

In-service problems of selective catalytic reduction systems for reduction of nitrogen oxides

This paper describes the development of selective catalytic reduction systems which are used for reduction of nitrogen oxides in diesel engines in passenger vehicles. The paper presents a methodology of application development and solutions for problems encountered in service. The main solution which allows the requirements of Euro 6 limit to be met (as applied by various car manufacturers), is the introduction of the SCR system as an upgrade of the existing aftertreatment systems that meet the Euro 5 emission standard consisting of a diesel oxidation catalyst (DOC) and a particulate matter filter (DPF).

Keywords: nitrogen oxide emissions, SCR catalytic converter, AdBlue, ammonia

Problemy eksploatacji systemów selektywnej redukcji katalitycznej tlenków azotu

W artykule opisano rozwój systemów selektywnej redukcji katalitycznej, stosowanych do redukcji tlenków azotu w silnikach pojazdów osobowych. Przedstawiono metodykę rozwoju aplikacji oraz rozwiązania napotkanych problemów badawczych i eksploatacyjnych. Głównym założeniem pozwalającym na spełnienie wymagań normy Euro 6, stosowanym przez różnych producentów pojazdów, jest wprowadzenie systemu SCR, jako rozbudowa istniejących układów oczyszczania spalin, spełniających normę emisji Euro 5 i składającego się z reaktora utleniającego DOC oraz filtra cząstek stałych DPF.

Słowa kluczowe: emisja tlenków azotu, reaktor katalityczny SCR, AdBlue, amoniak

1. Wprowadzenie

Coraz bardziej wymagające przepisy legislacyjne dotyczące emisji szkodliwych składników spalin oraz ich zróżnicowanie dla Europy, USA czy Japonii, wymusiły zastosowanie dodatkowych systemów oczyszczania spalin, a zwłaszcza w odniesieniu silników z zapłonem samoczynnym. Dotyczy to głównie emisji tlenków azotu, a obecnie wiodącym systemem stosowanym do ich redukcji jest selektywna redukcja katalityczna SCR (Selective Catalytic Reduction) oraz reaktory magazynujące tlenki azotu, znane pod nazwą: NSC (NO_x-Storage Catalysts) lub LNT (Lean NO_x Trap). Wymienione systemy pozwalają na sprostanie nowym limitom emisji, a intensywne badania rozwojowe przeprowadzone w ciągu ostatniej dekady zapewniają cechy dużej sprawności oraz wymaganej trwałości. Jednak ze względu na wielosegmentową budowę oraz złożone działanie całego systemu, pojawiają się problemy natury badawczej, konstrukcyjnej i eksploatacyjnej, które mają istotny wpływ na oczekiwany efekt oczyszczania spalin.

2. Metody kontroli i zmniejszenia emisji tlenków azotu

Koncerny samochodowe opracowują i wprowadzają różne koncepcje zmniejszenia i kontroli emisji szkodliwych składników spalin, a obecnie dotyczy to zwłaszcza tlenków azotu. Nadal też, potencjał rozwojowy istniejący w nowoczesnych jednostkach napędowych i układach oczyszczania

spalin, pozwala sprostać najsurowszym limitom emisji toksycznych składników spalin obowiązującym obecnie i w przyszłości.

Zakres przeprowadzonych zmian konstrukcyjnych zmierzających do zmniejszenia emisji tlenków azotu zawiera się głównie w optymalizacji procesu spalania w silniku i sprowadza się do zastosowania jednego z dwóch typów reaktorów katalitycznych przeznaczonych do redukcji tlenków azotu: reaktora magazynującego typu NSC, LNT lub układu selektywnej redukcji katalitycznej SCR, z systemem dozowania czynnika redukującego o handlowej nazwie AdBlue. Rodzaj zastosowanego rozwiązania zmniejszenia emisji tlenków azotu zależy głównie od klasy pojazdu i od jego masy własnej.

Wspólną strategią dla zapewnienia najmniejszej możliwej emisji wszystkich toksycznych składników spalin jest optymalizacja procesu spalania w silniku i takie nastawy regulacyjne jednostki sterującej silnikiem (ECU), które zapewniają maksymalnie korzystne warunki współpracy z zastosowanym układem oczyszczania spalin. Sprowadza się to zwykle do stosowania odpowiedniej strategii wtrysku paliwa, polegającej na dostosowaniu podziału wtryskiwanej dawki i czasu jej wtrysku do uzyskiwanych efektów.

Dla silników o małej objętości skokowej sama optymalizacja procesu spalania daje szansę uniknięcia lub uproszczenia drogiego układu zmniejszającego emisję tlenków azotu. Wystarczające jest zwykle zastosowanie odpowiedniej strategii wtrysku paliwa oraz systemu recyrkulacji spalin EGR.

Dla silników większych pojazdów stosuje się systemy okresowego magazynowania tlenków azotu, zwanych NSC lub LNT, pracujących na zasadzie cyklicznej adsorpcji tlenków azotu w warunkach spalania mieszanki ubogiej oraz następnie ich redukcji w fazie krótkotrwałego wzbogacenia mieszanki do wartości stechiometrycznej. Zwykle w tych systemach tlenki azotu są okresowo wiązane przez węglan baru $BaCO_3$ w postaci $Ba(NO_3)_2$, a następnie, po chwilowym wzbogaceniu mieszanki, uwalniane jako wolny azot N_2 i produkty całkowitego utleniania CO_2 i H_2O .

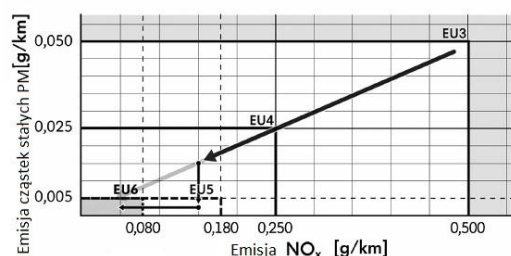
Z kolei dla średniej i wyższej klasy samochodów osobowych, przewiduje się zastosowanie systemu SCR wyróżniającego się bardzo dużym stopniem konwersji NO_x , który dzięki odpowiedniej strategii sterowania układem zasilania, nie powoduje wzrostu zużycia paliwa, a nawet przyczynia się do jego nieznaczniejszego zmniejszenia.

Powyższy podział aplikacji systemów redukcji NO_x w pojazdach nie jest jednakże jednoznaczny i zależy od wymagań danego rynku. Przykład stanowić może silnik przygotowany w koncernie Volkswagen lub Mercedes-Benz, dla samochodów przeznaczonych na rynek Ameryki Północnej. W tym przypadku zostały rozwinięte i zastosowane znane z Europy jednostki wyposażone w system zasilania common-rail i układ NSC/LNT do oczyszczania spalin z tlenków azotu, spełniające normę emisji Euro 5. Przy opracowywaniu wersji silnika przeznaczonego na rynek amerykański należało wziąć pod uwagę inne czynniki, niż w przypadku silnika przeznaczonego do eksploatacji w Europie. W pierwszym przypadku należało uwzględnić niską jakość oleju napędowego, jego zanieczyszczenie, jak również stan infrastruktury technicznej i przyzwyczajenia nabywców. Z tego względu na rynek amerykański opracowano silniki, które nie wymagają dodatkowych czynności obsługowych i wyposażone w system odporny na skutki używania paliwa o gorszej jakości. Aby spełnić wymagania obowiązujących w Stanach Zjednoczonych norm emisji spalin BIN5/LEV2, silniki zostały wyposażone w system selektywnej redukcji katalitycznej SCR, dzięki czemu mogły sprostać wymaganiom w zakresie emisji tlenków azotu. Takie silniki oferowane w pojazdach na rynku amerykańskim, w zmodyfikowanej wersji spełniają wymagania normy emisji Euro 6 i są już oferowane na rynku europejskim [8].

3. Zmiany konstrukcyjne w jednostce napędowej

Głównym celem rozwoju nowych jednostek napędowych było ograniczenie emisji szkodliwych składników spalin a zwłaszcza NO_x , przy jednoczesnym poprawieniu lub co najmniej utrzymaniu dotychczasowej ekonomiki oraz parametrów pracy silnika. Limity normy Euro 6 ograniczają emisję

NO_x o ponad połowę w porównaniu do wymagań normy Euro 5 (rys. 1), co stwarzało konieczność zastosowania dodatkowego reaktora redukującego tlenki azotu o wysokim współczynniku konwersji.



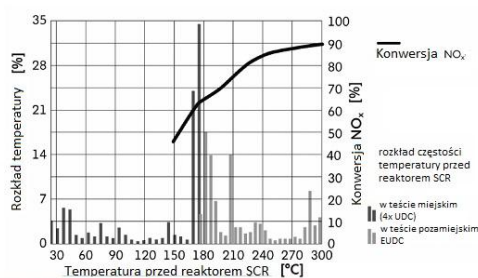
Rys. 1. Ograniczenia wartości emisji NO_x i PM dla normy Euro 6 [1]

Wdrożenie systemu SCR do pojazdów osobowych wiązało się z szeregiem ograniczeń technologicznych z których najważniejszymi było dopasowanie wymiarów systemu oczyszczania spalin do nadwozia pojazdu, rozbudowanie układu elektrycznego pojazdu o dodatkowe funkcje obsługi układu SCR oraz stworzenie infrastruktury do serwisowego uzupełniania AdBlue, przy zapewnieniu ogólnej przyjazności w eksploatacji systemu

Największym wyzwaniem w rozwoju istniejącej jednostki spełniającej normę Euro 5 do wymogów normy Euro 6 było zmniejszenie emisji NO_x , przy równoczesnym zwróceniu szczególnej uwagi na zmniejszenie emisji CO_2 , czyli zmniejszenie zużycia paliwa. Jednostki napędowe zostały zmodernizowane w taki sposób, aby w połączeniu z nowym układem oczyszczania spalin można zmniejszyć emisję toksycznych składników spalin i sprostać nowym wymogom legislacyjnym. W zakresie głównych zmian konstrukcyjnych silników, standardowo wyposażonych w głowicę o czterech zaworach na cylinder, zmniejszono stopień sprężania, zmieniono kształt komory spalania oraz zmodyfikowano geometrię kanałów dolotowych. Zmiany te miały na celu zoptymalizowanie współczynnika zawirowania powietrza w komorze spalania, a w rezultacie zwiększenia stopnia homogeniczności ładunku. Pozwoliło to w cylindrze na uniknięcie obszarów lokalnie bogatych i ograniczenie w nich zjawiska powstawania emisji cząstek stałych. To z kolei dało możliwość zwiększenia udziału EGR w procesie spalania i dalszego zmniejszenia emisji NO_x w krytycznych obszarach pracy silnika. Zastosowano nowy układ zasilania paliwem o zwiększonym maksymalnym ciśnieniu wtrysku paliwa (1800 bar), co w połączeniu ze zmodyfikowaną koncepcją procesu spalania pozwoliło na znaczące zmniejszenie powstawania toksycznych składników spalin w cylindrze [3].

4. Metodyka zmniejszenia emisji NOx w fazie nagrzewania się silnika

Rozpoczęcie dozowania czynnika Adblue i aktywacja systemu SCR może nastąpić po osiągnięciu przez układ odpowiednio wysokiej temperatury pracy, która jednakże nie może być zapewniona całym obszarze pracy silnika. Na rys. 2 przedstawiono rozkład temperatury spalin oraz potencjalnie osiągalny współczynnik konwersji NOx, w przypadku testu jezdnego NEDC. Z powyższych danych wynika wyraźnie, iż szczególnie w części miejskiej testu (UDC) system SCR ma tylko niewielki udział w zmniejszeniu emisji NOx. Fakt ten ma szczególne znaczenie przy projektowaniu całego systemu. Chcąc niejako skompensować brak gotowości systemu, dążono do tego, aby natychmiast po zimnym rozruchu silnika i następującej miejskiej części testu (UDC) umożliwić ograniczenie powstawania emisji NOx w silniku, aż do momentu uzyskania odpowiednich warunków termicznych i rozpoczęcia pracy reaktora SCR.



Rys. 2. Rozkład temperatury spalin w teście NEDC [1]

W celu ograniczenia emisji NOx w krytycznym zakresie niskiej temperatury spalin, zwiększono udział EGR w tych obszarach pracy. Aby jednak było to możliwe bez negatywnego wpływu na pracę silnika, należało w procesie spalania zminimalizować powstawanie dwóch wzajemnie przeciwnych toksycznych składników: cząstek stałych i tlenków azotu, tzw. PM-NOx *trade-off*. Uczyniono to poprzez zwiększenie ciśnienia wtrysku paliwa, zwiększenie ciśnienia doładowania, a także optymalizację stopnia zawirowania ładunku i odpowiednią strategię podziału dawki wtryskiwanego paliwa.

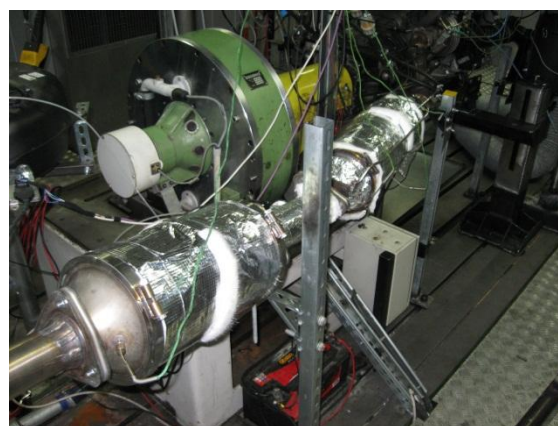
5. Charakterystyka układu oczyszczania spalin

Dla zapewnienia optymalnego współczynnika konwersji NOx w czasie całego okresu eksploatacji systemu SCR, zagadnieniami priorytetowymi w fazie projektowania i rozwoju układu oczyszczania spalin były:

- stopień konwersji ciekłego czynnika redukującego w celu całkowitej dekompozycji mocznika i uwolnienia amoniaku w strumieniu spalin

- wymieszanie i jednorodny rozkład w strumieniu spalin uwolnionego amoniaku
- dobór odpowiedniego udziału NO₂/NO w spalinach, w zależności od typu zastosowanego reaktora SCR poprzez zastosowanie odpowiedniego pokrycia metalami szlachetnymi rdzenia reaktora DOC oraz filtra cząstek stałych DPF
- dobór rodzaju reaktora SCR i strategii dozowania czynnika do warunków pracy a w szczególności do zakresu temperatury spalin

Przykład prototypowego układu oczyszczania spalin zamontowanego na stanowisku badawczym Instytutu BOSMAL przedstawiono na rysunku poniżej. Składa się on ze zintegrowanego systemu DOC-DPF (rys. 3), zainstalowanego za wylotem z turbosprężarki silnika oraz reaktora SCR wraz modulem dozowania czynnika, umieszczonego pod podłogą pojazdu.



Rys. 3. Zintegrowany system reaktora DOC i filtra cząstek stałych DPF wraz z układem SCR zainstalowany w Laboratorium Silników BOSMAL

Umieszczenie wtryskiwacza dozującego AdBlue przed reaktorem SCR jest zwykle utrudnione ilością dostępnego miejsca w przestrzeni pod podwoziem pojazdu oraz maksymalną temperaturą panującą w jego otoczeniu. Dla dobrego odparowania wodnego roztworu mocznika bardzo korzystna jest wysoka temperatura spalin i z tego względu pożądanym byłoby umieścić wtryskiwacz dozujący bezpośrednio za filtrem DPF. Z drugiej strony, takie rozwiązanie niesie ze sobą ryzyko jego uszkodzenia, a szczególnie w fazie regeneracji filtra cząstek stałych, kiedy temperatura spalin jest najwyższa. W tej sytuacji optymalnym rozwiązaniem było specjalne ukształtowanie komory mieszania AdBlue ze spalinami za filtrem DPF w postaci odcinka układu wylotowego w kształcie litery „S” i umieszczenie wtryskiwacza nieco z boku, możliwie współosiowo do strumienia spalin (rys. 4). Tak umiejscowiony wtryskiwacz jest lepiej chłodzony i pozwala na dozowanie czynnika na dużej powierzchni przepływających spalin oraz zwiększenie jego stopnia wymieszania i odparowania.



Rys. 4. Komora mieszania z wtryskiwaczem dozującym AdBlue

Dozowany w niewielkiej odległości przed reaktorem SCR czynnik redukujący, powinien w możliwie krótkim czasie wymieszać się ze spalinami i odparować. Dopiero tak przygotowany czynnik ulega następnie procesom termolizy i hydrolizy, w których powinno dojść do uwolnienia możliwie dużej ilości lotnego amoniaku i jego rozkład na powierzchni czołowej SCR powinien być możliwie jednorodny. W tym celu w przestrzeni pomiędzy modulem wtryskującym a reaktorem SCR zastosowano specjalny mikser wykonany ze stali kwasoodpornej (rys. 5), który nie powoduje zbyt dużego wzrostu przeciwności spalin w układzie. Funkcją miksera było z jednej strony rozbicie strugi kropli czynnika poprawiając tym samym odparowanie i wymieszanie, a z drugiej strony ograniczenie powstawania stałych osadów powodujących zaklejenie kanałów i stopniową dezaktywację reaktora redukującego SCR.



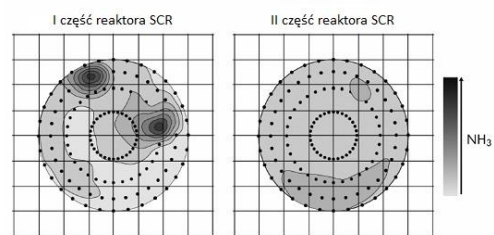
Rys. 5. Mikser - widok ogólny

Zastosowanie miksera pozytywnie wpłynęło na przygotowanie roztworu mocznika w spalinach, a w konsekwencji na uwolnienie amoniaku będącego właściwym czynnikiem redukującym tlenki azotu. Jednakże przeprowadzone badania rozkładu amoniaku NH_3 w przekroju za reaktorem SCR ujawniły obszary o lokalnie wysokiej koncentracji, które przyczyniają się do emisji nieprzereagowanego amoniaku za reaktorem (tzw. ammonia slip) oraz

mogące zakłócać pomiar czujnika NO_x umieszczonego za reaktorem. Znaczną poprawę w tej sytuacji uzyskano dzieląc reaktor SCR na dwa mniejsze monolity, które zostały odsunięte od siebie i połączone krótkim odcinkiem układu wydechowego (rys. 6). Takie podzielenie reaktora na dwie części pozwoliło na uzyskanie dodatkowej przestrzeni mieszającej między nimi i przez to na bardziej jednorodne wymieszanie czynnika w jego drugiej części (rys. 7). Dodatkową zaletą rozwiązania było szybsze osiągnięcie temperatury pracy (tzw. light-off) części pierwszej reaktora ze względu na jej mniejszą bezwładność termiczną.



Rys. 6. Komora mieszania oraz pierwsza i druga część reaktora SCR



Rys. 7. Rozkład amoniaku NH_3 w przekroju pierwszej i drugiej części reaktora SCR

5.1 Strategia aktywnego nagrzewania reaktora SCR

Podczas rozruchu silnika i w fazie jego nagrzewania się układ oczyszczania spalin nie osiąga wymaganej temperatury pracy. W tym okresie stosowana jest tzw. strategia powtrysku, której zadaniem jest przyspieszenie wzrostu temperatury spalin w układzie poprzez kontrolowany wtrysk dodatkowej dawki paliwa podczas procesu wylotu. Rozdrobnione w spalinach krople paliwa przedostają się do układu oczyszczania i w reakcji utleniania generowane jest ciepło. Metoda ta ma na celu skrócenie czasu, po jakim system SCR jest gotowy do pracy i może zostać rozpoczęte dozowanie czynnika Adblue, przy czym musi być spełniony warunek braku pogorszenia parametrów pracy silnika, uniknięcia nadmiernego wzrostu emisji węglowodorów i braku zwiększenia zużycia paliwa. W celu uniknięcia nadmiernej emisji węglowodorów, proces aktywnego nagrzewania układu SCR został podzielony na dwie fazy. Faza pierwsza jest odpowiedzialna za szybkie osiągnięcie temperatury pracy reaktora utleniającego (DOC light-off), poprzez odpowiedni dobór udziału recyrkulacji spalin

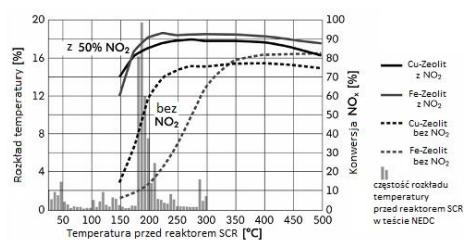
(EGR) oraz podział dawki wtryskiwanego paliwa. Faza druga rozpoczyna się po osiągnięciu temperatury pracy reaktora DOC, kiedy uaktywnia się kontrolowany powtrysk i część paliwa trafia do strumienia spalin. W wyniku reakcji egzotermicznej w reaktorze DOC dochodzi do uwolnienia się znacznych ilości ciepła, wykorzystywanego do wzrostu temperatury systemu SCR. Po aktywacji reaktora SCR, moduł sterujący ECU powraca do normalnego trybu pracy silnika. Wdrożenie strategii aktywnego nagrzewania w fazie miejskiej testu NEDC pozwoliło na skrócenie o 50% czasu niezbędnego do aktywacji systemu SCR i rozpoczęcie dozowania AdBlue. Zwiększone zużycie paliwa występujące w fazie nagrzewania reaktora jest zrekompensowane po osiągnięciu właściwej temperatury pracy reaktora SCR i rozpoczęciu dozowania AdBlue. W tym okresie powstaje możliwość zmniejszenia udziału spalin w ładunku z układu EGR i następuje zwiększenie sprawności silnika.

5.2 Reaktor selektywnej redukcji katalizacyjnej SCR

Współczynnik konwersji tlenków azotu w reaktorze SCR bardzo silnie zależy od proporcji NO_2/NO_x w spalinach i zjawisko to jest szczególnie widoczne w zakresie niskiej temperatury. Dla zastosowanego typu reaktora optymalny udział NO_2/NO_x wynosił 50%. W związku z powyższym faktem i w pewnym przeciwieństwie do pojazdów Euro 5, w aplikacji Euro 6 wykorzystującej system SCR, emisja NO_2 za filtrem DPF została celowo zwiększona. Składnik NO_2 w spalinach powstaje na drodze utleniania NO w reaktorze DOC oraz w pokrywanym metalami szlachetnymi filtrze DPF. Istotne znaczenie ma tu masa metali szlachetnych, ich rozmieszczenie na powierzchni aktywnej oraz relacja platyna/pallad, jak również procesy starzenia.

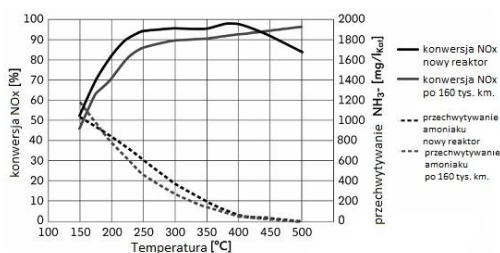
Ze względu na konieczność zapewnienia aktywnej pracy reaktora SCR w temperaturze poniżej 250°C , która jest typowa dla eksploatacji pojazdu w ruchu miejskim, bardzo ważny jest odpowiedni dobór materiału katalizacyjnego. Ze względu na najlepsze efekty redukcji tlenków azotu w procesie selektywnej redukcji katalizacyjnej, wybrano metalowo-zeolitowe reaktory SCR. Stosowane jest w nich zwykle pokrycie katalizacyjne typu: Fe-zeolit lub Cu-zeolit, przy czym to ostatnie wykazuje znaczącą przewagę. Pokrycie katalizacyjne typu Cu-zeolit odznacza się dużą odpornością na wysoką temperaturę spalin, zachowując swe walory przy pracy w temperaturze 600°C , a chwilowo nawet wyższej, podczas przebiegu pojazdu 160 tys. km. Przewaga pokrycia katalizacyjnego typu Cu-Zeolit nad Fe-Zeolit w stopniu konwersji tlenków azotu jest szczególnie widoczna w zakresie niskiej temperatury spalin, kiedy formowanie się NO_2 w systemie

DOC-DPF jest ograniczone i udział NO_2 w spalinach jest mały (rys. 8).



Rys. 8. Wpływ temperatury spalin oraz udziału NO_2 na sprawność reaktorów SCR

W przeszłości zastosowanie pokrycia typu Cu-Zeolit ograniczała niska odporność na działanie wysokiej temperatury lecz obecnie stosowane pokrycia tego typu są znacznie stabilniejsze termicznie. Próby starzenia hydrotermicznego wykazały, że pokrycie typu Cu-zeolit pracuje stabilnie w spalinach o temperaturze do ok. 600°C , natomiast chwilowo nawet do 700°C . Dłuższa praca reaktora w warunkach powyżej 700°C powoduje przyspieszoną degradację pokrycia i zmniejszenie stopnia konwersji NO_x , a w skrajnym przypadku nawet fizyczne zniszczenie reaktora. W związku z powyższym, maksymalna osiągnięta temperatura spalin przed reaktorem SCR jest parametrem niezwykle istotnym dla wymaganej trwałości systemu. Analiza tego parametru wykazała, iż w warunkach normalnej eksploatacji pojazdu temperatura przed reaktorem SCR nie przekracza 600°C , a w najgorszym scenariuszu osiąga krótkotrwale wartości rzędu 650°C mające miejsce podczas regeneracji filtra cząstek stałych (rys. 9).



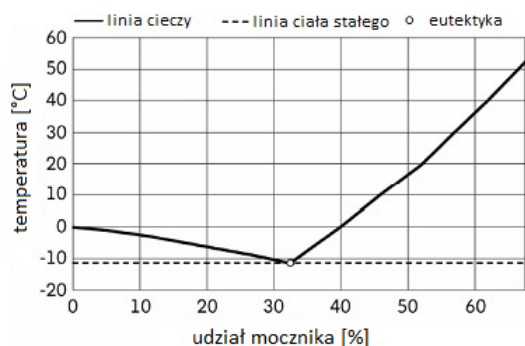
Rys. 9. Wpływ starzenia na sprawność i stopień akumulacji amoniaku w reaktorze SCR (Cu-Zeolit)

Wykres przedstawia zmianę współczynnika konwersji NO_x oraz stopnia zdolności akumulacji amoniaku wewnątrz reaktora SCR w funkcji temperatury. Porównane parametry odnoszą się do reaktora nowego oraz reaktora po starzeniu reprezentującym dystans 160 tys. km. Częściowe pogorszenie stopnia konwersji NO_x jest spowodowane zmniejszeniem powierzchni właściwej rdzenia reaktora oraz ubytkami w pokryciu warstwy aktywnej. Istotne ze względu na strategię dozowania czynnika AdBlue i ogólny model SCR zaimplementowany w

jednostce sterującej ECU, jest zdolność akumulowania NH₃ w reaktorze [1].

5.3 Czynniki redukujący

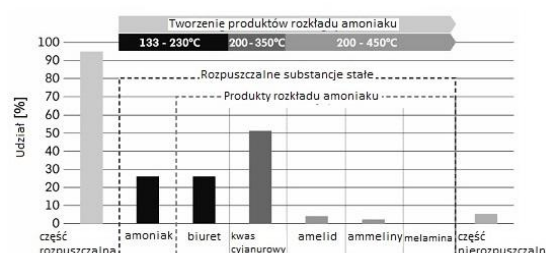
Powszechnie stosowany czynnik redukujący AdBlue jest 32,5 % eutektycznym roztworem wodnym mocznika. Jest to ciecz niepalna, która szybko ulega rozkładowi w środowisku, natomiast wchodzi w reakcje z niektórymi materiałami konstrukcyjnymi. Z tego względu należy zwrócić uwagę na odpowiedni dobór materiałów mających bezpośredni kontakt z tym czynnikiem. Stosuje się tu części wykonane z polimerów lub niektórych stali stopowych, a unika stali konstrukcyjnej, stopów cynku lub miedzi. Innym problemem jest zapewnienie płynności roztworu w niskiej temperaturze, ponieważ poniżej temperatury – 11,5°C roztwór krystalizuje się (rys. 10). Należy przewidzieć specjalny system ogrzewania zbiornika AdBlue oraz system powrotu do zbiornika po każdym wyłączeniu silnika, przy czym zarówno przewody doprowadzające, jak i zawór wtrysku powinny zostać puste. Problemem jest również utrata właściwości AdBlue pod wpływem temperatury wyższej niż 40°C, ponieważ rozpoczyna się jego powolny rozkład na amoniak i dwutlenek węgla. Z tego powodu zbiornik AdBlue jest izolowany termicznie i dodatkowo wyposażony jest w zawór upustowy, natomiast układ sterujący stale nadzoruje wartość temperatury i ciśnienia w zbiorniku [6].



Rys. 10. Właściwości czynnika AdBlue

W czasie dozowania czynnika redukującego do układu wydechowego część jego strumienia natrafia i pozostaje na wewnętrznych ściankach układu wydechowego lub innych elementach znajdujących się w zasięgu rozpylanej strugi. W niskiej temperaturze spalin na przechłodzonych powierzchniach tworzy się ciekła warstwa czynnika, która następnie krystalizuje się po odparowaniu wody tworząc stały osad. Osady powstają także na końcówce wtryskiwacza dozującego, powierzchni miksera i powierzchni czołowej reaktora SCR. Zjawisko to jest jednakże odwracalne i pod wpływem długotrwałego działania wysokiej temperatury mocznik w stanie stałym ulega dekompozycji. Biorąc pod uwagę wpływ warunków klimatycznych i temperatury

otoczenia, trybu pracy oraz stanu termicznego układu oczyszczania spalin, zjawisko formowania się osadów we wnętrzu układu nie może zostać całkowicie wyeliminowane. Procesy powstawania i redukowania się stałych frakcji są zjawiskami ciągłymi i następują naprzemiennie w funkcji zmieniającej się temperatury spalin. Dąży się do minimalizacji zjawisk powstawania osadów do tego stopnia, aby nie miało ono negatywnego wpływu na założony, końcowy poziom emisji i funkcjonalność systemu w różnych warunkach eksploatacji pojazdu. Na rys. 11 przedstawiono typowy skład chemiczny osadów powstających w układzie wylotowym w funkcji temperatury.



Rys. 11. Typowy skład chemiczny osadów stałych

Czynnikami mającymi bezpośredni wpływ na powstawanie osadów są: kształt i geometria układu wydechowego, stopień wymieszania i odparowania AdBlue w spalinach, strategia dozowania czynnika - zwłaszcza w stanach nieustalonych a także ewentualne nieszczelności wtryskiwacza. Zjawisko gromadzenia się stałych depozytów w pewnych warunkach pracy jest nieuniknione. Stwierdzono jednak, iż niewielkie ilości osadów nie prowadzą do pogorszenia współczynnika konwersji NO_x, wzrostu emisji czy też mechanicznych uszkodzeń układu wydechowego.

Niezależne badania rozwojowe nad systemami SCR przeprowadzone w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL, dokumentują i potwierdzają powyższe opisywane zjawiska powstawania oraz wpływu osadów stałych na pracę całego systemu oczyszczania spalin. Należy przyjąć, iż warunkami najbardziej sprzyjającymi temu zjawisku są fazy nagrzewania silnika, przewlekłej pracy w niskich temperaturach spalin oraz ciągła jazda w intensywnym cyklu miejskim.



Rys. 12. Osady stałe na powierzchni reaktora SCR podczas testów badawczych w Laboratorium Silników BOSMAL

Na powyższym rysunku przedstawiono osady stałe wytrącone z czynnika AdBlue na powierzchni reaktora SCR podczas pracy silnika w symulowanym teście jeżdżym na hamowni silnikowej w Instytucie BOSMAL.

W stosowanych rozwiązaniach czynnik redukujący AdBlue jest podawany do układu wylotowego poprzez elektronicznie sterowany wtryskiwacz dawkujący, przy średnim ciśnieniu dawkowania wynoszącym 5 bar. Wielkość wtryskiwanej dawki czynnika jest kalkulowana w jednostce sterującej ECU w funkcji takich zmiennych jak: masowa emisja tlenków azotu, temperatura spalin, iloraz masowego przepływu spalin do objętości reaktora (space velocity), udział NO₂/NO_x oraz masa amoniaku pozostająca w reaktorze. Masowa emisja NO_x jest wartością kalkulowaną na podstawie empirycznego modelu, co przy wysokiej korelacji z wartościami mierzonymi, eliminuje potrzebę stosowania czujnika NO_x przed reaktorem SCR. Złożonym zagadnieniem było określenie aktualnej masy amoniaku kumulowanego w reaktorze i

utrzymanie takiego bieżącego nasycenia, które zapewnia maksymalną redukcję tlenków azotu przy możliwie minimalnej emisji amoniaku za reaktorem (tzw. ammonia slip). W jednostce sterującej ECU zaimplementowano szereg szczegółowych modeli obliczeniowych pozwalających na maksymalnie efektywną pracę systemu na przestrzeni całego okresu użytkowania. Czujnik stężenia NO_x umieszczony za reaktorem pełni rolę diagnostyczną zgodnie z wymaganiami systemu EOBD II.

