

dr hab. inż. Agnieszka Merkisz-Guranowska, prof. PP
Politechnika Poznańska
dr inż. Maciej Andrzejewski,
dr inż. Paweł Daszkiewicz,
mgr Dawid Gallas
mgr inż. Hanna Stawecka
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

Modern systems for reducing the toxicity of rail vehicle exhaust

In order to minimize the share of toxic substances in exhaust gases emitted by the engine it is necessary to continuously, because the provisions on emissions are now being rapidly changed and tightened, work on modern aftertreatment systems. It is, therefore, required that increasingly sophisticated and structurally efficient solutions that ensure maximum reduction of toxic exhaust are being used. The article presents examples of systems that are currently used in some diesel rail vehicles.

Nowoczesne systemy zmniejszające toksyczność spalin pojazdów kolejowych

W celu minimalizowania udziału substancji toksycznych w emitowanych przez silniki gazach wylotowych, należy ciągle, bo przepisy dotyczące emisji zanieczyszczeń są obecnie w szybkim tempie zmieniane i zaostrzane, pracować nad nowoczesnymi układami oczyszczania tych gazów. Wymagane jest zatem stosowanie coraz doskonalszych konstrukcyjnie oraz efektywniejszych rozwiązań, które zapewnią maksymalne zmniejszenie ilości toksycznych składników spalin. W artykule zaprezentowano przykładowe systemy znajdujące aktualnie zastosowanie w wybranych pojazdach kolejowych trakcji spalinowej.

1. WPROWADZENIE

Limity emisji zanieczyszczeń w spalinach w krajach członkowskich Unii Europejskiej odnoszą się zarówno do pojazdów nowych, będących obecnie w produkcji, jak i dla starszych używanych pojazdów szynowych, w tym sprowadzanych z innych krajów. Dopuszczenie importowanej lokomotywy do eksploatacji w Europie wymaga poddania jej badaniom emisyjności oraz potwierdzenia, że spełnia ona wspomniane limity emisji dla pojazdów w danym wieku i danej kategorii homologacyjnej. Przedmiotowe limity mają na celu ograniczenie możliwości stosowania przestarzałych lokomotyw przez polskich przewoźników operujących na terenie całego kraju. Wiek taboru kolejowego w Polsce jest bowiem bardzo wysoki w porównaniu z resztą Europy [3]. Przyczynia się do tego niski koszt polonizacji taboru sprowadzanego w porównaniu do zakupu nowego, przy zbliżonych parametrach eksploatacyjnych importowanych pojazdów. Stąd średni wiek lokomotyw spalinowych w Polsce wynosi około 30 lat (tab. 1). W związku z tym podejmuje się liczne działania w celu efektywnej modernizacji polskiego taboru kolejowego.

1 INTRODUCTION

Limits on emissions of pollutants in the exhaust gases in the EU member states apply both to new vehicles, which are currently in production, and to older used rail vehicles, including those imported from other countries. The admission of imported locomotives to service in Europe, requires it to undergo emissivity tests and to confirm that it meets these emission limits for vehicles of its age and category of approval. These limits are designed to limit the possibility of using outdated locomotives by Polish carriers operating throughout the country. The age of rolling stock in Poland is in fact very high in comparison with the rest of Europe [3]. It is the result of the low cost of rolling stock Polonization of imported vehicles compared to buying new units, with operating parameters similar to the imported vehicles. Thus, the average age of locomotives in Poland is about 30 years (Table. 1). Therefore, numerous steps are being taken to effectively modernize the Polish rolling stock.

