

CZTEROPARAMETROWY INDYKATOR TORU – DEFINICJA I ZNACZENIE

Henryk Bałuch

prof. dr hab. inż., Instytut Kolejnictwa, ul. Chłopickiego 50, 04-275 Warszawa, e-mail: hbaluch@ikolej.pl

Streszczenie. *W utrzymaniu infrastruktury kolejowej wykorzystywane są różne wskaźniki. Ich stosowanie jest pomocne w podejmowaniu decyzji, szczególnie dotyczących napraw. W eksploatacji nawierzchni kolejowej znane są wskaźniki charakteryzujące tylko jeden parametr lub kilka parametrów łącznie. Artykuł przedstawia propozycję nowego wskaźnika charakteryzującego obciążenie toru i jego stan. Parametrami wchodzącymi do indykatora są prędkość maksymalna pociągów, natężenie przewozów, syntetyczny wskaźnik stanu toru oraz ubytek trwałości. Podano przykłady wykorzystywania tego indykatora w praktyce.*

Słowa kluczowe: *utrzymanie nawierzchni, wskaźniki, indykator toru*

1. Wstęp

Najdłuższym etapem w całym cyklu życia nawierzchni kolejowej jest eksploatacja. Powinna ona zapewnić przez możliwie najdłuższy czas bezpieczeństwo, regularność i ciągłość ruchu pociągów. Długość tego etapu oraz ponoszone nakłady, przy określonej konstrukcji drogi kolejowej i jakości jej budowy (modernizacji), zależą od obciążenia ruchem kolejowym oraz utrzymania.

Problemy utrzymania nawierzchni stanowią obecnie przedmiot wielu badań i rozpraw naukowych. W Anglii badania takie pod hasłem inteligentne utrzymanie toru prowadzi na zlecenie zarządcy infrastruktury, tj. Network Rail, Uniwersytet w Cranfield [16]. Jednym z celów opracowywanego systemu jest zmniejszenie nieprzewidywanych napraw nawierzchni, na które wydaje się rocznie 120 mln funtów w porównaniu z naprawami planowanymi, których koszt wynosi 850 mln funtów.

W badaniach holenderskich zwraca się uwagę na duże różnice między dotychczasowymi danymi o stanie toru a uzyskiwanymi obecnie, do których doszły m.in. przyspieszenia mierzone przez aparaturę zainstalowaną w wagonach pasażerskich, w składzie pociągów rozkładowych [7]. Przekształcenie tak zróżnicowanych informacji w użyteczną wiedzę jest zadaniem bardzo złożonym. Pomiar przyspieszeń (*ABA – Axle Box Acceleration*) są wykorzystywane m.in. do pomiaru wad podkowiatych na powierzchni tocznej szyn, czyli wad typu squat.

Duże znaczenie do trwałości nawierzchni przywiązuje się w ocenie infrastruktury na kolejach szwajcarskich. Przeprowadzone tam analizy wykazały, że ograniczenia w podbijaniu torów w latach 2005 – 2010 spowodowały zmniejszenie

trwałości nawierzchni z 37 do 34 lat. Odbiło się to na wzroście liczby ograniczeń prędkości pociągów [13,12]. Wpłynął na to również duży wzrost liczby szyn z wadami zmęczeniowymi, spowodowany wprowadzeniem pojazdów szynowych o zwiększonym oddziaływaniu na nawierzchnię (zwiększyła się też wykrywalność wad dzięki nowym technikom diagnostycznym).

Na kolejach austriackich do oceny stanu torów i w podejmowaniu decyzji dotyczących utrzymania stosuje się system NATAS (*New Austrian Track Analysing System*). Dzięki niemu można np. określić, czy zwiększone osiadanie toru wynika ze słabego odwodnienia. System ten ma też kilka parametrów oceniających zużycie szyn, co znacznie ułatwia planowanie ich wymiany [6]. W Austrii nastąpił również wzrost ograniczeń prędkości pociągów. Wzrost ten wywarł wpływ na zmianę strategii utrzymania infrastruktury, w której w większym stopniu uwzględnia się wiek, stan i intensywność jej użytkowania.

W pracach dotyczących utrzymania nawierzchni wykorzystuje się często dane historyczne. Odgrywają one kluczową rolę w modelach opartych na metodzie CBR (*Case-Based Reasoning*), w której rozwiązywanie występujących problemów opiera się na porównaniach z podobnymi problemami, które występowały w przeszłości [11]¹.

Zarządzanie utrzymaniem nawierzchni kolejowej, obejmującym dwie podstawowe grupy działań, tj. diagnostykę i wszelkiego rodzaju naprawy jest obecnie zadaniem, wymagającym dużego doświadczenia, obszernego zakresu wiedzy teoretycznej i posługiwania się systemami doradczymi, na których powinien być oparty System Zarządzania Utrzymaniem (*Maintenance Management System*).

Istotną rolę w zarządzaniu utrzymaniem spełniają różne wskaźniki. Lista wskaźników stosowanych w infrastrukturze jest dość długa [17,5,9]. Na porównywaniu wskaźników z kolejnych lat ocenia się wykonanie zadań nałożonych na zarządców infrastruktury w umowach zawieranych z organami państwowymi. Obszerną charakterystykę takich wskaźników zawiera artykuł [12]. Znane są również wskaźniki stosowane w eksploatacji różnych urządzeń i obiektów technicznych [10,13]. Analizie i opracowywaniu wskaźników są poświęcane prace badawcze, np. [1,15], w tym nawet rozprawy doktorskie [2]. Powszechny jest pogląd, że posługiwanie się wskaźnikami ułatwia podejmowanie decyzji.

Mimo dużej liczby wskaźników nie ma dotychczas krótkiej liczbowej charakterystyki toru, która, wyrażałaby z jednej strony podstawowe wielkości wpływające na jego stan, z drugiej zaś główne parametry wywołane tym stanem. Charakterystyka taka powinna stać się zasadniczym elementem nowej bazy infrastruktury kolejowej.

2. Wymagania dotyczące nowego wskaźnika

Wskaźniki stosowane w charakterystyce toru można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należą te, które odnoszą się tylko do jednej cechy. Takimi wskaźni-

¹ Metoda CBR, znana od lat 90-tych ubiegłego stulecia i stosowana w różnych obszarach, m.in. w sztucznej inteligencji jest opisana w setkach prac naukowych.

kami są np. odchylenie standardowe pionowych nierówności toru i liczba wybożeń w ciągu roku. Drugą grupę stanowią wskaźniki złożone z kilku parametrów. Ich przykładem, stosowanym w Polsce i cytowanym zagranicą, jest syntetyczny wskaźnik stanu toru zaproponowany w pracy [4], określony wzorem:

$$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0,5S_e}{3,5}, \quad (1)$$

gdzie:

S_z, S_y, S_w, S_e – odchylenia standardowe odpowiednio – nierówności pionowych, poziomych, wichrowatości i szerokości toru.

Proponowany nowy wskaźnik będzie należał do grupy drugiej. Przy jego opracowywaniu przyjęto następujące założenia:

- 1) liczba charakteryzującej go wielkości nie powinna przekraczać 4,
- 2) wielkości te powinny być jednoznacznie zdefiniowane i opierać się na dostępnych dokumentach oraz wynikach pomiarów zautomatyzowanych (wyklucza się cechy opisowe lub szacunki heurystyczne),
- 3) odpowiednie kombinacje zestawień zbiorów wartości opisujących wskaźnik powinny ułatwiać planowanie napraw nawierzchni, wykonywanie zadań diagnostycznych oraz ostrzeżenie o zjawiskach niepożądanych,
- 4) wielkości opisujące wskaźnik powinny stanowić zasadnicze dane w specjalistycznych systemach wspomaganie decyzji,
- 5) w celu odróżnienia od innych wskaźników nowy wskaźnik będzie nazywany *indykatorem toru*².

3. Wielkości określające indyikator

Wielkościami charakteryzującymi oddziaływanie pociągów na tor są w pierwszym rzędzie prędkość maksymalna i natężenie przewozów. Wychodząc z tego założenia zaproponowano w pracy [3] wprowadzenie nowego pojęcia, tj. intensywności obciążenia I definiowanej w postaci

$$I = \frac{V_{\max}}{10} q, \quad (2)$$

gdzie:

V_{\max} – maksymalna prędkość pociągów na danej linii [km/h],

q – natężenie przewozów [Tg/rok], zaokrąglane do 1 Tg.

Propozycja wprowadzenia intensywności obciążenia, jako istotnej wielkości charakteryzującej oddziaływanie pociągów na drogę kolejową znalazła zwolenników.

2 Wyraz *indykator*, będący synonimem *wskaźnika*, ma wg Słownika Języka Polskiego PWN dwa znaczenia – pierwsze to, co ukazuje, ujawnia, drugie to przyrząd wskazujący stan czegoś. Słowo *ndykatywny* oznacza zaś orientujący, orientacyjny. Propozycja tej nazwy ma więc dobre podstawy językowe.

Drugą część indykatora powinny stanowić wielkości wyrażające skutki oddziaływań pociągów na tor, tj. przedstawiające stopień jego degradacji, a więc procesu zachodzącego w całym cyklu życia drogi kolejowej. Stopień ten powinien charakteryzować stan konstrukcyjny oraz geometryczny i być niezależny od ocen subiektywnych.

Zakładając, że procesy zużycia i uszkodzeń nawierzchni narastają proporcjonalnie do przeniesionego obciążenia lub upływającego czasu, można posłużyć się umownym pojęciem współczynnika wykorzystania trwałości w , określając go wzorem:

$$w = \frac{\Delta T}{T}, \quad (3)$$

gdzie:

ΔT – przeniesione obciążenie [Tg] lub czas od początku eksploatacji konstrukcji [lata],

T – trwałość wyrażona odpowiednio w Tg lub w latach.

Trwałość nawierzchni kolejowej można określić na podstawie obliczeń wykonanych w programie SOKON lub, przy małych natężeniach przewozów, przy których trwałość szyn wyraża się wartościami rzędu 100 lat – w postaci czasu eksploatacji, przyjmując, w przybliżeniu, że graniczny czas eksploatacji szyn i podkładów betonowych wynosi 40 lat, drewnianych zaś 20 lat. W tym przypadku należałoby też wprowadzić pewne uproszczenia umowne oraz przyjąć, że w torze na podkładach drewnianych, niezależnie od innych cech, trwałość nawierzchni wynosi 20 lat, a w torze klasycznym wartości uzyskane z wzoru (3) należy pomnożyć przez 1,25.

W przypadku niskiej jakości robót naprawy głównej, po kilku latach od jej ukończenia dochodzi do szybkiej degradacji podsypki. Uwzględniając to, należałoby wprowadzić wariant obliczeń wykorzystania trwałości, oparty na stanie podsypki. Wydaje się to możliwe po opanowaniu techniki obrazowania stanu elementów nawierzchni przez kamery zainstalowane na nowym pojeździe pomiarowym, nad czym trwają obecnie prace.

Według koncepcji autora artykułu, można by, na podstawie obrazów przedstawiających wychlapki w podsypce obliczać współczynnik wykorzystania trwałości przy założeniu, że jest on iloczynem procentu podkładów na długości 100 m toru i połowy maksymalnej liczby kolejnych podkładów objętych wychlapkami, czyli skupienia. Przyjmując, że na długości 100 m toru znajduje się 160 podkładów, założeniu temu odpowiada wzór:

$$w_o = \frac{bn}{320}, \quad (4)$$

gdzie:

b – liczba podkładów z wychlapkami na długości 100 m toru,

n – liczba kolejnych podkładów z wychlapkami obok siebie (skupienie),

W przypadku $w_o > 100$ należy przyjąć 100. Do indykatora toru byłaby przyjmowana ta spośród wartości w lub w_o , która jest większa.

Przykład obliczeń

Na 100 m toru na podkładach betonowych, po upływie 5 lat od ciągłej wymiany nawierzchni kamery wykryły 37 podkładów z wychłapkami, przy czym największe skupienie obejmowało 5 podkładów. Tak więc:

$$w_o = \frac{37 \cdot 5}{320} = 0,58, \quad (5)$$

Współczynnik wykorzystania trwałości obliczony wg wzoru (3) wynosi:

$w = 5:40 = 0,125$, a zatem do indykatora należy wprowadzić 0,58.

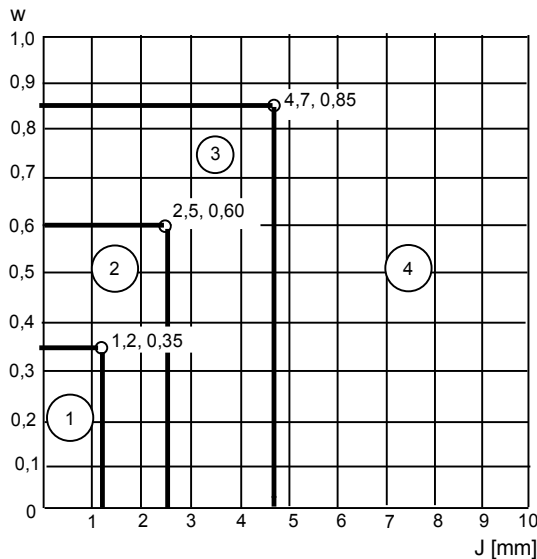
Geometryczny stan toru charakteryzuje wskaźnik J . Mniejsze wartości J oraz w (lub w_o) będą oznaczały tor w stanie dobrym, większe w stanie gorszym. Stopień degradacji D można zatem wyrazić iloczynem:

$$D = wJ. \quad (6)$$

Dysponując zależnościami (2) i (6) można określić indykator toru jako charakterystykę eksploatacyjno-diagnostyczną toru i nadać mu symbol ID oraz wyrażać wzorem:

$$ID = \left(\frac{V_{\max}}{10} q \cdot wJ \right), \quad (7)$$

Strukturę tak określonego indykatora przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Wielkości określające indykator toru

Zródło: opracowanie własne

Oznaczając konkretny odcinek toru (zazwyczaj 1 km) indykatozem można wpisać w uproszczeniu kolejne cztery liczby, nie wykonując na nich działań matematycznych. Ułatwi to szybką ocenę stanu toru oraz odczyt indykatora i tak np.

$$ID = \{14;21;0,46;2,37\},$$

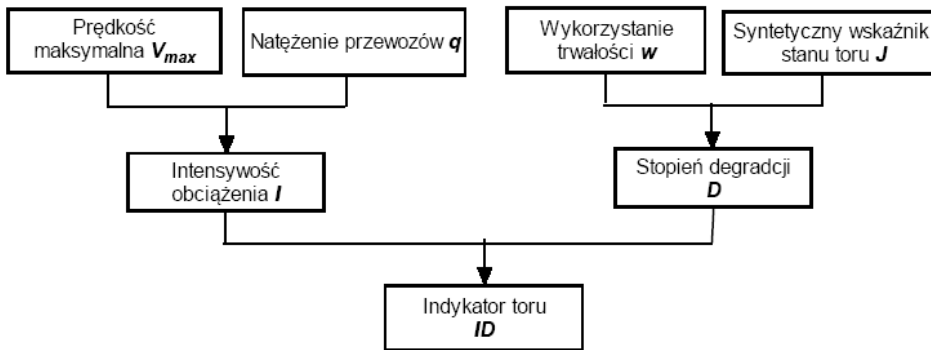
charakteryzuje tor, na którym maksymalna prędkość pociągów V_{max} wynosi 140 km/h, natężenie przewozów q jest równe w przybliżeniu 21 Tg/rok, współczynnik wykorzystania trwałości w wynosi 0,46, a geometryczny stan nawierzchni odpowiada wskaźnikowi $J = 2,37$ mm. Odczytując indykator wystarczy wymienić kolejno te cztery liczby. Ich wartość informacyjna jest większa niż ewentualne podanie samego wyniku obliczeń. Obliczenia te są natomiast konieczne w przypadku oceny podatności toru na ograniczenia prędkości pociągów (por. punkt 5).

W bazie danych, w której zawarte są wartości indykatora powinny się znaleźć również dane źródłowe, tj. trwałość T i ΔT oraz takie charakterystyki każdego odcinka toru jak jego rodzaj (bezstykowy, klasyczny) typ szyn, podkładów itp.

Wartości składowe indykatora, tj. prędkość maksymalna, natężenie przewozów i syntetyczny wskaźnik stanu toru nie wymagają dodatkowych interpretacji i przez osoby zajmujące się nawierzchnią kolejową są rozumiane jednoznacznie i tak np. natężenie przewozów 4 Tg/rok będzie uznane zgodnie jako małe, a wskaźnik $J = 7,5$ mm, jako charakteryzujący tor znajdujący się w bardzo złym stanie. W dyskusji nad stopniem degradacji pojawiło się natomiast pytanie, czy poszczególnym wartościom tej miary nie należałoby przyporządkować nazwy. Ustalenie takich nazw i ich granic liczbowych będzie zawsze subiektywne. Można jednak, zastrzegając się, że ocena degradacji tylko na podstawie dwóch wielkości jest dużym przybliżeniem, zaproponować w pewnym sensie tytułem próby, zaliczenie każdej wartości stopnia degradacji do jednego z czterech określeń:

- 1) degradacja mała $0 < D \leq 0,42$,
- 2) degradacja przeciętna $0,42 < D \leq 1,50$,
- 3) degradacja duża $1,50 < D \leq 4,00$,
- 4) degradacja bardzo duża $D > 4,00$.

Pola tych nazw i ograniczających je współrzędnych przedstawia rys. 2, a w tab. 1 podano kilka przykładów tych nazw. Wielkością decydującą o granicach pierwszych trzech pól jest syntetyczny wskaźnik stanu toru J nawet przy bardzo małym wykorzystaniu trwałości. Warto jednak zauważyć, że po wykonaniu naprawy wskaźnik ten z reguły maleje, co może oznaczać zmianę oceny degradacji.



Rys. 2. Proponowane granice nazw degradacji: 1 – mała, 2 – przeciętna, 3 – duża, 4 – bardzo duża

Źródło: opracowanie własne

Tabela 1. Przykłady i wielkości określające stopień degradacji

Lp.	Prędkość V_{max} [km/h/]/10	Natężenie przewozów q Tg/rok]	Intensywność obciążenia I	Współczynnik wykorzystania trwałości w	Syntetyczny wskaźnik stanu toru J [mm]	Stopień degradacji D	Moduł toru ID	Degradacja
1	20	11	220	0,40	0,80	0,32	70	mała
2	9	17	153	0,95	1,25	1,19	182	przeciętna
3	12	15	180	0,27	2,00	0,54	97	przeciętna
4	7	24	168	0,63	4,10	2,58	433	duża
5	10	9	90	0,20	2,50	0,50	45	przeciętna
6	4	27	108	0,82	6,75	5,53	597	b. duża
7	16	13	208	0,13	1,00	0,13	27	mała

Na liczbach charakteryzujących intensywność obciążenia oraz degradację można wykonywać działania matematyczne, gdy zachodzi potrzeba scharakteryzowania populacji określonych torów, np. toru nr 1 lub 2 na całej linii kolejowej. Może to dotyczyć średniej ważonej prędkości i średniego ważonego natężenia przewozów lub wartości średnich arytmetycznych wskaźnika syntetycznego J oraz wykorzystania trwałości w .

Wielkości te zawierają informacje przydatne przy planowaniu napraw na szczeblu sekcji i oddziałów eksploatacji oraz ułatwiają ogólną ocenę stanu toru na wybranych liniach szczeblowi centralnego.

4. Wykorzystanie zbiorów wartości indykatora w podejmowaniu decyzji

Zestawiając odpowiednie wartości parametrów wchodzących do indykatora oraz danych źródłowych można uzyskać nowe zbiory ułatwiające podejmowanie decyzji. Rozpatrzmy dwa przykłady.

Przykład 1.

Należy zaplanować ciągłą wymianę nawierzchni z wyprzedzeniem $n = 3$ lata. Zadanie polega na znalezieniu odcinków toru, na których w tym czasie wykorzy-

stanie trwałości osiągnie ponad 0,85 (lub wcześniej przekroczy tę wartość), przy czym, ma to dotyczyć linii o prędkości maksymalnej 140 km/h i większej oraz o natężeniu przewozów większym niż 16 Tg/rok. Trzeba założyć, że na każdej z analizowanych linii odcinki kilometrowe będą przedzielone odcinkami niespełniającymi tych warunków, tzn. odcinkami o lepszym stanie toru. Wymiana będzie prowadzona na linii, na której stosunek sumy długości odcinków spełniających założenia do długości całkowitej osiągnie wartość największą. Zbiór takich odcinków można określić następująco:

$$G_3 = \{V_{\max} \geq 140 \wedge q > 16 \wedge \sum q + 3 \cdot 16 > 0,85 \cdot T\}, \quad (8)$$

Symbol Σq oznacza tu całkowite obciążenie przeniesione od początku eksploatacji nawierzchni.

Przykład 2.

Na pewnych liniach eksploatowanych z prędkością maksymalną $V_{\max} \geq 160$ km/h i przy stosunkowo małym natężeniu przewozów $q \leq 8$ Tg/rok stwierdzono po dwóch latach eksploatacji szybkie narastanie deformacji torów. Jako granicę tej deformacji przyjęto syntetyczny wskaźnik stanu toru $J > 3,5$ mm. Postanowiono dokładnie przeanalizować przypadki tego zjawiska, biorąc pod uwagę m.in. stan podtorza i podsypki, dokumentację odbioru robót itp. Wytypowanie takich przypadków wymaga określenia zbioru:

$$P = \{V_{\max} \geq 160 \wedge \sum q < 16 \wedge J > 3,5\} \quad (9)$$

5. Wykorzystanie zbioru liczb charakteryzujących indykator w rankingach

W zarządzaniu utrzymaniem nawierzchni kolejowej mogą się okazać przydatne rankingi obejmujące całe linie kolejowe lub ich odcinki. Może to być ranking linii pod względem intensywności obciążenia (kryterium I), ułatwiający ocenę potrzeb naprawczych lub ranking degradacji wspomagający planowanie wymian głównych (kryterium D).

Szczególne znaczenie w utrzymaniu nawierzchni kolejowej ma zapobieganie występującym ograniczeniom prędkości pociągów. Wczesną ocenę możliwości wystąpienia tych niekorzystnych zdarzeń ułatwi ranking linii kolejowych, na których przy dużej intensywności obciążenia występuje jednocześnie wysoki stopień degradacji. Jako kryterium oceny możliwości wystąpienia ograniczeń prędkości można więc przyjąć wartości indykatorów określone wzorem (7).

6. Podsumowanie

Trafna ocena stanu nawierzchni kolejowej jest jednym z najważniejszych warunków jej racjonalnego utrzymania. W ocenie tej są stosowane różne narzędzia wspomagające podejmowane decyzje. W planowaniu napraw i zadań diagnostycznych pomocne są odpowiednie wskaźniki. Proponowany indyktor toru, przedstawiający cztery parametry charakteryzujące intensywność i stopień degradacji nawierzchni może się stać istotnym uzupełnieniem stosowanych dotychczas miar, z których część, po nowszych opracowaniach, straciła już swoje pierwotne znaczenie (dotyczy to np. wadliwości 5-cio parametrowej, zaproponowanej przed laty przez autora artykułu).

Znaczenie indykatora toru wzrośnie, gdy dzięki rozwijającej się technologii informacyjnej powstaną bazy infrastruktury kolejowej dostępne dla pracowników zajmujących się utrzymaniem nawierzchni z każdego miejsca i w każdym czasie. Takie mobilne wspomaganie utrzymania sprawi, że podejmowanie decyzji na wszystkich szczeblach zarządzania będzie obciążone mniejszą niepewnością niż to jest obecnie.

Bibliografia

- [1] Ahrén T., Kumar U., Use of maintenance performance indicators: a case study at Banverket. Conference proceedings of the 5th Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems (APIEMS), Gold Coast, Australia, 2004 December.
- [2] Åhrén T., Maintenance performance indicators (MPIs) for railway infrastructure: identification and analysis for improvement. Luleå University of Technology, 2008.
- [3] Bałuch H., Syntetyczne metody oceny nawierzchni kolejowej. Problemy Kolejnictwa 2015, zeszyt 166.
- [4] Bałuch M., Estymacja nierówności toru kolejowego. Archiwum Inżynierii Lądowej, nr 3-4, 1989.
- [5] Beck A., Bente H., Shilling M., Railway efficiency – An overview and a look at opportunities for improvement. International Transport Forum. Discussion Paper No. 2013-2, OECD.
- [6] Briginshaw D., ÖBB targets infrastructure cost savings. International Railway Journal 2014 No 1.
- [7] Dollevoet R., Núñez A., Li Z., ABA measurements: Monitoring of condition based maintenance during revenue operations. European Railway Review 2017, No. 3.
- [8] EN 15341:2007 Maintenance – Maintenance Performance Indicators.
- [9] Liden T., Railway infrastructure maintenance – a survey of planning problems and conducted research. Transportation Research Procedia, ELSEVIER 2015.

-
- [10] Loska A., Eksploatacyjna ocena wybranych obiektów technicznych z zastosowaniem metod taksonomicznych. Instytut Inżynierii Produkcji, Politechnika Śląska, 2012.
 - [11] Lovett A.H., Barkan C.P.L., Dick C.T., An integrated model for evaluation and planning of railroad track maintenance. University of Illinois at Urbana-Champaigns, 2013.
 - [12] Massel A., Ocena stanu infrastruktury w skali sieciowej. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, Oddział w Krakowie, nr 2 (104), 2014.
 - [13] Nezzustansbericht. SBB Infrastruktur, 2013.
 - [14] Sadeghi J., Askarenijad H., Development of improved railway track degradation models. Structure and Infrastructure Engineering 2010, December.
 - [15] Seitan P.M., Atmaja S., Rosyidl P., Track quality index as track quality assessment indicator. The 19th International Symposium of FSTPT, 2016, October.
 - [16] Starr A., Towards intelligent track maintenance planning. Railway Gazette International 2016, No 8.
 - [17] Stenström C., Parida A., Galar D., Performance indicators of railway infrastructure. The International Journal of Railway Technology 2012, No. 1 (3).