6. Podsumowanie

Opracowanie nowej generacji silników, spełniających wymagania normy Euro 6 świadczy o dużym potencjale rozwojowym, który nadal istnieje w produkowanych obecnie jednostkach napędowych. Wśród oferowanych na rynku tego typu jednostek napędowych, są to silniki wywodzące się wprost z obecnie stosowanych, sprawdzonych konstrukcji, które spełniają wymagania normy Euro 5. W stosunku do obecnie stosowanych systemów oczyszczania spalin, nowy układ został wzbogacony o dodatkowy reaktor selektywnej redukcji katalitycznej tlenków azotu SCR wraz systemem dozowania czynnika redukującego AdBlue. Bardziej złożony jest także układ elektronicznego sterowania, wyposażony w szereg dodatkowych czujników obsługujących system SCR. Konieczność uzupełniania czynnika AdBlue, możliwość jego krystalizacji lub zamarznięcia, potrzeba opróżniania systemu po zatrzymaniu silnika, to tylko niektóre cechy, które przekładają się na większą wrażliwość całego systemu na usterki i zaniedbania eksploatacyjne. Można też stwierdzić, że układ wylotowy stał się we współczesnych silnika bardzo złożonym podzespołem, który jest nie tylko bardzo kosztowny ale też podczas eksploatacji wymaga wiedzy i nowego podejścia ze strony użytkowników.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

SCR	Selective Catalytic Reduction/selektywna redukcja katalityczna	ECU	Engine Control Unit/jednostka sterująca silnikiem
DOC	Diesel Oxidation Catalyst/utleniający reaktor katalityczny	NEDC	New European Driving Cycle/ Europejski homologacyjny test jezdny
DPF	Diesel Particulate Filter/ filtr cząstek stałych	UDC	Urban Driving Cycle/Część miejska homologacyjnego testu jeźdnego
NSC	NO _x Storage Catalyst/reaktor katalityczny adsorbujący NO _x	EOBD	European On Board Diagnostic/pokładowy system diagnostyczny (europejska modyfikacja OBDII)
LNT	Lean NO _x Trap/reaktor katalityczny adsorbujący NO _x		

Bibliography/Literatura

- [1] DORENKAMP R., HADLER J., RUDOLPH F. et al.: Der neue 2,0l TDI-Motor von VOLKSWAGEN zur Erfüllung niedrigster Abgasgrenzwerte in Europa Aachener Kolloquium Fahrzeug - und Motorentechnik 2008
- [2] HADLER J.: Herausforderungen CO₂-Emissionen VDA 10. Technischer Kongress 2008

-
- [3] HADLER J., RUDOLPH F., ENGLER H.-J., RÖPKE S.: Der neue 2,0-l-4V-TDI-Motor mit Common-Rail-Einspritzung. MTZ 11I2007 Jahrgang 68
- [4] HERRMANN H.-O., HERNIER M. M.; SCHOLZ V.: Ein Feststoff SCR System für Diesel Pkw und leichte Nutzfahrzeuge 23. Int. Wiener Motorensymposium H.P. Lenz (Hrsg.) VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12 Nr. 490, Band 2, S. 217-233
- [5] MÜLLER W., HERR A., KÄFER S., LACROIX A.; JACOB E.: Ein Feststoff SCR System für Diesel Pkw und leichte Nutzfahrzeuge Feststoff-SCR, Beiträge 3. Int. Forum Abgas und Partikelemissionen, AVLDeutschland, Sinsheim, S. 231/242
- [6] TRAUTWEIN W.-P.: DGMK Forschungsbericht 616-1AdBlue als Reduktionsmittel für die Absenkung der NOX-Emissionen aus Nutzfahrzeugen mit Diesel motor
- [7] BRZEŻAŃSKI M.: Nowe standardy emisji w silnikach z zapłonem samoczynnym - silnik VW 2.0 TDI. kwartalnik Silniki Spalinowe 1/2010 (140)
- [8] BRZEŻAŃSKI M.: Diesel engines with respect to Euro 6 and BIN5/LEV II emission limits, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 18, No. 4 2011
- [9] BRZEŻAŃSKI M.: Zdjęcia i materiały własne

Marek Brzeżański, DSc., DEng. – Deputy Manager of the Institute and Internal Combustion Engines at Cracow University of Technology.

Dr hab. inż. Marek Brzeżański – wicedyrektor Instytutu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.



Rafał Sala, MEng. – Research Engineer in Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research & Development Institute Ltd, Bielsko-Biała, Poland.

Mgr inż. Rafał Sala – inżynier badawczy w Laboratorium Badań Silników Instytutu Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej.