Tab. 1. Wiek taboru kolejowego wybranych polskich przewoźników [5]

Tab. 1. Age of the rolling stock of selected Polish carriers [5]

	Regional Transport		PKP Intercity		Mazovia Railways	
	Number	Avg. age	Number	Avg. age	Number	Avg. age
EMUs	868	25 years	14	4 years	199	30 years
Carriages	920	25 years	3127	24,7 years	37***	2 years
Locomotives	136*	30 years	402**	30 years	138*	30 years

*diesel locomotives, **electric locomotives, ***bunk carriages

*lokomotywy spalinowe, **lokomotywy elektryczne, ***wagony piętrowe

Jak już wspomniano, po sprowadzeniu pojazdu szynowego do Polski należy przystosować go do eksploatacji w kraju, między innymi upewniając się, że emisja zanieczyszczeń z jego układu napędowego mieści się w granicach norm europejskich. Ogólnie mówiąc, należy stale podejmować działania w celu minimalizowania udziału substancji toksycznych w spalinach emitowanych przez silniki lokomotyw, ponieważ regulacje prawne w zakresie emisji spalin są obecnie szybko zmieniane i zaostrzone dla wszystkich pojazdów z silnikami spalinowymi [1]. Stąd konieczne jest korzystanie z coraz bardziej wyrafinowanych i efektywnych układów oczyszczania, które zapewniają maksymalną redukcję zanieczyszczeń z gazów wylotowych [6].

Mając na względzie powyższe aspekty stosuje się różne typy układów oczyszczania spalin, w zależności od stopnia konieczności i opłacalności przedsięwzięć modernizacyjnych. Możliwe są też na przykład naprawa główna silnika lub jego wymiana na nowocześniejszy i o lepszych parametrach eksploatacyjnych, ale jest to często utrudnione przez ograniczenia masy, wymiarów, kompatybilności oraz wysokie koszty. Stąd większość pojazdów z przestarzałymi silnikami spalinowymi nie jest poddawana gruntownej modernizacji silnika, uniemożliwiając tym samym wykorzystanie wewnątrzsilnikowych rozwiązań dotyczących redukcji emisji zanieczyszczeń. W większości przypadków właściciele taboru ograniczają się do wymiany tylko pewnych elementów oraz dodania pozasilnikowych układów oczyszczania spalin. Na rynku dostępne są gotowe moduły, które można zamontować na lokomotywie, aby poprawić jej klasę emisji [4]. Tego typu działanie określa się jako retrofitting, czyli dodawanie nowych układów do starszych silników. Przykładem takich rozwiązań jest zaawansowany technologicznie układ oczyszczania spalin firmy Cummins (rys. 1).

2. RETROFITTING

Implementacja układów oczyszczania gazów wylotowych silników lokomotyw, określana jako retrofitting, jest najpopularniejszym sposobem dostosowania pojazdów do nowszych standardów emisyjnych. Przykładem takich działań jest dodanie (montaż na dachu

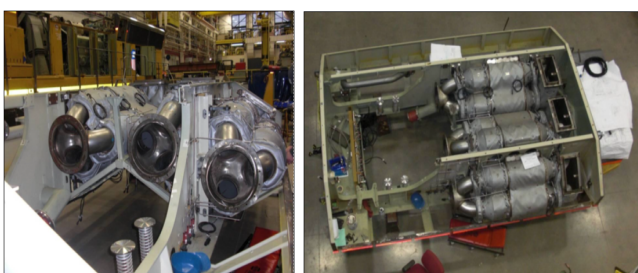
As already mentioned, after having been brought to Poland the rail vehicle must be adapted to operation in the country, among other things, making sure that the emission of pollutants from its drive system is in line with the European standards. Generally speaking, steps to minimize the share of toxic substances in exhaust gases emitted by the engines of locomotives should be taken, because the legislation regarding emissions is currently being rapidly changed and tightened for all vehicles with combustion engines [1]. Hence, it is necessary to use more and more sophisticated and effective aftertreatment systems that ensure maximum reduction of pollution from exhaust gases [6].

Considering the above aspects different types of exhaust aftertreatment systems are being used, depending on the need and cost of modernization. It is also possible to, for example, repair the main engine or replace it with a more modern and better performing engine, but this is often hampered by the constraints of mass, dimensions, compatibility and high costs. Thus the majority of vehicles with outdated internal combustion engines are not subjected to a thorough overhaul of the engine, thereby preventing the use of engine based solutions for the reduction of emissions. In most cases, the owners of rolling stock limit the modernization to replacing only some elements and adding in exhaust aftertreatment systems. The market offers ready-made modules, which can be mounted on the locomotive to improve its emission class [4]. This type of operation is referred to as retrofitting, or adding new systems to older engines. An example of such solutions is the technologically advanced exhaust aftertreatment system from Cummins (Fig. 1).

2. RETROFITTING

Implementation of systems for treating diesel engine exhaust gases, referred to as retrofitting, is the most popular method of adapting vehicles to newer emission standards. Examples of such activities is to add (mounted on the roof of the vehicle) a system consisting of nine DOC and DPF units (*Diesel Oxidation Catalyst, Diesel Particulate Filter*; Fig. 2 and 3). Such a solution allows for a significant reduction in

pojazdu) systemu składającego się z dziewięciu układów typu DOC i DPF (*Diesel Oxidation Catalyst, Diesel Particulate Filter*; rys. 2 i 3). Zastosowanie takiego rozwiązania pozwoliło na znaczące zmniejszenie emisji związków szkodliwych. Redukcja emisji wyniosła 35% dla tlenków azotu, około 75% dla tlenku węgla, a dla węglowodorów oraz cząstek stałych nawet ponad 90% (rys. 4). Zastosowanie nowych technologii oczyszczania spalin pozwoliło na podniesienie klasy emisyjności lokomotywy SD59MX do normy Tier 2. Wskazuje to na duży potencjał tego typu modułowych systemów montowanych na starszych lokomotywach [2]. Umożliwia to dalszą eksploatację sprawnej lokomotywy w zgodności z normami emisji kosztem zaledwie ułamka kosztu zakupu nowej lokomotywy wyposażonej w nowoczesny silnik o podobnych parametrach eksploatacyjnych.



Rys. 2. System dziewięciu układów DOC i DPF przygotowanych do zamontowania na lokomotywie SD59MX [11]

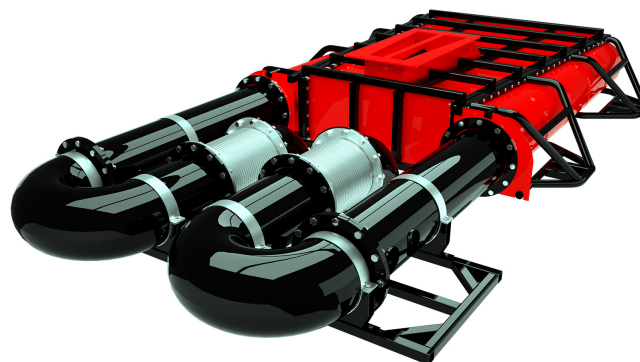
Fig. 2. The system of nine DOC and PDF units prepared to be mounted on the SD59MX locomotive [11]



Rys. 3. Lokomotywa SD59MX [11]

Fig. 3. Locomotive SD59MX [11]

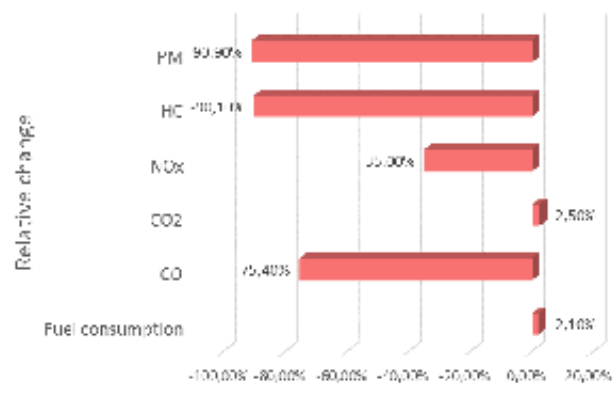
Głównym problemem w zastosowaniu opisanych powyżej rozwiązań, zwłaszcza w starszych lokomotywach, jest mało miejsca na montaż nowych podzespołów w lokomotywie (ograniczenia związane ze skrajnią taboru). Przedstawiony wcześniej system nie pozwolił na zmniejszenie emisji NO_x z lokomotywy o więcej niż 35% - duża wartość emisji tlenków azotu jest głównym ograniczeniem w zwiększeniu normy emisji przedmiotowego pojazdu kolejowego do poziomu Tier 3. Zastosowanie dedykowanej redukcji tlenków azotu układu SCR (*Selective Catalytic Reduction*) wymaga niestety dalszego dodatkowego miejsca w pojeździe na zbiornik wodnego roztworu mocznika i system dozujący. Pomimo tego istnieją rozwiązania,



