

Jacek PIELECHA, Łukasz RYMANIAK, Łukasz BRZEZIŃSKI

CHARAKTERYSTYKA SYSTEMÓW OCZYSZCZANIA SPALIN W POMOCNICZYCH SILNIKACH OKRĘTOWYCH

Streszczenie

W artykule zaprezentowano podstawowe charakterystyki systemów oczyszczania spalin przeznaczone do pomocniczych silników okrętowych o zapłonie samoczynnym. W związku z wprowadzaniem norm dotyczących ochrony środowiska, również tego typu silniki coraz częściej są wyposażane w systemy zmniejszające emisję zanieczyszczeń. Główny nacisk położony jest na zmniejszenie emisji tlenków azotu, a zastosowane metody selektywnej redukcji katalitycznej pozwalają na zmniejszenie jej o ponad 90%, co w konsekwencji skutkuje spełnieniem bardzo restrykcyjnych norm emisji spalin w strefach, w których ta emisja jest kontrolowana.

WSTĘP

Silniki o zapłonie samoczynnym (ZS) stanowią główne źródło napędu statków oraz zespołów prądotwórczych. W wyniku spalania paliw węglowodorowych silniki spalinowe emitują do atmosfery substancje szkodliwe w postaci: tlenku i dwutlenku węgla (CO i CO₂), węglowodorów (HC), tlenków azotu (NO_x), cząstek stałych (w zakresie masy PM oraz liczby PN), a także tlenków siarki (SO_x). Szacuje się, że w skali globalnej ok. 70% emisji związków szkodliwych pochodzących z transportu morskiego przypada na strefę 400 km od lądu, co znacząco wpływa na jakość powietrza w strefie przybrzeżnej. Coraz większa świadomość wpływu emisji zanieczyszczeń z tych silników na środowisko naturalne oraz zdrowie człowieka spowodowała, że w wielu krajach wydano przepisy normujące poziom emisji poszczególnych związków toksycznych. Wydanie stosownych przepisów wymusiło opracowanie odpowiednich testów pomiarowych oraz metod zmniejszenia emisji związków toksycznych w spalinach [1]. Obecnie podstawowym zadaniem zmniejszenia toksyczności spalin jest zredukowanie emisji tlenków azotu. Pod pojęciem tlenków azotu rozumie się połączenia azotu z tlenem typu: NO, NO₂, N₂O, N₂O₅. Azot w temperaturze otoczenia jest gazem, który prawie nie wchodzi w reakcje chemiczne z pozostałymi gazami atmosferycznymi, jednakże po przekroczeniu temperatury około 1100 °C staje się gazem reaktywnym o dużym powinowactwie do tlenu. Tlenki azotu powstające w trakcie procesu spalania paliw węglowodorowych są jedną z głównych przyczyn kwaśnych deszczy i smogu, natomiast wdychane przez człowieka przedostają się do krwioobiegu zatruwając organizm [2]. W silnikach zasilanych paliwem lekkim (MDO – *Marine Diesel Oil*) w procesie tworzenia tlenków azotu bierze udział przede wszystkim azot zawarty w powietrzu. Natomiast dla silników zasilanych paliwem ciężkim (HFO – *Heavy Fuel Oil*) znaczącą rolę odgrywa również azot zawarty w paliwie, w którym może znajdować się do 0,5% tego pierwiastka. Stwierdzono, że azot związany z paliwem ciężkim może zwiększyć nawet o 10% stężenie tlenków azotu w gazach wylotowych silnika spalinowego.

