

Maciej SZKODA<sup>1</sup>

## **OCENA EFEKTYWNOŚCI MODERNIZACJI LOKOMOTYWY SERII SM42 W OPARCIU O ANALIZĘ LCC**

*W artykule przedstawiono ocenę efektywności modernizacji lokomotywy spalinowej serii SM42 w oparciu o analizę LCC. Analiza miała na celu określenie wymiernych efektów ekonomicznych wyrażonych w kosztach generowanych przez lokomotywę zmodernizowaną w porównaniu do lokomotywy niezmodernizowanej w 25-letnim okresie eksploatacji.*

## **EFFECTIVENESS EVALUATION OF LOCOMOTIVE SM42 MODERNIZATION BASED ON LCC ANALYSIS**

*The article presents effectiveness evaluation of locomotive SM42 modernization based on LCC analysis. The aim of the analysis was to determine measurable economical effects expressed in costs which are being generated by a modernized locomotive in comparison to a non-modernized one within 25 years period of exploitation.*

### **1. WSTĘP**

Wśród przedsięwzięć zmierzających do podwyższenia efektywności transportu kolejowego istotną rolę spełniają działania w zakresie obniżenia kosztów eksploatacji i utrzymania pojazdów trakcyjnych. Drogą do osiągnięcia tego celu jest modernizacja lokomotyw spalinowych, dodatkowo uwzględniająca uwarunkowania w zakresie emisji spalin i hałasu. Podstawowe założenia modernizacji lokomotyw to [1, 2]:

- poprawa efektywności eksploatacji przez zmniejszenie zużycia paliwa i materiałów eksploatacyjnych,
- zwiększenie przebiegów międzynaoprawczych,
- dostosowanie parametrów techniczno-eksploatacyjnych do wymagań przepisów międzynarodowych,
- poprawa wskaźników oddziaływania na środowisko naturalne,
- poprawa warunków pracy maszynisty lokomotywy,
- wprowadzenie nowoczesnych systemów sterowania.

W ostatnich latach ze strony przewoźników kolejowych obserwuje się duże zainteresowanie modernizacją lokomotyw spalinowych. Zostały wykonane lub są w trakcie

---

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

wykonywania modernizacji lokomotyw liniowych serii: ST44, SU45, SU46, SP32 oraz lokomotyw manewrowych: SM48 i SM42.

Przedmiotem artykułu jest ocena efektywności modernizacji manewrowej lokomotywy spalinowej serii SM42. Ocena ta została przeprowadzona w ramach prac badawczych wykonanych w Instytucie Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej w latach 2007 i 2010 [3, 4]. Do wykonania oceny efektywności zastosowano analizę kosztu cyklu trwałości (Life Cycle Cost Analysis) oraz analizę korzyści-kosztów (Cost-Benefit Analysis). Szczegółowy opis zastosowanych metod analitycznych zawarty jest m. in. w pracach [5, 6, 7, 8]. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane aspekty oceny efektywności modernizacji lokomotywy SM42 uzyskane wyłącznie w ramach analizy LCC.

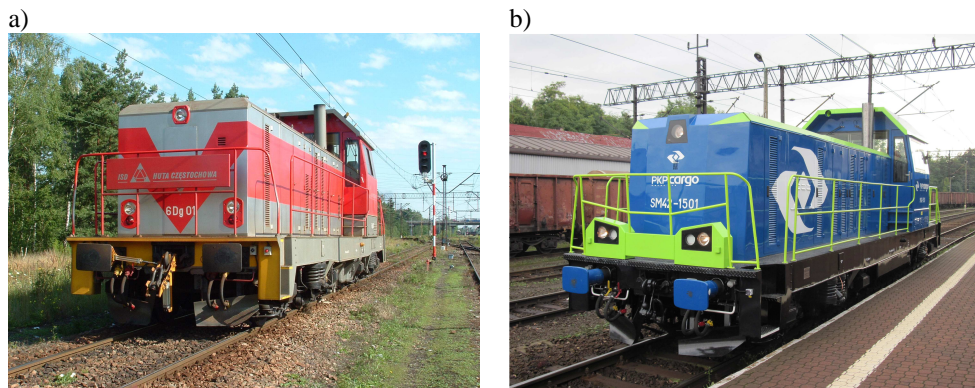
## 2. WARIANTY PODLEGAJĄCE ANALIZIE

Do oceny efektywności modernizacji lokomotywy SM42 przyjęto dwa warianty:

1. **Wariant SM42 a8C22:** niezmodernizowana lokomotywa spalinowa serii SM42 z silnikiem HCP a8C22,
2. **Wariant SM42 CAT C27:** zmodernizowana lokomotywa SM42 w wersji 6Dg z silnikiem Caterpillar C27.

### 2.1. Modernizacja lokomotywy SM42 w wersji 6Dg

W 2007 roku Spółka Akcyjna NEWAG wykonała dla potrzeb przedsiębiorstwa ISD Huta Częstochowa Sp. z o. o. prototypową modernizację lokomotywy spalinowej serii SM42. Lokomotywa po modernizacji została oznaczona symbolem 6Dg. W 2009 roku podczas targów TRAKO w Gdańsku została zaprezentowana lokomotywa SM42-1501 zmodernizowana dla PKP Cargo S.A., która oznaczona została symbolem 6Dga (rys. 1).



Rys.1. Zmodernizowana lokomotywa SM42 a) w wersji 6Dg dla ISD Huta Częstochowa, b) w wersji 6Dga dla PKP Cargo (Zdj.: M. Górowski)

Dotychczasowy silnik został zastąpiony nowym 12-cylindrowym wysokoprężnym silnikiem spalinowym firmy CATERPILLAR model C27 o mocy 652 kW (875 KM). 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 posiada przekładnię elektryczną AC-DC (prąd przemienny-prąd stały) [3, 4].

Układy wspomagające pracę silnika, tj. układ chłodzenia, układ zasilania, układ wydechowy, mikroprocesorowy układ sterowania oraz 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 zabudowane zostały 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 [3, 4].

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. Wybrane parametry techniczne lokomotywy zostały zestawione w tabeli 1.

*Tab. 1. Parametry techniczne lokomotywy spalinowej typu 6Dg (6Dga)*

L.p.	Parametr	Wartość
1	Układ osi	Bo-Bo
2	Szerokość toru	1435 mm
3	Rodzaj przekładni	Elektryczna AC/DC
4	Długość ze zderzakami	14240 mm
5	Szerokość	3170 mm
6	Odległość od główki szyny	4323 mm
7	Masa służbowa lokomotywy	70 000 kg
8	Pojemność zbiornika paliwa	2350 l
9	Moc znamionowa	652 kW (875 KM)
10	Prędkość obrotowa	1800 obr/min
11	Ilość i układ cylindrów	V 12
12	Zużycie paliwa na biegu jałowym	4,5 l/h
13	Jednostkowe zużycie paliwa	200 g/kWh
14	Pojemność silnika spalinowego	27 l
15	Siła pociągowa przy rozruchu	219 kN
16	Prędkość maksymalna	85 km/h

Obecnie w czynnej eksploatacji znajduje się 15 zmodernizowanych lokomotyw SM42 w wersji 6Dg (6Dga): 3 sztuki w przedsiębiorstwie ISD Huta Częstochowa Sp. z o.o. oraz 12 sztuk w PKP Cargo SA.

### 3. ANALIZA KOSZTU CYKLU TRWAŁOŚCI

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.

#### 3.1. 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. Poniżej wypunktowano najważniejsze z nich.

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:  $H(t)$ ,  $MTTF$ ,  $MTBF_n$ ,  $F_n(t)$ ,  $MTTR$ ,  $A$ .

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÷2009 u jednego z czołowych przewoźników kolejowych w Polsce, określono harmonogram obciążenia silnika spalinowego oraz określono następujące wskaźniki eksploatacyjne:

- średni czas pracy silnika spalinowego: 5.000 [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.

Wskaźniki te stanowią podstawą do kolejnych etapów analizy.

#### 3.2. Opracowanie modelu LCC

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

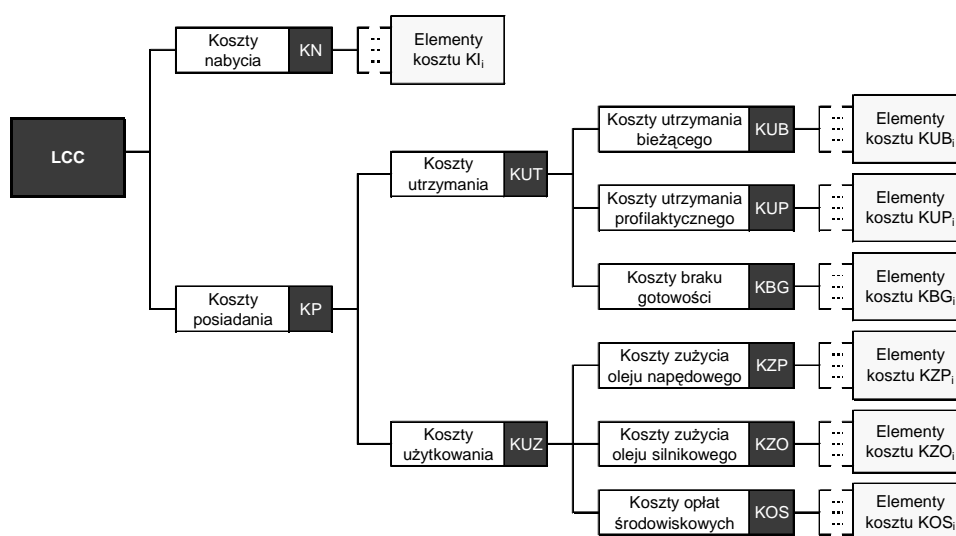
$$LCC = K_N + K_p \quad (1)$$

gdzie: LCC – koszt cyklu trwałości,

$K_N$  – koszty nabycia,

$K_p$  – koszty posiadania.

Koszty nabycia  $K_N$  w wariantcie bazowym (wariant SM42 a8C22) stanowią koszty naprawy głównej. Dla zmodernizowanej lokomotywy SM42 (wariant SM42 CAT C27) koszty nabycia stanowią łączne wydatki na modernizację, uwzględniające m.in.: koszty dokumentacji, koszty dopuszczenia do eksploatacji, koszty zakupu i dostawy silnika spalinowego, koszty niezbędnych podzespołów i elementów oraz koszty robocizny. Założono, że modernizacja lokomotywy SM42 będzie przeprowadzona w ramach naprawy głównej pojazdu. Koszty posiadania  $K_P$  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 2.



Rys.2. Struktura kosztów zdefiniowana w modelu LCC

W zastosowanym modelu LCC zdefiniowano 10 elementów kosztów wykorzystując 26 parametrów i funkcji. Wycenę elementów kosztu przeprowadzono z zastosowaniem inżynierskiej metody szacowania kosztu i oparto o ceny stałe (netto) z poziomu 2010 roku. Analizę LCC wykonano na niezdykontowanych 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 ramach analizy niezawodnościowej, która wyraża oczekiwaną liczbę uszkodzeń do chwili „t”. Koszty utrzymania bieżącego lokomotywy w analizowanych wariantach wyrażono następującą formułą:

$$KUB = [H(t_i) - H(t_{i-1})] \cdot [(MMH \cdot CPH) + ACM] \quad [zł/rok] \quad (2)$$

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 uniemożliwiającym wykonanie przewidzianych do realizacji zadań. Do kosztów braku gotowości zalicza się np.: koszty kar umownych, koszty gwarancji, koszty utraconych możliwości i inne. W definicji KBG wykorzystywany jest wskaźnik gotowości technicznej  $A$  wyznaczony w ramach analizy niezawodnościowej.

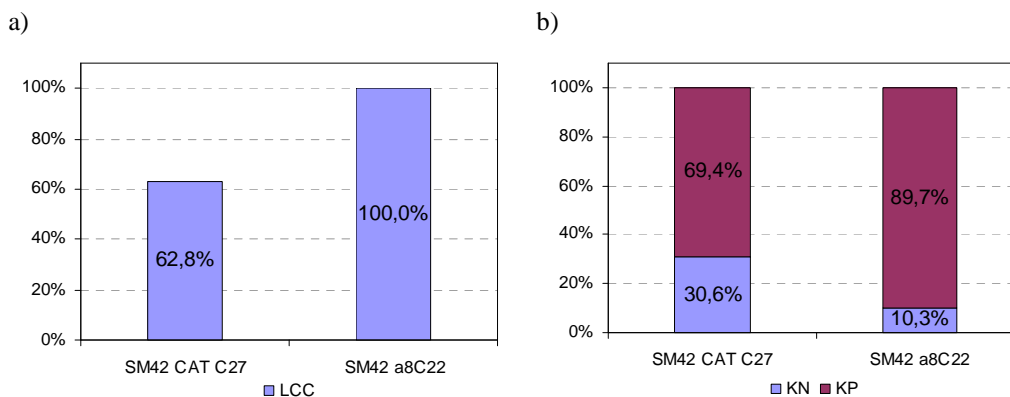
Koszty zużycia oleju napędowego (KZP) i oleju silnikowego (KZO) obliczono na podstawie charakterystyk uniwersalnych silników HCP a8C22 i CAT C27 oraz danych eksploatacyjnych zgromadzonych przez PKP Cargo SA.

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.

### 3.3. Analiza modelu LCC i prezentacja wyników

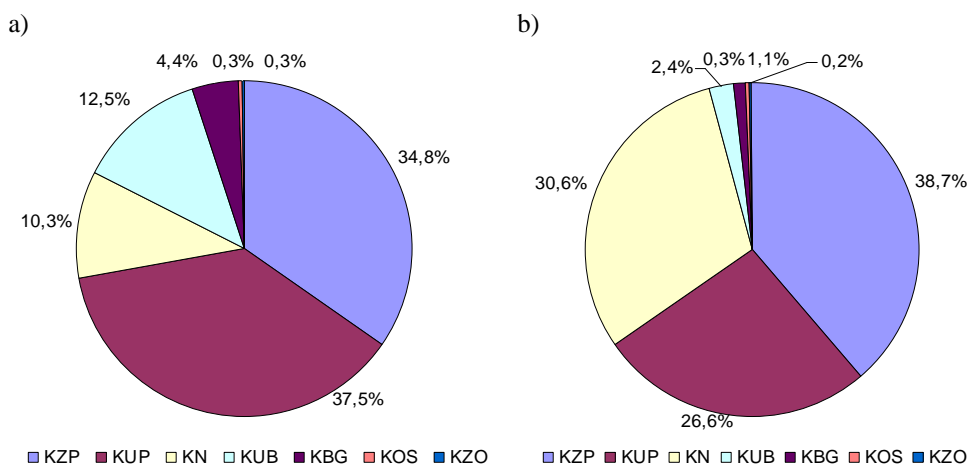
Analiza modelu kosztu wykazała, że proponowany wariant modernizacji lokomotywy SM42 w wersji 6Dg (6Dga) jest w pełni uzasadniony ekonomicznie. Z obliczeń przeprowadzonych przy zastosowaniu oprogramowania CATLOC wynika, że modernizacja lokomotywy zapewnia bardzo wysokie oszczędności w kosztach całkowitych – około 6,0 mln zł, tj. 37,2% mniej w porównaniu do lokomotywy niezmodernizowanej.

Porównanie kosztów całkowitych (LCC) dla analizowanych wariantów w 25-letnim okresie eksploatacji przedstawiono na rysunku 3a. Dla zmodernizowanej lokomotywy SM42 w wersji 6Dg koszty nabycia (KN) związane z nakładami poniesionymi na modernizację stanowią 30,6% kosztów całkowitych, a koszty posiadania 69,4% (rys. 3b).



Rys.3. a) Porównanie LCC dla analizowanych wariantów, b) Udział kosztów nabycia KN i kosztów posiadania KP w LCC

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. 4a).



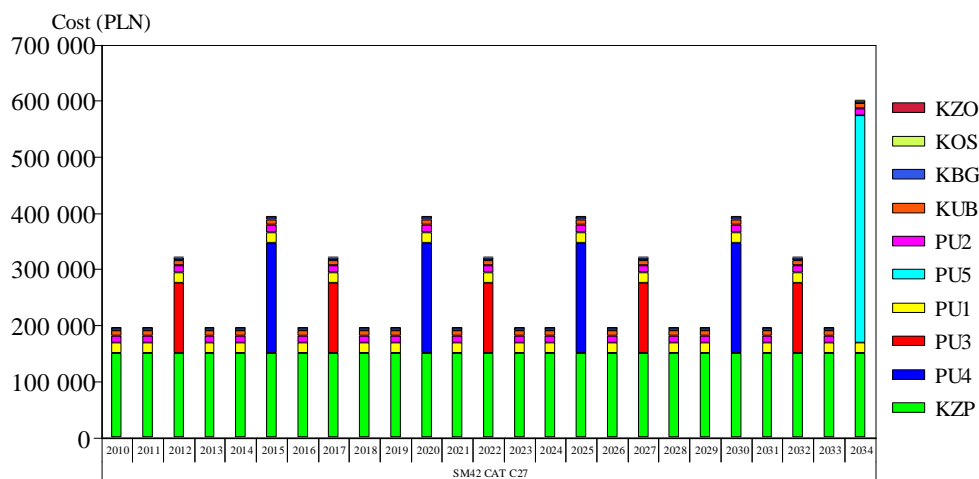
Rys.4. Koszty dominujące w LCC analizowanych wariantów a) wariant SM42 a8C22, b) wariant SM42 CAT C27

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 największy udział w LCC mają koszty zużycia paliwa (KZP) - 38,7%. Znaczące obniżenie kosztów generowanych w cyklu trwałości lokomotywy zmodernizowanej, otrzymano dzięki zwiększeniu niezawodności, gotowości i dostępności części zamiennych. Przekłada się to na redukcję nakładów na utrzymanie bieżące oraz niższe koszty obsługi profilaktycznych pojazdu (przeglądy, naprawy okresowe). Koszty utrzymania profilaktycznego (KUP) lokomotywy zmodernizowanej stanowią około 26,6% kosztów ogółem, a utrzymania bieżącego (KUB) niewiele ponad 2,4% (rys. 4b).

Największe oszczędności w ujęciu wartościowym w stosunku do lokomotywy niezmodernizowanej dotyczą kosztów zużycia oleju napędowego – oszczędności rzędu 22÷35% w zależności od warunków eksploatacji i oleju silnikowego do 57,8%. Biorąc pod uwagę aktualną tendencję wzrostu cen paliw, w planowaniu długookresowym ma to duże znaczenie.

Na rysunku 5 przedstawiono rozkład kosztów posiadania dla zmodernizowanej lokomotywy w 25-letnim okresie eksploatacji, gdzie: KZP – koszty zużycia paliwa, PU5 – koszty poziomu utrzymania 5, PU4 – koszty poziomu utrzymania 4, PU3 – koszty poziomu utrzymania 3, PU2 – koszty poziomu utrzymania 2, PU1 – koszty poziomu utrzymania 1, KUB – koszty napraw bieżących, KBG – koszty braku gotowości, KOS – koszty opłat środowiskowych, KZO – koszty zużycia oleju silnikowego.



Rys.5. Rozkład kosztów posiadania dla zmodernizowanej lokomotywy SM42 w 25-letnim okresie eksploatacji

W przeprowadzonej analizie wykazano, że modernizacja lokomotywy spalinowej serii SM42 w wersji 6Dg zapewnia znaczące oszczędności w kosztach eksploatacji w stosunku do lokomotywy niezmodernizowanej. W tabeli 2 zestawiono średni poziom oszczędności w ujęciu rocznym dla wybranych kategorii kosztów lokomotywy zmodernizowanej w porównaniu do pojazdu niezmodernizowanego.



Tab. 2. Poziom oszczędności w ujęciu rocznym dla zmodernizowanej lokomotywy SM42

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

### 3.4. Weryfikacja analizy

Do weryfikacji analizy wykorzystano dane eksploatacyjne zgromadzone w latach 2007÷2010 podczas eksploatacji nadzorowanej prowadzonej przez:

- ISD Huta Częstochowa Sp. z o.o. na trzech zmodernizowanych lokomotywach,
- PKP Cargo SA, Górnośląski Zakład Spółki w Rybniku na jednej zmodernizowanej lokomotywie.

Zgromadzone dane dotyczą:

- zużycia paliwa i materiałów eksploatacyjnych,
- uszkodzeń lokomotywy wraz z ich przyczynami,
- 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]. Dane te wykazują, że zmodernizowana lokomotywa umożliwia uzyskanie oszczędności w zużyciu paliwa rzędu 20,9 do 39,5%.

Analiza wszystkich zebranych danych eksploatacyjnych umożliwiła obliczenie i porównanie pozostałych kategorii kosztów uwzględnionych w modelu LCC. Obliczenia zestawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Poziom oszczędności dla zmodernizowanej lokomotywy SM42 na podstawie danych eksploatacyjnych

Kategoria kosztu	Koszty utrzymania profilaktycznego KUP	Koszty utrzymania bieżącego KUB	Koszty zużycia oleju napędowego KZP	Koszty zużycia oleju silnikowego KZO	Koszty braku gotowości KBG	Koszty opłat środowisk. KOS
Poziom oszczędności	53,6%	84,1%	20,9% do 39,5%	57,8%	76,5%	30,2%

Porównując dane zawarte w tabelach 2 i 3 można zauważyć, że oszczędności jakie są uzyskiwane w rzeczywistej eksploatacji lokomotywy zmodernizowanej są bardzo zbliżone do wartości obliczonych z modelu LCC, co świadczy o wysokiej dokładności przeprowadzonych obliczeń.

#### 4. PODSUMOWANIE

Celem modernizacji lokomotywy spalinowej serii SM42 jest przywrócenie, poprawa i dostosowanie do współczesnych wymagań własności użytkowych. Główne obszary przebudowy i modernizacji powinny dotyczyć: zespołu napędowego z silnikiem o ograniczonym poziomie emisji spalin, sterowania mikroprocesorowego zespołem silnik – prądnice, poprawy ergonomii kabiny i stanowiska pracy operatora (maszynisty), ekonomicznego napędu maszyn i urządzeń pomocniczych oraz poprawy elementów układu hamulcowego.

Baza danych wyjściowych do analizy i oceny efektywności modernizacji została oparta na aktualnych kosztach utrzymania profilaktycznego i bieżącego oraz cenach oleju napędowego i silnikowego. Dane dotyczące poziomu zużycia paliwa zostały wykorzystane w stanie rzeczywistym i uwzględniały zróżnicowany charakter pracy lokomotywy: od lekkiej pracy manewrowej ze składami pasażerskimi do ciężkiej pracy na górze rozrządowej ze składami towarowymi. W przeprowadzonej ocenie efektywności wykazano, że modernizacja lokomotywy spalinowej serii SM42 w wersji 6Dg (6Dga) zapewnia znacząco istotne oszczędności w kosztach eksploatacji w stosunku do pojazdu niezmodyfikowanego. W okresie 25 lat użytkowania pojazdu oszczędności te mogą wynosić około 6,0 mln zł dla jednej lokomotywy.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Marciniak Z.: *Dotychczasowe projekty modernizacji lokomotyw spalinowych w Polsce*. Technika Transportu Szynowego, 9/2005.
- [2] Tułeczki A.: *Modele decyzyjne w odnowie parku spalinowych pojazdów trakcyjnych*. Technika Transportu Szynowego, 9/2005.
- [3] *Studium techniczno – ekonomiczne odnowy parku pojazdów trakcyjnych eksploatowanych przez PKP Cargo S.A. Etap IV Modernizacja manewrowej lokomotywy spalinowej serii SM42*. Projekt badawczy, Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2007.
- [4] *Ocena efektywności modernizacji lokomotywy serii SM42 w oparciu o bieżące dane eksploatacyjne*. Projekt badawczy, Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2010.
- [5] Szkoda M.: *Metoda oceny kosztu cyklu trwałości (LCC) pojazdu szynowego*. Konferencja SITK: Wymagania w zakresie ochrony środowiska dla taboru kolejowego. Kierunki modernizacji i rozwoju konstrukcji. Cedzyna, 2006.
- [6] Szkoda M.: *Analiza kosztu cyklu trwałości LCC w ocenie pojazdów szynowych*. Seminarium SITK: Rynek lokomotyw – rozwiązania techniczne. Aspekty prawne i ekonomiczne modernizacji lokomotyw. Dobieszków, 2006.
- [7] Tułeczki A., Szkoda M.: *Koszt cyklu trwałości LCC jako model decyzyjny modernizacji pojazdów szynowych*. XVII Konferencja Naukowa POJAZDY SZYNOWE. Kazimierz Dolny, 2006.
- [8] Hawranek P.M., Behrens W.: *Poradnik przygotowania przemysłowych studiów feasibility*, UNIDO Warszawa 1993.