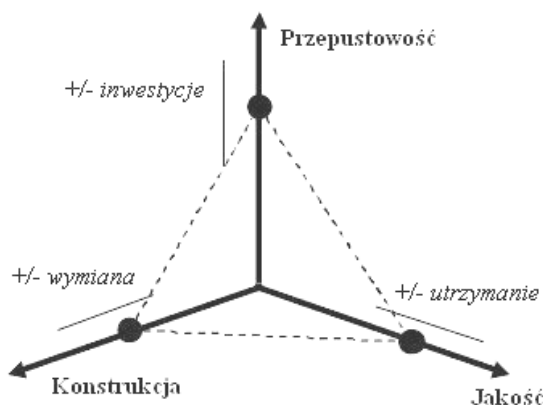


Ekonomiczne aspekty strategii utrzymania torów kolejowych

WSTĘP

Tor kolejowy stanowi pewnego rodzaju system, który można opisać trzema podstawowymi elementami: przepustowością, konstrukcją i jakością (Rys.1). Przepustowość może być wyrażona jako użyteczność (dostępność) toru kolejowego w określonym przedziale czasu do wykonywania przewozów kolejowych. Konstrukcja związana jest ze stanem elementów nawierzchni kolejowej i podtorza, a wysoka jej wartość oznacza, że tor jest nowy. Natomiast jakość określona jest poprzez stan geometrii toru kolejowego i opisana jego nierównościami oraz ich wskaźnikami statystycznymi i syntetycznymi.



Rys. 1. Podstawowe elementy systemu [1]

Zarządzanie infrastrukturą kolejową będzie polegało na odpowiednim ustaleniu wartości tych trzech parametrów na odpowiednim poziomie w celu maksymalnej efektywności całego systemu. Przepustowość linii kolejowych może być regulowana poprzez odpowiednią politykę inwestycyjną, konstrukcja poprzez strategię prowadzenia wymiany elementów nawierzchni kolejowej (naprawy główne), a jakość będzie związana ze strategią utrzymania (konserwacja i naprawy bieżące).

Odpowiednie dostosowanie tych parametrów wymaga jednak planowania w różnych okresach czasowych (Tab.1).

Tab. 1. Zakres planowania systemu [1]

Parametry	Okres planowania	Czynniki decydujące
Przepustowość linii kolejowej	od 5 do 20 lat	Modernizacja linii kolejowej, budowa nowych torów, zmiana systemu sterowania itd.
Stan nawierzchni kolejowej	od 2 do 5 lat	większa lub mniejsza liczba napraw głównych (podtorza, podsypki, podkładów i szyn)
Jakość geometrii toru	od 1 do 5 lat	większa lub mniejsza liczba napraw bieżących (szlifowania szyn, regulacji osi toru itp.)

Brak odpowiedniej polityki inwestycyjnej i strategii utrzymaniowej może prowadzić w konsekwencji do obniżenia przepustowości linii kolejowej oraz zmniejszenia bezpieczeństwa ruchu

¹ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Transportu Szynowego kedra@pg.gda.pl

kolejowego. Odzyskanie odpowiedniej wydajności infrastruktury w krótkim okresie czasu jest bardzo trudne do uzyskania i może skutkować utrudnieniami w ruchu nawet przez wiele lat.

Wzrost przewozów powoduje pogorszenie stanu infrastruktury, co w konsekwencji skutkuje zwiększonym zapotrzebowaniem na naprawy. Jeżeli prace utrzymaniowe nie są prowadzone to stan infrastruktury ulega dalszemu pogorszeniu, co prowadzi do ograniczenia prędkości pociągów i zmniejszenia bezpieczeństwa. Zły stan elementów nawierzchni jest również przyczyną pogorszenia się geometrii toru. To powoduje zwiększone obciążenia dynamiczne i przyspiesza degradację nawierzchni i tym samym skraca jej trwałość.

W ostatnich latach coraz więcej uwagi poświęca się analizie kosztów cyklu życia (Life Cycle Cost - LCC) w zakresie planowania strategii utrzymania infrastruktury kolejowej [6,7]. Większość prac ogranicza się jednak do kosztów bezpośrednich (tzw. planowanych), takich jak budowy, konserwacji, odnowienia i utylizacji. Takie podejście prowadzi do niedoszacowania kosztów wynikających z niskiej jakości geometrii toru.

Ograniczenia kosztów utrzymania torów kolejowych było powszechnie stosowane w wielu krajach europejskich i jest zauważalne do chwili obecnej. Wielu zarządców infrastruktury kolejowej celem oszczędności krótkoterminowych drastycznie ograniczało budżet na utrzymanie torów, co spowodowało problemy związane z szybką degradacją infrastruktury i wprowadzeniem licznych ograniczeń prędkości.

W dłuższej perspektywie czasowej koszty wynikające z opóźnień pociągów, wcześniejszej wymiany nawierzchni i bardzo często wypadków są dużo większe, niż uzyskane wcześniej oszczędności. Dlatego tak istotne jest rozszerzenie LCC o koszty wynikające z niskiej jakości toru, planując długi okres użytkowania infrastruktury [5].

1. KOSZT CYKLU ŻYCIA LCC

Koszt cyklu życia analizowany w fazie projektowania toru kolejowego [6,7], zmienia się, gdy system przechodzi do eksploatacji, co jest wynikiem zmiany wymagań zainteresowanych stron. W fazie działania koszty eksploatacji i naprawy infrastruktury kolejowej są dominujące i składają się z kosztów diagnostyki, konserwacji, naprawy bieżącej i głównej [4].

W tabeli 2 przedstawiono najczęściej wykonywane naprawy torów w fazie utrzymania i odnowy nawierzchni kolejowej oraz czynniki decydujące o konieczności wykonania tych robót.

Tab. 2. Rodzaje napraw i czynniki decydujące o jej rozpoczęciu

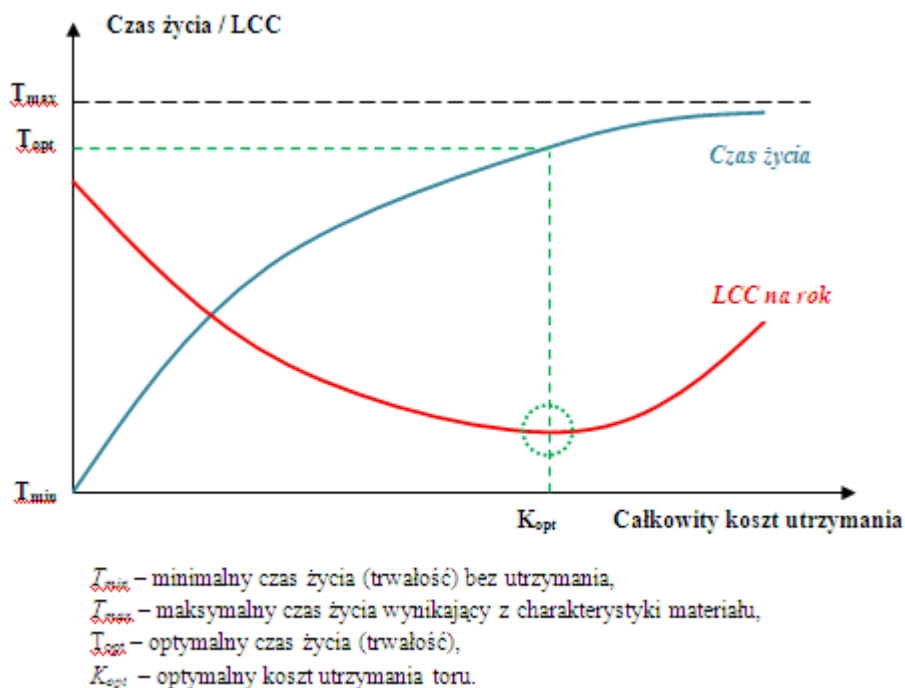
Rodzaj naprawy	Rodzaje robót	Czynnik decydujący o naprawie
Napraw bieżąca	Szlifowanie szyn	Obciążenie
	Regulacja osi toru	Stan geometrii toru
	Oczyszczanie podsypki	Stan podsypki
	Diagnostyka toru	Czas
Naprawa główna (odnowa)	Wymiana szyn	Stopień degradacji szyn
	Wymiana podkładów	Stopień degradacji podkładów
	Wymiana przytwierdzeń	Stopień degradacji przytwierdzeń
Naprawa interwencyjna	Pojedyncza wymiana szyn	Uszkodzenia lub pęknięcie szyny

Koszty utrzymania nawierzchni kolejowej są bardzo złożonym składnikiem kosztów aktywów z uwagi na długotrwały i ciągły proces eksploatacji infrastruktury. Koszty napraw mogą być oszacowane za pomocą znanych metod, jednak obliczenie kosztów utrzymania nawierzchni przez cały okres eksploatacji jest dużo bardziej skomplikowane. Wynik to z faktu, że rodzaj, termin i zakres prowadzonych napraw zależy od wielu czynników, z których najważniejszymi są polityka utrzymaniowa i ograniczenia budżetu na utrzymanie.

Optymalizacja kosztów będzie polegać na znalezieniu kompromisu pomiędzy wymianą elementów nawierzchni kolejowej (ich odnową), a strategią utrzymania torów. Oparta jest ona na rocznej analizie kosztów cyklu życia i założeniu, że czas życia (trwałość) konstrukcji toru rośnie przy zwiększonych nakładach na utrzymanie. Czas życia konstrukcji nie może być jednak nieskończenie przedłużany w wyniku napraw toru (Rys.2).



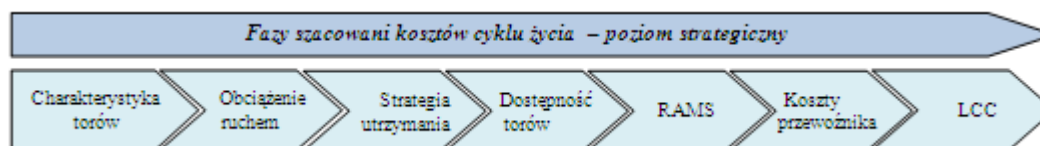
Istnieje zatem minimalna wartość rocznych nakładów na utrzymanie torów (Rys.2 – K_{opt}), która zapewni optymalny koszt cyklu życia [2].



Rys. 2. Optymalizacja kosztów utrzymania torów kolejowych [2]

Szacowanie kosztów cyklu życia LCC jest procesem złożonym, ponieważ każda zmiana planu utrzymania może mieć wpływ na ostateczną rentowność, a zatem i koszty dostępu do infrastruktury. Jeżeli wydłużymy okres kolejnej regulacji osi toru (cykl podbijania) z 2 do 3÷4 lat, to wszystkie rodzaje kosztów i czas życia infrastruktury zmienią się. Koszty bezpośrednie i LCC maleje, a wzrastają częściowo koszty stałe i społeczne.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe etapy szacowania koszt cyklu życia LCC na poziomie strategicznym zaproponowanym przez Li [2].



Rys. 3. Fazy szacowania LCC [2]

W pierwszym etapie analizy należy określić charakterystykę toru kolejowego, która powinna zawierać takie dane jak: maksymalne obciążenie na oś, liczba odcinków torów, liczbę rozjazdów i skrzyżowań torów, profil prędkości linii, stan podtorza, podsypki, podkładów, szyn i przytwierdzeń. Dane te powinny pozwolić na podział linii kolejowej na odcinki o jednorodnej degradacji z uwagi na obciążenie, typ i stan elementów konstrukcji nawierzchni oraz geometrię toru.

