

# Ocena energochłonności układów napędowych lokomotyw spalinowych

JEL: L92 DOI: 10.24136/atest.2019.139

Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

W artykule dokonano oceny wskaźników ekonomicznych wybranych typów lokomotyw użytkowanych na liniach kolejowych w Polsce. Pojazdy szynowe charakteryzują się niższą energochłonnością w porównaniu do większości stosowanych obecnie środków transportu, co przekłada się na większą wydajność systemu transportu w skali całego kraju. Udział transportu szynowego w transporcie w Polsce i jego rozwój jest ograniczony kilkoma aspektami związanymi z kosztami zakupu i eksploatacji pojazdów, infrastruktury oraz dostępnością nowych technologii. W artykule przedstawiono m.in. wyniki pomiarów przeprowadzonych na kilkunastu egzemplarzach lokomotywy ST44 o różnym stopniu zużycia technicznego. Badania wykazały przede wszystkim wpływ stopnia tego zużycia na wielkość zużycia paliwa przez układ napędowy.

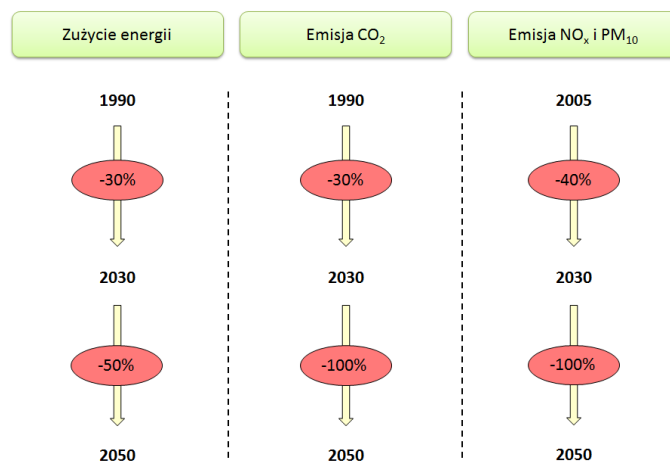
**Słowa kluczowe:** lokomotywa spalinowa, układ napędowy, zużycie paliwa.

## Wstęp

Przystosowanie importowanego taboru spalinowego do użytkowania w Polsce (czy też modernizacja przestarzałego taboru krajowego) polega zasadniczo na zastępowaniu wyeksploatowanych tłokowych silników spalinowych jednostkami nowszymi (nie zawsze nowymi), naprawie głównej lub poddawaniu ich remotoryzacji [5]. Naprawa lub wymiana silnika spalinowego wiąże się zarówno z korzyściami ekologicznymi, jak i ekonomicznymi (mniejsze zużycie paliwa) [8]. Te aspekty udało się potwierdzić w wyniku przeprowadzonych badań emisyjnych na oporniku wodnym, o czym w dalszej części artykułu.

Przeprowadzane prace modernizacyjne odnośnie do eksploatowanych w Polsce lokomotyw spalinowych starego typu pozwalają przyczynić się do spełnienia, narzucanych przez różnego rodzaju organy i instytucje odpowiedzialne za ochronę klimatu ziemskiego, ograniczeń co do emisji zanieczyszczeń z pojazdów transportu masowego wykorzystywanych w kolejnictwie (rys. 1). Z uwagi na bardzo toksyczne oddziaływanie na organizmy żywe obecnie największą uwagę przykładą się do emisji cząstek stałych o bardzo małych średnicach (rzędu 10  $\mu\text{m}$ ) oraz emisji tlenków azotu z dużych silników o zapłonie samoczynnym – HDD (Heavy Duty Diesel). W obliczu wzrastającego efektu cieplarnianego istotna jest także emisja dwutlenku węgla do atmosfery. Stąd też w trakcie modernizacji starych pojazdów kolejowych, obok wyżej wspomnianych rozwiązań konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, stosuje się także takie rozwiązania jak hybrydyzacja układów napędowych lokomotyw, przede wszystkim manewrowych (z uwagi na charakter ruchu).

Pomimo niskiej emisji związków szkodliwych z transportu kolejowego na tle innych środków transportu udział kolei w operacjach transportowych w Polsce jest niewielki. Przekłada się to na niską wydajność oraz podwyższoną emisyjność krajowego systemu transportu. Ponieważ koszty zakupu pojazdów szynowych są znacząco wyższe niż pojazdów samochodowych obecny średni wiek taboru kolejowego wynosi ponad 30 lat.



Rys. 1. Plany co do ograniczeń wobec pojazdów kolejowych w Europie [1]

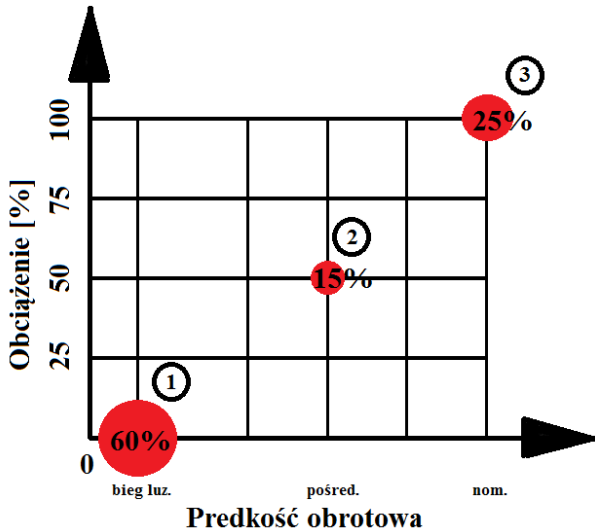
Większość przewoźników traktuje zakup nowego taboru szynowego jako ostateczność, posilując się tańszymi rozwiązaniami, takimi jak: naprawa główna, retrofitting lub modernizacja, co przekłada się na akceptowalny poziom emisji związków toksycznych z lokomotywy w Polsce pomimo ich wieku. Głównym aspektem przemawiającym za zastosowaniem pojazdów szynowych jest jednak zużycie paliwa oraz bezpośrednio związana z nim emisja CO<sub>2</sub>. Pomimo większych objętości skokowych silników lokomotyw ich emisja CO<sub>2</sub> w gramach na pasażerokilometr jest preferencyjna pod względem czysto ekonomicznym.

Regresja transportu kolejowego w Polsce w ostatniej dekadzie dotycząca liczby przewożonych pasażerów i pokonanego dystansu była wynikiem zabiegów politycznych, gdzie jako priorytet oraz wzorzec transportu w przyszłości postawiono transport samochodowy. Fundusze przeznaczane na autostrady znacząco przekroczyły wartość funduszy przekazywanych na utrzymanie i rozwój infrastruktury sieci kolejowej, co widać porównując długości nowych linii kolejowych – 34 km, w porównaniu do autostrad – 2293 km, oddanych do użytku od 2004 roku [3]. Fundusze przeznaczane na transport szynowy nie wystarczały na utrzymanie obecnej infrastruktury kolejowej w stanie zdatnym do użytku, brakowało też do niedawna możliwości jego dalszego rozwoju lub większych renowacji bez zabezpieczenia funduszy ze źródeł prywatnych. Pomimo tego okresu stagnacji i regresji polskiego kolejnictwa możliwości oraz atuty transportu szynowego zaczęły być zauważane przez władze rządowe. W efekcie udział kolei w funduszach unijnych przeznaczonych na inwestycje transportowe zwiększył się z 21,8% w latach 2007–2013 do poziomu ok. 33% na lata 2014–2020.

Z powodu wyżej wymienionych czynników obecny udział transportu szynowego w całkowitej masie przewożonych ładunków w Polsce pozostaje na relatywnie niskim poziomie ok. 13% [3]. Należy jednak zauważyć, że dzięki większym nakładom finansowym oraz rozbudowie i renowacji infrastruktury kolejowej, wartość ta ma obecnie tendencję wzrostową.

1. Metodyka badawcza

Badania emisji zanieczyszczeń przeprowadzono według procedury NRSC (Non-Road Steady Cycle) w warunkach stacjonarnego testu PN-EN ISO 8178-F [7], który obejmuje 3 punkty obciążenia silnika. Pierwszy to bieg jałowy, dla którego udział fazy wynosi 60%, drugi punkt to 50% obciążenia przy udziale fazy 15% oraz trzeci punkt pomiarowy obejmuje maksymalne obciążenie a udział wynosi 25% (rys. 2).



Rys. 2. Przebieg testu badawczego PN-EN ISO 8178 cykl F [7]

Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, na którym lokomotywę podczas testów obciążano za pomocą opornika wodnego. Wykorzystany w badaniach opornik wodny to typ OW6300 wypełniony cieczą przewodzącą, którą był wodny roztwór soli z zanurzonymi dwoma elektrodami o maksymalnej mocy ciągłej 2000 kW. Szczegółowe parametry operacyjne opornika przedstawiono w tab. 1. Zasadę działania opornika można opisać prawem Ohma:

$$V = IR \tag{1}$$

gdzie: V – napięcie [V],  
I – natężenie prądu [A],

R – oporność urządzenia [Ω].

Moc wydzieloną na oporniku opisuje wzór:

$$P = I^2R \tag{2}$$

gdzie: P – moc [W].

W przypadku opornika wodnego opór, jakim się charakteryzuje, jest zależny od składu elektrolitu (stężenia soli) danego opornika oraz od odległości między znajdującymi się w nim elektrodami. Regulując ich odległość, przez różne głębokości zanurzenia powierzchni elektrod, uzyskać można różne wartości oporu. Uzyskana w ten sposób moc przetwarzana jest na ciepło. Zastosowanie opornika wodnego do tego typu badań opisane jest wielokrotnie w literaturze, np. w poz. [4].

Tab. 1. Główne parametry eksploatacyjne opornika wodnego [1]

Parametr	Wartość
Maksymalny prąd	6300 A
Prąd ciągły bez chłodzenia elektrolitu	1000 A
Prąd ciągły z chłodzeniem elektrolitu	2000 A
Maksymalne napięcie	1000 V
Moc ciągła rozpraszana bez chłodzenia	750 kW
Moc ciągła rozpraszana z chłodzeniem	2000 kW

Wielkość toksyczności spalin – stężenie poszczególnych składników w gazach wylotowych – oraz zużycie paliwa określano przy wykorzystaniu urządzenia Testo 360. Wartości oczekiwanych parametrów pozyskiwano po dostarczeniu próbki spalin do mobilnego urządzenia pomiarowego – zestawu analizatorów. Do tego celu służyła sonda zamontowana w układzie wylotowym silnika lokomotywy (rys. 3).

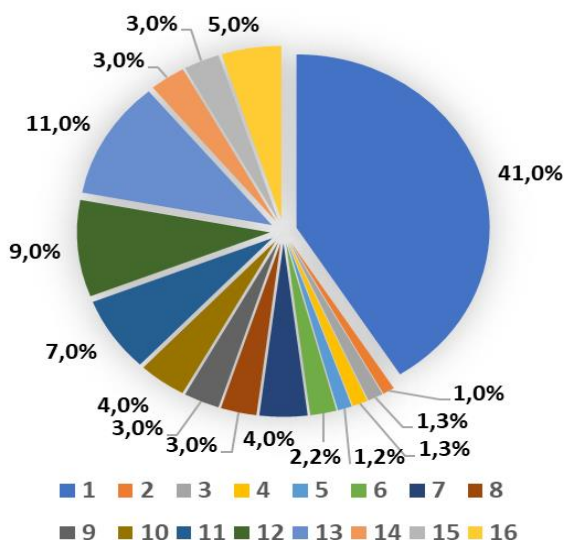
Parametry pracy silnika, w tym jego moc użyteczna, były określone z pozycji maszynisty – panel kontrolny w kabinie. Badania wykonano w odniesieniu do 15 wybranych egzemplarzy lokomotywy ST44. Wybrane lokomotywy różniły się nieznacznie elementami układów wylotowych oraz wykonywały różne prace transportowe, co powodowało różny stopień zużycia lokomotywy. Kilka z badanych obiektów przebadano pod względem emisji związków toksycznych spalin przed i po naprawie głównej.



Rys. 3. Przykładowy obiekt podczas badań mobilną aparaturą do pomiarów toksyczności spalin na oporniku wodnym [1]

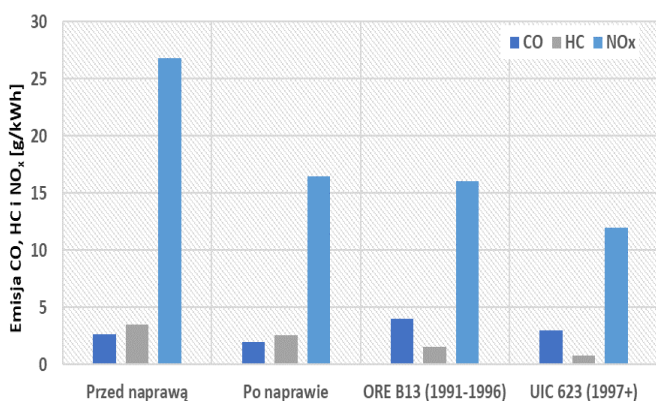
## 2. Wyniki pomiarów i ich analiza

W celu dokonania oceny wpływu naprawy głównej lokomotywy na emisję spalin wykonano badania emisji związków toksycznych dla 2 wybranych lokomotyw ST44 przed i po naprawie głównej. Pomiary wykonywano, oprócz testu ISO 8178-F, także przy zastosowaniu innych pozycji nastawnika jazdy tak, aby odwzorować parametry rzeczywistej eksploatacji lokomotywy. Udział czasu pracy dla poszczególnych pozycji nastawnika jazdy przedstawiono na rysunku 4. Uzyskane wartości emisji jednostkowej z silników badanych lokomotyw odniesiono do norm ORE B13 oraz UIC 623 (rys. 5).



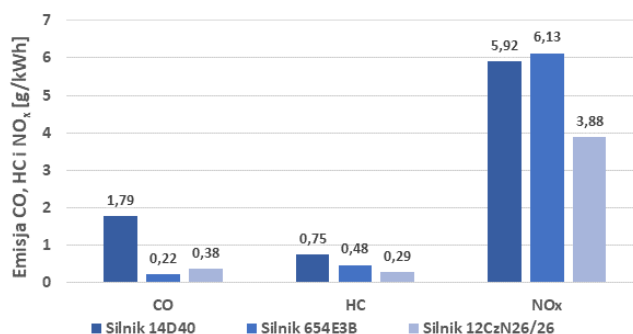
**Rys. 4.** Wykres udziału czasu pracy dla poszczególnych pozycji nastawnika jazdy. Wartości mocy dla tych pozycji są następujące [1]: 1 – 40 kW, 2 – 100 kW, 3 – 200 kW, 4 – 400 kW, 5 – 450 kW, 6 – 550 kW, 7 – 550 kW, 8 – 650 kW, 9 – 700 kW, 10 – 750 kW, 11 – 800 kW, 12 – 910 kW, 13 – 1000 kW, 14 – 1100 kW, 15 – 1232 kW

Na podstawie otrzymanych wyników wykazany został znaczący wpływ naprawy głównej na poziom emisji związków toksycznych z silnika lokomotywy. Wynik ten potwierdza zasadność tego typu procedur naprawczych. Naprawa główna jest zaledwie ułamkiem kosztów, które przewoźnik ponosi przy zakupie nowego taboru. Pozwala ona zmniejszyć emisyjność lokomotywy do poziomu mieszczącego się w normach ORE B13 (1991–1996). Niemożliwe okazuje się natomiast spełnienie bardziej restrykcyjnych nowszych limitów emisji, jak choćby UIC 623.



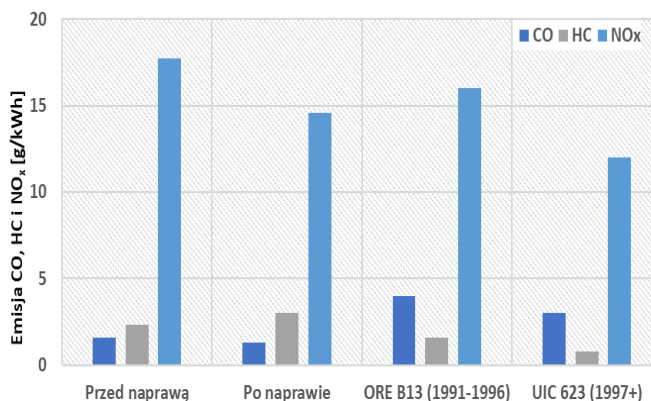
**Rys. 5.** Wartości jednostkowych emisji związków toksycznych dla dwóch wybranych lokomotyw ST44 przed i po naprawie głównej

Głównym aspektem określającym emisję związków toksycznych podczas pracy lokomotyw jest ich jednostka napędowa, w tym przypadku był to silnik o zapłonie samoczynnym. Podczas gdy nowe lokomotywy mogą być wyposażone w napędy hybrydowe lub silniki zasilane paliwami alternatywnymi (takimi jak CNG czy wodór), renowacja starszych lokomotyw nie pozwala na tak daleko idące zmiany konstrukcyjne. Jednakże dokonanie wymiany silnika spalinowego na nowszą, bardziej sprawną i emitującą mniej związków toksycznych do atmosfery jednostkę jest możliwe. Efekty takiej wymiany przedstawiono na rysunku 6, gdzie porównano podstawowy dwusuwowy silnik widlasty 14D40 z nowszą wersją oznakowaną jako 654E3B oraz silnikiem 12CzN26/26 – dwunastocylindrowym, ZS z wtryskiem bezpośrednim, doładowanym, z chłodnicą powietrza doładowującego, spełniający wymagania w zakresie emisji składników toksycznych do atmosfery zgodnie z kartą UIC 624 II. Potencjalne efekty zastosowania tego typu silnika w naprawie głównej lokomotyw wykazano w poz. [6].



**Rys. 6.** Porównanie wskaźników ekologicznych lokomotyw typu ST44 wyposażonych w różne jednostki napędowe

Badania pojazdów szynowych w aspekcie ekonomicznym dokonano na podstawie określenia zużycia paliwa przy wykorzystaniu wyników emisji związków toksycznych (za pomocą metody carbon balance) [2]. Obliczenia wykonano dla 15 lokomotyw ST44 o różnym stopniu wyeksploatowania, zarówno podczas maksymalnego obciążenia silnika z wykorzystaniem opornika wodnego, jak i bez obciążenia dla biegu jałowego. W celu zapewnienia porównywalności wyników wszystkie badane lokomotywy wyposażone były w standardowy silnik 12CzN26/26. Rozrzut uzyskanych wartości zawierał się w zakresie do 16% dla zużycia paliwa przy pracy z pełnym obciążeniem oraz do 56% dla pracy bez obciążenia (rys. 7).







Rys. 7. Porównanie energochłonności pracy lokomotyw typu ST44 – pomiary z obciążeniem silnika (12CzN26/26) oraz bez obciążenia

### Podsumowanie

Dokonanie naprawy głównej silnika lokomotywy powoduje zauważalne zmniejszenie emisji mierzonych związków toksycznych. W przeprowadzonych badaniach udało się zmniejszyć emisyjność testowanych lokomotyw do poziomu mieszczącego się w normie ORE B13 (1991–1996). Nie było możliwe natomiast spełnienie bardziej restrykcyjnych nowszych limitów emisji, jak UIC 623. Należy jednak zauważyć, że tego typu naprawa nie jest ukierunkowana na większą poprawę wskaźników ekologicznych lokomotywy niż poziom wymagany prawnie. Naprawa główna przede wszystkim pozwala na poprawienie wskaźników ekonomicznych lokomotywy oraz zwiększenia jej niezawodności w czasie przyszłej eksploatacji. Należy zaznaczyć, że przedstawione w pracy wyniki wskazują, iż możliwe jest wykonanie dalszych kroków w celu zmniejszenia emisji spalin z tego typu pojazdów. Do rozwiązań takich zalicza się retrofitting, czyli doposażenie pojazdu w układ oczyszczania spalin, który potrafi w dalszym stopniu znacząco zmniejszyć emisję związków toksycznych nawet do kilkudziesięciu procent [5].

Z badanych pojazdów najmniejszą emisją jednostkową związków toksycznych podczas pracy na oporniku wodnym wykazał się silnik 12CzN26/26 osiągając emisję CO niższą o 79%, HC o 60%, a NO<sub>x</sub> o 34% w odniesieniu do tradycyjnego silnika 14D40. Pozwala to stwierdzić, że wymiana jednostki napędowej na nowszą jest jak najbardziej uzasadnioną alternatywą w odniesieniu do zakupu nowego taboru. Główną wadą tego rozwiązania jest fakt, że nie wszystkie konstrukcje lokomotyw umożliwiają dokonania tego typu prac. W przypadku kiedy nie ma nowego silnika zastępczego, który wpisywałby się w ograniczenia konstrukcyjne oraz ergonomiczne, wymiana jednostki napędowej może być zdecydowanie droższa w wykonaniu lub całkowicie niemożliwa.

Podczas przeprowadzonych badań wykazano również różnice w wartościach zużycia paliwa przez jednostki napędowe badanych lokomotyw (w zależności od stopnia ich wyeksploatowania). Maksymalne różnice pod obciążeniem zawierały się w zakresie do 16%, natomiast bez obciążenia do 56%. Uzyskane w ten sposób wartości

zużycia paliwa mogą być wykorzystane jako wskaźniki stopnia pogorszenia stanu technicznego silnika lokomotywy. W długotrwałej eksploatacji zaobserwowane różnice mogą znacząco wpłynąć na koszty eksploatacyjne taboru kolejowego ponoszone przez przewoźnika, co może przyczynić się do przyspieszenia decyzji o naprawie głównej bądź wymianie taboru na nowy.

### Bibliografia:

1. Andrzejewski M., Daszkiewicz P., Merkisz J., Stawecki W., Gallas D., Fuel consumption and pollutants emission study of locomotives performed using a water rheostat, POJAZDY SZYNOWE 3/2018, Wydawnictwo IPS „TABOR”, s. 11–17.
2. Bajerlein, M., Fuć, P., Lijewski, P., Rymaniak, Ł., Ziółkowski, A., Dobrzyński, M., Simulation of vehicle work in real conditions at engine test bed, PTNSS–2013–SC–124, Combustion Engines 2013, R. 52, no. 3, s. 708–715, ISSN 2300-9896.
3. Fundacja ProKolej, <http://www.prokolej.org/pl/infografiki> (dostęp w dniu 04.07.2018)
4. Kowalski, S., Sowa, A., Classification of technical diagnostic methods used in rail vehicle repair works, Problemy Eksploatacji 2007, nr 2, s. 65–76.
5. Lenz, M., Powertrains and fuels for locomotives. Electro-Motive Diesel, NAFTANEXT, April 23, 2014.
6. Marciniak, Z., Modernisation of diesel-electric locomotive type M62 with 12CZN26/26 engine – construction and results of tests, TTS Technika Transportu Szynowego 2007, R. 13, nr 1-2, s. 64–78.
7. Marciniak, Z., Pielecha, I., Effect of the diesel engines of the traction vehicles operated at home on the environment – trials and tests, and the instructions for reduction of the harmful constituents emission, Pojazdy Szynowe 2009, nr 1, s. 34–43.
8. Merkisz-Guranowska A., Andrzejewski M., Daszkiewicz P., Gallas D., Stawecki H., The impact of the modernization of imported diesel locomotives on pollutant emissions, POJAZDY SZYNOWE 2/2016, Wydawnictwo IPS „TABOR”, s. 8–12.

### The assessment of the energy consumption of diesel locomotives propulsion systems

The article evaluates economic indicators of selected types of locomotives used on railway lines in Poland. Rail vehicles are characterized by lower energy consumption compared to the majority of currently used means of transport, which translates into higher efficiency of the transport system in the whole country. The share of rail transport in Poland and its development is limited by several aspects related to the costs of purchase and operation of vehicles, infrastructure and the availability of new technologies. The article presents, among others the results of measurements carried out on several ST44 locomotives with varying degrees of technical wear. The research showed above all the impact of the degree of this consumption on the fuel consumption by the propulsion system.

**Keywords:** diesel locomotive, propulsion system, fuel consumption

#### Autorzy:

dr inż. **Maciej Andrzejewski** – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”,

m.andrzejewski@tabor.com.pl

mgr **Robert Świechowicz** – Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Transportu, robswiech@wp.pl

prof. dr hab. inż. **Jerzy Merkisz** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu,

jerzy.merkisz@put.poznan.pl

dr **Włodzimierz Stawecki** – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”, stawecki@tabor.com.pl

dr inż. **Paweł Daszkiewicz** – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”, p.daszkiewicz@tabor.com.pl