

Analiza przemieszczeń geometrycznych i kinematycznych krajowych pojazdów tramwajowych na torze prostym oraz na łuku o minimalnym promieniu

Artykuł jest poświęcony studium położenia pojazdu tramwajowego w torze prostym oraz na łuku o minimalnym promieniu z uwzględnieniem najniekorzystniejszych przemieszczeń geometrycznych i kinematycznych, które wpływają na ostateczny zarys pojazdu szynowego. Dokonano szczegółowej analizy wybranych czynników, mających wpływ na zwężenia wewnętrzne i zewnętrzne oraz podano możliwości korekty wzorów, celem uzyskania większej przestrzeni dla nadwozia tramwaju bez pogorszenia bezpiecznej jazdy.

Artykuł powstał w ramach projektu badawczego nr N 509 03531/2367 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków na naukę na lata 2006÷2009 pt.: „Metodyka wyznaczania kinematycznego zapotrzebowania przestrzeni oraz luzów bezpieczeństwa dla pojazdów tramwajowych, celem ustalenia optymalnego zarysu pojazdu”

1. Wstęp

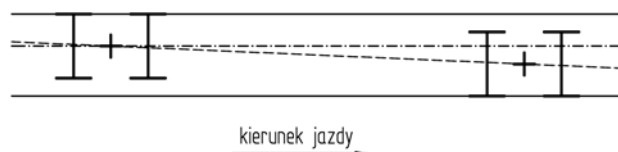
Obecnie obowiązująca norma PN-K-92008 [10] wraz z PN-K-92008/Ap1 [11] formułuje wzory na zwężenia wewnętrzne E_i oraz zewnętrzne E_a , odejmowane od zarysu odniesienia skrajni kinematycznej, celem ustalenia dopuszczalnego zarysu dla wózkowych oraz dwuosiowych pojazdów tramwajowych. Wzory te wynikają z najbardziej niekorzystnych ustawień geometrycznych na różnych odcinkach toru oraz przemieszczeń kinematycznych pojazdu (dynamika układu tor-pojazd). Analizę tych wzorów przeprowadzono w [4]. Wzory na zwężenia wyprowadzono w oparciu o założenie, że wszystkie czynniki w nich uwzględnione występują jednocześnie z takim samym prawdopodobieństwem i działają w tym samym kierunku. Wychodzi się tutaj z założenia, że tak skonstruowany pojazd może być eksploatowany z maksymalnym bezpieczeństwem lub inaczej, zarys pojazdu musi być tak skonstruowany, aby w żadnym z dopuszczalnych stanów eksploatacyjnych nie mogło dochodzić do niebezpieczeństwa zetknięcia się pojazdów. Przy obliczaniu skrajni uwzględnia się istotne właściwości pojazdu i toru. Kolejnym czynnikiem, który uwzględnia się w wyznaczaniu dopuszczalnego zarysu pojazdu, jest maksymalne przemieszczenie pojazdu H_i w dół, wynikające ze zużycia kół zestawów kołowych, sprężystego ugięcia ich elementów elastycznych, ugięcia usprężynowania (statycznego i dynamicznego), przemieszczenia pionowego pojazdu w wyniku wjazdu na pionowy tor wklęsły lub wypukły. Jeśli pojazd spełnia pod względem dopuszczalnego zarysu wymagania PN-K-92008 [10] oraz PN-K-92008/Ap1 [11], wówczas żaden jego punkt nie powinien podczas eksploatacji w najbardziej niekorzystnych warunkach wejść w kolizję z urządzeniami stałymi umieszczonymi poza zarysem określonym w normie PN-K-92009:1998 [12].

Jak wynika z [6,7 i 8] przy wyznaczaniu zwężeń wewnętrznych oraz zewnętrznych istotnym czynnikiem jest analiza najbardziej niekorzystnych położenia pojazdu tramwajowego w torze:

- położenie skrajnie wewnętrzne w łuku (pojazd nabiega osiami prowadzącymi na szynę wewnętrzną toru- niem. Sehnenstellung-rys.3)
- położenie skrajnie zewnętrzne w łuku (pojazd nabiega osiami prowadzącymi na szynę zewnętrzną toru- niem. Spießgangstellung)
- położenie z przodu swobodne w łuku (niem. Freilauf des vorderen Radsatzes)
- położenie z tyłu swobodne w łuku (niem. Freilauf des hinteren Radsatzes)
- położenie narożnikowe w torze prostym (rys.1) i w łuku (rys.2).

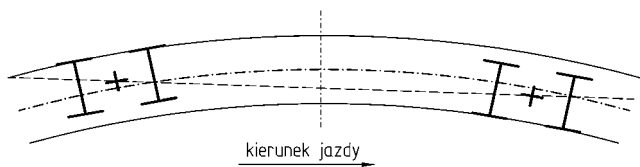
2. Położenia pojazdów tramwajowych w torze stanowiące bazę do ustalania zwężeń wewnętrznych oraz zewnętrznych

Przy wyznaczaniu zwężeń wewnętrznych E_i i zewnętrznych E_a na torze prostym najbardziej niekorzystnym położeniem ze wszystkich możliwych w eksploatacji jest położenie narożnikowe (rys.1)

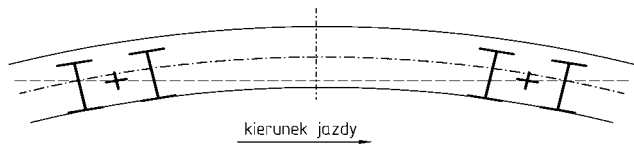


Rys.1. Położenie narożnikowe konwencjonalnego pojazdu tramwajowego wózkowego w torze prostym

Przy wyznaczaniu zwężeń wewnętrznych E_i i zewnętrznych E_a na łuku najbardziej niekorzystnym położeniem jest odpowiednio położenie skrajnie wewnętrzne (rys.3) oraz narożnikowe (rys.2).



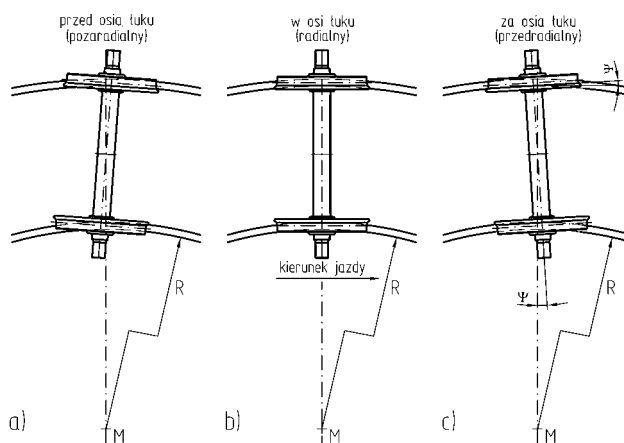
Rys.2. Położenie narożnikowe konwencjonalnego pojazdu tramwajowego w łuku toru



Rys.3. Położenie skrajnie wewnętrzne konwencjonalnego pojazdu tramwajowego w łuku toru

Częstym analizowanym przypadkiem, świadczącym o bezpiecznej eksploatacji, jest mijanie się dwóch tramwajów podczas ustawienia narożnikowego na torze prostym oraz na łuku.

Przy analizie najbardziej niekorzystnego ustawienia pojazdu w torze należy również wziąć pod uwagę wszystkie możliwe ustawienia zestawu kołowego w torze, które są przedstawione na rys.4 [3]. Idealnym ustawieniem zestawu kołowego w łuku toru jest tzw. ustawienie radialne-rys.4b (niem. „radiale Einstellung”), czyli zestaw kołowy toczy się w kierunku łuku toru bez nabiegania na szynę wewnętrzną oraz zewnętrzną. Bardzo często występują jednak dwa inne ustawienia zestawu kołowego w torze (tzn. „pozaradialne” oraz „przedradialne” z niem. odpowiednio „überra-diale Stellung” i „unterradiale Stellung”-rys.4a i 4c). Podczas ustawienia „przedradialnego” występuje nabieganie zestawu kołowego na szynę zewnętrzną łuku toru pod kątem ψ (niem. „Anlaufwinkel” lub „Anschneidwinkel”) [3]. W przypadku ustawienia „pozaradialnego” występuje nabieganie zestawu kołowego na szynę wewnętrzną łuku toru. Radialne lub quasi-radialne ustawienie się zestawu kołowego sprzyja bardziej ustawieniu narożnikowemu lub skrajnie wewnętrznemu na łukach torów, zwłaszcza pojazdów wózkowych.



Rys.4. Ustawienia zestawu kołowego w torze

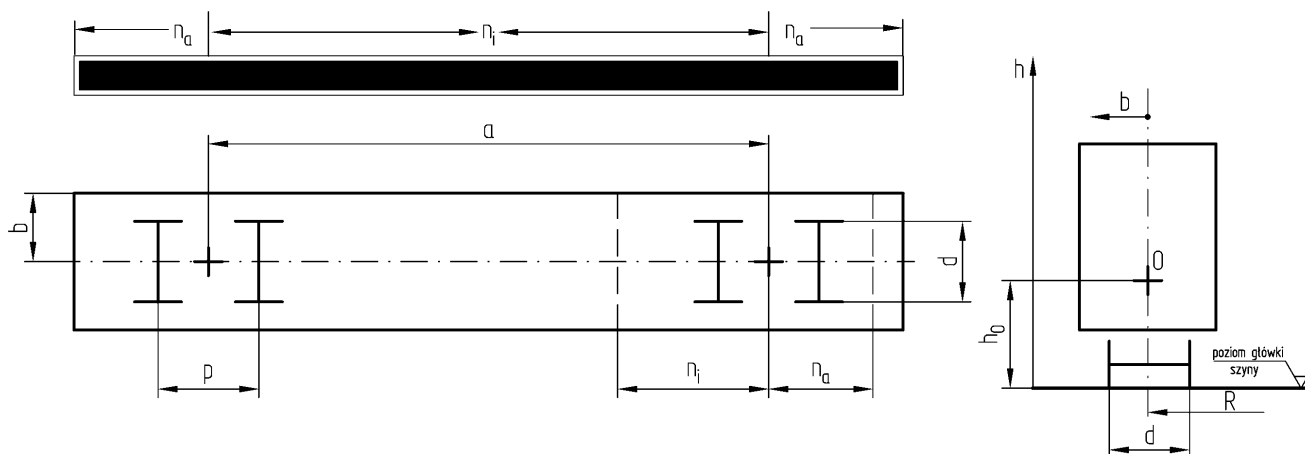
Specyfika eksploatacji pojazdów tramwajowych w porównaniu do pojazdów kolejowych polega na występowaniu małych łuków toru, o promieniu $R=20\div 25$ m oraz braku poszerzeń na łukach toru. Ewentualny luz zestawu kołowego w torze o określonym promieniu wynika z:

- prześwitu toru S (na który składa się wymiar nominalny prześwitu, jego tolerancja oraz dopuszczalne zużycie boków szyn)
- zewnętrznego rozstawu obrzeży kół d (ang. „flange gauge at the greatest possible wear”, niem. „äußerer Abstand der Spurkränze, gemessen 10 mm unterhalb des Laufkreises), który jest mierzony na powierzchni zarysu zewnętrznego wieńców kół w odległości wynoszącej 10 mm powyżej powierzchni toczonej kół.

3. Analiza wielkości przemieszczeń na łuku toru i na torze prostym dla tramwaju wg obowiązujących przepisów krajowych

3.1. Uwagi ogólne

Obliczenia dopuszczalnego zarysu pojazdu tramwajowego wg PN-K-92008:1998 [10] oraz PN-K-92008/Ap1 [11] przeprowadza się w oparciu o model przedstawiony na rys.5.



Rys.5. Model pojazdu tramwajowego przyjmowany do obliczeń dopuszczalnego zarysu pojazdu

- a- baza pojazdu tramwajowego (odległość pomiędzy czopami skreću lub umownymi środkami obrotu wózków) [m]
- p- baza wózka [m]
- n_r- odległość rozpatrywanego przekroju pojazdu od umownego czopa skreću w kierunku wewnętrznym pojazdu (środka obrotu wózka) [m]
- n_a- odległość rozpatrywanego przekroju pojazdu od umownego czopa skreću w kierunku zewnętrznym pojazdu [m]
- h₀- wysokość bieguna przechylenia względem główki szyny [m]
- h- wysokość rozpatrywanego punktu przekroju pojazdu szynowego [m]
- d- rozstaw zewnętrzny obrzeży zestawu kołowego [m]
- R- promień łuku toru [m]
- b- efektywna szerokość połowy pojazdu tramwajowego [m].

3.2. Wielkości zwiężeń wewnętrznych oraz zewnętrznych na przykładzie wybranego pojazdu tramwajowego 105N

Przyjmując dane wymiarowe dla tramwaju:

- baza pojazdu a=6 m
- baza wózka p=1,9 m
- luz przymaźniczny w kierunku poprzecznym q=0,005 m
- luz belki bujawkowej względem ramy wózka w kierunku poprzecznym w=0,030 m
- współczynnik pochylenia s=0,300
- asymetria liniowa e=0,007 m
- asymetria kątowna θ=0°45'
- wysokość bieguna pochylenia (kołysania pudła) od główki szyny h₀=0,460 m
- dopuszczalne zużycie kół w kierunku promieniowym z_k=0,025 m
- pionowe ugięcie statyczne sprężyn pudła wynikające z masy pasażerów f_{stp}=0,046 m
- pionowe ugięcie dynamiczne sprężyn wózka od masy pasażerów f_{dwp}=0,003m
- pionowe ugięcie dynamiczne sprężyn pudła f_{dp}=0,025 m
- pionowe ugięcie dynamiczne sprężyn wózka f_{dwp}=0,001 m
- odległość odbijaka resorowego od podłużnej płaszczyzny symetrii tramwaju b_{odb}=0,641 m w kierunku poprzecznym,

wykonano obliczenia zwiężeń wewnętrznych oraz zewnętrznych dla wybranych punktów przekroju poprzecznego pojazdu tramwajowego dla łuku o promieniu R=20 m (najmniejszym dopuszczalnym określonym przez normę PN-K-92008 [10]).

Wartości zwiężeń wewnętrznych E_i dla współrzędnych n₁=1 m, n₂=1,5 m, n₃=2 m, n₄=2,5 m i n₅=3 m przedstawiono w tabeli 1 przy założeniu charakterystycznych punktów zarysu skrajni kinematycznej tzn. W=1,2 m i h=0,06 m, W=1,350 m i h=3,2 mm oraz W=1,1 m i h=3,4 m.

Zwiężenia obliczono przy wykorzystaniu wzoru na zwiężenia wewnętrzne wg normy PN-K-92008 [10]:

$$E_i = \left[1 + \frac{(a-2n)^2}{8R^2} \right] \cdot \left| \frac{n(a-n) + \frac{p^2}{4} - 10}{2R} \right|_{>0} - \frac{(a-2n)^2}{8R^2} \cdot W \Big|_{>0} + \frac{S-d}{2} + q + w + e + z \quad (1)$$

gdzie:

W- współrzędna szerokości rozpatrywanego punktu przekroju pojazdu szynowego [m]

S- prześwit toru [m]

z- wyraz quasistatyczny [m]

Otrzymane wyniki zwiężeń wewnętrznych nie zależą w tym przypadku od przemieszczeń geometrycznych,

gdyż człon równania $n \cdot (a-n) + \frac{p^2}{4} - 10$ dla a=6 m

i p=1,9 m jest zawsze mniejszy od zera. Stąd wynika wniosek, że zwiężenia wewnętrzne E_i na łuku toru dla pojazdu tramwajowego są takie same jak na torze prostym.

Wartości zwiężeń zewnętrznych E_a dla współrzędnych n₁=0,25 m, n₂=0,5 m, n₃=0,75 m, n₄=1 m i n₅=1,5 m przedstawiono w tabeli 2 przy założeniu charakterystycznych punktów zarysu skrajni kinematycznej tzn. W=1,2 m i h=0,060 m, W=1,350 m i h=3,2 m oraz W=1,1 m, h=3,4 m.

Zwiężenia obliczono przy wykorzystaniu wzoru na zwiężenia zewnętrzne wg normy PN-K-92008 [10]: (patrz strona 14)

W przypadku obliczeń zwiężeń wewnętrznych oraz zewnętrznych należy uwzględnić przemieszczenie pionowe rozpatrywanego punktu przekroju poprzecznego pojazdu, które powstaje w wyniku ugięcia wszystkich stopni usprężynowania oraz zużycie elementów układu biegowego [10].

Zestawienie zwiężeń wewnętrznych E_i przykładowego pojazdu tramwajowego

Tabela 1

L.p.	h [m]	z [m]	W [m]	Zwiężenia wewnętrzne E _i [m]				
				n ₁ =1 m	n ₂ =1,5 m	n ₃ =2 m	n ₄ =2,5m	n ₅ =3 m
1.	0,060	0,013	1,200			0,075		
2.	3,200	0,091	1,350			0,153		
3.	3,400	0,097	1,100			0,159		

$$E_a = \left[1 + \frac{(a+2n)^2}{8R^2} \right] \left\{ \frac{\left| n \cdot (a+n) - \frac{p^2}{4} - 10 \right|_{>0}}{2(R + |25-R|_{>0})} + \frac{|25-R|_{>0} \left| n \cdot (a+n) - \frac{p^2}{4} - 10 - \frac{8400}{R^2} \right|_{>0}}{50R} \right\} - \frac{(a+2n)^2}{8R^2} \cdot W \Big|_{>0} + \frac{2n+a}{a} \cdot \left(\frac{S-d}{2} + q+w \right) + e+z \quad (2)$$

Zestawienie zwężeń zewnętrznych E_a przykładowego pojazdu tramwajowego

Tabela 2

L.p.	h [m]	z [m]	W [m]	Zwężenia zewnętrzne E_a [m]				
				$n_1=0,25$ m	$n_2=0,5$ m	$n_3=0,75$ m	$n_4=1$ m	$n_5=1,5$ m
1.	0,060	0,013	1,200	0,079	0,084	0,088	0,093	0,102
2.	3,200	0,091	1,350	0,157	0,162	0,166	0,171	0,180
3.	3,400	0,097	1,100	0,163	0,168	0,172	0,177	0,186

3.3. Analiza wybranych czynników mających decydujący wpływ na zwężenia wewnętrzne i zewnętrzne wózkowych pojazdów tramwajowych

Analizie poddano następujące wybrane czynniki:

- wyraz quasistatyczny „z”
- wysokość bieguna pochylania h_0
- współczynnik pochylania s
- współczynnik wychylenia A
- luz zestawu kołowego w torze.

