

Aleksander Mazanek

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Tendencje rozwoju silników o zapłonie samoczynnym w ujęciu proekologicznym

W artykule przedstawiono informacje dotyczące rozwoju proekologicznej techniki silników o zapłonie samoczynnym. Podkreślono, że dla spełnienia wymogów ochrony środowiska przez silniki o ZS nie wystarczają już pojedyncze środki, lecz niezbędne są kompleksowe działania.

Słowa kluczowe: silnik Diesla, emisja spalin, ekologia.

Tendencies in the development of diesel engines in terms of ecology

The article presents information on the development of environment-friendly technology in diesel engines. It is emphasized, that to meet environmental requirements of ZS engines, single action is no longer sufficient, there is need for comprehensive action.

Key words: Diesel engine, exhaust emission, ecology.

Wstęp

Podstawowe tendencje w konstrukcji silników i całych pojazdów są obecnie bardzo zależne od wymagań norm emisji szkodliwych substancji spalin, a także przepisów dotyczących zmniejszenia emisji dwutlenku węgla (CO₂). Transport samochodowy jest jednym z największych źródeł szkodliwej emisji spalin i w ciągu ostatnich kilku lat zaobserwowano zmiany w konstrukcji silników spalinowych, będące odpowiedzią na wymagania prawne w Unii Europejskiej (wprowadzenie normy Euro 5 w latach 2009–2011 i zapowiadana na lata 2014–2015 norma Euro 6). Dodatkowym czynnikiem wpływającym na modyfikacje konstrukcyjne pojazdów jest wzrost nacisku na zmniejszanie emisji gazów cieplarnianych – przede wszystkim wskazano na CO₂, ale również na inne gazy tego rodzaju wytwarzane jako efekt niecałkowitego spalania (takie jak CH₄), a także będące

wynikiem reakcji ubocznych występujących w systemie oczyszczania spalin [12].

Zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego powodowanego przez motoryzację jest zagadnieniem rozwiązywanym przy ścisłej współpracy specjalistów z różnych gałęzi przemysłu, ze znaczącym udziałem przemysłu naftowego (rafineryjno-naftowego). Przemysł ten w istotny sposób wpływa na spełnienie wielu wymagań użytkowników, dotyczących między innymi zmniejszenia zużycia paliwa, poprawy parametrów roboczych pojazdów i kosztów użytkowania. Nie bez znaczenia jest rola konstruktorów silników, których nadrzędne zadanie stanowi optymalizacja przebiegu procesu spalania, aby maksymalnie wykorzystać energię zawartą w paliwie, ograniczając przy tym ilość gazów spalinowych wydzielanych przez silnik.

Nowe limity poziomu emisji szkodliwych związków spalin według Euro 5 i Euro 6

Wprowadzony ostatnio przez Unię Europejską pakiet nowych przepisów w zakresie emisji zanieczyszczeń z po-

jazdów samochodowych kategorii homologacyjnych M (do transportu osób) i N (do transportu ładunków) obejmuje [13]:

- przepisy Euro 5 i Euro 6 dla tzw. pojazdów lekkich (badanych pod względem emisji zanieczyszczeń na hamowni podwozowej), zastępujące dotychczas obowiązujące Euro 4;
 - przepisy Euro VI dla tzw. pojazdów ciężkich (których badania emisji zanieczyszczeń prowadzi się na silniku zamontowanym na silnikowym stanowisku dynamometrycznym), zastępujące dotychczas obowiązujące Euro V.
- Przepisy dla obu grup pojazdów dotyczą:

- kontroli pojazdów w zakresie emisji zanieczyszczeń (tzw. zanieczyszczeń kontrolowanych i dwutlenku węgla) i cech, które można nazwać „okołoemisyjnymi” (zużycie paliwa, zadymienie spalin, moc silnika);
- homologacji typu pojazdów w zakresie dostępności do informacji niezbędnych do obsługi i napraw;
- homologacji układów ograniczających emisję zanieczyszczeń, przeznaczonych na części zamienne do pojazdów homologowanych zgodnie z odpowiednim rozporządzeniem. W nowych przepisach zachowano występujące dotychczas

formy kontroli typu pojazdów w zakresie emisji zanieczyszczeń i cech „okołoemisyjnych”, tzn.:

- homologację typu pojazdu;
 - kontrolę zgodności produkcji (*conformity of production*) z homologowanym typem;
 - kontrolę zgodności w eksploatacji (*in-service compliance* lub *in-service conformity*) z homologowanym typem;
- lecz do poszczególnych z nich wprowadzono zmiany.

