

Grzegorz TRAWIŃSKI¹

**ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA POMIARÓW
CHWILOWEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ WAŁU KORBOWEGO DO OCENY
SZCZELNOŚCI PRZESTRZENI NADŁOKOWEJ SILNIKA**

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

**THE ANALYSIS OF UTILIZING POSSIBILITY OF CRANKSHAFT
MOMENTARY ROTATIONAL SPEED MEASUREMENT
FOR ESTIMATING OF CYLINDER TIGHTNESS**

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 diagnostic method for compression pressure in cylinder evaluating.

1. WSTĘP

Podczas eksploatacji tłokowego silnika spalinowego zachodzą w nim procesy zużycia elementów tworzących przestrzeń roboczą. W efekcie następuje spadek szczelności przestrzeni nadłokowej, co powoduje między innymi zmianę napełnienia cylindrów, obniżenie ciśnienia sprężania i wzrost zużycia oleju silnikowego. Prowadzi to do pogorszenia głównych parametrów i wskaźników pracy silnika – spadku jego mocy (momentu obrotowego), wzrostu zużycia paliwa oraz zwiększenia emisji szkodliwych składników spalin. Stąd powszechnie uważa się, że szczelność przestrzeni nadłokowej determinuje trwałość silnika (okres do osiągnięcia granicznej wartości zużycia - ciśnienia sprężania), która dla współczesnych silników samochodów osobowych wynosi 250÷400 tys. km, a dla samochodów ciężarowych nawet do 1 mln km [2, 3].

Wyróżnia się kilkanaście metod oceny szczelności przestrzeni nadłokowej. Wszystkie są metodami pośrednimi, to znaczy dostarczają informacji o wartości mierzonego parametru diagnostycznego, który zależy od stopnia szczelności. Stosowane powszechnie klasycz-

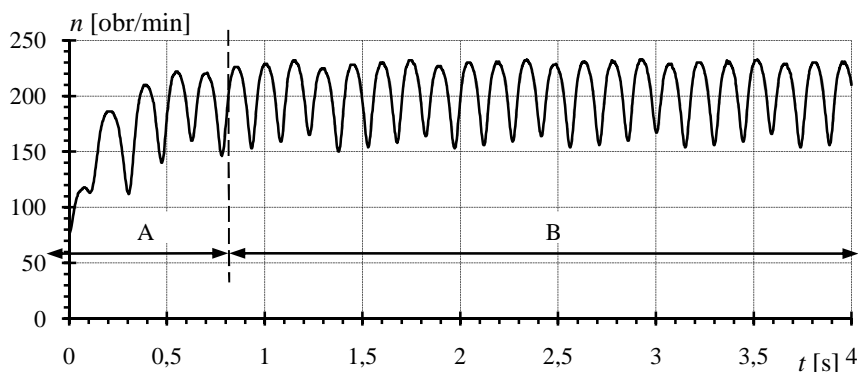
¹ Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, 00-908 Warszawa, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, tel./fax. (+48) 22-6837046, gtrawinski@wat.edu.pl

ne metody oceny szczelności przestrzeni nadłokowej (pomiar ciśnienia sprężania za pomocą manometrów czy pomiar względnego ubytku sprężonego powietrza) charakteryzują się dużą pracochłonnością oraz stosunkowo małą dokładnością (około 5%). Ich wadą jest również mała powtarzalność wyników pomiarów, zależnych od stanu cieplnego silnika oraz stanu technicznego akumulatora i rozrusznika.

Z kolei metody nowocześniejsze, oparte o pomiar przebiegu natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania za jego pomocą wałem korbowym silnika przy odciętym dopływie paliwa dostarczają przede wszystkim informacji o względnej szczelności poszczególnych cylindrów. W metodzie tej 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 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].

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 silnika napędzanym od wału. 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.

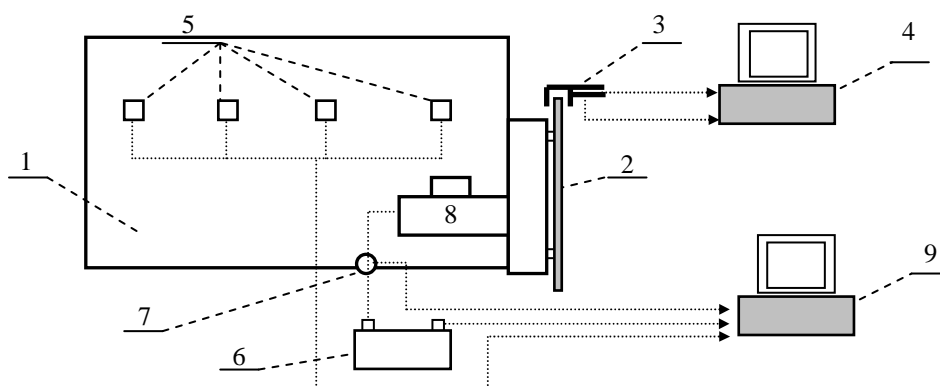


Rys. 1. Przykładowy przebieg chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego czterocylindrowego silnika AD 4.236 podczas jego napędzania za pomocą rozrusznika bez podania paliwa

Przebieg pokazany na rys. 1 jest zbliżony w swej postaci do sinusoidy. W okresie, kiedy tłok w cylindrze znajdującym się w swicie sprężania wykonuje ruch do góry (sprężanie ładunku), chwilowa prędkość obrotowa wału korbowego maleje. Osiąga ona wartość minimalną w momencie osiągnięcia przez tłok w tym cylindrze górnego martwego położenia. Następnie, wskutek wspomaganie pracy rozrusznika przez sprężony ładunek, chwilowa prędkość obrotowa wału korbowego rośnie do momentu, w którym nastąpi wzrost oporów sprężania w kolejno pracującym cylindrze.

2. STANOWISKO I METODYKA BADAŃ

Badania eksperymentalne, mające wykazać, czy możliwe jest wykorzystanie pomiaru chwilowej prędkości obrotowej do oceny szczelności przestrzeni nadłokowej cylindrów wykonano na stanowisku badawczym silnika AD 4.236 (rys. 2).



Rys. 2. 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

Badania polegały 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 chwilowej prędkości obrotowej z krokiem co 2° obrotu wału korbowego. Błąd względny pomiaru prędkości był mniejszy niż 0,1 %, natomiast błąd pomiaru przyspieszenia kątowego mniejszy niż 1 % [4, 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 wykorzystaniem znacznika identyfikacji cylindra. 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 filtru 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).

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

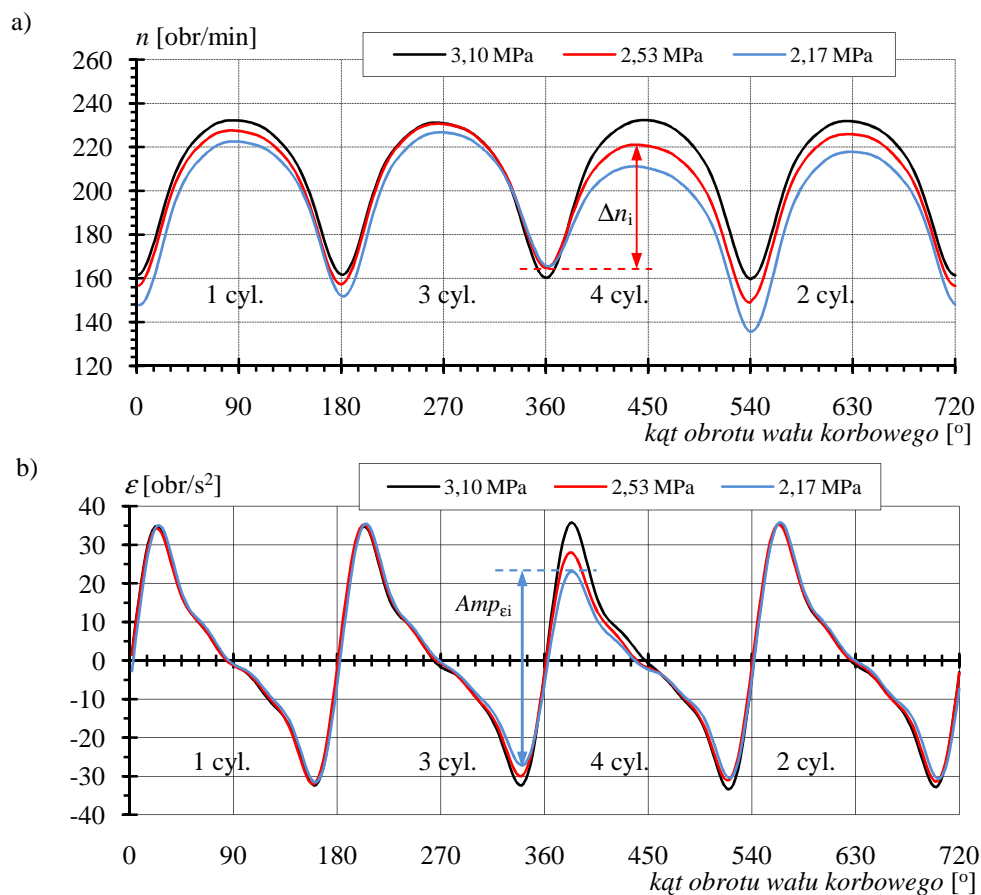
W początkowym etapie badań określono wpływ stanu cieplnego silnika, charakteryzowanego poprzez temperaturę cieczy chłodzącej (T_{cc}) i oleju silnikowego (T_{ol}) oraz stanu naładowania (rozładowania) akumulatora na przebieg prędkości obrotowej wału korbowego silnika dla stosowanej metodyki wykonywania pomiarów (obracanie wałem korbowym za pomocą rozrusznika bez podania paliwa).

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 chwilowej prędkości dla tego samego położenia wału korbowego. Przy czym uzyskiwane dla różnych temperatur cieczy chłodzącej i oleju silnikowego (oprócz przebiegu uzyskanego dla silnika „zimnego” o temperaturze cieczy chłodzącej i oleju zbliżonej do temperatury powietrza atmosferycznego) były zbliżone. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem ze wzrostem stanu cieplnego silnika następował nieznaczny wzrost amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia kąowego wału korbowego silnika.

W dalszej kolejności dla silnika rozgrzanego (T_{cc} i $T_{ol} > 70^{\circ}\text{C}$) określono wpływ stopnia rozładowania akumulatora na przebieg chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego. Odpowiedni stan naładowania akumulatora uzyskiwano poprzez kontrolowane rozładowanie akumulatora w pełni naładowanego. Stwierdzono, że wraz ze spadkiem rzeczywistej (bieżącej) pojemności akumulatora (wzrostem stopnia jego rozładowania) następował spadek wartości chwilowej prędkości obrotowej dla tego samego położenia kąowego wału korbowego. Dla przebiegów przyspieszenia kąowego zaobserwowano wraz ze spadkiem stopnia naładowania akumulatora niewielki spadek amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia kąowego, przy zachowaniu podobnego charakteru jego przebiegu.

Zasadniczy etap badań obejmował pomiary wykonywane dla silnika rozgrzanego, w pełni naładowanego akumulatora oraz dla różnych modelowanych zmian szczelności wybranego cylindra (czwartego) lub tej samej zmiany szczelności dokonywanej we wszystkich cylindrach. 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.

Wybrane wyniki dla etapu badań obejmującego zmianę szczelności w pojedynczym cylindrze pokazano na rys. 3.

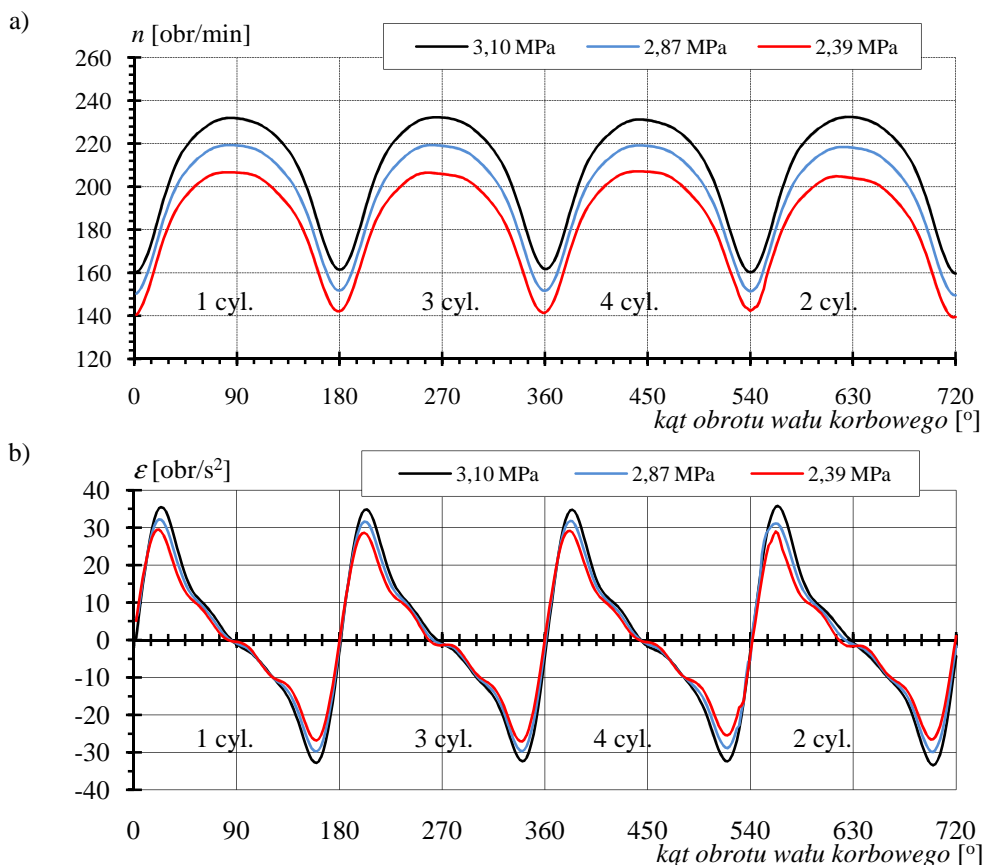


Rys. 4. Przebiegi chwilowej prędkości obrotowej n {a} oraz przyspieszenia kąowego ϵ {b} dla modelowanych zmian szczelności w 4-tym cylindrze (wartość liczbową oznacza wartość ciśnienia sprężania w 4-tym cylindrze)

Stwierdzono, 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 kąowe. Im niższa wartość ciśnienia sprężania w czwartym cylindrze tym mniejsza wartość amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia Amp_{ϵ_i} , przy porównywalnej wartości amplitudy międzyszczytowej 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.

Zaobserwowano, że amplituda międzyszczytowa przyspieszenia kąowego (także przyrost prędkości obrotowej) zależy od szczelności (wartości ciśnienia sprężania) w cylindrach. Im niższa wartość ciśnienia sprężania, tym mniejsza wartość amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia kąowego (rys. 4). Przy czym wartości ciśnienia sprężania i amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia kąowego, uzyskane dla poszczególnych cylindrów (o tej samej szczelności), były do siebie zbliżone.

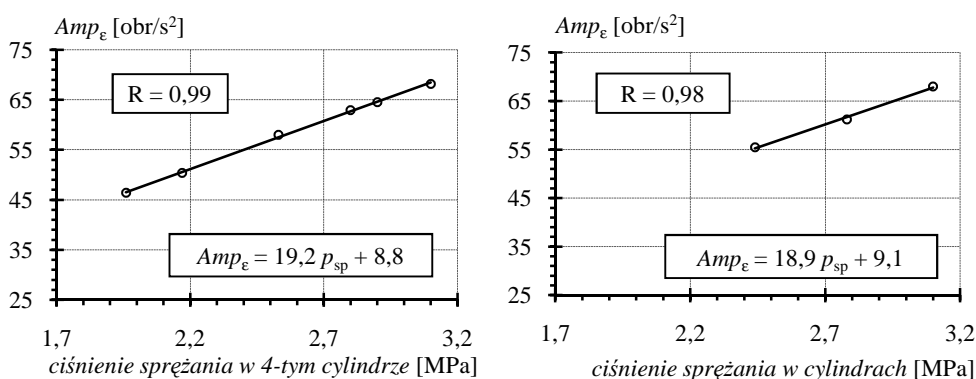


Rys. 4. Przebiegi prędkości obrotowej n {a} oraz przyspieszenia kąowego ε {b} silnika AD 4.236 uzyskane dla tej samej szczelności we wszystkich cylindrach (wartość liczbową oznacza średnią wartość ciśnienia sprężania dla wszystkich cylindrów)

4. ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA POMIARÓW CHWILOWEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ DO OCENY SZCZELNOŚCI CYLINDRÓW

Analiza otrzymanych przebiegów wykazała, że z dwóch rozpatrywanych parametrów (Δn_i i $Amp_{\varepsilon i}$) lepszym do oceny szczelności cylindrów jest wartość amplitudy

międzyszczytowej. Stąd wyniki pomiarów przedstawione na wykresach 3 i 4 aproksymowano (oddzielnie dla każdego przypadku) liniowym równaniem regresji, uzyskując zależność pomiędzy wartością amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia Amp_{ϵ} , a wartością maksymalną ciśnienia sprężania p_{sp} (rys. 5). Dla obu rozpatrywanych przypadków uzyskano bardzo wysoką wartość współczynnika korelacji R , a uzyskane współczynniki równania regresji w obu przypadkach były zbliżone.



Rys. 5. 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)

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 [5]:

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

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 $+1,6\%$ 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 „uszczelne”) 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 (dla silnika AD 4.236) istnienie liniowej zależności pomiędzy wartością ciśnienia sprężania w danym cylindrze, a wartością amplitudy międzyszczytowej przyspieszenia dla tego cylindra.
2. Wyniki badań wskazują na możliwość wykorzystania prezentowanej metody pomiarowej do oceny szczelności cylindrów silnika AD 4.236 (wyznaczania ciśnienia sprężania). Zaletą zaproponowanej metody diagnostycznej jest duża dokładność oraz względna prostota jej realizacji.
3. Wykorzystanie układu pomiarowego prędkości obrotowej o dostatecznie dużej rozdzielczości pomiaru chwilowej prędkości obrotowej zamontowanego na silniku umożliwi zastosowanie tej metody w systemach diagnostyki pokładowej standardu OBDII/EOBD lub w diagnostykach stacjonarnych, mających możliwość współpracy ze sterownikiem silnika (pokładowym układem pomiaru chwilowej prędkości obrotowej).

6. BIBLIOGRAFIA

- [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., Pięta A., Trawiński G.: *Określenie dokładności pomiaru przyspieszenia kąowego silników spalinowych*. V Krajowa Konferencja „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów DIAG'2003”, Ustroń 2003.
- [5] Trawiński G.: *Analiza możliwości wykorzystania pomiarów chwilowej prędkości Obrotowej i przyspieszenia wału korbowego do oceny stanu technicznego silnika o zapłonie samoczynnym*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 2004.