyższe niż $70\text{ }^{\circ}\text{C}$) przy zastosowaniu akumulatora o różnym stopniu rozładowania (naładowania), uzyskiwanym poprzez kontrolowane rozładowanie akumulatora w pełni naładowanego. Wraz ze spadkiem rzeczywistej (bieżącej) pojemności akumulatora (wzrostem stopnia jego rozładowania) następował spadek wartości chwilowej prędkości obrotowej dla tego samego położenia wału korbowego. Dla przebiegów przyspieszenia kąтового zaobserwowano wraz ze spadkiem stopnia naładowania akumulatora niewielki spadek amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia kąтового, przy zachowaniu podobnego charakteru jego przebiegu.

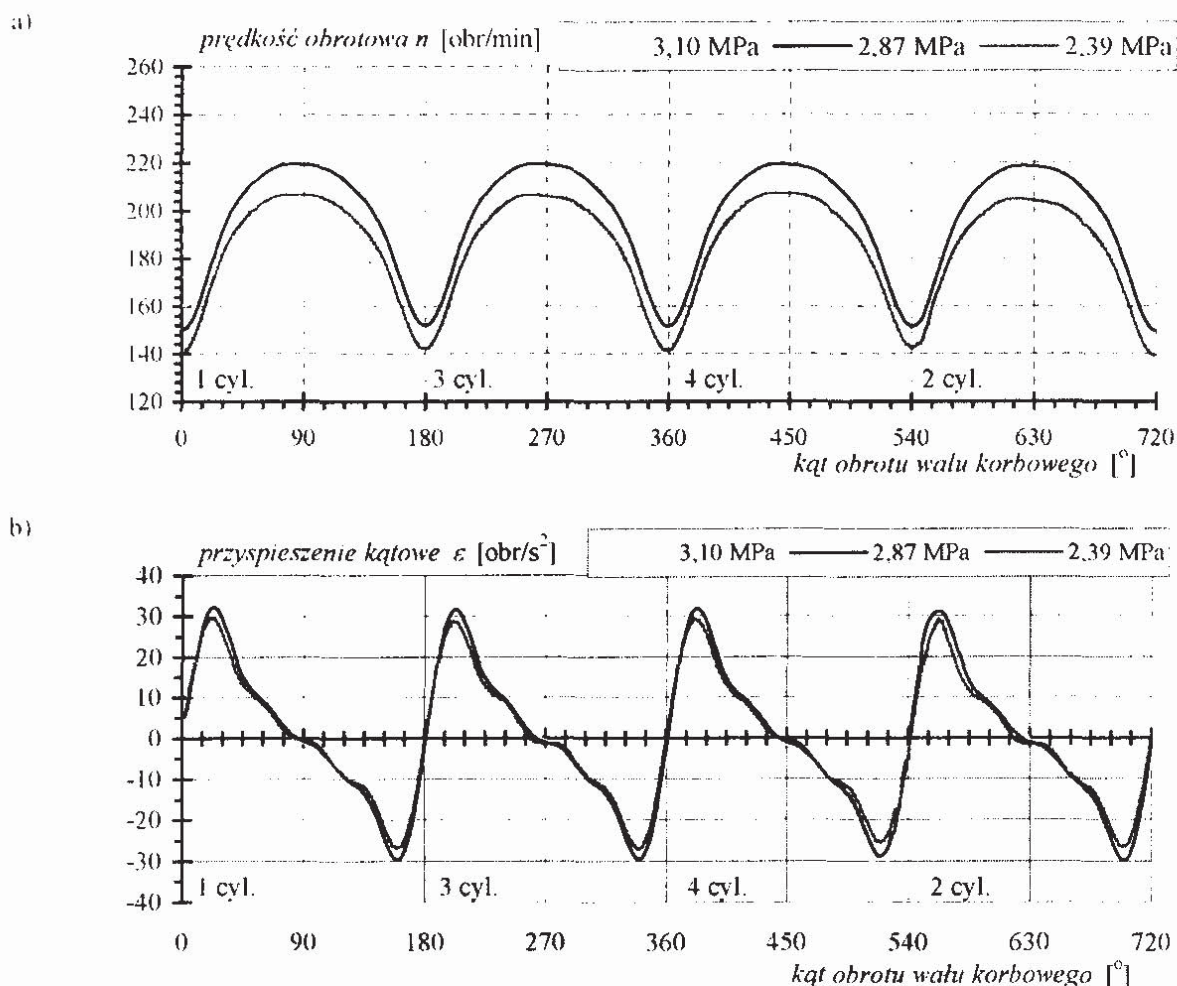
W zasadniczym etapie badań pomiary wykonano dla modelowanej zmiany szczelności w wybranym (czwartym) cylindrze. Zmiany szczelności cylindra dokonywano poprzez umieszczenie w miejsce wymontowanego wtryskiwacza (po rozgrzaniu silnika) „wtryskiwacza” umożliwiającego swobodny wypływ części ładunku (powietrza) na zewnątrz silnika poprzez otwór wykonany w „rozpylaczu”. Wielkość przekroju kanału wpływała na zmianę ilości ładunku wydostającego się „nieszczelnościami przestrzeni nadłokowej”, powodując zmianę ciśnienia sprężania. Badania wykonywano dla silnika rozgrzanego ($t_{ot} > 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{cc} > 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) oraz w pełni naładowanego akumulatora. Wybrane wyniki badań pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Przebiegi chwilowej prędkości obrotowej [a] oraz przyspieszenia kąowego [b] dla modelowanych zmian szczelności w 4-tym cylindrze (wartość liczbową oznacza wartość ciśnienia sprężania w 4-tym cylindrze)
 Fig. 4. Courses of momentary rotational speed [a] and angular acceleration [b] for simulated tightness changes in fourth cylinder (numerical data means the value of compression pressure in four cylinder)

Uzyskane wyniki pomiarów wykazały, że przyrost chwilowej prędkości obrotowej wynikający ze wspomagania pracy rozrusznika przez sprężone powietrze jest zależny od wartości ciśnienia sprężania (szczelności cylindra). Im większy spadek szczelności w czwartym cylindrze, tym mniejszy przyrost prędkości obrotowej Δn_i „dla tego cylindra”. Wyniki pomiarów wykazały również, że lepszym parametrem (do oceny szczelności cylindra) jest przyspieszenie kątowe. Im niższa wartość ciśnienia sprężania w czwartym cylindrze tym mniejsza wartość amplitudy przyspieszenia, przy porównywalnej wartości amplitudy przyspieszenia (także ciśnienia sprężania) dla pozostałych cylindrów, dla których nie dokonywano zmiany szczelności.

W dalszym etapie badań określono wpływ w przybliżeniu jednakowego spadku szczelności wszystkich cylindrów silnika AD 4.236 na przebieg chwilowej prędkości obrotowej. Warunki i metodyka pomiarów były takie same jak w poprzednim etapie badań. Otrzymane wyniki pomiarów wskazują wyraźnie na zależność amplitudy przyspieszenia kąowego (także prędkości obrotowej) od szczelności cylindrów (wartości ciśnienia sprężania w cylindrach). Im niższa wartość ciśnienia sprężania, tym mniejsza wartość amplitudy przyspieszenia kąowego (rys. 5). Przy czym wartości ciśnienia sprężania i amplitudy przyspieszenia kąowego uzyskane dla poszczególnych cylindrów (o tej samej szczelności) są do siebie zbliżone.

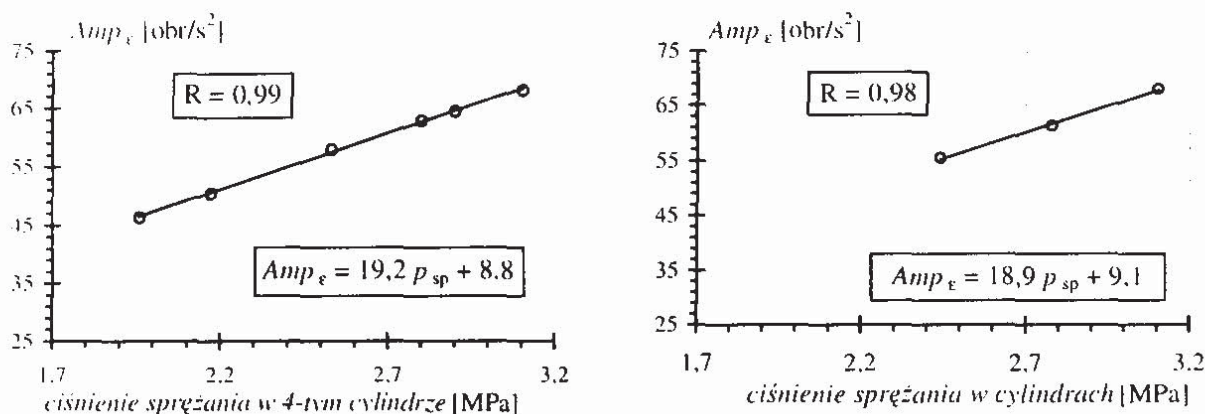


Rys. 5. Przebiegi prędkości obrotowej [a] oraz przyspieszenia kąowego [b] silnika AD 4.236 uzyskane dla tej samej szczelności we wszystkich cylindrach (wartość liczbową oznacza średnią wartość ciśnienia sprężania dla wszystkich cylindrów)

Fig. 5. Courses of rotational speed [a] and angular acceleration [b] of AD 4.236 diesel engine obtained for identical tightness in all cylinders (numerical data means the average value of compression pressure in all cylinders)

4. Analiza możliwości wykorzystania pomiarów chwilowej prędkości obrotowej do oceny szczelności cylindrów

Analiza otrzymanych przebiegów wykazała, że z dwóch rozpatrywanych parametrów (Δn_i i $Amp_{\epsilon i}$) lepszym do oceny szczelności cylindrów jest wartość amplitudy międzyszczytowej. Stąd wyniki pomiarów przedstawione na wykresach 4 i 5 aproksymowano (oddzielnie dla każdego przypadku) liniowym równaniem regresji, uzyskując zależność pomiędzy wartością amplitudy przyspieszenia Amp_{ϵ} , a wartością maksymalną ciśnienia sprężania p_{sp} (rys. 6). Dla obu rozpatrywanych przypadków uzyskano bardzo wysoką wartość współczynnika korelacji R , a uzyskane współczynniki równania regresji w obu przypadkach były zbliżone.



Rys. 6. Zależność amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia od ciśnienia sprężania: [a] w czwartym cylindrze silnika AD 4.236 (rozszczelniony czwarty cylinder), [b] we wszystkich cylindrach (rozszczelnione wszystkie cylindry)
 Fig. 6. Dependence of minimum-maximum amplitude of acceleration on compression pressure: [a] in the fourth cylinder of AD 4.236 diesel engine (the four cylinder untightened), [b] in all cylinders (all cylinders untightened)

Wykonane dla silnika AD 4.236 badania eksperymentalne wykazały zależność wartości amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia od wartości ciśnienia sprężania (szczelności). Opierając się o uzyskane wyniki badań wyznaczono zależność postaci:

$$p_{sp} = 0,0535 Amp_{\epsilon} - 0,5318 \quad (1)$$

z której wyznaczono wartość ciśnienia sprężania p_{sp} i porównano ją z wartością ciśnienia sprężania otrzymaną w wyniku pomiaru czujnikiem piezoelektrycznym. Maksymalna różnica między wyznaczonymi różnymi metodami {z pomiaru i z zależności (1)} wartościami ciśnienia sprężania nie przekracza $\pm 0,04$ MPa, to jest -1,4 % i +1,63 % wartości zmierzonej.

W toku dalszych badań powtórzono kilkakrotnie pomiary dla silnika ze wszystkimi szczelnymi cylindrami oraz wykonano pomiary dla tej samej nieszczelności modelowanej kolejno w poszczególnych cylindrach. Określono w ten sposób powtarzalność pomiarów (uzyskiwanych wyników) dla tego samego stanu technicznego silnika i warunków wykonywania pomiarów oraz sprawdzono, czy ta sama w przybliżeniu nieszczelność w pojedynczym cylindrze powoduje jednakową zmianę przebiegu prędkości obrotowej (przyspieszenia) wału korbowego, a tym samym podobną (dla poszczególnych cylindrów) zmianę wartości rozpatrywanego parametru (Amp_{ϵ}).

W pierwszym wypadku (wszystkie cylindry „szczelne”) uzyskano (dla czterech powtórzeń) praktycznie te same wartości średnie ciśnienia sprężania oraz zbliżone wartości średnie amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia, które cechowały się nieco mniejszą powtarzalnością większym (większym rozrzutem) w porównaniu do wartości ciśnienia sprężania.

W wypadku pomiarów przyspieszenia kąowego rejestrowanych dla tej samej, modelowanej kolejno w różnych cylindrach „nieszczelności” cylindra najmniejsze wartości amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia uzyskano dla cylindra o obniżonej szczelności. Przy czym stwierdzono dość duże różnice w wartościach tych parametrów między poszczególnymi pomiarami. Wynikają one prawdopodobnie z niejednakowego stanu technicznego poszczególnych cylindrów (różnej szczelności) oraz różnic w przebiegu napełniania cylindrów i sprężania ładunku (powietrza).

5. Wnioski

1. Wykonane badania eksperymentalne wykazały istnienie liniowej zależności pomiędzy wartością ciśnienia sprężania w danym cylindrze, a wartością amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia dla tego cylindra. Potwierdzają to zbliżone wartości współczynników równań regresji wyznaczone dla różnych modelowanych przypadków spadku ciśnienia sprężania (w pojedynczym i we wszystkich cylindrach).
2. Wyniki badań wskazują na możliwość wykorzystania prezentowanej metody pomiarowej do oceny szczelności cylindrów (wyznaczania ciśnienia sprężania). Zaletą zaproponowanej metody diagnostycznej jest duża dokładność oraz prostota jej realizacji. Nie wymaga ona w porównaniu z metodami stosowanymi do tej pory częściowego demontażu silnika, jest stosunkowo mało wrażliwa na zmianę warunków wykonywania pomiarów (stan cieplny silnika, stopień naładowania akumulatora), a przede wszystkim opiera się na wykorzystaniu sygnału pomiarowego ze stosowanych powszechnie we współczesnych silnikach czujników prędkości obrotowej. Stąd też kosztem niewielkich zmian w oprogramowaniu sterownika można byłoby ją zastosować w systemach diagnostyki pokładowej OBD II/E OBD, lub w diagnostykach stacjonarnych, mających możliwość współpracy z hallotronowym lub reluktancyjnym czujnikiem o odpowiednio dużej rozdzielczości kąowej sygnału pomiarowego chwilowej prędkości obrotowej.
3. Należy kontynuować rozpoczęte prace. W szczególności należy zbadać możliwość wykorzystania proponowanej metody pomiarowej dla bardziej złożonych przypadków zmiany szczelności niż modelowane podczas badań oraz potwierdzić jej uniwersalność (możliwość zastosowania) dla innych silników.

Literatura

- [1] Jakubczak M.: *Ocena stanu sprawności technicznej silnika o zapłonie samoczynnym na podstawie analizy drgań skrętnych wału korbowego*. Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1997.
- [2] Merkisz J., Tomaszewski F., Ignatow O.: *Trwałość i diagnostyka węzła tłokowego silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1995.
- [3] Niewczas A.: *Trwałość zespołu tłok - pierścienie tłokowe - cylinder silnika spalinowego*. WNT, Warszawa 1998.
- [4] Olchowik W.: *Metrologiczne aspekty diagnozowania silników o ZS na podstawie wartości chwilowego momentu obrotowego*. Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1999.
- [5] Olchowik W., Pięta A., Trawiński G.: *Określenie dokładności pomiaru przyspieszenia kąowego silników spalinowych*. V Krajowa Konferencja „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów DIAG'2003”, Ustroń 2003.