

Maciej SZKODA¹

ANALIZA KOSZTU CYKLU TRWAŁOŚCI (LCC) W OCENIE EFEKTYWNOŚCI ŚRODKÓW TRANSPORTU SZYNOWEGO

Artykuł dotyczy zastosowania analizy kosztu cyklu trwałości (LCC) w ocenie efektywności środków transportu szynowego. W artykule dokonano zwięzłego opisu genezy i koncepcji analizy LCC. Na podstawie zaleceń międzynarodowych norm przedstawiono metodę kalkulacji LCC dla pojazdów szynowych. Metoda ta może być stosowana do porównywania kosztów całkowitych przy zakupie nowych pojazdów jak również do porównywania kosztów różnych wariantów ich modernizacji.

LIFE CYCLE COST ANALYSIS IN EFFECTIVENESS EVALUATION OF RAILWAY MEANS OF TRANSPORT

The article presents life cycle cost (LCC) analysis in effectiveness evaluation of railway means of transport. The article includes a short description of LCC analysis's genesis and its conception as well as presentation of LCC's calculation method for railway vehicles. The method, which is based on international standards' recommendations, can be applied both to comparison of total costs upon new vehicles' purchase and different variants of used vehicles' modernization costs.

1. WSTĘP

Uwarunkowania prawne w zakresie transportu kolejowego w Polsce pozwoliły na dynamiczny rozwój prywatnych podmiotów gospodarczych zajmujących się kolejowymi przewozami ładunków i pasażerów. W ostatnich latach na rynku kolejowym obserwuje się duże zainteresowanie zakupem nowych pojazdów do przewozów pasażerskich: lokomotyw elektrycznych, zespołów trakcyjnych, autobusów szynowych oraz modernizacją starego taboru szynowego do przewozów towarowych, przede wszystkim lokomotyw spalinowych. Ze względu na bardzo wysokie koszty z jakimi związane są inwestycje dotyczące zakupu lub modernizacji pojazdów szynowych, przedsięwzięcia te powinny być dokładnie przeanalizowane pod kątem wykonalności i opłacalności. Analizy te sporządza się w celu określenia wymiernych efektów ekonomicznych dla różnych koncepcji nabycia.

Istnieje kilka metod służących do wykonania oceny efektywności środków transportu szynowego. Jedną z nich jest analiza LCC (Life Cycle Cost Analysis), określana jako

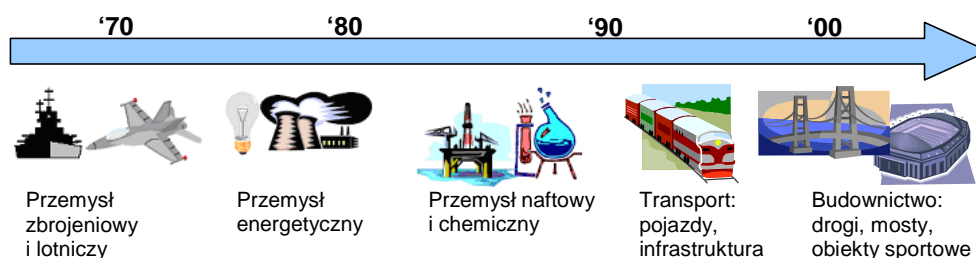
¹ Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków
E-mail: maciek@m8.mech.pk.edu.pl

analiza kosztu cyklu trwałości lub analiza kosztu cyklu życia. Przewagą tej metody nad innymi jest to, że uwzględnia całkowite koszty eksploatacji pojazdu w całym okresie trwałości, a nie tylko koszty początkowe związane z nakładami inwestycyjnymi.

2. GENEZA I KONCEPCJA ANALIZY LCC

2.1 Geneza analizy LCC

Początki analizy LCC sięgają końca lat 60-tych. Informacje o jej zastosowaniu można znaleźć w kilku programach prowadzonych przez Ministerstwo Obrony USA. Ministerstwo to wprowadziło kalkulację LCC do różnych obszarów działalności amerykańskiej armii, między innymi w eksploatacji środków transportu. W latach osiemdziesiątych XX wieku Ministerstwo wydało kilka przewodników po zastosowaniu kosztu LCC np.: [1], które wykorzystywane są przez amerykańskie przedsiębiorstwa. Po tym okresie zastosowanie analizy LCC rozpowszechniono na inne gałęzie przemysłu m.in. w branży lotniczej, energetyce, w branży naftowej, chemicznej oraz w transporcie i budownictwie (rys. 1).



Rys.1. Zastosowanie analizy LCC w latach 1970÷2000

Obecnie zastosowanie analizy LCC jako narzędzia decyzyjnego, służącego do oceny alternatywnych rozwiązań jest dość szerokie. W obszarze transportu kolejowego jako przykłady zastosowań można wymienić:

- zakup szybkich pociągów X2000 na kolejach szwedzkich,
- optymalizacja strategii utrzymania pojazdów szynowych na kolejach szwedzkich,
- budowa linii kolei magnetycznej Transrapid w Chinach,
- konstrukcje autobusów szynowych: typu RegioSprinter firmy Siemens, typu 214M Partner firmy PESA Bydgoszcz,
- projekty dotyczące modernizacji pojazdów trakcyjnych,
- projekty dotyczące linii kolejowej: w zakresie wdrożenia nowego typu szyn kolejowych i nowego typu podtorza i inne.

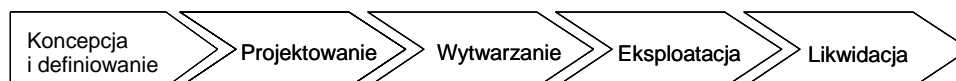
W wielu państwach analiza LCC jest elementem wymaganym prawnie przy realizacji nowych inwestycji, rozpisywaniu przetargów na realizację usług, wykonanie i dostawę obiektów technicznych – najczęściej o dużej wartości początkowej i długim okresie trwałości. Do takich inwestycji należą przedsięwzięcia dotyczące infrastruktury oraz

środków transportu szynowego. W ostatnich latach również w Polsce, analiza LCC jest coraz częściej wymagana od producentów i dostawców przy przetargach publicznych, których przedmiotem jest tabor szynowy. Jako przykład można podać dwa przetargi na zakup 4 i 13 sztuk nowych elektrycznych zespołów trakcyjnych przez Szybką Kolej Miejską Sp. z o.o. w Warszawie.

2.2 Koncepcja LCC

Ogólne warunki przeprowadzenia analizy LCC precyzowane są we wielu międzynarodowych normach, w tym obowiązującej w Polsce normie: PN-EN 60300-3-3:2006 *Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań - Szacowanie kosztu cyklu życia*. Według tej normy analiza LCC jest to proces identyfikacji i oceny całkowitych kosztów tzw. Life Cycle Cost (LCC) ponoszonych w cyklu trwałości obiektu technicznego. Zasadnicze znaczenie dla koncepcji szacowania LCC środków transportu szynowego ma zrozumienie cyklu trwałości i działań podejmowanych w kolejnych fazach tego cyklu. Istotne jest również zrozumienie zależności między tymi działaniami i osiąganymi, nieuszkodzalnością, obsługiwalnością i innymi charakterystykami pojazdu oraz wynikającymi stąd kosztami. Według normy można wyróżnić pięć głównych faz cyklu trwałości:

1. Koncepcja i definiowanie;
2. Projektowanie;
3. Wytwarzanie;
4. Eksploatacja;
5. Likwidacja.



Rys.2. Fazy cyklu trwałości wg normy PN-EN 60300-3-3

Łączne koszty (LCC) ponoszone w wymienionych wyżej fazach można podzielić na koszty nabycia, koszty posiadania i koszty likwidacji [2]:

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

gdzie: LCC – koszt cyklu trwałości,

K_N – koszty nabycia,

K_P – koszty posiadania,

K_L – koszty likwidacji.

Koszty nabycia ponoszone są w pierwszych fazach cyklu trwałości. Związane są z nakładami inwestycyjnymi niezbędnymi do pozyskania i wprowadzenia pojazdu do eksploatacji. Koszty nabycia są elementem, który można łatwo obliczyć w kalkulacji LCC, ale jak dowodzą prace badawcze np.: [3, 4, 5, 6, 7] bardzo często stanowią tylko przysłowiowy wierzchołek góry lodowej.

Koszty posiadania związane z okresem eksploatacji pojazdu ponoszone są w trzech ostatnich fazach, nie są one łatwo dostrzegalne i są trudne do oszacowania. Choć koszty te mają pierwszoplanowe znaczenie dla użytkownika pojazdu, to wzrasta również zainteresowanie nimi producenta przez uzgodnienia dotyczące okresu gwarancyjnego i inne uzgodnienia zawarte w umowach handlowych. Jak pokazano na rysunku 3 koszty posiadania są bardzo często głównym składnikiem LCC i w wielu przypadkach wielokrotnie przekraczają koszty nabycia. Jak wykazują analizy dotyczące środków transportu szynowego, udział kosztów posiadania w LCC ogółem może wynosić od 60 do ponad 90%. Na przykład, dla zmodernizowanej spalinowej lokomotywy liniowej udział kosztów posiadania w LCC wynosi 92%, dla lokomotywy manewrowej 70%, dla nowego elektrycznego zespołu trakcyjnego 65% [3, 6, 8].



Rys.3. LCC pojazdu szynowego jako suma kosztów nabycia i kosztów posiadania

Koszty likwidacji związane są z wycofaniem pojazdu z eksploatacji. W niektórych przypadkach mogą one stanowić znaczną część całkowitych LCC. Dotyczy to obiektów, których unieszkodliwienie jest bardzo uciążliwe, jak materiały radioaktywne lub kosztowne w sensie technologicznym np.: złomowanie statków, pojazdów szynowych itp. Koszty te są uwzględniane w analizie, gdy przyjęty horyzont czasowy obejmuje etap wycofania pojazdu z eksploatacji.

3. METODA KALKULACJI LCC

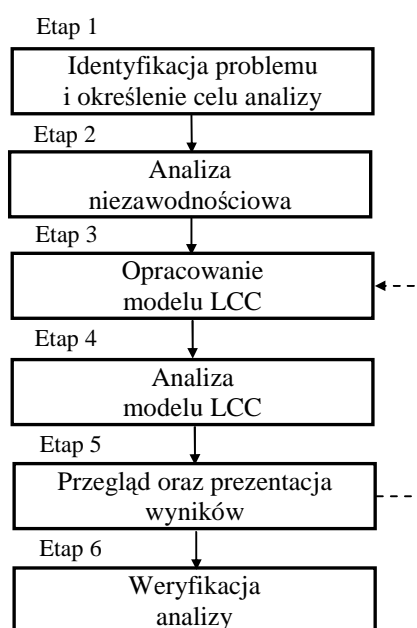
Na podstawie proponowanych w literaturze i w normach [2, 9÷15] metod wykonania analizy LCC można zaproponować uniwersalną procedurę oceny efektywności środków transportu szynowego. Procedura ta składa się z sześciu etapów i została przedstawiona na rysunku 4.

Etap 1 w proponowanej metodzie to identyfikacja problemu i określenie celów jakie analiza ma dostarczyć. Do przykładowych celów analizy LCC można zaliczyć:

- ocena porównawcza kosztów całkowitych lub kosztów generowanych w fazie eksploatacji pojazdu,
- identyfikacja kosztów dominujących,
- określenie elementów i parametrów kosztów mających największy wpływ na LCC.

Na tym etapie następuje również opracowanie założeń i określenie danych wyjściowych niezbędnych do dalszych etapów analizy. Dane te mogą dotyczyć:

- identyfikacji cech konstrukcyjnych pojazdu,
- oszacowania trwałości pojazdu,
- identyfikacji warunków, czasu i intensywności eksploatacji pojazdu (czas pracy silnika spalinowego, praca przewozowa wykonana w ciągu roku itp.),
- wymagań wynikających z dokumentacji utrzymania pojazdu (czas pracy pomiędzy obsługami profilaktycznymi, oczekiwany czas trwania obsługi itp.).



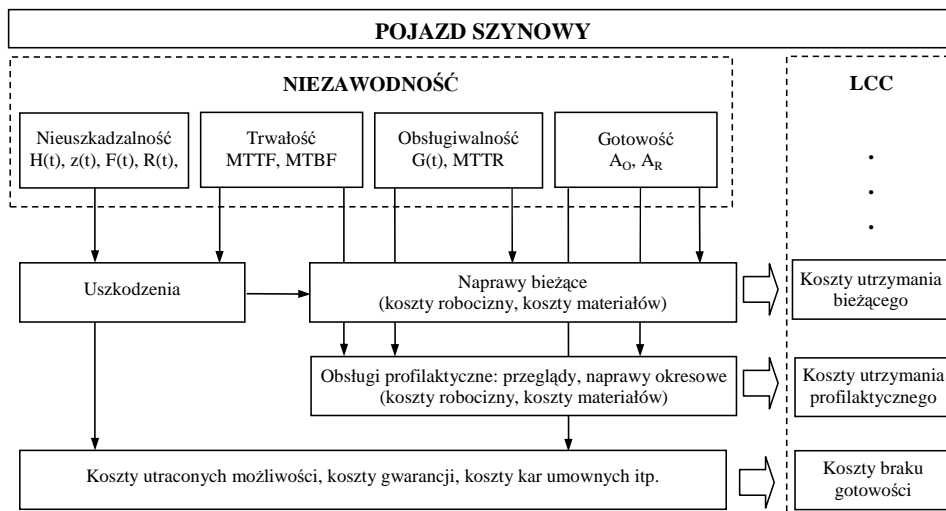
Rys.4. Procedura kalkulacji LCC dla środków transportu szynowego

Etap 2 to przeprowadzenie analizy niezawodnościowej pojazdu, określanej w literaturze jako analiza RAM (reliability, availability, maintainability – z ang. niezawodność, gotowość, obsługiwalność). Według wymagań normy PN-EN 60300-3-3 ocena niezawodnościowa obiektu technicznego powinna być integralną częścią procesu kalkulacji LCC. Wskaźniki pozwalające na ilościowy opis niezawodności, jak również sposoby przeprowadzenia badań niezawodnościowych można znaleźć w obszernej literaturze z tej dziedziny np.: [11, 12]. Wybór wskaźników niezawodnościowych zależy od stopnia szczegółowości i celu analizy. Przykładowe wskaźniki stosowane dla środków transportu szynowego to:

- funkcja odnowy $H(t)$,
- intensywność uszkodzeń $z(t)$,

- oczekiwany czas do uszkodzenia MTTF,
- oczekiwany czas między uszkodzeniami MTBF,
- gotowość techniczna A,
- oczekiwany czas naprawy MTR,
- oczekiwany czas do odnowy MTTR.

Niezawodność pojazdu obejmująca takie cechy jak: nieuszkodzalność, trwałość, obsługiwalność i gotowość techniczną stanowi podstawę do budowy modelu kosztu (rys. 5). Jak wykazują analizy, własności niezawodnościowe mają największy wpływ na koszty obsługi i utrzymania. W większości opracowań dotyczących tego zagadnienia straty wywołane zawodnością pojazdu traktuje się jako wielkość zdeterminowaną i określoną kosztami postoju i ewentualnie kosztami jego napraw. W rzeczywistości powstają również straty związane z bezpośrednim skutkiem niezdatności, wynikłe na przykład z utraty korzyści powstających w okresie sprawności pojazdu, koszty związane z utratą renomy i prestiżu firmy lub utraty klientów. Zależności między niezawodnością, kosztami a efektami ekonomicznymi pojazdu szynowego nie są łatwe do zidentyfikowania. Ich poznanie daje jednak możliwości porównywania efektywności obiektów o różnej niezawodności. Jest to jedna z zalet, jaką posiada analiza LCC w stosunku do tradycyjnych ekonomicznych metod oceny efektywności.



Rys.5. Związek pomiędzy LCC, a niezawodnością pojazdu szynowego (na podst. [2])

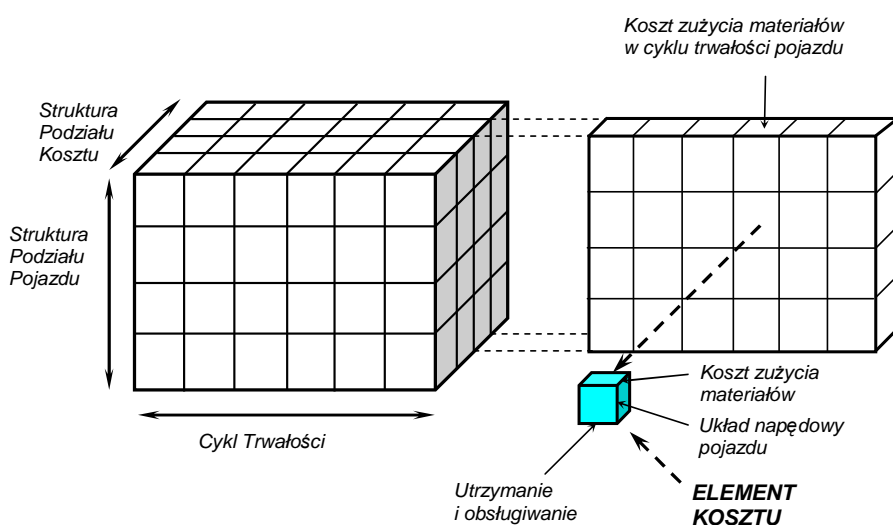
Model LCC opracowywany w ramach etapu 3, podobnie jak każdy inny model, jest uproszczoną prezentacją rzeczywistości. Wyodrębnia on cechy i aspekty pojazdu, i przekształca je w liczby odnoszące się do kosztów. W celu uzyskania realistyczności modelu zaleca się, aby odzwierciedlał on charakterystykę analizowanego pojazdu, włączając w to przewidywane scenariusze użytkowania, koncepcje obsługi i utrzymania oraz

wszystkie pozostałe założenia zdefiniowane w etapie 1 i 2. 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.

Tworzenie modelu kosztu obejmuje [2]:

- strukturę podziału kosztu,
- strukturę podziału pojazdu,
- oszacowanie elementów i parametrów kosztów.

Jednym z najważniejszych zadań w modelowaniu LCC jest definicja struktury podziału kosztu, która polega na dekompozycji kategorii kosztów na najwyższym poziomie: kosztów nabycia, kosztów posiadania i kosztów likwidacji na koszty składowe. Zgodnie z normą PN-EN 60300-3-3 każda kategoria kosztu powinna zostać podzielona aż do osiągnięcia najniższego poziomu tzw. elementu kosztu [2]. Element kosztu jest to taka wartość, której nie można wyrazić jako sumę innych kosztów. Jest on definiowany za pomocą matematycznych formuł zawierających funkcje, wartości stałe oraz parametry np.: intensywność uszkodzeń, koszt roboczogodziny przy naprawach i przeglądach okresowych, pracochłonność obsługi technicznych, stopę dyskontową i inne. Jeden ze sposobów podejścia, stosowany do określenia wymaganych elementów kosztu, polega na wyodrębnieniu niższych poziomów identyfikacji związanych z podziałem struktury pojazdu, kategoriami kosztu i fazami cyklu trwałości. To podejście najlepiej zilustrować trójwymiarową macierzą przedstawioną na rysunku 6.



Rys.6. Koncepcja elementu kosztu (na podst. [2])

Takie podejście ma tę zaletę, że jest usystematyzowane i uporządkowane, a zatem dające wysoki poziom ufności, że wszystkie elementy kosztu mające duże znaczenie w modelu LCC zostały uwzględnione. Koncepcję definiowania elementów kosztu w wielowymiarowej macierzy zaproponowano 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 wykonywana w ramach etapu 4 dotyczy:

- obliczenia wszystkich elementów kosztu włączonych do modelu,
- identyfikacji kosztów dominujących w LCC.

Dodatkowo na tym etapie proponuje się przeprowadzenie analizy wrażliwości w celu zbadania wpływu zmian parametrów i elementów kosztu na LCC. W pierwszej kolejności powinna ona obejmować koszty dominujące oraz parametry niezawodnościowe np.: średnią liczbę uszkodzeń, czas trwania obsługi technicznych itp.

Etap 5 w proponowanej procedurze to przegląd oraz prezentacja wyników. Przegląd, który ma na celu potwierdzenie prawidłowości i spójności wyników oraz wniosków obejmuje [2]:

- 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 oraz że uwzględniono wszystkie niezbędne elementy kosztu.

W przypadku, gdy stwierdzono, że utworzony model zawiera jakiekolwiek błędy, wówczas zachodzi konieczność poprawy i uzupełnienia wstępnej koncepcji. Prezentacja wyników powinna zawierać czytelne zestawienie rezultatów uzyskanych z przeprowadzonej kalkulacji.

Na etapie 6 wykonywana jest weryfikacja utworzonego modelu i samej analizy. Weryfikacja możliwa jest wyłącznie na podstawie rzeczywistej eksploatacji pojazdu w określonym przedziale czasu, podczas której gromadzone są dane eksploatacyjne dotyczące:

- nieuszkodzalności i trwałości pojazdu,
- czasu trwania napraw bieżących i obsługi profilaktycznych,
- pracochłonności i zużycia materiałów w naprawach bieżących oraz obsługach profilaktycznych,
- zużycia energii elektrycznej lub paliwa,
- zużycia materiałów eksploatacyjnych i inne.

Na podstawie zgromadzonych danych eksploatacyjnych następuje ocena poprawności i dokładności wykonanych obliczeń kosztów zdefiniowanych w modelu LCC. Stanowi to podstawę do ewentualnych roszczeń i kar umownych w stosunku do dostawcy pojazdu.

4. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA

Analiza LCC od wielu lat jest wykorzystywana w Instytucie Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej w pracach badawczych wykonywanych dla firm i przewoźników kolejowych. Ze względu na wymagania, co do objętości artykułu, przykład zastosowania analizy LCC dla zmodernizowanej spalinowej lokomotywy serii SM42 został przedstawiony w drugim artykule autora pt: *Ocena efektywności modernizacji lokomotywy serii SM42 w oparciu o analizę LCC*.

5. PODSUMOWANIE

Na decyzję klienta o zakupie lub modernizacji środków transportu szynowego ma wpływ nie tylko koszt początkowy związany z nakładami inwestycyjnymi na zakup pojazdu lub nowych zespołów, elementów i wykonaniem zmian konstrukcyjnych, lecz także oczekiwany koszt użytkowania i obsługi w całym cyklu trwałości. Analiza LCC z powodzeniem może być stosowana do oceny efektywności różnych wariantów nabycia środków transportu szynowego, zarówno pojazdów trakcyjnych jak i wagonów pasażerskich lub towarowych. Dostarcza ona kompleksowej i czytelnej informacji wyrażonych w kosztach o możliwych konsekwencjach w analizowanych wariantach. W przeciwieństwie do ekonomicznych metod oceny efektywności analiza LCC uwzględnia koszty całkowite generowane w okresie trwałości i własności niezawodnościowe pojazdu.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] MIL-HDBK-259 *Military Handbook. Life Cycle Cost in Navy Acquisitions, Global Engineering Documents*, 1983.
- [2] PN-EN 60300-3-3:2006 *Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań - Szacowanie kosztu cyklu życia*.
- [3] *Analiza uwarunkowań i efektywności modernizacji manewrowych lokomotyw spalinowych serii SM42 eksploatowanych przez KOLPREM Sp. z o.o. na bocznicę Ispat Polska Stal S.A. oddział w Dąbrowie Górniczej*. Projekt badawczy nr EU-1602 (M-8/694/2004), Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2005.
- [4] *Modernizacja lokomotywy spalinowej serii SP32. Studium wykonalności*. Projekt badawczy nr NB-4/2008 (M-8/30/2008), Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, marzec 2008.
- [5] *Ocena efektywności modernizacji liniowych lokomotyw spalinowych serii ST44*. Projekt badawczy nr M-8/618/2004, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków 2005 r.
- [6] *Strategia odnowy parku lokomotyw w przedsiębiorstwie PKP LHS Sp. z o.o.*. Projekt badawczy nr EU-1636 (M-8/599/2007), Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2007.
- [7] *Studium techniczno-ekonomiczne odnowy parku pojazdów trakcyjnych eksploatowanych przez PKP Cargo S.A. Etap I, III i IV*. Projekt badawczy nr EU-1622 (M-8/631/2006), Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2006.
- [8] *Analiza LCC Elektrycznego Zespołu Trakcyjnego 19WE*. Projekt badawczy nr M-8/20/2009, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2009.
- [9] Durairaj S.K., Ong S.K., Nee A.Y.C., Tan R.B.H.: *Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies*. Corporate Environmental Strategy, Vol. 9, No. 1 2002.
- [10] Durairaj S.K., Ong S.K., Nee A.Y.C., Tan R.B.H.: *Tool to incorporate Environmental Costs into Life Cycle Assessment*, Environmentally Conscious Manufacturing Conference, USA Boston, November 2000.
- [11] Barringer H. P.: *A Life Cycle Cost Summary*, International Conference of Maintenance Societies, Perth, Australia 2003.
- [12] AS/NZS 4536:1999 *Life cycle costing - An application guide*.

-
- [13] ASTM E917-05 *Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Buildings and Building Systems*.
 - [14] SAE ARP 4293 *Life Cycle Cost - Techniques and Applications*.
 - [15] SAE ARP 4299 *Data formats and Practices for the LCC of Aircraft propulsion systems*.
 - [16] Adamkiewicz W., Hempel L., Podsiadło A., Śliwiński R.: *Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym*, WKiŁ, 1983.
 - [17] Oprzędkiewicz J.: *Wspomaganie komputerowe w niezawodności maszyn*, WNT, Warszawa, 1993.