

Maciej Andrzejewski, Paweł Daszkiewicz, Łukasz Rymaniak, Jerzy Merkisz, Michalina Kamińska

Wpływ modernizacji lokomotyw eksploatowanych w Polsce na emisję związków toksycznych w spalinach

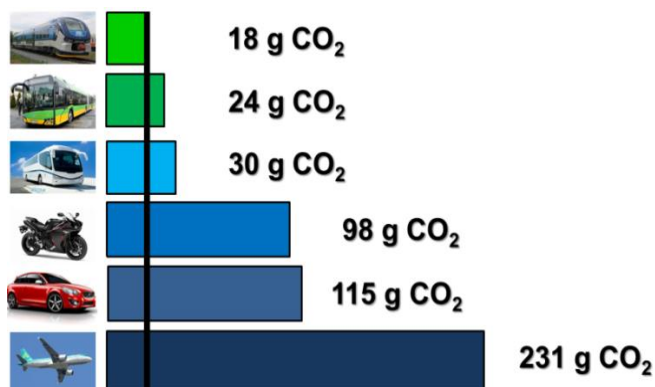
JEL: Q01 DOI: 10.24136/atest.2018.353
Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule skupiono się na wpływie programu modernizacji taboru kolejowego obejmującego kompleksową przebudowę lokomotyw spalinowych przy założeniu wymiany ich jednostek napędowych na silniki spełniające normę Stage IIIA. W artykule poruszono temat taboru eksploatowanego na terenie Polski oraz przedstawiono regulacje prawne dotyczące emisji spalin w lokomotywach. Efektem końcowym było oszacowanie emisji związków toksycznych z lokomotyw przed i po modernizacji oraz porównanie tych wyników.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenia środowiska, transport kolejowy, modernizacja, ochrona środowiska

Wstęp

Emisja związków szkodliwych spalin emitowana przez transport szynowy charakteryzuje się dużo mniejszymi wartościami w porównaniu do innych gałęzi transportu, co przedstawia rys. 1. Ze względu na rosnące wymagania dotyczące limitów szkodliwych związków w spalinach coraz więcej mówi się o spalinach emitowanych przez pojazdy trakcyjne. W Polsce głównym problemem jest przestarzały tabor kolejowy, którego znaczna większość została wyprodukowana w latach 70-tych i 80-tych. Wprowadzone normy emisji spalin zgodne z regulacją ORE 13 czyli pierwszą normą dotyczącą pojazdów pozadrogowych nie uwzględnia powyższych pojazdów. Ze względu na dążenie do ciągłej poprawy stanu środowiska, wymagane jest podejmowanie działań mających na celu poprawę ekologiczności silników w lokomotywach spalinowych. Jednym ze sposobów są podejmowane działania mające na celu modernizację i unowocześnianie pojazdów trakcyjnych [4, 7, 9, 10].



Rys. 1. Średnia emisja CO₂ [pkm] w Europie należy wstawić bezpośrednio w tekście i wyśrodkować [opracowanie własne]

1. Lokomotywy eksploatowane w Polsce

Według małego rocznika statystycznego Polski z roku 2017 liczba eksploatowanych lokomotyw spalinowych w kraju wyniosła 2091 sztuk (tab. 1). Ze względu na długi okres eksploatacji lokomotyw oraz fakt, że lata budowy eksploatowanego taboru kolejowego przypadają w większości przypadków na okres, w którym nie regu-

lowano jeszcze wartości granicznych związków toksycznych dla pojazdów pozadrogowych, w rozważaniach dotyczących emisji spalin dla tych pojazdów przyjęto możliwie najstarszą normę emisji związków toksycznych w spalinach. Około 66% pojazdów trakcyjnych stanowią lokomotywy typu: ST 44, ST 43 oraz SM 42, których lata produkcji przypadają na okres, który nie obejmuje normy emisji związków szkodliwych oraz na taki w którym wszedł w życie raport ORE B13 a decyzja o przyjęciu takiego sposobu rozważań jest uzasadniona. W rozważaniach nie ujęto wielkości oraz liczby cząstek stałych, gdyż przed rokiem 2003 brano było pod uwagę zaciemnienie spalin, co uniemożliwia porównanie wyników przed i po modernizacji taboru. Najnowszą normę emisji spalin Stage IIIA spełnia jedynie 2,5% lokomotyw w Polsce, dlatego też pojawiła się inicjatywa wprowadzenia programu modernizacji silników spalinowych stosowanych w tych pojazdach, co ma na celu redukcję ich negatywnego oddziaływania na środowisko [2, 6].