Maksymalne limity emisji zawarte w normie Euro 5 są znacznie mniejsze w stosunku do poprzedniej normy Euro 4 (redukcja od 20% do 80%). Część z tych limitów (dozwolonej masy cząstek spalin na kilometr) będzie ponownie zmniejszona wraz z wprowadzeniem normy Euro 6. Będzie ona wymagała od samochodów osobowych i lekkich pojazdów użytkowych, aby łączna emisja HC, CO, NO_x i cząstek stałych była mniejsza niż 1 gram na kilometr dla pojazdów z silnikami ZS i 1,16 grama na kilometr dla samochodów z silnikami ZI, co stanowi duże wyzwanie dla konstrukcji silników, systemów oczyszczania spalin, a także dla metod i aparatury pomiarowej [1].

Wybrane zagadnienia zmian proekologicznych konstrukcji i technologii silników o zapłonie samoczynnym

Dla spełnienia wymagań ekologicznych przez silniki ZS nie wystarczają już pojedyncze środki. Niezbędne są rozwiązania kompleksowe, co zmusiło projektantów do modyfikacji konstrukcji silnika i rozbudowy układów oczyszczania spalin (EGAS – *exhaust gas aftertreatment system*) [5–9].

W nowych konstrukcjach silników o zapłonie samoczynnym zwiększenie mocy jednostkowej i równoczesne zmniejszanie toksyczności spalin uzyskano dzięki:

- ulepszonemu kształtowi układu dolotowego powietrza do cylindrów, zapewniającemu silne zawirowanie ładunku w komorze spalania lekko obciążonych silników;
- zwiększeniu współczynnika nadmiaru powietrza;
- zwiększeniu liczby zaworów na cylinder;
- doładowaniu silnika (turbodoładowanie, elektrycznie wspomaganie turbodoładowanie, dwustopniowe turbodoładowanie ze zmienną geometrią turbiny);
- chłodzeniu powietrza doładowania;
- bezwirowym komorom spalania w wysokoobciążonych silnikach;
- wysokociśnieniowemu wtryskowi paliwa (pompowtryskiwacze, wysokociśnieniowe wtryskiwacze elektromagnetyczne i piezoelektryczne);
- elektronicznej regulacji parametrów wtrysku w funkcji wielu zmiennych;
- zmianie geometrii komór spalania umieszczonych w tłoku;
- zmniejszeniu objętości skokowej jednostki napędowej (*downsizing*);

- zwiększeniu stopnia sprężania przy małej prędkości obrotowej i zmniejszeniu przy dużej;
- zmianie czasu otwarcia i zamknięcia zaworów;
- recykulacji gazów spalinowych (EGR – *exhaust gas recirculation*);
- filtrom cząstek stałych (DPF – *diesel particulate filter*);
- katalitycznym reaktorom utleniającym (DOC – *diesel oxidation catalyst*);
- selektywnej redukcji katalitycznej (SCR – *selective catalytic reduction*);
- pułapką tlenków azotu (LNT – *lean NO_x trap*);
- diagnostyce pokładowej OBD-II.

Silniki spalinowe opracowane w kilku ostatnich latach emitują znacznie mniej substancji szkodliwych, stały się też bardziej ekonomiczne. Pozostaną one najprawdopodobniej najważniejszym źródłem napędu samochodów aż do momentu wprowadzenia na dużą skalę bezemisyjnych systemów napędowych [11]. Ciągły nacisk legislacyjny w kierunku zmniejszenia emisji przez pojazdy z silnikiem o zapłonie samoczynnym doprowadził, obok innych zmian, do wdrożenia zaawansowanych układów wtrysku paliwa i oczyszczania spalin, w tym filtrów cząstek stałych. Szerokie zastosowanie systemów *common rail* w silnikach ZS umożliwiło uzyskanie mocy efektywnej przewyższającej moc silników benzynowych. Wysiłki konstruktorów ukierunkowane były przede wszystkim na kompletny silnik, z uwzględnieniem kształtu komory spalania, technologii materiałów i systemu wtrysku paliwa. W przypadku wtrysku poprawa polegała na zastoso-

waniu wtryskiwaczy paliwa sterowanych elektronicznie przez cewki elektromagnesów lub piezosystemy – ciśnienie wtrysku podniesiono z 35 MPa do 200 MPa, a podział dawki paliwa zwiększono do siedmiu części w pojedynczym obiegu, co stało się przyczyną znaczącego podwyższenia się temperatury rozpylacza. Wszystkie te zmiany spowodowały ogromny wzrost energii kinetycznej rozpylonego paliwa, prowadząc do mniejszych wymiarów kropeł w komorze spalania, co poprawia atomizację paliwa i daje w rezultacie sprawniejszy i pełniejszy proces spalania [14].