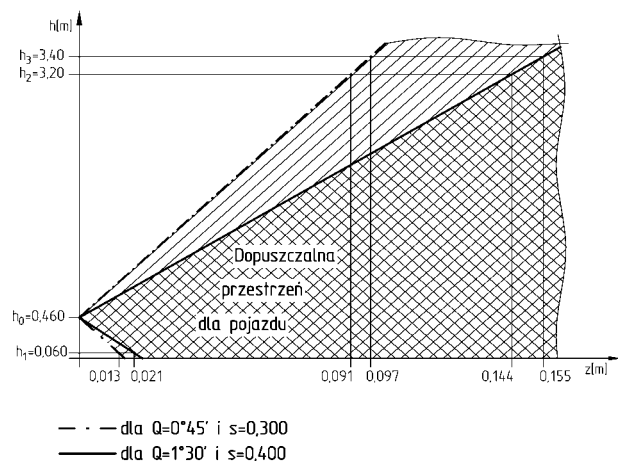
♦ Jak wynika z tabel 1 oraz 2 bardzo poważny udział w zwężeniach wewnętrznych E_i oraz zewnętrznych E_a posiada wyraz quasistatyczny „z”, wyznaczany wg wzoru:

$$z = \left(\frac{s}{15} + tg\theta \right) \cdot (h - h_0) \quad (3)$$

gdzie:

- s- współczynnik pochylania [-]
- θ - kąt asymetrii pojazdu tramwajowego [°]
- h- wysokość punktu rozpatrywanego przekroju od główki szyny [m]
- h_0 - wysokość bieguna pochylania od główki szyny [m].

Wartość wyrazu „z” rośnie wraz ze wzrostem wysokości h rozpatrywanego punktu przekroju poprzecznego oraz wartości współczynnika pochylania pojazdu s (niem. „Neigungskoeffizient”, ang. „coefficient of flexibility”), co ma szczególne znaczenie w górnych partiach pojazdu. Przykładowa krzywa dla kąta asymetrii pojazdu tramwajowego $\theta=1^{\circ}30'$ oraz dla współczynnika pochylania $s=0,4$ jest przedstawiona na rys.6. Zgodnie z PN-K-92008:1998 [10] ww. parametry przyjmują wartości dopuszczalne, określające zakres ważności normy.



Rys.6. Udział przemieszczeń quasistatycznych „z” w zwężeniach wewnętrznych E_i oraz zewnętrznych E_a w pojeździe tramwajowym dla $h_0=0,460$ m oraz dla dwóch wartości współczynnika pochylania s

Wielkość zwężeń quasistatycznych „z” dla pojazdów tramwajowych z różnymi współczynnikami pochylania s oraz różnymi kątami asymetrii θ obliczono wg wzoru (3) i przedstawiono w tabeli 3.

Jak wynika z rys.6 oraz tabeli 3 udział zwężeń quasistatycznych $z=f(\theta, s, h, h_0)$ przyjmuje bardzo duże wartości, zwłaszcza w górnych partiach wagonu tramwajowego, w związku z czym konieczne jest dokładne ustalenie wartości asymetrii kątowej θ oraz współczynnika pochylania s na drodze analitycznej oraz na drodze eksperymentalnej [3].

♦ Biegun pochylania (lub biegun kołysania, niem. „Wankpol”, ang. „roll centre”) określa się w PN-K-92008 [10] jako „punkt wokół którego odbywa się kołysanie poprzeczne pudła wagonu tramwajowego”, albo jako „punkt, którego przemieszczenie poprzeczne przyjmuje wartość zerową, jeśli do środka masy zostanie przyłożona siła poprzeczna F_y o dowolnej wartości” [1].

Zestawienie zwiężeń quasistatycznych „z” w zależności od współczynnika pochylania s oraz kąta asymetrii pojazdu θ
Tabela 3

L.p.	h [m]	θ [°]	Zwiężenia quasistatyczne z [m] dla różnych wartości współczynników pochylania s						
			s=0,1	s=0,15	s=0,2	s=0,25	s=0,3	s=0,35	s=0,4
1.	0,06	0,45°	0,007	0,009	0,010	0,011	0,013	0,0145	0,016
2.	3,20		0,054	0,063	0,072	0,081	0,090	0,099	0,108
3.	3,40		0,058	0,067	0,077	0,087	0,097	0,107	0,116
4.	0,06	1°	0,009	0,010	0,020	0,013	0,015	0,016	0,017
5.	3,20		0,066	0,075	0,084	0,093	0,102	0,111	0,120
6.	3,40		0,070	0,080	0,090	0,100	0,110	0,119	0,129
7.	0,06	1° 30'	0,013	0,014	0,015	0,017	0,018	0,019	0,021
8.	3,20		0,090	0,099	0,108	0,117	0,126	0,135	0,144
9.	3,40		0,096	0,106	0,116	0,125	0,135	0,145	0,155

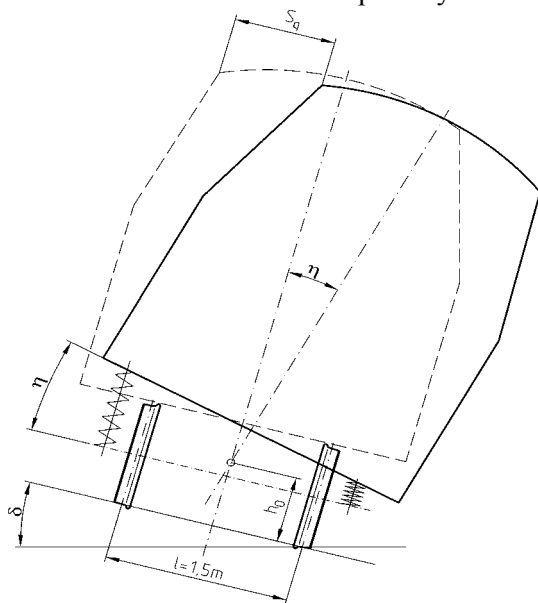
Współczynnik pochylania s definiuje się ogólnie jako (rys.7):

$$s = \frac{\eta}{\delta} \quad (4)$$

gdzie:

η - odchylenie osi pionowej pudła od normalnej do płaszczyzny wyznaczonej przez główki szyn

δ - kąt odpowiadający przechyłce lub niedostateczności przechyłki toru.



Rys.7. Pochylenie pudła pojazdu z jednostopniowym usprężynowaniem na łuku pod wpływem nadmiaru lub niedostateczności przechyłki toru

Ponieważ wózek tramwajowy posiada wielostopniowe usprężynowanie, współczynnik pochylania można wyznaczyć ze wzoru wyprowadzonego w [1]:

$$s = \frac{Q_r'' \cdot (h_c - h_0)}{c_{nk} - Q_r'' \cdot (h_c - h_0)} \quad (5)$$

gdzie:

Q_r'' -siła ciężkości pochodząca od masy usprężynowanej

h_c - wysokość środka masy usprężynowanej części pojazdu

c_{nk} - sztywność na kołysanie pojazdu z wielostopniowym usprężynowaniem.

Sztywność na kołysanie z dwustopniowym usprężynowaniem „ c_{2k} ” wyznacza się wg wzoru [1]:

$$c_{2k} = \frac{k_1^2 \cdot l_1^2 \cdot k_2^2 \cdot l_2^2}{4(k_1^2 \cdot l_1^2 + k_2^2 \cdot l_2^2)} \quad (6)$$

gdzie:

k_1 -sztywność usprężynowania pierwszego stopnia

k_2 -sztywność usprężynowania drugiego stopnia

l_1 -odległość pomiędzy osiami sprężyn lewej i prawej strony usprężynowania pierwszego stopnia

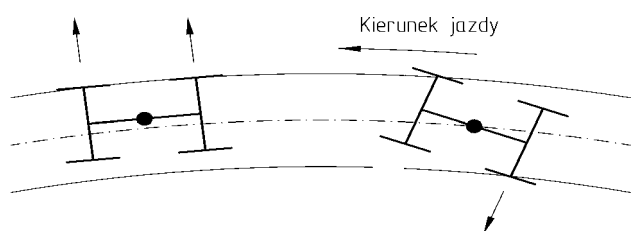
l_2 -odległość pomiędzy osiami sprężyn lewej i prawej strony usprężynowania drugiego stopnia.

Zgodnie z przyjętymi zasadami obliczania skrajni w kolejnictwie, współczynnik pochylania należy zbadać w stanie próżnym i w stanie ładownym jak również w stanach pośrednich (jeśli występuje taka potrzeba) oraz przyjąć do obliczeń zwiężeń największą wartość tego współczynnika [1]. Zaleca się, aby w takich przypadkach wykonywać badania współczynnika pochylania na drodze eksperymentalnej oraz wykonać porównanie z wartościami otrzymanymi na drodze analitycznej, analogicznie jak w przypadku pojazdów kolejowych [1 i 8]. W przypadku wystąpienia znaczących niezgodności należy dokonać analizy poprawności zastosowanej metody pomiarowej oraz metody obliczeniowej i wykonać odpowiednie przedsięwzięcia korygujące. Czynnikiem zakłócającym pomiar współczynnika pochylania jest histereza tarcia występująca w różnych stopniach usprężynowania, w związku z czym zaleca się wykonywanie pomiarów przy wyłączonych tłumikach drgań.

♦Współczynnik wychylenia lub zwiężenia A (ang. „displacement factor”, niem. „Einschränkungs faktor”)

przyjęto we wzorze (2) jako wynoszący $A = \frac{2n+a}{a}$.

Jednak, w miarę postępu prac studialnych, bardziej zbliżona do rzeczywistości jest sytuacja przedstawiona na rys. 8, uznana w kolejnictwie jako miarodajna dla wagonów osobowych oraz wagonów towarowych.



Rys.8 . Ustawienie narożnikowe pojazdu tramwajowego w torze wg [1]

Początkowo na etapie tworzenia przepisów kolejowych, czyli tzw. skrajni Jedności Technicznej, przyjęto największą wartość współczynnika wychylenia, uznając przypadek położenia narożnikowego wg rys.2 jako najbardziej miarodajny. Jako przykład może tutaj posłużyć jeszcze obowiązujący dokument wyznaczania dopuszczalnego zarysu pojazdu w oparciu o PN-70/K-02056 [9].

Pierwszy komentarz o możliwości przyjęcia mniejszego współczynnika wychylenia A pojawił się w karcie UIC 505-5 [8]. Jeśli uwzględnimy sytuację położenia skrajnie narożnikowego na łuku przedstawioną na rys.8 wówczas wzór (2) na zwięźnia zewnętrzne pojazdu tramwajowego przyjmuje postać:

$$E_a = \left[1 + \frac{(a + 2n)^2}{8R^2} \right] \left\{ \frac{\left| n \cdot (a + n) - \frac{p^2}{4} - 10 \right|_{>0}}{2(R + |25 - R|_{>0})} + \frac{|25 - R|_{>0} \left| n \cdot (a + n) - \frac{p^2}{4} - 10 - \frac{8400}{R^2} \right|_{>0}}{50R} \right\} - \frac{(a + 2n)^2}{8R^2} \cdot W \Bigg|_{>0} + \frac{n + a}{a} \cdot S + \frac{2n + a}{a} \cdot (q + w) + e + z \quad (7)$$

Wówczas wyniki zwięźni zewnętrznych E_a przyjmą wartości przedstawione w tabeli 4.

Wartości zwięźni zewnętrznych E_a obliczone wg wzoru (7)

Tabela 4

L.p.	h [m]	z [m]	W [m]	Zwięźnia zewnętrzne E_a [m]				
				$n_1=0,25$ m	$n_2=0,5$ m	$n_3=0,75$ m	$n_4=1$ m	$n_5=1,5$ m
1.	0,060	0,013	1,200	0,078	0,082	0,086	0,089	0,097
2.	3,200	0,091	1,350	0,156	0,160	0,164	0,167	0,175
3.	3,400	0,097	1,100	0,162	0,166	0,170	0,173	0,181

Z porównania wyników zwięźni zewnętrznych E_a przedstawionych w tabeli 2 i tabeli 4 wynika, że przy zastosowaniu wzoru (7) zwięźnia zewnętrzne E_a są o kilka milimetrów mniejsze, co wpływa korzystnie na kształt pojazdu. W karcie UIC 505-1 [7] przedstawiono studium wartości współczynnika wychylenia A w zależności od usytuowania pojazdu kolejowego w torze. Pomimo, że wyniki prac studialnych dotyczą pojazdów kolejowych, pojazdy tramwajowe przez analogię podlegają bardzo podobnym regułom. Wyniki prac studialnych przeprowadzonych dla współczynnika wychylenia A dla pojazdów kolejowych na podstawie karty UIC 505-1 [7] są przedstawione w tabeli 5 oraz 6.

Wartości współczynnika wychylenia A dla różnych ustawień położenia pojazdu w torze prostym oraz dla łuku toru dla pojazdów kolejowych, które stosuje się we wzorach na zwiężenia wewnętrzne E_i wg karty UIC 505-1 [7]

Tabela 5

Obliczenie zwiężeń wewnętrznych E_i						
Rodzaj pojazdu	Człon wzoru w którym występuje współ. A	położenie pojazdu w torze	$\frac{1,465 - d}{2}$	w		$\frac{p^2}{4}$ (na łuku toru)
				na torze prostym	zależne od promienia łuku	
				w	$W_{i(R)}$	
w torze prostym			współczynnik wychylenia (zwiężenia) A			
1	Pojazdy 2-osiowe lub osobno traktowane wózki jak i związane z nimi części		1	—	—	—
2	Pojazdy z 2 wózkami za wyjątkiem wymienionych w p. 3		1	1	—	—
3	Pojazdy z 1 wózkiem jako „wózkiem silnikowym” i 1 wózkiem „nośnym” lub uważanym za „nośny”		1	w_∞ $\frac{a - n\mu}{a}$	w'_∞ $\frac{n\mu}{a}$	—
w łuku toru			współczynnik wychylenia (zwiężenia) A			
4	Pojazdy 2-osiowe lub osobno traktowane wózki jak i z nimi związane części		Polożenia i współczynniki zwiężenia na łukach torów są takie same jak na torze prostym			
5	Pojazdy z 2 wózkami silnikowymi lub wózkami uważanymi jako „wózki silnikowe”		1	—	1	1
6	Pojazdy z 1 „wózkiem silnikowym” uważanym jako wózek, z 1 wózkiem tocznym lub wózkiem uważanym jako „wózek nośny”		$\frac{a - n\mu}{a}$	—	$w_{i(R)}$ $\frac{a - n\mu}{a}$ (2)	$w'_{i(R)}$ $\frac{n\mu}{a}$ (2)
					$\frac{p^2}{4}$ (2)	$\frac{p'^2}{4}$ (2)
7	Pojazdy z 2 wózkami nośnymi lub wózkami uważanymi jako „wózki nośne”		0 ⁽¹⁾	—	1 ⁽¹⁾	1 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ przypadek szczególny dla wagonów towarowych

⁽²⁾ współczynnik przyczepności o wartościach:

- $\mu \geq 0,2$ dla wózka trakcyjnego

- $0 \leq \mu < 0,2$ dla wózka tocznego

$w_{i(R)}$ - luz poprzeczny pomiędzy belką bujawkową oraz ramą zależny od promienia R łuku toru w kierunku wewnętrznym łuku

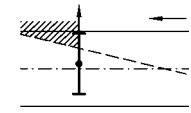

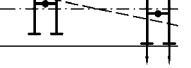
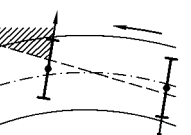
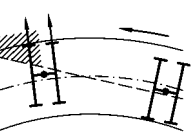
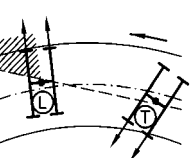
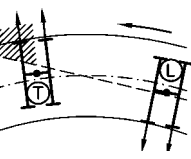

w_∞ - luz poprzeczny na torze prostym

$W_{i(R)}$, W'_∞ -j.w. dla zespołów trakcyjnych wieloczlonowych z wózkami napędzonymi

p - baza wózka napędzonego zespołu trakcyjnego wieloczlonowego.

Wartości współczynnika wychylenia A dla różnych ustawień położenia pojazdu w torze prostym oraz dla łuku toru dla pojazdów kolejowych, które stosuje się we wzorach na zwężenia zewnętrzne E_a wg karty UIC 505-1 [7]

Tabela 6

Obliczenie zwężeń zewnętrznych E_a									
Człon wzoru w którym wyst. współcz. A	Położenie pojazdu w torze	$\frac{1,465 - d}{2}$	q	w				$\frac{p^2}{4}$ (na łuku toru)	
				na torze prostym		zależne od promienia łuku			
				w	$w_{i(R)}$	$w_{ia(R)}$			
w torze prostym		współczynnik wychylenia (zwężenia) A							
1		$\frac{2n + a}{a}$	$\frac{2n + a}{a}$	—	—	—	—	—	—
2		$\frac{2n + a}{a}$	$\frac{2n + a}{a}$	$\frac{2n + a}{a}$	—	—	—	—	—
3		$\frac{2n + a}{a}$	$\frac{2n + a}{a}$	w	w'	—	—	—	—
wózek silnikowy jadący przodem									
$\frac{n + a}{a}$	$\frac{n}{a}$								
wózek toczny jadący przodem									
				$\frac{n}{a}$	$\frac{n + a}{a}$				
w łuku toru		współczynnik wychylenia (zwężenia) A							
4		Położenia i współczynniki zwężenia na łukach torów są takie same jak na torze prostym							
5		$\frac{2n + a}{a}$	$\frac{2n + a}{a}$	—	$\frac{n}{a}$	$\frac{n + a}{a}$	—	—	1
6		$\frac{n + a}{a}$	$\frac{2n + a}{a}$	—	$w_{i(R)}$	$w'_{i(R)}$	$w_{a(R)}$	$w'_{a(R)}$	$\frac{p^2}{4}$
		—	—	—	—	$\frac{n}{a}$	$\frac{n + a}{a}$	—	$\frac{n + a}{a}$
		$\frac{2n + a}{a}$	$\frac{2n + a}{a}$	—	$\frac{n}{a}$	—	—	$\frac{n + a}{a}$	$\frac{n}{a}$
7		$\frac{n + a}{a}$	$\frac{2n + a}{a}$	—	$\frac{n}{a}$	—	$\frac{n + a}{a}$	—	$1_{(1)}$
		$\frac{n + a}{a}^{(1)}$	$\frac{2n + a}{a}^{(1)}$	$\frac{2n + a}{a}^{(1)}$	—	—	—	—	

gdzie:

$w_{a(R)}$ - luz poprzeczny pomiędzy belką bujawkową oraz ramą zależny od promienia R łuku toru w kierunku zewnętrznym łuku

w'_a - j.w. dla zespołów trakcyjnych wieloczlonowych z wózkami napędzonymi; L - wózek toczny; P - wózek napędzny.

Pozostałe oznaczenia jak dla tabeli 5.

W związku z powyższym należy wziąć pod uwagę, że przyjęcie współczynnika wychylenia na poziomie

$$A = \frac{2n + a}{a}$$

we wzorach na zwężenia (1) i (2) nie jest błędem z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacyjnego, zdefiniowanego jako zabezpieczenie przed złożeniem się wszystkich niekorzystnych przypadków (ang. „worst case”). Przyjęcie jednak bardziej realnych wartości współczynników wychylenia A , odzwierciedlających rzeczywiste przypadki eksploatacyjne we wzorach na zwężenia zbliża do odtworzenia rzeczywistych wartości przemieszczeń na torze prostym oraz na łukach toru, co pozwala na osiągnięcie bardziej optymalnej konstrukcji z punktu widzenia własności użytkowych pojazdu. Dla każdego przypadku pojazdu tramwajowego należy rozważyć rzeczywiste wartości współczynnika wychylenia A we wzorach na zwężenia wewnętrzne oraz zewnętrzne, co może prowadzić do zwiększonego, rzeczywistego zarysu pojazdu jak wykazała analiza wg wzoru (7).

◆ Maksymalny luz zestawu kołowego w torze występuje wtedy, gdy wymiar „ d ” przyjmuje wartość minimalną wynoszącą $d=1410$ mm a prześwit toru przy skrajnie zużytych szynach wartość maksymalną $S=1455$ mm. Przyjmując wzory na zwężenia wewnętrzne oraz zewnętrzne założono, że wszystkie zestawy kołowe czteroosiowego pojazdu tramwajowego zużywają się równomiernie i osiągają wymiar graniczny d . Osiągnięcie wymiaru granicznego jest tym szybsze, im bardziej zwiększają się kąty nabiegania ψ zestawu kołowego na szyny (rys.4c) i powolniejsze w przypadku radialnego ustawiania się zestawu kołowego w torze (rys.4b). Ostatnio jednak coraz bardziej zyskuje na znaczeniu ograniczenie wymiaru „ d ”, chociażby z tego względu, że toczenie skrajnie zużytych zestawów kołowych jest nieekonomiczne (reprofilacja powoduje konieczność zebrania znacznych warstw materiału). Wydaje się więc, że wprowadzenie toczenia ekonomicznego przy ograniczeniu wymiaru „ d ” do wartości $d=1415$ mm lub $d=1418$ mm jest uzasadnione. Powoduje to tym samym zwiększenie szerokości dopuszczalnego zarysu pojazdu tramwajowego w pierwszym przypadku przynajmniej o 5 mm, natomiast w drugim przypadku aż o 8 mm (wzór (1)).

3.4. Możliwości korekty obowiązujących wzorów na zwężenia zewnętrzne oraz wewnętrzne w oparciu o prace studialne dla pojazdów kolejowych

W oparciu o p.3.3. i prace studialne dla pojazdów kolejowych istnieją następujące możliwości korekty poszczególnych czynników w obowiązujących wzorach na obliczenia zwężeń dla pojazdów tramwajowych:

- wyrazu korekcyjnego „ z ” poprzez dokładne określenie parametrów kąta asymetrii pojazdu „ θ ”, współczynnika pochylania „ s ” i bieguna pochylania „ h_0 ”

- wysokości bieguna pochylania h_0 poprzez wyznaczenie na drodze analitycznej i eksperymentalnej, zamiast przyjmowania wartości ryczałtowych
- współczynnika pochylania „ s ” poprzez wyznaczenie na drodze analitycznej i eksperymentalnej; przyjmowanie wartości wyznaczonych dla innych konstrukcji pojazdów tramwajowych lub jakichkolwiek wartości ryczałtowych jest niedopuszczalne
- współczynnika wychylenia A poprzez dokładną analizę konstrukcji pojazdu oraz jego ustawienia w torze
- przemieszczenia zestawu kołowego wynikającego z prześwitu toru „ S ” oraz szerokości prowadnej zestawu kołowego; jeśli istnieje możliwość toczenia ekonomicznego wówczas minimalny wymiar „ d ” można ograniczyć do wartości $d_{EK}=1415$ mm lub $d_{EK}=1418$ mm; w związku z tym we wzorach na zwężenia (1) i (2) należałoby wprowadzić wartość „ $d_{EK}=1415$ lub $d_{EK}=1418$ mm”, pod warunkiem że jest stosowane toczenie ekonomiczne zarysów zewnętrznych wieńców kół tramwajowych.

W efekcie proponowanych korekt uzyska się większą przestrzeń dla pudła pojazdu tramwajowego bez pogorszenia bezpieczeństwa eksploatacji pojazdu.

4. Analiza wielkości przemieszczeń na łuku toru dla pojazdów tramwajowych wg wytycznych niemieckich

Przemieszczenia pojazdów tramwajowych wg niemieckich wytycznych BOStrab [14] rozpatruje się dla następujących przypadków eksploatacyjnych:

- pojazdów eksploatowanych na trasach jednotorowych (niem. „eingleisige Strecke”)
- pojazdów eksploatowanych na trasach wielotorowych (niem. „mehrgleisige Strecke”), przy czym tory sąsiadują ze sobą (niem. „benachbarten Gleise”) oraz
- pojazdów eksploatowanych na trasach wielotorowych, przy czym tory nie sąsiadują ze sobą (niem. „nicht benachbarten Gleise”).

W przypadku przemieszczeń dla pojazdów tramwajowych eksploatowanych na trasach jednotorowych należy uwzględnić:

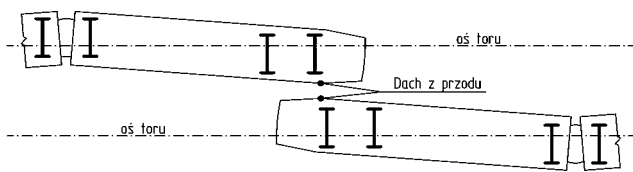
- odległość wybranych punktów pojazdu (punktów krytycznych) od osi toru (tzw. wystawanie geometryczne włącznie z połową szerokości pojazdu)
- przesunięcie poprzeczne pojazdu spowodowane luzem w torze
- przesunięcia poprzeczne spowodowane czynnikami, działającymi w sposób nieprzypadkowy i w tym samym kierunku

- przemieszczenia poprzeczne spowodowane czynnikami, działającymi w sposób przypadkowy i w tym samym kierunku.

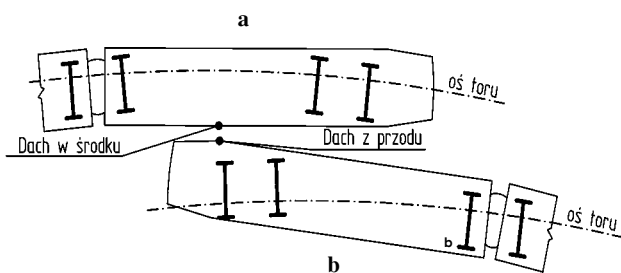
Dla przemieszczeń pojazdów tramwajowych eksploatowanych na trasach wielotorowych z sąsiadującymi torami należy dodatkowo uwzględnić:

- wpływ wiatru działającego tylko na jeden pojazd
- przesunięcia poprzeczne obydwu torów wynikające z czynników przypadkowych.

Położenia pojazdu, które są uznane przez niemieckie wytyczne BOStrab [14] jako najbardziej niekorzystne, są przedstawione na rys. 9 i 10.



Rys.9. Położenie narożnikowe pojazdów tramwajowych na torze prostym



Rys.10. Położenie pojazdów tramwajowych na łuku, przy czym:
a- jest w położeniu skrajnie wewnętrznym (tor zewnętrzny),
b- znajduje się w położeniu narożnikowym (tor wewnętrzny)

Autorzy wytycznych BOStrab[14] wyszli z założenia, że należy posłużyć się tylko jednym zarysem odniesienia tzn. zarysem odniesienia skrajni kinematycznej budowli (zarys odniesienia dla urządzeń stałych). Zrezygnowano więc przy wyznaczaniu dopuszczalnego zarysu pojazdu tramwajowego z korzystania z „zarysu odniesienia skrajni kinematycznej pojazdu”. Zaletą takiej metody jest przede wszystkim jej uniwersalność, a więc możliwość zastosowania dla różnych pojazdów o różnej budowie (np. pojazdy przegubowe), co bardziej odpowiada rzeczywistej sytuacji eksploatacyjnej wielu miast polskich i zagranicznych, gdzie kursują tramwaje różnych typów [4]. Metoda wyznaczania dopuszczalnego zarysu pojazdu na podstawie obliczenia jego kinematycznego zapotrzebowania przestrzeni (niem. „Lichtraumbedarf”) zmusza jednak konstruktora pojazdu do gruntownego poznania przepisów infrastruktury [15]. Kinematyczne zapotrzebowanie przestrzeni dla danego pojazdu porównuje się z zarysem odniesienia skrajni budowli (niem.„Umgrenzung des Lichtraumbedarfes”, ang.„lineside structure installation gauge) lub wykorzystuje się do analizy, mającej

na celu ustalenie bezkolizyjnego przejazdu pomiędzy mijającymi się pojazdami tramwajowymi. Jak wynika z paragrafu 18 ustęp 1 wytycznych BOStrab [14], pomiędzy kinematycznym zapotrzebowaniem przestrzeni oraz zarysem skrajni budowli powinien być przewidziany luz bezpieczeństwa (niem. „Sicherheitsabstand”). Z luzu bezpieczeństwa można zrezygnować pod warunkiem, że w kinematycznym zapotrzebowaniu przestrzeni uwzględni się wszystkie możliwe stany eksploatacyjne.

W związku z powyższym kinematyczne zapotrzebowanie przestrzeni wg wytycznych BOStrab [14] dla poszczególnych przypadków wyznacza się z ogólnego wzoru [4]:

$$y = y_{nz1} + y_{nz2} + \dots + y_{nzi} + \sqrt{y_{z1}^2 + y_{z2}^2 + \dots + y_{zj}^2} \quad (8)$$

gdzie:

- $y_{nz1}, y_{nz2}, \dots, y_{nzi}$ - przemieszczenia wywołane czynnikami nieprzypadkowymi (niem. „nicht zufallsbedingt”)
 - $y_{z1}, y_{z2}, y_{z3}, \dots, y_{zj}$ - przemieszczenia wywołane czynnikami przypadkowymi (niem. „zufallsbedingt”).
- Wytyczne BOStrab [14] klasyfikują czynniki wpływające na przemieszczenia na dwie grupy:
- związane z pojazdem:
 - ♦ tolerancji budowy pojazdu (z)
 - ♦ luzów (nz)
 - ♦ zużycia (nz)
 - ♦ przemieszczeń poprzecznych usprężynowania (nz, z)
 - związane z infrastrukturą:
 - ♦ trwałe odkształcenia toru uwarunkowane eksploatacją, wynikające z tolerancji wykonawczych (nz, z)
 - ♦ sprężyste odkształcenia toru wynikające z eksploatacji (nz).

Na zapotrzebowanie kinematyczne przestrzeni dla pojazdu znajdującego się na torze prostym oraz na łuku wg wzoru (8) składają się przemieszczenia przedstawione w tabeli 7.

W przypadku mijania się dwóch pojazdów tramwajowych znajdujących się na dwóch sąsiadujących torach prostych (rys.9) kinematyczne zapotrzebowanie przestrzeni, będące bazą do odległości pomiędzy torami, wynosi wg wzoru (8) odpowiednio:

$$y_d = 2b_a + y_{SS} + y_{SA} + y_{SD} + y_{FR} + y_{FP} + y_{FS} + y_{GE} + y_{WQ} + y_{WZ} + y_{HE} + \sqrt{2(y_{SW}^2 + y_{TR}^2 + y_{TA}^2 + \dots + y_{TD}^2 + y_{TP}^2 + y_{TW}^2 + y_{DS}^2) + y_{GW}^2 + y_{GV}^2 + y_{WW}^2 + 2(y_{WS}^2 + y_{WB}^2 + y_{HS}^2)} \quad (9)$$

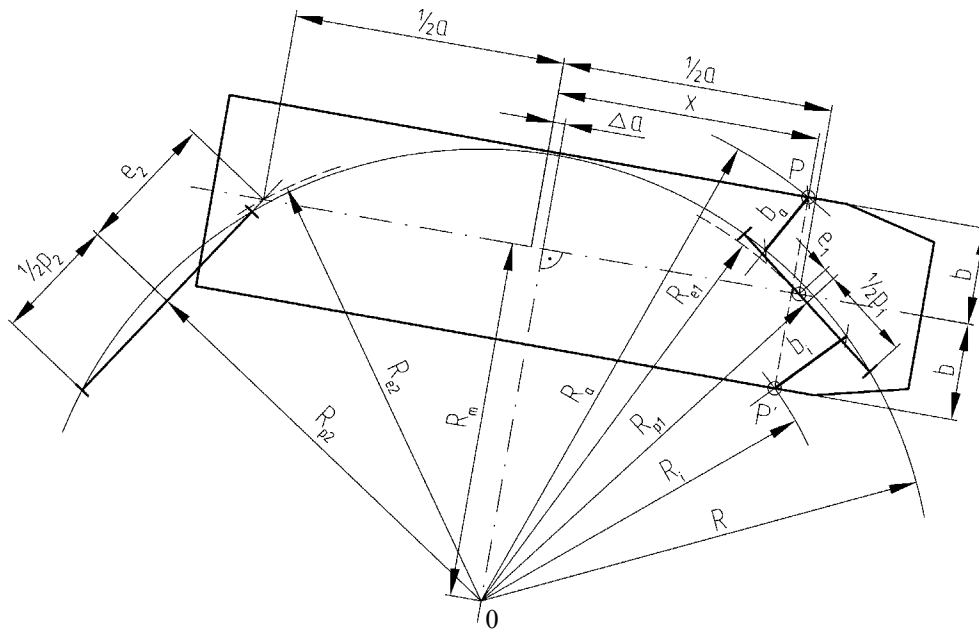
Wielkość wystawiania wybranego punktu P pojazdu b_a w kierunku zewnętrznym łuku od osi toru lub b_i w kierunku wewnętrznym łuku od osi toru można wyznaczyć na podstawie rys.11

Przemieszczenia poprzeczne dla kinematycznego zapotrzebowania przestrzeni na torze prostym

Tabela 7

L.p	Oznaczenie wg wzoru (8)	Oznaczenie	Definicja przemieszczenia poprzecznego rozpatrywanego punktu P pojazdu tramwajowego
Czynniki nieprzypadkowe			
1.	y_{nz1}	$b_{a,i}$	b_a Odległość punktu P pojazdu od środka toru w wyniku geometrycznego wystawiania w kierunku zewnętrznym łuku toru włącznie z połową szerokości pojazdu
			b_i Odległość punktu P pojazdu od środka toru w wyniku geometrycznego wystawiania w kierunku wewnętrznym łuku toru włącznie z połową szerokości pojazdu
2.	y_{nz2}	y_{SS}	Przesunięcie punktu pojazdu z powodu luzu zestawu kołowego w torze
3.	y_{nz3}	y_{SA}	Przesunięcie poprzeczne spowodowane luzem przymaźniczym
4.	y_{nz4}	y_{SD}	Przesunięcie poprzeczne w wyniku luzu w rejonie czopa skrzywienia
5.	y_{nz5}	y_{FR}	Przesunięcie poprzeczne usprężynowania koła obrotowego
6.	y_{nz6}	y_{FP}	Przesunięcie poprzeczne usprężynowania pierwszego stopnia
7.	y_{nz7}	y_{FS}	Przesunięcie poprzeczne usprężynowania drugiego stopnia
8.	y_{nz8}	y_{GE}	Przesunięcie poprzeczne wynikające z elastyczności toru i szyny
9.	y_{nz9}	y_{WQ}	Przemieszczenia poprzeczne wynikające z nadmiaru lub nieskompensowanej siły odśrodkowej
10.	y_{nz10}	y_{WZ}	Przesunięcie poprzeczne wynikające z asymetrii ładunku
11.	y_{nz11}	y_{HE}	Przemieszczenie poprzeczne wynikające ze wzajemnej różnicy wysokości szyn (zakres odkształceń sprężystych)
Czynniki przypadkowe			
1.	y_{z1}	y_{SW}	Przemieszczenie poprzeczne wynikające z kołysania pudła w wyniku uderzenia bocznego spowodowanego nierównościami na torze; przyspieszenie uderzenia należy przyjmować na poziomie $a_s = \pm 50 \text{ m/s}^2$
2.	y_{z2}	y_{TR}	Przemieszczenia poprzeczne wynikające z cech budowy pojazdu: tolerancja konstrukcyjna zestawu kołowego
3.	y_{z3}	y_{TA}	Przemieszczenia poprzeczne wynikające z cech budowy pojazdu: tolerancja konstrukcyjna maźnicy
4.	y_{z4}	y_{TD}	Przemieszczenia poprzeczne wynikające z cech budowy pojazdu: tolerancja konstrukcyjna połączenia czop skrzywienia-gniazdo skrzywienia
5.	y_{z5}	y_{TP}	Przemieszczenia poprzeczne wynikające z cech budowy pojazdu: tolerancja konstrukcyjna usprężynowania pierwszego stopnia
6.	y_{z6}	y_{TW}	Przemieszczenia poprzeczne wynikające z cech budowy pojazdu: tolerancja konstrukcyjna pudła pojazdu
7.	y_{z7}	y_{DS}	Przemieszczenia poprzeczne wynikające z ugięcia usprężynowania drugiego stopnia wskutek obciążeń dynamicznych
8.	y_{z8}	y_{GW}	Przesunięcie poprzeczne wynikające ze zmiany przesunięcia poprzecznego toru
9.	y_{z9}	y_{GV}	Przesunięcie poprzeczne toru
10.	y_{z10}	y_{WW}	Przesunięcie poprzeczne wynikające z kołysania pudła pojazdu spowodowanego wiatrem (przyjmuje się ciśnienie spowodowane wiatrem $p_w = \pm 200 \text{ N/m}^2$ odpowiadające prędkości wiatru 60 km/h)

11.	Y_{z11}	Y_{WS}	Przesunięcie poprzeczne wynikające z odchyłki osi symetrii toru
12.	Y_{z12}	Y_{WB}	Przesunięcie poprzeczne wynikające z kąta asymetrii pojazdu (regulacja)
13.	Y_{z13}	Y_{HS}	Przemieszczenie poprzeczne wynikające ze wzajemnej różnicy wysokości szyn (zakres odkształceń trwałych)



Rys.11. Wystawianie punktu P i P' pojazdu tramwajowego o bazie „a” i z dwoma wózkami o różnych bazach p₁ oraz p₂ na łuku toru o promieniu R

- Δa - odległość pomiędzy poprzeczną osią symetrii pojazdu i prostą prostopadłą do osi wzdłużnej pojazdu przechodzącej przez punkt „O” zaczepienia promienia R
- b- szerokość połowy przekroju poprzecznego pojazdu tramwajowego
- b_a - odległość punktu P przekroju poprzecznego pojazdu od środka toru w wyniku wystawiania w kierunku zewnętrznym łuku toru z uwzględnieniem połowy szerokości pojazdu
- b_i - odległość punktu P' przekroju poprzecznego pojazdu od środka toru w wyniku wystawiania w kierunku wewnętrznym łuku toru z uwzględnieniem połowy szerokości pojazdu
- e_1, e_2 - odległości pomiędzy środkami przegubów i środkami obrotu układów biegowych
- R_a - promień okręgu, na którym znajduje się rozpatrywany punkt P pojazdu
- R_{e1}, R_{e2} -promienie okręgów, na których znajdują się środki przegubów lub punkty oparcia pudła (niem. Anlenkpunkte)
- R_{p1}, R_{p2} -promienie okręgów, na których znajdują się punkty obrotu wózków lub środki symetrii układów biegowych
- R_m - odległość osi symetrii pojazdu od środka okręgu wyznaczającego łuk toru
- R- promień łuku toru
- x- współrzędna punktu P i P'

Wystawianie b_a w kierunku zewnętrznym łuku od osi toru wynosi:

$$b_a = \sqrt{\left[\sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4} - \frac{p_1^2 + p_2^2}{8} + \frac{e_1^2 + e_2^2}{2} - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{8a} - \frac{e_1^2 - e_2^2}{2a} \right)^2} + b \right]^2 + \left[x - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{8a} - \frac{e_1^2 - e_2^2}{2a} \right) \right]^2} - R \quad (10)$$

Wystawianie b_i w kierunku wewnętrznym łuku od osi toru wynosi:

$$b_i = R - \sqrt{\left[\sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4} - \frac{p_1^2 + p_2^2}{8} + \frac{e_1^2 + e_2^2}{2} - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{8a} - \frac{e_1^2 - e_2^2}{2a} \right)^2} - b \right]^2 + \left[x - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{8a} - \frac{e_1^2 - e_2^2}{2a} \right) \right]^2} \quad (11)$$

W przypadku gdy $p_1=p_2$ i $e_1=e_2=0$ wzór (10) i (11) przyjmuje postać:

$$b_a = \sqrt{\left(R^2 - \frac{a^2}{4} - \frac{p^2}{4} + b\right)^2 + x^2} - R \quad (12)$$

$$b_i = R - \sqrt{\left(R^2 - \frac{a^2}{4} - \frac{p^2}{4} - b\right)^2 + x^2} \quad (13)$$

W przypadku mijania się dwóch pojazdów tramwajowych znajdujących się na dwóch sąsiadujących łukach toru (rys.10) kinematyczne zapotrzebowanie przestrzeni, będące bazą do odległości pomiędzy torami, wynosi wg wzoru (8) odpowiednio:

$$y_d = b_{aa} + b_{ib} + y_{SSb} + y_{SAb} + y_{SDa} + y_{SDb} + y_{FRa} + y_{FRb} + y_{FPa} + y_{FPb} + y_{FSa} + y_{FSb} + y_{WZa} + y_{WZb} + y_{HEa} + y_{HEb} + y_{GEa} + y_{GEb} + y_{WQa} + y_{WQb} + \sqrt{y_{SWa}^2 + y_{SWb}^2 + y_{TRa}^2 + y_{TRb}^2 + y_{TAa}^2 + y_{TAb}^2} + \sqrt{y_{TDa}^2 + y_{TDb}^2 + y_{TPa}^2 + y_{TPb}^2 + y_{DSa}^2 + y_{DSb}^2 + y_{TWa}^2 + y_{TWb}^2 + y_{WBa}^2 + y_{WDb}^2 + y_{HSA}^2 + y_{HSb}^2 + y_{WSa}^2} + \sqrt{y_{WSb}^2 + y_{GWb}^2 + y_{GVb}^2} \quad (14)$$

gdzie indeksy użyte dla oznaczeń wymienionych w tabeli 7 dotyczą odpowiednio: indeks a-pojazdu tramwajowego znajdującego się na łuku wewnętrznym, natomiast indeks b –pojazdu tramwajowego znajdującego się na łuku zewnętrznym.

Jeśli wyznaczanie kinematycznego zapotrzebowania przestrzeni dotyczy pojazdu o nieznanymi tolerancjach wykonania pojazdu i własnościach usprężynowania jak również nieznanymi tolerancjami budowy i sprężystości toru, wówczas należy wykonać obliczenia z pewnym zapasem i oprócz geometrycznego wystawiania należy uwzględnić:

- maksymalny luz zestawu kołowego w torze
- maksymalne przesunięcie toru
- maksymalną odchyłkę wzajemnej wysokości szyn bez uwzględnienia wpływu przemieszczenia środka masy (y_{HS}^*).

W takim przypadku dla pojazdu z przeciętnym komfortem jazdy i przy uwzględnieniu normalnego stanu utrzymania i konserwacji pojazdu i toru do ustalonego kinematycznego zapotrzebowania przestrzeni należy dodać luz bezpieczeństwa y_s w zależności od wysokości badanego punktu pojazdu, o liniowym przebiegu, wynoszący przynajmniej 60 mm w rejonie podłogi oraz 120 mm w rejonie dachu.

W związku z tym dla jednotorowej trasy kinematyczne zapotrzebowanie przestrzeni wynosi odpowiednio:

$$y_p = b_{a,i} + y_{SS} + \sqrt{y_{GV}^2 + y_{HS}^{*2}} + y_s \quad (15)$$

W przypadku mijania się dwóch pojazdów tramwajowych znajdujących się na dwóch sąsiadujących torach prostych (rys.9) kinematyczne zapotrzebowanie przestrzeni, będące bazą do odległości pomiędzy torami wynosi odpowiednio:

$$y_d = 2(b_a + y_{SS}) + \sqrt{y_{GV}^2 + 2y_{HS}^{*2}} + 2y_s \quad (16)$$

W przypadku mijania się dwóch pojazdów tramwajowych znajdujących się na dwóch sąsiadujących łukach toru (rys.10) kinematyczne zapotrzebowanie przestrzeni, będące bazą do odległości pomiędzy torami wynosi odpowiednio:

$$y_d = b_{aa} + b_{ib} + y_{SSb} + \sqrt{y_{GVb}^2 + y_{HSA}^{*2} + y_{HSb}^{*2}} + 2y_s \quad (17)$$

Przedstawiona metodyka wyznaczania kinematycznego zapotrzebowania przestrzeni jest zbliżona do nowoczesnego podejścia dla pojazdów kolejowych przedstawionego w [2].

5. Wytyczne dla projektowanych pojazdów tramwajowych na podstawie przeprowadzonych analiz

W wyniku przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że ustalanie optymalnego zarysu pojazdu jest zależne od przyjętej metodyki. W przypadku ustalania dopuszczalnej szerokości pojazdu tramwajowego poprzez obliczanie zwożeń wewnętrznych oraz zewnętrznych, optymalny kształt pojazdu można ustalić poprzez odpowiedni dobór bazy (odległości pomiędzy umownymi środkami obrotu wózków) z warunku:

$$E_i = E_a \quad (18)$$

W opracowaniu [5] przedstawiono uproszczony ogólny wzór dla pojazdów kolejowych przegubowych wielocłonowych, który pozwala ustalić optymalną bazę każdego członu pojazdu:

$$a = \sqrt{12 \cdot E_a \cdot R} \quad (19)$$

Jak widać z przykładu obliczeniowego pojazdu tramwajowego, którego wyniki obliczeń zwężeń wewnętrznych oraz zwężeń zewnętrznych są przedstawione odpowiednio w tabeli 1 oraz 2, warunek równości obydwu zwężeń nie jest spełniony (zwężenia zewnętrzne są większe od zwężeń wewnętrznych), co oznacza, że baza pojazdu mogłaby być nieco większa. Podstawiając do wzoru (19) maksymalne zwężenie zewnętrzne wynoszące $E_a=0,186$ m dla $n_a=1,5$ m, $h=3,400$ m oraz $R=20$ m otrzymuje się bazę pojazdu „a” wynoszącą:

$$a = \sqrt{12 \cdot 0,186 \cdot 20} = 6,68m$$

wobec faktycznie przyjętej $a=6$ m. Zwężenie zewnętrzne E_a wyznaczone na podstawie przekształconego wzoru (19) dla $a=6$ m wynosi odpowiednio:

$$E_a = \frac{a^2}{12R} = \frac{6^2}{12 \cdot 20} = 0,150m \quad (20)$$

Zakres ważności norm PN-K-92008:1998 [10] wraz PN-K-92008/Ap1 [11] dla baz pojazdów tramwajowych wynoszących $a_{max}=8$ m jest uzasadniony. W związku z tym, że wózki (układy biegowe) charakteryzują się dużym przesuwem poprzecznym w_i lub w_a w kierunku wewnętrznym lub zewnętrznym łuku toru, warunek ważności potwierdzają również doświadczenia kolejowe, gdzie optymalny zarys członów pojazdów trakcyjnych przystosowanych do wysokich prędkości występuje dla $a \leq 8$ m. Wpływ przesuwów poprzecznych na wielkość zwężenia jest w pojazdach tramwajowych znaczący. Dlatego celowy jest jego optymalny dobór analogicznie jak w pojazdach kolejowych [13].

6. Wnioski

Jak wynika z przedstawionej analizy przemieszczeń geometrycznych na torze prostym oraz na łuku toru, metodyka wyznaczania kinematycznego zapotrzebowania przestrzeni i dopuszczalnego zarysu pojazdu jest zależna od indywidualnego podejścia poszczególnych przedsiębiorstw przewozowych, będących jednocześnie właścicielem infrastruktury oraz taboru tramwajowego.

Przy wyznaczaniu dopuszczalnego zarysu pojazdu tramwajowego należy bardzo dokładnie przeanalizować udział poszczególnych czynników w zwężeniach oraz możliwości konstrukcyjne zmniejszenia ich udziału [2]. Przyjęcie coraz bardziej podatnego usprężynowania pojazdu tramwajowego sprzyja komfortowi jazdy podróżnych, ale w istotny sposób zwiększa współczynnik pochylania „s”, a tym samym zwężenia quasztatyczne „z”. W związku z powyższym zwężenia zarysu, zwłaszcza w górnych partiach pojazdu, przyjmują bardzo duże wartości.

Spełnienie kryteriów dynamicznych, szczególnie w zakresie dopuszczalnych przyspieszeń działających na pojazd, powinno być wynikiem kompromisu z dopuszczalnym zarysem pojazdu. Takie parametry pojazdu jak szerokość miejsc siedzących, korytarza przejściowego pomiędzy rzędami miejsc siedzących, wysokość podłogi i pojazdu, ilość i usytuowanie drzwi wejściowych (częstotliwość wsiadania i wysiadania pasażerów) są też cechami określającymi komfort jazdy dla podróżnych.

Celowe jest również udoskonalenie technologii wytwarzania pojazdu tramwajowego, mające na celu ograniczenie odchyłek wykonawczych pojazdu (np. kąta asymetrii własnej θ pojazdu tramwajowego) i tym samym mających wpływ na „kinematyczne zapotrzebowanie przestrzeni.” Konstruktor pojazdu powinien posiadać informacje na temat infrastruktury tramwajowej. Wówczas jest możliwość wyznaczania nie tylko dopuszczalnego zarysu pojazdu, ale również kinematycznego zapotrzebowania przestrzeni. Pozwala to na wyznaczenie udziału odpowiednio pojazdu tramwajowego i infrastruktury w tej wielkości i podjęcie odpowiedniej optymalizacji konstrukcji względnie współpracującej z nią infrastruktury.

Jak już sygnalizowano w innych opracowaniach [1 i 2] metodyka wyznaczania kinematycznego zapotrzebowania przestrzeni przez pojazd pozwala na poznanie wszystkich czynników mających wpływ na przemieszczenia poprzeczne pojazdu, jak również uniknięcie uwzględniania niektórych czynników dwukrotnie.

Oprócz obliczeń analitycznych zaleca się przeprowadzenie analizy graficznej z użyciem wspomaganie komputerowego przy użyciu programu AUTO-CAD. Analiza graficzna może być potwierdzeniem poprawności obliczeń zwężeń zarysu odniesienia, zwłaszcza w przypadkach wątpliwych, kiedy kinematyczne zapotrzebowanie przestrzeni może przekroczyć zarys odniesienia skrajni budowli.

Literatura

- [1] Gąsowski W., Sobaś M.: *Nowoczesna skrajnia pojazdów kolejowych. Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor”.* Poznań 2005.
- [2] Gąsowski W., Sobaś M.: *Wyznaczanie dopuszczalnego zarysu pojazdu w oparciu o skrajnie pojazdów szynowych i budowli. Pojazdy Szynowe Nr 3/2007.*
- [3] Krugmann H.L.: *Lauf der Schienenfahrzeuge im Gleis. Eine Einführung.* R. Oldenbourg Verlag GmbH. München-Wien 1982.
- [4] Sobaś M.: *Skrajnia kinematyczna i budowli pojazdów tramwajowych. Pojazdy Szynowe Nr 3/2007.*
- [5] Pasemann B., Stüwig M., Theile F.: *Beitrag zur Einschränkungsberechnung für Gelenkzüge. ZEV +DET Glasers Annalen 122. Nr. 4/1998.*

- [6] Tatara F., Sobaś J.: *Analiza geometryczno-statyczna biegu pojazdów szynowych w lukach*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.04.1967. Nr 191.
- [7] Karta UIC 505-1: *Pojazdy kolejowe. Skrajnia pojazdów*. 10-te wydanie z 05.2006.
- [8] Karta UIC 505-5: *Wspólne warunki podstawowe dla kart 505-1 i 505-4. Komentarz o przygotowaniu tych kart i przepisy ich dotyczące*. 2-gie wydanie z 1.01.1977z aktualną zmianą z 1.01.1993.
- [9] Norma PN-70/K-02056: *Tabor kolejowy normalnotorowy. Skrajnie statyczne*.
- [10] Norma PN-K-92008:1998: *Komunikacja miejska. Skrajnia kinematyczna wagonów tramwajowych*.
- [11] Norma PN-K-92008/Ap1:1998: *Komunikacja miejska. Skrajnia kinematyczna wagonów tramwajowych*.
- [12] Norma PN-K-92009:1998: *Komunikacja miejska. Skrajnia budowli. Wymagania*.
- [13] Raport ERRI B 176/DT 278: *Wpływ przemieszczenia poprzecznego belki bujawkowej na profile pojazdów.*(ang.: „Influence of lateral swing bolster play on vehicle profiles”) . Utrecht, maj 1993.
- [14] Tymczasowe wytyczne dla określenia zapotrzebowania przestrzeni dla kolei miejskich wg zarządzenia dotyczącego budowy i eksploatacji tramwajów (niem. „Vorläufige Richtlinien für die Bemessung des lichten Raumes nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen(BOStrab-Lichtraum-Richtlinien”), grudzień 1996.
- [15] *Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych*. Ministerstwo Administracji, Gospodarki Terenowej i Ochrony Środowiska. Departament Komunikacji Miejskiej i Dróg. Warszawa 1983.