

# Metody analizy kosztu cyklu życia w odniesieniu do trasy kolejowej

**Na drogi kolejowe w Niemczech wydawane są rocznie miliardy marek. Problem analizy kosztów był zawsze uwzględniany, ale rzadko z punktu widzenia kosztu cyklu życia. Przy finansowym wsparciu ze strony Fundacji Hermanna i Ellen-Klaprothów podjęte zostały wspólnie na Politechnice w Berlinie (Technische Universität Berlin) oraz w Wyższej Szkole Inżynierskiej w Brandenburgu (Fachhochschule Brandenburg) cztery projekty mające na celu opracowanie metody określenia kosztów cyklu życia nawierzchni kolejowej, przy uwzględnieniu nowych wyników badań dotyczących zachowania się tłucznia, szyn i nawierzchni twardej.**

Na specjalizacji kolejowe drogi jezdne i eksploatacja kolei Politechniki w Berlinie, przy finansowym wsparciu Fundacji Hermanna i Ellen-Klaprothów, opracowywana jest metoda obliczania kosztu cyklu życia (life cycle cost – LCC) w odniesieniu do toru kolejowego.

## Rozgraniczenie obiektu badań od środowiska systemowego

Przed obliczeniem kosztów cyklu życia jakiegoś obiektu należy dokonać rozgraniczenia między obiektem a środowiskiem. W pierwszym przybliżeniu, dla ogólnego porównania różnych metod budowy wystarczy jedynie uwzględnić tylko rodzaj nawierzchni. Sieć trakcyjna, urządzenia sterujące i zabezpieczające, obiekty inżynierskie i podłoże nie będą brane pod uwagę. Jako dalsze uproszczenie przyjmuje się tor prostoliniowy, bez rozjazdów.

Przy tak przyjętych uproszczeniach rozważania ograniczone zostaną na początku do najdokładniejszego uchwycenia kosztów i procesu zużycia. Późniejsze rozszerzenia dotyczące rozpatrywanego obiektu są w każdej chwili możliwe. Wysokość kosztów cyklu życia, wskutek uwzględnienia różnych rozszerzeń, może zmienić się nawet znacznie. Jeżeli np. pod uwagę wziąć obiekty inżynierskie oraz łuki, koszty roczne przesuną się w kierunku typu nawierzchni, która

wymaga mniej nakładów, niż zakrojone na szeroką skalę wytyczenie linii. Tak więc, w następstwie przyjęcia większej stabilności położenia toru poprzez zastosowanie nawierzchni betonowej, zwiększone muszą być przechyłki toru na łukach, niż przy nawierzchni z tłucznia. Oszczędności poczynione na konstrukcjach mostowych i tunelach oraz różne długości tras znacznie wpływają na wynik obliczenia kosztów cyklu życia.

Przy zabudowie nawierzchni betonowej nie ma konieczności przeprowadzania prac naprawczych toru i oczyszczania podsypki. Szacuje się, że okres między przebudowami toru będzie o wiele dłuższy, niż podobne cykle przy naprawie nawierzchni z tłucznia. Poprzez pomniejszone w ten sposób nakłady na utrzymanie nawierzchni możliwe są większe odstępy w linii napowietrznej, niż ma to miejsce na trasie szybkiego ruchu z Berlina do Hanoweru. Mniejsza liczba zwrotnic zmniejsza w sposób znaczący koszty inwestycyjne, jak również koszty utrzymania.

Rozważania dotyczące toru kolejowego powinny obejmować nawierzchnię od jej krawędzi dolnej. Podtorze powinno być wówczas uwzględniane w kosztach, gdy przy porównaniu dwóch torów kolejowych występuje duża różnica nakładów na podtorze, tzn. mamy do czynienia z zastosowaniem różnego rodzaju warstw konstrukcyjnych o różnych grubościach. W przypadku, gdy ze względu na wybór określonego rodzaju nawierzchni stawiane są szczególne wymagania dotyczące podłoża, powstające z tego powodu dodatkowe nakłady powinny być również uwzględnione w rachunku kosztów.

## Analiza dotycząca odcinka toru

Do obliczenia kosztu cyklu życia toru kolejowego należy dokonać podziału toru na odcinki. Większa liczba odcinków tworzy wówczas sieć torów lub sieć odcinków, tak że na bazie kosztów cyklu życia poszczególnych odcinków mogą zostać określone koszty całej sieci. Podziału toru na odcinki można dokonać stosując jedną z dwóch możliwych metod: podział toru na odcinki równoległe lub podział na homogeniczne (jednolite) konstrukcje budowli.

Podział na odcinki równoległe ma tę zaletę, że odniesienie do miejsca pozostaje niezmiennie. Jako wadę należy wymienić to, że na jednym odcinku mogą występować różne obiekty inżynierskie (mosty, tunele, nasypy, wykopy) i elementy trasowania znacznie różniące się pod względem nakładów. Utrudnione jest przez to przejrzyste ujęcie kosztów.

Zaletą homologicznego potraktowania odcinków nawierzchni jest bezpośredni związek między powstającymi kosztami, rodzajem nawierzchni, trasowaniem i obciążeniem eksploatacyjnym. Przeprowadzając analizę pod względem okresu użytkowania, każdy z homogennych (jednorodnych) pierwotnie odcinków trasy może podzielić się na dwa lub więcej różnorodnych odcinków. Zakłócenie jednorodności odcinka trasy może nastąpić poprzez częściową przebudowę torów, jak również przez wykonywanie różnych pod względem intensywności prac utrzymaniowych na części jakiegoś odcinka jednorodnego.

Aby przeciwdziałać atomizacji odcinków toru, należało by podziału toru dokonywać tylko wówczas, gdy zmianie ulegnie rodzaj nawierzchni. Dla przebudowanego odcinka toru zaczyna się tym samym nowy cykl życia. Należy przy tym zwrócić uwagę, że tą metodą w ekstremalnym przypadku tworzone mogą być bardzo krótkie odcinki toru. Dotyczy to szczególnie tras drugorzędowych, na których mogą występować odcinki o długości mniejszej niż 100 m.

### Fazy życia

Fazy życia jakiegoś obiektu podzielone są na wiele faz czasowych, począwszy od fazy projektowania, aż po jego eliminację z eksploatacji i fazę utylizacji. Każda z tych faz reprezentuje pewien odcinek życia urządzenia, na który przypadają określone koszty cyklu życia. W ten sposób uwzględniane są nie tylko wszystkie powstające koszty, ale wynika z tego również przejrzysty przegląd kosztów charakterystycznych dla określonej fazy życia urządzenia. Należy rozróżnić co najmniej następujące fazy: projektowanie, wytworzenie, użytkowanie/eksploatacja i eliminacja obiektu ze względu na jego zużycie/złomowanie.

Szczególnie przy wytwarzaniu produktu nowego typu, czy produktu o właściwościach kompleksowych, jak np. pojazdu, w pierwszej fazie (projektowanie) można rozróżnić jeszcze następujące etapy: koncepcja, projekt wstępny oraz projekt szczegółowy. Chociaż na te trzy fazy projektowania obiektu przypada wprawdzie tylko około 20 do 25% sumarycznego kosztu cyklu życia, fazy te decydują o około 90% przyszłych kosztów [6]. Nie zostało wymienione jakich obiektów dotyczy to stwierdzenie, jednakże podobne dane podane zostały dla przedsiębiorstwa tramwajowego Stuttgarter Straßenbahn AG w Stuttgarcie [2].

Przy wyliczaniu kosztów LCC dla nowego, będącego jeszcze na etapie planowania obiektu, następuje konfrontacja z wieloma zagadnieniami, do rozwiązania których nie ma się żadnej pewności. Okres cyklu życia, przebieg zużywania się nawierzchni i koszty wytworzenia są częściowo lub są nie do określenia z wymaganą dokładnością. Z tego też względu należy wesprzeć się danymi doświadczalnymi dotyczącymi już zrealizowanych obiektów.

Do analizy kosztów LCC potrzebne są dane rzeczywiste. Wraz z rozszerzaniem się dostępnej bazy danych, zwiększa się również wiedza o podlegających analizie obiektach, możliwości ich intensywnego użytkowania, zdolności do wykonywania napraw, czasu cyklu życia i ich słabych punktach. Nowo wyprodukowane obiekty charakteryzują się naj-

częściej najnowszymi standardami technicznymi, wytwarzane są z wykorzystaniem nowego rodzaju materiałów i przy wprowadzeniu nowych metod produkcji oraz zastosowaniu całkowicie innych jakościowo komponentów systemowych (takich np. jak: systemy lokalizacji, czy katalizatory w budowie pojazdów). Wprowadzenie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, zmienione warunki zastosowania i zmienione wymagania odnośnie okresu trwałości życia nie pozwalają na proste, bezpośrednie przejście modelu kosztów poprzednich modeli.

Do oszacowania oczekiwanych w przyszłości kosztów przyjmuje się metodę prognozowania kosztów LCC. Przy wykorzystaniu zasady wzrostu kosztów mogą zostać oszacowane koszty produkcji, jak również koszty poszczególnych działań. Okres trwałości życia, charakterystyka robocza i charakterystyka uszkodzeń uzyskiwane są za pomocą specjalnych narzędzi symulacyjnych. Przeprowadzana w czasie użytkowania analiza LCC z jednej strony poszerza istniejącą bazę danych, lecz z drugiej strony weryfikuje również dokładność metod prognostycznych.

Charakterystyka toru kolejowego nie jest do tej pory zadowalająco poznana. Dotyczy to również stosowanej od 150 lat nawierzchni tłuczniowej o różnych konstrukcjach. Nieznany do tej pory, przyjmowanymi tylko szacunkowo, parametrami są: okres trwałości życia, charakterystyka zużywania się, cykle czynności do utrzymania toru w dobrym stanie technicznym oraz koszty. A więc również obliczanie kosztu cyklu życia nawierzchni jest skazane w dużej mierze na wykorzystanie aktualnie zdobywanych danych.

Oprócz opracowania sposobu postępowania do obliczania kosztu cyklu życia toru kolejowego, fundacja Hermann-und Ellen-Klaproth przygotowuje następujące projekty:

- Model symulacyjny nawierzchni trwałej (Katedra Linii Kolejowych i Eksploatacji Kolei na Uniwersytecie Technicznym w Berlinie).
- Osiadanie i niszczenie tłuczni (Instytut Lotnictwa i Astronautyki, Uniwersytet Techniczny w Berlinie).
- Uszkodzenia powierzchni jezdnej szyny (Wydział Techniki, Wyższa Szkoła Techniczna w Brandenburgu).

Wyniki badań uzyskane na bazie tych trzech projektów umożliwiają przeprowadzanie analizy LCC oraz prognozowanie LCC różnych rodzajów nawierzchni toru kolejowego.

W przedstawionym modelu kosztów LCC uwzględnionych zostało pięć faz: badania i opracowanie, planowanie, budowa nawierzchni, eksploatacja oraz przebudowa toru.

### Baza danych

Jak już wspomniano, do przeprowadzenia analizy kosztów cyklu życia konieczna jest wiarygodna baza danych. Wraz ze wzrostem dokładności dostępnej bazy danych wzrasta dokładność obliczenia kosztów LCC. W umowach pomiędzy producentami pojazdów szynowych a użytkownikami zawierane są zastrzeże-

Rok	km 45	km 46	km 51	km 54	km 58
2000	UIC 60 B 70 W				Nawierzchnia twarda Rheda
2020	UIC 60 B 70 W		UIC 60 B 75 W		Nawierzchnia twarda Rheda
2040	UIC 60 B 70 W	Ciągłe podparcie szyn		UIC 60 B 75 W	Nawierzchnia twarda Rheda

Rys.1. Podział toru na odcinki homogenne (jednorodne)

nia, aby dane uzyskiwane z procesu konserwacji i napraw udostępniane były wytwórcom urządzeń. Często się zdarza, że czynności utrzymania urządzeń w dobrym stanie technicznym pozostawiane są wytwórcy. Pomimo trudności powstających przy zawieraniu umów, przy właściwym ujęciu problemu, korzyści odnoszą obie strony umowy: użytkownik zmniejsza ryzyko wynikające z nieznanych mu przyszłych nakładów na utrzymanie, producent otrzymuje dane z pierwszej ręki i może wykorzystać je do optymalizacji nowych modeli pojazdów. Producent jest jednakże skazany na dane dotyczące obciążeń eksploatacyjnych pochodzących od użytkownika, który w celu ich pozyskania musi ponieść pewien wkład pracy. Zobowiązania umowne nie dotyczą jednakże użytkownika niezgodnego z umową.

W celu wykonania poprawnej analizy kosztów cyklu życia, konieczne są następujące dane:

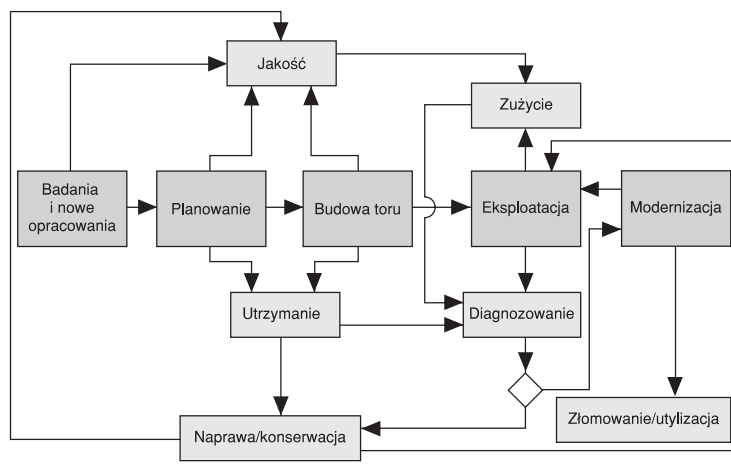
- Dane o kosztach (badania i projektowanie, budowa nawierzchni, utrzymanie, utrudnienia eksploatacyjne, przebudowa toru); szczegółowe dane odnośnie kosztów budowy nawierzchni i kosztów utrzymania, jak również cykli napraw istnieją, ale są prawie zupełnie niedostępne.
- Metoda budowy nawierzchni (szyna, zamocowania, podkłady, grubość warstwy tłuczniowej, podłoże); podawane dane w znacznej mierze odpowiadają rzeczywistym stosunkom, przy czym np. grubość warstwy tłuczniowej oraz podłoże są nie dla wszystkich tras bezpośrednio udokumentowane.
- Obciążenie eksploatacyjne (rodzaj pociągów, obciążalność na oś, prędkości, rodzaj i stan techniczny zespołów jezdnych); obciążenia dynamiczne (analiza wartości pomiaru sił poprzecznych) udostępniane są dla pociągów ICE oraz niektórych wagonów towarowych [5].
- Charakterystyki robocze poszczególnych komponentów. Zjawisko pęknięcia szyn, charakterystyki zużycia szyn, zachowywanie się nawierzchni trwałej, jak również osiadanie tłucznia badane są intensywnie dopiero od pewnego czasu.
- Naprawy.

W literaturze na temat cykli napraw i rodzajów prac brakuje często danych dotyczących rodzaju nawierzchni, podtorza i obciążenia eksploatacyjnego.

#### □ Okres trwałości użytkowania

Do tej pory istnieją jedynie hipotezy odnośnie trwałości użytkowania nawierzchni tłuczniowej. Koniec okresu trwałości osiągany jest wraz z przebudową całego toru. Ze względu na różne okresy trwałości toru kolejowego, podtorza i obiektów inżynierskich, przy obliczaniu wynikowego kosztu cyklu życia, okres trwałości tych elementów należy wykazywać osobno. Dla okresu trwałości życia decydujący jest techniczny okres używalności.

#### □ Jakość wykonania toru kolejowego i prac naprawczych



Rys. 2. Koszt cyklu życia; model – tor kolejowy

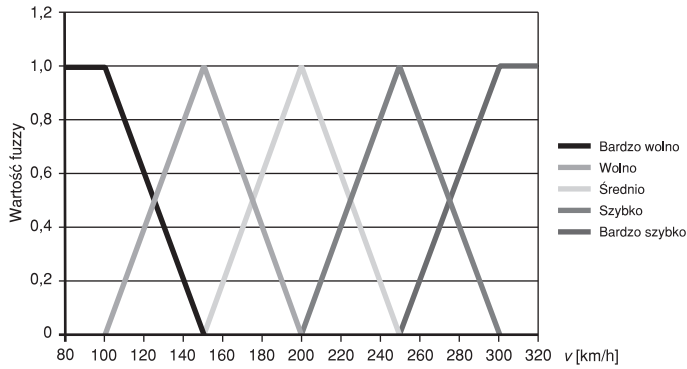
Jeżeli przy budowie nawierzchni tłuczniowej nie wyeliminowane zostaną duże fluktuacje sprężystości pionowej nawierzchni z tłucznia, to w procesie eksploatacji dojdzie do ich wzmocnienia i konieczne będą przedwczesne prace naprawcze toru.

#### Logika fuzy

Jak już wspomniano, dysponujemy obecnie danymi w niewystarczającej ilości i jakości. Aby móc w sposób wiarygodny wypowiadać się na temat kosztu cyklu życia toru kolejowego, muszą być znane zarówno koszty i okresy trwałości, jak i częstości napraw. W dalszej części artykułu opisana będzie metoda pozwalająca na określenie cykli prac poprawkowych toru.

Logika fuzy stosowana jest z powodzeniem od kilku lat w technice regulacji. Chodzi tutaj o metodę, za pomocą której, pomimo nieoznaczoności, mogą być podejmowane decyzje. Termin „fuzzy” pochodzi z języka angielskiego i może być przetłumaczony jako „nieprecyzyjny”, „postrzępiony”, „nieostry”. Zbiór fuzy, w porównaniu do klasycznej teorii mnogości, rozszerzony jest o wartości pośrednie, leżące między „tak” i „nie” lub między logiczną „1” a logicznym „0”. Wartości te mają określony stopień przynależności, np. 0,3 dla „światła przyćmionego”, jeżeli przez „1” oznaczymy światło pełne, a przez „0” brak światła.

Możemy znać cykl prac remontowych pewnego toru kolejowego, jego obciążenie robocze oraz sposób budowy nawierzchni. Na podstawie tych danych dla jednego określonego toru nie możemy wyprowadzić żadnych ogólnych wniosków w odniesieniu do innych torów. Dalszymi wielkościami, które mają wpływ na trwałość użytkowania toru to między innymi stan techniczny pojazdów, jakość wykonania toru itp. Na podstawie znanych wzorów na osiadanie nawierzchni z tłucznia nie można z wystarczającą dokładnością określić optymalnego punktu czasowego do wykonania prac naprawczych. Dysponujemy więc „ostrymi” danymi wejściowymi, lecz nie możemy na ich podstawie uzyskać „ostrzych” wyników. Za pomocą logiki fuzy można zbudować system regulacji umożliwiający stworzenie zależności pozwalającej



Rys. 3. Zmienna lingwistyczna „prędkość”

otrzymywanie „ostrzych” wyników na podstawie „ostrzych” danych wejściowych.

Na początku dla każdej wielkości wejściowej budowanych jest wiele funkcji przynależności (oznaczanych również jako lingwistyczne terminy). Ponieważ pracujemy z normalnymi zbiorami fuzji, przynależne wartości funkcji przynależności leżą między 0 i 1. Im węższa jest szerokość wpływu (tzn. odstęp między obiema wartościami „0”), tym ostrzejsza jest wartość wejściowa. Lingwistyczne terminy wielkości wejściowej ujęte zostają do zmiennych lingwistycznych (oznaczanych również jako kanał sygnałowy). Okazuje się, że forma trójkąta lub trapezu w zupełności wystarcza do przedstawienia termin lingwistycznych. Każda zmienna lingwistyczna może zostać odwzorowana również za pomocą funkcji analitycznej.

Kombinacja wielu wielkości wejściowych następuje poprzez skojarzenie zmiennych lingwistycznych. Ostra wartość wejściowa podlega fuzyfikacji, w wyniku czego dla tej ostrej wartości wyznaczona zostaje wartość przynależności. W dalszym ciągu musi zostać stworzona podstawa regulacji, tzn. system reguł inferencyjnych (wnioskowania). One tworzą zasady przetwarzania, za pomocą których ostre wartości wejściowe poddane fuzyfikacji przetworzone zostają na ostre wartości wyjściowe.

W naszym przykładzie (rys. 3) wyznaczony został przeciętny cykl prac naprawczych dla pewnego toru dla następujących parametrów wejściowych: nacisk na oś, współczynnik dynamiczny, roczny tonaż brutto, rodzaj nawierzchni, jakość położenia tłuczni oraz prędkość pojazdu.

## Wnioski

Logika fuzji jest metodą analizy kosztów LCC dla obiektu narażonego na zużycie. Ustanowiona przy tym podstawa regulacji może być uproszczona do tego stopnia, aby odwzorowywała rzeczywistość w wystarczająco dokładnym stopniu. Do legalizacji podstawy regulacji konieczne są dane doświadczalne. Poprzez selektywną wariację parametrów wejściowych można zasymulować zachowanie się systemu. Za pomocą logiki fuzji możliwe jest w każdym bądź razie ostrożne prognozowanie kosztu cyklu życia. Stopniowo do tego systemu mogą być włączane wyniki dalszych badań nad nawierzchnią, szczególnie odnośnie zużywania się poszczególnych komponentów.

Dokładniejszy obraz przebiegu eksploatacji i procesu powstawania uszkodzeń nawierzchni otrzymuje się poprzez zastosowanie modeli mechanicznych.

□

## Literatura

- [1] Driver J., Trescher C.: *Die Lebenszykluskosten auf dem Prüfstand*. Der Nahverkehr 5/1998.
- [2] Grote U.: *Life-Cycle-Cost-Management bei Schienenfahrzeugen*. Rad 99, Dresden 1999.
- [3] Kahler J., Hubert F.: *Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control*. Braunschweig/Wiesbaden 1994.
- [4] Lichtberger B.: *Praxis der Verdichtung, Stabilisierung und Homogenisierung des Schotteroberbaus*. Symposium Schotteroberbau – Mechanische Modellierung, Laborversuche und die Praxis. TU Berlin Februar 1999.
- [5] Reinecke J, Zacher M.: *Vertikale Kräfte am Oberbau – Messung und Rechnung*. Eisenbahntechnische Rundschau 1-2/1996.
- [6] Zehbold C.: *Lebenszykluskostenrechnung*. Wiesbaden 1996.

Na podstawie:  
*Methoden der LCC-Betrachtung für den Schienenfahrweg*  
*Der Eisenbahn Ingenieur 12/2000*

Autor  
 mgr inż. Peter Danzer, pracownik naukowy na kierunku Pojazdy  
 szynowe i eksploatacja kolei na Politechnice w Berlinie