W tablicy 1 zamieszczono zmiany parametrów związanych z rozwojem układów wtrysku paliwa w ciągu ostatnich kilkunastu lat.

Należy podkreślić, że wysokie ciśnienie wtrysku przy małych otworkach rozpylacza umożliwi lepsze rozpylenie paliwa w komorze spalania, generując krople o mniejszej średnicy, które łatwiej mieszają się z powietrzem i efektywniej ulegają spalaniu. Jednym z najpoważniejszych wyzwań naszej cywilizacji jest walka z globalnym ociepleniem przez

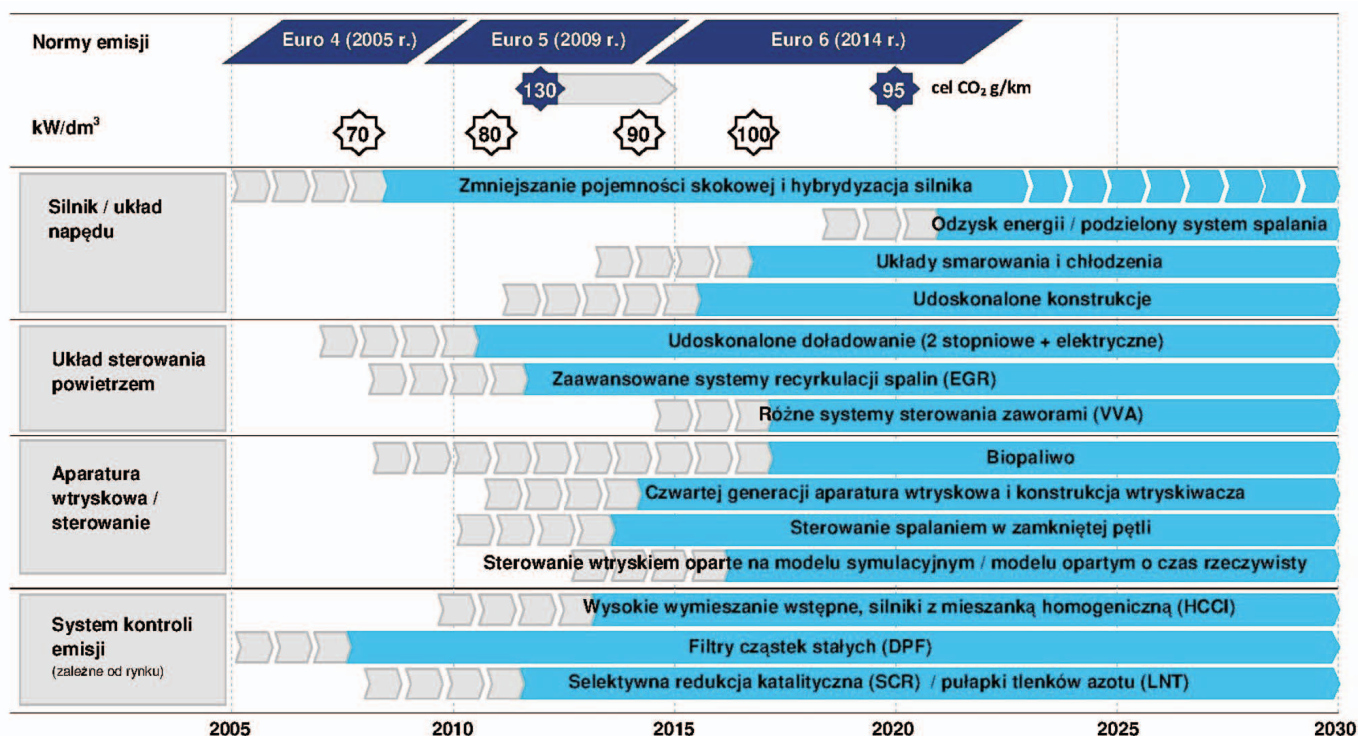
obniżenie emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, a szczególnie dwutlenku węgla – o 20% do 2020 roku i o 50% do 2050 roku oraz emisji cząstek stałych [2].

Ograniczenie emisji toksycznych składników spalin osiągnięto dzięki wyposażeniu silnika z ZS w zaawansowane układy oczyszczania spalin lub przez kontrolowanie procesu spalania paliwa zachodzącego w cylindrze tłokowego silnika spalinowego. Według [10] filtr cząstek stałych (DPF) jest bardzo skutecznym narzędziem do usuwania ze spalin cząstek stałych (PM) i nanocząstek (NP < 1 μm), jakkolwiek jego zastosowanie powoduje zwiększenie kosztów eksploatacji pojazdu, w tym trudności w regeneracji filtra. Bardzo ważną rolę w ocenie eksploatacyjnej filtrów cząstek stałych DPF w pojazdach samochodowych odgrywają następujące czynniki: informacja użytkowników, systemy sterowania i kontroli filtrów DPF, dostępność obsługi i części zamiennych oraz odpowiedzialność producentów filtrów DPF.

Jednym z możliwych rozwiązań ograniczających emisję toksycznych składników spalin jest recyrkulacja spalin, pole-

Tablica 1. Rozwój układów wtrysku paliwa [2]

| Parametry techniczne | Do 1995 r. | Do 2000 r. | Lata 2005–2010 |
|--|------------|------------|----------------|
| Maksymalne ciśnienie wtrysku [MPa] | 35 | 100+ | 200+ |
| Liczba wtrysków na minutę przy $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ | 1500 | 1500 | 4500÷7500+ |
| Temperatura paliwa w końcówce rozpylacza [°C] | < 230 | < 250 | > 250 |
| Liczba otworków rozpylacza | 1 | 1–4 | 4–8+ |
| Średnica otworu rozpylacza [mm] | < 0,5 | > 0,25 | < 0,1 |



Rys. 1. Tendencje rozwojowe lekko obciążonych silników o ZS (lata 2005–2030) [16]

gająca na tym, że część z nich zostaje zawrócona do układu dolotowego silnika w celu zmniejszenia emisji NO_x [3].

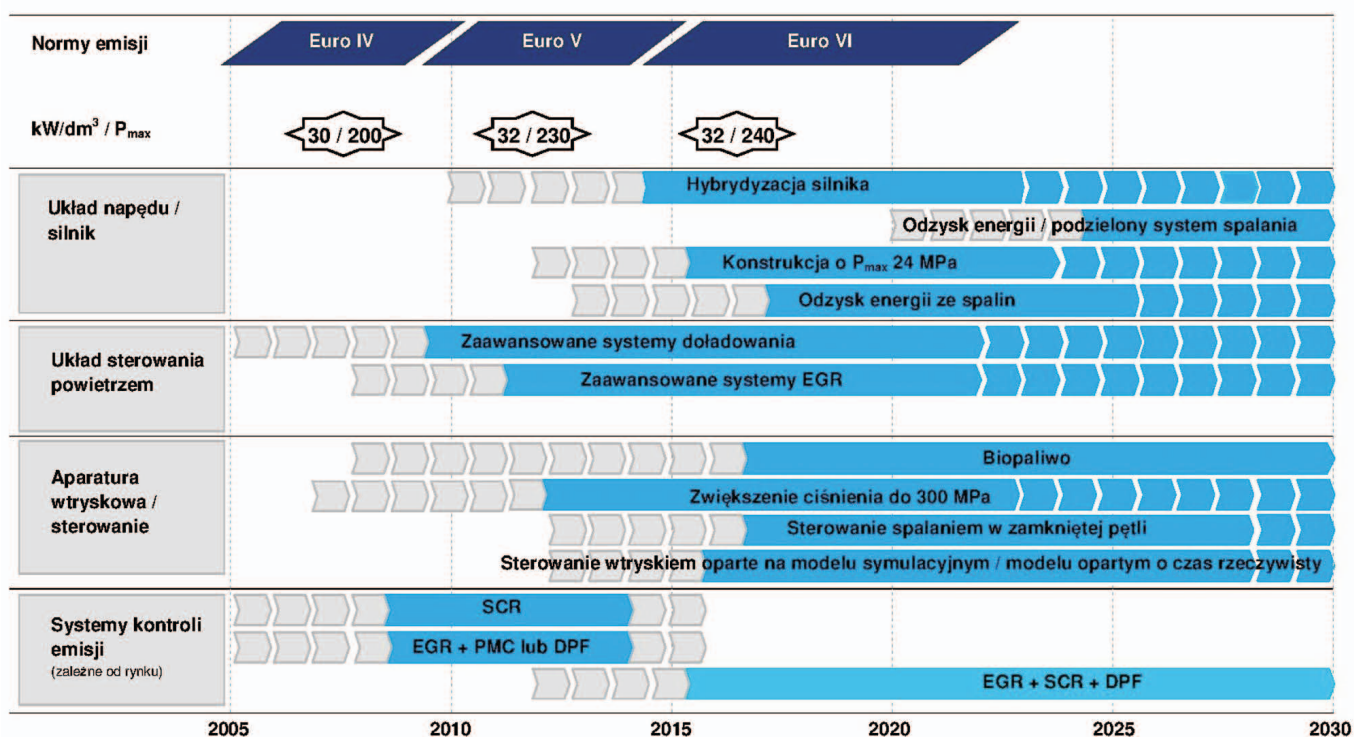
Istotne zagadnienie stanowi optymalizacja kąta wyprzedzenia zapłonu w silniku w celu uzyskania możliwie największej sprawności jednostki napędowej. Zmiana kąta wyprzedzenia zapłonu powoduje wcześniejsze inicjowanie procesu spalania, co przekłada się na zwiększenie maksymalnego ciśnienia w komorze spalania i temperatury.

Wprowadzone modyfikacje we wspomnianych konstrukcjach silników o zapłonie samoczynnym oraz udoskonalenia w procesie spalania i obróbki gazów spalinowych miały istotny wpływ na zużycie paliwa i zmniejszenie emisji tlenków azotu (NO_x) oraz cząstek stałych.

Na rysunku 1 przedstawiono tendencje rozwojowe techno-

logii silników o zapłonie samoczynnym spełniające przyszłe normy zużycia paliwa i emisji CO_2 w okresie do 2030 roku dla jednostek napędowych przeznaczonych do samochodów osobowych oraz lekkich pojazdów użytkowych. Rysunek 2 prezentuje to samo zestawienie dla samochodów ciężarowych [16].

Początkowe strzałki koloru szarego przedstawiają wprowadzenie rozwiązania na rynek, natomiast końcowe strzałki koloru szarego reprezentują malejące znaczenie na rynku. Ciągłe strzałki koloru niebieskiego wskazują pełny rozwój techniki na rynku (przyjęcie przez kilku producentów (OEM) co najmniej dwóch modeli). Końcowe niebieskie strzałki przedstawiają kontynuację danego rozwiązania technicznego na rynku [15].



Rys. 2. Tendencje rozwojowe wysokoobciążonych silników o ZS (lata 2005–2030) [16]

Proekologiczne projektowanie silników spalinowych

Produkcja środków transportu jest związana przede wszystkim z przemysłem motoryzacyjnym, jedną z największych gałęzi przemysłu na świecie. Niewątpliwie łączy się z tym także ważne zagadnienia ochrony środowiska, dotyczące różnych procesów i surowców emitujących duże ilości różnorodnych zanieczyszczeń [4].

Obserwowane tendencje w zakresie wytwarzania silników spalinowych z ZS przeznaczonych do napędu pojazdów samochodowych można zestawić w następujących grupach [3]:

- wprowadzenie nowych energooszczędnych materiałów o mniejszej masie;

- wykorzystanie nowoczesnych materiałów kompozytowych, proszków metali oraz tworzyw sztucznych, np. poliamidów, które mogą być wzmacniane włóknem szklanym, poliptylenem itp. – wykonuje się z nich układy dolotowe, pokrywy napędu rozrzędu i napinacze łańcuchów;
- wprowadzenie w niedalekiej przyszłości nanomateriałów o lepszej wytrzymałości, dużej odporności na ścieranie, korozję i pełzanie;
- stosowanie technologii przyjaznych środowisku – ograniczanie metod obróbki pozostawiających trudne do neutralizacji odpady;

- wykorzystywanie technologii i materiałów ułatwiających recykling – dzięki odpowiednim uregulowaniom prawnym zmuszającym do tego producenta.

Ważnym stymulatorem poszukiwań nowych rozwiązań jest zmniejszenie masy silników, mających znaczący udział w masie pojazdów samochodowych. Do technik rozwoju silników spalinowych pojazdów samochodowych, które

mogą obniżyć emisję toksycznych składników spalin, należy wliczyć pojazdy hybrydowo-elektryczne, opony o małym oporze toczenia, a w dłuższej perspektywie – nowe systemy napędu i ogniwa paliwowe. Rzeczywiste zmniejszenie emisji będzie zależne od szybkości wdrażania nowych technologii w istniejących już samochodach, co według dotychczasowych ocen zajmie co najmniej dwie dekady.

Podsumowanie

Wymogi środowiskowe dotyczące limitów emisji normowanych składników spalin pojazdów samochodowych wyposażonych w silniki wewnętrznego spalania o ZS są siłą napędową zmian zarówno w zakresie konstrukcji i technologii jednostek napędowych, jak i parametrów jakościowych paliw. Postęp w tej dziedzinie wiąże się m.in. z rozwojem zaawansowanych układów wtrysku paliwa, m.in. typu *common rail*, i z wprowadzeniem nowoczesnych systemów oczyszczania spalin, w tym filtrów cząstek stałych oraz recyrkulacji spalin.

Rozwój konstrukcji silników z ZS to jednoczesny wzrost wymagań odnośnie do jakości paliwa i dodatków do jego uszlachetniania, zapewniających utrzymanie właściwej pracy jednostki napędowej podczas długotrwałej eksploatacji.

Wprowadzone zmiany we wspomnianych konstrukcjach silników o zapłonie samoczynnym oraz udoskonalenia w procesie spalania i obróbki gazów spalinowych mają istotny wpływ na zużycie paliwa i zmniejszenie emisji tlenków azotu (NO_x) oraz cząstek stałych (PM).

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 6, s. 390–394

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Najnowsze trendy rozwoju silników spalinowych do napędu pojazdów samochodowych* – praca INiG na zlecenie MNiSW; nr archiwalny: DK-4100-62/13, nr zlecenia: 0062/TE1/13.

Literatura

- [1] Bielaczyc P., Szczotka A., Pajdowski P., Woodburn J.: *Development of vehicle exhaust emission testing methods – BOSMAL's new emission testing laboratory*. Combustion Engines / Silniki Spalinowe 2011, nr 1 (144), s. 3–12.
- [2] *Diesel demand new generation of additives*. Infineum Insight 2004, issue 24, Dec.
- [3] Heywood J. B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York, McGraw-Hill, 1988.
- [4] Idzior M.: *Rozwój samochodowych silników spalinowych w aspekcie metod ich wytwarzania*. Silniki Spalinowe 2006, nr 1 (124), s. 60–70.
- [5] Johnson T. V.: *Diesel Emission Control in Review*. SAE 2009-01-0121.
- [6] Johnson T. V.: *Diesel Emissions in Review*. SAE 2011-01-0304.
- [7] Johnson T. V.: *Review of CO₂ Emissions and Technologies in the Road Transportation Sector*. SAE 2010-01-1276.
- [8] Johnson T. V.: *Review of Diesel Emissions and Control*. SAE 2010-01-0301.
- [9] Johnson T.: *Diesel Engine Emissions and Their Control*. Platinum Metals Rev. 2008, vol. 52, issue 1, pp. 23–37.
- [10] Mazanek A.: *Badania porównawcze emisji toksycznych składników gazów wylotowych z silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego ON i B10*. Nafta-Gaz 2010, nr 9, s. 835–849.
- [11] Mazanek A.: *Ocena parametrów pracy aparatury wtryskowej typu Common Rail przy zasilaniu paliwami o różnej zawartości biokomponentu*. Nafta-Gaz 2012, nr 8, s. 540–544.
- [12] Merkisz J., Pielecha I.: *Alternatywne napędy pojazdów*. Wydanie I. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [13] Merkisz J., Radzimirski S.: *Nowe przepisy Unii Europejskiej o emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych*. Transport Samochodowy, Wydawnictwo ITS, 2011, nr 2, s. 41–70.
- [14] Oleksiak S., Lukasik Z.: *Nowoczesne układy wtrysku paliwa w silnikach Diesla i ich wpływ na jakość paliw i dodatków detergentowo-dyspersyjnych*. Nafta-Gaz 2009, nr 1, s. 58–64.
- [15] Stanik W., Jakobiec J.: *Proekologiczny rozwój technologii silników o zapłonie samoczynnym*. Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 2013, nr 7–8, s. 187–192.
- [16] Wood Mackenzie/Ricardo: *Impact of the use of biofuels on oil refining and fuel specifications*. Final Report European Commission, October 2010.



Dr inż. Aleksander MAZANEK
 Adiunkt w Zakładzie Oceny Właściwości Eksploatacyjnych.
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25A
 31-503 Kraków
 E-mail: mazaneka@inig.pl