Rys. 1. Układ oczyszczania do silników o dużej mocy z oferty firmy Cummins [7]

Fig. 1. Aftertreatment system for high power engines offered by Cummins [7]

the emission of harmful compounds. Achieved emission reduction was 35% for nitrogen oxides, about 75% for carbon monoxide and 90% for hydrocarbons and particulate matter (Fig. 4). The use of new technologies for the treatment of exhaust gases allowed to increase the emission class of the SD59MX locomotive to Tier 2. This demonstrates the high potential of this type of modular systems installed on older locomotives [2]. It also allows for continued operation of operational locomotives in compliance with the emission standards at the expense of only a fraction of the cost of purchasing new locomotives equipped with a modern engine with similar operating parameters.

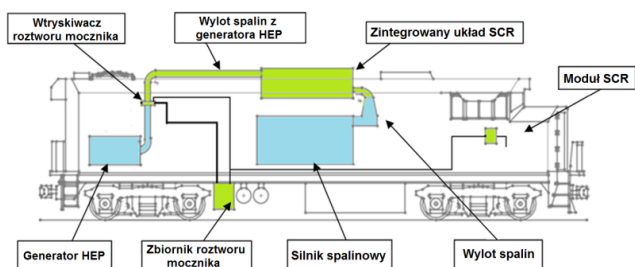


Rys. 4. Względna zmiana poziomu emisji lokomotywy SD59MX po modernizacji [8]

Fig. 4. The relative change in the level of emissions of the SD59MX locomotive after modernization [8]

The main problem in the application of the above mentioned solutions, especially in older locomotives, is the limited space for the installation of new components in the locomotive (limitations associated with the gauge of the rolling stock). The system presented earlier did not allow for the reduction of NO_x emissions from locomotives by more than 35% - a large emission value of nitrogen oxides is a major limitation in increasing the emission standard of the rail vehicle to Tier 3. The use of a dedicated system for the reduction of nitrogen oxides known as SCR (*Selective Catalytic Reduction*) unfortunately

które mogą poprawić również wspomniany aspekt emisyjny. Na przykład proponowany przez firmę Rail Propulsion Systems układ pozwala zmniejszyć emisję zanieczyszczeń z silnika spełniającego normę Tier 0 do poziomu normy Tier 4 (dot. emisji NO_x) i Tier 3 (dla emisji PM). System ten określany jest jako BATS (*Blended Aftertreatment System*), czyli system łączący układ wylotowy głównego silnika ZS o dużej mocy z układem dodatkowego generatora HEP, dostarczającego energię m.in. do zasilania systemów elektrycznych w wagonach pociągu (rys. 5). Połączenie to jest konieczne dla efektywnego wykorzystania wtryskiwanego roztworu mocznika, który ostatecznie służy do zmniejszenia emisji NO_x w spalinach obu jednostek tłokowych.



Rys. 5. Schemat podłączenia systemu BATS przy renowacji starszej lokomotywy [9]

Fig. 5. Diagram showing the addition of BATS system when renovating older locomotives [9]

System BATS przedstawiony na rysunku 5 pozwala na bardzo efektywne zmniejszenie poziomu większości emitowanych toksycznych zanieczyszczeń. Przez zastosowanie tego typu układu oczyszczania spalin w zmodernizowanej lokomotywie PR30C zmniejszono emisję CO, HC i NO_x o około 85-95%, natomiast emisję PM o około 50% (rys. 6).

Niestety powszechne użytkowanie lokomotyw z układami SCR, wykorzystującymi wodny roztwór mocznika, wymaga dostosowania infrastruktury kolejowej. Aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie tego typu systemów konieczna jest bowiem możliwość regularnego uzupełniania przedmiotowego płynu. Przygotowanie odpowiedniego dystrybutora do tankowania roztworu mocznika na każdej stacji oraz, w przypadku długich tras umożliwienia tankowania pomiędzy stacjami, wymagałoby dużych kosztów inwestycyjnych. Stąd większość przewoźników na rynku amerykańskim odrzuciło możliwość wykorzystania układów typu SCR w spalinowych pojazdach kolejowych.

Jak wykazano przedstawiony system BATS skutecznie zmniejsza emisję tlenków azotu. Nie posiada on jednak w tej wersji skutecznej metody redukcji cząstek stałych. W celu rozwiązania tego problemu firma Rail Propulsion Systems pracuje obecnie nad opracowaniem i opatentowaniem wersji systemu BATS z dodatkowym filtrem cząstek stałych (DPF) oraz innymi usprawnieniami zwiększającymi wydajność całego pojazdu. Taki system ma już w swojej ofercie

requires further additional space in the vehicle for a tank of aqueous urea solution and the urea dosing system. Despite this, there are solutions that can also improve the emission in this aspect. For example, the system proposed by the Rail Propulsion Systems company reduces the emission of pollutants from a Tier 0 engine to that of Tier 4 level (regarding the NO_x emission) and Tier 3 (for PM emissions). This system is called BATS (*Blended aftertreatment system*), a solution that combines the exhaust system of the main high power diesel engine with the additional HEP generator exhaust, which supplies energy to power the electrical systems in the cars of the train (Fig. 5) among other things. This connection is necessary for the effective use of the injected urea solution that ultimately serves to reduce the NO_x concentration in the exhaust gas of both piston units.



Rys. 6. Względna zmiana wartości emisji zanieczyszczeń z lokomotywy PR30C po modernizacji (dodany układ SCR) [8]

Fig. 6. The relative change in the value of emissions from locomotive PR30C after modernization (added SCR) [8]

The BATS system shown in Figure 5, allows for very effective reduction of the level of toxic emissions for most exhaust components. Through the use of this type of exhaust aftertreatment systems in the modernized locomotive PR30C the emissions of CO, HC and NO_x were reduced by about 85-95%, and PM emissions by about 50% (Fig. 6).

Unfortunately, a widespread use of locomotives with SCR systems, which use aqueous urea solution, requires an adjustment of the railway infrastructure. It is necessary to provide a possibility of regularly replenishing the fluid to ensure proper functioning of such systems. Preparation of a suitable distributor for refueling the urea solution at each station and, in the case of long distances between refueling stations, would incur large investment costs. Hence, most carriers in the US have rejected the possibility of using such SCR systems in rail vehicles operated by them.

As demonstrated the presented BATS system effectively reduces nitrogen oxide emissions. This version, however, does not contain an effective method of reducing particulate matter emission. To

firma Speedy, co przy okazji jest dobrym przykładem omięcia ograniczeń przestrzeni w lokomotywie (kompaktowe rozwiązanie; rys. 7).



Rys. 7. Ergonomiczne wykorzystanie przestrzeni w pojazdach kolejowych na przykładzie filtra DPF firmy Speedy [10]

Fig. 7. Ergonomic use of space in railway vehicles on the example of the DPF placement by Speedy [10]

3 PODSUMOWANIE

W przeciągu ostatnich 15 lat, dla pojazdów ciężkich o mocy użytecznej w przedziale 130-560 kW, największym zmianom uległy wartości graniczne emisji tlenków azotu (95%), węglowodorów (85%) i cząstek stałych (97%). Stąd konieczne jest dalsze rozwijanie technologii służących zmniejszaniu emisji tychże substancji toksycznych. Pomimo dalszej eksploatacji starszych lokomotyw spalinowych wydajne systemy oczyszczania spalin mogą pozwolić na znaczące obniżenie poziomu emisji szkodliwych substancji z sektora transportu kolejowego.

Takie działania modernizacyjne jak retrofitting, pozwalają na osiągnięcie nowszych limitów emisji spalin niskimi nakładami pieniężnymi. Pomimo nieustannego rozwoju układów oczyszczania spalin wciąż zmniejszanych limitów emisji wkrótce nie będzie można osiągnąć przez samo dodawanie pozasilnikowych urządzeń ograniczających emisję zanieczyszczeń gazowych i stałych. Wymusza to opracowywanie coraz bardziej ekologicznych silników (nowoczesne układy wtryskowe) oraz stosowanie paliw alternatywnych.

Możliwe rozwiązania modernizacyjne, poza retrofittingiem, to wymiana jednostki napędowej na nowszą (z wbudowanymi fabrycznie rozwiązaniami wewnątrzsilnikowymi, jak np. EGR). Przykładowo dla lokomotywy typu SU 45 koszt modernizacji z wymianą silnika szacuje się na około 5 mln złotych. Jest to wciąż około 3-4 razy mniej niż zakup nowej jednostki, z czego można wnioskować, że renowacje eksploatowanych dotąd lokomotyw spalinowych pozostaną preferowaną metodą na utrzymanie funkcjonalnego taboru kolejowego przez polskich przewoźników.

to solve this problem, Rail Propulsion Systems is currently developing and patenting a new version of the BATS with an additional diesel particulate filter (DPF) and other improvements that increase the fuel efficiency of the entire vehicle. Such a system is already on offer from the company Speedy, which is also a good example of overcoming the space limitations on board the locomotive (compact solution; Fig. 7).

3 CONCLUSIONS

In the past 15 years the biggest changes for heavy vehicles with a power output of between 130-560 kW were the limit values for emissions of nitrogen oxides (95%), hydrocarbons (85%) and particulates (97%). Hence, it is necessary to further develop technologies for reducing emissions of these substances. Despite the continued operation of older locomotives efficient exhaust aftertreatment systems may allow for a significant reduction in emissions of harmful substances from the rail transport sector.

Changes such as retrofitting can achieve the newer exhaust emission limits with low investment costs. Despite the continuous development of exhaust aftertreatment systems the regularly reduced emission limits will soon be impossible to achieve simply by adding exhaust aftertreatment systems. Development of increasingly cleaner engines (modern injection systems) and the use of alternative fuels is currently being pushed for worldwide.

Possible modernization solutions, aside from retrofitting, is the replacement of the engine with a newer model (with integrated factory solutions for emission reduction such as EGR). For example, for SU 45 type locomotives the cost of modernization along with engine replacement is estimated at about 5 million PLN. This is still about 3-4 times less than the cost of purchasing a new vehicle, from which it can be concluded that the modernization of older operational locomotives will remain the preferred method for maintaining a functional rolling stock by Polish carriers.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kettner J.: *Moving towards sustainable mobility a strategy for 2030 and beyond for the European railway sector*. 12 UIC Sustainability Conference, Venice 2012.
- [2] Lenz M.: *Powertrains and fuels for locomotives*. Electro-Motive Diesel, NAFTANEXT, April 23, 2014.
- [3] Miłaszewicz D., Ostapowicz B.: *Stan transportu kolejowego w Polskiej gospodarce*. Studia i prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania nr 25, Uniwersytet Szczeciński.

- [4] *Park P.W., Downey M., Youngren D., Bruestle C.: Advanced aftertreatment system development for a locomotive application. ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference ICEF2012, September 23–26, 2012, Vancouver, Canada.*
- [5] *PKP S.A., ZDG TOR*
- [6] *Rokosch U.: Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów. WKiŁ, Warszawa 2007.*
- [7] *www.cummins.com*
- [8] *www.progressrail.com*
- [9] *www.railpropulsion.com*
- [10] *www.speedyservices.com*
- [11] *www.up.com*