Istnieją różne metody redukowania tlenków azotu, które można podzielić na [1]:

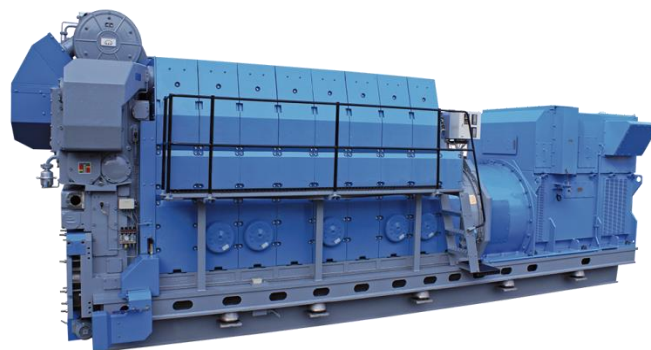
1. Metody pierwotne, polegające na redukowaniu tlenków azotu podczas procesu spalania w silniku,
2. Metody wtórne, polegające na usuwaniu lub redukowaniu tlenków azotu ze spalin silnika.

W niniejszym artykule omówiona zostanie metoda oczyszczania spalin z tlenków azotu z wykorzystaniem układów selektywnej

redukcji katalitycznej (SCR – *selective catalytic reduction*) dla pomocniczych średnioobrotowych silników okrętowych.

1. CHARAKTERYSTYKA POMOCNICZYCH SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

Średnioobrotowe czterosuwowe silniki spalinowe z zapłonem samoczynnym, pełniące funkcję silników pomocniczych na statkach, są wykorzystywane przede wszystkim do napędu prądnic (rys. 1). Są to silniki stałobrotowe. Najczęściej stosowane prędkości obrotowe wału korbowego to 720 obr/min, 750 obr/min, 900 obr/min, 1000 obr/min oraz 1200 obr/min. Jednostki te mogą być zasilane zarówno paliwem lekkim, jak również ciężkim przy wykorzystaniu indywidualnych pomp wtryskowych dla każdego cylindra.



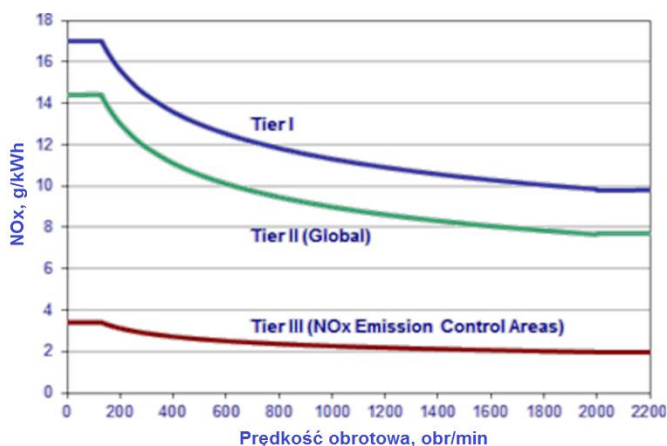
Rys. 1. Widok ogólny zespołu prądotwórczego z silnikiem MAN 8L27/38 [3]

Pompy wtryskowe napędzane są bezpośrednio z wałka rozrządu. Wyróżnia się konstrukcje z oddzielnymi wałkami rozrządu dla pomp i zaworów oraz rozwiązania zintegrowane. Ze względu na rozmiary silnika, wałki rozrządu są skręcane z pojedynczych segmentów, odpowiadających poszczególnym cylindrom. Silniki są tak projektowane, aby zapewnić dużą niezawodność działania w czasie całego okresu ich eksploatacji. W tym celu stosuje się m.in. masywne bloki cylindrowe, wały korbowe o wysokim stopniu sztywności oraz solidne korbowody. W jednostkach tych wykorzystuje się napinane hydraulicznie ściągi w celu zaabsorbowania obciążeń dynamicznych pochodzących z procesu spalania oraz mas wirujących. Zespół silnik-prądnicca umieszczony jest na wspólnej ramie fundamentowej, na której zabudowuje się również urządzenia pomocnicze. W celu minimalizacji przenoszenia drgań, kompletne zespoły prądotwórcze są osadzone elastycznie na specjalnych kompensato-

rac. Nowoczesne okrętowe silniki spalinowe spełniają wymagania norm emisji spalin IMO Tier II MARPOL Annex VI, a przy zastosowaniu układu SCR spełniają także wymagania IMO Tier III.

2. NORMY EMISJI DOTYCZĄCE TLENKÓW AZOTU

Międzynarodowe wymogi dotyczące emisji tlenków azotu, tlenków siarki i cząstek stałych są określone na mocy konwencji MARPOL załącznik VI (rozporządzenie dotyczące zapobiegania zanieczyszczeniu powietrza przez statki). Zgodnie z zasadami, emisja tlenków azotu każdego morskiego silnika z zapłonem samoczynnym zainstalowanego na statku zbudowanym po 1.01.2016 r. musi spełniać normy Tier III podczas pracy w obszarze kontroli emisji NO_x (NO_x ECA – Emission Control Area, rys. 2) w Ameryce Północnej (rys. 2). W Europie Północnej w obszarze kontroli emisji NO_x będą obowiązywały od 1.01.2021 r. Na pozostałych obszarach obowiązują normy Tier II [4].



Rys. 3. Dopuszczalne limity emisji tlenków azotu w zależności od prędkości obrotowej silnika [5]

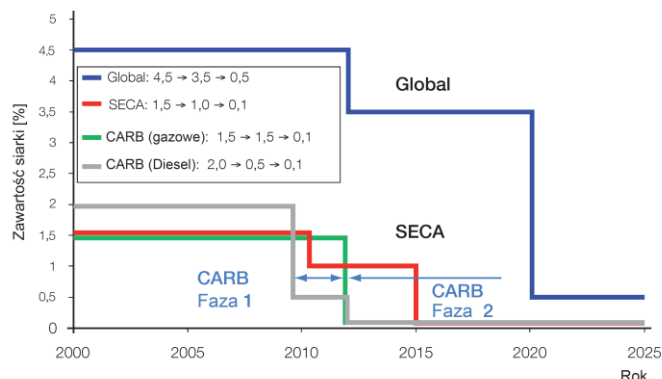
Międzynarodowe limity emisji NO_x dla morskich silników spalinowych, określone przez MARPOL Annex VI, przedstawiono na rys. 3 jako funkcja znamionowej prędkości obrotowej silnika.



Rys. 2. Obecnie obowiązujące Strefy Kontrolowanej Emisji (ECA) – w obszarze Ameryki Północnej i północnej części Europy [6]

Oprócz limitów emisji ustalonych przez Międzynarodową Organizację Morską – IMO o których mowa wcześniej, obowiązują również regulacje Unii Europejskiej zwracające uwagę na problem emisji związków szkodliwych (tlenków siarki i azotu) oraz na konieczność podjęcia działań mających na celu ich ograniczenie. Również w prawodawstwie polskim powstały ustawy i rozporządzenia regulujące poziomy emisji zanieczyszczeń pochodzących ze spalania paliw żeglugowych, które to opierają się w głównej mierze na prawie międzynarodowym [1].

Załącznik VI przytoczonych wcześniej regulacji zawiera dopuszczalne wartości zawartości siarki w paliwie jako środek mający na celu kontrolę emisji tlenków siarki i pośrednio cząstek stałych (gdyż nie ma wyraźnych limitów tej emisji). Dla obszarów kontroli emisji tlenków siarki (SECA – Sulphur Emission Controlled Areas) istnieją specjalne przepisy dotyczące jakości paliwa (docelowa zawartość siarki to 0,1%). Terminy wprowadzania zmian oraz dopuszczalne wartości zawartości siarki w paliwie (gazowym oraz w oleju napędowym) podano na rysunku 4.



Rys. 4. Zawartość siarki w paliwie na przestrzeni lat [7]

Zakłada się, że spełnienie norm emisji spalin Tier II jest możliwe do uzyskania w wyniku optymalizacji procesu spalania poprzez modyfikację przebiegu wtrysku paliwa do komory spalania. Spełnienie norm Tier III będzie natomiast wymagało zastosowania dodatkowych technologii redukujących emisję substancji szkodliwych np. w przypadku tlenków azotu – układu SCR.