Tab. 1. Lokomotywy eksploatowanych w Polsce [2, 8]

Seria	Typ	Lata budowy	Liczba	Moc [kW]	Prędkość [km/h]	Norma
SU46	303D	1974-1977/1985	28	1654	120	-/ORE B13
SU45	301Db	1987-1998	97	1250	120	ORE B13
SU42	-	1999-2000	21	590	90	ORE B13
SU160	111Db	2014-2015	7	570	140	Stage IIIA
ST46	303Da	2011	1	1500	120	Stage IIIA
ST45	301Dd	2009-2012	20	1300	100	Stage IIIA
ST44	M62	1965-1988	592	1472	100	-/ORE B13
ST43	060DA	1965-1978	212	1544	100	-
ST40	311D	2007-2010	17	2133	100	Stage IIIA
SP32	LDE1300	1985-1991	1	957	100	ORE B13
SM48	T3M2	1976-1989	66	880	100	-/ORE B13
SM42	LS800	1965-1992	580	588	90	-/ORE B13
	6D					
	6Dc					
	6De					
	6Df					
	6Dg					
6Dk						
SM32	401Da	1968-1978	1	257	60	-
SM31	Ls1200	1976-1985	85	880	80	-/ORE B13
	411D					
	411Da					
SM30	Ls300	1957-1970	153	220	60	-
SM03	2D	1959-1969	138	110	45	-
SM02	Ls40	1952-1961	7	30	11	-
-	410Da	1968-1978	44	257	60	-
-	LDH45	1965-1985	3	335	60	-/ORE B13
-	LDH70	1965-1985	3	520	70	-/ORE B13
-	Class 66	1998-2008	8	2420	120	ORE B13/ UIC I-II
-	Maxima 40CC	2006-dziś	1	3600	120	Stage IIIA
-	Baureihe 285	2006-dziś	5	2 400	140	Stage IIIA
-	LM-400.00	2012	1	400	40	Stage IIIA

2. Normy emisji spalin odnoszące się do lokomotyw używanych w Polsce

2.1. Raport ORE B13 Rp22

Na podstawie normy ORE B13 wykonywany jest dwudziesto-dziewięciofazowy test badawczy, z którego do analiz obliczeniowych przyjmuje się cztery punkty pomiarowe, dobrane równomiernie dla badanego silnika (rys. 2). Zestawienie wartości granicznych związków szkodliwych spalin wprowadzonych według raportu ORE B13 Rp22 przedstawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 3 [3].

Tab. 2. Wartości graniczne emisji według ORE B13 Rp22 [3]

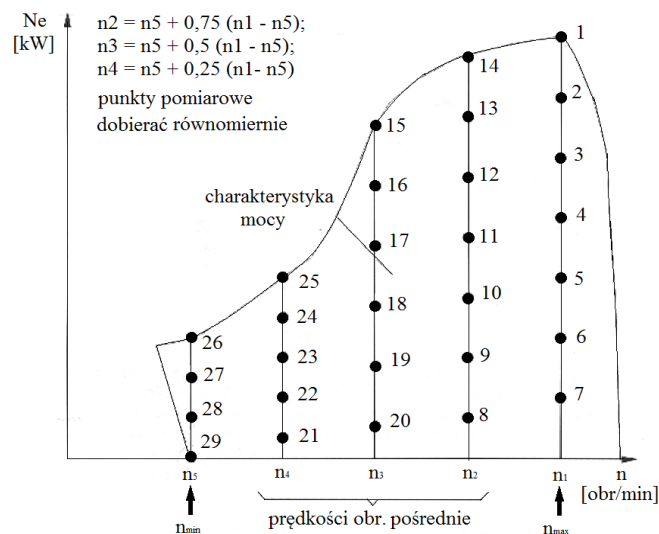
Data wprowadzenia (obowiązująca)	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC [g/kWh]	Zaczerzenie [k (m ⁻¹)]
Do 31.12.1981	12,0	24,0	4,0	1,6 ÷ 2,5
Od 01.01.1982	8,0	20,0	2,4	1,6 ÷ 2,5
Od 01.02.1991	4,0	16,0	1,6	1,6 ÷ 2,5
Od 01.02.1997	3,0	12,0	0,8	1,6 ÷ 2,5

2.2. PN-EN ISO 8178 cykl F i C1

Test badawczy według PN-EN ISO 8178 cykl F uwzględnia trzy punkty pomiarowe obciążenia silnika. Pierwszy na biegu jałowym (60% dla obrotów biegu jałowego, brak obciążenia), drugi dla mocy częściowej (15% obrotów pośrednich, około 50% obciążenia) oraz trzeci dla pełnej mocy (25% obrotów maksymalnych, 100% obciążenia) (rys. 3). Test badawczy według PN-EN ISO 8178 cykl C1 przeznaczony jest dla silników zabudowanych w lekkich pojazdach szynowych (np. trolejbusy). Cykl ten uwzględnia osiem punktów pomiarowych zależnych od obciążenia oraz współczynników ważonych. Wartości graniczne składników toksycznych w spalinach dla cyklu F i C1 przedstawia tabela 3 [3].

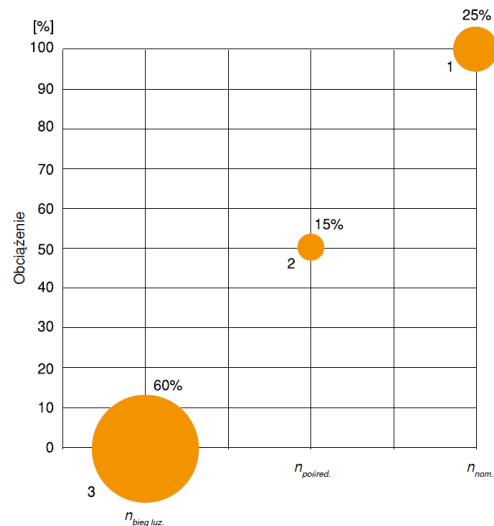
Tab. 3. Wartości graniczne emisji według ORE B13 Rp22 [3]

Data wprowadzenia (obowiązująca)	Moc [kW]	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC [g/kWh]	PM [g/kWh]
Od 01.01.2003 UIC II	P ≤ 560	2,5	6	0,6	0,25
	P > 560	3,0	n > 1000 obr/min 9,5	0,8	0,25
	n ≤ 1000 obr/min 9,9				
Od 01.01.2008 UIC II	P > 560	2,0	6,0	0,5	0,20



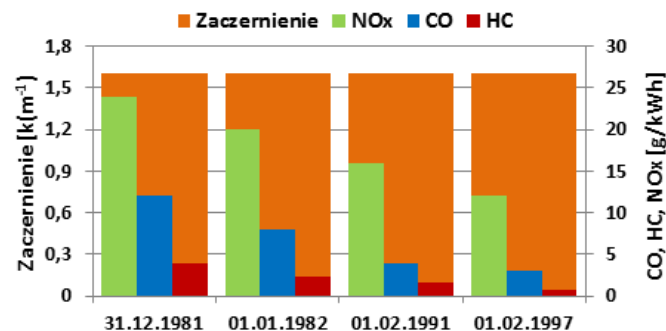
Rys. 2. Przebieg testu 29-fazowego według raportu ORE B13 [3]

Wartości graniczne związków szkodliwych spalin zgodnie z raportem ORE B13 Rp22 na przestrzeni lat ulegały redukcjom. Pierwsze limity wprowadzono w roku 1981 i wynosiły 24 g/kWh dla tlenków azotu, 12 g/kWh dla tlenku węgla, 4 g/kWh i 1,6 – 2,5 [k(m⁻¹)] dla zaczerzenia, dla którego limity wraz z czasem nie uległy redukcji. Ostateczne limity wprowadzone według wyżej wspomnianego raportu wprowadzono w 1997 roku, które obejmowały dwukrotną redukcję tlenków azotu, czterokrotne zmniejszenie tlenku węgla oraz pięciokrotny spadek węglowodorów w porównaniu z wartościami granicznymi z roku 1981.

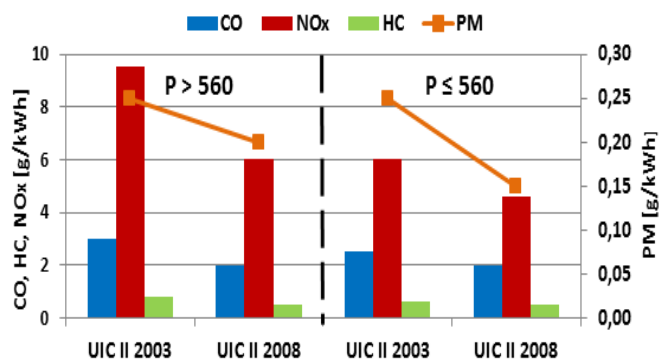


Rys. 3. Przebieg testu badawczego według PN-EN ISO 8178 cykl F [3]

W roku 2002 wprowadzono nowe limity zgodnie z normą UIC 623-2 i UIC 624, następnie zaostrożono je w latach 2003 i 2008, ich wartości przedstawiono na rysunku 4. Wrz z wprowadzeniem UIC II normy rozdzielono na dwie kategorie silników według mocy znamionowej na silniki o mocy do 560 kW i powyżej 560 kW, co nie uwzględniała norma UIC I. Najmniejsze wartości graniczne wszystkich analizowanych związków szkodliwych występują w przypadku UIC II P ≤ 560 kW. Największa emisję dopuszczalna dla tlenków azotu zawierała się w przedziale między 6,0-9,9 g/kWh, a najmniejsza dla cząstek stałych – 0,2-0,25 g/kWh.



Rys. 3. Wartości graniczne związków szkodliwych według ORE B13 Rp22 [opracowanie własne]



Rys. 4. Wartości graniczne związków szkodliwych według UIC 623-2 i UIC 624 [opracowanie własne].

2.3. Norma emisji Stage IIIA

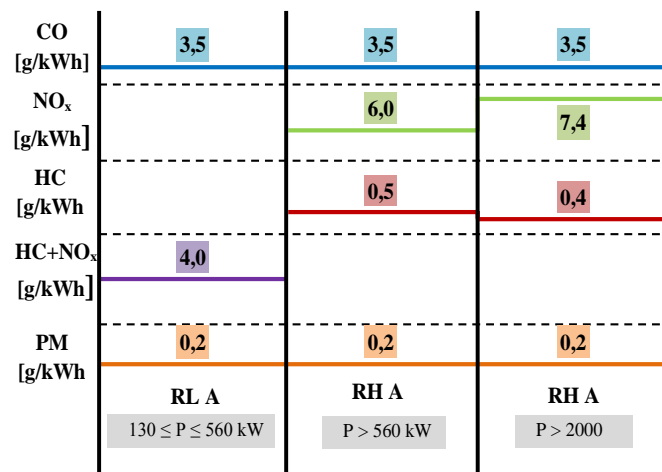
W przypadku homologacji silników napędowych stosowanych w lokomotywach zgodnie z normą Stage IIIA nie udziela się homologacji dla typu silników (lub rodzin silników):

- RLA – dla silników o mocy $130 \text{ kW} \leq P \leq 560 \text{ kW}$,
- RHA – dla silników o mocy $560 \text{ kW} < P$.

Powyższe dotyczy przypadku, kiedy silnik nie spełnia wymagań przedstawionych w dyrektywie [1] oraz gdy emisja związków toksycznych w spalinach nie spełnia limitów określonych w tabeli 4. Przepisów nie stosuje się dla silników, które zostały wyprodukowane przed dniem 20 maja 2004 roku a silnik wprowadzony został do użytku nie później niż 2 lata po wprowadzeniu wymagań [1].

Tab. 4. Wartości graniczne według Stage IIIA dla napędu lokomotyw [1]

Kategoria	P [kW]	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC [g/kWh]	PM [g/kWh]
RL A	$130 \leq P \leq 560$	3,5	HC + NO _x = 4,0		0,2
RH A	$P > 560$	3,5	6,0	0,5	0,2
RH A	$P > 2000$	3,5	7,4	0,4	0,2



Rys. 5. Wartości graniczne związków szkodliwych według Stage IIIA w odniesieniu do lokomotyw [5, opracowanie własne]

Limity wprowadzone według Stage IIIA są pierwszymi limitami wprowadzonymi ściśle dla napędów lokomotyw. Dla silników z przedziału mocy pomiędzy 130 kW a 560 kW wprowadzono limity sumy węglowodorów i tlenków azotu, których wartość jest równa 4,0 g/kWh. Wprowadzono również wartości graniczne dla silników o mocy przekraczającej 560 kW, dla których podaje się osobno

wartości dopuszczalne węglowodorów i tlenków azotu. Dla jednostek $P > 500 \text{ kW}$ wartości te wynoszą 0,5 g/kWh – HC i 6,0 g/kWh – NO_x, natomiast dla $P > 2000 \text{ kW}$ – 0,4 g/kWh dla HC oraz 7,4 g/kWh dla NO_x. Emisja tlenków węgla i cząstek stałych dla wszystkich kategorii mocy jest taka sama i wynosi odpowiednio 3,5 h/kWh dla CO i 0,2 h/kWh dla PM. Wartości graniczne odniesione do lokomotyw przedstawiono na rysunku 5.

3. Planowany program modernizacji taboru kolejowego

Ze względu na zwiększenie mocy oraz parametrów trakcyjnych Ministerstwo Rozwoju przygotowało program modernizacji taboru kolejowego (tab. 5). Dzięki przebudowie lokomotyw eksploatowanych na terenie naszego kraju egzemplarze te będą miały zaimplementowane nowoczesne silniki, które tym samym będą bardziej ekologiczne. Liczba sztuk modernizowanego taboru kolejowego wyniesie około 309 pojazdów różnych serii, co przy stanie 2091 lokomotyw spalinowych pozwoli na modernizację 15% silników. Norma emisji spalin w przypadku unowocześnionych silników zmieni się na normę Stage IIIA [6].

Tab. 5. Program modernizacji taboru kolejowego [6]

Rodzaj pojazdu	Liczba sztuk modernizowanego taboru kolejowego
SM 42	200
SM 48	~50
ST 44	~40
ST 45	19

Emisję związków toksycznych dla lokomotyw objętych unowocześnieniem przed oraz po wprowadzeniu programu modernizacji planowanego na lata 2017-2023 przedstawiono w tabeli 6. Na chwilę obecną całkowita emisja tlenku węgla wynosi 23605 g/kWh dla wszystkich rodzajów lokomotyw wykorzystywanych w kraju, natomiast po wprowadzeniu planu kompleksowej przebudowy i unowocześnieniu silników spalinowych wartość CO zmniejszy się do 21140 g/kWh. Wartość wprowadzanych do powietrza tlenków azotu wynosi 48142 g/kWh, natomiast po przeprowadzonej renowacji wartość ta zmniejszy się do 42922 g/kWh. Ostatnim z rozważanych związków toksycznych są węglowodory, których całkowita emisja wynosi 7852 g/kWh przed przebudową oraz 6836 g/kWh po wprowadzeniu modyfikacji. Największą emisją wszystkich związków toksycznych spalin charakteryzują się lokomotywy, których największą liczbę sztuk eksploatuje się na terenie Polski, czyli ST 44 – 592 sztuki, SM 42 – 580 sztuk oraz ST 43 – 212 sztuk. W planie modernizacji uwzględniono między innymi część lokomotyw typu ST 44, w przypadku których unowocześnionych zostanie około 40 pojazdów, dzięki czemu dla tego typu pojazdów torowych emisja CO zostanie zredukowana o 4,8%, dla NO_x o 5,1%, natomiast dla HC o 5,9%. Zmodernizowana zostanie również lokomotywa SM 42, dla której liczba przebudowanych środków transportu publicznego tego typu wyniesie 200 sztuk, dla tej serii zmiany będą znacznie większe. Emisja tlenku węgla zmaleje o 24,4% w przypadku tlenków azotu o 25,9%, natomiast emisja całkowita węglowodorów zostanie zredukowana o 30,2%. Wyposażone w nowoczesne silniki zostanie również 50 z 66 sztuk taboru kolejowego typu ST 48, dzięki czemu unowocześniona zostanie większość lokomotyw tego typu a emisja CO, NO_x i HC znacznie się zmniejszy, odpowiednio o 53,7% dla tlenku węgla 56,8% dla tlenków azotu i 66,3% w przypadku węglowodorów. Ostatnim z modernizowanych pojazdów będzie lokomotywa typu ST 45, jednak w tym przypadku nie zajdą żadne ekologiczne zmiany, ponieważ już spełnia ona normę Stage IIIA.

Tab. 6. Emisja spalin modernizowanego taboru kolejowego przed i po przebudowie [opracowanie własne].

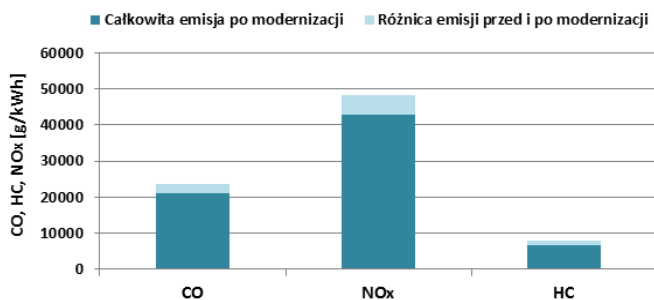
Seria	Przed modernizacją			Po modernizacji		
	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC [g/kWh]	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC [g/kWh]
ST45	70	120	10	70	120	10
ST44	7104	14208	2368	6764	13488	2228
SM48	792	1584	264	367	684	89
SM42	6960	13920	2320	5260	10320	1620

Podsumowanie

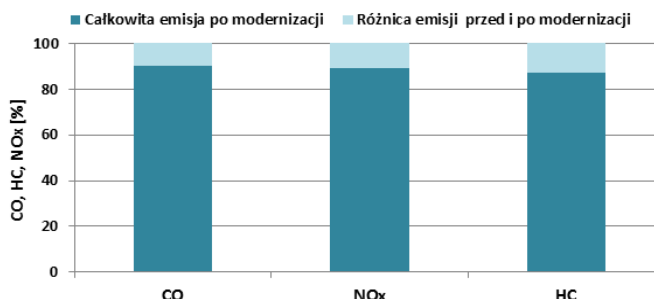
Po wprowadzeniu planowanej modernizacji emisja związków toksycznych w spalinach znacznie przyczyni się do zmniejszenia negatywnego oddziaływania pojazdów szynowych na środowisko naturalne. Różnica wartości między tlenkiem węgla wyniesie 2465 g/kWh co daje 10% redukcję wartości emisji CO. W przypadku węglowodorów różnica procentowa będzie największa i wyniesie 13% co odpowiada 1015 g/kWh. Emisja tlenków azotu natomiast zmniejszy się o 11%, a jej różnica liczbowa wyniesie 5220 g/kWh. Dzięki wprowadzeniu modernizacji redukcja emisji związków toksycznych będzie zauważalna, tym bardziej, że unowocześnionych zostanie jedynie 15% taboru kolejowego.

Tab. 8. Szacowana emisja związków toksycznych przed i po modernizacji [opracowanie własne].

	CO	NO _x	HC
Całkowita emisja przed modernizacją [g/kWh]	23605	48142	7852
Całkowita emisja po modernizacji [g/kWh]	21140	42922	6836
Liczbowa różnica emisji [g/kWh]	2465	5220	1015
Procentowa różnica emisji [%]	10	11	13



Rys. 6. Szacowana liczbowa emisja związków szkodliwych w spalinach po modernizacji oraz jej różnica przed i po wprowadzeniu modernizacji [opracowanie własne].



Rys. 7. Szacowana procentowa emisja związków szkodliwych w spalinach po modernizacji oraz jej różnica przed i po wprowadzeniu modernizacji [opracowanie własne].

Szacowaną emisję związków toksycznych unowocześnionych lokomotyw eksploatowanych w Polsce przed oraz po modernizacji jak również ich różnicę liczbową i procentową przedstawiono w tabeli 8 oraz na rysunkach 6 i 7. Dzięki przebudowie wszystkich

przestarzałych pojazdów uzyskane wartości byłyby jeszcze bardziej imponujące, jednak według największego przewoźnika w kraju czyli PKP Intercity Sp. z o.o. po roku 2021 nie planuje się wprowadzenia dalszych modernizacji lokomotyw, gdyż planowana jest stopniowa całkowita wymiana taboru, co będzie jeszcze szerszym działaniem zmierzającym do ochrony środowiska naturalnego.

Bibliografia:

1. DYREKTYWA 2004/26/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 21 kwietnia 2004 r.
2. Mały rocznik Statystyczny Polski 2018, Warszawa 2018.
3. Marciniak Z., Pielecha I. „Wymagania w zakresie ograniczenia emisji toksycznych składników spalin przez spalinowe pojazdy trakcyjne”, „Technika Transportu Szynowego”, 12/2006.
4. Marciniak Z., Stawecki W., Pielecha I., Pielecha J., „Ekologiczne aspekty spalinowych pojazdów szynowych eksploatowanych na krajowych liniach kolejowych”, „Logistyka”, 4/2010.
5. Merksiz J., Pielecha I., Andrzejewski M., Daszkiewicz P., Stawecki W., “Legal conditions in the aspect of pollutant emissions from exhaust systems of rail vehicles engines”, *Jurnal of KONES Powertrain and Transport*, 2018, Vol. 25, No. 1.
6. Merksiz-Guranowska A., Stawecka H., „Recykling pojazdów szynowych”, *IPS TABOR*, Poznań, 2018.
7. Ożóg M., „Wymagania w zakresie ograniczenia emisji spalin przez tabor kolejowy i konsekwencje dla przedsiębiorstw kolejowych”, „Technika Transportu Szynowego”, 6/2008.
8. Pokropiński B., „Lokomotywy spalinowe produkcji polskiej”, Warszawa, WKiŁ, 2009.
9. Stawecki W., Marciniak Z., Pielecha I., Pielecha J., „Ekologiczne aspekty modernizacji lokomotyw spalinowych w Polsce”, *Prace naukowe Politechniki Warszawskiej*, 2013.
10. Tomaszewski F., Wojciechowska E. „Transport kolejowy, a ochrona środowiska”, „Czasopismo Techniczne”, 2/ 2011.

Impact of modernization of locomotives operated in Poland on the emission of toxic compounds in exhaust gases

The article focuses on the impact of the rolling stock modernization program covering the comprehensive reconstruction of diesel locomotives with Impact of modernization of locomotives operated in Poland on the emission of toxic compounds in exhaust gases the assumption of replacing their drives with engines meeting the Stage IIIA standard for the emission of toxic compounds in exhaust gases. In connection with this, the subject of the rolling stock was discussed in Poland and legal regulations concerning exhaust emissions in locomotives. The final result was the estimated emissions of toxic compounds before and after modernization and the comparison of these results.

Keywords: environmental pollution, rail transport, modernization, environmental protection

Autorzy:

- dr inż. **Maciej Andrzejewski** – Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR” w Poznaniu, m.andrzejewski@tabor.com.pl
 dr inż. **Paweł Daszkiewicz** – Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR” w Poznaniu, p.daszkiewicz@tabor.com.pl
 dr inż. **Łukasz Rymaniak** – Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Transportu, lukasz.rymaniak@put.poznan.pl
 prof. dr hab. inż. **Jerzy Merksiz** – Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Transportu, jerzy.merksiz@put.poznan.pl
 inż. **Michalina Kamińska** – Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Transportu