

Wpływ zanieczyszczeń w oleju napędowym na funkcjonalność pracy wtryskiwaczy paliwa w systemie Common Rail

Andrzej Suchecki, Tomasz Kniefel, Jacek Nowakowski

W artykule przedstawiono ocenę wpływu chemicznych zanieczyszczeń zawartych w oleju napędowym na parametry pracy turbodoładowanego silnika o zapłonie samoczynnym. Zakres prac obejmował przygotowanie paliwa, specjalnie zanieczyszczonego, zwłaszcza związkami metali, które mogą zostać wprowadzone zarówno w procesie produkcji paliwa, jak i eksploatacji silnika. Przeprowadzono analizę spektralną paliwa. W dalszej kolejności wykonano trwałościowe badania silnika, które miały na celu wyznaczenie przebiegów takich wielkości jak: mocy i momentu obrotowego silnika, godzinowego i jednostkowego zużycia paliwa oraz ciśnienia doładowania. Pracę podzielono na etapy, które obejmowały pracę silnika zasilanego zanieczyszczonym paliwem, pracę silnika zasilanego zanieczyszczonym paliwem z oczyszczonymi rozpylaczami, pracę silnika zasilanego czystym paliwem z oczyszczonymi rozpylaczami. W każdym etapie rejestrowano zmiany maksymalnej mocy silnika. Wykonano analizy spektralne osadów z rozpylacza. Przedstawiono analizy porównawcze parametrów pracy silnika.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, układ zasilania Common Rail, wtryskiwacz, olej napędowy

Wstęp

Większość niesprawności wtryskiwaczy silnika o zapłonie samoczynnym (ZS) jest związana z jakością i parametrami paliwa. Powszechnie stosowany układ Common Rail wymaga stosowania oleju napędowego o odpowiednich właściwościach fizycznych i chemicznych. Zanieczyszczenia chemiczne paliw mogą być źródłem niesprawności wtryskiwaczy i przyczyną zmniejszenia mocy silnika. Powodują one powstawanie smolistych osadów oraz nagaru na rozpylaczach, co zakłóca przepływ paliwa oraz jego rozpylanie w komorze spalania. Zasięg strugi paliwa wypływającej z rozpylacza oraz jakość jego rozpylenia są bardzo istotne dla przebiegu spalania. Zasięg jest związany z rozpadem strugi paliwa na krople [8]. Stopień rozpylenia determinuje przebieg wydzielania ciepła. Analiza uszkodzeń wtryskiwaczy wskazuje, że są one wrażliwe na rodzaj i jakość paliwa oraz wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia chemiczne. Stosunkowo rzadko podejmowane są badania wpływu własności chemicznych oleju napędowego na pracę wtryskiwaczy. Można spotkać analizę wpływu niekonwencjonalnych paliw na pracę i uszkodzenia

wtryskiwaczy [3], czy ocenę wpływu własności fizycznych paliw silników o ZS na parametry przebiegu wtrysku [2]. Zawsze jednak podkreśla się konieczność zapewnienia właściwej jakości paliw [6, 10]. Z reguły uszkodzenie wtryskiwacza wiąże się z koniecznością przeprowadzenia co najmniej jednego stopnia naprawy – wymiany końcówki i regulacji [4]. Normy dotyczące właściwości paliw nie obejmują badań w zakresie zawartości zanieczyszczeń chemicznych. Niniejsza praca została poświęcona temu zagadnieniu.

1. Cel i zakres badań

Celem pracy było przeprowadzenie badań, mających określić wpływ zanieczyszczeń oleju napędowego substancjami chemicznymi o niewielkim stężeniu na funkcjonowanie układu wtryskowego silnika o ZS. Założeniem badań było wykazanie, że zanieczyszczenie paliwa substancjami chemicznymi zawierającymi pierwiastki metali w istotny sposób wpływa na funkcjonowanie wtryskiwaczy paliwa w silnikach o ZS z zasobnikowym systemem zasilania. Przedstawiono wyniki pomiarów, stanowiących fragment pracy mającej na celu opracowanie dodatków do oleju napędowego, umożliwiających prawidłową pracę rozpylaczy w warunkach zasilania paliwem zanieczyszczonym chemicznie.

W celu przeprowadzenia badań wybrano paliwo zanieczyszczone substancjami zawierającymi w swoim składzie min. cynk, sód, fosfor oraz krzem (zawartość powyżej 0,5 mg/kg).

Zakres pracy obejmował:

- przeprowadzenie analizy chemicznej zastosowanego w teście paliwa,
- zrealizowanie prób trwałościowych z zastosowaniem czystego oraz zanieczyszczonego oleju napędowego,
- wykonanie analizy chemicznej osadów powstałych na końcówkach wtryskiwaczy.

Objektem badań był silnik o pojemności 1,3 dm³ o zapłonie samoczynnym, doładowany turbosprężarką, zasilany układem Common Rail (tabela 1). W próbie został użyty silnik spełniający normę EURO IV.

Tab. 1. Dane techniczne silnika

liczba cylindrów, układ	4, rzędowy w pionie
pojemność skokowa [dm ³]	1,3
moc maksymalna (przy 4000 obr/min) [kW]	66
moment obrotowy maksymalny (przy 1750 obr/min) [N·m]	200

Do przeprowadzenia głównych etapów testu wykorzystano paliwo o zawartości 350 ppm siarki (S350), nie zawierającego dodatku biopaliwa (FAME). Do paliwa badawczego dodano specjalne substancje nieorganiczne przygotowane w przemysłowym laboratorium chemicznym, zawierające min. cynk, sód, fosfor oraz krzem (tak, aby ich zawartość w paliwie wynosiła powyżej 0,5 mg/kg). Badania zrealizowano na hamowni silnikowej Instytutu Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku – Białej. Określenie zawartości pierwiastków metali w próbce oleju napędowego oraz w próbkach osadów na rozpylaczach paliwa wykonano na spektrometrze ICP OPTIMA 4300 DV. Pomiar dotyczył następujących pierwiastków (będących elementami różnych związków chemicznych): wapnia, cynku, glinu, ołowiu, chromu, miedzi, magnezu, boru, baru, żelaza, potasu, manganu, molibdenu, sodu, fosforu, krzemu, cyny, tytanu i wolframu (tabela 2).

Tab. 2. Wyniki analizy właściwości fizykochemicznych oleju napędowego użytego w teście

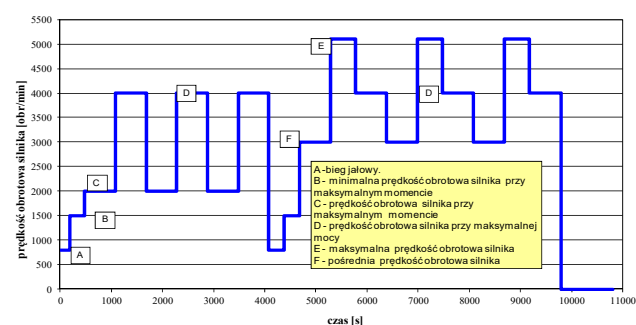
Pierwiastek wg. ASTM D7111	Zawartość w paliwie [mg/kg]	Pierwiastek wg. ASTM D7111	zawartość w paliwie [mg/kg]
Zn	0,82	Mo	< 0,1
Al	< 0,1	Na	1,2
B	< 0,5	Ni	< 0,1
Ba	< 0,1	P	1,7
Ca	< 0,1	Pb	< 0,1
Cr	< 0,3	Si	2,0
Cu	< 0,1	Sn	< 0,5
Fe	0,16	Ti	< 0,1
K	< 0,5	V	< 0,1
Mg	< 0,1	gęstość w 15 °C PN-EN ISO 3675	834,4 [kg/m ³]
Mn	< 0,1	lepkość w 40 °C PN-EN ISO 3104	2,839 [mm ² /s]

Ilość zanieczyszczeń metalicznych znacznie przekraczała zalecaną przez renomowane firmy paliwowe normę ustaloną na poziomie 0,3 mg/kg. Szczególnie przekroczona była zawartość pierwiastków metali: cynku 0,82 mg/kg i sodu 1,2 mg/kg. Zawartość: żelaza, boru, chromu, potasu, cyny nie przekraczała 0,5 mg/kg dla każdego pierwiastka. Zanieczyszczenia niemetaliczne występowały w postaci krzemu 2,0 mg/kg i

fosforu 1,7 mg/kg. Ilość pozostałych, oznaczalnych składników, nie przekraczała wartości 0,1 mg/kg.

2. Przebieg badań

Do ustalenia przebiegu próby posłużono się normą FIAT nr 7.A6310. Odzworowuje ona obciążenie silnika spotykane w trakcie eksploatacji pojazdu przez użytkownika. Czas trwania pojedynczego cyklu wynosił około 3 godzin (rysunek 1).



Rys. 1. Przebieg pojedynczego cyklu testu.

Tab. 3. Przebieg testu z podziałem na etapy

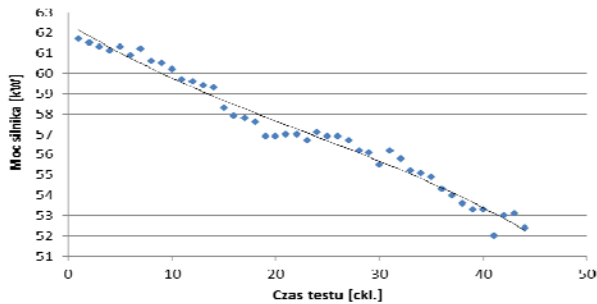
nr etapu	czas pracy [godz.]	rodzaj paliwa	opis konfiguracji
I	252	zanieczyszczone S350	nowy silnik z wtryskiwaczami I
II	126	zanieczyszczone S350	silnik po wymianie wtryskiwaczy na nowe (zamontowane wtryskiwacze II)
III	252	zanieczyszczone S350	silnik po wymianie wtryskiwaczy na wtryskiwacze I, których zewnętrzne powierzchnie końcówek rozpylaczy zostały oczyszczone mechanicznie
IV	252	B7 bez zanieczyszczeń	silnik z wtryskiwaczami I (wymontowane końcówki wtryskiwaczy zostały oczyszczone mechanicznie, a następnie wtryskiwacze zostały zamontowane ponownie do silnika)

Po zamontowaniu silnika na stanowisko hamowniane przeprowadzono wstępne docieranie silnika trwające 2 godziny. Następnie przystąpiono do wykonania charakterystyki zewnętrznej silnika (FLP). Stanowi ona punkt odniesienia dla określenia zmian mocy i momentu silnika w czasie testu. Co 126 godzin oraz każdorazowo przy zmianie konfiguracji wyposażenia były wykonywane charakterystyki prędkościowe mocy maksymalnej. Właściwa część testu obejmowała kilka etapów, których opis został zamieszczony w tabeli 3.

3. Wynik badań doświadczalnych

Etap I testu.

Pierwszy etap obejmował 252 godziny pracy silnika. W trakcie trwania tej części testu zaobserwowano stopniowy spadek mocy silnika (rysunek 2). Krzywą mocy w funkcji czasu trwania testu wykreślono na podstawie wartości maksymalnej mocy w każdym z pojedynczych cykli badawczych.

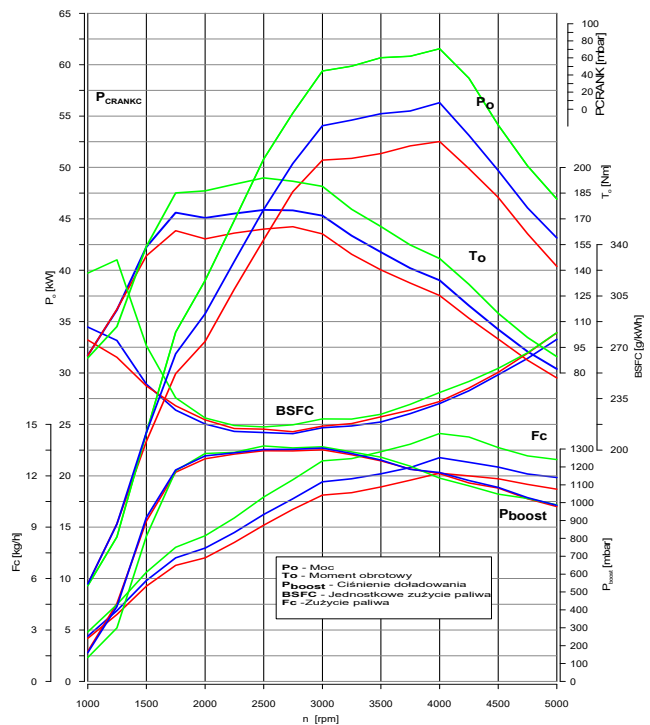


Rys. 2. Zmiany mocy maksymalnej w trakcie I etapu testu

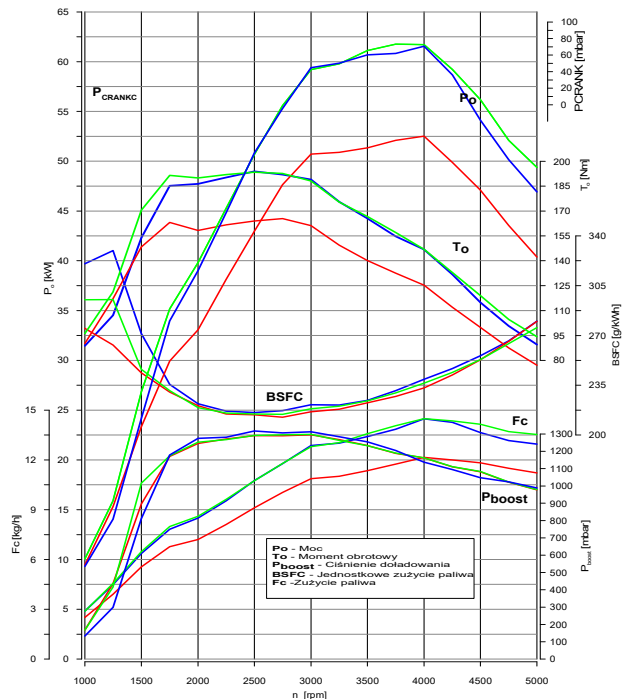
Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykę prędkościową mocy maksymalnej po 126 (linie niebieskiego koloru) oraz po 252 godzinach testu (linie czerwonego koloru). Zostały one porównane z charakterystyką wykonaną przed rozpoczęciem testu (linie zielonego koloru). Po przepracowaniu przez silnik 252 godzin w teście spadek mocy maksymalnej silnika wynosił 15% przy 4000 obr/min, a maksymalnego momentu obrotowego 12 % przy 1750 obr/min.

Następnie, w celu sprawdzenia wpływu stanu technicznego wtryskiwaczy na parametry silnika i wykluczenia innych przyczyn pogorszenia się osiągnięć silnika, wtryskiwacze wymieniono na nowe (wtryskiwacze II). Na rysunku 4 przedstawiono porównanie parametrów silnika przed testem (linie niebieskiego koloru), po 252 godzinach pracy wtryskiwaczy I (linie czerwonego koloru) oraz po zamontowaniu wtryskiwaczy II (linie zielonego koloru).

Z zestawienia tych charakterystyk można wywnioskować, że parametry silnika po wymianie wtryskiwaczy na nowe powróciły do poziomu, jak przed próbą. Godzinowe zużycie paliwa pozostało na niezmienny poziomie prawie w całym zakresie prędkości obrotowej, a jedynie w zakresie niższych prędkości wystąpiły nieznaczne różnice. Mimo niezmiennego zużycia godzinowego paliwa znacznie zwiększyła się moc i moment obrotowy silnika. Należy wiązać to z: jakością rozpylania paliwa, wielkością kropeł rozpylonego paliwa i zasięgiem strugi paliwa w czasie wtrysku.



Rys. 3. Charakterystyki prędkościowe silnika zasilanego zanieczyszczonym olejem napędowym S350 w trakcie I etapu testu.



Rys. 4. Charakterystyki prędkościowe silnika zasilanego zanieczyszczonym olejem napędowym S350 w trakcie I etapu testu.

W związku z zaobserwowanym spadkiem mocy zdemontowane wtryskiwacze zostały poddane oględzinom stanu zewnętrznego. Na tej podstawie stwierdzono dużą ilość zanieczyszczeń, jaka osadziła się na końcówkach rozpylaczy. Wokół wszystkich otworków rozpylaczy utworzyły się narosty w postaci kraterów o nieregularnych kształtach. Ilość osadów smolistych była na tyle duża, że zakłócały przepływ strugi paliwa wypływającego z otworków. Z tego powodu pogorszyła się jakość rozpylania, a więc także zmniejszyła się moc silnika.

Dla porównania na rysunku 5 przedstawiono widok końcówki rozpylacza nowego wtryskiwacza, a na rysunku 6 fotografię wylotu jednego z otworków rozpylacza wykonaną w dużym powiększeniu. Można zauważyć znaczną ilość nagaru zgromadzonego u wylotu jednego z otworków rozpylacza.

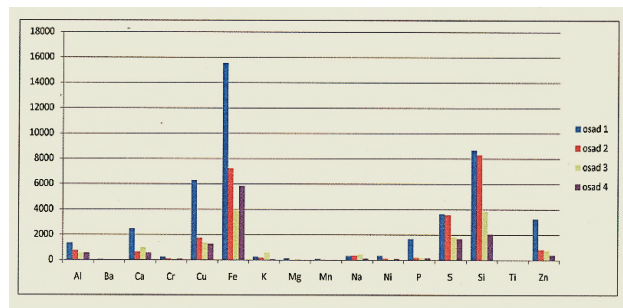


Rys. 5. Końcówka rozpylacza nowego wtryskiwacza.



Rys. 6. Otworek rozpylacza w powiększeniu po przepracowaniu 252 godzin.

Osady znajdujące się na końcówkach wtryskiwaczy zostały poddane badaniu spektrometrem, w celu określenia składu chemicznego, w laboratorium chemicznym Instytutu Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL (rysunek 7).

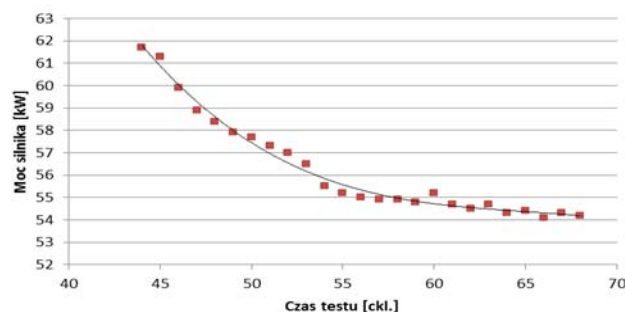


Rys. 7. Analiza chemiczna osadów pobranych z powierzchni zewnętrznych końcówek wtryskiwaczy.

W osadach stwierdzono dużą koncentrację zanieczyszczeń metalicznych takich samych jak znajdujących się w paliwie, które było spalane przez silnik. Najwięcej osadziło się żelaza, krzemu, siarki, miedzi i cynku. W wyniku analizy spektrometrycznej stwierdzono także niewielką zawartość glinu, wapnia, potasu i sodu. Ilość zanieczyszczeń nie była jednakowa na wszystkich wtryskiwaczach. Największa koncentracja pierwiastków chemicznych znajdowała się na wtryskiwaczu z pierwszego cylindra, a najmniejsza na wtryskiwaczu z czwartego cylindra.

Etap II testu.

Aby sprawdzić, czy zjawisko spadku mocy nastąpi na innych wtryskiwaczach, zamontowano nowe wtryskiwacze (wtryskiwacze II) i kontynuowano próbę. Po wymianie, a następnie po 126 godzinach pracy silnika z wtryskiwaczami II, wykonano charakterystykę prędkościową mocy maksymalnej. Podobnie jak w przypadku pierwszego kompletu wtryskiwaczy (wtryskiwacze I), wystąpiło zjawisko zmniejszenia maksymalnej mocy i momentu silnika (rysunek 8). Początkowo następowało znaczące zmniejszanie wartości mocy, natomiast od 55 cyklu testu nastąpiła pewna stabilizacja osiąganej mocy na poziomie około 55 kW.

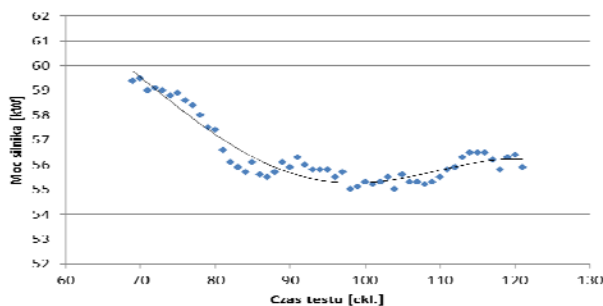


Rys. 8. Zmiany mocy maksymalnej w trakcie II etapu testu.

Etap III testu.

Po zakończeniu II etapu badań, ponownie zamontowano wyjściowy komplet wtryskiwaczy (wtryskiwacze I), które uprzednio poddano mechanicznemu oczyszczeniu zewnętrznej powierzchni końcówek rozpylaczy z osadów, jakie się na nich utworzyły w trakcie początkowych 252 godzin próby. Została wykonana charakterystyka zewnętrzna. Okazało się, że mechaniczne oczyszczenie końcówek wtryskiwaczy wpłynęło na znaczną poprawę parametrów silnika. Moc maksymalna wzrosła o 6,4 kW, a moment obrotowy o 9,7 N·m (linia niebieskiego koloru). Oczyszczenie wylotów z otworków rozpylaczy wpłynęło na poprawę jakości rozpylania, a co za tym idzie na wzrost mocy i momentu silnika.

Próbie kontynuowano, rejestrując parametry pracy silnika (etap III), ponownie zaobserwowano zmniejszenie mocy (rysunek 10).



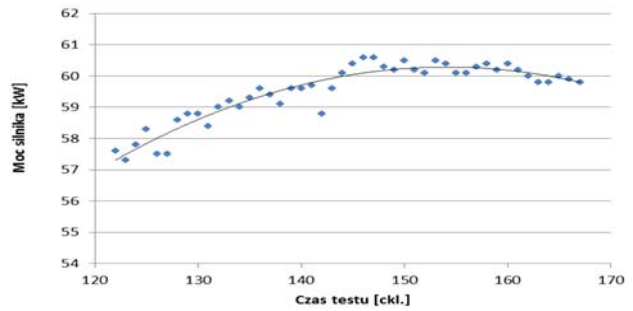
Rys. 10. Zmiany mocy maksymalnej w trakcie III etapu testu.

W trakcie tego etapu zostały wykonane charakterystyki prędkościowe mocy maksymalnej silnika: po oczyszczeniu wtryskiwaczy I, po 126 godzinach pracy wtryskiwaczy I oraz po 252 godzinach pracy wtryskiwaczy I. Z charakterystyk wynika, że w ciągu 126 godzin próby nastąpiło zmniejszenie mocy o 4,6 kW przy 4000 obr/min (o 7,8 %), a momentu obrotowego o 4,4 Nm przy 1750 obr/min (o 2,6 %). W trakcie kolejnych 126 godzin testu moc maksymalna zmniejszyła się o 1,0 kW, a maksymalny moment obrotowy zmniejszył się o 0,4 Nm. Po szybkim zmniejszeniu mocy w początkowych godzinach tego etapu, nastąpiło ustabilizowanie się mocy na poziomie około 56 kW, co stanowiło 85% mocy nominalnej silnika.

Etap IV testu.

Przed rozpoczęciem kolejnego etapu testu wtryskiwacze I wymontowano z silnika i ponownie oczyszczono ich rozpylacze. Po mechanicznym oczyszczeniu końcówek rozpylaczy zamontowano je do silnika. Aby sprawdzić czy proces osadzania się zanieczyszczeń będzie następował przy stosowaniu innego paliwa, przez dalszą część próby silnik był zasilany olejem napędowym B7 (7% dodatku biopaliwa), który nie zawierał zanieczyszczeń metalicznych.

W trakcie testu maksymalna moc silnika stopniowo zwiększała się (rysunek 12).



Rys. 12. Zmiany mocy maksymalnej w trakcie IV etapu testu.

Tu również zostały wykonane charakterystyki prędkościowe mocy maksymalnej:

- po ponownym oczyszczeniu wtryskiwaczy I, na początku IV etapu testu (po 756 godzinach testu),
- po 126 godzinach pracy przy zasilaniu paliwem B7 (882 godzinach testu),
- po 252 godzinach pracy przy zasilaniu paliwem B7 (1008 godzinach testu).

Maksymalna moc i moment obrotowy pozostały praktycznie na niezmiennym poziomie przez 252 godziny testu. Oznacza to, że jakość paliwa i zawarte w nim zanieczyszczenia chemiczne mają znaczący wpływ na tworzenie osadów na powierzchniach rozpylaczy.

Podsumowanie

Przeprowadzone w ramach pracy badania potwierdzają, że na pracę wtryskiwaczy ma wpływ zanieczyszczenie paliwa nieorganicznymi związkami chemicznymi, które mają w swojej budowie pierwiastki takie jak: cynk, sód, potas, krzem. Ich obecność w paliwie powoduje osadzanie się w okolicy otworków rozpylacza osadów, zakłócających wypływ strugi paliwa. W wyniku tego procesu jakość rozpylania, a co za tym idzie parametry pracy silnika, zmniejszają się. Działanie układu zasilania silnika ZS może być zakłócone przez niewielką ilość nieorganicznych zanieczyszczeń chemicznych. Dlatego należy zadbać o czystość paliwa także w tym aspekcie. Aktualnie obowiązujące normy jakości paliw nie przewidują badania paliwa w tym zakresie.

Bibliografia

1. Abramek K. F., Osipowicz T., Gołębiewski W., Kowalek S., Wpływ zanieczyszczeń paliwa na zużycie wybranych elementów układu Common Rail. Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 2014, nr 5.
2. Dernet J., Hespel C., Foucher F., Houillé S., Mounad'm-Rousselle C. Influence of physical fuel properties on the injection rate in a Diesel injector, Fuel 96 (2012), 153–160.
3. Galle J.; Verhelst S.; Sierens R.; Goyos L.; Castaneda R.; Verhaege M.; Vervaeke L.; Bastiaen M. Failure of fuel injectors in a medium speed diesel engine operating on bio-oil, Biomass and Bioenergy, 2012, Vol. 40, 27-35.
4. Konieczny Ł., Adamczyk B., Adamczyk G. Diagnostyka i regeneracja wtryskiwaczy CR, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Transport z. 86, Nr kol. 1926, 2015, 65-73.

5. Osadnik, P., Czech P., Łazarz B., Matyja T., Juzek M., Wpływ zanieczyszczenia paliwa na charakterystykę pracy wtryskiwaczy Common Rail. Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 2016, nr 6.
6. Osipowicz T., Abramek K. Katalityczna obróbka paliwa we wtryskiwaczach silnika o zapłonie samoczynnym, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, Vol. 16, No. 1, 2014, 22-28.
7. Osipowicz T., Wpływ biopaliw na działanie układów Common Rail. Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 2014, nr 2.
8. Stobnicki B., Badawcza analiza wtrysku paliwa w aspekcie właściwości ekologicznych silnika o zapłonie samoczynnym, Politechnika Poznańska, Poznań, 2013.
9. Stoeck T., Osipowicz T., Analiza uszkodzeń i stopnia zużycia wtryskiwaczy Common Rail Bosch. Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 2013, nr 10.
10. Stoeck T., Osipowicz T., Abramek K. Metodyka naprawy wtryskiwaczy elektromagnetycznych układów zasilania Common Rail Denso, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, Vol. 16, No. 2, 2014, 270-275.

Autorzy:

Dr hab. inż. **Tomasz Kniefel**, Prof. ATH - Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej,

Dr hab. inż. **Jacek Nowakowski**, Prof. ATH - Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej,

Dr inż. **Andrzej Suchecki** - Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej,

Effect of pollutants in diesel fuel on operation functionality of fuel injectors in the Common Rail system

This paper presents an assessment of the impact of chemical pollutants in diesel fuel on the parameters of the diesel super charged engine. The scope of work included preparation of fuel, especially polluted, especially metal compounds, which can be implemented in both the production of fuel and engine life. Spectral analysis was carried out of the diesel fuel. Subsequently engine durability test was performed, which aimed to appoint registration courses of parameters such as: power and torque, hourly and specific fuel consumption and boost pressure. The work is divided into stages, which included the work of contaminated fuel powered engine, the work of contaminated fuel powered engine with cleaned nozzles, powered engine run clean fuel with cleaned nozzles. At each stage changes in the maximum engine power was recorded. Spectral analyzes of sediments from the nozzles was carried out. The paper presents a comparative analysis of engine operating parameters.

Key words: diesel engine, Common Rail injection system, injector, diesel fuel.