3. RODZAJE SYSTEMÓW SELEKTYWNEJ REDUKCJI KATALITYCZNEJ

Selektywna katalityczna redukcja tlenków azotu jest podstawowym sposobem zmniejszenia ich emisji w spalinach zawierających duże ilości tlenu. Istnieje wiele jej opracowań i technologii, które ze względu na zastosowany reduktor można podzielić na dwie podstawowe grupy:

1. NH₃-SCR – redukcja związkami zawierającymi azot, np. amoniakiem, mocznikiem lub metyloaminą.
2. HC-SCR – redukcja węglowodorami lub pośrednimi produktami ich utleniania, np. węglowodorami nasyconymi i nienasyconymi, alkoholami, aldehydami itp.

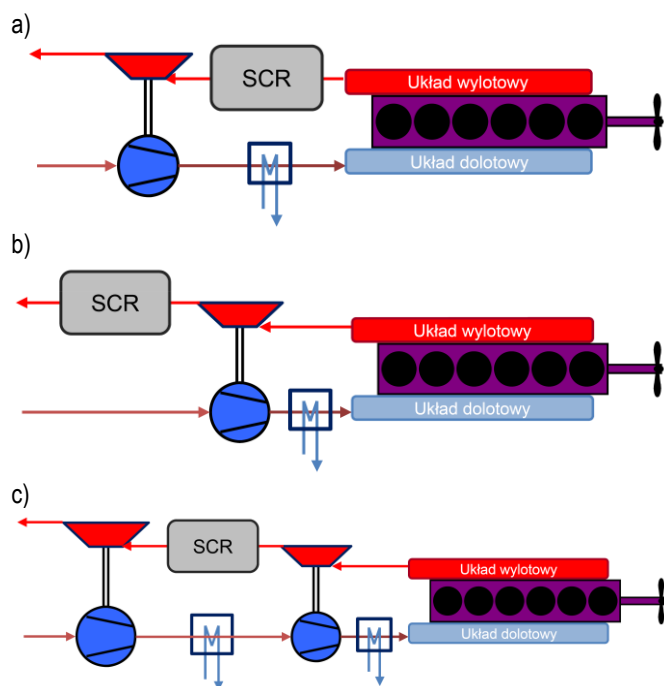
Układ selektywnej redukcji katalitycznej może być różnie umiejscowiony w układzie wylotowym silników okrętowych:

- a) przed turbosprężarką – rozwiązanie typowe dla silników dwusuwowych (rys. 5a),
- b) za turbosprężarką – rozwiązanie typowe dla silników czterosuwowych (rys. 5b),
- c) między turbosprężarkami – rozwiązanie zaawansowane dla silników czterosuwowych (rys. 5c).

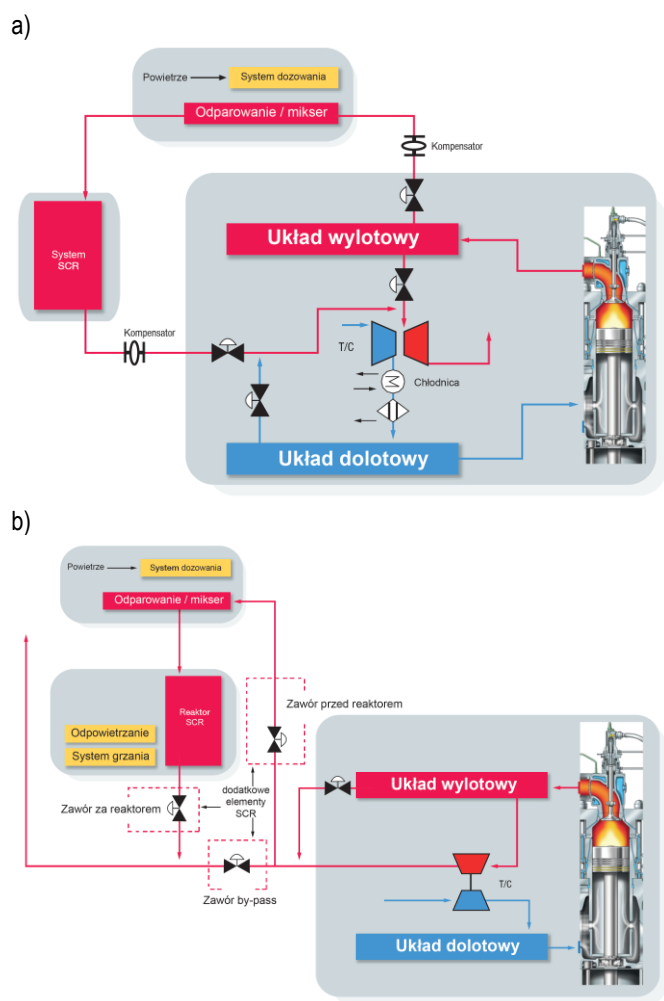
Można rozróżnić trzy podstawowe układy selektywnej redukcji katalitycznej, gdzie czynnikiem różniącym jest zawartość siarki w paliwie:

1. Systemy wysokociśnieniowe (HP-SCR; HP – high pressure) dla paliwa o zawartości siarki do 3,5%.
2. Systemy wysokociśnieniowe (HP-SCR) dla paliwa o małej zawartości siarki.
3. Systemy niskociśnieniowe (LP-SCR; LP – low pressure) dla paliwa o małej zawartości siarki.

Przykładem powyższych rozwiązań są systemy firmy MAN przedstawione na rysunku 6.



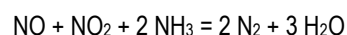
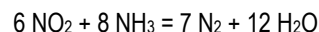
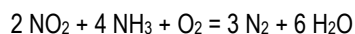
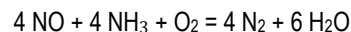
Rys. 5. Usytuowanie selektywnej redukcji katalitycznej w układzie wylotowym silnika: a) przed turbosprężarką, b) za turbosprężarką, c) między turbosprężarkami [8]



Rys. 6. System redukcji katalitycznej według rozwiązania firmy MAN: a) wysokociśnieniowy, b) niskociśnieniowy [9]

4. DZIAŁANIE SYSTEMU SELEKTYWNEJ REDUKCJI KATALITYCZNEJ

Selektywna redukcja katalityczna jest podstawową metodą redukcji tlenków azotu w spalinach zawierających duże ilości tlenu. Najbardziej rozpowszechnioną i efektywną metodą redukcji tlenków azotu jest wykorzystanie amoniaku (NH₃). Amoniak pełni rolę reduktora tlenków azotu i katalizatora. W tej metodzie amoniak jest wprowadzany do strumienia spalin przed katalizatorem, gdzie w obecności tlenu następuje redukcja NO_x nawet o 90-95%. Proces przebiega według reakcji:



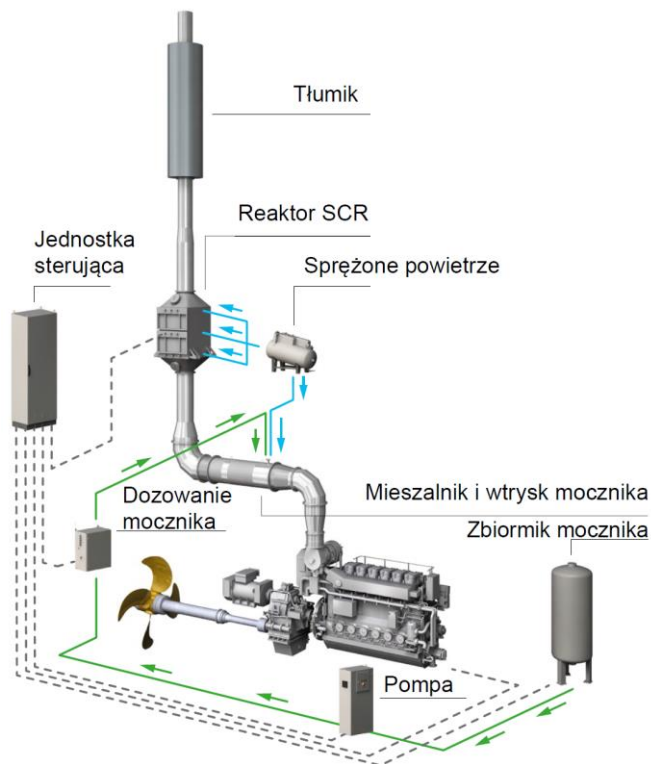
Ponieważ w omawianym procesie powstaje tylko azot i para wodna, nie występuje problem pozbywania się odpadów lub innych zanieczyszczeń. Powszechnie stosowane katalizatory do redukcji tlenków azotu za pomocą amoniaku bazują na tlenkach V₂O₅/TiO₂. W niektórych rozwiązaniach część tlenku wanadu V₂O₅ może być zastąpiona trójtlenkiem wolframu (WO₃) lub trójtlenkiem molibdenu (MoO₃). W skład katalizatora wchodzi także dwutlenek krzemu (SiO₂). Warstwę aktywną katalizatora NH₃ mogą stanowić tlenki glinu (Al₂O₃), tytanu (TiO₂) lub cyrkonu (ZrO₂) z dodatkiem jednego lub więcej tlenków V₂O₅, MoO₂ i WO₃ [1]. Cechą charakterystyczną reaktorów typu SCR jest istnienie, oprócz temperatury początku działania wynoszącej około 300°C, także górnej granicy temperatury około 450°C [2]. Dolna granica temperatury pracy wynika z konieczności wyeliminowania możliwości uszkodzenia katalizatora. W temperaturze poniżej 300°C amoniak łączy się z trójtlenkiem siarki, w wyniku czego powstaje siarczan amonu, powodujący korozję oraz uszkodzenie katalizatora. W temperaturze pracy powyżej 500°C amoniak zaczyna się palić, tracąc jednocześnie właściwości jako czynnik redukujący tlenki azotu. Jednorodne wymieszanie NH₃ ze spalinami jest warunkiem koniecznym sprawnego przebiegu procesu redukcji i minimalizacji poślizgu NH₃. Rozmiary katalizatora SCR są zależne od efektywności jego pracy z pożądanym stopniem redukcji NO_x, ciśnienia spalin i dopuszczalnego poślizgu NH₃. Ilością dozowanego amoniaku steruje się w zależności od stężenia NO_x dla poszczególnych obciążeń silnika. Na rysunku 7 przedstawiono układ SCR z wyszczególnieniem poszczególnych elementów jego instalacji.

System selektywnej redukcji katalitycznej na przykładzie rozwiązania stosowanego przez firmę MAN B&W składa się z: reaktora, jednostki mieszającej, systemu dostarczania mocznika zawierającego moduł pompy, jednostki dozującej, zespołu sterującego i systemu wydmuchiwania sadzy z modułem zbiornika sprężonego powietrza. Uruchomienie i działanie systemu SCR następuje w trybie całkowicie automatycznym. Podczas pracy silnika system sterowania wysyła sygnały początku i końca pracy do systemu zarządzającego. Ponadto, analizowane jest aktualne obciążenie silnika. Na podstawie tych informacji sterownik uruchamia układ pomiarowy reaktora i wtryskiwacz mocznika. W układzie pompowym mocznik dociera do jednostki dozującej z zasobnika. Jednostka dozująca kontroluje przepływ mocznika do wtryskiwacza w oparciu o działanie silnika, a ponadto reguluje strumień sprężonego powietrza do wtryskiwacza.