W drugiej fazie należy określić wartość obciążenia brutto infrastruktury na podstawie przewidywanego ruchu, który może obejmować takie dane jak: liczbę pociągów pasażerskich i towarowych dziennie, natężenie ruchu w nocy i weekendy, wzrost ruchy w ciągu roku, czas zajętości torów, średnia liczba pasażerów w pociągu, itd. Dane te pozwolą również na oszacowanie strat poniesionych przez przewoźników w wyniku prowadzenia robót utrzymaniowych, które mogą być istotnym czynnikiem decyzyjnym w procesie planowania napraw.

W fazie trzeciej szacowany jest wpływ strategii utrzymania torów i rozjazdów kolejowych na koszt cyklu życia, degradację elementów nawierzchni i jakość geometrii toru kolejowego (zagadnienie omówiono w punkcie 3).

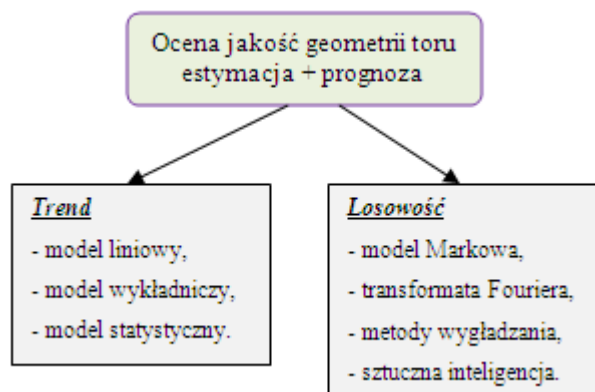
W czwartym etapie szacowana jest dostępność torów w celu wykonania napraw bieżących i głównych oraz koszt prowadzenia robót w różnych okienkach czasowych. Wykonanie naprawy w nocy, w krótkim okresie czasowym jest droższe, niż w dzień przy dłuższym zamknięciu toru.

W fazie piątej i szóstej szacowany jest koszt opóźnień i awarii w oparciu o metodę RAMS oraz straty przewoźnika i pasażera.

W fazie wyjściowej otrzymujemy przegląd kosztów cyklu życia LCC, które mogą obejmować: wykres jakości toru w czasie, wykres LCC z podziałem na rodzaje kosztów, wykres kosztów rocznych oraz inne zestawienia ogólne i szczegółowe według potrzeb.

2. MODELE JAKOŚCI GEOMETRII TORU

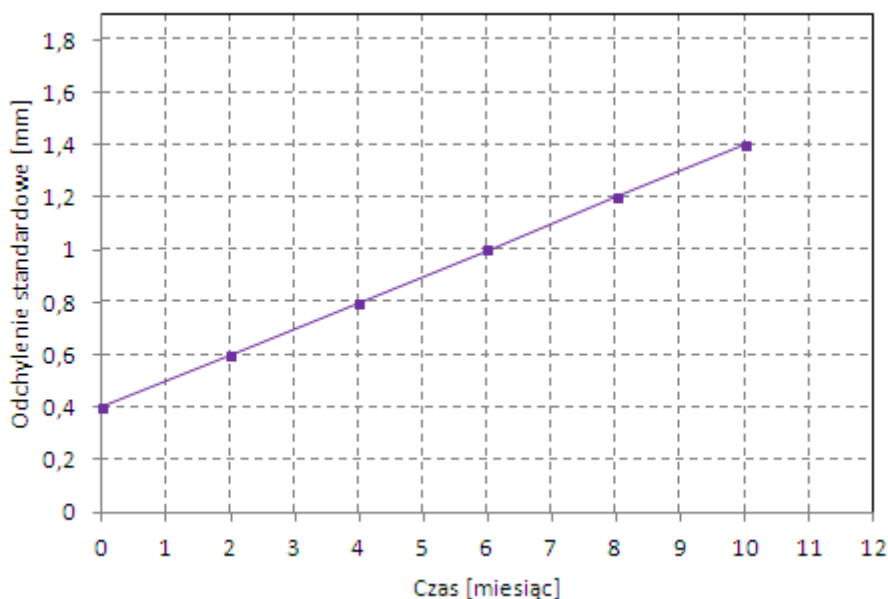
Jednym z istotnych etapów szacowania kosztów cyklu życia jest opracowanie i przyjęcie modeli oceny degradacji geometrii toru i elementów nawierzchni kolejowej. Modele te powinny pozwalać na estymację i prognozowanie stanu infrastruktury w funkcji czasu lub obciążenia, a ich podział według normy [14] przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Modele oceny stanu geometrii toru według normy [14]

Tylko w dwóch ostatnich latach ukazało się kilka publikacje w prestiżowych czasopismach dotyczące problemu modelowania degradacji geometrii toru kolejowego, między innymi w pracach [10,12,15]. Przedstawione rozwiązania bardzo często są czysto naukowe i trudne do zastosowań praktycznych z uwagi na dużą niejednorodność geometryczną toru.

W praktyce do oceny jakości geometrii toru najczęściej stosowane są modele liniowe lub wykładnicze.



Rys. 5. Model liniowy oceny jakości geometrii toru



W 1990 r. po raz pierwszy Esveld [13] przedstawił liniowy model degradacji geometrii toru kolejowego (Rys.5) wykorzystujący odchylenia standardowe nierówności pionowych obliczone na odcinkach toru o długości 200 m, opisany zależnością:

$$\sigma = c_1 + c_0 T \quad (1)$$

gdzie:

- σ – odchylenie standardowe nierówności pionowych [mm],
- c_1 – początkowa wartość odchylenia po naprawie głównej lub podbiciu toru [mm],
- c_0 – współczynnik degradacji toru [mm/Tg],
- T – obciążenie pomiędzy kolejnymi podbiciami toru [Tg].

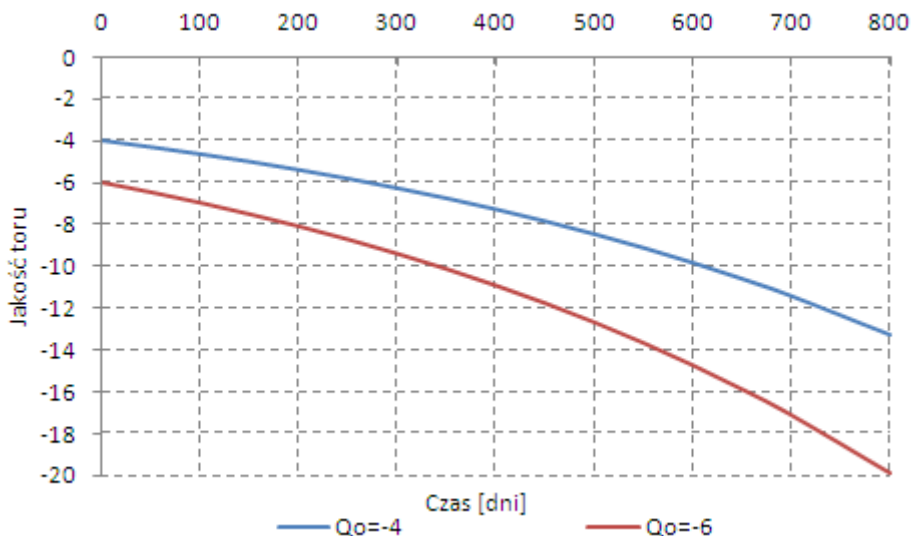
Wartość współczynników c_1 i c_0 zależy również od miejsca położenia toru (most, stacja, szlak) i są odmienne dla rozjazdów kolejowych [11].

Do opisu degradacji geometrii toru kolejowego bardzo często stosowane są modele nieliniowe, na przykład model wykładniczy (Rys.6) przedstawiony przez Veita [5].

$$Q = Q_0 \cdot e^{bt} \quad (2)$$

gdzie:

- Q – obecna jakość toru,
- Q_0 – jakość toru po modernizacji ($t=0$),
- b – współczynnik degradacji toru,
- t – czas.



Rys. 6. Model wykładniczy oceny jakości geometrii toru

W modelach wykładniczych uwzględniony jest również nieliniowy wpływ początkowej jakości geometrii toru kolejowego Q_0 na wartość Q . Gorsza jakość robót w czasie modernizacji linii kolejowej lub naprawy bieżącej przyspiesza degradację geometrii toru (Rys.6).

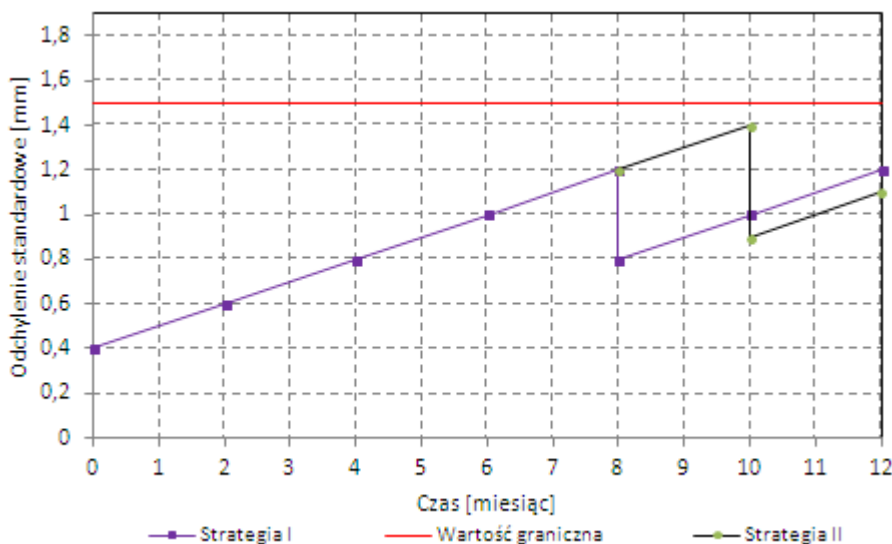
3. STRATEGIA UTRZYMANIA TORU

Strategia podbijania toru powinna uwzględniać następujące czynniki:

- a) przewidywaną degradację geometrii toru,
- b) miejsca krytyczne, gdzie występują problemy z utrzymaniem prawidłowej geometrii toru,
- c) dane o geometrii toru w miejscach, gdzie występują problemy,
- d) dostępność podbijarek torowych,
- e) usuwanie pojedynczych usterek geometrii toru,
- f) wartości graniczne, kiedy podbijanie staje się nieopłacalne,
- g) korzyści z oszczędności długoterminowych, kosztem oszczędności w krótkim okresie czasu.

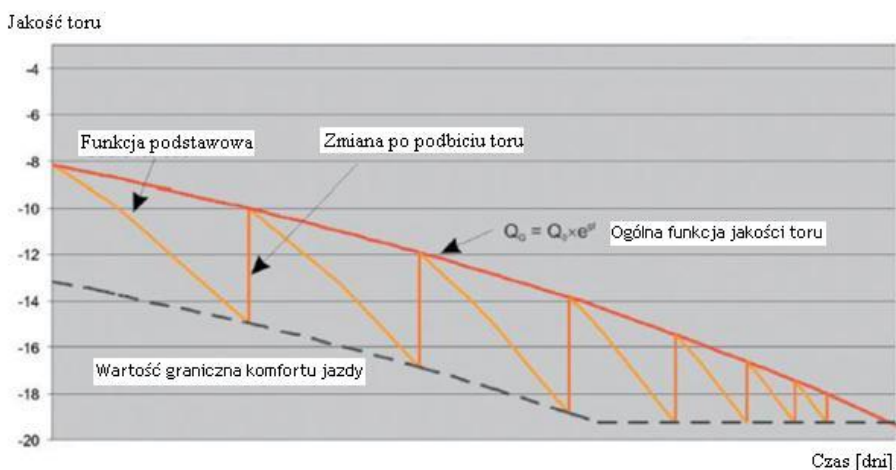
Strategia utrzymania toru kolejowego może być oparta na przykład o wartości odchylenia standardowego nierówności pionowych mierzonych drezyną pomiarową i wówczas należy:

- ustalić wartości granicznych odchylenia standardowego, kiedy należy prowadzić regulację osi torów za pomocą podbijarek torowych – czas podbijania,
- wyznaczyć odcinki toru, na których należy wykonać podbijania toru – miejsce podbijania,
- ustalić przyczynę występowania pojedynczych usterek i jeżeli nie zagrażają bezpieczeństwu, to ich nie podbijać.



Rys. 7. Przykład strategii utrzymania toru

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe strategie utrzymania w oparciu o obliczoną wartość odchylenia standardowego nierówności pionowych, przyjmując model liniowej degradacji geometrii toru. Strategia I przewiduje wykonanie podbijania toru po 8 miesiącach, a strategia II po 10 miesiącach. W konsekwencji zastosowanie strategii I, czyli wcześniejsze wykonanie podbijania toru, spowoduje zwiększenie kosztów utrzymania toru. Dodatkowo po 12 miesiącach eksploatacji jakość toru, gdzie zastosowano strategię I będzie gorsza (większe odchylenie standardowe), niż w przypadku strategii II.



Rys. 8. Przykład degradacji toru kolejowego [5]

Koleje austriackie stosują obecnie model wykładniczy degradacji geometrii toru kolejowego (Rys.8) opracowany przez politechnikę w Graz [5]. Planowe prowadzenie robót utrzymaniowych może wydłużyć czas użytkowania toru, ale nigdy nie uzyskamy jakości nowego toru. Jakość toru spada w czasie i żeby nie przekroczyć wartości dopuszczalnej należy wykonać podbijanie toru. W



końcowej fazie utrzymania jakość toru bardzo szybko się pogarsza i prace naprawcze stają się nieopłacalne.

WNIOSKI

Szacowanie kosztów cyklu życia jest procesem złożonym, gdyż każda zmiana planu utrzymania może mieć wpływ na ostateczną rentowność inwestycji, a zatem i koszty dostępu do infrastruktury. Analizując zatem LCC szczególną uwagę należy zwrócić na koszty związane ze strategią utrzymania toru kolejowego. Niska jakość geometrii toru w dłuższej perspektywie czasowej generuje dodatkowe koszty wynikające z opóźnień pociągów i wcześniejszej wymiany nawierzchni, co powoduje, że koszty są dużo większe, niż uzyskane wcześniej oszczędności.

Strategia utrzymania toru powinna uwzględniać między innymi: przewidywaną degradację geometrii toru; miejsca krytyczne, gdzie występują problemy z utrzymaniem prawidłowej geometrii toru; dostępność podbijań torowych; wartości graniczne, kiedy podbijanie staje się nieopłacalne oraz korzyści z oszczędności długoterminowych, kosztem oszczędności w krótkim okresie czasu.

Streszczenie

W ostatnich latach coraz więcej uwagi poświęca się analizie kosztów cyklu życia (Life Cycle Cost - LCC) w zakresie planowania strategii utrzymania infrastruktury kolejowej. Większość prac ogranicza się jednak do kosztów bezpośrednich (planowanych), takich jak budowy, konserwacji, odnowienia i utylizacji. Takie podejście prowadzi do niedoszacowania kosztów wynikających z niskiej jakości geometrii toru.

W artykule przedstawiona została metoda planowania strategicznego kosztów cyklu życia infrastruktury kolejowej, która stosowana jest w wielu krajach europejskich. W obliczeniach uwzględnione zostały koszty ponoszone przez przewoźników kolejowych i pasażerów oraz koszty utrzymania i odbudowy infrastruktury kolejowej. Przedstawiono również przykładowe modele degradacji geometrii toru kolejowego i wpływ niskiej jakości toru na koszt cyklu życia.

Economic aspects of railway track maintenance strategy

Abstract

In recent years more and more attention is paid to the analysis of life-cycle cost (LCC) in the planning of railway infrastructure maintenance strategy. Most of the work however, limited to direct costs (planned), such as construction, maintenance, renewal and disposal. This approach leads to an underestimation of the costs resulting from poor quality of track geometry.

The paper presents the method of strategic planning life cycle costs of railway infrastructure, which is used in many European countries. The calculations were included costs incurred by the rail operators and passengers, and the cost of maintenance and rehabilitation of railway infrastructure. It also presents examples of models of railway track geometry degradation and the impact of low-quality track geometry to the life cycle cost.

BIBLIOGRAFIA

1. Putallaz, Y., Rivier, R. and al: Long-term railways infrastructure maintenance and renewal policy (chapter 3). *Deliverable D6: Methods for Capacity and Resource Management*. IMPROVERAIL – EC Fifth Framework Programme (Growth), pp. 61-109, 2003.
2. Li R. and al.: *Framework for Railway Phase-based Planning*. Proceedings from the Annual Transport Conference at Aalborg University. 2013, pp. 1-14. www.trafikdage.dk/artikelarkiv. ISSN 1603-9696.
3. Vale C., Ribeiro I., Calçada R.: *Application of a maintenance model for optimizing tamping on ballasted tracks: the influence of the model constraints*. 2nd International Conference on Engineering Optimization. September 6-9, 2010, Lisbon, Portugal, pp. 1-8.
4. Patra A., Söderholm P., Kumar U.: *Uncertainty estimation in railway track life cycle cost: a case study from Swedish National Rail Administration*. Proc. IMechE Vol. 222 Part F: J. Rail and Rapid Transit, pp. 1-9, 2008.

5. Veit P.: *Track Quality – Luxury or Necessity?* Maintenance & Renewal, Railway Technical Review (RTR) Special, Vol. 47/2007, pp. 8.
6. Zoeteman A.: *Life Cycle cost analysis for managing rail infrastructure.* European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR), 1, no. 4/2001, pp. 391-413.
7. Zoeteman A.: *Asset maintenance management: state of the art in the European railways.* International Journal of Critical Infrastructures, Vol. 3, No 2/3, 2006, pp.171-186.
8. Bałuch H., Bałuch M.: *Determinanty prędkości pociągów – układ geometryczny i wady toru.* Instytut Kolejnictwa, Warszawa 2010.
9. Decyzja komisji z dnia 26 kwietnia 2011 r. dotycząca technicznej specyfikacji interoperacyjności podsystemu „infrastruktura” transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnych. 2011/275/UE.
10. Vale C., Lurdes S.: *Stochastic model for the geometrical rail track degradation process in the Portuguese railway Northern Line.* Reliability Engineering and System Safety, No 116, 2013, pp. 91-98.
11. Andrade A., Teixeira P.: *A Bayesian model to assess rail track geometry degradation through its life-cycle.* Research in Transportation Economics, No 36, 2012, pp. 1-8.
12. Sadeghi J.: *Development of Rail Track Geometry Indexes Based on Statistical Distribution on Geometry Data.* Journal of Transportation Engineering, August 2010, pp.693-700.
13. Esveld C.: *Computer-aided maintenance and renewal of track.* ASME/IEEE Joint Railroad Conference, 1990, pp. 165-170.
14. EN 13848-6 Railway applications - Track - Track geometry quality Part 6: *Characterization of track geometry quality.* (Draft 2012).
15. Perrin G. and al.: *Track irregularities stochastic modeling.* Probabilistic Engineering Mechanics, No 34, 2013, pp. 123-130.