

Dr hab. inż. Marek Babel, dr inż. Maciej Szkoda

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny
Instytut Pojazdów Szynowych
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, Polska
Tel.: 12 374 33 10, fax: 12 374 33 11
E-mail: babel@mech.pk.edu.pl; maciej.szkoda@mech.pk.edu.pl

Poprawa efektywności i niezawodności lokomotyw spalinowych w wyniku modernizacji układu sterowania obciążeniem zespołu napędowego

Słowa kluczowe: niezawodność, eksploatacja, modernizacja lokomotyw, analiza LCC

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję modernizacji układu sterowania obciążeniem zespołu napędowego lokomotywy spalinowej na przykładzie lokomotywy serii SM31. Proponowane rozwiązanie polega na zastosowaniu elektronicznego regulatora obrotów i mocy silnika wysokoprężnego a8C22W, opracowanego w wyniku wspólnych prac autorów z firmą Lokel (Czechy) i Newag S.A. (Polska), realizującego na lokomotywie nową, optymalną charakterystykę eksploatacyjną. Charakterystyka ta została wybrana w wyniku obliczeń optymalizacyjnych z wykorzystaniem opracowanego modelu matematycznego odwzorowującego rzeczywiste warunki pracy zespołu silnik-prądnicza na lokomotywie spalinowej. Badania stanowiskowe oraz ponad trzyletnia eksploatacja obserwowana lokomotywy z zamontowanym regulatorem elektronicznym wykazały poprawne i niezawodne jego działanie. Bazując na danych zgromadzonych podczas eksploatacji obserwowanej, przeprowadzono ocenę efektywności proponowanego rozwiązania w oparciu o analizę LCC (Life Cycle Cost).

1. Wprowadzenie

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

- zmniejszenie kosztów zużycia paliwa i materiałów eksploatacyjnych,
- dostępność nowych podzespołów i części zamiennych,
- zwiększenie gotowości technicznej,
- zwiększenie przebiegów międzynaprawczych,
- poprawa warunków pracy maszynisty,
- zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

W ostatnich latach ze strony przewoźników kolejowych obserwuje się duże zainteresowanie modernizacją lokomotyw spalinowych. W Instytucie Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej w latach 2006 ÷ 2014, przy współpracy z przewoźnikami kolejowymi, powstały projekty modernizacji zarówno lokomotyw liniowych np.: serii ST44, SU45, SU46, SP32 jak i lokomotyw manewrowych: serii SM48, SM42 i SM31 [54, 55]. Większość z tych projektów zakończyło się pełnym wdrożeniem.

W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję modernizacji układu sterowania obciążeniem zespołu napędowego lokomotywy serii SM31 poprzez wdrożenie nowej charakterystyki eksploatacyjnej silnika wysokoprężnego a8C22W, realizowanej przez

nowoczesny elektroniczny regulator obrotów i mocy. Nowa charakterystyka eksploatacyjna została wybrana na drodze obliczeń optymalizacyjnych z wykorzystaniem modelu matematycznego odwzorowującego rzeczywiste warunki pracy lokomotywy w eksploatacji. W celu oceny efektywności proponowanego rozwiązania przeprowadzono analizę LCC (Life Cycle Cost) uwzględniającą własności niezawodnościowe pojazdu.

2. Charakterystyka obiektu badań

Lokomotywy spalinowe serii SM31 eksploatowane są w Polsce od ponad 35 lat. Według danych na koniec 2014r. w eksploatacji czynnej znajdowało się około 150 lokomotyw tej serii. Lokomotywa SM31 przeznaczona jest przede wszystkim do wykonywania ciężkiej pracy manewrowej na stacjach i górkach rozrządowych, ale także wykorzystywana jest w pracy pociągowej. Pojazd ten wyposażony został w wysokodoładowany silnik a8C22W produkcji zakładów HCP Poznań, który powstał na bazie silnika a8C22. Podstawowe parametry techniczne ww. silników przedstawiono w tabeli 1b.

Tabela 1 a) Widok lokomotywy spalinowej serii SM31 b) Dane techniczne silników a8C22 i a8C22W



[zdj. <http://woziarze.cal.pl>]

b)

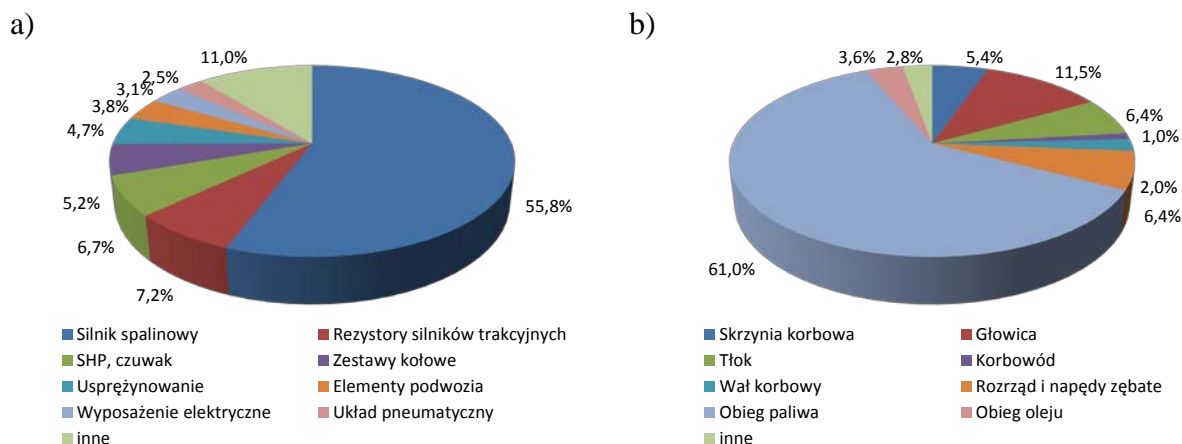
Parametr silnika	a8C22 (lok. SM42)	a8C22W (lok. SM31)
Średnica/skok tłoka [mm]	220/270	220/270
Ilość cylindrów w układzie V	8	8
Moc efektywna (znamionowa) [kW]	590	885
Obroty znam. / biegu jałowego [obr/min]	1000/500	1000/500
Średnie ciśnienie efektywne [MPa]	0,88	1,32
Stopień sprężania	13,5	12
Ciśnienie doładowania (absolutne) [MPa]	0,15	0,20
Maksymalne ciśnienie spalania [MPa]	10	11,5
Jednostkowe zużycie paliwa [g/kW h]	235	225
Temperatura spalin przed turbiną [K]	780	850
Obroty turbosprężarki [obr/min]	14500	17700
Chłodzenie powietrza doładowania	brak	chłodnica

Lokomotywy SM31 produkowane były w oparciu o technologię i rozwiązania techniczne z początku lat 70-ch ubiegłego wieku. Od momentu ich produkcji konstrukcja lokomotyw praktycznie nie uległa zmianom. Nie wykonywano także żadnych prac modernizacyjnych. Analiza wskaźników eksploatacyjnych wraz z oceną niezawodności lokomotyw SM31, przeprowadzona w Instytucie Pojazdów Szynowych PK, wykazała konieczność przeprowadzenia ich modernizacji w zakresie najbardziej zawodnych zespołów i układów lokomotywy [7].

3. Analiza uszkodzeń lokomotywy serii SM31

Niezawodność lokomotyw spalinowych serii SM31 w eksploatacji limitowana jest w głównej mierze niezawodnością wysokodoładowanych silników spalinowych a8C22W. Z analizy danych eksploatacyjnych pozyskanych z PKP Cargo S.A. dla próby 36 lokomotyw SM31 zgromadzonych w latach 2010-2014 wynika, że około 56% wszystkich uszkodzeń występujących na lokomotywach SM31 przypada na silnik spalinowy (rys. 1a). Niezawodność silnika spalinowego a8C22W w największym stopniu limitowana jest przez układ tłok-cylinder, a największa liczba uszkodzeń występuje w układzie paliwowym (rys. 1b) [4, 7]. Jest to wynikiem znacznego wzrostu naprężeń cieplnych, które dla układu tłok-

cylinder silnika wysokoprężnego a8C22W są w zasadzie kilkakrotnie większe od naprężeń mechanicznych.



Rys. 1 a) Struktura uszkodzeń lokomotywy SM31; b) Struktura uszkodzeń silnika a8C22W

Wyniki badań dowodzą, że dla zwiększenia niezawodności kolejowych silników spalinowych w eksploatacji konieczna jest poprawa jakości ich pracy w stanach przejściowych, które dla lokomotyw manewrowych wynoszą do 50% ogólnego czasu pracy silnika pod obciążeniem. Poprawę jakości pracy silników spalinowych na lokomotywie w stanach przejściowych można osiągnąć poprzez wdrożenie optymalnej charakterystyki eksploatacyjnej silnika wybranej na podstawie określonego kryterium.

4. Model matematyczny silnika wysokoprężnego lokomotywy spalinowej

Zwiększenie niezawodności wybranych układów i agregatów lokomotyw spalinowych w eksploatacji dotyczy zadań optymalizacyjnych, które nie mogą być rozwiązane metodami eksperymentalnymi. Wymaga to zastosowania modelowania matematycznego warunków pracy zespołu napędowego: silnik - prądnica wraz z modelem symulacyjnym, pozwalającym odwzorować warunki pracy lokomotywy w eksploatacji. Część składników, wchodzących w koszty LCC pojazdu trakcyjnego, posiada charakter czasowy i zależy od warunków eksploatacji. Autorzy zaproponowali, aby obliczenia tych składników przeprowadzać także z wykorzystaniem modelu matematycznego procesów roboczych w zespole napędowym lokomotywy w trakcie jej eksploatacji.

Podstawowymi wymaganiami zastosowania modelu matematycznego do obliczeń optymalizacyjnych są: adekwatność do obiektów badań, zwartość i uniwersalność z punktu widzenia opisanego procesów dla różnego typu silników spalinowych i układów doładowania. Potrzeba opracowania modeli matematycznych procesów roboczych silników spalinowych w warunkach eksploatacji jest aktualna od wielu lat. Pojawiło się wiele prac podejmujących tę tematykę. W dziedzinie samochodowych silników spalinowych większość prac dotyczy sterowania w układach silników spalinowych z uwzględnieniem stanów dynamicznych [10, 14, 15, 25, 36, 61]. Interesującym jest model matematyczny procesów przejściowych silników wysokoprężnych lokomotyw spalinowych przedstawiony w pracy [11], który opiera się na rozwiązaniu układu składającego się z „n” równań różniczkowych części tłokowej silnika i 6 równań, opisujących procesy w kolektorze wylotowym w przypadku zastosowania

pulsacyjnego układu doładowania. Na podobnych zasadach opracowano modele matematyczne procesów przejściowych silników wysokoprężnych przedstawione w pracach [60, 62]. Należy jednakże zaznaczyć, że użyteczność tych modeli jest ograniczona w przypadku rozwiązywania zadań optymalizacyjnych. Wymaga bowiem przeprowadzenia znacznej ilości operacji obliczeniowych, posiadania podprogramów, dokładność obliczeń zależy od wyboru sposobu rozwiązania układu równań różniczkowych, co związane jest z czasochłonnością obliczeń.

Opracowany przez autorów model matematyczny procesów roboczych w silnikach spalinowych typu a8C22W w warunkach ustalonych i procesach przejściowych, uwzględnia wspólną pracę silnika tłokowego z turbiną, sprężarką, układami wlotowym i wylotowym na lokomotywie oraz właściwości pracy silników na manewrowych lokomotywach spalinowych. Model matematyczny imituje powiązania funkcjonalne, stosowane w układach sterowania prędkością obrotową wału korbowego i mocą silnika. Szczegółowe założenia, wymagania i równania matematyczne związane z modelem zawarte są w pracach [3, 6, 31, 33]. Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich:

1. Człony wykonawcze układów sterowania pracują w ten sposób, że w każdym momencie prędkość zmiany wielkości sterowanej A jest proporcjonalna do wielkości rozbieżności i odwrotnie proporcjonalna do stałej czasowej

$$\frac{dA}{dt} \cong \frac{A^* - A}{T_A} \quad (1)$$

gdzie:

A^* , A – zadane i faktyczne wartości wielkości sterowanej,
 T_A - stała czasowa układu regulacji wielkości A .

2. W dowolnym momencie zachowany jest bilans mocy:

$$b_T \cdot H_u \cdot \eta_i = P_M + P_B + P_P + J_\Sigma \cdot \omega_g \cdot \frac{d\omega_g}{dt} \quad (2)$$

gdzie:

P_P – wielkość mocy, przekazywana prądnicy trakcyjnej,
 P_M , P_B – moc strat mechanicznych w silniku i urządzeń pomocniczych na lokomotywie,
 J_Σ – suma momentów bezwładności silnika spalinowego i agregatów lokomotywy, zredukowanych do wału korbowego silnika wysokoprężnego,
 $d\omega_g/dt$ – przyspieszenie kątowe wału korbowego silnika spalinowego.

W obliczeniach, dla wyboru wielkości db_T/dt , $d\omega_g/dt$ i dP_P/dt równanie (2) wykorzystywane jest w postaci różniczkowej:

$$J_\Sigma \left(\omega_g \frac{d^2 \omega_g}{dt^2} + \left(\frac{d\omega_g}{dt} \right)^2 \right) = \frac{db_T}{dt} H_u \left(\eta_i + \frac{\partial \eta_i}{\partial b_T} b_T \right) + b_T \frac{\partial \eta_i}{\partial \omega_g} \frac{d\omega_g}{dt} H_u - \left(\frac{dP_M}{dt} + \frac{dP_B}{dt} + \frac{dP_P}{dt} \right) \quad (3)$$

Dla zespołu silnik-prądnica lokomotywy spalinowej serii SM31 składowa dP_P/dt przedstawia sobą sumę dwóch składników:

$$\frac{dP_P}{dt} = \frac{dP_C}{d\omega_g} + \frac{d\omega_g}{dt} + \frac{dP_{RM}}{dt} \quad (4)$$

gdzie:

$dP_C/d\omega_g$ – zmiana mocy silnika spalinowego w zależności od obrotów wału korbowego przy stałej prędkości jazdy,

dP_{RM}/dt – zadana zmiana mocy silnika spalinowego, sterowana przez regulator mocy w zależności od położenia regulatora wzbudzenia (serwomotoru).

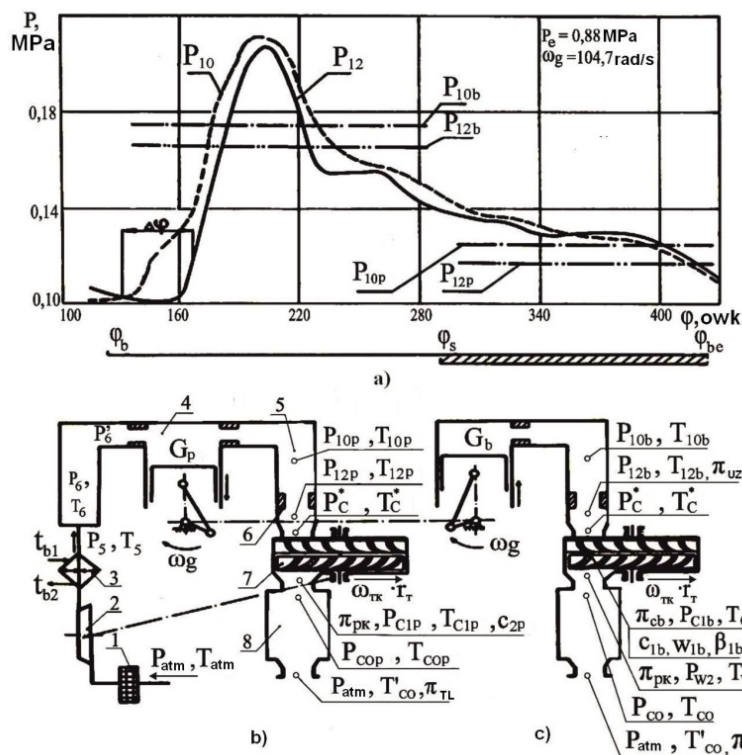
3. Początkowo do równania (3) podstawia się możliwą wartość przyrostu dawki paliwa (db_T/dt) obliczoną na podstawie ograniczeń parametrów obiegu cieplnego silnika spalinowego i oblicza się wielkość przyspieszenia kątownego wału korbowego przy stałej mocy P_P przekazywanej prądnicy trakcyjnej. W momencie osiągnięcia dopuszczalnego przyspieszenia kątownego wału korbowego ($d\omega_g/dt$), zadanego na podstawie ograniczeń lub innych warunków, w równaniu (3) podstawia się wielkości możliwej prędkości przyrostu dawki paliwa (db_T/dt) oraz zadanego przyspieszenia kątownego wału korbowego ($d\omega_g^*/dt$) i określana jest wielkość możliwego przyrostu mocy prądnicy trakcyjnej (dP_P/dt). Jeżeli otrzymana wielkość prędkości przyrostu mocy jest mniejsza od dopuszczalnej (dP_P/dt), to zmienne (db_T/dt) i (dP_P/dt) są szukanymi wielkościami sterującymi. Jeżeli wielkość (dP_P/dt) jest większa od dopuszczalnej, to w równaniu (3) podstawia się dopuszczalne wielkości ($d\omega_g/dt$) i (dP_P/dt) a następnie obliczana jest prędkość zmiany dawki paliwa (db_T/dt). Zmienne (db_T/dt) i (dP_P/dt) są szukanymi wielkościami sterującymi.

Jeżeli wielkości ($d\omega_g/dt$) i (dP_P/dt) wyrazić w postaci składowych, funkcjonalnie zależnych od czasu, prędkości obrotowej wału korbowego, ciśnienia doładowania itp., to opracowaną metodę można wykorzystać w celach imitacji funkcji logicznych w istniejących układach sterowania. Takie podejście pozwala wykluczyć wpływ jakości pracy układów sterowania na wskaźniki procesów przejścia i opracować nowe zasady sterowania przy zmianie wzajemnych powiązań zmiennych, występujących w równaniu (3).

Charakterystyczną cechą silników spalinowych typu a8C22W jest zastosowanie pulsacyjnego układu doładowania. Przy opracowaniu modelu zakładano, że zmiana ciśnienia spalin w kolektorze wydechowym silnika w funkcji czasu lub kąta obrotu wału korbowego ω_g przedstawia sobą funkcję okresową o okresie:

$$T = \omega_g \cdot \varphi^* \quad (5)$$

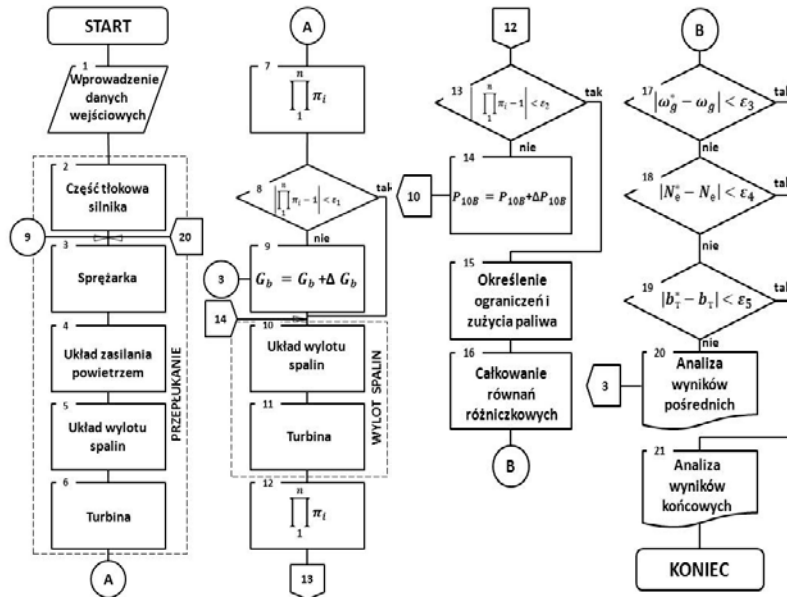
Faza zmiany ciśnienia spalin w kolektorze φ^* będzie równa wielkości przesunięcia faz pracy cylindrów. Załóżmy, że cykliczny proces w kolektorze można przedstawić w postaci pewnego szeregu procesów o czasie trwania $\Delta\varphi$, związanych warunkami granicznymi. Takich procesów szeregowych może być stosunkowo dużo, jednakże w powiązaniu z procesami w kolektorze wlotowym istnieją dwa charakterystyczne okresy: faza wylotu spalin (kąt φ_b, φ_s) i faza przepłukania (kąt φ_s, φ_{be}) – rys. 2a.



Rys. 2. Zmiana ciśnień w kolektorze wydechowym: a) model obliczeniowy silników wysokoprężnych typu a8C22W z pulsacyjnym układem doładowania przy przepłukaniu b) i wylocie c) [4]

W silniku spalinowym z pulsacyjnym układem doładowania przymusowy wylot spalin jest całkowicie oddzielony od procesów w kolektorze wlotowym i może być obliczony wg znanych metodyk, jeżeli zadane są parametry czynnika roboczego w cylindrze. Proces przepłukania związany jest bezpośrednio z procesami w kolektorze wlotowym. Obliczanie procesu przepłukania odbywa się wspólnie z obliczeniami procesów w przewodach wlotowych silnika, włączając urządzenia lokomotywy spalinowej - filtr powietrza 1, sprężarkę 2, chłodnicę powietrza doładowania 3, część tłokową 4, turbinę 7 i elementy układu wylotowego 8 (rys. 2b). Spadki ciśnień w fazach wlotu i przymusowego wylotu obliczono niezależnie od siebie. Oba procesy opisane są układem nieliniowych równań algebraicznych, odzwierciedlających quasiustalony przepływ czynnika roboczego w elementach układów wlotowego i wylotowego. Obliczenia przepływu czynnika roboczego w fazach przepłukania i wylotu odbywały się kolejno na podstawie średnich wartości ciśnień, temperatur i natężenia przepływu czynnika roboczego w odpowiednich fazach z przyjętym czasem trwania $\Delta\varphi$ (rys. 2a). Parametrami początkowymi do obliczeń procesów w układzie wylotowym, w przypadku przymusowego wylotu, są wartości parametrów określone w trakcie obliczeń procesów w układzie wlotowym przy przepłukaniu. Obliczenia gazodynamiczne turbiny turbosprężarki w procesie przejścia prowadzone są z uwzględnieniem zmiany kątów napływu strumienia spalin między łopatki wirnika [3, 5].

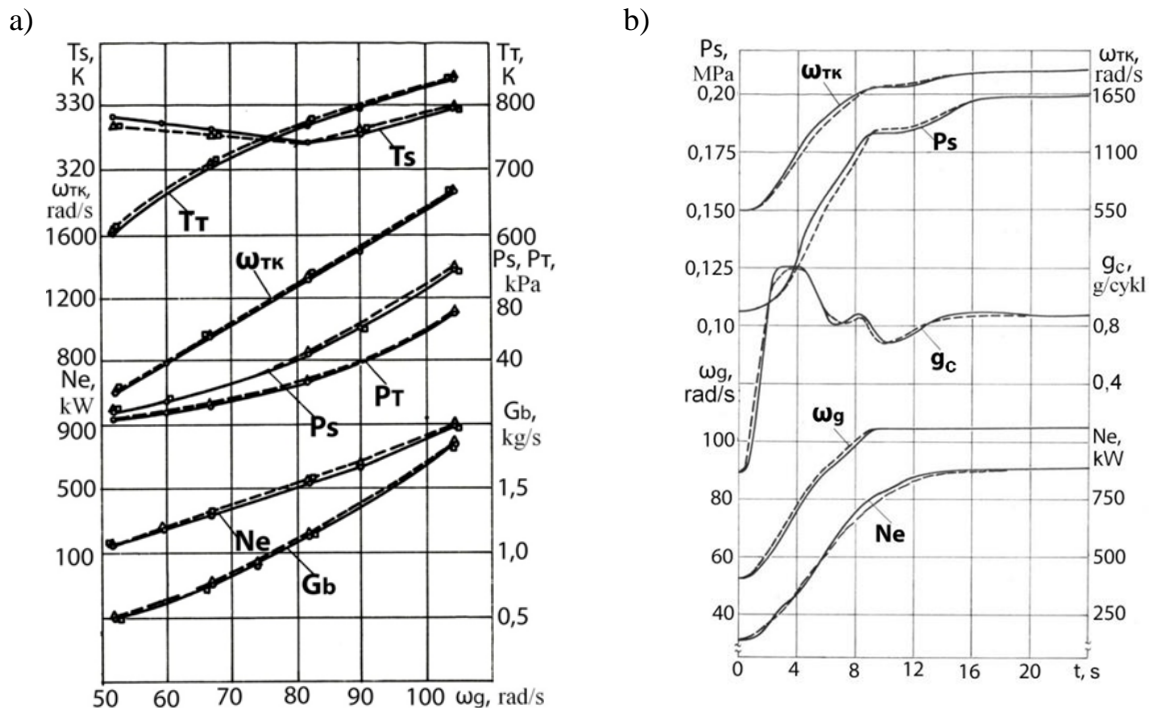
Obliczanie warunków pracy silnika spalinowego w stanach ustalonych i w procesie przejścia odbywa się za pomocą jednego programu, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 3. Na podstawie tego schematu blokowego opracowano program obliczeń wskaźników pracy silników wysokoprężnych a8C22W w warunkach ustalonych i procesach przejścia [3].



Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu obliczeń procesu przejścia silnika spalinowego [3]

5. Optymalna charakterystyka eksploatacyjna zespołu napędowego lokomotywy SM31

Porównanie obliczonych i eksperymentalnych wskaźników pracy silników spalinowych a8C22W dla charakterystyki eksploatacyjnej – rys. 4a i procesu przejścia w funkcji czasu – rys. 4b, wykazało dostateczną zbieżność wyników [3].



Rys. 4. Wskaźniki pracy zespołu silnik-prądnica a8C22W: a) dla charakterystyki eksploatacyjnej, b) w procesie przejścia [3]

Objaśnienia z rys. 4a i 4b:

T_s , T_T – temperatura powietrza w kolektorze wlotowym i spalin przed turbiną; P_s , P_T – ciśnienie doładowania i spalin przed turbiną (nadciśnienie); ω_g , ω_{TK} – prędkość kątowna wału korbowego silnika spalinowego i wirnika turbosprężarki; G_b – powietrza; g_c – dawka paliwa na cykl; N_e – moc efektywna silnika spalinowego; — – wynik badań; - - - – wynik obliczeń.

Dostateczna zgodność modeli matematycznych procesów roboczych w silnikach spalinowych typu a8C22W z przebiegami rzeczywistymi pozwala sformułować strategię wyboru optymalnej charakterystyki obciążeniowej zespołu silnik-prądnica, z uwzględnieniem warunków eksploatacji lokomotywy spalinowej, na podstawie wybranego kryterium. Jako kryterium zaproponowano zastosować minimum iloczynu:

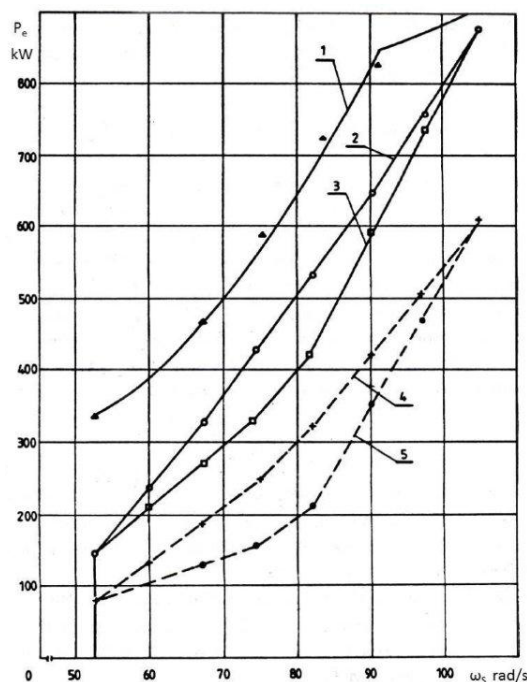
$$W_S = (K_P + K_{NP} + K_{NN}) \cdot T_L \quad (6)$$

gdzie:

- K_P - koszty zużytego paliwa za okres T_L wykonania przez lokomotywę zadanej pracy trakcyjnej A_T ,
- K_{NP} - koszty planowych przeglądów i napraw silnika spalinowego w okresie jednego cyklu naprawczego,
- K_{NN} - koszty napraw nieplanowych (np.: elementów układu tłok - cylinder) związane z występowaniem uszkodzeń awaryjnych w eksploatacji.

Wskaźniki pracy silnika i lokomotywy za okres pracy T_L pojazdu trakcyjnego obliczane są w rezultacie modelowania pracy zespołu napędowego lokomotywy SM31 w warunkach eksploatacji. Koszty napraw planowych K_{NP} obliczane są w zależności od średniej eksploatacyjnej prędkości kątowej wału korbowego silnika przy znanym sumarycznym koszcie napraw i przeglądów w ciągu jednego cyklu naprawczego. Wielkość kosztów K_{NN} jest liniowo zależna od trwałości elementów układu tłok-cylinder, która to z kolei uwarunkowana jest ilością uszkodzeń. Ilościowa ocena zmiany trwałości elementów układu tłok-cylinder silnika a8C22W (głowic cylindrowych) odbywa się w przybliżeniu z wykorzystaniem krzywej zmęczenia żeliwa szarego i liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w zależności od maksymalnych obliczonych wartości temperatur spalin przed turbiną [3].

Wykorzystując opracowane modele matematyczne, przeprowadzono obliczenia optymalizacyjne, w wyniku których w oparciu o kryterium (6) wybrano optymalną charakterystykę eksploatacyjną dla silników wysokoprężnych a8C22W lokomotyw spalinowych SM31 (rys. 5).



Rys. 5. Charakterystyki silnika a8C22W lokomotywy SM31 [3]

1 – charakterystyka graniczna - dopuszczalna temperatura spalin przed turbiną $[T_T] = 850 \text{ K}$; 2, 3 – charakterystyki eksploatacyjne – aktualna, zgodna z dokumentacją techniczno-ruchową lokomotywy i proponowana w oparciu o minimum kryteria kosztów; 4, 5 – charakterystyki selektywne - aktualna i proponowana dla charakterystyki 3.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że wdrożenie optymalnej charakterystyki eksploatacyjnej silnika a8C22W pozwala uzyskać następujące efekty:

- znaczne zmniejszenie naprężeń cieplnych w elementach układu tłok-cylinder silnika, co prowadzi do 3-krotnego zmniejszenia ilości uszkodzeń głowic cylindrowych i tłoków, tj. zmniejszenia kosztów napraw nieplanowych,
- zmniejszenie zużycia paliwa w granicach 3%.

6. Badania zmodernizowanego układu sterowania obciążeniem zespołu napędowego

Wdrożenie wybranej optymalnej charakterystyki na lokomotywie SM31 wymaga przeprowadzenia prac modernizacyjnych w układach regulacji obciążenia i dawkowania paliwa. Aktualnie stosowany na lokomotywach spalinowych serii SM31 układ sterowania zespołem napędowym składa się z nastawnika maszynisty, regulatora obrotów wału korbowego i układu wzbudzenia prądnicy głównej. Stosowane na tych lokomotywach regulatory elektrohydrauliczne dysponują bardzo ograniczonymi możliwościami zadawania charakterystyk. Regulatory tego typu realizują praktycznie liniową zależność zadanego położenia listwy paliwowej pompy wtryskowej (mocy efektywnej silnika P_e) od prędkości obrotowej wału korbowego – krzywa 2 na rysunku 5. Wybrana optymalna charakterystyka eksploatacyjna poz. 3 posiada charakter nieliniowy. Wdrożenie tej charakterystyki na lokomotywie SM31 wymaga zastosowania nowoczesnego elektronicznego regulatora obrotów i mocy silnika a8C22W wykorzystującego technikę mikroprocesorową. Przy tym sposobie regulacji wszystkie powiązania logiczne pomiędzy stanem wejść i wyjść układów sterowania utworzone są w postaci programu sterującego. Przy tym, dowolna zmiana lub korekta wprowadzane do realizowanych funkcji nie wymaga żadnych zmian w układzie sterowania lokomotywą. Przy opracowaniu elektronicznego regulatora obrotów i mocy dla

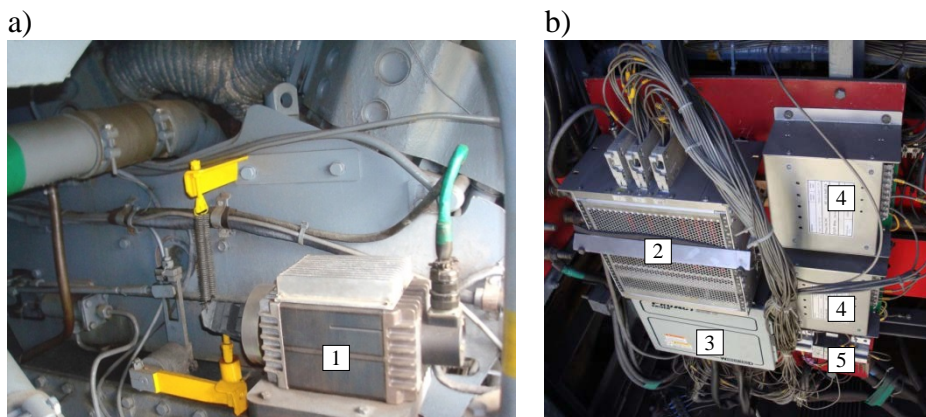
silników wysokoprężnych typu a8C22W lokomotyw spalinowych serii SM31 postawiono następujące wymagania:

- zapewnić adaptację istniejących na lokomotywach urządzeń elektromechanicznych i aparatów układu regulacji mocy prądnicy głównej ze sterownikiem regulatora elektronicznego;
- zapewnić współpracę organu wykonawczego regulatora elektronicznego – siłownika, z istniejącym na silniku spalinowym układem dźwigni sterujących dawkowaniem paliwa pomp wtryskowych;
- wykorzystać do budowy regulatora elektronicznego sprawdzone i niezawodne w eksploatacji na lokomotywach elementy takich firm jak Woodward lub Heinzmann.

W wyniku wspólnych prac autorów z firmą Lokel (Czechy) i Newag S.A. (Polska) został opracowany elektroniczny regulator obrotów i mocy dla silników wysokoprężnych a8C22 i a8C22W, składający się z [7]:

- siłownika elektrycznego ProAct III Woodward;
- modułu sterującego siłownikiem ProAct Driver Woodward;
- sterownika mikroprocesorowego INTELO 144 Lokel;
- przetworników napięcia 110V/24V, czujników prądu i napięcia obwodu głównego oraz czujników obrotów wału korbowego, ciśnienia oleju i temperatury czynnika chłodzącego.

Zabudowa regulatora elektronicznego na silniku wysokoprężnym a8C22W (rys. 6) pozwala realizować w układzie regulacji mocy (obciążenia) lokomotywy SM31 wybraną optymalną charakterystykę eksploatacyjną. Montaż kompletnego regulatora na lokomotywie może odbywać się w trakcie obsługi utrzymania profilaktycznego: poszerzonego przeglądu okresowego (poziom P3) lub naprawy rewizyjnej (poziom P4).



Rys. 6. Regulator elektroniczny obrotów i mocy silników wysokoprężnych typu a8C22, a8C22W
a) 1 – siłownik elektryczny; b) 2 – sterownik mikroprocesorowy; 3 – moduł sterowania siłownikiem elektrycznym; 4 – przetworniki napięcia; 5 – czujniki prądu i napięcia [7]

Badania stanowiskowe oraz ponad trzyletnia eksploatacja obserwowana lokomotywy z zamontowanym regulatorem elektronicznym wykazały poprawne i niezawodne jego działanie. Układ regulacji obrotów i mocy na lokomotywie działa stabilnie zarówno w stanach ustalonych jak i w procesach przejściowych. Wyniki próbnej eksploatacji wykazały, że główne korzyści z modernizacji układu regulacji mocy lokomotywy dotyczą [3, 32]:

- zmniejszenia kosztów utrzymania lokomotyw związanych z naprawą i regulacją zużytych w ponad 35 letniej eksploatacji regulatorów elektrohydraulicznych;

- zmniejszenia kosztów obsługi lokomotyw w związku z wyeliminowaniem konieczności wykonywania czasochłonnej regulacji i nastawy charakterystyki eksploatacyjnej na oporniku w ciągu całego okresu eksploatacji lokomotywy;
- poprawy dokładności i stabilności regulacji mocy co wpływa na zmniejszenie zużycia paliwa w granicach do 5%.

7. Ocena efektywności modernizacji układu regulacji mocy z zastosowaniem analizy LCC

W celu oceny efektywności w ujęciu kosztowym proponowanego rozwiązania, przeprowadzono analizę LCC (Life Cycle Cost). Life Cycle Cost to termin będący w użyciu od ponad 50 lat, a mimo tego w literaturze polskiej trudno jest znaleźć jednoznaczny odpowiednik tego wyrażenia. Life Cycle Cost rozpowszechniło się w dosłownym tłumaczeniu na język polski jako „koszt cyklu życia”. W literaturze przedmiotu stosuje się zamiennie i inne określenia tego angielskiego terminu jak: koszt cyklu trwałości, koszt cyklu eksploatacji czy koszt okresu używalności. W pracy [13] prof. Z. Chłopek przedstawił przekonujące uzasadnienie i propozycję tłumaczenia terminu „life” w odniesieniu do obiektów innych niż organizmów jako „istnienie”. Stąd w celu ujednolicenia i standaryzacji polskiego określenia, w pracy jako tłumaczenie Life Cycle Cost przyjęto koszt cyklu istnienia. Początki analizy LCC sięgają lat 60-tych ubiegłego wieku. Informacje o jej zastosowaniu można znaleźć w kilku programach prowadzonych przez Ministerstwo Obrony USA (U.S. Department of Defense), które wprowadziło kalkulację LCC do różnych obszarów działalności amerykańskich sił zbrojnych [39-41]. LCC stosowano między innymi w ocenie kosztów użytkowania i utrzymania sprzętu wojskowego, uzbrojenia i systemów obronnych. Przeprowadzone analizy wykazały, że we wielu przypadkach koszty użytkowania i utrzymania stanowią co najmniej 75% kosztów całkowitych, a w okresie 10÷15 lat eksploatacji wielokrotnie przewyższają początkowe koszty nabycia [1, 8, 34, 42]. Po tym okresie zastosowanie analizy LCC rozpowszechniono w innych gałęziach przemysłu m.in. w przemyśle lotniczym [2], w energetyce [17, 49], w przemyśle naftowym i chemicznym [30, 46], w budownictwie [16, 18] oraz w transporcie [12, 43, 52].

W literaturze i normach proponowanych jest wiele metod wykonania kalkulacji LCC [9, 21, 23, 24, 28, 30, 35, 47, 49, 53, 56, 63]. Na przykład w pracy [15] autor dokonuje porównania 9 modeli kalkulacji LCC. Wybór właściwego modelu jest uzależniony od dostępnych zasobów, posiadanych danych wejściowych, horyzontu czasowego jaki obejmuje analiza oraz od obiektu będącego przedmiotem analizy. W odniesieniu do modernizacji lokomotywy SM31, będącej przedmiotem rozważań w niniejszej pracy, zaproponowano kalkulację LCC opartą na zaleceniach europejskiej normy PN-EN 60300-3-3 *Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań – Szacowanie Kosztu Cyklu Życia*. Metoda ta składa się z sześciu etapów [58]:

1. Założenia i cel analizy;
2. Analiza niezawodności RAM;
3. Opracowanie modelu LCC;
4. Analiza modelu LCC;
5. Prezentacja wyników;
6. Weryfikacja analizy.

Jako miarę efektywności przyjęto koszt cyklu trwałości (LCC) w 25-letnim okresie eksploatacji lokomotywy.

7.1. Założenia i cel analizy

Przyjęto założenie, że analiza ma charakter porównawczy. Celem analizy jest porównanie efektów ekonomicznych uzyskiwanych przy eksploatacji lokomotywy zmodernizowanej do efektów uzyskiwanych przed jej modernizacją. W analizie przyjęto zatem dwa warianty:

1. **SM31 wariant 0:** niezmodernizowana lokomotywa serii SM31 z silnikiem a8C22W,
2. **SM31 wariant 1:** zmodernizowana lokomotywa SM31 z silnikiem a8C22W, wyposażona w regulator elektroniczny realizujący wybraną optymalną charakterystyką eksploatacyjną zespołu napędowego.

W pierwszym etapie analizy opracowano zbiór danych wyjściowych dla obu wariantów. Dane dotyczące lokomotywy niezmodernizowanej obejmowały:

- określenie rozkładu obciążenia lokomotywy dla rzeczywistych warunków eksploatacji,
- pomiar rzeczywistego zużycia paliwa i oleju silnikowego,
- obliczenie średniego czasu pracy, przebiegu, pracy przewozowa w ciągu roku,
- określenie okresowości, pracochłonność i koszty obsługi profilaktycznych wynikających z cyklu utrzymania,
- przygotowanie danych eksploatacyjnych związanych z czasami poprawnej pracy i czasami odnów, niezbędnych do analizy niezawodności.

Dane dotyczące lokomotywy zmodernizowanej:

- zakres, okresowość obsługi technicznych dla nowych układów i podzespołów,
- nowy plan utrzymania dla lokomotywy wyposażonej w regulator elektroniczny.

Dane wyjściowe do wykonania oceny efektywności modernizacji dotyczą warunków pracy lokomotywy. Dla niezmodernizowanej lokomotywy SM31 pozyskano je na podstawie eksploatacji serii lokomotyw w przedsiębiorstwie PKP Cargo S.A. W analizie przyjęto następujące wskaźniki eksploatacyjne:

- średni czas pracy lokomotywy w roku kalendarzowym: $TZ = 5771,7$ [mth/rok],
- średni przebieg: $P = 50000,0$ [km/rok],
- średnia praca przewozowa: $PP = 9564,5$ [tys. btkm/rok].

7.1.1. Czas realizacji przedsięwzięcia

W analizie LCC przyjęto 25-letni okres eksploatacji lokomotywy: 01.2015 ÷ 12.2039, co odpowiada 144292,0 godzinom pracy układu napędowego.

7.2. Analiza niezawodności RAM

Niezawodność lokomotywy SM31 jest traktowana jako właściwość kompleksowa obejmująca takie cechy pojazdu jak: nieuszkodzalność, gotowość i podatność utrzymaniową (z ang. Reliability, Availability and Maintainability w skrócie RAM). Ogólne wytyczne dotyczące analizy RAM ujęte są w normie PN-EN 50126 *Railway applications. The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)* [22]. W literaturze dotyczącej tego zagadnienia dostępny jest szczegółowy opis, definicje oraz formuły obliczeniowe różnych wskaźników wykorzystywanych do oceny [29, 44, 53]. Analiza nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej była przedmiotem wielu badań naukowych w ostatnich dekadach. Obecnie jest stosowana w różnych sektorach przemysłu, włączając przemysł lotniczy, zbrojeniowy, energetyczny, przetwórczy i transportowy [14, 19, 29, 38, 50, 55, 59].

7.2.1. Dane niezawodnościowe

Podstawą do oceny niezawodności lokomotywy niezmodernizowanej były dane eksploatacyjne dotyczące 36 pojazdów. Dane zostały zebrane przy współpracy z PKP Cargo S.A. w rzeczywistych warunkach eksploatacji na przełomie lat 2013 ÷ 2014. Umożliwiło to

obserwację przebiegu eksploatacji w różnorodnych warunkach, a tym samym pozyskanie wiarygodnych i obszernych danych do analizy niezawodnościowej. Dla lokomotywy zmodernizowanej wykorzystano dane zgromadzone podczas trzyletniej eksploatacji obserwowanej.

7.2.2. Wskaźniki nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej

Lokomotywę SM31 można analizować na różnych poziomach złożoności przypisując im odpowiednie wskaźniki niezawodnościowe związane z nieuszkodzalnością, gotowością i podatnością utrzymaniową. Ze względu na szeroki zakres przeprowadzonej analizy niezawodnościowej, poniżej przedstawiono obliczenia wyłącznie wybranych, najistotniejszych z punktu widzenia wykonywanej oceny efektywności, wskaźników RAM:

- Średni czas pracy między uszkodzeniami *MTBF*,
- Wskaźnik gotowości operacyjnej A_o ,
- Średni czas trwania naprawy *MTTR*.

Definicje i oznaczenia zastosowanych wskaźników przyjęto zgodnie z normami PN-EN 50126 oraz PN-EN 61703 [22, 48], a w obliczeniach wykorzystano możliwości pakietów: Statistica, MiniTab i BlockSim.

Uszkodzenia lokomotywy SM31 dzielą się na uszkodzenia lekkie, dla których czas naprawy nie przekracza 3 godzin i nie wymagają wyłączenia pojazdu z eksploatacji oraz uszkodzenia ciężkie wymagające wyłączenia pojazdu z eksploatacji w celu przekazania do zakładu utrzymania taboru. W przeprowadzonej analizie za istotne uznano wyłącznie uszkodzenia ciężkie. W oparciu o zgromadzone dane eksploatacyjne określono modele niezawodnościowe dla czasów poprawnej pracy analizowanych przypadków. W analizie zastosowano dwuparametrowy rozkład Weibulla, dla którego funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy wyraża się wzorem:

$$f(t) = \frac{a}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{a-1} \exp\left(-\frac{t}{b}\right)^a, \quad \text{dla } t \geq 0 \quad (7)$$

gdzie:

- a – parametr kształtu,
- b – parametr skali.

Parametry zastosowanych rozkładów przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry rozkładu Weibulla dla analizowanych przypadków

L.p.	Wariant	Parametr kształtu a	Parametr skali b
1	SM31 wariant 0	1,2313	348,788
2	SM31 wariant 1	1,2025	847,734

Uwzględniając zgromadzone dane eksploatacyjne, obliczono średnie czasy między uszkodzeniami *MTBF* dla analizowanych wariantów [26, 37]. Wyniki zestawiono w tabeli 3.

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} TTF_i}{N(0)} \quad (8)$$

gdzie:

- TTF_i – łączny czas pracy lokomotywy „i” podczas eksploatacji obserwowanej w [godz.],
- $N(0)$ – ogólna liczba lokomotyw.

W ocenie podatności utrzymaniowej analizowanych wariantów, wyznaczono dystrybuanty czasu usuwania uszkodzenia (tzw. napraw bieżących) oraz oczekiwane czasy usuwania uszkodzenia $MTTR$. W obliczeniach zastosowano rozkład lognormalny, dla którego funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu odnowy wyrażona jest wzorem [37]:

$$g(t) = \frac{1}{t \cdot \delta \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln t - a)^2}{2\delta^2}\right], \text{ dla } t > 0 \quad (9)$$

gdzie:

a – parametr kształtu,
 δ – parametr skali.

Tabela 3. Parametry rozkładu lognormalnego dla analizowanych przypadków

L.p.	Wariant	Parametr kształtu a	Parametr skali Δ
1	SM31 wariant 0	4,0392	0,9688
2	SM31 wariant 1	4,0428	0,9261

Oszacowanie statystyczne $MTTR$ wyznaczono z zależności [26, 37]:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} TTR_i}{N(0)} \quad (10)$$

gdzie:

TTR_i – łączny czas napraw lokomotywy „i” podczas eksploatacji obserwowanej,
 $N(0)$ – ogólna liczba lokomotyw.

Podstawą do wyznaczenia średnich czasów usuwania uszkodzenia były dane pozyskane z 503 napraw bieżących, wykonanych w latach 2013 ÷ 2014 w zakładach utrzymania taboru PKP Cargo S.A. Wyniki zestawiono w tabeli 3.

Do porównania gotowości technicznej zastosowano wskaźnik gotowości operacyjnej definiowany jako średni udział czasu w okresie jednego roku, w którym lokomotywa przebywa w stanie zdatności. W odniesieniu do pojedynczego pojazdu wskaźnik ten wyrażono następującą formułą [56]:

$$A_o = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} TZ_i}{\sum_{i=1}^{N(0)} TZ_i + \sum_{i=1}^{N(0)} TN_i} \quad (11)$$

gdzie:

TZ_i – czas przebywania lokomotywy „i” w stanie zdatności w [godz.],
 TN_i – czas przebywania lokomotywy „i” w stanie niezdatności w [godz.]:

$$TN_i = MNF_i \cdot MTTR \quad (12)$$

gdzie:

MNF_i – średnia liczba uszkodzeń lokomotywy „i” w roku eksploatacji,
 $N(0)$, $MTTR$ – j.w.

W tabeli 4 zestawiono wyniki obliczeń dla wybranych wskaźników RAM rozpatrywanych wariantów.

Tabela 4. Zestawienie wyników obliczeń z analizy RAM dla analizowanych wariantów

L.p.	Wariant	MNF [uszk./rok]	MTBF [godz.]	MTTR [godz.]	A_o
1	SM31 wariant 0	13,9	416,5	90,8	0,8223
2	SM31 wariant 1	6,6	874,5	87,5	0,9097

7.3. Model kosztów LCC

Model kosztów LCC wyrażono jako sumę kosztów nabycia i kosztów posiadania:

$$LCC = KN + KE \quad (13)$$

gdzie:

LCC – koszt cyklu trwałości,
 KN – koszty nabycia,
 KE – koszty eksploatacji.

Koszty nabycia (KN) to suma nakładów inwestycyjnych związanych z modernizacją lokomotywy i ponoszone są wyłącznie w wariantcie zakładającym modernizację lokomotywy. Koszty eksploatacji (KE) to koszty związane z użytkowaniem i utrzymaniem lokomotywy. Ze względu na porównawczy charakter analizy, w kalkulacji uwzględniono tylko te kategorie kosztów, które są różne dla ocenianych wariantów. Struktura kosztów w zastosowanym modelu przedstawia się następująco:

1. Koszty nabycia (KN)
 - Koszty modernizacji (KM)
2. Koszty eksploatacji (KE)
 - Koszty utrzymania (KUT):
 - Koszty utrzymania profilaktycznego (KUP),
 - Koszty utrzymania bieżącego (KUB),
 - Koszty braku gotowości (KBG).
 - Koszty użytkowania (KUZ):
 - Koszty zużycia oleju napędowego (KZP),
 - Koszty zużycia oleju silnikowego (KZO),
 - Koszty opłat środowiskowych (KOS).

Wycenę elementów kosztów przeprowadzono z zastosowaniem inżynierskiej metody szacowania kosztu i oparto o ceny stałe (netto) z poziomu 2015 roku. Analizę LCC wykonano na niezdyskontowanych wartościach kosztów. W punktach 7.3.1 ÷ 7.3.5 przedstawiono założenia wykorzystane do przeprowadzenia obliczeń.

7.3.1. Koszty modernizacji (KM)

Koszty modernizacji stanowią łączne wydatki związane z modernizacją lokomotywy. Uwzględniają m.in.: koszty dokumentacji, koszty zakupu niezbędnych podzespołów i elementów, koszty dopuszczenia do eksploatacji oraz koszty robocizny. Założono, że modernizacja lokomotywy SM31 będzie przeprowadzona w ramach obsługi utrzymania

profilaktycznego: przeglądu okresowego (poziom P3) lub naprawy rewizyjnej (poziom P4). Koszty modernizacji wynoszą: $KM=75000,0$ [zł].

7.3.2. Koszty utrzymania profilaktycznego (KUP)

Koszty utrzymania profilaktycznego (KUP) stanowią wydatki na naprawy i przeglądy okresowe lokomotywy, wynikające z planu utrzymania określonego w dokumentacji systemu utrzymania (tabela 5).

Tabela 5. Poziomy utrzymania lokomotywy SM31 [20]

Lp.	Poziom utrzymania	Miara odstępu
1	P1	max.1300 km / max.102 h pracy / max. 14 dni kalendarzowych
2	P2/1	23 dni ± 3 dni
3	P2/2	46 dni ± 6 dni
4	P2/3	138 dni ± 18 dni
5	P3	2 lata ± 2 miesiące
6	P4	200 000 km lub 4 lata
7	P5	1 200 000 km lub 24 lata

Koszty utrzymania profilaktycznego uwzględniają koszty robocizny (KUPR) oraz materiałów i części zamiennych (KUPM). KUP w ujęciu rocznym wyrażono następującą zależnością:

$$KUP = \sum_{i=1}^n KUP_i \quad (14)$$

gdzie:

KUP_i - koszty utrzymania profilaktycznego dla poziomu utrzymania „i”:

$$KUP_i = KUPR_i + KUPM_i = NPMA_i(t) \cdot [(MMH_i \cdot CPH_p) + ACM_i] \quad [zł/rok] \quad (15)$$

gdzie:

$NPMA_i(t)$ – liczba obsług profilaktycznych poziomu utrzymania „i” w danym roku eksploatacji,

MMH_i – średnia pracochłonność obsługi profilaktycznej poziomu utrzymania „i”,

CPH_p – koszt roboczogodziny przy obsłudze profilaktycznej: $CPH_p = 53,8$ [zł/rbh],

ACM_i – średni koszt zużycia materiałów w obsłudze profilaktycznej poziomu utrzymania „i”.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że poprzez zastosowanie nowych podzespołów oraz wyeliminowanie konieczności wykonywania czasochłonnej regulacji i nastawy charakterystyki eksploatacyjnej na oporniku, modernizacja lokomotywy SM31 umożliwia uzyskanie oszczędności w kosztach utrzymania profilaktycznego na poziomie 9,6 [tys. zł/rok] w porównaniu do lokomotywy niezmodernizowanej.

7.3.3. Koszty utrzymania bieżącego (KUB)

Koszty utrzymania bieżącego (KUB) związane są z naprawami bieżącymi lokomotywy. Uwzględniają zarówno koszty robocizny (KUBR) jak również koszty materiałów i części zamiennych (KUBM). Koszty utrzymania bieżącego w ujęciu rocznym dla pojedynczego pojazdu wyrażono następującą formułą:

$$KUB = KUBP + KUBM = MNF[(MMH_B \cdot CPH_B) + ACM_B] \quad [zł/rok] \quad (16)$$

gdzie:

MMH_B – średnia pracochłonność naprawy bieżącej: MMH_B=10,9 [rbh/naprawę],
 CPH_B – koszt roboczogodziny przy naprawie bieżącej: CPH_B = 53,8 [zł/rbh],
 ACM_B – koszt zużycia materiałów w naprawie bieżącej: ACM_B = 2324,3 [zł/naprawę],
 MNF – średnia liczba uszkodzeń lokomotywy w roku eksploatacji:

$$MNF = \frac{TZ}{MTBF} \quad [uszk/rok] \quad (17)$$

gdzie:

TZ – średni czas pracy lokomotywy w roku kalendarzowym w [godz./rok],
 MTBF – średni czas między uszkodzeniami w [godz.].

Tabela 6. Koszty utrzymania bieżącego dla analizowanych wariantów

L.p.	Wariant	Średni czas pracy TZ [godz./rok]	Średni czas między uszkodzeniami MTBF [godz.]	Koszty utrzymania bieżącego [zł/rok]
1	SM31 wariant 0	5771,7	416,5	40 353,5
2	SM31 wariant 1		874,5	19 210,8

Przeprowadzone obliczenia z wykorzystaniem opracowanego modelu matematycznego pracy silnika spalinowego wykazały, że modernizacja układu sterowania obciążeniem zespołu napędowego lokomotywy SM31 umożliwia uzyskanie oszczędności w kosztach utrzymania bieżącego na poziomie 21,1 [tys. zł/rok], w porównaniu do lokomotywy niezmodernizowanej.

7.3.4. Koszty zużycia paliwa (KZP)

Koszty zużycia paliwa (KZP) dla lokomotywy niezmodernizowanej obliczono w oparciu o rzeczywiste dane eksploatacyjne zgromadzone w latach 2013 ÷ 2014 przez PKP Cargo S.A. Dla lokomotywy zmodernizowanej w rezultacie modelowania pracy trakcyjnej pojazdu i procesów w zespole napędowym, realizującym wybraną optymalną charakterystykę eksploatacyjną, otrzymujemy chwilowe wielkości zużycia paliwa b_{Pi} w okresie τ_j pojedynczego reżimu pracy silnika spalinowego lokomotywy. Za okres wykonania przez zmodernizowaną lokomotywę SM31 zadanej pracy trakcyjnej koszty zużycia paliwa KZP wyrażono następującą zależnością:

$$KZP = \int_{\tau_0}^{\tau_j} c_P b_{Pi} dt \quad [zł/mth] \quad (18)$$

gdzie:

b_{Pi} – chwilowe wielkości zużycia paliwa w okresie τ_j [kg/s],
 c_P – cena oleju napędowego: 4,43 [zł/kg].

Na podstawie uzyskanych danych i przeprowadzonych obliczeń ustalono średnie zużycie paliwa:

- SM31 wariant 0: 17,74 [kg/mth];
- SM31 wariant 1: 16,85 [kg/mth].

W tabeli 7 zestawiono roczne koszty zużycia paliwa dla analizowanych wariantów. Wykonane obliczenia wykazują, że modernizacja lokomotywy SM31 w proponowanym wariantcie pozwala na oszczędności w zużyciu paliwa na poziomie 5,0%, tj. 22,7 [tys. zł/rok].

Tabela 7. Koszty zużycia paliwa dla analizowanych wariantów

L.p.	Wariant	Czas pracy [mth/rok]	Zużycie oleju napędowego [kg/rok]	Koszt zużycia oleju napędowego [zł/rok]
1	SM31 wariant 0	5 771,7	10 2360,8	453 458,3
2	SM31 wariant 1		97 242,7	430 785,3

7.3.5. Koszty zużycia oleju silnikowego (KZO)

Dla niezmodernizowanej lokomotywy SM31 średnie zużycie oleju silnikowego wg danych eksploatacyjnych wynosi 0,92% zużycia paliwa. Dla lokomotywy zmodernizowanej uwzględniając efekty uzyskane z wdrożenia wybranej optymalnej charakterystyki eksploatacyjnej zespołu napędowego zużycie to kształtuje się na poziomie 0,60%. W tabeli 8 zestawiono roczne koszty zużycia oleju silnikowego dla obu wariantów. Do obliczeń przyjęto cenę oleju silnikowego stosowanego w silniku a8C22W na poziomie 10,88 [zł/kg].

Tabela 8. Koszty zużycia oleju silnikowego dla analizowanych wariantów

L.p.	Wariant	Zużycie oleju napędowego [kg/rok]	Zużycie oleju silnikowego [kg/rok]	Koszt zużycia oleju silnikowego [zł/rok]
1	SM31 wariant 0	102 360,8	941,7	10 245,9
2	SM31 wariant 1	97 242,7	583,5	6 348,0

W ujęciu wartościowym oszczędności w zużyciu oleju silnikowego dla lokomotywy zmodernizowanej wynoszą 38,1% tj. 3,9 [tys. zł/rok].

7.3.6. Koszty braku gotowości (KBG)

Koszty braku gotowości (KBG) to suma kosztów będących konsekwencją znajdowania się lokomotywy w stanie uniemożliwiającym wykonanie przewidzianych do realizacji zadań. Zalicza się do nich m.in.: koszty kar umownych, koszty gwarancji, koszty utraconych możliwości, koszty zapewnienia rezerwowych pojazdów i inne. Do porównania kosztów braku gotowości zastosowano zależność:

$$KBG = [8760 \cdot (1 - A)] \cdot KPS \quad (19)$$

gdzie:

KBG – koszty braku gotowości w [zł/rok],

A – wskaźnik gotowości operacyjnej, obliczony w ramach analizy RAM (pkt. 7.2.2),

KPS – koszty przestoju lokomotywy w [zł/godz.]

Zakładając oszacowane koszty przestoju lokomotywy $KPS=35,5$ [zł/mth], roczne koszty braku gotowości zestawiono w tabeli 9.

Tabela 9. Koszty braku gotowości dla analizowanych wariantów

L.p.	Wariant	Koszty przestoju lokomotywy KPS [zł/godz.]	Gotowość operacyjna A_o	Koszty braku gotowości [zł/rok]
1	SM31 wariant 0	35,5	0,8223	55 261,2
2	SM31 wariant 1		0,9097	28 081,5

Z analizy wynika, że proponowany wariant modernizacji pozwala na uzyskanie oszczędności w kosztach braku gotowości na poziomie 49,2% czyli 27,2 [tys. zł/rok] w stosunku do lokomotywy niezmodernizowanej.

7.3.7. Koszty opłat środowiskowych (KOS)

Koszty opłat środowiskowych (KOS) związane są z opłatami za korzystanie ze środowiska ustalonymi przez Ministerstwo Środowiska za emisję szkodliwych substancji zawartych w spalinach. Wysokość tych opłat zależy od wskaźników publikowanych przez Ministerstwo i jest proporcjonalna do zużycia paliwa przez lokomotywę. W tabeli 10 zestawiono jednostkowe stawki opłat obowiązujące w 2015 roku.

Tabela 10. Jednostkowe stawki opłat za gazy i pyły wyprowadzane do powietrza [45]

L.p.	Składnik emisji	Opłata jednostkowa [zł/kg]	Wskaźnik obliczeniowy [g/kg]
1	Dwutlenek siarki	0,53	0,028
2	Tlenki azotu (w przeliczeniu na NO_2)	0,53	50
3	Tlenek węgla	0,11	20
4	Węglowodory alifatyczne	0,11	2,5
5	Węglowodory aromatyczne	1,44	5,5
6	Pyły ze spalania paliw	0,35	4,0

Uwzględniając wielkości zużytego paliwa, zgodnie z obliczeniami zamieszczonymi w punkcie 7.3.4, w tabeli 11 podano koszty opłat środowiskowych dla analizowanych wariantów.

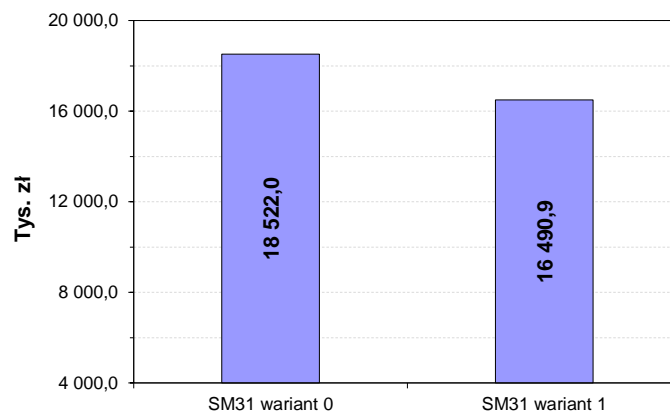
Tabela 11. Koszty opłat środowiskowych dla analizowanych wariantów

L.p.	Wariant	Zużycie oleju napędowego [kg/rok]	Koszt opłat środowiskowych [zł/rok]
1	SM31 wariant 0	102 360,8	3 391,1
2	SM31 wariant 1	97 242,7	3 221,6

Z analizy wynika, że proponowany wariant modernizacji pozwala na uzyskanie 5,0% oszczędności w kosztach opłat środowiskowych w stosunku do lokomotywy niezmodernizowanej.

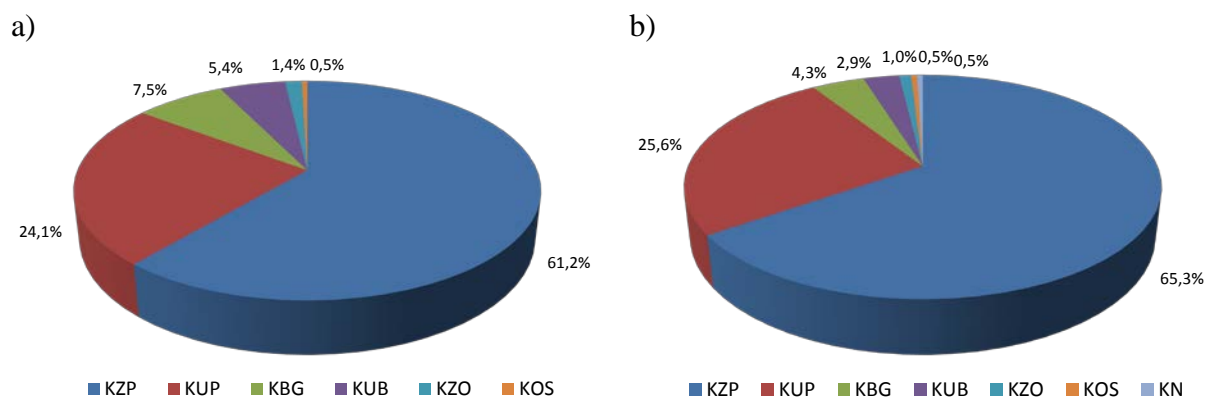
7.4. Analiza modelu LCC i prezentacja wyników

Przeprowadzona analiza z zastosowaniem oprogramowania CATLOC wykazała, że modernizacja lokomotywy SM31 w proponowanej wersji jest w pełni uzasadniona ekonomicznie. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że zastosowanie nowego regulatora elektronicznego i wdrożenie nowej charakterystyki eksploatacyjnej zapewnia oszczędności w kosztach całkowitych na poziomie ponad 2,0 [mln zł] w 25-letnim okresie eksploatacji, czyli 10,97% mniej w porównaniu do lokomotywy niezmodernizowanej. Porównanie kosztów całkowitych LCC dla analizowanych wariantów w 25-letnim okresie eksploatacji przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Porównanie kosztów całkowitych (LCC) w 25-letnim okresie eksploatacji

Dla niezmodernizowanej lokomotywy SM31 kosztami dominującymi w LCC są koszty zużycia paliwa KZP – 61,2% oraz koszty utrzymania profilaktycznego KUP – 24,1%. Koszty napraw bieżących KUB oraz koszty braku gotowości KBG stanowią ponad 12,9% kosztów całkowitych lokomotywy (rys. 8a).



Rys. 8. Koszty dominujące w LCC analizowanych przypadków: a) wariant 0, b) wariant 1
 KZP – koszty zużycia paliwa, KUP – koszty utrzymania profilaktycznego, KUB – koszty utrzymania bieżącego, KBG – koszty braku gotowości, KOS – koszty opłat środowiskowych, KZO – koszty zużycia oleju silnikowego, KN – koszty nabycia

Dla zmodernizowanej lokomotywy SM31 koszty nabycia (KN) związane z nakładami poniesionymi na modernizację stanowią poniżej 0,5% całkowitych LCC (rys. 8b). Największy udział w LCC mają koszty zużycia paliwa (KZP) – 65,3%. Koszty utrzymania profilaktycznego (KUP) stanowią około 25,6% kosztów ogółem, a utrzymania bieżącego (KUB) niewiele ponad 2,9%. Największe oszczędności w stosunku do pojazdu niezmodernizowanego dotyczą kosztów zużycia paliwa – 566,8 [tys. zł]. Znaczące obniżenie kosztów otrzymano dzięki zwiększeniu niezawodności i gotowości pojazdu. Przekłada się to na redukcję nakładów na utrzymanie bieżące, niższe koszty obsługi profilaktycznych oraz niższe koszty braku gotowości pojazdu. Łączne oszczędności dla tych kategorii kosztów wynoszą 1437,6 [tys. zł] w 25 letnim okresie eksploatacji (tabela 12).

Tabela 12. Porównanie kosztów dominujących dla analizowanych wariantów

L.p.	Wariant	Koszty zużycia paliwa [tys. zł]	Koszty utrzymania profilaktycznego [zł]	Koszty utrzymania bieżącego [zł]	Koszty braku gotowości [zł]
1	SM31 wariant 0	11336,5	4454,7	1008,4	1381,5
2	SM31 wariant 1	10769,6	4224,7	480,3	702,0

8. Podsumowanie

Poprawa efektywności i niezawodności lokomotywy spalinowej SM31 poprzez wdrożenie optymalnej charakterystyki eksploatacyjnej przy istniejącym układzie sterowania wymaga zastosowania regulatora elektronicznego. W wyniku wspólnych prac autorów z firmą Lokel i Newag S.A. opracowano i wdrożono nowy elektroniczny regulator obrotów i mocy silnika a8C22W. Ocenę efektywności proponowanego rozwiązania w aplikacji na lokomotywie serii SM31 przeprowadzono w oparciu o rzeczywiste dane eksploatacyjne. Do oceny zastosowano opracowaną w Instytucie Pojazdów Szynowych PK metodykę kalkulacji kosztów LCC. Przeprowadzone obliczenia dla 25-letniego okresu eksploatacji wykazały, że modernizacja układu regulacji mocy na lokomotywach SM31 jest ekonomicznie uzasadniona i pozwala osiągnąć wymierne efekty ekonomiczne przy niewielkich nakładach finansowych. Przeprowadzone badania i analizy stanowią podstawę decyzyjną o modernizacji lokomotywy.

Bibliografia

- [1] Augustine N R. Is Life Cycle Cost Costing Lives? Armed Forces Journal International 1978: 110-115.
- [2] Bååthe O. Life Cycle Management for the A/C JAS 39 Gripen. 11-th Logistics Congress Society of Logistics Engineers, Stockholm 1995.
- [3] Babel M. Podstawy teoretyczne i metodologia wyboru zakresów oraz technologii modernizacji lokomotyw spalinowych w oparciu o kryterium kosztów cyklu istnienia. Rozprawa habilitacyjna. Instytut Naukowo-Badawczy Transportu Kolejowego, Moskwa, 2015.
- [4] Babel M. Warunki pracy, charakterystyka eksploatacyjna a niezawodność doładowanych trakcyjnych silników spalinowych. Trakcja i wagony 1990; 9: 163-165.
- [5] Babel M. Zwiększenie efektywności pracy trakcyjnych silników wysokoprężnych a8C22 na drodze dopasowania charakterystyk obciążenia do warunków eksploatacji. Rozprawa doktorska. Moskiewski Instytut Inżynierów Transportu (MIIT), Moskwa, 1989.
- [6] Babel M, Kossov E E. Zwiększenie efektywności pracy lokomotyw spalinowych w eksploatacji na drodze optymalizacji warunków pracy silnika wysokoprężnego z wykorzystaniem elektronicznego regulatora obrotów i mocy. Materiały I Sympozjum Naukowego: Automatyzacja pracy silników wysokoprężnych, Poznań 1992: 69-78.
- [7] Babel M, Szkoda M. Poprawa efektywności i niezawodności lokomotyw serii SM31 w wyniku modernizacji układu regulacji mocy. XXI Konferencja Naukowa POJAZDY SZYNOWE 2014, Wojanów, 26-28 maja 2014.
- [8] Barringer H P, Weber D P. Life Cycle Cost Tutorial. 5-th International Conference on Process Plant Reliability, TX: Gulf Publishing Company, 1996.
- [9] Barringer H P. A Life Cycle Cost Summary. International Conference of Maintenance Societies, Perth, Australia 2003: 20-23
- [10] Bianchi G M, Falfari S, Parotto M, Osbat G. Advanced modeling of common rail injector dynamics and comparison with experiments. SAE paper 2003-01-0006.
- [11] Володин А И. Моделирование на ЭВМ работы тепловозных дизелей. Транспорт, Москва, 1985.
- [12] Borghagen L, Brinkhagen L. LCC-procurement at the Swedish State Railways. Reliability and Maintainability Symposium 1984. Proceedings Annual IEEE, 1984: 349-358.

- [13] Chłopek Z. Badania zużycia energii przez samochód elektryczny w warunkach symulujących jazdę w mieście. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2013; 15(1): 75-82.
- [14] Chłopek Z, Piaseczny L. Uwagi o modelowaniu w badaniach naukowych. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2001; 4(11): 47-57.
- [15] Chłopek Z. Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe Seria „Mechanika” z. 173*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
- [16] CILECCTA: Sustainability within the Construction Sector, Life Cycle Costing and Assessment. CILECCTA project EU 7-th Framework Programme FP7/2007-2013, grant no. 229061, 2013. (www.cileccta.com)
- [17] Coe C K. Life Cycle Costing by State Governments. *Public Administration Review* 1981; 41: 564-69.
- [18] Department of Sport and Recreation, Government of Western Australia: Life Cycle Cost Guidelines Sport and Recreation Facilities, 2005.
- [19] DoD Guide for Achieving Reliability, Availability and Maintainability. USA Department of Defense, Washington, 2005.
- [20] Dokumentacja Systemu Utrzymania lokomotywy spalinowej serii SM31 typu 411D. PKP Cargo S.A., 2011.
- [21] Durairaj S K, Ong S K, Nee A Y C, Tan R B H. Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies. *Corporate Environmental Strategy* 2002; 9(1): 30-39.
- [22] EN 50126 Railway applications. The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS).
- [23] Fabrycky Wolter J, Blanchard B S. Life-Cycle Cost and Economic Analysis. Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, 1991.
- [24] Garcia Marquez F P, Lewis R W, Tobias A M, Roberts C. Life cycle costs for railway condition monitoring. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 2008; 44(6): 1175-1187.
- [25] Guzzella L, Onder Ch. Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems. Springer Verlag. 2nd ed., 2010.
- [26] Hebda M, Janicki D. Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji. Warszawa: WKiŁ, 1977.
- [27] Herder P M, van Luijk J A, Bruijnooge J. Industrial application of RAM modeling development and implementation of a RAM simulation model for the Lexan plant at GE Industrial, Plastics. *Reliability Engineering & System Safety* 2008; 93(4): 501-508.
- [28] Hokstad P. Life Cycle Cost Analysis in Railway Systems. SINTEF Safety and Reliability, 1998.
- [29] Jackson Y, Tabbagh P, Gibson P, Seglie E. The new Department of Defense (DoD) guide for achieving and assessing RAM. Reliability and Maintainability Symposium 2005. Proceedings Annual IEEE, 2005: 1-7.
- [30] Kawauchi Y, Rausand M. Life Cycle Cost (LCC) analysis in oil and chemical process industries. Norwegian University of Science and Technology 1999.
- [31] Kossov E E, Babel M. Zagadnienia modelowania eksploatacyjnych warunków pracy trakcyjnych silników spalinowych. *Silniki spalinowe* 1988; 2: 27-31.
- [32] Коссов Е Е, Нестрахов А С, Аникиев И П, Бычков Д А. Микропроцессорная система регулирования дизель - генератора. *Локомотив* 2002; 12: 14-15.
- [33] Коссов Е Е, Сухопаров С И. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов. Труды ВНИИЖТ. Интекст. Москва 1999.
- [34] Lamar W E. Review and Assessment of System Cost Reduction Activities. Proceedings NATO AGARD Conference on Design to Cost and Life Cycle Cost, 12-22 May, 1980.
- [35] Lynch J P, Karlaftis M G, Sinha K C, Fricker J D. The Indiana Public Transportation Management System. Report No. CE-TRA-95-1, Purdue University, 1995.
- [36] Ma H, Xu H M, Wang J H. Real-time control oriented HCCI engine cycle-to-cycle dynamic modelling. *International Journal of Automation and Computing* 2011; 8(3): 317-325.
- [37] Manzini R, Regattieri A, Pham H, Ferrari E. Maintenance for Industrial Systems. Springer, 2010.

- [38] Martorell S, Villanueva J F, Carlos S, Nebot Y, Sanchez A, Pitarch J L, Serradell V. RAMS+C informed decision-making with application to multi-objective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms. *Reliability Engineering & System Safety* 2005; 87(1): 65-75.
- [39] MIL-HDBK-259 Military Handbook, Life Cycle Cost in Navy Acquisitions. Global Engineering Documents 1983.
- [40] MIL-HDBK-276-1 Military Handbook, Life Cycle Cost Model for Defense Material Systems, Data Collection Workbook. Global Engineering Documents 1984.
- [41] MIL-HDBK-276-2 Military Handbook, Life Cycle cost Model for Defense Material Systems Operating Instructions. Global Engineering Documents 1984.
- [42] Navarro-Galera A, Ortúzar-Maturana R I, Muñoz-Leiva F. The application of life cycle costing in evaluating military investments: An empirical study at an international scale. *Defence and Peace Economics* 2011; 22(5): 509-543.
- [43] NCHRP: Bridge Life-Cycle Cost Analysis. Report No 483. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2003.
- [44] O'Connor P. *Practical Reliability Engineering*. John Wiley & Sons Ltd., 2010.
- [45] Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 11 sierpnia 2014 r. w sprawie wysokości stawek opłat za korzystanie ze środowiska na rok 2015. *Monitor Polski*, 18.09.2014 r., poz. 790.
- [46] Parra C, Crespo A, Kristjanpoller F, Viveros P. Stochastic model of reliability for use in the evaluation of the economic impact of a failure using life cycle cost analysis. Case studies on the rail freight and oil industries. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability* 2012; 226(4): 392-405.
- [47] PN-EN 60300-3-3 Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań - Szacowanie kosztu cyklu życia.
- [48] PN-EN 61703 Wyrażenia matematyczne dotyczące nieuszkodzalności, gotowości, obsługiwalności i zapewnienia środków obsługi.
- [49] Reiger A J. Solar Energy: The Market Realities. *Real Estate Review* 1979; 8: 49-52.
- [50] Senthil Kumaran D, Ong S K. Environmental life cycle cost analysis of products. *Environmental Management and Health* 2001; 12(3): 260-267.
- [51] Sharma R K, Kumar D, Kumar P. Performance modeling in critical engineering systems using RAM analysis. *Reliability Engineering & System Safety* 2008; 93(6): 891-897.
- [52] Sherif Y S, Kolarik W J. Life cycle costing: concept and practice. *Omega* 1981; 9(3): 287-296.
- [53] Smith D J. *Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers*. Butterworth-Heinemann, 2011.
- [54] Strategia odnowy parku lokomotyw w przedsiębiorstwie PKP LHS Sp. z o. o. Projekt nr M8/599/2007. Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2007.
- [55] Studium techniczno-ekonomiczne odnowy parku pojazdów trakcyjnych eksploatowanych przez PKP CARGO S.A. Projekt nr M8/631/2006. Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków, 2006.
- [56] Szkoda M, Babeł M, Kossov E E. Анализ стоимости жизненного цикла (LCC) при оценке эффективности подвижного состава. *Вестник ВНИИЖТ* 2013; 6: 55-59.
- [57] Szkoda M. Assessment of Reliability, Availability and Maintainability of Rail Gauge Change Systems. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2014; 16(3): 422-432.
- [58] Szkoda M. Ocena efektywności ekonomicznej środków transportu szynowego z zastosowaniem analizy LCC. *TTS Technika Transportu Szynowego* 2012; 11-12: 64-69.
- [59] ten Wolde M, Ghoobar A A. Optimizing inspection intervals - Reliability and availability in terms of a cost model: A case study on railway carriers. *Reliability Engineering & System Safety* 2013; 114: 137-147.
- [60] Watson N. Transient performance simulation and analysis of turbocharged diesel engines. No 810338. SAE Technical Paper 1981: 1-19.
- [61] Wendeker M, Godula A. Research on variability in control parameters for spark ignition engines in real-life operation. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2002; 16(4): 12-23.
- [62] Zellbeck H, Woschni G. Rechnerische Untersuchung des dynamischen Betriebs-verhaltens aufgeladener Dieselmotor. *MTZ* 1983; 3: 81-86.

- [63] Zoeteman A. Asset maintenance management: state of the art in the European railways. *International Journal of Critical Infrastructures* 2006; 2(2/3): 171-186.