ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 5(77)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

OBSŁUGIWANIE MASZYN I URZĄDZEŃ OKRĘTOWYCH
O M i U O 2 0 0 5

Karol Kwiatkowski, Bogdan Żółtowski

Pomiary składu spalin silników spalinowych

Słowa kluczowe: ekologia, silniki spalinowe, toksyczne składniki spalin

W ostatnich latach cały wysiłek konstruktorów był skierowany na zmniejszenie emisji związków toksycznych wydalanych przez silniki spalinowe pojazdów. W pracy tej przedstawiono wpływ zmian stanu silnika (jakości procesu spalania oraz rozregulowań silników) na wzrost toksycznych składników spalin.

Measurements of Engine Exhaust Gas Components

Key words: ecology, combustion engines, toxic components of exhaust gases

In the past years designers' efforts was directed into the reduction of toxic compounds produced by vehicle combustion engines. The paper introduces the influence of combustion engine process as well as putting out of combustion process order on growth of toxic compounds emission.

Wprowadzenie

Szybki przyrost liczby samochodów na świecie stanowi w aspekcie ekologicznym istotny czynnik destrukcyjny. Zwiększający się udział pojazdów z silnikami o zapłonie iskrowym (ZI) oraz o zapłonie samoczynnym (ZS) zaznaczył się wzrostem stężeń szkodliwych składników i cząsteczek stałych (PM) w strukturze globalnej emisji zanieczyszczeń atmosferycznych i wymusił konieczność podjęcia działań ograniczających skalę tej emisji. Zagrożenie tymi substancjami jest szczególnie wysokie w dużych aglomeracjach miejskich i w bezpośrednim sąsiedztwie tras komunikacyjnych. Także w Polsce podjęto działania, których celem jest ograniczenie emisji toksycznych składników spalin pochodzenia motoryzacyjnego. Z pewnym opóźnieniem w stosunku do systematycznie wprowadzanych ograniczeń emisji szkodliwych dla środowiska składników spalin rozpoczęto ustanawiać przepisy dotyczące emisji hałasu przez pojazdy samochodowe. Obecnie istnieje tendencja do globalnego traktowania zagrożeń środowiska ze strony motoryzacji wraz z zagrożeniami bezpieczeństwa [3, 6, 7, 8, 9, 12].

1. Zagrożenie środowiska ze strony silników

Pomimo stosowania we współczesnych konstrukcjach silników spalinowych części o dużej niezawodności, ich stan w procesie eksploatacji stale się zmienia i nieuchronnie prowadzi do zużycia granicznego grożącego awarią silnika. Ocena stanu silnika spalinowego w czasie jego eksploatacji w dużej mierze ma charakter wynikowy i często dokonywana jest subiektywnie. Silniki o ZS w porównaniu z silnikami o ZI charakteryzują się wyższą sprawnością oraz spalają znacznie mniej paliwa. W silniku o ZS podstawowym procesem energetycznym jest proces spalania. Z tego względu toksyczność spalin w silniku o ZS zależy głównie od przebiegu procesu spalania heterogenicznej mieszaniny paliwowo-powietrznej. Na przebieg spalania dominujący wpływ wywierają: przebieg wtrysku paliwa, zawirowanie powietrza w komorze spalania oraz stale zmieniający się skład ładunku w komorze spalania, w której ubywa powietrza a przybywa spalin. Podstawowymi źródłami emisji substancji szkodliwych z pojazdu są: układ wylotowy, układ paliwowy i skrzynia korbowa [3, 10].

Dominującym źródłem emisji jest układ wylotowy silnika. We współczesnych silnikach w stosunku do emisji z układu wylotowego – emisja z układu paliwowego jest niewielka, a ze skrzyni korbowej – śladowa.

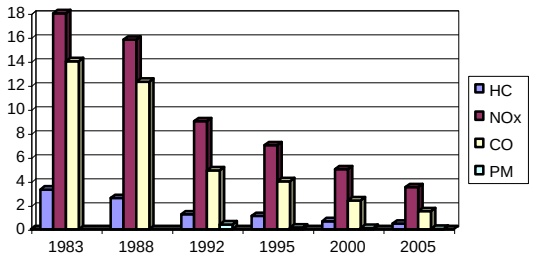
2. Ocena szkodliwych składników spalin silników spalinowych

Obecnie kontrolując toksyczność spalin samochodowych, zgodnie z przepisami przeglądów technicznych pojazdów i diagnostyki silników, należy korzystać z nowoczesnych urządzeń diagnostycznych, przy pomocy których można kontrolować i regulować silniki spalinowe.

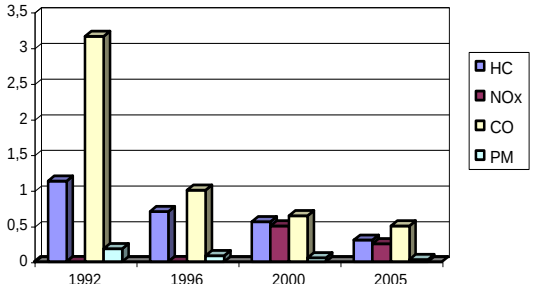
Pomiaru stopnia toksyczności spalin pojazdów z silnikami o ZI dokonuje się za pomocą analizatora spalin, przeznaczonego do oznaczania zawartości w spalinach: węglowodorów (HC), tlenu (O_2), tlenku węgla (CO), dwutlenku węgla (CO_2) oraz określenia współczynnika nadmiaru powietrza (λ) a także temperatury oleju i prędkości obrotowej silnika. Wszystkie te wyniki pokazywane są na wyświetlaczach i mogą być drukowane na dołączonej drukarce. Pomiar CO, CO_2, HC odbywa się na zasadzie prześwietlenia spalin wiązką podczerwieni, zaś O_2 – metodą elektrochemiczną. Obrotomierz podłączony jest do przewodu zapłonowego wysokiego napięcia, natomiast temperatura oleju mierzona jest czujnikiem termoparowym wsuwanym w miejsce miarki poziomu oleju. Analizator jest przystosowany do pracy w temperaturze otoczenia od +5 do +40°C przy wilgotności względnej nie przekraczającej 90% i ciśnieniu atmosferycznym 1000 hPa ± 25 hPa.

Wysokoprężne silniki spalinowe w porównaniu z silnikami o ZI nie mają jednolitego, w pełni zautomatyzowanego przyrządu (urządzenia) do pomiaru takich składników spalin jak: tlenek węgla (CO), tlenki azotu (NO_x), węglowodory (HC) oraz cząstek stałych (PM).

Stosowane w kraju dymomierze pozwalają określić ilość zawartego w spalinach silnika o ZS dymu, temperaturę oleju, obroty silnika, czas trwania wtrysku i czas przyspieszenia obrotów silnika. Natomiast nie określają ilościowo CO, NO_x, HC w spalinach zgodnie z wymogami EURO – 1, 2, 3, 4, których to ilość podczas eksploatacji silnika o ZS będzie wzrastała z uwagi na zużycie poszczególnych układów silnika. Wartości poszczególnych mierzonych składników spalin według kolejnych norm EURO przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Kryteria UE dla silników o ZS do 3,5 t
Fig. 1. EU criteria for engines the ZS to 3.5 t



Rys. 2. Kryteria UE dla silników o ZS
Fig. 2. EU criteria for ZS engines

Urządzeniem spełniającym wymogi EURO 1, 2, 3, 4 jest analizator spalin LANCOM III, przy pomocy którego można dokonać pomiaru dziewięciu składników gazów wylotowych jednocześnie (CO, CO_2, NO, NO_2, HC, SO_2, H_2S, O_2, PM). Ponadto umożliwia on bezpośredni pomiar temperatury spalin oraz wyposażony jest w czujnik temperatury otoczenia. Wbudowana drukarka termiczna umożliwia natychmiastowy wydruk danych pomiarowych. Na wydruku zawarte są ilości gazów w spalinach silnika o ZS wraz z datą i czasem pomiaru. Niezależnie od wymienionych zalet koszt tego analizatora jest stosunkowo duży.

Do toksycznych składników spalin emitowanych przez silniki o ZI należą [3, 5]:

- **tlenek węgla (CO)** – produkt niedokończonego spalania węgla w wyniku zbyt małej ilości tlenu oraz zbyt krótkiego czasu, aby ulec zupełnemu spaleniu. Jest gazem trującym, bezbarwnym i bezwonnym;
- **węglowodory (HC)** – niespalone lub częściowo spalone cząstki paliwa. Przyczyny powstawania węglowodorów są takie same jak tlenku węgla. Mają działanie rakotwórcze oraz uczestniczą w tworzeniu smogu;
- **tlenki azotu (NO_2)** – wielkość emisji tlenku azotu zależy od wartości szczytowych temperatur podczas procesu spalania oraz czasu ich oddziaływania. Dwutlenek azotu ma silnie trujące właściwości. Wiąże się z hemoglobiną i w krótkim czasie może wywołać objawy porażenia. Ponadto podrażnia on płuca, a przy dłuższym oddziaływaniu nadżera tkankę płuc doprowadzając do jej perforacji, może nawet spowodować śmierć;
- **tlenki siarki (SO_2 i SO_3)** – udział motoryzacji w ogólnej emisji tych związków nie przekracza 3%. Dwutlenek siarki jest również głównym składnikiem kwaśnego deszczu. Dwutlenek siarki jest gazem silnie drażniącym. Łatwo rozpuszcza się w wydzielinie błon śluzowych, tworząc kwas siarkowy, który działa drażniąco na błony.

Związkami toksycznymi emitowanymi przez silniki o ZS są głównie: tlenki azotu (NO_x), nie spalone węglowodory HC, tlenek węgla CO, a przede wszystkim cząstki stałe PM.

Cząstki stałe – PM – to produkty wydostające się z układu wylotowego silnika o konsystencji ciekłej lub stałej, zawierające między innymi pewną ilość cząstek węgla, związków siarki i azotu, metali oraz ciężkich węglowodorów. W wyniku lokalnego niedoboru powietrza w komorze spalania powstaje sadza absorbująca węglowodory i związki nieorganiczne: SO_2, NO_x i kwasy siarkowe. Obecność sadzy w spalinach powoduje ich zadymienie. Zadymienie staje się zauważalne gołym okiem już przy zawartości sadzy wynoszącej około 100 mg/m^3. Natomiast zawartość sadzy około 600 mg/m^3 postrzegana jest jako gęsty, czarno – brunatny dym. Sadza, która jest w istocie chemicznie czystym węglem, sama nie jest toksyczna. Stanowi jednak nośnik węglowodorów, w tym aromatycznych, uważanych za rakotwórcze. Szkodliwość oddziaływania cząstek stałych na środowisko naturalne i organizmy żywe wynika też z faktu, że ze względu na małe wymiary, cząstki utrzymują się długo w atmosferze i są łatwo wchłaniane przez układ oddechowy człowieka. W ten sposób umożliwiają wniknięcie do organizmu metali ciężkich takich jak: związki siarki, azotu, ołowiu i węglowodory.

W tabeli nr 1 przedstawiono przeciętny ilościowy skład gazów spalinowych silników spalinowych z podziałem na silniki o ZI i ZS.

Tabela 1

Ilościowy skład gazów spalinowych silników o ZI i ZS [9]
Quantitative composition of fumes of engines ZI and ZS

Składniki gazów spalinowych	Jednostka miary	Silniki z zapłonem		Ocena toksyczności
		iskrowym	samoczynnym	
Azot	% obj.	74 – 77	76 – 78	Obojętny
Tlen	jw.	0,3 – 8,0	2,0 – 18	jw.
Para wodna	jw.	3,0 – 5,5	0,5 – 4,0	jw.
Dwutlenek węgla	jw.	5,0 – 12,0	1,0 – 10,0	jw.
Tlenek węgla	jw.	5,0 – 10,0	0,01 – 0,5	Toksyczny
Tlenki azotu	jw.	0,0 – 0,8	0,002 – 0,5	jw.
Węglowodory	jw.	0,2 – 3,0	0,009 – 3,0	jw.
Aldehydy	jw.	0,0 – 0,2	0,001 – 0,009	jw.
Sadza	g/m^3	0,0 – 0,04	0,01 – 1,1	jw.
3,4 benzopiren	g/m^3	do 15,0	do 10,0	Rakotwórczy

Badania wykazały, że emisja toksycznych składników spalin silników o ZS może wielokrotnie wzrosnąć ponad graniczne wartości w wyniku:

- niewłaściwego rozpylenia wtryskiwanego paliwa na skutek niesprawności wtryskiwaczy (zbyt niskie ciśnienie wtrysku, nieszczelność rozpylacza, zużycie otworków wylotowych rozpylacza);
- nieprawidłowej regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku (zbyt mały kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa, zużyte elementy napędu pompy wtryskowej);
- zbyt dużej, większej od znamionowej dawki paliwa (niewłaściwa regulacja dawkowania pompy wtryskowej);
- pogorszenia się stanu technicznego silnika (niewłaściwe luzy zaworowe, nadmiernie zużyte cylindry i pierścienie tłokowe, zanieczyszczony filtr powietrza).

