

WSKAŹNIKI INDYKOWANE SILNIKA PERKINS 1104D-E44TA ZASILANEGO DWUPALIOWO OLEJEM NAPĘDOWYM I GAZEM ZIEMNYM

Celem artykułu jest analiza i ocena wpływu zasilania dwupaliwowego olejem napędowym i gazem ziemnym na wskaźniki indykowane silnika o zapłonie samoczynnym Perkins 1104D-E44TA. Analizie poddano rzeczywiste wykresy indykatorowe sporządzone przy pracy silnika wg zewnętrznej charakterystyki prędkościowej w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego silnika od 1000 do 2400 obr/min. Na podstawie uśrednionych przebiegów ciśnienia w cylindrze sporządzano otwarte wykresy indykatorowe, które następnie poddawano analizie. Wyznaczano wskaźniki pracy badanego silnika jak: średnie ciśnienie indykowane p_i , średnie ciśnienie efektywne p_e , moc indykowaną N_i , moment indykowany M_i , sprawność indykowaną η_i , sprawność mechaniczną η_m , oraz jednostkowe indykowane zużycie paliwa g_i .

WSTĘP

Paliwami konwencjonalnymi stosowanymi do zasilania tłokowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym są oleje napędowe otrzymywane z ropy naftowej. Wzrost zapotrzebowania na energię, wynikający między innymi z intensywnie wzrastającej liczby eksploatowanych pojazdów samochodowych, kurczenie się zasobów ropy naftowej oraz w wielu krajach brak lub ograniczony dostęp do jej zasobów, powoduje konieczność poszukiwania nowych paliw alternatywnych. W ostatnich latach obserwuje się zainteresowanie alternatywnymi paliwami silnikowymi – głównie gazowymi [5, 6, 7, 10, 12]. Przewiduje się, że w najbliższej przyszłości będzie wzrastało zainteresowanie gazem ziemnym, jako paliwem do zasilania tłokowych silników spalinowych. Gaz ziemny ze względu na dużą odporność na spalanie detonacyjne, można łatwo zastosować do zasilania silników o zapłonie wymuszonym. W tym celu w silnikach o zapłonie iskrowym stosuje się odpowiedni układ zasilania, który umożliwi doprowadzenie do cylindrów silnika zamiennie gazu ziemnego lub benzyny. W przypadku silników o zapłonie samoczynnym są dwa sposoby ich przystosowania do zasilania silnika tym paliwem. Pierwszy z nich polega na zmniejszeniu stopienia sprężania i wprowadzeniu układu zapłonowego. Drugi sposób polega na przystosowaniu silnika do zasilania dwupaliwowego równocześnie gazem ziemnym i olejem napędowym. Przy drugim rozwiązaniu dawka oleju napędowego inicjuje proces spalania [2, 3, 8, 9, 11, 14, 14]. Dalszy rozwój tłokowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym dotyczący zmniejszenia toksyczności spalin, jaki i poprawy parametrów ekonomicznych i eksploatacyjnych związany jest z dążeniem do obniżenia ich strat mechanicznych i osiągnięciem sprawności ogólnej zbliżonej do 50%. Cele te są ściśle związane z doskonaleniem procesów wewnątrzcyldrowych, a przede wszystkim procesu spalania. Przebieg procesu spalania oceniany jest za pomocą przebiegu ciśnienia w cylindrze, na podstawie którego sporządza się wykresy indykatorowe. Postać wykresu indykatorowego zależy przede wszystkim od: przebiegu i jakości rozpylenia paliwa podczas procesu wtrysku, ilości oraz parametrów stanu powietrza doprowadzonego do cylindra. Wielkości te decydują o jakości tworzonej i spalanej mieszanki palnej. Od właściwie realizowanego procesu spalania zależy, jakość przemiany energii chemicznej zawartej w paliwie na energię mechaniczną. Od jakości

tego procesu zależy zużycie paliwa oraz emisja szkodliwych składników ze spalinami i hałas silnika.

Przygotowanie do analizy eksperymentalnie zdjętego wykresu indykatorowego, musi zapewniać wygładzenie uśrednionych wartości ciśnień w cylindrze, według kolejnych realizacji cykli pracy oraz uwzględnić dokładne i wiarygodne określenie na wykresie indykatorowym położenia tłoka w GZP. Podstawowych informacji na temat własności silników jak i jakości zamiany energii chemicznej zawartej w paliwie na energię mechaniczną dostarczają wskaźniki ich pracy.

Wskaźniki tłokowych silników spalinowych są wielkościami liczbowymi charakteryzującymi ich pracę, służącymi do ich oceny i porównywania. Niektóre z nich są powszechnie wykorzystywane w przekazie informacji do szerokiego grona użytkowników pojazdów samochodowych [1, 4]. Najczęściej stosowanymi spośród nich są: moc, moment obrotowy i zużycie paliwa.

Wskaźniki charakteryzują silniki w różnych aspektach, przez co można je zaliczyć do różnych grup. Jedną z możliwych klasyfikacji wskaźników pracy tłokowych silników spalinowych jest ich podział na wskaźniki indykowane i wskaźniki efektywne. Wskaźniki indykowane wyznaczane są na podstawie wykresu indykatorowego, czyli przebiegu ciśnienia w cylindrze silnika wyznaczonego w funkcji zmiany objętości cylindra nad tłokiem lub w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Do podstawowych wskaźników indykowanych można zaliczyć: pracę indykowaną L_i , średnie ciśnienie indykowane p_i , moc indykowaną N_i , moment indykowany M_i , sprawność indykowaną η_i , oraz jednostkowe indykowane zużycie paliwa g_i .

Wskaźniki efektywne pracy silnika to wskaźniki charakteryzujące silnik z uwzględnieniem strat mechanicznych. Wskaźniki te mierzone są na wale korbowym silnika, z którego moc przekazywana jest do odbiornika. Do wskaźników tych zaliczamy między innymi moc efektywną, efektywny moment obrotowy, średnie ciśnienie efektywne, godzinowe i jednostkowe zużycie paliwa. Wskaźniki efektywne silnika wyznaczane są na hamowni silnikowej, na której za pomocą hamulca obciążany jest silnik i wyznaczany jest moment obrotowy. Wyznaczona wartość efektywnego momentu obrotowego, pozwala na obliczenie mocy efektywnej silnika. Zużycie paliwa w warunkach hamowni silnikowej wyznaczane jest za pomocą dawkomierza paliwa lub przepływomierza masowego. Wskaźniki pracy tłokowych silników spalinowych można również podzielić na: operacyjne, porównawcze i ekologiczne. Dodatkowo wśród wskaźników operacyjnych rozróżnia się wskaźniki energetyczne i ekono-

miczne. Wskaźniki operacyjne charakteryzują właściwości energetyczne i ekonomiczne silników, na które oddziaływać można poprzez sterowanie procesami zachodzącymi w cylindrze. Wskaźniki energetyczne określają rozdział ciepła doprowadzonego z paliwem do silnika na składowe wynikające z zasady jego pracy. Wskaźniki ekonomiczne oceniają efektywność wykorzystania doprowadzanego do cylindra ciepła i pozwalają na ekonomiczną ocenę eksploatacji silnika. Wskaźniki ekologiczne charakteryzują wpływ eksploatacji silnika na środowisko. Wskaźniki porównawcze to wielkości, które pozwalają porównywać silniki. Są one odniesione do określonych parametrów konstrukcyjnych silnika, przez co mogą stanowić podstawę do porównania silników należących do tej samej klasy. Wskaźniki pracy silnika wymienione w poszczególnych grupach są wzajemnie współzależne i wzajemnie się uzupełniają i nie można przypisać ich jednoznacznie tylko do jednej grupy [4].

1. ZAKRES I METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku hamownianym zbudowanym w Laboratorium Silników Ciepłych Politechniki Świętokrzyskiej. Zakres badań obejmował wyznaczenie zewnętrznej charakterystyki prędkościowej silnika Perkins 1104D-E44TA przy jego zasilaniu dwupaliwowym, gazem ziemnym i olejem napędowym i dla porównania tylko olejem napędowym. Silnik pracował w zakresie prędkości obrotowych od 1000 do 2200 obr/min. Pomiaru wykonano przy ustalonych warunkach pracy silnika z krokiem, co 200 obr/min wału korbowego. W czasie badań dokonywano pomiarów podstawowych parametrów pracy silnika takich jak: moc efektywna N_e , moment obrotowy M_o , godzinowe zużycie oleju napędowego oraz gazu ziemnego. Ponadto rejestrowano wielkości szybkozmiennie, takie jak: przebiegi ciśnienia w cylindrze i przebiegi prądu sterującego pracą wtryskiwacza w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika. Wybrane przebiegi ciśnienia przedstawiono i porównano na rysunkach. Na podstawie wykresów indykatorowych i parametrów pracy silnika wyznaczono podstawowe wskaźniki jego pracy takie jak: średnie ciśnienie indykowane p_i , średnie ciśnienie efektywne p_e , moc indykowaną N_i , moment indykowany M_i , sprawność indykowaną η_i , sprawność mechaniczną η_m , oraz jednostkowe indykowane zużycie paliwa. Wskaźniki te przedstawiono i porównano na wykresach.

2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań był czterocylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym PERKINS 1104D-E44TA wyposażony w układ zasilania Common Rail z bezpośrednim wtryskiem paliwa i wtryskiwaczami sterowanymi elektromagnetycznie. Silnik wyposażony jest w układ doładowania z turbosprężarką sterowaną zaworem upustowym połączonym z elektrozaworem sterowanym przez elektroniczną jednostkę sterującą pracą silnika. Jednostka ta na podstawie informacji z czujników opisujących warunki pracy silnika, między innymi jego obciążenie i prędkość obrotową wału korbowego, określa dawkę wtryskiwanego paliwa sterując wartością ciśnienia w zasobniku paliwa i czasem wtrysku oraz ciśnieniem doładowania. Dzięki temu spełnia on normę emisji spalin Tier 3 dla silników o zastosowaniach pozadrogowych [3, 13]. Podstawowe dane techniczne badanego silnika przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Podstawowe dane techniczne silnika o zapłonie samoczynnym Perkins 1104D-E44TA [13]

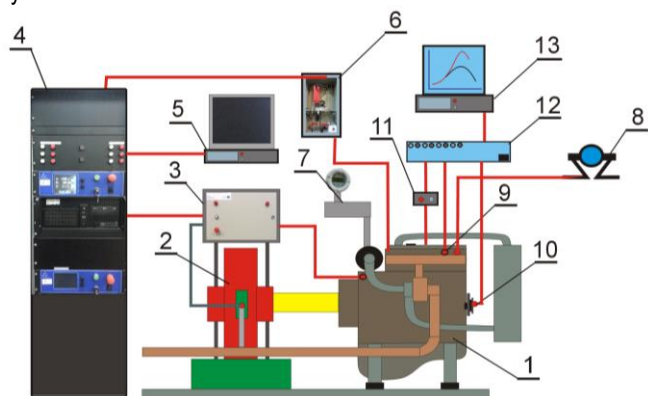
Parametr	Jednostka	Wartość
Układ cylindrów	-	rzędowy
Liczba cylindrów	-	4
Rodzaj wtrysku	-	bezpośredni
Typ układu zasilania	-	Common Rail
Maksymalna moc silnika	kW	96,5
Prędkość obrotowa mocy maksymalnej	obr/min	2200
Maksymalny moment obrotowy silnika	Nm	516,0
Prędkość obrotowa maksymalnego momentu	obr/min	1400
Pojemność skokowa silnika	m ³	4,4 · 10 ⁻³
Średnica cylindra	mm	105
Skok tłoka	mm	127
Stopień sprężania	-	16,2
Układ doprowadzenia powietrza	-	turbosprężarka, chłodnica powietrza doładowującego

Silnik dodatkowo wyposażony został w układ zasilania sprężonym gazem ziemnym CNG systemu OSCAR-N DIESEL. Może on być zasilany zamiennie olejem napędowym lub dwupaliwowo, równocześnie gazem ziemnym i olejem napędowym. Zastosowany system sterowania układem zasilania paliwa gazowego przeznaczony jest do współpracy z silnikami o zapłonie samoczynnym: wolnossącymi i doładowanymi. Umożliwia on konwersję konwencjonalnego układu zasilania silnika do zasilania dwupaliwowego paliwem gazowym i olejem napędowym, gdzie zadaniem dawki oleju napędowego jest zainicjowanie procesu spalania. Układ sterowania instalacji gazowej CNG przy dwupaliwowym zasilaniu silnika ON+CNG, zmniejsza dawkę oleju napędowego obniżając ciśnienie w szynie paliwowej Common Rail. W zamian do cylindra doprowadzany jest gaz ziemny CNG. Jednak ilość gazu doprowadzanego do cylindrów jest ograniczana ze względu na możliwość zachodzenia spalania detonacyjnego mogącego doprowadzić do uszkodzenia silnika. Jest to szczególnie ważne przy pracy badanego silnika według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy dużych obciążeniach i wysokich temperaturach w cylindrze silnika [3].

3. STANOWISKO BADAWCZE

Badania przeprowadzono na hamowni silnikowej, na której zainstalowany został tłokowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym firmy PERKINS 1104D-E44TA. W skład stanowiska wchodził hamulec elektrowirowy typu AMX – 200/6000 firmy ELEKTROMEX CENTRUM o mocy 200 kW. Stanowisko wyposażone zostało w komputer stacjonarny wraz z oprogramowaniem firmy Automex do sterowania, kontrolowania i zapisu wyników badań. Pomiar zużycia oleju napędowego realizowany był za pomocą masowego dawkomierza paliwa firmy Automex, natomiast pomiar zużycia gazu ziemnego za pomocą masowego przepływomierza Coriolisa firmy Emerson. Stanowisko wyposażone jest również w układ do pomiaru temperatur w podstawowych układach funkcjonalnych silnika. Układ ten, składa się z czujników termoelektrycznych i rezystancyjnych oraz przetworników temperatury. Stanowisko posiada pięć płaszczowych wymienników ciepła, które chłodzone są wodą w obiegu zamkniętym. Odprowadzają one ciepło z układu chłodzenia hamulca, układu chłodzenia silnika, układu olejenia, doładowania i układu zasilania. Ponadto stanowisko za pomocą pięciu przetworników ciśnienia firmy WIKA umożliwia pomiar ciśnienia powietrza w układzie dolotowym, cieczy chłodzącej w układzie chłodzenia, spalin w układzie wydechowym oraz ciśnienia oleju w głowicy silnika, a także ciśnienia w skrzyni korbowej [3]. Stanowisko wyposażone jest również w urządzenie Mexa-730 λ firma Horiba do pomiaru współ-

czynnika nadmiaru powietrza. Schemat blokowy stanowiska hamowanego z silnikiem PERKINS 1104D-E44TA przedstawiono na rysunku 1.



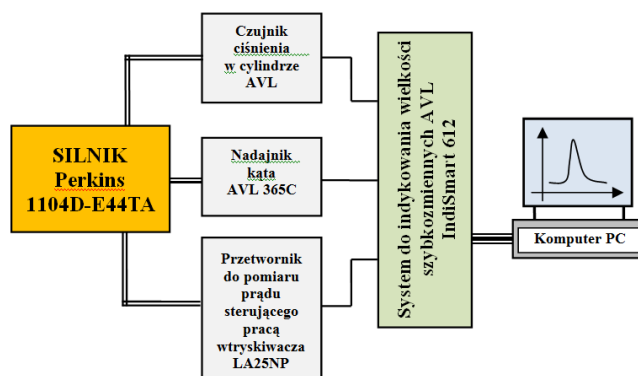
Rys. 1. Budowa stanowiska badawczego, gdzie: 1- silnik Perkins 1104D - E44TA, 2 – hamulec Automex AMX 200/6000, 3 – moduł pomiarowy, 4 – szafa pomiarowa z systemem starowania stanowiska, 5 – komputer do sterowania parametrami stanowiska i archiwizacji wyników badań, 6 – masowy dawkomierz paliwa Automex ATM2040, 7 – masowy przepływomierz powietrza ABB, 8 – przepływomierz Coriolisa do pomiaru zużycia gazu CNG, 9 – czujnik ciśnienia w cylindrze silnika, 10 – enkoder kąta obrotu wału korbowego silnika AVL 365C, 11 – przetwornik do pomiaru prądu sterującego pracą wtryskiwacza LA25NP, 12 – system do indykowania wielkości szybkozmiennych AVL IndiSmart 612, 13 – komputer do archiwizacji wielkości szybkozmiennych

Do pomiaru wielkości szybkozmiennych zastosowano system pomiarowy firmy AVL IndiSmart 612, który umożliwia wyznaczenie przebiegów zmiany ciśnienia czynnika roboczego w cylindrze. Zestaw do indykowania składa się z następujących elementów:

- głównego systemu akwizycji danych AVL IndiSmart 612,
- piezoelektrycznego czujnika ciśnienia w cylindrze silnika AVL GH13P/AG04,
- optycznego enkodera kąta obrotu wału korbowego silnika AVL 365C.

Do obsługi systemu wykorzystywano program AVL Indicom Mobile 2012 umożliwiający między innymi sporządzanie wykresów indykatorowych oraz charakterystyk wydzielania ciepła podczas procesu spalania. Stanowisko wyposażone było dodatkowo w układ do pomiaru natężenia prądu sterującego pracą wtryskiwacza. Układ ten był podłączony szeregowo do przewodu sterującego pracą wtryskiwacza tego cylindra, z którego rejestrowano ciśnienie w cylindrze. Umożliwia on rejestrację przebiegu prądu sterującego pracą wtryskiwacza. Przebiegi te zapisywane są w komputerze w funkcji kąta obrotu wału korbowego.

Zastosowany podczas badań system pomiarowy wielkości szybkozmiennych firmy AVL przedstawiono na rysunku 2. System ten składał się z trzech torów pomiarowych: toru pomiarowego ciśnienia w komorze spalania, toru pomiarowego przebiegu prądu sterującego pracą wtryskiwacza, toru optycznego enkodera kąta obrotu wału korbowego.

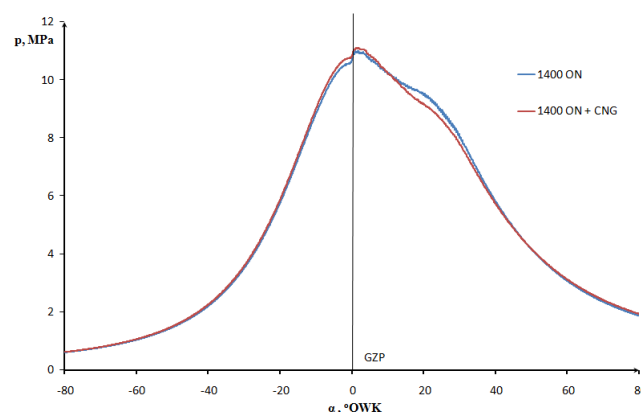


Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego parametrów szybkozmiennych tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym wykorzystany do przeprowadzenia badań

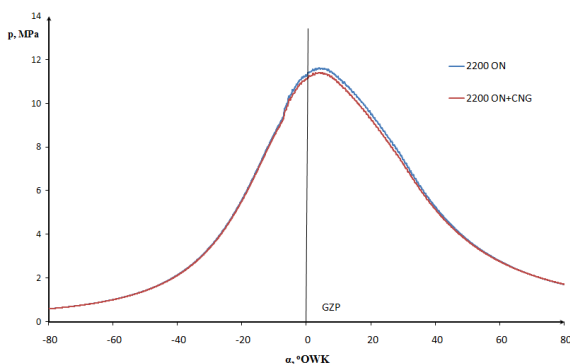
4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Podczas badań silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego na hamowni według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej i zasilanego dwupaliwowo ON+CNG oraz ON, zmierzono podstawowe wskaźniki operacyjne silnika. Rejestrowano przebiegi ciśnienia w cylindrze oraz przebiegi prądu sterującego pracą wtryskiwacza w funkcji kąta obrotu wału korbowego. W czasie badań rejestrowano 200 cykli pracy, które następnie uśredniano. Na podstawie uśrednionych przebiegów ciśnienia w cylindrze sporządzano otwarte wykresy indykatorowe. Sporządzono zamknięte wykresy indykatorowe na podstawie, których wyznaczono pracę indykowaną, która umożliwiła obliczenie podstawowych wskaźników indykowanych.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono porównanie przebiegów ciśnienia w cylindrze badanego silnika przy jego zasilaniu dwupaliwowym ON+CNG oraz zasilaniu tylko olejem napędowym ON i jego pracy według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej przy $n = 1400$ obr/min (rys. 3) oraz przy $n = 2200$ obr/min (rys. 4). Jak wynika z wykresów 3 i 4 przebiegi ciśnienia w cylindrze przy zasilaniu silnika ON+CNG oraz tylko olejem napędowym ON nie wykazują znaczących różnic.

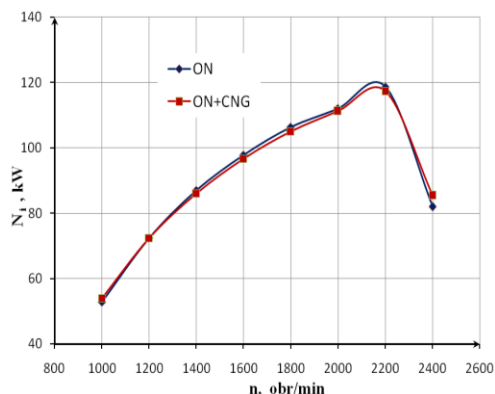


Rys. 3. Porównanie przebiegów ciśnienia p w cylindrze silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy $n = 1400$ obr/min i przy jego zasilaniu olejem napędowym ON oraz dwupaliwowo ON + CNG

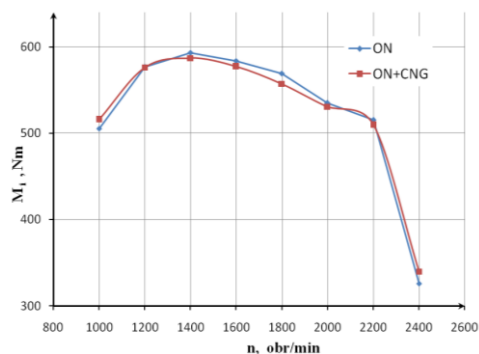


Rys. 4. Porównanie przebiegów ciśnienia p w cylindrze silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy $n = 2200$ obr/min i przy jego zasilaniu olejem napędowym ON oraz dwupaliwowo ON + CNG

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie mocy indykowanej, zaś na rysunku 6 momentu indykowanego badanego silnika przy jego zasilaniu olejem napędowym ON oraz dwupaliwowo ON+CNG i jego pracy według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej. Zasilając silnik dwupaliwowo ON+CNG uzyskano dla większości prędkości obrotowych wału korbowego silnika mniejsze o około 4% wartości mocy i momentu indykowanego w porównaniu do wartości uzyskanych zasilając silnik tylko olejem napędowym. Tylko dla prędkości obrotowych wału korbowego silnika $n = 1000$ i 2400 obr/min wartości mocy indykowanej N_i i indykowanego momentu obrotowego M_i są nieznacznie większe przy dwupaliwowym zasilaniu silnika ON+CNG.

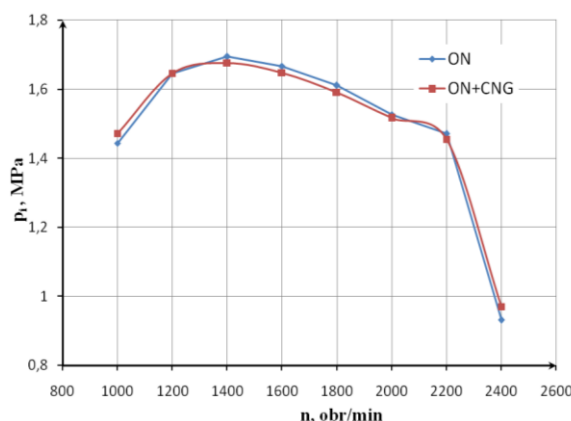


Rys. 5. Porównanie wartości mocy indykowanej N_i silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy jego zasilaniu olejem napędowym ON oraz dwupaliwowo ON + CNG

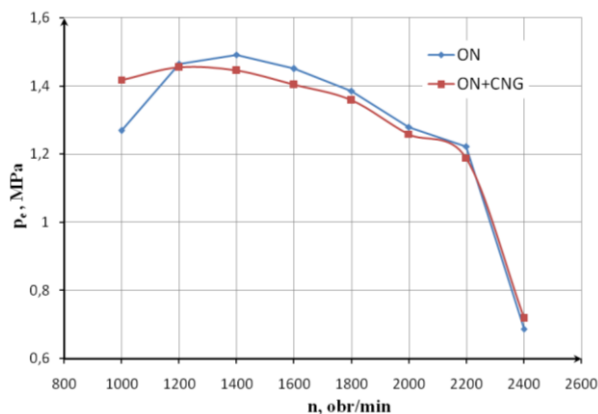


Rys. 6. Porównanie wartości momentu indykowanego M_i silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy jego zasilaniu olejem napędowym ON oraz dwupaliwowo ON + CNG

Na rysunku 7 przedstawiono porównanie średniego ciśnienia indykowanego, zaś na rysunku 8 średniego ciśnienia efektywnego badanego silnika przy jego zasilaniu olejem napędowym ON oraz dwupaliwowo ON+CNG i jego pracy według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej. Zasilając silnik dwupaliwowo ON+CNG uzyskano dla większości prędkości obrotowych wału korbowego silnika mniejsze o około 4% wartości średniego ciśnienia indykowanego oraz średniego ciśnienia efektywnego. Podobnie jak dla mocy i momentu indykowanego, dla prędkości obrotowych wału korbowego silnika $n = 1000$ i 2400 obr/min wartości średniego ciśnienia indykowanego p_i i średniego ciśnienia efektywnego p_e są nieznacznie większe przy dwupaliwowym zasilaniu silnika ON+CNG.

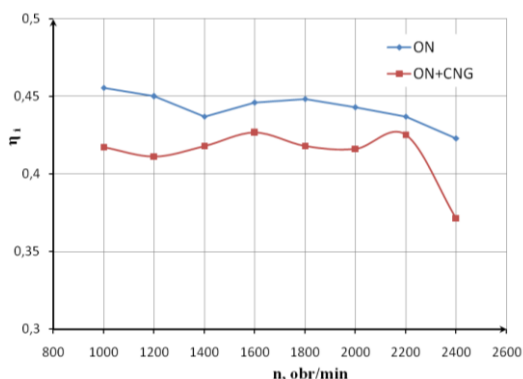


Rys. 7. Porównanie wartości średniego ciśnienia indykowanego p_i silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy jego zasilaniu olejem napędowym ON oraz dwupaliwowo ON + CNG

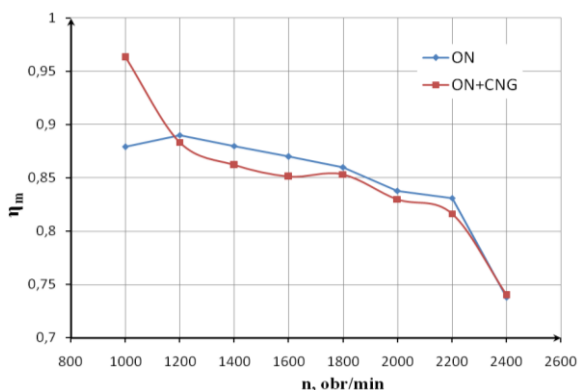


Rys. 8. Porównanie wartości średniego ciśnienia efektywnego p_e silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy jego zasilaniu ON oraz ON + CNG

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie sprawności indykowanej, natomiast na rysunku 10 sprawności mechanicznej silnika Perkins 1104-E44TA przy jego zasilaniu dwupaliwowym ON+CNG oraz tylko olejem napędowym ON. Zasilając silnik dwupaliwowo ON+CNG uzyskano mniejsze o około 7% wartości sprawności indykowanej. Dla większości prędkości obrotowych wału korbowego zasilając silnik dwupaliwowo uzyskano mniejsze o około 2% wartości sprawności mechanicznej. Tylko dla prędkości obrotowej wału korbowego silnika $n = 1000$ obr/min sprawność mechaniczna jest większa przy zasilaniu silnika dwupaliwowo.

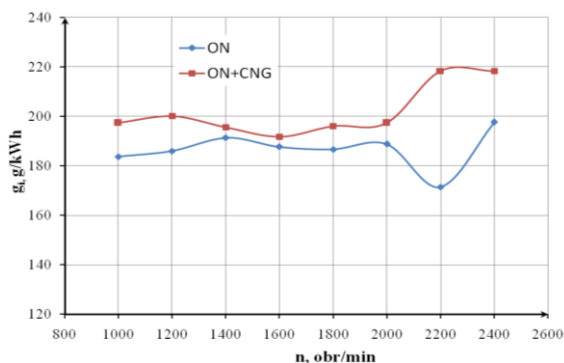


Rys. 9. Porównanie wartości sprawności indykowanej η_i silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej i przy jego zasilaniu olejem napędowym ON oraz dwupaliwowo ON + CNG



Rys. 10. Porównanie wartości sprawności mechanicznej η_m silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej i przy jego zasilaniu olejem napędowym ON oraz dwupaliwowo ON + CNG

Na rysunku 11 przedstawiono porównanie wartości jednostkowego indykowanego zużycia paliwa silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej i przy jego zasilaniu dwupaliwowo oraz tylko olejem napędowym. Zasilając silnik dwupaliwowo wzrosła wartość jednostkowego indykowanego zużycia paliwa g_i dwupaliwowo, od 2,6% do 17,6% w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego. Największy wzrost wartości jednostkowego indykowanego zużycia paliwa miał miejsce dla prędkości obrotowych wału korbowego wynoszących $n = 2200$ i 2400 obr/min, a najmniejszy dla prędkości obrotowych wału korbowego $n = 1400$ i 1600 obr/min.



Rys. 11. Porównanie wartości jednostkowego indykowanego zużycia paliwa g_i silnika Perkins 1104D-E44TA, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej i jego zasilaniu olejem napędowym ON oraz dwupaliwowo ON + CNG

PODSUMOWANIE

Podczas badań na hamowni silnik PERKINS 1104D-E44TA pracował według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej. Były to maksymalne wartości obciążeń tego silnika. W takich warunkach był on zasilany dwupaliwowo, czyli sprężonym gazem ziemnym i olejem napędowym, oraz dla porównania tylko olejem napędowym. Udział doprowadzanego gazu ziemnego ograniczony jest ze względu na niebezpieczeństwo uszkodzenia silnika przez występowanie spalania detonacyjnego. Zasilając silnik dwupaliwowo ON+CNG uzyskano dla większości prędkości obrotowych wału korbowego silnika mniejsze wartości mocy i momentu indykowanego, maksymalnie o około 4% w porównaniu do wartości uzyskanych zasilając silnik tylko olejem napędowym. Ponadto zasilając silnik dwupaliwowo uzyskano dla większości prędkości obrotowych wału korbowego silnika, mniejsze około 4% wartości średniego ciśnienia indykowanego oraz średniego ciśnienia efektywnego. Zasilając silnik dwupaliwowo uzyskano mniejsze o około 7% wartości sprawności indykowaną oraz mniejsze o około 2% wartości sprawności mechanicznej. Dwupaliwowe zasilanie silnika w porównaniu do zasilania silnika tylko olejem napędowym, spowodowało zwiększenie jednostkowego indykowanego zużycia paliwa g_i .

Podsumowując, wyznaczone parametry pracy silnika były mniej korzystne przy jego dwupaliwowym zasilaniu olejem napędowym i gazem ziemnym. Wyniki badań wskazują na konieczność doskonalenia procesu tworzenia mieszanki palnej przy jednoczesnym zasilaniu silnika gazem ziemnym i olejem napędowym. Można to zrealizować przez zmianę parametrów procesu wtrysku oleju napędowego, czyli skrócenie czasu otwarcia wtryskiwacza oraz zmianę kąta wyprzedzenia wtrysku dawki inicjującej spalanie gazu ziemnego. Ponadto można oddziaływać na wartość ciśnienia w listwie paliwowej.

BIBLIOGRAFIA

1. Ambrozik A.: Analiza cykli pracy czterosurowych silników spalinych, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2010.
2. Ambrozik A., Ambrozik T., Kurczyński D., Łagowski P.: Adaptacja silnika Perkins 1104D-E44TA z układem zasilania common rail do zasilania gazem ziemnym CNG. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 1(97)/2014, s. 61÷70.
3. Ambrozik A., Ambrozik T., Kurczyński D., Łagowski P.: Wskaźniki energetyczne silnika perkins 1104D-E44TA zasilanego dwupaliwowo olejem napędowym i gazem ziemnym. Autobusy 12/2016. s. 760÷767.
4. Ambrozik A., Ambrozik T., Kurczyński D., Łagowski P.: Ocena sprawności silnika ZS zasilanego biopaliwami. Autobusy 4/2012. s. 52÷61.
5. Monaghan M.L.: Future Gasoline and Diesel Engines. World Automotive Congress FISITA, F2002PA03, Seoul 2000.
6. Mazuruk P., Sikora M., Marcin K., Wojs, Orliński P.: Detection of damage to the power supply system of diesel engine under field conditions, Combustion Engines, Polskie Towarzystwo Naukowe Silników Spalinowych, vol. 168, nr 1, 2017
7. Kurczyński S. W., Ślęzak M., Gis W., Orliński P., 2016, Evaluation of the impact of combustion hydrogen addition on operating properties of self-ignition engine. Eksploatacja i Niezawodność. 2016. Vol. 18, no. 3, p. 342–347.
8. Wernecke W., Lueke W., Clarke L., Louis J., Kempel S.: Fuels of the Future. 27th International Vienna Motor Symposium 2006, Vienna 2006
9. Idziar M.: Problemy doboru wtryskiwaczy silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami alternatywnymi. Wydawnic-

- two Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Poznań – Radom 2012.
10. Balawender K., Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A.: The effect of multi-phase injection on selected parameters of the common rail fuel system. PTNSS-2008-SS4-403
 11. Kaźmierowski J., Pielecha I., Czajka J., Wiślocki K., Borowski P., Kałużny J.: Investigations of operational and optical indexes of the combustion process for the multiple injection different strategies in CI-type model engine. PTNSS-2013-SC-117
 12. Cheolwoong P., Sanghoon K., Choongsik B.: Effects of Multiple Injections in a HSDI Diesel Engine Equipped With Common Rail Injection System. SAE Technical Paper Series 2004-01-0127.
 13. Perkins, Operation and Maintenance Manual, Perkins Engines Company Limited, 2012
 14. Stelmasiak Z. Wybrane problemy stosowania gazu ziemnego do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Archiwum Motoryzacji 1, s. 13-30 (2006)

Indicated indicators Perkins 1104d-E44ta engine dual fuel oil and natural gas supply

The aim of the article is to analyze and evaluate the effect of dual-fuel feed on diesel and natural gas on Indicated Engine Ignition Indicators Perkins 1104D-E44TA. The actual indicator diagrams prepared during engine operation according to the external speed characteristic in the engine

crankshaft speed range from 1000 to 2400 rpm were analyzed. On the basis of the average pressure courses in the cylinder, open indicator diagrams were made, which were then analyzed. The operating parameters of the tested motor were determined as: average indicated pressure p_i , average effective pressure p_e , indicated power N_i , indicated torque M_i , indicated efficiency η_i , mechanical efficiency η_m , and unit-specific fuel consumption g_i .

Autorzy:

dr inż. **Piotr Łagowski** – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Pojazdów Samochodowych i Transportu, adres e-mail: p.lagowski@tu.kielce.pl

dr inż. **Dariusz Kurczyński** – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Pojazdów Samochodowych i Transportu, adres e-mail: kdarek@tu.kielce.pl

mgr inż. **Michał Warianek** – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Pojazdów Samochodowych i Transportu, adres e-mail: mwarianek@tu.kielce.pl

mgr inż. **Tomasz Dąbrowski** – Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., adres e-mail: tomasz.dabrowski@bosmal.com.pl

JEL: L62 **DOI:** 10.24136/atest.2018.134

Data zgłoszenia: 2018.05.23 **Data akceptacji:** 2018.06.15