

Aleksander Mazanek
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Ocena parametrów pracy aparatury wtryskowej typu *Common Rail* przy zasilaniu paliwami o różnej zawartości biokomponentu

Wprowadzenie

Dynamiczna ekspansja silników o zapłonie samoczynnym w pojazdach samochodowych powoduje, że już ponad połowa wszystkich samochodów sprzedawanych w Europie jest wyposażona we wspomniane zespoły napędowe. Podstawowym źródłem napędu pojazdów samochodowych wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym są paliwa na bazie ropy naftowej. Paliwa te, z punktu widzenia bliższej lub dalszej przyszłości, muszą być zastąpione innymi nośnikami energii. Perspektywy wyczerpania się zasobów paliw kopalnych, obawy o stan środowiska naturalnego, a przede wszystkim – rosnące ceny ropy naftowej znacznie przyspieszyły zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii [1, 2]. Alternatywnym paliwem do silników o zapłonie samoczynnym mogą być paliwa odnawialne produkowane z surowców roślinnych, w tym biopaliwa. W Unii Europejskiej pomocą w podejmowaniu promocyjnych działań są Dyrektywy [3, 4] dotyczące wprowadzenia przez kraje członkowskie UE biopaliw w transporcie samochodowym, w ilościach odpowiednio: 2% do 2005 r.; 5,75% do 2010 r.; 20% do 2020 roku. Biopaliwa są promowane w Unii Europejskiej od ponad 10 lat, jednak tempo ich wdrażania jest dalece niezadowalające. Istnieje wiele czynników, które hamują rozwój biopaliw. Jednym z nich jest obawa producentów samochodów o trwałość i niezawodność pracy silników, a w szczególności układu zasilania – wtrysku paliwa. Wprowadzenie na rynek nowych biokomponentów i biopaliw, odmiennych pod względem struktury chemicznej i właściwości, musi rodzić obawy, że wypracowane przez lata dostosowanie paliw węglowodorowych do silników samochodowych zostanie niebezpiecznie zaburzone [5].

Silnik spalinowy jest podstawowym źródłem napędu pojazdów samochodowych. Zespoły napędowe wraz z postępem cywilizacji ulegają nieustannej modyfikacji konstrukcyjno-technologicznej. W przeszłości silniki spalinowe były konstruowane z myślą o uzyskaniu wysokich wskaźników roboczych. Aktualnie najważniejszym stimulatorem ich rozwoju jest stale ograniczana uciążliwość dla środowiska naturalnego, czyli ograniczenie emisji substancji toksycznych, w tym – efektu cieplarnianego wywołanego emisją CO₂, hałasu oraz obniżenie zużycia paliwa. Wymagania w zakresie poprawy właściwości proekologicznych silników są wnioskowane przez urzędy ochrony środowiska, jak również przez samych użytkowników, co świadczy o wzroście świadomości ekologicznej społeczeństw [6].

Obecnie większość europejskich producentów silników posiada w swojej ofercie samochody z układami wtrysku paliwa typu CR (*Common Rail*), stosowanymi w silnikach z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Wynika to z mniejszego jednostkowego zużycia paliwa w porównaniu z silnikami benzynowymi oraz z korzystniejszych parametrów trakcyjno-użytkowych uzyskiwanych przez te jednostki napędowe.

Postęp technologiczny w dziedzinie silników ZS doprowadził do znacznego wzrostu zainteresowania tego rodzaju napędem. Najnowsze konstrukcje silników różnią się bardzo od hałaśliwych jednostek produkowanych według tradycyjnych rozwiązań konstrukcyjnych. Szczególnie turbodoładowane silniki o wtrysku bezpośrednim (DI – *Direct Injection*), w tym silniki wykorzystujące system wtrysku *Common Rail*, odznaczają się bardzo wysokim średnim

ciśnieniem efektywnym, zapewniającym wyjątkowo dobre wskaźniki robocze przy zachowaniu małego jednostkowego zużycia paliwa.

Reasumując, należy podkreślić, że postęp technologiczny, jaki dokonuje się w tej dziedzinie, musi uwzględniać uzyskanie wysokich walorów dynamiki wskaźników roboczych pojazdów, ich niezawodności, poziomu bezpieczeństwa i wymagań w zakresie ochrony środowiska oraz atrakcyjności handlowej.

Pomimo przeprowadzenia wielu prac badawczych w dalszym ciągu istnieją kontrowersje związane z eksploatacją nowoczesnych silników o zapłonie samoczynnym zasilanych biopaliwem. Należy podkreślić, że specyfika danego rynku paliwowego, użytkowanych na nim pojazdów samochodowych oraz sposobu ich eksploatacji wymaga każdorazowo rozpoznania zagrożeń dla silników ZS, stwarzanych przez stosowane biopaliwo. Nadal istnieje wiele obszarów wymagających dalszych badań, zwłaszcza w zakresie współdziałania biopaliwa z olejem silnikowym, kompatybilności materiałów konstrukcyjnych silników z biopaliwem, trwałości elementów wtrysku paliwa, a także właściwości eksploatacyjnych i proekologicznych badanych pojazdów.

Wysoka precyzja wykonania funkcjonalnych par i złożeń roboczych elementów układów wtryskowych *Common Rail* (tolerancje wykonania rzędu 1 μm) sprawia, że są one bardzo podatne na uszkodzenia spowodowane złą jakością paliwa. W miarę wzrostu udziału biokomponentów (FAME) w oleju napędowym wzrasta zagrożenie dla silników i współpracujących z nimi układów. Z drugiej strony, wiele przeprowadzonych za granicą badań dowodzi, że nowoczesne silniki o zapłonie samoczynnym wyposażone w wysokociśnieniowe układy wtrysku paliwa (*Common Rail*, pompowtryskiwacze), mogą być bez szkody eksploatowane na paliwie zawierającym do 20% (V/V) FAME. W związku z powyższym, wielu europejskich producentów dopuszcza możliwość eksploatacji swoich pojazdów na wspomnianym paliwie, bez konieczności modyfikacji lub specjalnego przygotowania silnika. Wszystko to w sposób jednoznaczny dowodzi konieczności prowadzenia dalszych prac badawczo-rozwojowych, mających na celu potwierdzenie możliwości „bezpiecznej” eksploatacji nowoczesnych silników o zapłonie samoczynnym zasilanych biopaliwem i wskazanie wynikających stąd korzyści. Prace tego typu prowadzone w innych krajach w konsekwencji doprowadziły do dopuszczenia do eksploatacji pojazdów zasilanych olejem napędowym o zawartości FAME powyżej 5% (V/V).

Oddzielnym problemem towarzyszącym eksploatacji pojazdów na biopaliwa jest ich ograniczona kompatybil-

ność z materiałami konstrukcyjnymi i olejami silnikowymi. Należy jednak oczekiwać, że rygorystyczne stanowisko producentów silników ulegnie zmianie z chwilą wprowadzenia nowego rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie wymagań dla biopaliw ciekłych, w związku z nowelizacją normy EN 590 podwyższającej dopuszczalną ilość FAME w paliwie do 7% (V/V).

Paliwo przeznaczone do zasilania szybkobieżnych silników o zapłonie samoczynnym powinno mieć właściwości zapewniające:

- prawidłowe funkcjonowanie całego układu paliwowego,
- prawidłowe i efektywne spalanie,
- maksymalną redukcję toksycznych spalin,
- ograniczenie zagrożenia dla środowiska naturalnego.

Na prawidłowe funkcjonowanie układu zasilania paliwem silnika o zapłonie samoczynnym mają wpływ następujące fizykochemiczne właściwości paliwa:

- gęstość,
- lepkość,
- parametry reologiczne w niskiej temperaturze,
- smarność,
- zawartość zanieczyszczeń stałych i wody,
- lotność.

Rodzaj paliwa i parametry procesu wtrysku determinują jakość tworzonej mieszanki palnej w komorze spalania [7]. Wpływają one w istotny sposób na przebieg procesu spalania, ponieważ:

- mają decydujący wpływ na okres opóźnienia zapłonu, od którego zależy jakość i czas przebiegu następnych okresów spalania,
- determinują jakość mieszanki paliwowo-powietrznej,
- w silniku o zapłonie samoczynnym, skutek wtrysku paliwa do cylindra, rozkład paliwo-powietrze jest bardzo niejednorodny.

Fazy wtrysku paliwa są zasadniczym parametrem regulacyjnym kontrolującym emisję NO_x oraz innych toksycznych składników, w tym sadzy. Paliwo doprowadzone do cylindrów silnika jest źródłem energii chemicznej, która ulega zamianie (całkowicie lub częściowo – podczas spalania niepełnego) na energię cieplną w procesie spalania. Przebieg wywiązywania ciepła podczas spalania decyduje o wartości średniego ciśnienia indykowanego w cylindrze oraz sprawności obiegu rzeczywistego, a także – o obciążeniu cieplnym i mechanicznym poszczególnych elementów silnika.

Spośród właściwości fizykochemicznych, bardzo duży wpływ na prawidłowe funkcjonowanie układu zasilania paliwem silnika o zapłonie samoczynnym ma lepkość. Decyduje ona o wartości oporów przepływu paliwa przez

przewody, filtry, dysze rozpylacza, a także o przebiegu procesu tłoczenia oraz jakości jego rozpylenia. Gęstość paliwa stanowi cechę charakterystyczną z uwagi na fakt,

że ilość paliwa każdorazowo wtrysniętego do komory spalania jest sterowana objętościowo lub czasowo we wtryskiwaczach sterowanych elektronicznie.

Część doświadczalna

Przeprowadzone badania miały charakter poznawczy i dotyczyły wpływu FAME zawartego w biopaliwach: B10, B20 i B30 na efektywność pracy wtryskiwaczy piezoelektrycznych w nowoczesnych, turbodoładowanych silnikach o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wysokociśnieniowym wtryskiem paliwa typu *Common Rail*.

Jako paliwa badawcze użyto:

- biopaliwo B10, zawierające 10% (V/V) uszlachetnionych estrów metylowych kwasów tłuszczowych FAME i 90% (V/V) oleju napędowego Ekodiesel Ultra,
- biopaliwo B20, zawierające 20% (V/V) uszlachetnionych estrów metylowych kwasów tłuszczowych FAME i 80% (V/V) oleju napędowego Ekodiesel Ultra,
- biopaliwo B30, zawierające 30% (V/V) uszlachetnionych estrów metylowych kwasów tłuszczowych FAME i 70% (V/V) oleju napędowego Ekodiesel Ultra.

Wspomniane biopaliwa skomponowano wykorzystując paliwa handlowe: olej napędowy (zakupiony na stacji) zawierający 5% (V/V) FAME i bioester B100 zawierający 100% (V/V) FAME produkcji Rafinerii Nafty TRZEBINIA S.A. Produkty finalne biopaliw zawierały wymaganą zawartość % (V/V) FAME. Wybrane właściwości badanych paliw i biopaliw przedstawiono w tabelicy 1.

„zerowym”. Sporządzono charakterystykę pracy wtryskiwaczy, w tym wielkości przelewu objętości paliwa. Zakres charakterystyki pracy wtryskiwacza piezoelektrycznego obejmował następujące stany/etapy:

- „bieg jałowy silnika” – czas otwarcia wtryskiwacza: 400 μ s, ciśnienie robocze: 25 MPa, częstotliwość otwarcia: 10 Hz, ilość wtrysków: 2000,
- „pełne obciążenie silnika” – czas otwarcia wtryskiwacza: 1200 μ s, ciśnienie robocze: 100 MPa, częstotliwość otwarcia: 20 Hz, ilość wtrysków: 400,
- „pełne obciążenie wtryskiwaczy” – czas otwarcia wtryskiwacza: 800 μ s, ciśnienie robocze: 140 MPa, częstotliwość otwarcia: 10 Hz, ilość wtrysków: 400,
- „zdolność podziałowa wtryskiwaczy” – czas otwarcia wtryskiwacza: 400 μ s, ciśnienie robocze: 100 MPa, częstotliwość otwarcia: 40 Hz, ilość wtrysków: 1000,
- „mikrodawki” – czas otwarcia wtryskiwacza: 200 μ s, ciśnienie robocze: 22 MPa, częstotliwość otwarcia: 20 Hz, ilość wtrysków: 6000.

Wykonano serię pomiarów dwóch kompletów wtryskiwaczy, przypisanych odpowiednio samochodom badawczym A i B. Rozpylacze wtryskiwaczy były przed badaniami poddane kąpeli w wannie ultradźwiękowej, w celu

oczyszczenia ich wewnętrznych powierzchni. Przebieg eksploatacyjny pracy wtryskiwaczy samochodów badawczych to ok. 150 tys. km.

Test wtryskiwaczy wymontowanych z pojazdów badawczych przeprowadzono na stole probierczym. Celem testu była ocena wydatku paliwa oraz strumienia przelewów wtryskiwacza przy określonych warunkach pracy i porównanie ich z warunkami danych nastawów fabrycznych. W przypadku braku danych od producenta powyższy wariant można wykorzystać do oceny wtryskiwaczy. W założeniu badań, jako

Tabela 1. Wybrane właściwości badanych paliw i biopaliw*

| Oznaczenie | Jednostka | Ekodiesel Ultra F 4,8 | Biopaliwo B10 | Biopaliwo B20 | Biopaliwo B30 |
|--|----------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
| Liczba cetanowa | | 51,9 | 52,2 | 53,5 | 53,2 |
| Gęstość w temp. 15°C | [kg/m ³] | 834,0 | 835,9 | 843,0 | 843,0 |
| Lepkość w temp. 40°C | [mm ² /s] | 2,69 | 2,70 | 2,76 | 2,89 |
| Zawartość siarki | [mg/kg] | 7,8 | 8,6 | 7,8 | 7,5 |
| Zawartość FAME | [% (V/V)] | 4,8 | 9,9 | 20,0 | 30,0 |
| Zawartość WWA | [% (m/m)] | 3,1 | - | 2,4 | - |
| Pozostałość po koksowaniu z 10% poz. po destylacji | [% (m/m)] | 0,01 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |

* Badania własne

Przed rozpoczęciem badań dokonano mikrometrycznych pomiarów elementów roboczych zestawu czterech wtryskiwaczy piezoelektrycznych Siemens o przebiegu

W przypadku braku danych od producenta powyższy wariant można wykorzystać do oceny wtryskiwaczy. W założeniu badań, jako

punkt odniesienia pracy wtryskiwaczy przyjęto „zerowy” przebieg eksploatacyjny.

Do poszukiwania wspomnianych związków i zależności wykorzystano stanowisko badawcze do testowania pomp i wtryskiwaczy systemów *Common Rail* STPiW – 2 (Autoelektronika Kędzia), które składało się z następujących elementów:

- pompy wysokiego ciśnienia, napędzanej silnikiem elektrycznym,
- przewodów i zasobnika (szyny) wysokiego ciśnienia,
- zestaw menzurek do pomiaru wydatku i przelewów,
- aparatury sterującej pracą silnika elektrycznego, pompy i wtryskiwaczy.

Testowanie polegało na badaniu wtryskiwacza w cyklu pomiarowym kontroli i wyznaczeniu przyjętych parametrów, a następnie porównaniu ich. Istnieje wiele firm zajmujących się produkcją urządzeń testujących wtryskiwacze (m.in. BOSCH, NOVA-DITEX, Autoelektronika Kędzia).

Urządzenie testujące przedstawiono na fotografii 1. W skład stanowiska badawczego wchodzi: silnik elektrycz-



Fot. 1. Widok ogólny stanowiska do testowania pomp i wtryskiwaczy systemów *Common Rail* STPiW – 2 produkcji Autoelektronika Kędzia (fot. autor)

Podsumowując przebieg badań, można sformułować wnioski, że istotny wpływ na wielkość dawki paliwa i strumienia przelewu miały wielkości osadów w rozpylaczu badanych wtryskiwaczy, zasilanych przedmiotowymi biopaliwami.

Główne parametry pracy wtryskiwaczy w zadanych cyklach/etapach obciążenia (w stosunku do pomiarów wyjściowych) zestawiono w tablicy 2.

Zawartość FAME w oleju napędowym skutkuje zmniejszeniem wydatku paliwa i zwiększeniem strumienia

ny połączony z pompą wysokiego ciśnienia (zamontowaną na stałe) oraz układ służący do badania wtryskiwaczy (wielkości wtryskiwanej dawki paliwa i strumienia paliwa trafiającego na przelew).

Ponadto układ daje możliwość obserwacji kształtu strugi rozpylanego paliwa oraz zmiany parametrów wtrysku (m.in. ciśnienia paliwa w zasobniku, wielkości dawek).

Pierwszym etapem badań był pomiar szczelności gniazda rozpylacza, który polegał na obserwacji zachowania końcówki rozpylacza poddanego wysokiemu ciśnieniu, ale bez impulsów wyzwalających wtrysk. Wszelkie nieszczelności dyskwalifikują dany wtryskiwacz do dalszej pracy.

Drugi etap badań był realizowany w cyklu automatycznym – obejmował pomiary przy różnych ciśnieniach, czasach „wysterowania” otwarcia wtryskiwaczy i częstotliwości impulsów, przy jednoczesnym zachowaniu stałej temperatury płynu testującego. Badane są wówczas dawki pilotażowe biegu jałowego, częściowego i pełnego obciążenia oraz wielkości strumienia przelewów. Uzyskane wyniki pomiarów porównywano z pracą wtryskiwaczy o zerowym przebiegu eksploatacyjnym.

Wykonano serię pomiarów dla dwóch kompletów wtryskiwaczy przypisanych do samochodów badawczych A i B.

W ramach prowadzonej pracy badawczej oceniono wpływ oddziaływania biopaliw: B10, B20 i B30 na efektywność pracy wtryskiwaczy po przebiegu eksploatacyjnym 10 tys. km.

Wykonano serię pomiarów każdego z zestawów badanych wtryskiwaczy, a następnie uzyskane wyniki uśredniono. Niepewność uzyskanych wyników oszacowano na podstawie odchylenia standardowego, które dla wszystkich wyliczonych wartości nie przekracza 4% mierzonych objętości.

Podczas eksploatacji samochodów badawczych zaobserwowano obniżenie dawki paliwa przy jednoczesnym wzroście strumienia przelewu.

Podsumowanie

przelewów w badanych wtryskiwaczach. Główną przyczynę takiego zjawiska upatruje się w procesie tworzenia nierozpuszczalnych osadów w rozpylaczach. Zmiany rozpatrywanych parametrów są najbardziej widoczne podczas pracy wtryskiwaczy przy niskich ciśnieniach i małych obciążeniach (spadek dawki od 17÷30%). Eksploatacja ograniczonej liczby samochodów badawczych (dwóch egzemplarzy) w zróżnicowanych warunkach pracy silnika utrudnia jednak uzyskanie wysokiej precyzji wyników badań.

Tablica 2. Procentowy udział wielkości spadku dawki i zwiększenia strumienia przelewów paliwa w badanych wtryskiwaczach zasilanych biopaliwami: B10, B20 i B30

| Rodzaj paliwa do zasilania wtryskiwacza | B10 | | B20 | | B30 | |
|---|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| | Spadek dawki [%]* | Wzrost przelewu [%]* | Spadek dawki [%]* | Wzrost przelewu [%]* | Spadek dawki [%]* | Wzrost przelewu [%]* |
| Bieg jałowy 400 μs, 25 MPa, 10 Hz, 2000 wtrysków | 9÷10 | 7 | 9÷13 | 7÷9 | 13÷15 | 9÷10 |
| Pełne obciążenie silnika 1200 μs, 100 MPa, 20 Hz, 400 wtrysków | 5÷7 | 7 | 8÷10 | 6÷10 | 13÷14 | 6÷13 |
| Pełne obciążenie wtryskiwaczy 800 μs, 140 MPa, 10 Hz, 400 wtrysków | 6÷7 | 14÷18 | 10 | 15÷21 | 19÷21 | 49÷50 |
| Zdolność podziałowa wtryskiwaczy 400 μs, 100 MPa, 40 Hz, 1000 wtrysków | 15÷17 | 5 | 21÷23 | 7 | 24÷26 | 11 |
| Mikrodawki 200 μs, 22 MPa, 20 Hz, 6000 wtrysków | 17÷24 | 2÷3 | 20÷23 | 4÷5 | 27÷30 | 5 |

* Zmiany w odniesieniu do wartości wyjściowych

Literatura

- [1] Baczewski K., Kałdoński T.: *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym WKŁ*. Warszawa, ISBN 83-206-1510-0.
- [2] *Dyrektywa 2003/30/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 8 maja 2003 r. w sprawie wspierania użycia w transporcie biopaliw lub innych paliw odnawialnych.*
- [3] *Dyrektywa Rady 2003/96/WE z dnia 27 października 2003 r. w sprawie restrukturyzacji wspólnotowych przepisów ramowych dotyczących opodatkowania produktów energetycznych i energii elektrycznej.*
- [4] Gajewska K.: *Biopaliwa – rozwiązania prawne w zakresie akcyzy w wybranych państwach Unii Europejskiej*. „Biuletyn ITN”, styczeń-marzec 2007, s. 22–27.
- [5] Kulczycki A.: *Rola badań naukowych w rozwoju biopaliw*. „Przemysł Chemiczny” 2006, 85/12, s. 1576–1578.
- [6] Merkisz J.: *Tendencje rozwojowe silników spalinowych*. „Silniki Spalinowe” 2004, nr 1, s. 28–39.
- [7] *Zielona księga o bezpieczeństwie zapotrzebowania na energię*, 2000.



Dr inż. Aleksander MAZANEK – absolwent Politechniki Krakowskiej na Wydziale Mechanicznym. Pracę rozpoczął w Instytucie Technologii Nafty w 2003 r., w Zakładzie Badań Eksploatacyjnych. Jest współautorem 12 artykułów publikowanych w czasopismach krajowych oraz 6 dokumentacji ITN. Obecnie jest kierownikiem laboratorium badań eksploatacyjnych w Pionie Technologii Nafty INiG.