Środek redukujący wtryskiwany jest do przewodu wylotu gazów spalinowych przez wtryskiwacz mocznika. Jednostka mieszająca jest umieszczona za miejscem wtrysku, w celu równomiernego rozprowadzenia mocznika w całej objętości spalin i jego rozkładu,

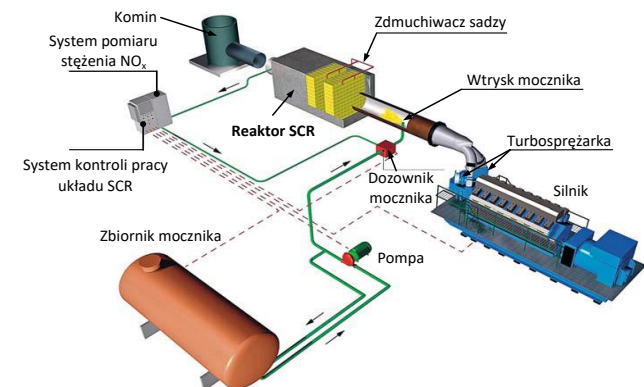
przed wprowadzeniem do reaktora SCR. W tym miejscu następuje katalityczna redukcja tlenków azotu.

Każdy reaktor jest wyposażony w system wydmuchiwania sadzy, zapobiegający blokowaniu systemu przez popiół i sadzę. Położenie reaktora jest pionowe i składa się z kilku warstw ceramicznych. Reaktor jest wyposażony w kontrolę różnicy ciśnienia i temperatury oraz otwory do inspekcji [10].



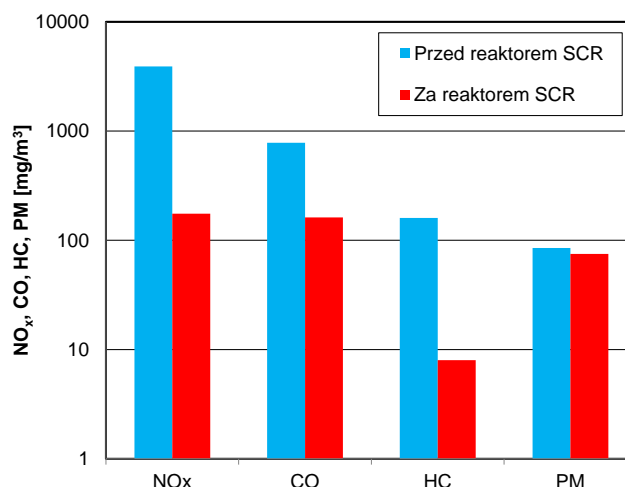
Rys. 7. Przykład układu selektywnej redukcji katalitycznej średnio-obrotowego silnika okrętowego [11]

Firma Wartsila uznaje system SCR za jedyny skuteczny sposób pozasilnikowego zmniejszenia zawartości tlenków azotu w spalinach. Badania przeprowadzone w żegludze promowej wykazały, że dzięki wysokiej temperaturze spalin silników średnioobrotowych katalizatory można umieszczać za turbodoładowaniem, a nie przed nim, jak to ma miejsce w silnikach wolnoobrotowych (rys. 8) [12, 13]. Takie rozwiązanie poprawia trwałość katalizatora, zmniejsza poziom amoniaku w spalinach i prawdopodobieństwo jego negatywnych oddziaływań na turbinę. Zauważono, że stabilność pracy reaktora jest niedostateczna przy zmiennych obciążeniach



Rys. 8. Schemat okrętowej instalacji SCR firmy Wartsila [12]

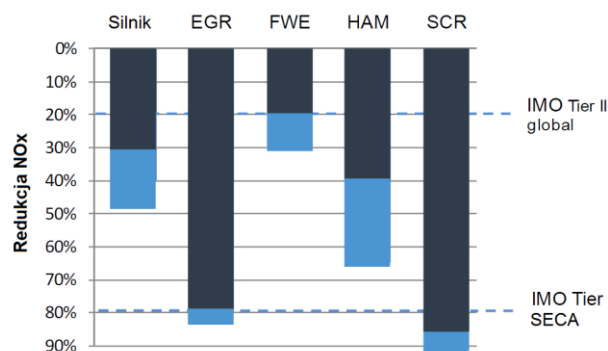
silnika. Wykorzystanie takiego rozwiązania przyniosło wymierne korzyści jego stosowania. Uzyskano zmniejszenie emisji związków szkodliwych na poziomie ponad 99% dla tlenków azotu (rys. 9). [13]



Rys. 9. Zmniejszenie emisji zanieczyszczeń dla stosowanego rozwiązania układu SCR firmy Wartsila [14]

PODSUMOWANIE

Obecnie obowiązujące przepisy prawa międzynarodowego dotyczące zakresów poziomu emisji substancji szkodliwych w spalinach pochodzących z silników okrętowych wymuszają na producentach silników oraz użytkownikach nowobudowanych statków stosowanie rozwiązań znacząco ograniczających emisję związków szkodliwych. Z licznych rozwiązań ograniczających emisję tlenków azotu najbardziej rozpowszechnione jest stosowanie układów selektywnej redukcji katalitycznej z zastosowaniem mocznika, jako źródła amoniaku będącego czynnikiem redukującym NO_x (rys. 9).



Rys. 9. Rozwiązania umożliwiające spełnienie wymagań odnośnie emisji tlenków azotu w silnikach okrętowych; oznaczenia: EGR (Exhaust Gas Recirculation) – recyrkulacja spalin, FWE (Fuel Water Emulsion) – emulsja wodno-paliwowa, HAM (Humid Air Motor) – nasycanie powietrza dolotowego parą wodną [15]

Pomimo wielu zalet i zadawalającego poziomu redukcji NO_x umożliwiającego spełnienie przez silniki norm emisji Tier III, układy SCR wymagają prowadzenia dalszych badań zmierzających do podniesienia sprawności funkcjonowania systemu w całym zakresie pracy silników. Podejmowane są również działania mające na celu ograniczenie wymaganej przestrzeni do zabudowy poszczególnych elementów układu.

The study presented in this article was performed within the statutory research (contract No. 05/52/DSPB/0260).

BIBLIOGRAFIA

1. Merkiż J., Piaseczny L., Kniżewicz T., *Zagadnienia emisji spalin silników okrętowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2016.
2. Rokosch U., *Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów OBD*. WKiŁ, Warszawa 2006.
3. <http://marine.man.eu> (dostęp: 10.10.2017).
4. <https://www.dieselnet.com> (dostęp: 11.10.2017).
5. Emission Project Guide, MAN B&W Two-stroke Marine Engines, 2017.
6. <http://www.egcsa.com> (dostęp: 10.10.2017).
7. Tier III Compliance, Low Speed Engines, MAN Diesel & Turbo, 2015.
8. Rippl A., *Impact of Tier III Regulations on Turbocharger Layout and Design*. Licence Days 2010.
9. MAN B&W Tier III two-stroke marine diesel engines with SCR, Market Update Note, MAN Diesel & Turbo, Copenhagen 2016.
10. Selective Catalytic Reduction, MAN Diesel & Turbo, 2017.
11. Technology for Ecology, Medium speed engines for cleaner air, MAN Diesel & Turbo, 2017.
12. Suominen A., Esselström L., Solla A., *SCR technology development for heavy fuel oil engines*. Wartsila Technical Journal, 2011.
13. Wärtsilä Environmental Product Guide, 2, 2013.
14. Merkiż J., Piaseczny L., Kniżewicz T., *Zagadnienia emisji spalin silników okrętowych*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2016.
15. Schlüter S., Fjeldhøj F., Wiedemann R., Bader I., Xu H., *MDT Emission Reduction Technology*. MAN Diesel & Turbo, 2012.

CHARACTERISTICS OF AFTERTREATMENT SYSTEMS IN AUXILIARY MARINE ENGINES

Abstract

The article presents basic characteristics of exhaust aftertreatment systems designed for auxiliary marine diesel engines. Due to the introduction of environmental standards, such engines are increasingly more often equipped with emission reduction systems. Emphasis is placed on the reduction of nitrogen oxide emissions, and selective catalytic reduction methods enable a reduction of more than 90%, which allow such systems to meet very strict emission standards in the areas where this emission is limited.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Jacek Pielecha** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
 dr inż. **Łukasz Rymaniak** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
 mgr inż. **Łukasz Brzeziński** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań