

**Maciej SZKODA**

Politechnika Krakowska, Kraków

## **KOSZT CYKLU TRWAŁOŚCI JAKO KRYTERIUM EFEKTYWNOŚCI MODERNIZACJI LOKOMOTYW SPALINOWYCH**

### **Słowa kluczowe**

Modernizacja taboru szynowego, koszt cyklu trwałości, analiza LCC.

### **Streszczenie**

Referat opracowany został na podstawie analiz i prac badawczych związanych z odnową spalinowych pojazdów trakcyjnych, wykonanych dla czołowych polskich przewoźników kolejowych. Dotyczy zagadnienia oceny efektywności technicznej i ekonomicznej modernizacji lokomotyw spalinowych. W referacie przedstawiono podstawowe wymagania stawiane współczesnym silnikom kolejowym i dokonano zwięzłego opisu oceny modernizacji lokomotywy spalinowej z wykorzystaniem analizy kosztu cyklu trwałości.

### **Wprowadzenie**

Przez pojęcie modernizacja należy rozumieć wprowadzenie zmian konstrukcyjnych lub zastosowanie nowych zespołów poprawiających właściwości eksploatacyjno-techniczne pojazdu, ale nie zmieniających jego przeznaczenia [10]. Aktualnie modernizacja jest bardzo popularnym sposobem odnowy lokomotyw spalinowych, których średni wiek przekracza w Polsce 32 lata. Ze

względu na wysokie koszty związane z modernizacją, każde tego typu przedsięwzięcie powinno być dokładnie przeanalizowane pod kątem wykonalności i opłacalności. Celem rozważań zawartych w niniejszej pracy jest zastosowanie analizy kosztu cyklu trwałości w ocenie efektywności modernizacji spalinowych pojazdów trakcyjnych.

## 1. Wymagania stawiane współczesnym silnikom kolejowym

Najważniejsze cele modernizacji lokomotyw spalinowych, jakimi są poprawa efektywności eksploatacji poprzez zmniejszenie zużycia paliwa, zwiększenie przebiegów międzynaprawczych oraz zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne, odnoszą się do silnika spalinowego. Silnik spalinowy jest elementem lokomotywy, który w największym stopniu wpływa na efektywność eksploatacji, koszty utrzymania, gotowość techniczną i inne parametry. Ponadto silnik spalinowy jest elementem, który w znaczącym stopniu decyduje o nowoczesności pojazdu [1]. W stosunku do współczesnych silników spalinowych, stosowanych w pojazdach trakcyjnych, stawianych jest wiele wymagań o charakterze eksploatacyjnym, ekonomicznym i ekologicznym. Spośród tych wymagań można wymienić cztery podstawowe kryteria:

- małe zużycie paliwa i oleju silnikowego,
- wysoka gotowość techniczna,
- wysoka trwałość,
- ograniczona emisja szkodliwych składników w spalinach.

Jednostkowe zużycie paliwa przy mocy znamionowej w nowoczesnych silnikach kolejowych zawiera się w granicach  $190 \div 212$  g/kWh w zależności od mocy silnika. W aktualnie eksploatowanych lokomotywach zużycie to wynosi do 258 g/kWh. Największe różnice występują w warunkach biegu jałowego. Dzięki nowoczesnym elektronicznym systemom sterującym pracą silnika na biegu jałowym, zużycie paliwa przez współczesne silniki kolejowe wynosi od 3 do 12 kg/h (aktualnie do 25 kg/h). Zużycie oleju silnikowego mieści się w granicach  $0,2 \div 0,5\%$  zużycia paliwa, w aktualnie eksploatowanych pojazdach jest ponad 10-krotnie wyższe [9].

Wysoka gotowość techniczna współczesnych silników kolejowych zostaje osiągnięta dzięki wysokiej niezawodności i mniejszej pracochłonności obsługi. Mniejsza pracochłonność obsługi jest wynikiem m.in. stosowanej obecnie przez producentów modułowej konstrukcji silników oraz mniejszych wymiarów, co wpływa na stworzenie dogodnych warunków obsługi technicznej przy przeglądach i naprawach okresowych.

Od współczesnych silników kolejowych wymagana jest wysoka trwałość, czyli zdolność do zachowania stanu zdatności w określonych warunkach eksploatacji. Oficjalnie producenci silników określają czas pracy silnika do naprawy głównej (tzw. Major Overhaul), np.:

- silniki konstrukcji europejskiej (np.: MTU): 24÷30 tys. mth (motogodzin),
- silniki rosyjskie (np.: Kolomna): 60÷120 tys. mth,
- silniki amerykańskie (np.: Caterpillar): 20÷105 tys. mth.

Obecnie kryterium determinującym w największym stopniu dobór silnika spalinowego do modernizowanej lokomotywy jest emisja szkodliwych składników w spalinach. W Europie obowiązują dwa główne przepisy, regulujące wymagania dla silników spalinowych pojazdów trakcyjnych w zakresie dopuszczalnych składników toksycznych zawartych w spalinach. Są to wymagania ujęte w raporcie ERRI (dawniej ORE) oraz w kartach UIC, niemających jednak umocowania prawnego w świetle prawa międzynarodowego, a są tylko zobowiązaniami wszystkich kolei skupionych w UIC. Poza tym, w związku z pojawieniem się na rynku europejskim wielu prywatnych przewoźników, zostały wydane Dyrektywy (2004/26/EC, 2005/13/EC), mające moc prawa unijnego, w których określono szczegółowo wymagania dotyczące emisji spalin. Nowe zastrzone kryteria regulowane przez Stage IIIA Dyrektywy 2004/26/EC (tab. 1) zaczęły obowiązywać już od 1 stycznia 2009 roku.

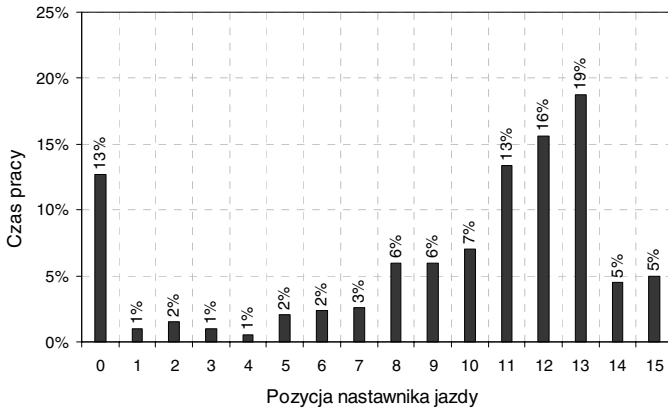
Tabela 1. Normy emisji zanieczyszczeń według Dyrektywy 2004/26/EC [5]

Lp.	Norma	Moc silnika ( $P_n$ )	NO <sub>x</sub> g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	PM g/kWh	Data wprowadzenia
1	Stage III A	$P_n = 130 \div 560$ kW	4,0		3,5	0,2	2007
		$P_n > 560$ kW	6,0	0,5	3,5	0,2	2009
		$P_n > 2000$ kW	7,4	0,4	3,5	0,2	2009
2	Stage III B	$P_n > 130$ kW	4,0		3,5	0,025	2012

## 2. Ocena efektywności modernizacji lokomotywy spalinowej

Do wykonania oceny efektywności modernizacji lokomotywy spalinowej muszą być spełnione pewne założenia i wymagania dotyczące silnika spalinowego. Najważniejsze z nich to określenie rozkładu prawdopodobieństwa obciążenia analizowanej lokomotywy. Rozkład obciążenia przedstawia się najczęściej za pomocą histogramu, który obrazuje procentowy czas pracy lokomotywy na poszczególnych pozycjach nastawnika jazdy [1].

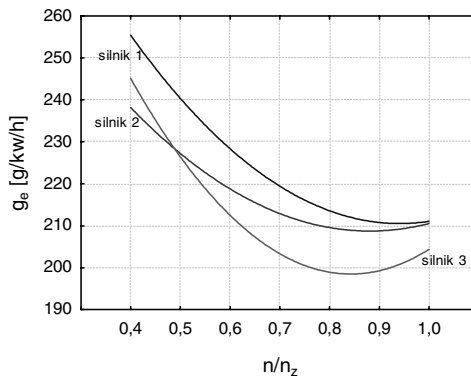
Na rys. 1 przedstawiono histogram obciążenia dla lokomotywy spalinowej serii ST44, opracowany na podstawie badań eksploatacyjnych u jednego z przewoźników kolejowych.



Rys. 1. Histogram obciążenia silnika spalinowego lokomotywy ST44 [2]

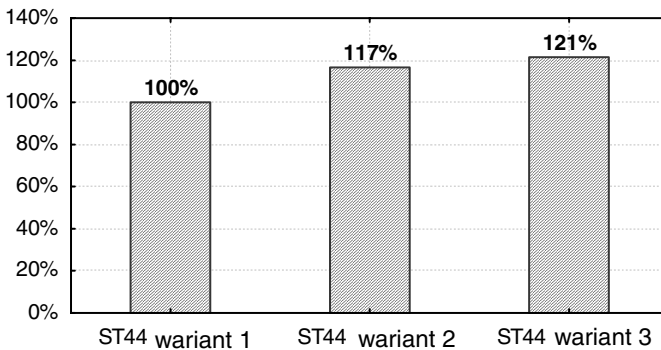
Z histogramu tego wynika, że silnik spalinowy w analizowanej lokomotywie przez około 5% czasu ogółem pracuje na mocy maksymalnej, 13% na biegu jałowym. Czyli przez większą część czasu pracy silnik obciążony jest mocą częściową, mocą mniejszą od mocy maksymalnej. W związku z tym nowy silnik spalinowy proponowany w ramach modernizacji powinien być dopasowany do obciążenia lokomotywy w aspekcie zużycia paliwa.

Dla lokomotywy ST44 opracowano trzy warianty modernizacji w ramach, których zaproponowano trzy dostępne na rynku silniki spalinowe o mocy 1500 kW. Rys. 2 przedstawia wykresy funkcji jednostkowego zużycia paliwa wybranych silników podczas pracy na charakterystyce zewnętrznej. Z kształtu tych krzywych wynika, że najmniejsze zużycie paliwa, a tym samym i największą opłacalność modernizacji pojazdu, powinien gwarantować silnik numer 3. Obszar minimalnego jednostkowego zużycia paliwa ( $0,8 \div 0,9 n_z$ ) pokrywa się z największym prawdopodobieństwem pracy lokomotywy.



Rys. 2. Jednostkowe zużycie paliwa dla trzech typów silników spalinowych w funkcji względnej prędkości obrotowej [5]

Porównując jednak koszty nabycia (rys. 3), czyli nakłady inwestycyjne dla opracowanych wariantów modernizacji lokomotywy, wariant z silnikiem 3 jest znacznie droższy od pozostałych: o 21% w stosunku do wariantu I oraz 4% do wariantu II. Powstaje zatem pytanie czy rzeczywiście wariant 3 gwarantuje najwyższą opłacalność modernizacji pojazdu?



Rys. 3. Koszty nabycia w analizowanych wariantach modernizacji lokomotywy ST44 [5]

### 3. Metoda analizy kosztu cyklu trwałości (LCC)

Do wykonania porównawczej oceny efektywności modernizacji lokomotywy spalinowej ST44 zastosowano analizę kosztu cyklu trwałości (analizę LCC), która jest metodą oceny zalecaną przez międzynarodowe normy oraz standardy np.: normę PN-EN 60300-3-3 lub kartę UIC 345.

Koszt cyklu trwałości LCC (Life Cycle Cost) definiuje się jako łączny koszt ponoszony w cyklu trwałości obiektu technicznego, czyli od powstania koncepcji i projektowania poprzez wytworzenie i eksploatację do jego likwidacji [3].

$$LCC = K_N + K_P + K_L \quad (1)$$

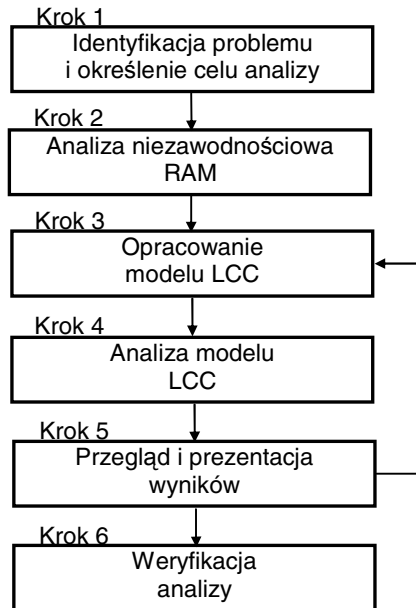
gdzie:

$K_N$  – koszty nabycia,

$K_P$  – koszty posiadania,

$K_L$  – koszty likwidacji.

Na podstawie różnych, proponowanych w literaturze i przede wszystkim w normach procedur wykonania analizy LCC opracowano metodę (rys. 4), która jest podejściem uniwersalnym przy analizowaniu przedsięwzięć związanych z pojazdami szynowymi, dotyczących zarówno zakupu nowych jak i modernizacji starych. W proponowanym układzie analiza rozpoczyna się od identyfikacji problemu i określenia celu analizy. Etapy od 3 do 5 mogą być powtarzane aż do spełnienia wszystkich założeń.



Rys. 4. Procedura wykonania analizy LCC [7]

### **Identyfikacja problemu i określenie celu analizy**

Krok 1 analizy LCC polega na identyfikacji problemu i określeniu celów, jakie ma ta analiza dostarczyć. Typowe cele analizy to [6, 8]:

- ocena porównawcza różnych wariantów modernizacji pojazdu,
- ocena porównawcza różnych strategii użytkowania i utrzymania na LCC,
- identyfikacja kosztów dominujących w LCC, dla ukierunkowania prac rozwojowych i optymalizacji,
- wspomaganie długoterminowego planowania poprzez uzyskanie informacji o rozkładzie kosztów ponoszonych w cyklu trwałości pojazdu.

Na tym etapie zaleca się również identyfikację danych wejściowych niezbędnych do budowy modelu kosztu.

### **Analiza niezawodnościowa RAM**

Krok 2 w proponowanym układzie to przeprowadzenie analizy niezawodnościowej określanej w literaturze jako analiza RAM (*reliability, availability, maintainability* – ang. niezawodność, gotowość, obsługiwalność). W obszarze badań niezawodnościowych leży wyznaczenie liczbowych i funkcyjnych miar niezawodności, takich jak: oczekiwany czas naprawy, oczekiwany czas do uszkodzenia, gotowość techniczna, funkcja niezawodności, intensywności uszkodzeń i inne [4].

Do wykonania analizy niezawodnościowej RAM niezbędne jest dysponowanie i przetwarzanie określonej informacji eksploatacyjnej o badanym pojeździe np.: sumarycznym czasie pracy, sumarycznym czasie napraw (planowych, pozaplanowych), sumarycznej liczbie uszkodzeń w zadanym przedziale czasu eksploatacji, przyczynach i skutkach tych uszkodzeń, czasie postojów organizacyjnych w obsłudze i wiele innych. Szeroko rozumiane właściwości niezawodnościowe stanowią podstawę do budowy modelu LCC. Jak wykazują analizy mają one szeroki wpływ na koszty związane z obsługiwaniem i użytkowaniem pojazdu.

### **Opracowanie modelu LCC**

Krok 3 to opracowanie modelu kosztu LCC. Model LCC, podobnie jak każdy inny model, jest uproszczoną prezentacją rzeczywistości. Wyodrębnia on cechy i aspekty pojazdu i przekształca je w liczby odnoszące się do kosztów. Model powinien być na tyle prosty, aby był łatwy do zrozumienia i pozwalał na przyszłe wykorzystanie, uaktualnienia i modyfikacje. Powinien być zaprojektowany w taki sposób, aby pozwalał na ocenę specyficznych elementów LCC niezależnie od innych [3].

Jednym z najbardziej fundamentalnych zadań w modelowaniu LCC jest definicja struktury podziału kosztu, która polega na dekompozycji kategorii kosztów na najwyższym poziomie, które wynikają z formuły na LCC na koszty składowe. Każda kategoria kosztu powinna zostać podzielona aż do osiągnięcia najniższego poziomu tzw. elementu kosztu. Element kosztu jest to taka wartość, której nie można wyrazić jako sumę innych kosztów. Jest on definiowany za pomocą matematycznych formuł zawierających parametry, wartości stałe lub funkcje [6]. Taki rodzaj podejścia ma tę zaletę, że jest usystematyzowany i uporządkowany, a zatem dający wysoki poziom ufności, że wszystkie elementy kosztu mające duże znaczenie w LCC zostały uwzględnione. Koncepcję definiowania elementów kosztu w wielowymiarowej macierzy 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 60300-3-3:2006.

### **Analiza modelu LCC**

Analiza modelu obejmuje:

- obliczenie wszystkich elementów kosztu włączonych do modelu LCC,
- identyfikację kosztów dominujących, które mają największy wpływ na LCC.

Dodatkowo w ramach tego etapu można przeprowadzić analizę wrażliwości w celu zbadania wpływu zmian parametrów i elementów kosztu na LCC. W pierwszej kolejności powinna ona być wykonana na zidentyfikowanych kosztach dominujących oraz parametrach niezawodnościowych, np.: intensywności uszkodzeń, intensywności napraw itp.

### **Przegląd i prezentacja wyników**

Krok 5 w proponowanej procedurze to przegląd oraz prezentacja wyników analizy LCC. Przegląd, który ma na celu potwierdzenie prawidłowości i spójności wyników oraz wniosków, obejmuje [3]:

- cel i zakres analizy: czy zostały one właściwie sformułowane i zinterpretowane;
- założenia poczynione w toku procesu analizy: upewnienie się, że są one rozsądne;
- model: upewnienie się, że jest on odpowiedni do celu analizy, że uwzględniono wszystkie elementy kosztu, czy wyniki (włączając w to wyniki analizy wrażliwości) zostały odpowiednio ocenione.

W przypadku gdy stwierdzono, że utworzony model zawiera jakiegokolwiek błędy, wówczas zachodzi konieczność poprawy i uzupełnienia wstępnej koncepcji. Prezentacja wyników powinna umożliwiać zrozumienie przeprowadzonej analizy. Powinna zawierać wyniki uzyskane z utworzonego modelu LCC, łącznie z kosztami dominującymi oraz wynikami analiz wrażliwości.

### **Weryfikacja analizy**

Istotną sprawą jest ocena i weryfikacja utworzonego modelu i całej analizy LCC. Weryfikacja odbywa się na podstawie eksploatacji pojazdu w ustalonym przedziale czasu, podczas której gromadzone są dane dotyczące między innymi:

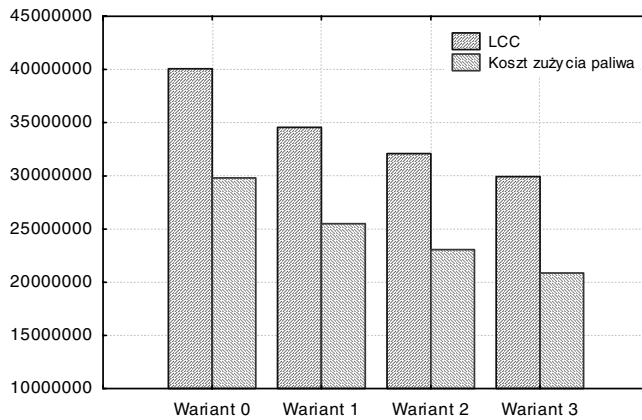
- pracochłonności i zużycia materiałów w naprawach i przeglądach planowych,
- niezawodności (uszkodzalności) pojazdu,
- pracochłonności i zużycia materiałów w naprawach pozaplanowych,
- zużycia energii, materiałów eksploatacyjnych itp.

Na podstawie zebranych danych eksploatacyjnych następuje ocena poprawności wykonania analizy LCC. Pozwala to na ocenę dokładności obliczeń i wyeliminowanie błędów w kolejnych analizach. Na kolejnych szwedzkich w przypadku dostawy nowego pojazdu szynowego taka weryfikacja odbywa się w okresie pierwszych 9÷18 miesięcy eksploatacji pojazdu. W sytuacji gdy rzeczywiste wartości parametrów i elementów LCC znacznie różnią się od zadeklarowanych, wówczas wyciągane są wobec dostawcy pojazdu konsekwencje ściśle określone warunkami umowy.

## **4. Wyniki analizy LCC dla lokomotywy spalinowej ST44**

Wykonana analiza kosztu cyklu trwałości dla modernizowanej lokomotywy ST44 wykazała, że wszystkie przyjęte do oceny koncepcje modernizacji lokomotywy zapewniają znaczące oszczędności w kosztach eksploatacji w stosunku do pojazdu niemodernizowanego (wariant 0).

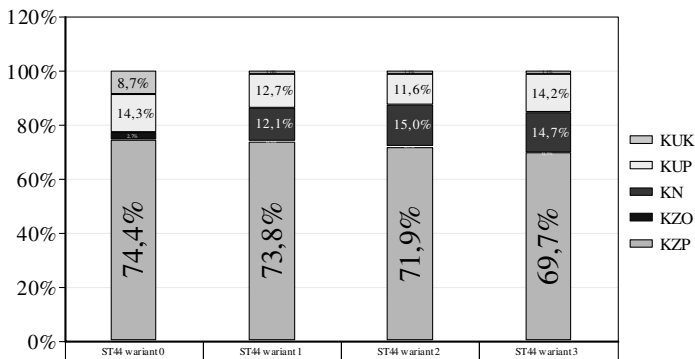




Rys. 5. LCC i koszty zużycia paliwa w analizowanych wariantach modernizacji (w zł)

Najwyższą opłacalność modernizacji gwarantuje wariant z silnikiem nr 3, rekomendowany ze względu na charakterystykę zużycia paliwa. Pomimo najwyższych kosztów nabycia związanych z wykonaniem modernizacji (rys. 1), LCC dla wariantu 3 w 25-letnim okresie trwałości pojazdu jest o około 10 mln zł niższy w stosunku do pojazdu niezmodernizowanego i 2÷4 mln do pozostałych wariantów (rys. 5). Wyniki te potwierdzają zalecenia karty UIC 345, że: *nie można koncentrować się przede wszystkim na kosztach pierwotnej inwestycji, wymagane jest podejście zorientowane na LCC.*

Rysunek 6 przedstawia koszty dominujące w LCC modernizowanej lokomotywy ST44 i podkreśla zarazem istotę właściwego doboru silnika spalinowego. Z rysunku tego można odczytać, że najważniejszą kategorią kosztów w 25-letnim okresie trwałości lokomotywy jest koszt zużycia paliwa KZP, który stanowi około 70% LCC.



Rys. 6. Koszty dominujące w LCC analizowanych wariantów modernizacji [5]

KUK – koszty utrzymania nieplanowego, KUP – koszty utrzymania planowego, KN – koszty nabycia, KZO – koszty zużycia oleju silnikowego, KZP – koszty zużycia paliwa

Jedną z kategorii dominujących dla pojazdu niezmodyfikowanego jest koszt utrzymania nieplanowego KUK, który stanowi 8,7% całkowitych LCC. Na podstawie wykonanych badań lokomotyw serii ST44 stwierdzono, że ponad 90% kosztów napraw nieplanowych spowodowanych jest uszkodzeniami silnika spalinowego typu 14D40. Jest on najsłabszym elementem tych lokomotyw. Koszty utrzymania planowego KUP, obejmujące naprawy i przeglądy okresowe wynoszą od 12 do 14% w zależności od wariantu. Dla pojazdu zmodernizowanego (wariant I, II i III) koszty nabycia KN stanowią około 15% LCC, czyli ponad 85%, to tzw. koszty posiadania związane z eksploatacją pojazdu. Ich identyfikacja w ramach analizy LCC daje możliwość przygotowania się przewoźnikowi na te wydatki i uniknięcia rozczarowania wysokimi kosztami użytkowania i utrzymania pojazdu [6, 11].

### Podsumowanie

Jak dowodzą wykonane analizy, decyzje dotyczące modernizacji spalinowych pojazdów trakcyjnych nie mogą być oparte wyłącznie na kosztach początkowych związanych z nakładami inwestycyjnymi na zakup nowych elementów czy wykonaniem zmian konstrukcyjnych w pojeździe. Analizując efektywność modernizacji spalinowych pojazdów trakcyjnych należy uwzględnić całkowite koszty generowane przez pojazd w cyklu trwałości. Decydujące znaczenie mają koszty posiadania, czyli koszty generowane przez pojazd po wykonanej modernizacji. W przypadku lokomotyw spalinowych największe znaczenie odgrywiają koszty zużycia paliwa i koszty utrzymania planowego. Do określenia i identyfikacji tych kosztów z powodzeniem może być stosowana analiza LCC, która w przeciwieństwie do ekonomicznych metod oceny efektywności uwzględnia własności związane z niezawodnością, gotowością i utrzymywalnością pojazdu.

### Bibliografia

1. Gronowicz J.: Energochłonność transportu kolejowego. Trakcja spalinowa. WKiŁ, Warszawa 1990.
2. Ocena efektywności modernizacji liniowych lokomotyw spalinowych serii ST44. Praca nr M-8/618/2004, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków 2005.
3. PN-EN 60300-3-3: Zarządzanie niezawodnością. Część 3-3. Przewodnik zastosowań – Szacowanie kosztu cyklu życia. 2006.
4. PN-EN 50126: Railway applications. The Specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). 2002.
5. Studium techniczno-ekonomiczne odnowy parku pojazdów trakcyjnych eksploatowanych przez PKP CARGO S.A. Etap III: Modernizacja lokomotyw spalinowych serii ST44 i SU45 do obsługi krajowych przewozów to-

- warowych. Praca nr M8/631/2006, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków 2007.
6. 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.
  7. Szkoda M.: Analiza kosztu cyklu trwałości LCC w ocenie pojazdów szynowych. Referat na Seminarium SITK: Rynek lokomotyw – rozwiązania techniczne. Aspekty prawne i ekonomiczne modernizacji lokomotyw. Dobieszków, 2006.
  8. Szkoda M.: Modernizacja wagonów towarowych w oparciu o modele kosztów LCC. Referat na III Konferencji „Modernizacja Taboru Szynowego”, Szczyrk, 2006.
  9. Szkoda M.: Techniczne i ekonomiczne kryteria doboru silników spalinowych do modernizowanych lokomotyw. Referat na IV Konferencji „Modernizacja Taboru Szynowego”, Jelenia Góra, 2007.
  10. Tułeczki A.: Modele decyzyjne w odnowie parku spalinowych pojazdów trakcyjnych. TTS, 9/2005, 69–73.
  11. Tułeczki A.: Ekonomiczno-techniczne aspekty odnowy parku spalinowych pojazdów trakcyjnych. Czasopismo Techniczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z. 3-M/2005, 289–299.

Recenzent:

**Marek PAWEŁCZYK**

## **Life cycle cost as a criterion of effectiveness of diesel locomotives modernization**

### **Key words**

Modernization of rail vehicles, Life Cycle Cost, LCC analysis.

### **Summary**

The paper is based on analyses and research projects connected with modernization of diesel traction vehicles which were conducted for leading Polish rail carriers. It deals with assessment of technical and economic efficiency of diesel locomotives' modernization. The paper presents the basic requirements which have to be fulfilled by modern rail engines and a concise description of diesel locomotive modernization's assessment using Life Cycle Cost Analysis.

