

## Rozwój układów biegowych pojazdów szynowych, związanych z opłatami za użytkowanie infrastruktury kolejowej

*W artykule przedstawiono nowoczesne podejście do problemów rozwoju taboru szynowego, zwłaszcza układów biegowych w obecnej sytuacji na rynku przewozowym, gdzie infrastruktura kolejowa została wyodrębniona ze struktury organizacyjnej poszczególnych kolei i stanowi pod względem organizacyjnym i ekonomicznym niezależną instytucję.*

### 1. Wstęp

Dzięki wdrożeniu nowej Dyrektywy Europejskiej EG 2001/14 zasadniczo zmienił się rynek kolejowy w przeciągu ostatnich dziesięciu lat. Dzięki nowemu przepisowi umożliwiono przewoźnikom równoprawny i nie dyskryminujący dostęp do infrastruktury dla potencjalnych przewoźników. Ta regulacja prawna miała na celu zwiększenie konkurencyjności transportu szynowego na rynku przewozowym osób i towarów. W wyniku użytkowania infrastruktury kolejowej przez poszczególnych przewoźników powstaje jej zużycie. Przez zużycie rozumie się wszystkie uszkodzenia pomiędzy kołem a szyną, które zostały spowodowane przez eksploatację pojazdów. Wymaganie, dotyczące modeli opłat polegają na tym, że rekompensuje się udział kosztów eksploatacji i napraw oraz konserwacji infrastruktury, które nie są pokrywane bezpośrednio z budżetu państwa użytkownikowi infrastruktury kolejowej. Udziały dla dopłat z budżetu państwa jak również opłaty za użytkowanie infrastruktury są różne w zależności od rozpatrywanego kraju. Z tego powodu nie mam możliwości bezpośredniego porównania cen za używanie trasy kolejowej pomiędzy dwoma lub w większej grupie państw. Opłaty za korzystanie z użytkowania tras można podzielić na dwie grupy tzn. zależne od kosztów i w zależności od zapotrzebowania na jej korzystanie. Dalszy podział opłat wiąże się z czynnikami, związanymi z infrastrukturą oraz z pojazdem. Jeśli tak, to logiczną konsekwencją jest:

- zainteresowanie przewoźnika jak najmniejszymi opłatami za użytkowanie infrastruktury
- jak najmniejszym zapotrzebowaniem na remonty i konserwacje infrastruktury, co wiąże się z jej dyspozycyjnością i niezawodnością do świadczenia usług przewozowych dla zainteresowanych przewoźników.

Aby pogodzić dwie przeciwstawne tendencje, logiczną konsekwencją jest rozwój pojazdów szynowych, a zwłaszcza ich układów biegowych, które powodują w konsekwencji jak najmniejsze zużycie infrastruktury. Aby rozwój układów biegowych był opłacalny, logiczne jest jak takie naliczanie opłat ze strony infrastruktury, które premiuje przewoźników inwestujących w rozwój układów biegowych.

### 2. Struktura opłat w wybranych krajach europejskich

Jak już wcześniej wspomniano system opłat za użytkowanie infrastruktury jest zróżnicowany w zależności od kraju. Parametry do modelu opłat dla czterech krajów europejskich tzn. Niemiec, Austrii, Szwajcarii oraz Wielkiej Brytanii przedstawiano w tabeli 1 i 2.

Porównując tabelę 1 i 2, które przedstawiają czynniki składające się na opłaty za korzystanie infrastruktury można zauważyć, że są one mocno zróżnicowane od rozpatrywanego kraju. W przypadku niemieckiej infrastruktury nie ma praktycznie żadnych komponentów, wpływających na cenę które mają związek z pojazdem. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że podział na dwanaście klas toru odzwierciedla z jednej strony różne koszty inwestycyjne dla przygotowania i utrzymania wymaganej jakości toru, zaś z drugiej strony silny aspekt gospodarki rynkowej, polegającym na tym że obciążenie trasy bardzo istotnie kształtuje poziom opłat za jej użytkowanie. W przypadku kolei austriackich występuje zróżnicowanie pomiędzy transportem szynowym ładunków i transportem osobowym. Bazą do naliczania opłat jest czynnik mierzony w bruttotonokilometrach. Za pomocą pomiarów podczas procesu dopuszczenia i homologacji dla każdego typu pojazdu trakcyjnego na podstawie pomiarów przydziela się kategorię A, B lub C. Wraz z przydziałem do ww. kategorii za pomocą współczynnika

## Zestawienie parametrów służących do oceny modeli opłat za użytkowanie tras dla Niemiec oraz Austrii

Tabela 1

			Niemcy	Austria	
			DB Netz	ÖBB Infra	
Związane z infrastrukturą	Związane z kosztami	Zróźnicowanie ruchu lokalnego i dalekobieżnego	tak	nie	
		jakość trasy	tak	tak	
	Związane z zapotrzebowaniem na korzystanie	Zróźnicowanie pory dnia	tak	tak	
		Zróźnicowanie obciążenia trasy	tak	tak	
Związane z pojazdem	Ogólne	Zróźnicowanie transportu towarowego/ osobowego	tak	tak	
		Bruttotonokilometry	nie	tak	
		Zróźnicowanie wózek trakcyjny/toczny	nie	nie	
	Udział w kierunku pionowym	Udział w kierunku pionowym	Masa pojazdu	nie	tak
			Masa nieusprężynowana	nie	tak
			Nacisk zestawu kołowego na tor	nie	tak
			Prędkość eksploatacyjna	nie	nie
			Ilość zestawów kołowych	nie	tak
			Średnica koła	nie	nie
			Moc ciąгла	nie	tak
	Udział w kierunku poziomym	Udział w kierunku poziomym	Baza pojazdu		tak
			Sztywność usprężynowania pierwszego stopnia w kierunku poziomym	nie	tak
			Sztywność obrotowa w drugim stopniu usprężynowania	nie	tak

## Zestawienie parametrów służących do oceny modeli opłat za użytkowanie tras dla Szwajcarii oraz Wielkiej Brytanii

Tabela 2

			Szwajcaria	Wielka Brytania	
			SBB	Network Rail	
Związane z infrastrukturą	Związane z kosztami	Zróźnicowanie ruchu lokalnego i dalekobieżnego	nie	tak	
		jakość trasy	tak	tak	
	Związane z zapotrzebowaniem na korzystanie	Zróźnicowanie pory dnia	tak	tak	
		Zróźnicowanie obciążenia trasy	tak	tak	
Związane z pojazdem	Ogólne	Zróźnicowanie transportu towarowego/ osobowego	tak	tak	
		Bruttotonokilometry	tak	tak	
		Zróźnicowanie wózek trakcyjny/toczny	tak	tak	
	Udział w kierunku pionowym	Udział w kierunku pionowym	Masa pojazdu	tak	tak
			Masa nieusprężynowana	tak	tak
			Nacisk zestawu kołowego na tor	tak	tak
			Prędkość eksploatacyjna	tak	tak
			Ilość zestawów kołowych	tak	tak
			Średnica koła	tak	nie
			Moc ciąгла	tak	nie
	Udział w kierunku poziomym	Udział w kierunku poziomym	Baza pojazdu	tak	tak
			Sztywność usprężynowania pierwszego stopnia w kierunku poziomym	tak	tak
			Sztywność obrotowa w drugim stopniu usprężynowania	tak	tak

pojazdu trakcyjnego przydziela się pojazd w system opłat. Na uwagę zwraca fakt, że nie uwzględnia się w systemie opłat prędkości eksploatacyjnej jak również tego czy pojazd jest pojazdem trakcyjnym czy też tocznym.

Nowy system opłat za użytkowanie infrastruktury dla kolei szwajcarskich SBB, który jest przedstawiony w tabeli 2 będzie obowiązywał od 2017 roku. Podstawą do naliczania opłat są fotografie uszkodzeń i komputerowe obliczenia symulacyjne. Analizowane uszkodze-

nia będą przyczynami naliczania kosztów i w dalszej konsekwencji stają się kosztami dla usuwania uszkodzeń toru (podbijanie torów, wymiana szyn i szlifowanie szyn). Koszty są podzielone na dziesięć zakresów trasowania toru (proste z sześcioma prędkościami jak również czterema klasami łuków). Jednocześnie współczynniki kosztowe ( $k_1$  do  $k_5$ ) są przyporządkowane do własności pojazdu, do jakich należą np. moc napędu, nacisk zestawu kołowego na tor, masy nieusprężynowane, sztywność

w kierunku wzdłużnym usprężynowania pierwszego stopnia.

W związku z tym każdy typ pojazdu szynowego jest przyporządkowany cenie dla dziesięciu łuków względnie grup prędkości.

Największą zmianą do dotychczasowego schematu wyceny jest odejście od wyceny pociągu (całkowitej masy pociągu) do wyceny pojazdu, których suma kosztów pojazdów daje koszty pociągu).

Koszty wyceny przejazdu pojazdu odbywają się wg wzoru:

$$C_{Vi} = k_1 \cdot F_{RQ} \cdot Q^3 + k_2 \cdot Q^{1,2} + k_3 \cdot T_{PV} + k_4 \cdot F_{RWb} \cdot W_b + k_5 \cdot \sqrt{0,5 \cdot Q^2 + 0,5 \cdot Y^2} \quad (1)$$

gdzie:

$C_{Vi}$ - całkowita opłata za pojazd

$Q$ - dynamiczna siła nacisku pionowego koła na szynę

$T_{pv}$ - wartość mocy trakcyjnej

$W_b$ - praca tarcia

$Y$ - siła prowadząca w kierunku poprzecznym

$F_{RQ}$ - współczynnik zależny od promieni łuku toru dla  $Q^3$

$F_{RWb}$ - współczynnik zależny od promieni łuku toru dla  $Q^3$

$k_i$ - współczynniki kosztowe, gdzie  $i=1 \div 5$ .

W celu uproszczenia wzoru (1) można korzystać z uproszczonej postaci:

$$C = \sum_{i=1}^{i=5} C_i \quad (2)$$

gdzie:

$$C_1 = k_1 \cdot F_{RQ} \cdot Q^3 \quad (3)$$

$$C_2 = k_2 \cdot F_{RQ} \cdot Q^3 \quad (4)$$

$$C_3 = k_3 \cdot T_{PV} \quad (5)$$

$$C_4 = k_4 \cdot F_{RWb} \cdot W_b \quad (6)$$

$$C_5 = k_5 \cdot \sqrt{0,5Q^2 + 0,5Y^2} \quad (7)$$

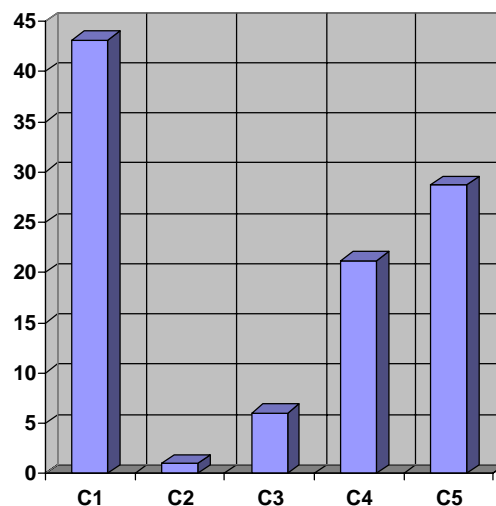
Pierwszy człon równania  $C_1$  opisuje utratę podłoża toru wskutek oddziaływania pojazdu. Czynniki  $C_1$  jest określany jako zależny od prędkości pojazdu oraz jego masy. Drugi i trzeci człon  $C_2$  i  $C_3$  ocenia powstanie rowków i zmęczenia wskutek naprężenia kontaktowego na torze prostym. Czynniki  $C_3$  jest określany jako zależny od zainstalowanej mocy. Za pomocą czwartego członu  $C_4$  rozróżnia się dwa różne efekty tzn. z jednej strony powstanie pęknięć główek szyn na łukach toru oraz zużycie szyn na łukach. Ostatnim członem równania  $C_5$  opisuje się uszkodzenia zwrotnic. W tym przypadku rozpatruje się jazdę przez zwrotnice. Współczynniki  $k_1$  i  $k_5$  są współczynnikami kalibracyjnymi kosztów i zostały ustalone na bazie dla podbić torów, operacji szlifowania szyn i wymianę zwrotnic (części zwrotnic) w poszczególnych zakresach traso-

wania. Niektórzy producenci taboru kolejowego wyrazili uznanie dla nowo wprowadzonego systemu opłat. Zasadniczo jednak udziały kosztowe, określone z pierwszego członu (usuwanie błędów toru, rozdrabnianie tłucznia i obciążenia zwrotnic) jako zbyt wysokie. Ocenia się również za zbyt wysokie koszty związane z parametrami zwrotnic. Z drugiej strony parametry kosztowe związane zostały wyceniono zbyt wysoko. Z kolei wycena parametrów, związanych z parametrami zwrotnic (ostatni człon równania) jest wyceniony za nisko. Zastrzeżenie budzi fakt, że zamiast mocy napędu powinien być użyty iloczyn siły pociągowej pomnożony przez poślizg dla oceny uszkodzeń, spowodowanych naprężeniami kontaktowymi przy rozruchu. Przykład rozkładu kosztów dla zespołu trakcyjnego piętrowego typu Dosto (pojazd referencyjny) na trasie referencyjnej St.Gallen-Genewa jest przedstawiony w tabeli 3 oraz na rys.1

**Zestawienie parametrów kosztowych (opłaty przewozowe) dla pojazdu trakcyjnego Dosto (pojazd referencyjny) na trasie St. Gallen-Genewa**

**Tabela3**

Wariant	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
Referencyjny	Utrata podłoża toru	Błędy szyn	Udział napędu podczas rozruchu	Zużycie na łukach	Degradacja zwrotnic
Udział procentowy	43,1%	0,98%	6,0%	21,2%	28,7%



**Legenda:**

C<sub>1</sub>-utrata własności podłoża toru

C<sub>2</sub>-błędy szyny na prostym odcinku toru

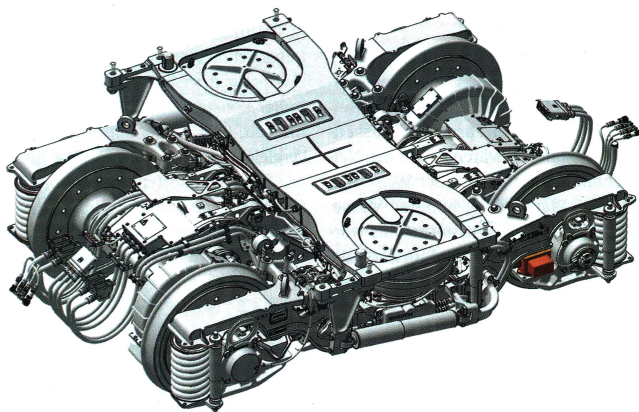
C<sub>3</sub>-wpływ napędu

C<sub>4</sub>-zużycie na łuku toru

C<sub>5</sub>-degradacja stanu technicznego zwrotnicy

Rys.1. Udział procentowy czynników kosztowych dla zespołu trakcyjnego piętrowego typu Dosto wg [4]

Jak widać z wykresu, na rys.1 istotne koszty kryją się w zakresach C1, C4 i C5. Na uwagę zasługuje bardzo duży udział kosztów związanych z utrzymaniem zwrotnic. Przy porównywaniu udziału kosztów dla różnych rozwiązań okazuje się, że zastosowując bardzo dobre sterowanie radialne zestawów kołowych współczynnik kosztowy „C4” może być praktycznie wyeliminowany. Jednakże udział związany z utrzymaniem zwrotnic zdominowany przez pionowe obciążenie nie może być w sposób decydujący zmniejszony przez zastosowanie prowadzenia zestawów kołowych. Pomimo tego występuje możliwość zmniejszenia siły poprzecznej podczas przejazdu przez zwrotnice, co stanowi dodatkowy potencjał do zmniejszenia tego czynnika do minimum. Odpowiedzią na model opłat za użytkowanie infrastruktury jest model układu biegowego TWINDEXX z FLEXX Tronic ARS, który jest przedstawiony na rys.2.



Rys.2. Wózek trakcyjny FLEXX Tronic ARS Upgrade w zespole trakcyjnym piętrowym Dosto (TWINDEXX) wg [4]

Jak wykazują wstępne analizy układ biegowy Flexx Tronic ARS wyposażony w pasywne sterowanie zestawów kołowych może w poważnym stopniu zmniejszyć koszty przejazdu. Szacuje się, że w przypadku floty czteroczłonowych zespołów trakcyjnych piętrowych typu DOSTO, liczącej 30 sztuk dzięki zastosowaniu efektywnego sterowania zestawami kołowymi z możliwością ustawiania radialnego można oszczędzić nawet do 50% opłaty za przejazd, co odpowiada 7 milionów CHF w skali rocznej. Okazją sprzyjającą wprowadzaniu układu sterowania radialnego zestawów kołowych jest tendencja, polegająca na stopniowej rezygnacji z hamulców klockowych, na rzecz systematycznego wprowadzania hamulców tarczowych.

W Wielkiej Brytanii zebrano wiele doświadczeń od czasu reformy, przeprowadzonej w 1994 roku. Network Rail opracował model opłat, który z jednej strony uwzględnia udział dla uszkodzeń pionowych i drugi czynnik, wynikający z naturalnego zużycia szyn, spowodowany naprężeniami kontaktowymi na wskutek oddziaływania w układzie koło-szyna. Na bazie parametrów pojazdu jak np. masa pojazdu, prędkość

jak również masa nieusprężynowana wyprowadzono udział kosztów spowodowany uszkodzeniem pionowym. Udział uszkodzeń poziomych każdego pojazdu wiąże się z łukami toru sklasyfikowanymi na 50 klas. Zaszeregowanie odzwierciedla pracę tarcia pomiędzy kołem i szyną.

### 3. Klasyfikacja uszkodzeń toru

Uszkodzenia toru można podzielić na pięć grup:

- D1- uszkodzenia tłucznia, utrata podłoża toru
- D2-zmęczenie naprężeniami kontaktowymi, spowodowane toceniem na bardzo dużych łukach/prostych odcinkach toru (toczenie taboru nienapędzonego)
- D3-zmęczenie naprężeniami kontaktowymi, spowodowane toceniem na bardzo dużych łukach/prostych odcinkach toru spowodowane przejazdem taboru trakcyjnego
- D4-zmęczenie materiału na łukach toru
- D5-procesy degradacji na zwrotnicach.

Parametry związane z uszkodzeniami toru D1 są przedstawione w tabeli 4.

Parametry związane z uszkodzeniami toru D1 tzn. uszkodzeniami tłucznia oraz podłoża toru

Tabela 4

1	2	3
Wielkość oddziaływania $Q_{dyn}$ (P2)	Parametry eksploatacyjne	Parametry konstrukcyjne, odpowiedzialne za uszkodzenia
Dynamiczna siła pionowa nacisku koła na szynę Q	Prędkość jazdy	Połowa nieusprężynowanej masy zestawu kołowego $m_u$
		Nacisk statyczny koła $Q_0$ na szynę
<b>Komentarz:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ zaniebuje się podział masy nieusprężynowanej w kierunku poprzecznym na zestawie kołowym</li> <li>➤ obliczenie z równym uwzględnieniem parametrów bez włączenia rzeczywistych, lokalnych warunków podłoża toru</li> <li>➤ stosuje się dopuszczalną lokalnie prędkość pociągu, a nie rzeczywisty profil jazdy</li> </ul>		

Parametry związane z uszkodzeniami toru D2 są przedstawione w tabeli 5.

Parametry związane z uszkodzeniami toru D3 są przedstawione w tabeli 6.

Parametry związane z uszkodzeniami toru D4 są przedstawione w tabeli 7.

Parametry związane z uszkodzeniami toru D5 są przedstawione w tabeli 8.

**Parametry związane z uszkodzeniami toru D2 tzn. zmęczenie naprężeniami kontaktowymi podczas toczenia na odcinkach prostych toru oraz na dużych lukach**

**Tabela 5**

1	2	3
Wielkość oddziaływania $Q_{dyn}(P2)$	Parametry eksploatacyjne	Parametry konstrukcyjne, odpowiedzialne za uszkodzenia
Dynamiczna siła pionowa nacisku koła na szynę $Q$	Prędkość jazdy	Połowa nieusprężynowanej masy zestawu kołowego $m_u$
		Nacisk statyczny koła $Q_0$ na szynę
<b>Komentarz:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ rezygnacja z uwzględnienia efektywnej średnicy koła</li> <li>➤ obliczenie z równym uwzględnieniem parametrów bez włączenia rzeczywistych, lokalnych warunków podłoża toru</li> <li>➤ stosuje się dopuszczalną lokalnie prędkość pociągu, a nie rzeczywisty profil jazdy</li> </ul>		

**Parametry związane z uszkodzeniami toru D3 tzn. zmęczenie naprężeniami kontaktowymi podczas rozruchu i hamowania na odcinkach prostych toru oraz na dużych lukach**

**Tabela 6**

1	2	3
Wielkość interakcji TPV	Parametry eksploatacyjne	Parametry konstrukcyjne, odpowiedzialne za uszkodzenia
Dynamiczna siła pionowa $Q$ nacisku koła na szynę	Lokalny promień łuku toru	Moc ciągła
		Baza wózka
		Statyczny nacisk koła $Q_0$ zestawów kołowych napędnych
<b>Komentarz:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ brak rozróżnienia pomiędzy rzeczywistymi, lokalnymi lub specyficznymi warunkami rozruchu i hamowania dla jazdy pociągu</li> <li>➤ brak uwzględnienia charakterystyki przyczepności</li> </ul>		

**Parametry związane z uszkodzeniami toru D4 tzn. zmęczenie naprężeniami kontaktowymi na lukach**

**Tabela 7**

1	2	3
Wielkość interakcji $T_y$	Parametry eksploatacyjne	Parametry konstrukcyjne, odpowiedzialne za uszkodzenia
Referencyjne uszkodzenie spowodowane energią tarcia (produkt, wynikający z poślizgu i stycznej siły poślizgu w kierunku wzdłużnym i kierunku poprzecznym)	Lokalny promień łuku toru	Konceptyjne prowadzenie zestawu kołowego (sztywne, wahaczowe, aktywne)
		Sztywność prowadzenia zestawów kołowych w pierwszym stopniu ( $c_x, c_y$ )
		Baza układu biegowego
		Średnica toczna koła $R_{rad}$ i geometria zarysu
		Statyczny nacisk koła na szynę $Q_0$ , specjalnie dla prowadzących zestawów kołowych
<b>Komentarz:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ brak rozróżnienia pomiędzy rzeczywistymi, lokalnymi lub specyficznymi dla jazdy pociągu w warunkach rozruchu i hamowania</li> <li>➤ ujednoliconą charakterystyką przyczepności <math>\mu=0,3</math> jak również nieużyte profile szyny i koła</li> <li>➤ pominięcie efektu uszkodzenia nabiegającego zestawu kołowego w ramie wózka</li> <li>➤ brak oceny własności dynamicznych w lukach przejściowych (działanie hamowania ciernego pomija się)</li> </ul>		

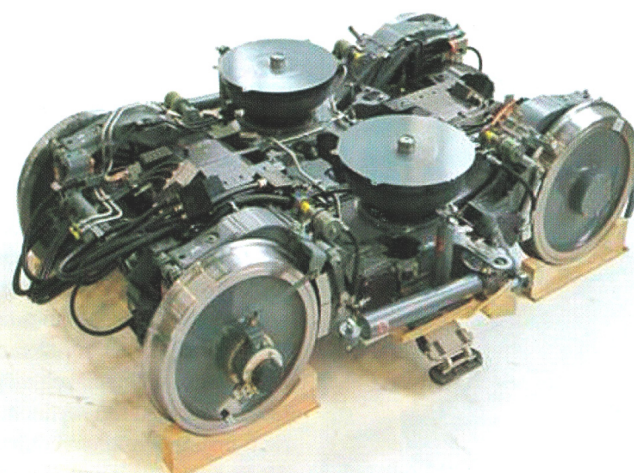
1	2	3
Wielkości oddziaływania $(Q_{dyn}^2 + Y^2)^{0,5}$	Parametry eksploatacyjne	Parametry konstrukcyjne, odpowiedzialne za uszkodzenia
Dodanie wektorów wyężenia materiału Y i Q (Y, Q ustalona przy prędkości 40 km/h na łuku S o promieniu 185 m)	Lokalny promień łuku toru	Koncepcyjne prowadzenie zestawu kołowego (sztywne, wahaczowe, aktywne)
		Baza układu biegowego
		Średnica toczna koła $R_{rad}$ i geometria zarysu
		Statyczny nacisk koła na szynę $Q_0$ , specjalnie dla prowadzących zestawów kołowych
		Statyczny nacisk koła $Q_0$ ,
<b>Komentarz:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ brak rozróżnienia pomiędzy rzeczywistymi, lokalnymi lub specyficznymi dla jazdy pociągu w warunkach rozruchu i hamowania</li> <li>➤ ujednoczona charakterystyka przyczepności <math>\mu=0,3</math>, łuk S o promieniu 185m jako „zwrotnicy wzorcowej” EW 185</li> <li>➤ pominięcie bezpośredniego uszkodzenia podczas prostych przejazdów z maksymalną prędkością jazdy na trasie</li> <li>➤ dołączenie całości kosztów zwrotnic do „zwrotnicy wzorcowej” EW185</li> </ul>		

#### 4. Przykładowe związki pomiędzy możliwościami zmniejszenia zużycia, a rozwiązaniami konstrukcyjnymi

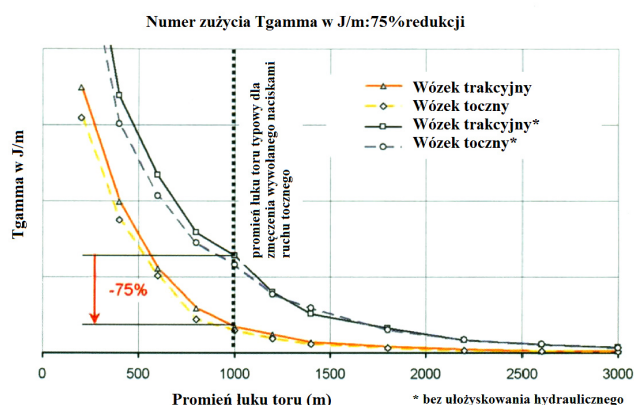
W przypadku projektowania układów biegowych występuje zasadniczo duża liczba konfliktów projektowych. Jednym z ważniejszych jest problem własności dynamicznych podczas jazdy, zaś z drugiej strony własności zużyciowe. W przypadku własności dynamicznych duży rozstaw zestawów kołowych może być uznany jako zaleta, ale w przypadku własności zużycia jest niewątpliwą wadą. Obok oczywistego konfliktu projektowego występuje szereg innych cech projektowych, które w sposób sprzeczny lub przynajmniej mniej lub bardziej mogą kształtować oddziaływanie pojazdu na tor w sposób pozytywny lub negatywny.

Platforma zespołów trakcyjnych cechują się drastycznym obniżeniem masy własnej, wynoszącym około 20% w stosunku do pojazdu referencyjnego, posiada układ biegowy typu SF 7000 nowej generacji i mającym na celu zmniejszenie opłat za użytkowanie infrastruktury. W przypadku układów biegowych SF 7000 pojazdu trakcyjnego Desiro City takie parametry jak masy nieusprężynowane oraz masa ogólna są mniejsze o jedną trzecią w stosunku do jego poprzedniej wersji. Układ biegowy SF 7000 dla pojazdu trakcyjnego Desiro City (firma przewoźnicza Thameslink) jest przedstawiony na rys.3.

W ramach przeprowadzonych symulacji komputerowych i zmęczenie materiałowe i naturalne zużycie, za które jest odpowiedzialna praca tarcia  $T_{gamma}$  są mniejsze niż dla układu biegowego SF 7000 niż dla układu biegowego SF 5000. Sytuacja ta jest przedstawiona na rys.4.



Rys.3. Układ biegowy trakcyjny SF 7000 zespołu trakcyjnego Desiro City wg [3]

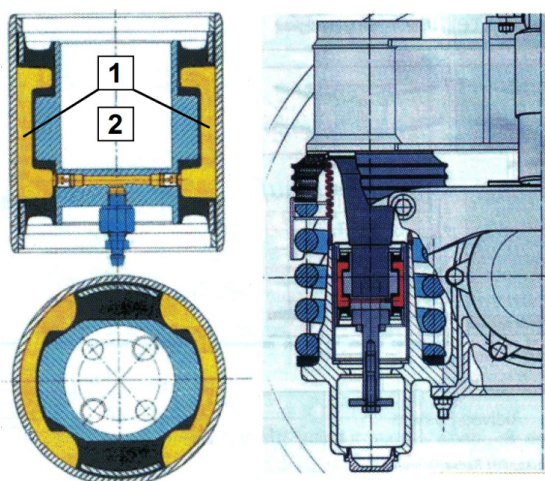


**Legenda:**

- wózek trakcyjny oraz wózek toczny bez gwiazdki dla Desiro City
- wózek trakcyjny oraz wózek toczny z gwiazdką \* dla Desiro UK

Rys.4. Porównanie pracy tarcia  $T_{gamma}$  dla wózków trakcyjnych typu SF 5000 i SF 7000 wg [3]

Przedstawione porównanie dotyczy pojazdów szynowych o trwałości 30 lat. W związku z tym pojawia się zagadnienie, jakie możliwości konstrukcyjne są ewentualnie do dyspozycji mogące poprawić oddziaływanie na tor układu biegowego, mając na uwadze układ biegowy trakcyjny SF5000, który nadal jest eksploatowany pod zespołem trakcyjnym Desiro UK. Łączna ilość zespołów trakcyjnych wynosi 3000 (początek dostawy w 2002 roku). Problem ten nabiera szczególnego znaczenia ze względu na opłaty za przejazdy. Okazuje się, że rozwiązaniem konstrukcyjnym, które może przynieść pożądany skutek jest tulejka hydrauliczna (niem. „Hydrobuchse”), której koncepcja została opracowana przez austriacką firmę Simmering Graz Pauker AG (SGP) w Grazu (Austria). Tulejka hydrauliczna jest przedstawiona na rys.5. Element ten jest zabudowywany zamiast przegubu prowadzenia zestawu kołowego, który znajduje się pomiędzy ramą układu biegowego, a ułożyskowaniem zestawu kołowego. Zasada działania tulejki polega zasadniczo na tym, że w elastomerze tulejki znajdują się przestrzenie drażone, wzajemnie połączone wypełnione substancją ciekłą. W przypadku występowania niskich prędkości jazdy względnie częstotliwości ruchu wzdłużnego, następuje przelew substancji ciekłej z jednej komory do drugiej, co oznacza że tulejka jest miękka i dopuszcza względnie duże przemieszczenia w kierunku wzdłużnym. Z kolei przy dużych prędkościach i częstotliwościach działa kanał przelewowy jak zwężka dławiąca, dzięki czemu może odbywać się wymiana cieczy pomiędzy obydwojma komorami. Tulejka nabiera w takim przypadku wymaganej sztywności, co gwarantuje prawidłowe własności dynamiczne i oddziaływanie na tor. Tulejka została opatentowana w 1989 roku i przetestowana na austriackim wagonie osobowym na początku lat 90-tych. Tulejka została umieszczona w prowadzeniu pierwszego stopnia, co jest pokazane na rys.5. Do chwili obecnej wymieniono tulejki w 700 wagonach.



**Legenda:** 1-kanał 2-przestrzenie drażone

Rys.5. Tulejka hydrauliczna zapewniająca lepsze własności dynamiczne w układach biegowych trakcyjnych SF 5000 w zespołach trakcyjnych Desiro City Thamselink wg [2]

W wyniku przeprowadzonej inwestycji w układach biegowych należy się spodziewać, że koszty inwestycji zwrócą się w wyniku obniżonych opłat przewozowych.

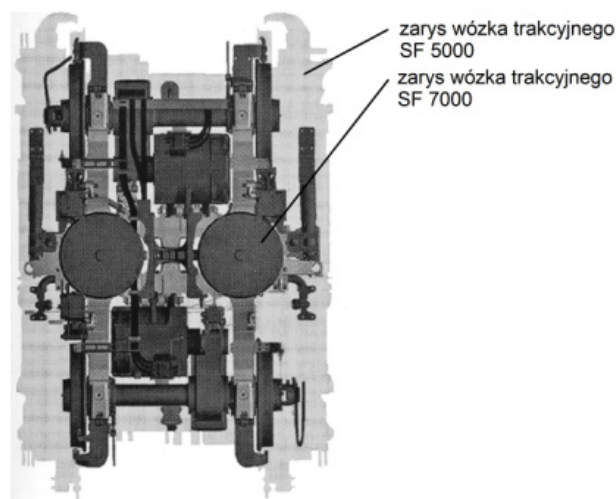
Porównanie pomiędzy podstawowymi parametrami wózków trakcyjnych oraz wózkami rocznymi typu SF7000 i SF5000 przedstawiono w tabeli 9.

**Porównanie parametrów wózków trakcyjnych oraz tocznych typu SF7000 i SF5000**

**Tabela 9**

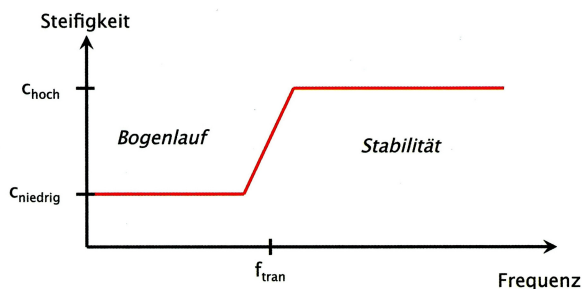
Parametr	Różnica wózków trakcyjnych SF7000 i SF5000	Różnica wózków tocznych SF7000 i SF50000
Masa całkowita	-37%	-37%
Masa zestawu kołowego	-40%	-31%
Nośność zestawu kołowego	-36%	-27%
Baza wózka	-15%	-19%

Porównanie zarysów wózków trakcyjnych SF 7000 i SF 5000 jest przedstawione na rys.6.



Rys.6. Porównanie zarysów wózków trakcyjnych SF 5000 i SF 7000 wg [1]

Analizując zarysy wózków trakcyjnych SF 5000 i SF 7000 pokazane na rys.6, można dostrzec korelację z tabelą 9. Wózek SF 7000 posiada wewnętrzne ułożyskowanie i mniejszą bazę wózka. Głównym czynnikiem, który decyduje o wielkości bazy wózka trakcyjnego jest wielkość silnika trakcyjnego. Stąd też wynika impuls dla opracowania kompaktowych konstrukcji silników elektrycznych, przy utrzymaniu wymaganej mocy. Wewnętrzne ułożyskowanie i usprężynowanie dawniej niechętnie akceptowane w ruchu kolejowym, obecnie przynosi wiele korzyści, związanych ze zmniejszeniem masy układu biegowego, a tym samym całego pojazdu, ale również zwiększa bezpieczeństwo jazdy w warunkach quasi-statycznych podczas przejazdu przez tory wichrowate.



Legenda:

Steifigkeit- sztywność prowadzenia zestawu kołowego

Bogenlauf- jazda w łuku toru

Stabilität- jazda po torze prostym

Frequenz- częstotliwość

$C_{\text{hoch}}$ - wysoka wartość sztywności prowadzenia zestawu kołowego

$C_{\text{niedrig}}$ - niska wartość sztywności prowadzenia zestawu kołowego

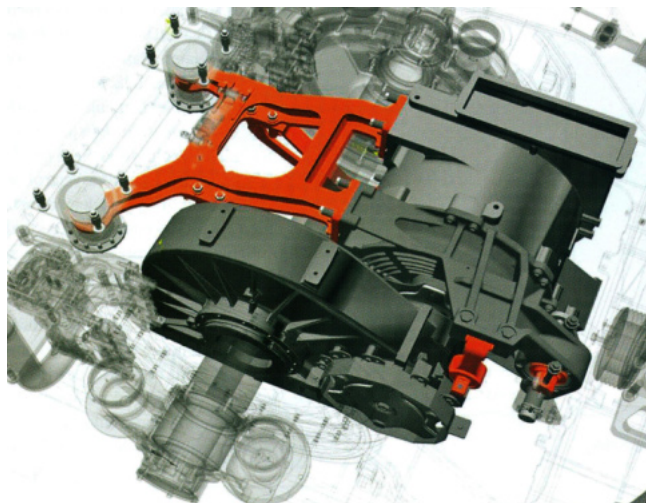
$f_{\text{tran}}$ - częstotliwość przejściowa

Rys.7. „Idealne”, teoretyczne prowadzenie zestawu kołowego wg [2]

Kolejnym przykładem dostosowania układu biegowego do zmniejszenia zużycia infrastruktury jest wózek trakcyjny SF4 lokomotywy uniwersalnej, wysokiej mocy typu Vectron, opracowanej przez koncern Siemens dla ruchu transgranicznego w Europie.

Na uwagę zwracają następujące rozwiązania o dużym stopniu innowacyjności:

- elastyczne oparcie korpusu silnika za pomocą elementów gumowo-metalowych na ramie wózka (rys.8),
- sprzęgło, do zmniejszenia ruchów względnych pomiędzy przekładnią i silnikiem,
- prowadnik trójramienny, umożliwiający optymalny rozkład sztywności wzdłużnej oraz poprzecznej (rys.9),
- aktywny tłumik wężykowania (ADD).

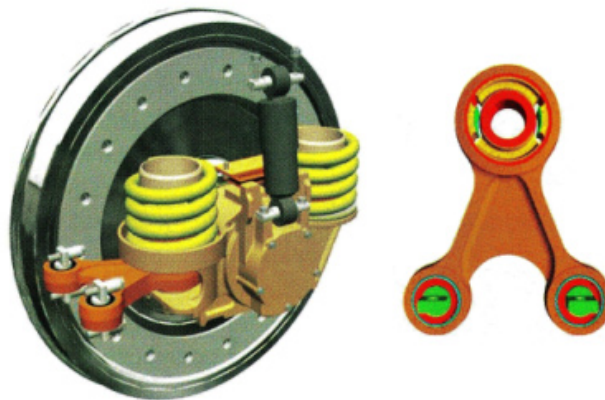


Rys.8.Połączenie przekładni z silnikiem oraz silnika z ramą wózka trakcyjnym SF4 lokomotywy uniwersalnej Vectron, opracowanej przez koncern Siemens wg [3]

Jak widać z rys.8 połączenie korpusu silnika z ramą wózka za pomocą elementów gumowo-metalowych oraz zastosowanie sprzęgła zmniejszającego ruchy względne pomiędzy przekładnią związaną z osią po-

zwala na znaczne zmniejszenie mas nieusprężynowanych w stosunku do zawieszenia napędu „za nos.” (niem. „Tatzlagerbetrieb”). Warto zwrócić uwagę, że wózek jest wyposażony w osie dążone, które ułatwiają dostęp sondy do badań ultradźwiękowych na całej długości osi, co działa korzystnie na bezpieczeństwo pojazdu jak również infrastruktury.

Na rys.9 jest przedstawiony prowadnik trójramienny, wyposażony w trzy tulejki sferyczne.



Rys.9. Prowadnik trójramienny, łączący maźnicę z ramą, zastosowany w wózku trakcyjnym SF4 lokomotywy Vectron, wyprodukowanej przez koncern Siemens wg [3]

Konstrukcyjnie prowadzenie zestawu kołowego jest zbudowane ze sprężyn śrubowych typu flexi-coil w pierwszym stopniu usprężynowania i w prowadnik trójramienny, wyposażony w łożyska sferyczne (gumowo-metalowe). Aby uzyskać radialne ustawienie zestawu kołowego w łuku, pierwszy stopień usprężynowania jest zaprojektowany, z dużą podatnością w kierunku wzdłużnym. Prowadnik trójramienny spełnia dwa niezależne wymagania. Aby zapewnić prawidłowe własności dynamiczne oraz stabilną jazdę lokomotywy sztywność w kierunku poprzecznym musi być odpowiednio wysoka, a z drugiej strony sztywność w kierunku wzdłużnym musi być odpowiednio małej wartości. Konstrukcyjnie zapewniają to trzy łożyska sferyczne, jedno z przodu (montowane od strony maźnicy) oraz dwa z tyłu (montowane od strony ramy wózka).

Dzięki zastosowaniu innowacyjnych rozwiązań w zakresie napędu prowadników zestawów kołowych oraz bazując na opracowanym modelu opłat na rzecz infrastruktury za przejazdy można oszacować trwałość lokomotywy na 40 lat, przy zakładanym przebiegu rocznym, wynoszącym 180 000 km. Ww. kombinacja elastycznego zawieszenia korpusu silnika wraz z zastosowaniem prowadników trójramiennych, umożliwia maksymalną prędkość lokomotywy 200 km/h przy stożkowatości ekwiwalentnej, wynoszącej 0,6.

Kolejnym elementem, który oferuje dodatkowe możliwości zmniejszenia sił oddziaływania pomiędzy kołem i szyną jest aktywny tłumik drgań obrotowych. Tłumik ten został opracowany przez firmę Liebherr Aerospace GmbH w Lindenbergu. Zmniejsza on



quasi-statyczne siły prowadzące poszczególnych zestawów kołowych. Tłumik ten dzieli siły przesunięcia toru równomiernie na cały wózek. Zasada działania tłumika ADD polega na kombinacji zasady działania tłumika obrotowego/ tłumika wężykowania z hydraulicznym cylindrem regulacyjnym. W efekcie tłumik ADD podczas przejazdu lokomotywy w ciasnych łukach w sposób aktywny powoduje radialne ustawienie zestawów kołowych, co w efekcie zmniejsza zużycie szyny. Zastosowanie tłumika ADD stosuje się w lokomotywie Vectron w celu optymalizacji własności dynamicznych lokomotywy. Opcjonalne stosowanie tych tłumików nie wymaga wprowadzania żadnych zmian w konstrukcji układu biegowego, ani też nadwoziu lokomotywy. Stosowanie tłumika ADD nie wymaga dodatkowych badań, gdyż został on dopuszczony do eksploatacji podczas badań dynamicznych pojazdu, które były przeprowadzane na etapie homologacji. Nowy system opłat za użytkowanie infrastruktury wpłynął bardzo mocno na producentów pojazdów w celu rozważenia stosowania aktywnego sterowania zestawów kołowych, celem radialnego ustawiania się zestawów kołowych w ciasnych łukach, aby ograniczyć zużycie szyn. Wymaga to jednak stosowania już inteligentniejszych systemów, do jakich można zaliczyć aktywności oraz sensory, które wymagają jednak przeglądów konserwacyjno-naprawczych.

## 5. PODSUMOWANIE

Wprowadzenie nowego systemu rozliczeń pomiędzy infrastrukturą, a przewoźnikami jest istotnym kamieniem milowym w zakresie inicjacji postępu w kolejnictwie. Dysponując dzisiejszą technologią można osiągnąć oszczędność kosztów sięgającą 30% w transporcie Intercity oraz 52% w transporcie regionalnym, biorąc pod uwagę system opłat SBB. Można wyciągnąć wniosek, że pojazdy posiadające dobre własności dynamiczne, charakteryzujące się mniejszym oddziaływaniem na tor i powodujące tym samym mniejsze zużycia toru i podłoża, przyczyniają się do zwiększenia trwałości, a tym samym dyspozycyjności infrastruktury kolejowej. Nowe systemy inteligentnych opłat za użytkowanie pojazdu, premiuje pojazdy o dużym stopniu innowacyjności, ultralekkie konstrukcje z aktywnym sterowaniem zestawów kołowych, z małym udziałem mas nieusprężynowanych. Z drugiej strony wprowadzenie nowego systemu może się okazać dyskryminujące dla niektórych poprawnych rozwiązań konstrukcyjnych jak np. pasywnych systemów sterowań zestawów kołowych, które w takich przypadkach toczą się tą samą drogą i mogą pozostawiać widoczne ślady na szynie. Koszty utrzymania toru rosną w sposób nieproporcjonalnie wysoko, a użytkownikowi pojazdu pozostaje wymiana na sztywne prowadzenia zestawów kołowych. Sceptycznie można również oceniać zmniejszenie możliwości zmniejszenia mas nieusprężynowanych. Należy wziąć

pod uwagę, że zastosowanie materiałów o wysokich własnościach wytrzymałościowych i odpowiednie zmniejszenie przekrojów osi jest mało realne. Materiały o wysokich własnościach wytrzymałościowych posiadają wysokie współczynniki wrażliwości na działanie karbu (niem. „Kerbempfindlichkeit”). Poza tym naprężenia nie są jedynym kryterium przydatności eksploatacyjnej zestawu kołowego. W przypadku skonstruowania osi o małej sztywności, pojawia się niebezpieczeństwo wystąpienia drgań giętych i skrętnych o częstotliwościach tym niższych im niższa jest sztywność osi. Drgania te mogą mieć nawet charakter rezonansowy, jeśli częstotliwość drgań własnych pokryje się z częstotliwością wymuszeń kinematycznych. Natomiast stosowanie osi drażonych (niem. „Hohlwellen”) wydaje się być koniecznością zwłaszcza w nowo konstruowanych pojazdach trakcyjnych. Wymaga to zastosowania otworu przelotowego Ø80 mm, który pomaga w umieszczeniu sondy do badań ultradźwiękowych na całej długości osi. Badania te można przeprowadzić podczas eksploatacji po odkręceniu pokrywy maźnicy i pierścienia dociskowego. Należy jednak wziąć pod uwagę, że naprężenia dopuszczalne dla osi drażonych są mniejsze niż dla pełnych osi (niem. „Vollwellen”). Wynika z tego, że ewentualne zyski masowe wskutek zastosowania osi drażonych mogą być niewielkie. Zastosowanie wózków o małej bazie jest celowe, ale ma ograniczenie w nacisku pojazdu bieżącym w przeliczeniu na jedną metr bieżący toru. Regulacje prawne dla poszczególnych klas toru A,B, C,D oraz E zawiera karta UIC 700 [5].

## 6. WNIOSKI

Nowy system opłat, opracowany przez właścicieli infrastruktury kolei DB, SBB, BR oraz ÖBB ma charakter innowacyjny w historii kolejnictwa w skali światowej. Powinien on się przyczynić do racjonalnego wydłużenia żywotności infrastruktury i wydłużenia okresów konserwacyjno-naprawczych. W wyniku tego zwiększa się dyspozycyjność infrastruktury. Jest to tym istotniejsze, że naprawy i konserwacje infrastruktury kolejowej są bardzo kosztowne. Z kolei nowy system naliczania opłat premiuje przede wszystkim pojazdy kolejowe, zapewniające małe oddziaływanie na tor. Takie powiązanie opłat powoduje z kolei pozytywny impuls na producentów taboru, aby dostarczać użytkownikowi pojazdów ultralekkich i możliwie małym oddziaływaniu na tor. Niniejszy system opłat spełni wyzwania konkurencji rynkowej na rynku przewozowym.

## 7. LITERATURA

- [1] *Hirtenlechner J., Brandstetter J.: SF7000-Das innovative Fahrwerkkonzept als Antwort auf Whole Life Cost Modelle. ZEVrail 137.2013 Tagungsband SFT Graz 2013*

- [2] *Kämfer B.O.: Variable Streckenbenutzungsgebühren-Motor für Fahrwerksinnovationen? Eisenbahningenieur Nr.10 /2011.*
- [3] *Strommer K.: Verschleißabhängige Trassenpreise – Chance für Innovation oder Risiko der Komplexerhöhung. ZEVrail 139. 6-7 Juni-Juli 2015.*
- [4] *Schneider R.: Neues verschleissabhängiges Trassenpreismodell in der Schweiz – Möglichkeiten auf Seiten des Fahrzeugs. ZEVrail 139. 6-7 Juni-Juli 2015.*
- [5] *Karta UIC 700: Klasyfikacja torów z punktu widzenia ich konserwacji. 10-te wydanie. Listopad 2004*