

Maciej SZKODA

Politechnika Krakowska

Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków

PORÓWNAWCZA OCENA EFEKTYWNOŚCI KOLEJOWYCH SYSTEMÓW ZE ZMIANĄ SZEROKOŚCI TORÓW Z ZASTOSOWANIEM ANALIZY LCC

Słowa kluczowe

Analiza LCC, ocena efektywności, kolejowy system przestawczy, system transportowy Wschód-Zachód.

Streszczenie

Artykuł został opracowany na podstawie prac badawczych prowadzonych w Instytucie Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej, dotyczących oceny efektywności technicznej i ekonomicznej kolejowych systemów ze zmianą szerokości torów (1435/1520 mm). Efektywność tych systemów uzależniona jest istotnie od metody zmiany szerokości torów 1435/1520 mm, wiążącej się ze złożonymi operacjami przeładunkowo-przestawczymi. W oparciu o analizę kosztu cyklu trwałości (analizę LCC) dokonano porównawczej oceny efektywności przewozu materiałów niebezpiecznych z wykorzystaniem aktualnie stosowanej technologii: wymiany wózków wagonowych i perspektywicznej: systemu samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000. Wykazano efekty ekonomiczne przyjętych wariantów oraz ograniczenia stosowania.

Wprowadzenie

Na kontynencie euroazjatyckim występuje duże zróżnicowanie sieci kolejowej pod względem szerokości torów. Oczywiście nie jest to jedyna kwestia

różniąc jeden system kolejowy od drugiego. Dodatkowo można wymienić stosowanie różnych napięć zasilania w trakcji elektrycznej czy różne systemy sterowania ruchem kolejowym. Większość europejskich państw, podobnie jak Polska, ma tory o szerokości 1435 mm, ale koleje byłej Wspólnoty Niepodległych Państw i innych krajów, w tym Litwy, Łotwy i Estonii posiadają linie kolejowe o prześwicie toru 1520 mm. Na terenie Azji pociąg porusza się po torze szerokim (1520 mm), by w Chinach i Korei znowu trafić na linie normalnotorowe (1435 mm). Jeszcze szersze tory są w Hiszpanii i Portugalii – 1668 mm. Różnice te stwarzają poważne utrudnienia eksploatacyjne, bowiem na styku torów o różnej szerokości towar trzeba przeładować albo dokonać wymiany zespołów biegowych pojazdu szynowego. Operacje te są kosztowne, czasochłonne i wymagają rozbudowanej infrastruktury w punktach granicznych wraz z całym bardzo drogim zapleczem magazynowo-przeładunkowym. Ponadto operacje te znacznie wydłużają czas transportu.

Od dawna prowadzone są prace mające na celu znalezienie bardziej efektywnych, niż dotychczas stosowane, metod pokonywania różnic szerokości toru. Jedną z nich jest polski system automatycznie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowanie technologii SUW 2000 w kolejowym systemie transportowym ze zmianą szerokości torów umożliwi osiągnięcie znaczących korzyści, jak: skrócenie czasu transportu do kilkunastu godzin w jednym kierunku, polepszenie jakości i bezpieczeństwa przewozu czy zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Jednak ze względu na bardzo wysokie koszty nabycia wdrożenie SUW 2000 do bieżącej eksploatacji w kolejowych przewozach towarowych wymaga przeprowadzenia kompleksowej oceny efektywności z zastosowaniem analizy LCC rekomendowanej przez międzynarodowe normy i standardy [9].

1. Systemy podlegające porównawczej ocenie efektywności

W ramach prac badawczo-rozwojowych wykonanych w Instytucie Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej [1, 2, 3, 9] przeprowadzono porównanie efektywności technicznej i ekonomicznej różnych wariantów przewozów ze zmianą szerokości torów 1435/1520 mm dla najważniejszych grup ładunkowych:

- materiałów niebezpiecznych (produkty ropopochodne, gazy skroplone),
- zintegrowanych jednostek ładunkowych (kontenery),
- ładunków drobnicowych,
- ładunków masowych (ruda żelaza).

Analizy wykazały, że szczególnie wymagającym usprawnienia jest system przewozów przestawczych, z którego korzysta się podczas transportu materiałów niebezpiecznych. Obecne rozwiązania stosowane w punktach granicznych

na wschodzie Polski, dla tej grupy ładunkowej, charakteryzują się niską niezawodnością oraz stwarzają poważne zagrożenie dla środowiska i bezpieczeństwa otoczenia systemu [9]. Ponadto wg danych GUS materiały niebezpieczne stanowią 30% ładunków importowanych i 13% eksportowanych transportem kolejowym w Polsce.

Niniejszy artykuł dotyczy dwóch wybranych systemów przestawczych związanych z przewozem materiałów niebezpiecznych:

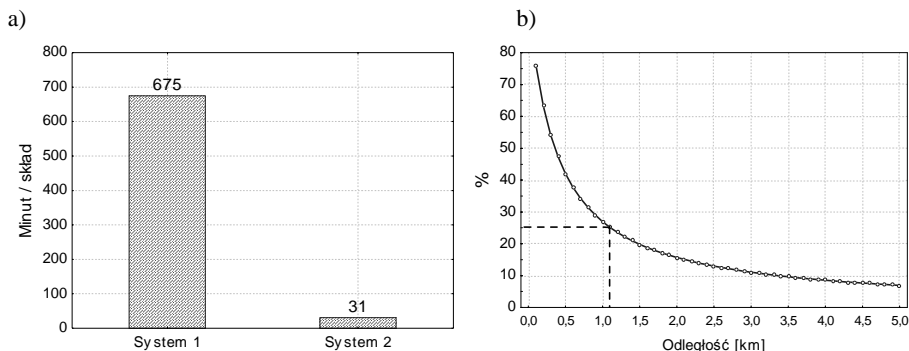
- system 1., w którym przewóz odbywa się poprzez aktualnie stosowaną wymianę wózków wagonowych,
- system 2., w którym przewóz odbywa się z zastosowaniem perspektywicznej metody – samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000.

W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry ilościowo-jakościowe charakteryzujące proces obsługi w punkcie styku torów różnej szerokości w omawianych systemach. W analizie pominięto czas operacji związanych z przyjęciem pociągu tj. czas sprawdzenia zabezpieczeń, zgodności dokumentów przewozowych, odprawy celnej i ważenia wagonów. Biorąc pod uwagę czas obsługi (rys. 1a) i wynikającą z niego wydajność, bezkonkurencyjny jest wariant z samoczynnie rozsuwanymi zestawami kołowymi. Występują tu jednak ograniczenia związane z uniwersalnością obsługi. Technologia ta wymaga przewozów w składach całopociągowych, ewentualnie wstępnego rozrządzenia przed punktem granicznym.

Tabela 1. Charakterystyka procesu obsługi w punktach styku 1435/1520 mm [1, 9]

System	Grupa przestawcza	Wyposażenie punktu 1435/1520	Średni czas obsługi	Średni czas wymiany grupy przestawczej	Ilość grup na dobę	Zdolność przestawcza na dobę
	[wagony]	[-]	[min]	[min]	[-]	[wagony]
1	10	10 stanowisk z podnośnikami	200,0	25,0	3	30,0
2	Cały skład pociągu	Torowe stan. przestawcze	6,0	25,0	46	1.380,0

Na rysunku 1b przedstawiono zależność procentowego zmniejszenia ilości zaangażowanych wagonów od odległości przewozu materiałów niebezpiecznych. Z wykresu można odczytać, że zastosowanie systemu SUW 2000 w relacji przewozowej liczącej 1100 km pozwala uzyskać 25% oszczędności w zaangażowanym taborze w stosunku do aktualnie stosowanej metody wymiany wózków. Wraz ze wzrostem odległości przewozu, co jest równoważne ze zmniejszeniem udziału czasu pokonania bariery szerokości toru w całkowitym czasie transportu, efektywność zastosowania systemu SUW 2000 maleje.



Rys. 1. a) Czas obsługi składu pociągu, b) Zmniejszenie zapotrzebowania na środki transportowe przy zastosowaniu systemu SUW 2000 w funkcji odległości przewozu [9]

2. Analiza LCC i model kosztu cyklu trwałości

Wstępną ocenę efektywności wybranych systemów przeprowadzono za pomocą wskaźników techniczno-ekonomicznych. Metoda ta nie uwzględniała jednak kwestii niezawodności i trwałości systemu. Istnienie związków pomiędzy efektywnością ekonomiczną, a niezawodnością systemów nie budzi poważniejszych wątpliwości. Jednak zarówno podczas określania efektywności ekonomicznej, jak i niezawodności systemów występują trudności. Żaden z mierników efektywności ekonomicznej nie uwzględnia aspektów związanych z niezawodnością i trwałością systemu. Dwa systemy eksploatacji o podobnych efektach ekonomicznych, lecz różnych charakterystykach niezawodnościowych są z punktu widzenia tradycyjnych kryteriów efektywności równoważne.

Do szczegółowej i kompleksowej oceny wybranych systemów zastosowano analizę LCC. Analiza miała charakter porównawczy, więc z kalkulacji wyeliminowano elementy wspólne, które mają taki sam wpływ w jednym i drugim systemie np.: infrastrukturę kolejową 1435 mm i 1520 mm, pojazdy trakcyjne. Ośrodek zainteresowania w porównywanych systemach stanowiły elementy wyposażenia technicznego punktów styku różnej szerokości torów oraz taboru kolejowego zaangażowanego w procesie transportowym.

Jako miarę efektywności ekonomicznej przyjęto całkowity koszt funkcjonowania systemu, tzw. koszt cyklu trwałości (LCC) obliczony w 25-letnim okresie eksploatacji. W analizie zastosowano procedurę zgodną z zaleceniami zawartymi w normie PN-EN 60300-3-3 *Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań – Szacowanie kosztu cyklu życia*. Procedura ta została opisana przez autora m.in. w pracach [7, 8, 9]. Podstawę do wykonania analizy LCC stanowiły wskaźniki niezawodnościowe, dotyczące nieuszkodzalności, trwałości, obsługiwalności oraz gotowości technicznej. Niezbędne w tym celu dane eksploatacyjne zostały zgromadzone podczas długoletnich badań prowadzonych we współ-

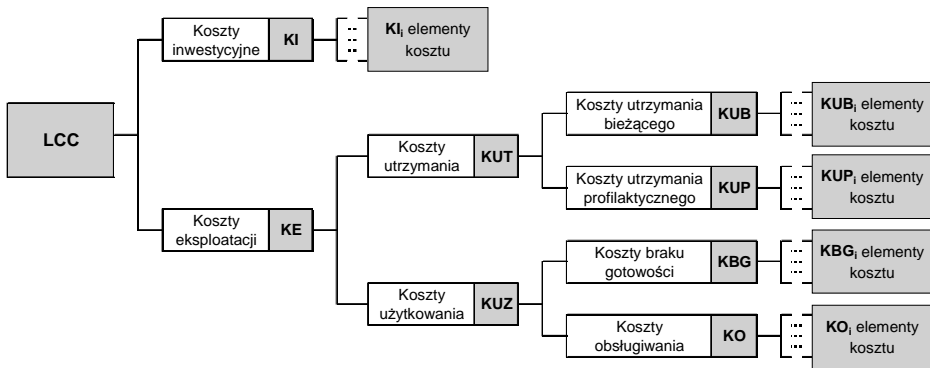
pracy z PKP Cargo S.A. W odniesieniu do elementów systemu zastosowano obszerny zestaw wskaźników niezawodnościowych [6, 9]:

- funkcję odnowy $H(t)$,
- intensywność (parametr) strumienia uszkodzeń $z(t)$,
- oczekiwany czas do pierwszego uszkodzenia MTTF,
- oczekiwany czas poprawnej pracy między uszkodzeniami MTBF,
- oczekiwany czas usuwania uszkodzenia MTTR,
- stacjonarny wskaźnik gotowości operacyjnej A_0 i rzeczywistej A_R .

Dla analizowanych systemów opracowano wspólny model kosztu (rys. 2), w którym LCC wyrażono następującą formułą:

$$LCC = KI + KE \quad (1)$$

gdzie: KI – koszty inwestycyjne systemu,
 KE – koszty eksploatacji systemu.



Rys. 2. Model LCC zastosowany do oceny efektywności analizowanych systemów [8, 9]

Koszty inwestycyjne (KI) to suma nakładów kapitałowych niezbędnych do realizacji przewozów w danym systemie. Na koszty eksploatacji (KE) składają się koszty utrzymania i użytkowania systemu. Analiza miała charakter porównawczy, więc w modelu kosztów uwzględniono tylko te kategorie, które są różne dla ocenianych systemów.

Jednym z najważniejszych zadań w modelowaniu LCC jest definicja struktury podziału kosztu, polegająca na dekompozycji kategorii kosztów na najwyższym poziomie, które wynikają z przyjętej formuły na LCC, na koszty składowe. Każda kategoria kosztu powinna zostać podzielona aż do osiągnięcia najniższego poziomu tzw. elementu kosztu [4, 5]. Element kosztu jest to taka wartość,

której nie można wyrazić jako sumy innych kosztów. Jest on definiowany za pomocą matematycznych formuł zawierających parametry, wartości stałe lub funkcje. Takie podejście jest usystematyzowane i uporządkowane, a zatem dające wysoki poziom ufności, że wszystkie elementy kosztu mające duże znaczenie w LCC zostały uwzględnione. Koncepcję definiowania elementów kosztu w modelu LCC można znaleźć m.in. w jednym z programów Ministerstwa Obrony USA Integrated Logistics Support (Dyrektywa DOD 4100.35 1968 r.) oraz w normie PN-EN 60300-3-3 z 2006 roku.

W zastosowanym modelu, jednym z elementów kosztu były koszty utrzymania bieżącego (KUB) związane z naprawami bieżącymi wykonywanymi po wystąpieniu uszkodzenia elementu systemu. KUB uwzględniają zarówno koszty robocizny jak i koszty materiałów i części zamiennych. Do wyznaczenia KUB wykorzystano funkcje odnowy $H(t)$ wyznaczone w ramach analizy niezawodnościowej. Koszty utrzymania bieżącego dla pojedynczego elementu systemu (KUB_n) wyrażono następującą formułą:

$$KUB_n = [H_n(t_i) - H_n(t_{i-1})] \cdot [(MMH_n \cdot CPH_n) + ACM_n] \quad [zł/rok] \quad (2)$$

gdzie: $H_n(t_i)$ – wartość funkcji odnowy n -tego elementu w i -tym roku eksploatacji,

MMH_n – średnia pracochłonność naprawy bieżącej n -tego elementu,

CPH_n – koszt roboczogodziny przy naprawie bieżącej n -tego elementu,

ACM_n – średni koszt zużycia materiałów w naprawie bieżącej.

Ogólnie, w modelu LCC analizowanych systemów zastosowano 19 elementów kosztów, zdefiniowanych na 54 parametrach i funkcjach. Przyjęto przy tym następujące założenia:

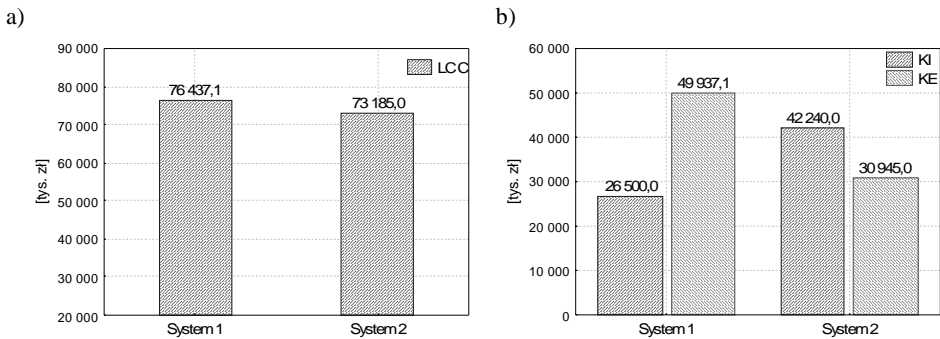
- ilość wagonów przestawionych w punkcie granicznym: 5483 [wag./rok],
- średnia ładowność przestawianego wagonu: 48 [ton],
- odległość przewozu: 1100 [km],
- obrót wagonu: system 1 – 10,6 [dni], system 2–8,0 [dni],
- czas eksploatacji systemów: 25 [lat].

Kalkulację LCC oparto na niezdyskontowanych wartościach kosztów. Wycenę elementów kosztu oparto o ceny stałe (netto) z poziomu 2008 roku.

3. Analiza modelu kosztu

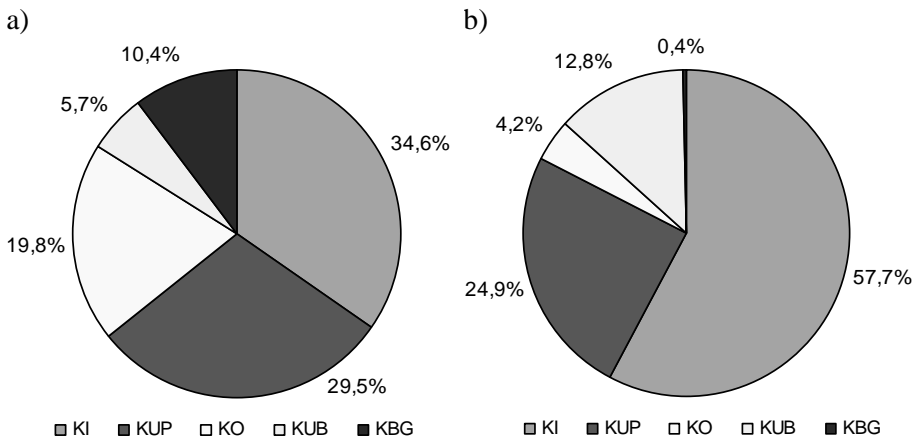
Analiza modelu LCC wykonana z zastosowaniem oprogramowania CATLOC wykazała, że zastosowanie systemu samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000 w przewozie materiałów niebezpiecznych, w porównaniu z aktualnie stosowaną wymianą wózków wagonowych, zapewnia zde-

cydowanie wyższą efektywność systemu transportowego. Na rysunku 3a porównano LCC systemu 1 i 2 obliczone dla okresu 25 lat eksploatacji. LCC systemu 2 jest o 3,2 mln zł niższe w porównaniu do systemu 1. Z rysunku 3b, na którym przedstawiono strukturę LCC, można odczytać, że pomimo zdecydowanie wyższych kosztów inwestycyjnych w systemie 2, osiągane są znaczące oszczędności w kosztach eksploatacji wynoszące ponad 18,9 mln zł.



Rys. 3. a) Koszty cyklu trwałości LCC, b) Koszty inwestycyjne KI i koszty eksploatacji KE analizowanych systemów [9]

Na rysunkach 4a i 4b przedstawiono strukturę LCC dla systemów 1 i 2. Największy udział w LCC systemów mają koszty inwestycyjne: 34,6% dla systemu 1 i 57,7% dla systemu 2. W kosztach eksploatacji największy udział



Rys. 4. Struktura kosztu cyklu trwałości LCC a) system 1, b) system 2 [9] KI – koszty inwestycyjne, KUP – koszty utrzymania profilaktycznego, KO – koszty obsługi, KUB – koszty utrzymania bieżącego, KBG – koszty braku gotowości

w LCC mają koszty utrzymania profilaktycznego: 29,5% dla systemu 1 oraz 24,9% dla systemu 2. Koszty utrzymania bieżącego stanowią 5,7% kosztów całkowitych dla systemu 1 i 12,8% dla systemu 2. Największe różnice dotyczą kosztów braku gotowości i kosztów obsługi. Brak gotowości elementów w systemie 1 jest przyczyną 10,4% kosztów ogółem, przy 0,4% dla systemu 2. Koszty obsługi stanowią blisko 20% LCC systemu 1 oraz 4% systemu 2.

W celu oszacowania wpływu zmian parametrów i elementów kosztów na LCC przeprowadzono analizę wrażliwości. W systemie 2, który zakłada zastosowanie samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000, obejmowała ona następujące parametry:

- średnią liczbę uszkodzeń elementów systemu,
- gotowość techniczną podsystemów,
- pracochłonność napraw bieżących elementów systemu,
- pracochłonność obsługi profilaktycznych elementów systemu,
- koszt roboczogodziny przy obsługach profilaktycznych i bieżących,
- koszt przestoju systemu,
- koszt wózka z zestawami przestawnymi.

Analiza wrażliwości wykazała, że czynnikiem decydującym w największym stopniu o efektywności ekonomicznej zastosowania systemu SUW 2000 w transporcie materiałów niebezpiecznych jest koszt wózka z zestawami przestawnymi. Obniżenie aktualnej ceny wózka o 20% wpływa na obniżenie LCC systemu o 11,5%, czyli ponad 8,5 mln zł. Z parametrów niezawodnościowych bardzo istotny jest wskaźnik gotowości technicznej podsystemów oraz średnia liczba uszkodzeń elementów systemu. Podwyższenie nieuszkodzalności systemu o 20%, poprzez zwiększenie niezawodności wózków wyposażonych w zestawy przestawne, wpływa na obniżenie LCC o 2,6%, czyli o 1,9 mln zł. Analiza wrażliwości wykazała ponadto, że przy aktualnie oferowanej cenie wózka z zestawami przestawnymi i obliczonych parametrach niezawodnościowych, efektywność systemu SUW 2000 jest ograniczona długością relacji transportowej do 1460 km [9].

Podsumowanie

Efektywny system transportu kolejowego jest podstawą rozwoju gospodarczego i wymiany handlowej pomiędzy krajami Europy i Azji. Prace nad nowymi, bardziej efektywnymi niż dotychczas stosowane, metodami pokonywania różnic szerokości toru wydają się konieczne i uzasadnione. W artykule przedstawiono zwięzłe porównanie efektywności dwóch wybranych systemów przestawczych. Do oceny efektywności zastosowano analizę LCC jako metodę pozwalającą na kompleksową ocenę, uwzględniającą wszystkie fazy życia przed-

sięwzięcia. Analiza wykazała, że zastosowanie samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000 w transporcie materiałów niebezpiecznych dla relacji transportowych o długości poniżej 1500 km jest ekonomicznie uzasadnione.

Bibliografia

1. Analiza organizacyjno-ekonomiczna wariantów przewozów produktów naftowych na kolejach o różnej szerokości torów. Projekt badawczy nr 186ZS, Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 1995.
2. Kryterialna ocena kolejowych systemów przestawczych z zastosowaniem analizy LCC. Projekt badawczy nr M8/14/2008, Politechnika Krakowska Instytut, Pojazdów Szynowych, Kraków 2008.
3. Szkoda M.: Analiza organizacyjno-ekonomiczna wariantów przewozów Wschód-Zachód ze zmianą szerokości torów. Praca dyplomowa nr DTT-135/02-SM, Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków 2002.
4. PN-EN 60300-3-3:2006 Zarządzanie niezawodnością. Część 3-3. Przewodnik zastosowań – Szacowanie kosztu cyklu życia.
5. Szkoda M., Tułeczki A.: Koszt cyklu trwałości LCC jako model decyzyjny modernizacji pojazdów szynowych. Materiały XVII Konferencji Naukowej „Pojazdy Szynowe”, Kazimierz Dolny 2006, 669-678.
6. Szkoda M.: Ocena niezawodności i efektywności kolejowych systemów przestawczych. Materiały XVIII Konferencji Naukowej „Pojazdy Szynowe”, Szczyrk, 2008, 249-264.
7. Szkoda M.: Metoda oceny kolejowych systemów transportowych ze zmianą szerokości torów. Materiały XVII Międzynarodowego Sympozjum Zastosowania Teorii Systemów, Zakopane 2007, 127-137.
8. Szkoda M., Tułeczki A.: Decision models in effectiveness evaluation of Europe-Asia transportation systems. Materiały Konferencyjne: The 8-th World Congress on Railway Research WCRR 2008, Seul, Korea, 2008.
9. Szkoda M.: Metoda oceny trwałości i niezawodności kolejowych systemów przestawczych. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Kraków, 2008.

Recenzent:
Włodzimierz CZYCZUŁA

Comparative Efficiency Assessment of Rail Systems with Track Gauge Change by Life Cycle Cost Analysis Applied

Key-words

LCC analysis, efficiency assessing, rail gauge-changing system, East-West transportation system.

Summary

The paper based on research and development projects made in Institute of Rail Vehicles Cracow University of Technology. The projects concerned assessing the technical and economic efficiency of rail systems with track gauge change (1435/1520 mm). Effectiveness of those transportation systems significantly depends on track gauge change 1435/1520 mm, which connects with complicated handling-shifting operations. Comparative analysis of dangerous materials transport, among others, using the SUW 2000 system of self-adjusted wheel-sets, was based on Life Cycle Cost Analysis. The analysis pointed out both economic effects and restrictions in application in assumed and presented systems. For effectiveness assessment, selected systems LCC analysis was applied as a method that allows evaluating comprehensively all phases of the life cycle. The conducted calculations proved the usefulness of the SUW 2000 system of self-adjusted wheel sets for relations with a haulage distance below 1500 km.