Największe ilości sadzy tworzą się w warunkach pełnego obciążenia silnika o ZS, gdy wytwarzana jest moc maksymalna $N_{e\,\max}$. Dzieje się tak, jeśli do silnika dostarczana jest przez układ wtryskowy maksymalna dawka paliwa Q_n, która po zmieszaniu się z powietrzem w komorze spalania tworzy mieszankę paliwowo-powietrzną o składzie odpowiadającym granicy dymienia λ_{gd}. Przekraczanie granicznych wartości zadymienia spalin w silnikach o ZS spowodowane jest najczęściej uszkodzeniami w układzie zasilania paliwem, powstającymi w procesie eksploatacji. Prowadzą one do przekroczenia, ze względu na dymienie, granicznej dawki paliwa przy jednoczesnym zmniejszeniu dostarczanej ilości powietrza oraz pogorszenia warunków mieszania się paliwa z powietrzem. W efekcie tego zwiększa się udział spalania niecałkowitego w silniku i wzrasta emisja sadzy do otoczenia.

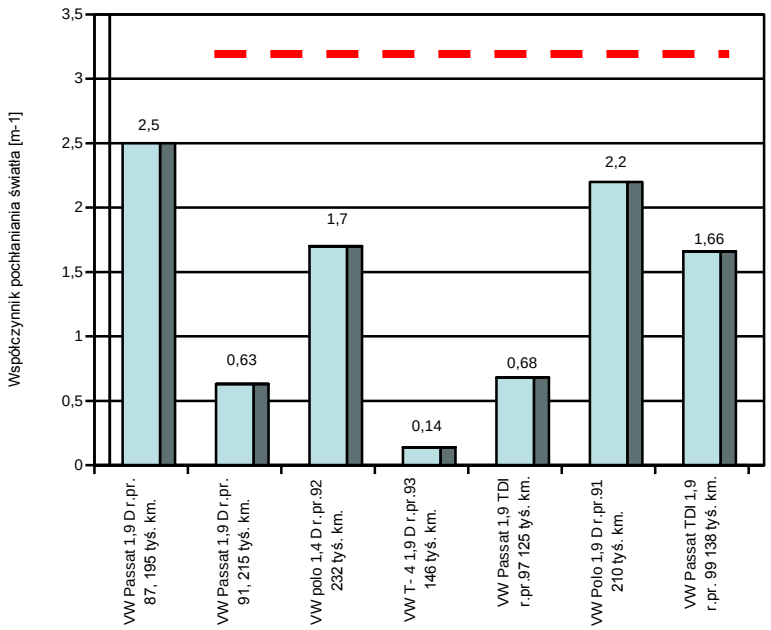
3. Diagnozowanie rozregulowań silnika

Aby zapobiec niekorzystnym zjawiskom w procesie użytkowania silnika, dokonuje się jego diagnozowania. Podstawowym sposobem diagnozowania silnika o ZS w aspekcie zagrożeń jest pomiar zadymienia spalin. Pomiar zadymienia spalin umożliwia:

- dokonanie ogólnej oceny stanu technicznego silnika i układu zasilania paliwem poprzez porównanie wyników pomiaru stopnia zadymienia spalin z wartościami dopuszczalnymi,
- sprawdzenie prawidłowości działania zespołów układu wtryskowego (wtryskiwacz, pompa wtryskowa, kąt wyprzedzenia wtrysku) po wykonaniu czynności obsługowych i naprawczych.

Jednym z rozwiązań filtracji spalin stosowanych obecnie w Europie przez producentów samochodów osobowych z silnikami Diesla jest rozwiązanie koncernu PSA. Wyżej wymieniony system filtracji spalin spełnia wymogi EURO-4, które obowiązywać będą w krajach Unii Europejskiej od 2005 roku dla samochodów osobowych napędzanych silnikami o ZS, a spaliny tych silników badane będą na zawartość CO, NO_x, HC, PM.

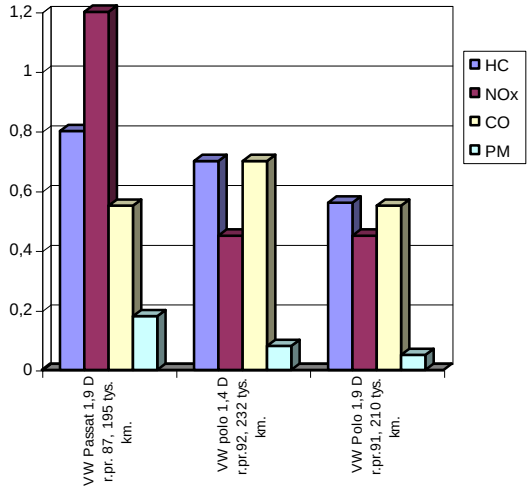
W ramach tego opracowania przeprowadzono na siedmiu samochodach osobowych marki VW z silnikami o ZS badania dymomierzem ISC OLIVER D-60, które wykazały, że wszystkie badane samochody spełniały warunki Polskich Norm zanieczyszczeń spalin, co przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zadymienie spalin silników VW o ZS w odniesieniu do PN (linia przerywana)
Fig. 4. The fogging of exhaust gas from VW engines compared to PN standards (broken line)

Te same silniki sprawdzono analizatorem LANCOM III. Uzyskane wyniki wskazywały na fakt, iż trzy z badanych pojazdów nie spełniały wymagań zawartych w obowiązujących normach EURO – 3.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań dla silników nie spełniających norm EURO – 3, dla których wartości graniczne poszczególnych składników spalin wynoszą: HC – 0,56; NO_x – 0,5; CO – 0,64; PM – 0,05.



Rys. 5. Silniki przekraczające wartości zanieczyszczeń określone normą EURO – 3
Fig. 5. The engines exceeding contamination values defined by the standard EURO – 3

Obecnie w Polsce nie prowadzi się badań na zawartość wyżej wymienionych związków toksycznych w silnikach o ZS z uwagi na brak odpowiednich przepisów prawnych i urządzeń diagnostycznych. Przyrządem diagnostycznym spełniającym wymogi EURO – 4 jest wcześniej wspomniany analizator spalin LANCOM III. Z uwagi na cenę analizator ten nie znalazł jeszcze szerszego zastosowania.

Podsumowanie

W pracy omówiono najistotniejsze problemy związane z powstawaniem i ograniczeniem emisji cząstek stałych z układów wylotowych silników spalinowych. Na podstawie wstępnych wyników badań uzyskanych z losowo wybranych silników spalinowych o ZS, przeprowadzonych urządzeniem LANCOM III stwierdzono, iż problem zanieczyszczenia spalin jest szczególnie istotny w Polsce. Wynika to z faktu, że znaczna ilość samochodów zarejestrowanych w naszym kraju to samochody eksploatowane przez dziesięć lub więcej lat. Wyniki badań wskazują, iż badanie dymomierzem stosowane obecnie w kraju nie zawsze jest adekwatne do wyników uzyskanych nowoczesną aparaturą badawczą i w związku z tym szereg samochodów dopuszczonych obecnie do ruchu przekracza normy obowiązujące w EURO 3 i są istotnym zagrożeniem dla środowiska naturalnego w Polsce. W pracy wymieniono i w skrócie opisano nowoczesne przyrządy służące do wykrywania toksycznych składników spalin silników o ZS.

Literatura

1. AutoEXPERT nr I 98, *Procesy i systemy spalania w ZS*, VP, Poznań 1998.
2. AutoEXPERT nr 7/8 2001, *Układy wydechowe silników spalinowych*.
3. Chłopek Z., *Ochrona środowiska naturalnego*, WKiŁ, Warszawa 2002.
4. Gunther H., *Diagnozowanie silników wysokoprężnych*, WKiŁ, Warszawa 2002.
5. Kwiatkowski K., Żółtowski B., *Ekologiczne aspekty oddziaływania silników wysokoprężnych*, Diagnostyka, Wyd. PTDT, vol. 26, 2002.
6. Kwiatkowski K., Żółtowski B., *Zagadnienie zanieczyszczeń środowiska przez silniki spalinowe*, Zeszyty Naukowe ATR, Nr 36, Bydgoszcz 2003.
7. Merkisz J., *Wpływ motoryzacji na skażenie środowiska naturalnego*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
8. Merkisz J., *Ekologiczne aspekty sterowania silników spalinowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
9. Merkisz J., *Ekologiczne problemy silników spalinowych, Tom I i II*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
10. Merkisz J., Mazurek S., *Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych*, WKiŁ, Warszawa 2004.
11. Nagórski Z., Swat M., *Ograniczenie emisji cząstek stałych pochodzenia motoryzacyjnego*, Kwartalnik 1/95, Problemy eksploatacji, ITE Radom.
12. Wajand J.A., Wajand J.T., *Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybko obrotowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.

Wpłynęło do redakcji w marcu 2005 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Oleh Klyus, prof. AM
dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM

Adresy Autorów

mgr inż. Karol Kwiatkowski
prof. dr hab. inż. Bogdan Żółtowski
Akademia Techniczno-Rolnicza
Zakład Diagnostyki Technicznej
al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz