

Maciej Szkoda

Ocena efektywności ekonomicznej środków transportu szynowego z zastosowaniem analizy LCC

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, jak również 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 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.

Geneza i koncepcja analizy LCC

Początki analizy LCC sięgają końca lat 60. XX w. 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 80. XX w. 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, między innymi w branży lotniczej, energetyce, w branży naftowej, chemicznej oraz w transporcie i budownictwie. Obecnie zastosowanie analizy LCC jako narzędzia decyzyjnego, służącego do oceny alternatywnych rozwiązań jest bardzo szerokie. W obszarze transportu kolejowego jako przykłady zastosowań można wymienić [2]:

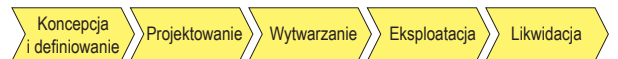
- zakup szybkich pociągów X2000 na kolejach szwedzkich;
- optymalizacja strategii utrzymania pojazdów szynowych na kolejach szwedzkich;
- budowa linii kolei magnetycznej Transrapid w Chinach;
- konstrukcje autobusów szynowych typu RegioSprinter firmy Siemens, 214M Partner firmy PESA Bydgoszcz;
- projekty dotyczące modernizacji pojazdów trakcyjnych;

- projekty dotyczące linii kolejowej w zakresie wdrożenia nowego typu szyn kolejowych, 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 Szybka Kolej Miejska Sp. z o.o. w Warszawie.

Ogólne warunki przeprowadzenia analizy LCC precyzowane są w wielu międzynarodowych normach, w tym obowiązującej w Polsce normie PN-EN 60300-3-3:2006 *Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań - Szacowanie kosztu cyklu życia*. Według 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. 1. Fazy cyklu trwałości według normy PN-EN 60300-3-3

Łączne koszty (LCC) ponoszone w wymienionych fazach można podzielić na koszty nabycia, koszty posiadania i koszty likwidacji [3]:

$$LCC = K_N + K_P + K_L$$

gdzie:

LCC – koszt cyklu trwałości,

K_N – koszty nabycia,

K_P – koszty posiadania,

K_L – koszty likwidacji.

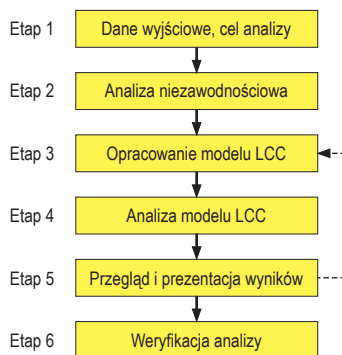
Koszty nabycia ponoszone są w pierwszych fazach cyklu trwałości. Związane są z nakładami inwestycyjnymi niezbędnymi do pozyskania i wprowadzenia pojazdu do eksploatacji. Koszty nabycia są elementem, który można łatwo obliczyć w kalkulacji LCC, ale jak dowodzą prace badawcze, np. [4, 5, 6, 7, 8], bardzo często stanowią tylko przystawki wierzchołków góry lodowej.

Koszty posiadania związane z okresem eksploatacji pojazdu ponoszone są w trzech ostatnich fazach, nie są one łatwo dostępalne 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. 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% [4, 7, 8].

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.

Metoda kalkulacji LCC

Na podstawie proponowanych w literaturze i w normach metod wykonania analizy LCC można zaproponować uniwersalną procedurę oceny efektywności środków transportu szynowego. Procedura ta składa się z sześciu etapów (rys. 2).



Rys. 2. Procedura kalkulacji LCC dla środków transportu szynowego

Etap 1 w proponowanej metodzie to opracowanie założeń, przygotowanie danych wyjściowych i określenie celów, jakie analiza ma dostarczyć. Dane wyjściowe dotyczą:

- 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 między obsługami profilaktycznymi, oczekiwany czas trwania obsługi itp.).

Do przykładowych celów analizy LCC można zaliczyć:

- ocenę porównawczą kosztów całkowitych lub kosztów generowanych w fazie eksploatacji pojazdu,
- identyfikację kosztów dominujących,
- określenie elementów i parametrów kosztów mających największy wpływ na LCC.

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 [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.

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, wynikiem 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.

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 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, uaktualnienie i modyfikacje. Powinien być zaprojektowany w taki sposób, aby pozwalał na ocenę specyficznych elementów LCC niezależnie od innych. Tworzenie modelu kosztu obejmuje:

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

Jednym z ważniejszych 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 [3]. 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. 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 i prezentacja wyników. Przegląd, który ma na celu potwierdzenie prawidłowości wyników oraz wniosków obejmuje:

- 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 jakiegokolwiek 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.

Przykład zastosowania analizy LCC

W ostatnich latach ze strony przewoźników kolejowych obserwuje się duże zainteresowanie modernizacją lokomotyw spalinowych. Zostały wykonane lub są w trakcie wykonywania modernizacje lokomotyw liniowych serii: ST44, SU45, SU46, SP32 oraz lokomotyw manewrowych: SM48 i SM42. W niniejszym artykule jako przykład zastosowania analizy LCC przedstawiono fragment oceny efektywności modernizacji lokomotywy spalinowej serii SM42. Ocena ta została przeprowadzona w ramach prac badawczych wykonanych w Instytucie Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej w latach 2007 i 2011 [8, 18]. Do analizy przyjęto dwa warianty:

- **SM42 6D** – niezmodernizowana lokomotywa serii SM42 z silnikiem HCP a8C22,
- **SM42 6Dg/A** – zmodernizowana dla potrzeb PKP Cargo S.A. lokomotywa SM42 w wersji 6Dg/A z silnikiem Caterpillar C27.

Modernizacja lokomotywy SM42 w wersji 6Dg/A

W 2007 r. spółka akcyjna NEWAG wykonała na potrzeby przedsiębiorstwa ISD Huta Częstochowa Sp. z o.o. prototypową modernizację lokomotywy spalinowej serii SM42. Lokomotywa po modernizacji została oznaczona symbolem 6Dg. W 2009 r. podczas targów TRAKO w Gdańsku została zaprezentowana lokomotywa SM42-1501, zmodernizowana dla PKP Cargo S.A., którą oznaczono symbolem 6Dg/A (fot. 1).

Dotychczasowy silnik zastąpiono nowym, 12-cylindrowym, wysokoprężnym silnikiem spalinowym firmy CATERPILLAR model C27 o mocy 653 kW, a od końca 2010 r. – o mocy 708 kW, spełniający normy emisji spalin według dyrektywy 2004/26/WE. Na lokomotywie zabudowano zespół prądnic synchronicznych, składający się z prądnicy głównej i prądnicy pomocniczej. W obwodach pomocniczych zainstalowano falowniki do regulacji silników elektrycznych i napędów urządzeń pomocniczych lokomotywy. Zmodernizowana lokomotywa ma przekładnię elektryczną AC–DC (prąd przemienny–prąd stały) [8, 13].

Układy wspomagające pracę silnika, tj. układ: chłodzenia, zasilania, wydechowy, mikroprocesorowy układ sterowania i rozwiązania konstrukcyjne połączenia silnika z prądnicą oraz zabudowy zespołu prądotwórczego na ramie lokomotywy zostały w całości zaprojektowane i wykonane po raz pierwszy w wersji z silnikiem C27. Nowoczesna bryła lokomotywy odpowiada współczesnym wymaganiom ergonomii i bezpieczeństwa. Kabina maszynisty została poddana kompleksowej modernizacji wraz ze zwiększeniem jej powierzchni użytkowej. W kabinie zabudowano dwa ergonomiczne pulpity sterownicze z fotelami maszynisty. Na pulpicie zamontowano monitor, na którym wyświetlane są parametry pracy lokomotywy, co umożliwia ich stałe monitorowanie. Nowa kabina spełnia warunki ergonomii i wysokiego komfortu pracy. W wyniku dokonanej modernizacji powstała pierwsza zarówno na rynku polskim, jak i europejskim lokomotywa z silnikiem spalinowym nowej generacji, spełniającym aktualne normy emisji spalin według dyrektywy 2004/26/WE. Szczegółowy zakres modernizacji i parametry techniczne lokomotywy opisane są

pracach [8, 13]. Obecnie w czynnej eksploatacji znajduje się około 40 zmodernizowanych lokomotyw SM42 w wersji 6Dg i 6Dg/A.

Analiza LCC lokomotywy SM42 w wersji 6Dg/A

Do oceny efektywności modernizacji lokomotywy SM42 zastosowano analizę kosztu cyklu trwałości (analizę LCC). Analiza została przeprowadzona zgodnie z zaleceniami międzynarodowej normy PN-EN 60300-3-3:2006 *Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań – Szacowanie Kosztu Cyklu Życia*. Jako miarę efektywności przyjęto koszt cyklu trwałości (LCC) obliczony w 25-letnim okresie eksploatacji lokomotywy.

Założenia wstępne i cel analizy

Przyjęto założenie, że analiza ma charakter porównawczy, polegający na porównaniu efektów ekonomicznych uzyskiwanych przy eksploatacji lokomotywy przed modernizacją do efektów uzyskiwanych po jej modernizacji. W pierwszym etapie analizy przygotowano obszerny zbiór danych wyjściowych dla lokomotywy niezmodernizowanej, jak i zmodernizowanej.

Dane wyjściowe dotyczące lokomotywy niezmodernizowanej:

- rozkład obciążenia lokomotywy dla rzeczywistych warunków eksploatacji;
- rzeczywiste zużycie paliwa i oleju silnikowego;
- czas pracy, przebieg, praca przewozowa w ciągu roku;
- okresowość, pracochłonność i koszty obsługi profilaktycznych wynikających z cyklu utrzymania;
- parametry niezawodnościowe: $H(t)$, MTTF, MTBFn, $F_n(t)$, MTTR, A.

Dane wyjściowe dotyczące lokomotywy zmodernizowanej:

- specyfikacje techniczne i charakterystyki dla nowego silnika spalinowego,
- zakres, okresowość obsługi technicznych dla nowych układów i podzespołów,
- nowy cykl utrzymania dla prototypowej lokomotywy.

Na podstawie danych eksploatacyjnych parku lokomotyw serii SM42, zebranych w latach 2007–2010 w przedsiębiorstwie PKP Cargo S.A., określono harmonogram obciążenia silnika spalinowego oraz określono następujące wskaźniki eksploatacyjne, stanowiące podstawę do kolejnych etapów analizy:

- średni czas pracy silnika spalinowego – 5000 [mth/rok],
- średni przebieg lokomotywy – 42 000 [km/rok],
- średnie zużycie paliwa – 72 696,0 [kg/rok],
- średnie zużycie oleju silnikowego – 447,6 [kg/rok], tj. 0,62% zużycia paliwa.

Opracowanie modelu LCC

Ze względu na porównawczy charakter analizy dla przyjętych wariantów opracowano wspólny model kosztu, w którym LCC wyrażono następującą formułą:

$$LCC = K_N + K_P$$

gdzie:

LCC – koszt cyklu trwałości,

K_N – koszty nabycia,

K_P – koszty posiadania.

Koszty nabycia K_N w wariantcie bazowym (wariant SM42 6D) stanowią koszty naprawy głównej. Dla zmodernizowanej lokomo-



Fot. 1. Zmodernizowana lokomotywa SM42

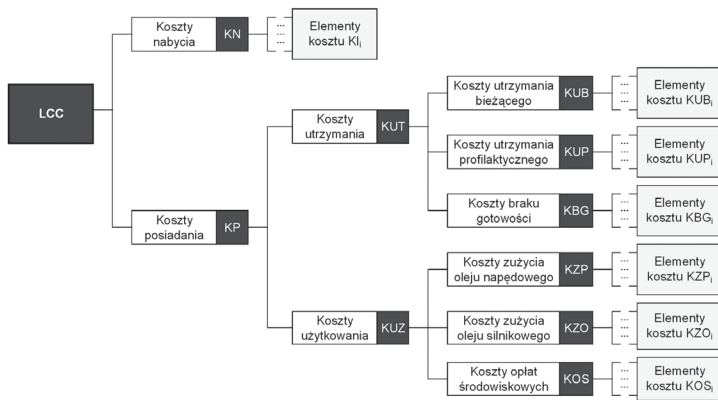
Fot. M. Górowski

a) w wersji 6Dg dla ISD Huta Częstochowa, b) w wersji 6Dg/A dla PKP Cargo

tywy SM42 (wariant SM42 6Dg/A) koszty nabycia stanowią łączne wydatki na modernizację, uwzględniające między innymi następujące koszty: dokumentacji, dopuszczenia do eksploatacji, zakupu i dostawy silnika spalinowego, niezbędnych podzespołów i elementów oraz robocizny. Założono, że modernizacja lokomotywy SM42 będzie przeprowadzona w ramach naprawy głównej pojazdu. Koszty posiadania KP to koszty związane z eksploatacją lokomotywy, czyli utrzymaniem i użytkowaniem. Stanowią je koszty zużycia paliwa, oleju silnikowego, utrzymania bieżącego, utrzymania profilaktycznego i inne. Strukturę kosztów, która została przyjęta w modelu LCC przedstawiono na rysunku 3.

W zastosowanym modelu zdefiniowano 10 elementów kosztów, wykorzystując 26 parametrów i funkcji. Wycenę elementów kosztu przeprowadzono z zastosowaniem inżynierskiej metody szacowania kosztu na podstawie cen stałych (netto) z poziomu 2011 r. Analizę LCC wykonano na niezdyktowanych wartościach kosztów.

Jednym z elementów kosztu w zastosowanym modelu były koszty utrzymania bieżącego (KUB) związane z naprawami bieżącymi lokomotywy. KUB uwzględniają zarówno koszty robocizny, jak również koszty materiałów i części zamiennych. Do wyznaczenia KUB wykorzystano funkcję odnowy $H(t)$, wyznaczoną w ra-



Rys. 3. Struktura kosztów zdefiniowana w modelu LCC [13]

mach analizy niezawodnościowej, która wyraża oczekiwaną liczbę uszkodzeń do chwili t . Koszty utrzymania bieżącego lokomotywy w analizowanych wariantach wyrażono następującą formułą:

$$KUB = [H(t_i) - H(t_{i-1})] \cdot [(MMH \cdot CPH) + ACM] \text{ [zł/rok]}$$

gdzie:

- $H(t_i)$ – wartość funkcji odnowy w i -tym roku eksploatacji,
- MMH – średnia pracochłonność naprawy bieżącej,
- CPH – koszt roboczogodziny przy naprawie bieżącej,
- ACM – średni koszt zużycia materiałów w naprawie bieżącej.

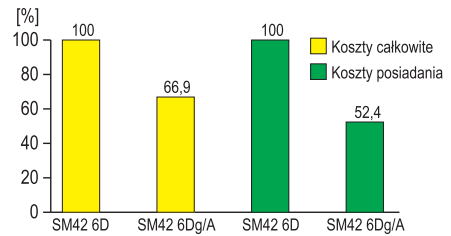
Koszty utrzymania profilaktycznego KUP stanowią wydatki na naprawy i przeglądy okresowe wynikające z cyklu utrzymania lokomotywy. Koszty braku gotowości KBG to suma kosztów będących konsekwencją znajdowania się lokomotywy w stanie niemożliwym do wykonania przewidzianych do realizacji zadań. Do kosztów braku gotowości zalicza się np. koszty: kar umownych, gwarancji, utraconych możliwości i inne. W definicji KBG wykorzystywany jest wskaźnik gotowości technicznej A , wyznaczony w ramach analizy niezawodnościowej. Koszty zużycia oleju napędowego KZP i oleju silnikowego KZO obliczono na podstawie charakterystyk uniwersalnych silników HCP a8C22 i CAT C27 oraz danych eksploatacyjnych zgromadzonych przez PKP Cargo SA.

Koszty opłat środowiskowych KOS związane są z opłatami ustalonymi przez Ministerstwo Środowiska za emisję szkodliwych składników zawartych w spalinach. Wysokość kosztów opłat środowiskowych zależy od wskaźników publikowanych przez ministerstwo i zużycia paliwa przez lokomotywę.

Analiza modelu LCC i prezentacja wyników

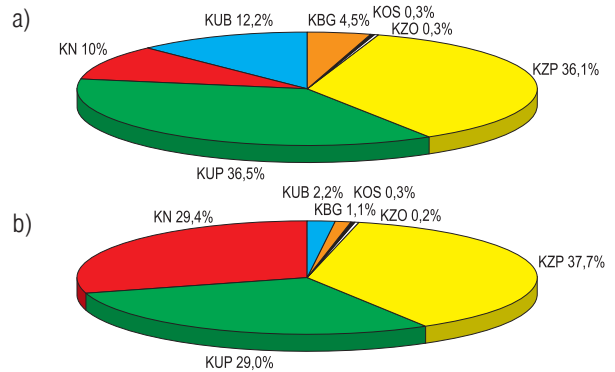
Analiza modelu kosztu wykazała, że proponowany wariant modernizacji lokomotywy SM42 w wersji 6Dg/A jest w pełni uzasadniony ekonomicznie. Z obliczeń przeprowadzonych przy zastosowaniu oprogramowania CATLOC wynika, że modernizacja lokomotywy zapewnia bardzo wysokie oszczędności w kosztach całkowitych – blisko 6,0 mln zł, tj. 33,1% mniej w porównaniu do lokomotywy niezmodernizowanej [13]. Według pierwszych analiz wykonanych 2007 r. przed powstaniem prototypu lokomotywy oszczędności szacowane były na poziomie 35,9% [8].

Porównanie kosztów całkowitych LCC w 25-letnim okresie dla analizowanych wariantów przedstawiono na rysunku 4. Bardzo duże oszczędności uzyskuje się w kosztach eksploatacji zmodernizowanej lokomotywy SM42 6Dg/A. Koszty te są aż o 47,6% mniejsze w porównaniu do lokomotywy niezmodernizowanej.



Rys. 4. Porównanie kosztów LCC [13]

Dla niezmodernizowanej lokomotywy SM42 kosztami dominującymi są koszty zużycia paliwa KZP – 34,8% oraz koszty utrzymania profilaktycznego 37,5%. Koszty napraw bieżących oraz braku gotowości stanowią 16,9% kosztów całkowitych (rys. 5a).



Rys. 5. Koszty dominujące w LCC [13]

a) wariant SM42 6D, b) wariant SM42 6Dg/A

KZP – koszty zużycia paliwa, KUP – koszty utrzymania profilaktycznego, KN – koszty nabycia, KUB – koszty utrzymania bieżącego, KBG – koszty braku gotowości, KOS – koszty opłat środowiskowych, KZO – koszty zużycia oleju silnikowego

Dla zmodernizowanej lokomotywy SM42 6Dg/A znaczące obniżenie kosztów generowanych w cyklu trwałości otrzymano dzięki zwiększeniu niezawodności, gotowości i dostępności części zamiennych. Przekłada się to na redukcję nakładów na utrzymanie bieżące oraz niższe koszty obsługi profilaktycznych pojazdów (przeglądy, naprawy okresowe). Koszty utrzymania profilaktycznego (KUP) lokomotywy zmodernizowanej stanowią 29,0% kosztów ogółem, a utrzymania bieżącego (KUB) niewiele ponad 2,2%. Największy udział w LCC mają koszty zużycia paliwa (KZP) 37,7% (rys. 5b).

Największe oszczędności w ujęciu wartościowym w stosunku do lokomotywy niezmodernizowanej dotyczą kosztów zużycia oleju napędowego i kosztów oleju silnikowego. Oszczędności te są uzależnione od warunków eksploatacji lokomotywy, która wykonuje w przedsiębiorstwie PKP Cargo bardzo zróżnicowaną pracę, tj. od lekkiej pracy manewrowej ze składami pasażerskimi do ciężkiej pracy na górcie rozrządowej ze składami towarowymi. Według obliczeń oszczędności w zużyciu paliwa powinny wynosić 22–35%, a w zużyciu oleju silnikowego do 57,1%. Biorąc pod uwagę aktualną tendencję wzrostu cen paliw, w planowaniu długookresowym ma to ogromne znaczenie.

W przeprowadzonej analizie wykazano, że modernizacja lokomotywy spalinowej serii SM42 w wersji 6Dg/A zapewnia znaczące oszczędności w kosztach eksploatacji w stosunku do lokomotywy niezmodernizowanej. W tabeli 1 zestawiono średni poziom oszczędności w ujęciu rocznym dla wybranych kategorii kosztów zmodernizowanej lokomotywy SM42 w wersji 6Dg/A [8].

Tabela 1

Poziom oszczędności w ujęciu rocznym dla zmodernizowanej lokomotywy SM42 [8]

| Kategoria kosztu | Poziom oszczędności |
|--|---------------------|
| Koszty utrzymania profilaktycznego KUP | 59,4% |
| Koszty utrzymania bieżącego KUB | 87,7% |
| Koszty zużycia oleju napędowego KZP | 22,0–35% |
| Koszty zużycia oleju silnikowego KZO | 57,1% |
| Koszty braku gotowości KBG | 83,8% |
| Koszty opłat środowiskowych KOS | 34,0% |

Weryfikacja analizy

Do weryfikacji analizy wykorzystano dane eksploatacyjne dla lokomotyw zmodernizowanych, zgromadzone w latach 2007–2011 podczas eksploatacji nadzorowanej, prowadzonej przez ISD Huta Częstochowa Sp. z o.o. oraz PKP Cargo S.A.. Zgromadzone dane dotyczą:

- zużycia paliwa i materiałów eksploatacyjnych,
- uszkodzeń lokomotywy i ich przyczyn,
- pracochłonności i zużycia materiałów w przeglądach okresowych lokomotywy.

Na podstawie danych eksploatacyjnych stwierdzono, że średnie zużycie paliwa przez zmodernizowaną lokomotywę SM42, w zależności od warunków eksploatacji, zawiera się w granicach 7,6–9,3 kg/mth. Zużycie paliwa przez niezmodernizowane lokomotywy w tych samych warunkach eksploatacyjnych wynosiło 9,7–13,3 kg/mth. Eksploatacja nadzorowana wykazała, że oszczędności w zużyciu paliwa wynoszą średnio 30,2%, a w zużyciu oleju silnikowego 57,8% [13].

Analiza wszystkich zebranych danych eksploatacyjnych umożliwiła obliczenie i porównanie pozostałych kategorii kosztów uwzględnionych w modelu LCC (tab. 2).

Tabela 2

Poziom oszczędności dla zmodernizowanej lokomotywy SM42 na podstawie danych eksploatacyjnych [13]

| Kategoria kosztu | Poziom oszczędności |
|--|---------------------|
| Koszty utrzymania profilaktycznego KUP | 53,2% |
| Koszty utrzymania bieżącego KUB | 87,7% |
| Koszty zużycia oleju napędowego KZP | 30,2% |
| Koszty zużycia oleju silnikowego KZO | 57,8% |
| Koszty braku gotowości KBG | 83,8% |
| Koszty opłat środowiskowych KOS | 30,2% |

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 obsługiwanego 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.

W przedstawionym przykładzie zastosowania analizy LCC bazą danych wyjściowych do oceny efektywności modernizacji lokomotywy SM42 została oparta na aktualnych kosztach utrzymania profilaktycznego i bieżącego, cenach oleju napędowego i silnikowego. Dane dotyczące poziomu zużycia paliwa zostały wykorzystane w stanie rzeczywistym i uwzględniały zróżnicowany rodzaj pracy lokomotywy. W przeprowadzonej ocenie efektywności wykazano, że modernizacja lokomotywy spalinowej serii SM42 w wersji 6Dg/A zapewnia istotne oszczędności w kosztach eksploatacji w stosunku do pojazdu niezmodernizowanego. W okresie 25 lat użytkowania pojazdu oszczędności te mogą wynosić około 6,0 mln zł dla jednej lokomotywy.



Literatura

- [1] MIL-HDBK-259 Military Handbook. *Life Cycle Cost in Navy Acquisitions*. Global Engineering Documents, 1983.
- [2] Tutecki A., Szkoda M.: *Koszt cyklu trwałości LCC jako model decyzyjny modernizacji pojazdów szynowych*. XVII Konferencja Naukowa POJAZDY SZYNOWE, Kazimierz Dolny, 2006.
- [3] PN-EN 60300-3-3:2006 *Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań - Szacowanie kosztu cyklu życia*.
- [4] *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 M-8/694/2004, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2005.
- [5] *Modernizacja lokomotywy spalinowej serii SP32. Studium wykonalności*. Projekt badawczy nr M-8/30/2008, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2008.
- [6] *Ocena efektywności modernizacji liniowych lokomotyw spalinowych serii ST44*. Projekt badawczy nr M-8/618/2004, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków 2005.
- [7] *Strategia odnowy parku lokomotyw w przedsiębiorstwie PKP LHS Sp. z o.o.* Projekt badawczy nr M-8/599/2007, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2007.
- [8] *Studium techniczno-ekonomiczne odnowy parku pojazdów trakcyjnych eksploatowanych przez PKP Cargo S.A.* Projekt badawczy nr M-8/631/2006, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2006.
- [9] *Analiza LCC Elektrycznego Zespołu Trakcyjnego typu 19WE*. Projekt badawczy nr M-8/20/2009, Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2009.
- [10] Adamkiewicz W., Hempel L., Podsiadło A., Śliwiński R.: *Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym*. WKiŁ, 1983.
- [11] Oprzędkiewicz J.: *Wspomaganie komputerowe w niezawodności maszyny*. WNT, Warszawa, 1993.
- [12] *Weryfikacja oceny efektywności modernizacji lokomotywy serii SM42 w wersji 6Dg/A*. Projekt badawczy nr M8/76/2011/1, Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2011.

Prezentowane wyniki badań, zrealizowane w ramach tematu nr M-8/473/DS-M/2011, zostały sfinansowane z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

dr inż. Maciej Szkoda
Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych