

WPLYW WSPÓŁCZESNYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM NA BEZPIECZEŃSTWO EKOLOGICZNE ICH STOSOWANIA

Tłokowe silniki spalinowe stosowane do napędu pojazdów samochodowych mają znaczący szkodliwy wpływ na środowisko życia człowieka. Powoduje to, że rozwój silników spalinowych jest od wielu lat stymulowany stale rosnącymi normatywnymi wymaganiami ekologicznymi. Wprowadzane są nowe rozwiązania w konstrukcji silników. Zmieniają się warunki zachodzenia procesów roboczych w ich cylindrach. Stosowane są nowe rozwiązania w układach zasilania paliwem, dolutu powietrza i wylotu spalin. Zmieniają się skład paliw konwencjonalnych i poszukiwane są paliwa alternatywne oraz rozwijane są nowe rodzaje układów napędowych. W artykule przedstawiono porównanie wybranych wskaźników efektywnych i ekologicznych dwóch silników o takiej samej konstrukcji, ale różniących się przede wszystkim rodzajem układu zasilania i sposobem sterowania przebiegiem doprowadzania paliwa i powietrza do cylindrów. Jeden z silników to Perkins 1104D-44TA sterowany mechanicznie i wyposażony w układ zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową. Drugi to Perkins 1104D-E44TA sterowany elektronicznie, w którym paliwo jest doprowadzane do cylindrów z wykorzystaniem układu zasilania Common Rail. Podczas badań stanowiskowych silniki pracowały według dwóch charakterystyk obciążeniowych. Wyznaczono i porównano wartości godzinowego zużycia paliwa, jednostkowego zużycia paliwa oraz wartości stężeń podstawowych składników spalin i zadymienia spalin badanych silników.

WSTĘP

Najważniejsze źródło szkodliwego oddziaływania transportu drogowego na środowisko to eksploatacja tłokowych silników spalinowych zasilanych paliwami węglowodorowymi, w wyniku spalania których powstaje dwutlenek węgla i woda oraz szkodliwe składniki, do których zalicza się między innymi: tlenki azotu, tlenek węgla, różne niespalone węglowodory i cząstki stałe. Rozwój silników od wielu już lat jest wymuszany kolejnymi, coraz bardziej rygorystycznymi, ograniczeniami ich szkodliwego oddziaływania na środowisko. W ostatnich latach wprowadzane były kolejne dopuszczalne poziomy emisji podstawowych składników spalin. Norma Euro 1 wprowadzona została w 1993 roku. Jej wymagania wymusiły zintensyfikowanie postępu technologicznego w budowie silników spalinowych. Rozwojowi uległy układy zasilania paliwem i układy dolotowe powietrza. W silnikach ZI rozwijano technologię wtrysku paliwa, od wtrysku jednopunktowego, poprzez wtrysk pośredni wielopunktowy, do wtrysku bezpośredniego. Obecnie koncern VW-Audi stosuje w niektórych konstrukcjach silników o zapłonie iskrowym układy zasilania z dwoma kompletami wtryskiwaczy. W jednym silniku oprócz wtryskiwaczy wtryskujących benzynę bezpośrednio do cylindrów, są także wtryskiwacze wtryskujące paliwo do kolektora dolotowego [14]. Podobne rozwiązanie stosuje również firma Toyota [15]. W silnikach ZS bazując na wtrysku bezpośrednim zwiększono ciśnienie wtrysku w celu poprawy warunków tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej. W układach dolotowych silników rozwijano technologię ich doładowania. Zmieniało się konstrukcję głowicy oraz układu rozrządu tak, aby zwiększyć możliwości napełniania cylindrów świeżym ładunkiem. Zastosowano recyrkulację spalin w celu ograniczenia emisji tlenków azotu. Olbrzymi wpływ na spełnianie przez silniki wymagań w zakresie emisji miał rozwój elektronicznych układów sterowania i regulacji oraz kontroli pracy elementów i pod-

zespołów mających wpływ na ilość powstających szkodliwych składników spalin. W przypadku silników ZI zasilanych benzyną, już przy wdrożeniu normy Euro 1 wprowadzono do stosowania trójfunkcyjne katalizatory spalin pracujące w zamkniętym układzie regulacji z sondą lambda. W przypadku silników spalinowych o zapłonie samoczynnym rozwój ich konstrukcji i sterowania umożliwił spełnienie wymagań w zakresie emisji spalin do limitów określonych normą Euro 3, bez konieczności stosowania w układzie wydechowym dodatkowych urządzeń zmniejszających zawartość w spalinach szkodliwych ich składników. Wprowadzenie normy Euro 4 w 2005 wymusiło zastosowanie w układach wydechowych silników ZS katalizatorów utleniających. Norma Euro 5 wprowadzona w 2009 roku wymusiła stosowanie w układach wydechowych silników ZS filtrów cząstek stałych. W przypadku silników ZS służących do napędu samochodów ciężarowych zaczęto również stosować katalizatory SCR tlenków azotu. Norma Euro 6 wprowadzona w 2014 roku wymusiła konieczność stosowania w silnikach o zapłonie samoczynnym wszystkich zaawansowanych technologii mających na celu ograniczanie emisji szkodliwych składników spalin. Zastosowanie w silnikach o zapłonie iskrowym bezpośredniego wtrysku paliwa i różnych strategii tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej, w tym ich pracy przy współczynniku nadmiaru powietrza większym od 1, wymusiło zastosowanie w układach wydechowych tych silników dodatkowych katalizatorów ograniczających emisję tlenków azotu. Wymagania normy Euro 6 oraz nowe procedury badań homologacyjnych emisji wprowadzone w 2017 roku, wymuszają stosowanie w układach wydechowych silników ZI z bezpośrednim wtryskiem benzyny, filtrów cząstek stałych. Wymagania norm emisji spalin i procedur ich badania powodują, że układy wydechowe tłokowych silników spalinowych to skomplikowane konstrukcje składające się z różnych urządzeń ograniczających zawartość w spalinach szkodliwych składników. Prawidłowa ich praca zależy od właściwej

eksploatacji silników i jest sterowana i kontrolowana za pomocą elektronicznej jednostki sterującej.

W rozwoju tłokowych silników spalinowych wyróżnia się kilka charakterystycznych kierunków. Najbardziej znanym i powszechnie obecnie stosowanym jest downsizing [8, 12, 13, 21]. Jego celem jest zmniejszenie zużycia paliwa i ilości szkodliwych składników spalin wytwarzanych przez silniki. Koncepcja downsizingu to projektowanie silników o coraz mniejszych objętościach skokowych oraz o większych uzyskiwanych mocach. Silniki o dużych objętościach skokowych zastąpiono silnikami o mniejszych objętościach skokowych przy zachowaniu lub uzyskaniu większych wartości mocy efektywnej. Oznacza to, że silniki zaprojektowane zgodnie z downsizingiem pracują przy znacznie większych obciążeniach. Z jednostki objętości skokowej uzyskują większe moce niż wcześniej projektowane silniki. Dzięki temu uzyskano zwiększenie sprawności wykorzystania energii i zmniejszenie zużycia paliwa. Obecnie powszechnie stosuje się silniki zaprojektowane zgodnie z koncepcją downsizingu. Są to silniki o małych objętościach skokowych, z doładowaniem za pomocą turbosprężarek, o większych stopniach sprężania, z bezpośrednim wtryskiem paliwa i sterowaniem elektronicznym [20]. Innym kierunkiem rozwoju samochodowych silników spalinowych, dotyczącym głównie silników o zapłonie iskrowym jest downsizing [7]. Polega on na przesunięciu najczęściej wykorzystywanego obszaru pracy silnika w kierunku mniejszych prędkości obrotowych wału korbowego i wyższych obciążeń. Efektem tego ma być zmniejszenie zużycia paliwa. Tendencje rozwojowe: downsizing oraz downsizing stosuje się zazwyczaj jednocześnie w tłokowych silnikach spalinowych. Innym nowym podejściem do projektowania i stosowania tłokowych silników spalinowych jest rightsizing [25]. Zwrócono w nim uwagę na to, że silnik powinien być dostosowany do klasy pojazdu i warunków w jakich jest on eksploatowany. Zmniejszanie pojemności skokowej i prędkości obrotowej wału korbowego silnika niekoniecznie w każdych warunkach pracy silnika pozwala na uzyskanie korzystnych efektów w postaci zmniejszenia zużycia paliwa i ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin. Warunki codziennej eksploatacji silnika są inne niż podczas jego badań testowych w warunkach laboratoryjnych. Zmniejszenie zużycia paliwa w warunkach panujących podczas badań laboratoryjnych niekoniecznie musi się przełożyć na mniejsze zużycie paliwa w warunkach ruchu drogowego. Stąd biorą się znaczne różnice w zużyciu paliwa pomiędzy danymi podawanymi przez producentów, a wartościami uzyskiwanymi podczas normalnej eksploatacji.

Bardzo ważnym obszarem działań mających na celu ograniczenie szkodliwego wpływu tłokowych silników spalinowych na środowisko są paliwa silnikowe. Stawiane są im również coraz bardziej restrykcyjne wymagania normatywne. Wymuszają one konieczność modyfikacji składu i właściwości paliw konwencjonalnych, tak aby ich stosowanie w coraz mniejszym stopniu wpływało negatywnie na środowisko. Poszukuje się paliw alternatywnych o korzystnych właściwościach w zakresie ich oddziaływania na środowisko [3, 4, 22, 19]. Realizowana jest polityka, której celem jest stwarzanie korzystnych warunków do stosowania paliw innych niż benzyna i oleje napędowe otrzymywane z ropy naftowej [10, 11, 16, 17].

1. BEZPIECZEŃSTWO EKOLOGICZNE TRANSPORTU

Transport jest działem gospodarki, który ma bardzo duże znaczenie dla istnienia i rozwoju cywilizacji człowieka. Umożliwia przemieszczanie się ludzi, surowców i wytwarzanych produktów. Jego funkcjonowanie ma jednocześnie istotny wpływ na środowisko. Wymaga zużycia dużych ilości zasobów i energii. Infrastruktura

transportu zajmuje znaczne powierzchnie i zmienia krajobraz. Ingeruje w naturalne ekosystemy i zmienia warunki życia zwierząt i roślin. Eksploatacja środków transportu przyczynia się do wytwarzania różnych szkodliwych produktów wprowadzanych do środowiska. Mają one szkodliwy wpływ na zdrowie i życie człowieka i inne organizmy żywe. W Unii Europejskiej w 2015 roku transport drogowy odpowiadał za 39% tlenków azotu NO_x wprowadzanych do atmosfery i stanowił największe źródło ich emisji [1]. Ponadto był źródłem 29% sadzy wprowadzonej do atmosfery, co stanowiło drugie co do wielkości źródło jej emisji. Ponadto transport drogowy w 2015 roku odpowiadał w Unii Europejskiej za 20% emisji tlenu węgla, 10% emisji niemetanowych lotnych związków organicznych, 11% pyłów PM_{2,5} i 11% pyłów PM₁₀. Transport w Unii Europejskiej jest źródłem emisji około 25% wszystkich gazów cieplarnianych. Największy udział w ich emisji ma transport drogowy [2, 27]. Zanieczyszczenia powietrza generowane przez samochody mają wpływ na zdrowie człowieka, zwłaszcza jego układ oddechowy, układ krążenia i układ nerwowy. Przyczyniają się do rozwoju chorób płuc takich jak astma czy nowotwory. Ponadto funkcjonowanie transportu przyczynia się do wypadków, w których ludzie tracą zdrowie lub życie.

Człowiek chce żyć w otoczeniu pozbawionym zagrożeń. Chce mieć poczucie bezpieczeństwa, czyli stanu, w którym brak jest zagrożeń dla spokojnego życia i rozwoju [5]. Człowiek zanieczyszczając środowisko, w tym również poprzez rozwój transportu szkodzi sam sobie generując zagrożenia dla swojego zdrowia i życia. Transport ma również udział w pogłębianiu zjawiska efektu cieplarnianego oraz w powstawaniu dziury ozonowej, kwaśnych deszczy i smogu. Człowiek w zakresie rozwoju transportu podejmuje wiele działań, których celem jest ograniczanie niepożądanych, szkodliwych skutków jego oddziaływania na środowisko. Działania te mają zapewnić człowiekowi bezpieczeństwo ekologiczne, czyli uchronić przed szkodliwymi oddziaływaniami ze strony środowiska. Bezpieczeństwo ekologiczne to pożądaný stan środowiska naturalnego, wolny od zagrożeń naruszających równowagę ekosystemów i biosfery [9].

2. PROBLEMY SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Tłokowe silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat były intensywnie rozwijane. Uzyskały one wysoki stopień doskonałości konstrukcji. Są one powszechnie stosowane do napędu samochodów dostawczych, ciężarowych, autobusów, różnych maszyn roboczych i pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych, jak również samochodów osobowych. Właściwości silników o zapłonie samoczynnym i ich intensywny w ostatnich latach rozwój spowodowały, że były one powszechnie stosowane do napędu nawet najmniejszych samochodów osobowych. Ich udział w rynku nowych sprzedawanych samochodów osobowych w Europie był większy niż samochodów z silnikami o zapłonie iskrowym. Silniki ZS zawsze charakteryzowały się niższym zużyciem paliwa. Współczesne silniki o zapłonie samoczynnym to konstrukcje o porównywalnych lub nawet lepszych właściwościach dynamicznych niż silniki o zapłonie iskrowym i nadal charakteryzują się mniejszym zużyciem paliwa. Niestety mają również swoje wady. Przede wszystkim to skomplikowane i kosztowne układy zasilania paliwem oraz układy wydechowe wraz z urządzeniami ograniczającymi stężenia szkodliwych składników spalin. Ponadto mają duże wymagania, co do jakości paliw stosowanych do ich zasilania oraz właściwej eksploatacji. Nie przestrzeganie zasad eksploatacji przyczynia się do uszkodzeń elementów wymienionych wyżej układów, wzrostu stopnia szkodliwego oddziaływania na środowisko i konieczności przeprowadzenia kosztownych na-

praw. Największe problemy silników ZS związane z ich oddziaływaniem na środowisko to emisja cząstek stałych i tlenków azotu. Dotyczy to zwłaszcza silników w złym stanie technicznym i nie spełniających aktualnie obowiązujących norm emisji spalin. Powoduje to, że aktualnie samochody z silnikami o zapłonie samoczynnym są źle oceniane i wprowadzane są lub planowane są do wprowadzenia restrykcje w zakresie możliwości ich użytkowania w aglomeracjach miejskich. Powoduje to, że samochody napędzane silnikami ZS tracą zainteresowanie ze strony potencjalnych nabywców. Niektórzy producenci zaczynają mówić o zaprzestaniu rozwoju ich konstrukcji, a nawet o stopniowym wycofaniu się z ich stosowania do samochodów osobowych. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że współczesne silniki o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem paliwa to konstrukcje zbliżone do silników o zapłonie samoczynnym, dla których również pojawił się problem emisji cząstek stałych. Stopień skomplikowania ich konstrukcji jest coraz bardziej zbliżony do silników ZS. Podobne są układy zasilania paliwem oraz dolotu powietrza. Stosowane są turbosprężarki w układach dolotowych. W ich układach wydechowych zaczęły pojawiać się filtry cząstek stałych. Powoduje to, że koszty napraw nowoczesnych silników turbodoładowanych, z bezpośrednim wtryskiem benzyny również wzrastają. Nawet jeśli będzie ograniczane stosowanie silników o zapłonie samoczynnym do napędu samochodów osobowych, to nadal będą one wykorzystywane do napędu samochodów dostawczych, ciężarowych, autobusów i różnych maszyn roboczych. To powoduje, że konstrukcja silników o zapłonie samoczynnym nadal będzie przedmiotem badań i analiz oraz rozwoju.

3. OBIEKTY BADAŃ

Objektami badań były dwa silniki o zapłonie samoczynnym Perkins: 1104D-44TA i 1104D-E44TA. Są one wykorzystywane do napędu maszyn roboczych i pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych. Spełniają one normy emisji spalin Stage IIIA & EPA Tier 3 [24, 23]. Podstawowe dane techniczne wyżej wymienionych silników Perkins przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Podstawowe dane techniczne silników o zapłonie samoczynnym Perkins: 1104D-E44TA, 1104D-44TA

Parametr	Jednostka	Perkins 1104D-E44TA	Perkins 1104D-44TA
Układ cylindrów	-	rzędowy	rzędowy
Liczba cylindrów	-	4	4
Rodzaj wtrysku	-	bezpośredni	bezpośredni
Typ układu zasilania	-	Common Rail	z pompą rozdzielaczową
Maksymalna moc silnika	kW	96,5	75
Prędkość obrotowa mocy maksymalnej	obr/min	2200	2200
Maksymalny moment obrotowy silnika	Nm	516,0	416,0
Prędkość obrotowa maksymalnego momentu	obr/min	1400	1400
Pojemność skokowa silnika	m ³	4,4 · 10 ⁻³	4,4 · 10 ⁻³
Średnica cylindra	mm	105	105
Skok tłoka	mm	127	127
Stopień sprężania	-	16,2	18,2
Układ doprowadzenia powietrza	-	turbosprężarka, chłodnica powietrza doładowującego	turbosprężarka, chłodnica powietrza doładowującego
Kolejność pracy cylindrów	-	1-3-4-2	1-3-4-2

Silniki dla których przeprowadzono badania mają bardzo podobną konstrukcję. Są to silniki czterocylindrowe, z bezpośrednim wtryskiem paliwa, o dokładnie takiej samej pojemności skokowej, przy średnicy cylindra 105 mm i skoku tłoka 127 mm. Maksymalne

wartości mocy efektywnej i momentu obrotowego silniki uzyskują przy tych samych wartościach prędkości obrotowej wału korbowego. W silnikach tych zastosowano układ rozrządu typu OHV. Na każdy cylinder przypadają cztery zawory. Sterowanie zaworami umieszczonymi w głowicy silnika odbywa się poprzez popychacze. Jeden popychacz steruje dwoma zaworami. Wałek rozrządu umieszczony jest w bloku silnika. Przeniesienie napędu z wału korbowego na wałek rozrządu realizowane jest za pomocą kół zębatach. W obu silnikach w układzie dolotowym zastosowano turbosprężarkę oraz chłodnicę powietrza doładowującego. Silnik Perkins 1104D-44TA sterowany mechanicznie jest wyposażony w układ zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową Delphi DP310 sterowaną mechanicznie. Elektryczna pompa wstępna tłoczy paliwo do pompy wysokociśnieniowej. Pompa rotacyjna wytwarza wysokie ciśnienie, określa dawkę paliwa zależną od warunków pracy silnika i za pomocą rozdzielacza tłoczy paliwo poprzez przewody wysokiego ciśnienia do wtryskiwaczy mechanicznych, które otwierają się pod wpływem ciśnienia paliwa. Ciśnienie otwarcia rozpylaczy w wtryskiwaczach wynosi 29-29,8 MPa [24]. W celu zwiększenia stopnia napełnienia cylindrów badanego silnika w jego układzie dolotowym zastosowano turbosprężarkę sterowaną zaworem upustowym połączonym z kolektorem dolotowym silnika. Silnik Perkins 1104D-E44TA wyposażono w powszechnie obecnie stosowany układ zasilania Common Rail z wtryskiwaczami elektromagnetycznymi sterowanymi elektronicznie. Elektroniczna jednostka sterująca na podstawie informacji z czujników określających aktualne 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. Dawka wtryskiwanego paliwa na pojedynczy cykl pracy silnika dzielona jest na dwie części. Najpierw wtryskiwana jest mała dawka paliwa, tak zwany przedwtrysk. Paliwo to szybko paruje i tworzy się mieszanka paliwowo-powietrzna ulegająca samozapłonowi. W ten sposób stworzone są warunki dla wtrysku dawki głównej i jej szybkiego samozapłonu i spalania. Pozwala to na łagodniejszy przebieg ciśnienia w cylindrze silnika i możliwości oddziaływania na przebieg procesu spalania. W układzie dolotowym silnika znajduje się turbosprężarka sterowana elektronicznie za pomocą jednostki sterującej. Pozwala ona na zwiększenie ilości powietrza doprowadzanego do cylindrów silnika w szerokim zakresie prędkości obrotowej wału korbowego. Silnik 1104D-E44TA ma mniejszy stopień sprężania, niż silnik 1104D-44TA.

4. STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko hamowniane z dwoma silnikami Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA przedstawiono na rysunku 1. Oba silniki wraz z hamulcem umieszczone są na wspólnej ramie. W zależności od tego który silnik ma być badany, to jest on łączony za pomocą wału z hamulcem. Na stanowisku jest hamulec elektrowirowy typu AMX – 200/6000 firmy ELEKTROMEX CENTRUM o mocy 200 kW, momencie obrotowym 700 Nm i maksymalnej prędkości obrotowej 6000 obr/min. Sterowanie pracą badanych silników odbywa się za pomocą modułu sterującego pracą stanowiska hamownianego oraz komputera wraz z oprogramowaniem firmy Automex. Moduł sterujący oraz komputer umieszczone są w wspólnej szafie sterowniczej. Moduł sterujący stanowiska umożliwia regulację prędkościowo-obciążeniowych warunków pracy silników. Kontroluje on warunki pracy silnika i hamulca oraz diagnozuje prawidłowość pracy stanowiska. Komputer umożliwia również rejestrację i archiwizację parametrów pracy badanego silnika oraz wizualizację przebiegu badań. Dokładny pomiar zużycia paliwa ciekłego przez silniki umożliwia ten sam masowy dawkomierz paliwa firmy Automex. W układach funk-

cyjonalnych obu silników zamontowano szereg czujników ciśnień i temperatur. Czujniki termoelektryczne i rezystancyjne oraz przetworniki temperatury, umożliwiają pomiar temperatur w układach silników: dolotowym, zasilania, smarowania, chłodzenia oraz w układzie wylotowym. Stanowisko wyposażone jest w przetworniki ciśnienia firmy WIKA, które umożliwiają pomiar ciśnienia powietrza w układzie dolotowym, cieczy chłodzącej w układzie chłodzenia oraz oleju w głowicy silnika, a także ciśnienia w skrzyni korbowej i spalin w układzie wydechowym. Każdy z silników ma własne wymienniki płaszczowe płynu chłodzącego, powietrza za turbosprężarką i oleju smarowego. Wspólny dla obu silników jest wymiennik chłodzący paliwo. Oddzielny wymiennik ciepła służy do odprowadzania ciepła od hamulca. Sterowanie dawką paliwa w silniku Perkins 1104D-44TA odbywa się za pomocą linki łączącej pompę wysokiego ciśnienia z serwomechanizmem. Serwomechanizm połączony jest z szafą sterującą pracą silnika. W silniku Perkins 1104D-E44TA sterowanie przebiegiem wtrysku paliwa jest realizowane poprzez elektroniczną jednostkę sterującą.



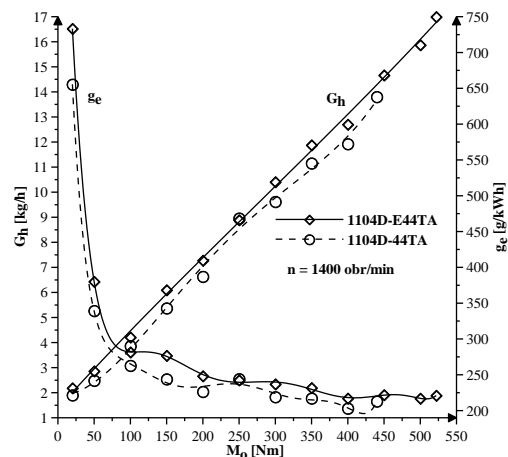
Rys. 1. Stanowisko hamowniane z silnikami Perkins: 1104D-E44TA i 1104D-44TA

Podczas realizacji badań na stanowisku hamowanym znajdował się również analizator spalin MEXA-1600 DEGR i analizator cząstek stałych MEXA-1230PM. Analizator MEXA-1600DEGR służy do ciągłych pomiarów stężeń w czasie rzeczywistym pięciu składników spalin tlenkowych silników spalinowych: tlenku węgla CO, dwutlenku węgla CO₂, węglowodorów THC, tlenków azotu NO_x i tlenu O₂ [26]. Analizator MEXA-1230 PM firmy Horiba umożliwia ciągły pomiar masowego stężenia składników cząstek stałych: rozpuszczalnych związków organicznych (SOF), sadzy (Soot) oraz sumy masy sadzy i rozpuszczalnych związków organicznych (PM) [6, 18]. Tory poboru spalin analizatorów są zgodne z wymaganiami normy ISO-8178.

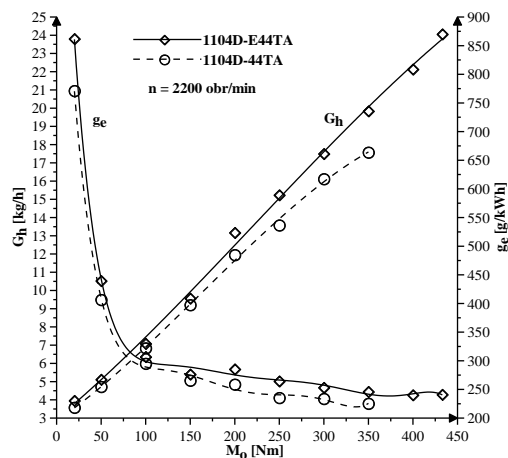
5. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNYCH SILNIKÓW PERKINS 1104D-44TA I 1104D-E44TA

Badania silników Perkins 1104D-44TA i 1104D-E44TA przeprowadzono przy wykorzystaniu tego samego hamulca i tej samej aparatury pomiarowej. Silniki w trakcie badań zasilane były tym samym olejem napędowym. Badania przeprowadzono przy pracy silników według charakterystyk obciążeniowych dla dwóch prędkości obrotowych wału korbowego $n = 1400$ i 2200 obr/min. Dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ silniki uzyskują maksymalną moc efektywną, a przy prędkości $n = 2200$ obr/min maksymalny moment obrotowy. W ustalonych warunkach pracy dokonywano pomiarów mocy efektywnej, momentu obrotowego, godzinowego zużycia paliwa oraz wartości stężeń podstawowych składników spalin i zadyminienia spalin. Silnik zasilany za pomocą układu Common Rail ma wyraźnie większe wartości maksymalnej mocy efektywnej i maksymalnego momentu obrotowego, niż silnik z ukła-

dem zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową. Silnik Perkins 1104D-44TA dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ uzyskał moc efektywną $64,8$ kW i maksymalny moment obrotowy 440 Nm. Dla porównania silnik Perkins 1104D-E44TA z układem zasilania Common Rail sterowanym elektronicznie, dla tej samej prędkości obrotowej wału korbowego, uzyskał maksymalną moc efektywną równą $76,8$ kW i maksymalny moment obrotowy 522 Nm. Dla prędkości obrotowej wału korbowego 2200 obr/min, przy której oba silniki uzyskują maksymalną moc efektywną, silnik Perkins 1104D-44TA uzyskał moc 78 kW, natomiast jego moment obrotowy wyniósł 350 Nm. Silnik 1104D-E44TA dla tej prędkości obrotowej wału korbowego uzyskał moc $99,8$ kW i moment obrotowy 433 Nm. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono porównanie krzywych przebiegu zmian godzinowego zużycia paliwa G_h i jednostkowego zużycia paliwa g_e silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyk obciążeniowych dla prędkości obrotowych wału korbowego $n = 1400$ i 2200 obr/min. Silnik 1104D-E44TA, przy tych samych wartościach obciążenia, uzyskiwał nieznacznie większe wartości zużycia paliwa w porównaniu do silnika 1104D-44TA.

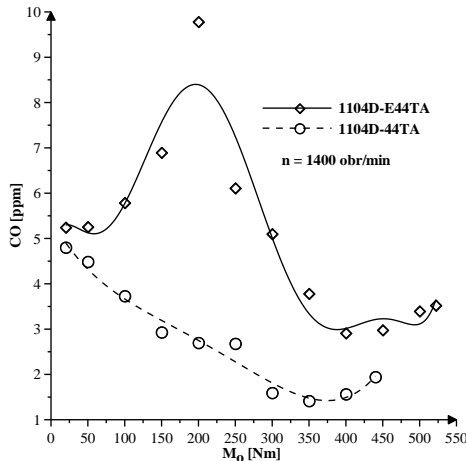


Rys. 2. Porównanie godzinowego zużycia paliwa G_h i jednostkowego zużycia paliwa g_e silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ obr/min i zasilanych olejem napędowym

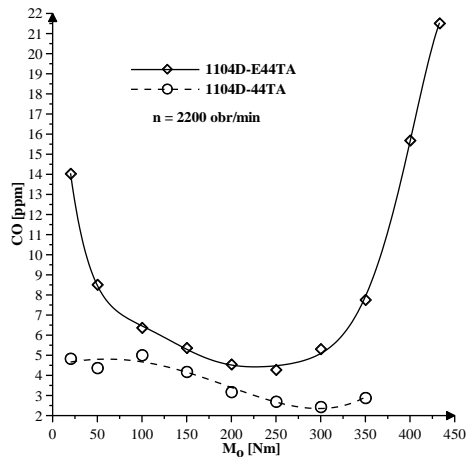


Rys. 3. Porównanie godzinowego zużycia paliwa G_h i jednostkowego zużycia paliwa g_e silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min i zasilanych olejem napędowym

Porównanie wartości stężeń tlenku węgla CO w spalinach badanych silników, przy ich zasilaniu tym samym olejem napędowym oraz pracy według charakterystyk obciążeniowych dla prędkości obrotowych wału korbowego $n = 1400$ i 2200 obr/min przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Dla silnika zasilanego za pomocą układu zasilania Common Rail w każdym punkcie pomiarowym uzyskano większe wartości stężeń tlenku węgla w spalinach, niż dla silnika z układem zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową. Jednocześnie w spalinach silnika, w którym paliwo jest dostarczane do cylindrów silnika za pomocą układu zasilania Common Rail, w każdym punkcie pomiarowym zmierzono mniejsze wartości dwutlenku węgla CO_2 . Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

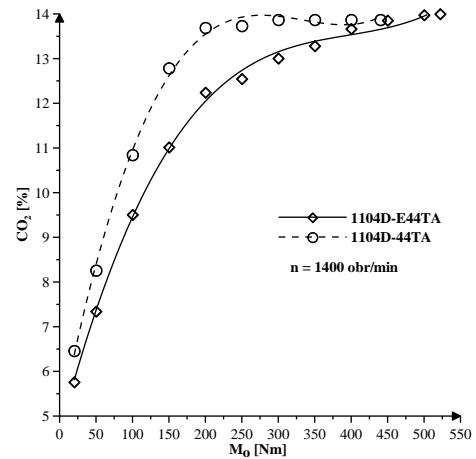


Rys. 4. Porównanie stężenia tlenku węgla CO w spalinach silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ obr/min i zasilanych olejem napędowym

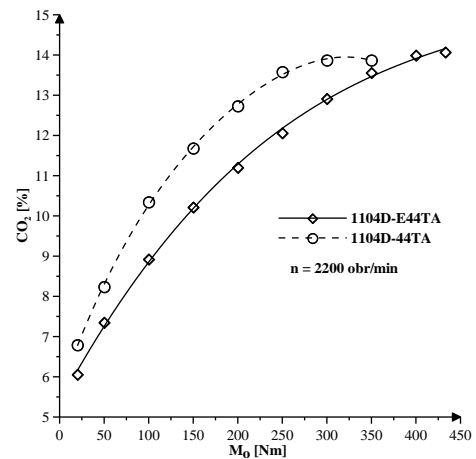


Rys. 5. Porównanie stężenia tlenku węgla CO w spalinach silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min i zasilanych olejem napędowym

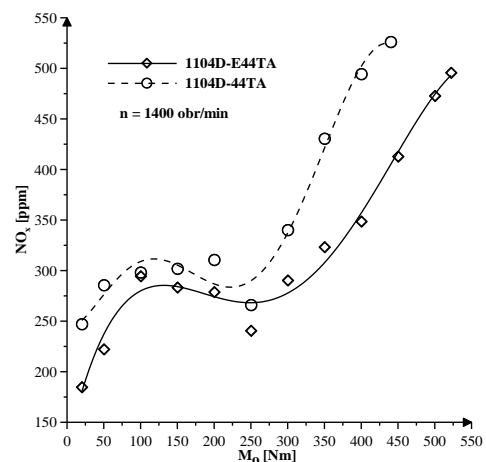
Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono porównanie stężeń tlenków azotu NO_x w spalinach badanych silników pracujących według charakterystyk obciążeniowych dla prędkości obrotowych wału korbowego $n = 1400$ i 2200 obr/min. Dla silnika Perkins 1104D-E44TA, w którym zastosowany jest układ zasilania Common Rail w większości punktów pomiarowych stężenia tlenków azotu NO_x są wyraźnie mniejsze niż w przypadku silnika 1104D-44TA zasilanego za pomocą rozdzielaczowej pompy wtryskowej.



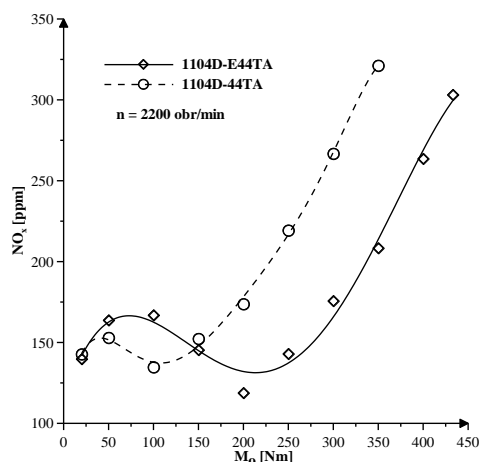
Rys. 6. Porównanie stężenia dwutlenku węgla CO_2 w spalinach silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ obr/min i zasilanych olejem napędowym



Rys. 7. Porównanie stężenia dwutlenku węgla CO_2 w spalinach silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min i zasilanych olejem napędowym

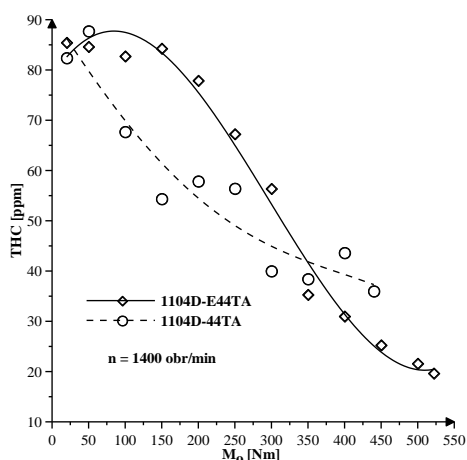


Rys. 8. Porównanie stężenia tlenków azotu NO_x w spalinach silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ obr/min i zasilanych olejem napędowym

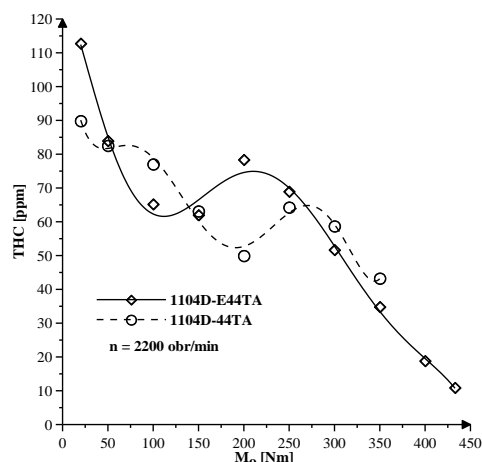


Rys. 9. Porównanie stężenia tlenków azotu NO_x w spalinach silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min i zasilanych olejem napędowym

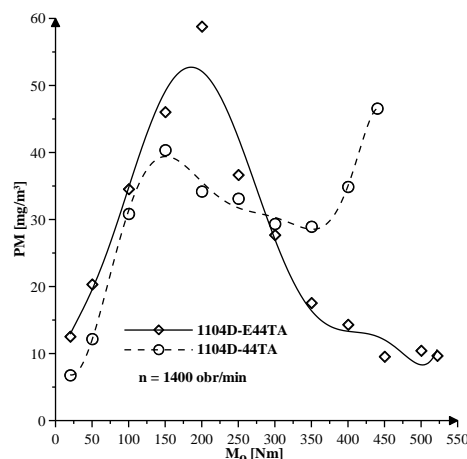
W przypadku pomiarów stężeń w spalinach całkowitej zawartości węglowodorów THC, cząstek stałych PM oraz zadymienia spalin D dla badanych silników Perkins, przy ich pracy według charakterystyk obciążeniowych dla dwóch prędkości obrotowych wału korbowego $n = 1400$ i 2200 obr/min, nie uzyskano jednoznacznych zależności pomiędzy zmierzonymi wartościami tych wskaźników. Wartości pomiarów stężeń węglowodorów w spalinach przedstawiono na rysunkach 10 i 11. Przy pracy silników według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej $n = 1400$ obr/min, w zakresie obciążeń od 100 do 300 Nm stężenia THC są większe dla silnika z układem zasilania Common Rail. Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono wyniki pomiarów stężeń cząstek stałych PM w spalinach badanych silników. Przy pracy silników według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ obr/min, w zakresie obciążenia do 300 Nm, większe stężenia uzyskano dla silnika z układem zasilania Common Rail. Dla obciążeń powyżej 300 Nm wartości stężeń cząstek stałych dla tego silnika są wyraźnie mniejsze niż dla silnika z rozdzielaczową pompą wtryskową. Przy pracy badanych silników według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min, stężenia cząstek stałych w spalinach silnika 1104D-E44TA są wyraźnie mniejsze niż dla silnika 1104D-44TA.



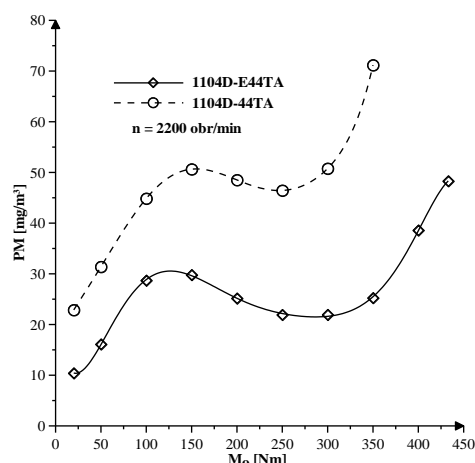
Rys. 10. Porównanie stężenia całkowitej zawartości węglowodorów THC w spalinach silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ obr/min i zasilanych olejem napędowym



Rys. 11. Porównanie stężenia całkowitej zawartości węglowodorów THC w spalinach silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min i zasilanych olejem napędowym



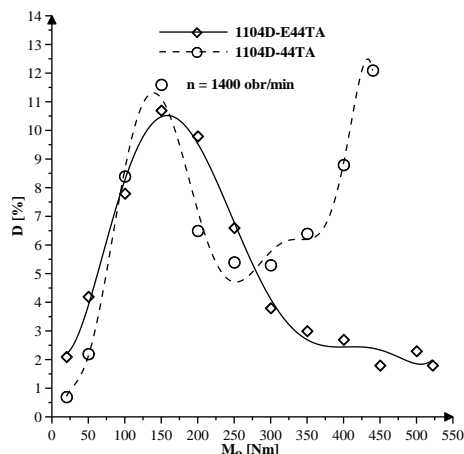
Rys. 12. Porównanie stężenia cząstek stałych PM w spalinach silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ obr/min i zasilanych olejem napędowym



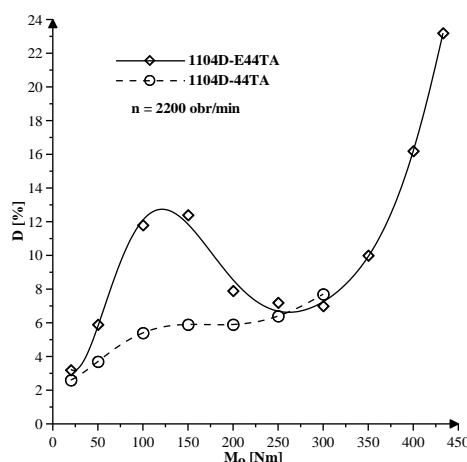
Rys. 13. Porównanie stężenia cząstek stałych PM w spalinach silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min i zasilanych olejem napędowym

Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono wyniki pomiarów zadymienia spalin dla badanych silników. Dla wartości obciążeń od 300

Nm, przy pracy silników według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ obr/min, wartości zadymienia spalin są mniejsze dla silnika z układem zasilania Common Rail. Przy pracy silników według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min, wartości zadymienia spalin w większości punktów pomiarowych są większe dla silnika z układem zasilania Common Rail.



Rys. 14. Porównanie zadymienia spalin D silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 1400$ obr/min i zasilanych olejem napędowym



Rys. 15. Porównanie zadymienia spalin D silników Perkins 1104D-E44TA i 1104D-44TA, pracujących według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min i zasilanych olejem napędowym

PODSUMOWANIE

Tłokowe silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym w ostatnich latach podlegały intensywnemu rozwojowi konstrukcyjnemu i technologicznemu. Duży postęp miał miejsce w zakresie układów zasilania. W ramach prezentowanych wyników badań porównano dwa silniki o podobnej konstrukcji, różniące się sposobem sterowania oraz rodzajem układu zasilania. Dla silnika Perkins 1104D-E44TA sterowanego elektronicznie wyposażonego w układ zasilania Common Rail, w porównaniu do silnika Perkins 1104D-44TA sterowanego mechanicznie i wyposażonego w układ zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową, uzyskano wyraźnie większe maksymalne wartości mocy efektywnej i momentu obrotowego dla prędkości obrotowych wału korbowego $n = 1400$ i 2200 obr/min, przy których silniki te uzyskują maksymalną wartość momentu obrotowego (1400

obr/min) i maksymalną wartość mocy efektywnej (2200 obr/min). Maksymalny moment obrotowy wyznaczony w trakcie badań dla silnika z układem zasilania Common Rail jest większy o około 18,6% niż dla silnika z układem zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową. Maksymalna wartość mocy efektywnej silnika Perkins 1104D-E44TA wyznaczona na hamowni silnikowej jest większa o około 28% w porównaniu do silnika Perkins 1104D-44TA. Silniki Perkins: 1104D-E44TA i 1104D-44TA porównano przy ich pracy według charakterystyk obciążeniowych dla prędkości obrotowych wału korbowego $n = 1400$ i 2200 obr/min. Dla silnika sterowanego elektronicznie z układem zasilania Common Rail uzyskano nieznacznie większe wartości godzinowego i jednostkowego zużycia paliwa w porównaniu z silnikiem sterowanym mechanicznie z układem zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową. Dla silnika 1104D-E44TA z układem zasilania Common Rail uzyskano mniejsze wartości stężeń w spalinach dwutlenku węgla i tlenków azotu. Jednocześnie uzyskano wzrost wartości stężenia tlenku węgla w porównaniu do silnika z układem zasilania z pompą rozdzielaczową. Przy pracy silników według charakterystyki obciążeniowej dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2200$ obr/min dla silnika 1104D-E44TA uzyskano w każdym punkcie pomiarowym mniejsze wartości stężeń cząstek stałych, w porównaniu do silnika 1104D-44TA sterowanego mechanicznie. Wyniki pomiarów stężeń w spalinach całkowitej zawartości węglowodorów THC oraz zadymienia spalin D dla badanych silników Perkins, przy ich pracy według charakterystyk obciążeniowych dla dwóch prędkości obrotowych wału korbowego $n = 1400$ i 2200 obr/min nie wykazały jednoznacznych różnic.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że podstawową zaletą zastosowania w silniku Perkins 1104D-E44TA układu zasilania Common Rail był wyraźny wzrost wartości mocy efektywnej i momentu obrotowego oraz zmniejszenie stężeń w spalinach dwutlenku węgla, tlenków azotu oraz w określonych warunkach pracy cząstek stałych.

BIBLIOGRAFIA

1. Air quality in Europe — 2017 report. No 13/2017. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>
2. Ajanovic A., Haas R.: Technological, ecological and economic perspectives for alternative automotive technologies up to 2050. 2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), IEEE Conferences, 2012, s. 129 – 134.
3. Ambrozik A., Ambrozik T., Kurczyński D., Łagowski P., The Influence of Injection Advance Angle on Fuel Spray Parameters and Nitrogen Oxide Emissions for a Self-Ignition Engine Fed with Diesel Oil and FAME, Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 23, No 6, 2014, s. 1917-1923.
4. Ambrozik A., Ambrozik T., Kurczyński D., Łagowski P., Trzensik E.: Cylinder Pressure Patterns in the SI Engine Fuelled by Methane and by Methane and Hydrogen Blends. Solid State Phenomena Vol. 210 (2014), Trans Tech Publications, pp 40-49.
5. Ambrozik A., Kurczyński D., Łagowski P.: Bezpieczeństwo ekologiczne stosowania estrów metylowych oleju rzepakowego w transporcie. X International Science-Technical Conference Automotive Safety 2016, Problemy bezpieczeństwa w pojazdach samochodowych. Kielce-Ameliówka, 22-24 lutego 2016 r., Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2016, s. 15÷22.
6. Analizator cząstek stałych w czasie rzeczywistym MEXA-1230PM. Instrukcja obsługi.

7. Bandel, W., Fraidl, G. K., Friedl, H., Kapus, P. E., Mehrwertorientierte Techniken für ottomotorische Antriebssysteme. In: MTZ 67 (2006), Nr. 2, s. 110–117.
8. Brzeżański M., Śliwiński K.: Downsizing – nowy kierunek rozwoju silników samochodowych. Silniki Spalinowe, nr 2/2004 (119), s. 3÷11.
9. CISZEK M.: Bezpieczeństwo ekologiczne i zrównoważony rozwój w aspekcie Strategii Bezpieczeństwa Narodowego Rzeczypospolitej Polskiej, Studia Ecologiae et Bioethicae UKSW 10(2012)1, s. 29-41.
10. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
11. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej.
12. Fröhlich K., Meyer R., Miersch J., Reulein C., Schwarz Ch., Witt A.: Downsizing: CO₂-Potentiale – Technische Realisierbarkeit. 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2000.
13. Golloch R., Downsizing bei Verbrennungsmotoren. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2005.
14. Heiduk T., Kuhn M., Stichmeir M. i in.: The new 1.8 l TFSI engine from Audi. Part 2: mixture formation, combustion method and turbocharging. MTZ, 2011, 7–8(72), s. 58–64.
15. Ishiguro F., Mashiki Z., Yamanari K.: The new 2.5L L4 gasoline engine for LEXUS IS300h - The renewed engine series for FR hybrid vehicles. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, vol. 764, Düsseldorf 2013, pp. 158-171.
16. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Czysta energia dla transportu: europejska strategia w zakresie paliw alternatywnych. Bruksela 24.01.2013.
17. Krajowe ramy polityki rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych. Ver 2.6, 2017.
18. Kurczyński D.: Stężenia cząstek stałych w spalinach silnika ZS zasilanego paliwami ON, B20 i B30. Logistyka 6/2014, s. 6420-6432.
19. Kurczyński D., Łagowski P., Warianek M.: Ecological indicators of the Perkins 1104D-E44TA engine after its adaptation for being powered with natural gas and diesel fuel. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 24, No 3 2017, s. 143-150.
20. Kurczyński D., Piwowarczyk P.: Analiza uszkodzeń turbosprężarek. Autobusy-Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, nr 12/2017, s. 1019÷1025.
21. Merkisz J., Rozwój silników spalinowych w aspekcie ich ekologii. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 2(78)/2010, s. 103÷125 Warszawa 2010.
22. Orliński P.: The effect of diesel fuel mixture and camelina oil ester on selected parameters of combustion process. Journal of Kones 2013, Vol. 20, No. 3, s. 291-298.
23. PerkinsEngines Company Limited: Technical Data 1100 Series. Standard Base List. 1104D-E44TA 96,5 kW, 2200 rev/min Unbalanced. Perkins, England, 2008.
24. Perkins Engines Company Limited: Technical Data 1100 Series. Industrial Open Power Until. 1104D-44TA 75,0 kW, 2200 rev/min Balanced. Perkins, England, 2008.
25. Rosenow J.: Downsizing silników – Nie za duży, nie za mały. Auto Expert Technika – Warsztat – Handel, 7-8/07.2016.
26. System do pomiaru spalin silnikowych MEXA-1600D/DEGR. Instrukcja obsługi.
27. W kierunku czystej i inteligentnej mobilności. Transport a środowisko w Europie. Europejska Agencja Środowiska, Luksemburg: Urząd Publikacji Unii Europejskiej, 2016. <https://www.eea.europa.eu/pl/publications/sygnaly-2016-w-kierunku-czystej>

The impact of modern constructional solutions of internal combustion engines upon ecological safety of their application

Piston combustion engines used for propelling vehicles have a significantly harmful impact upon people's living environment. As a result, for many years now the development of combustion engines has been to a large extent defined by growing legal ecological requirements. New constructional solutions are being introduced, the conditions of working processes in engine cylinders are being changed, new solutions are being implemented in fuel feeding systems, air intake systems and fumes exhaust. The composition of conventional fuel is being modified, alternative fuels are being sought for and new types of powering systems are being developed. This paper presents the comparison of selected efficiency and ecological indicators of two engines having the same construction, but different in the type of powering and the method of controlling the process of supplying fuel and air into cylinders. One of the engines is Perkins 1104D-44TA, mechanically controlled and equipped with a feeding system with distributor injection pump. The second one is the Perkins 1104D-E44TA, electronically controlled, where fuel is supplied into the cylinders by means of the Common Rail system. During the tests, the engines operated according to two load characteristics. Hourly and specific fuel consumption as well as concentration levels of main components of exhaust fumes and smokiness have been identified and compared.

Autorzy:

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

dr inż. **Piotr Łagowski** – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Pojazdów Samochodowych i Transportu, piotrek1@tu.kielce.pl

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

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

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.053

Data zgłoszenia: 2018.05.21 Data akceptacji: 2018.06.15