

# Analiza układów geometrycznych torów tramwajowych w oparciu o metodę bazy sztywnej wagonu

## Analysis of geometrical layout of tram tracks based on the railway methods

Jacek Szmagliński

Dr inż.

Politechnika Gdańska

jacsmag@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule opisano problemy występujące podczas pokonywania łuków tramwajowych, charakteryzujące się występowaniem nieprzyjemnych szarpnięć. Określono, że szarpnięcia powstają w wyniku braku analiz parametrów kinematycznych na łukach oraz zmiany schematu konstrukcyjnego tramwajów. Podano propozycję metodyki obliczeniowej, umożliwiającej ocenę najważniejszych parametrów kinematycznych, wykorzystującą stosowaną na kolei metodę bazy sztywnej wagonu. Określono parametry bazy sztywnej, związane z konstrukcją konkretnego wieloczlónowego tramwaju. Wykonano obliczenia parametrów kinematycznych dla typowych układów geometrycznych, zgodnych z Wytocznymi.

**Słowa kluczowe:** *Tory tramwajowe; kinematyka ruchu; komfort i bezpieczeństwo*

**Abstract:** The paper describes problems occurring during travelling by trams over curves. It was determined that stong jerks occur as a result of the lack of analysis of kinematic parameters on curves and changes in the construction scheme of trams. A proposal for a computational methodology has been given. Calculations of kinematic parameters were carried out for typical geometric layouts in accordance with the Polish Guidelines.

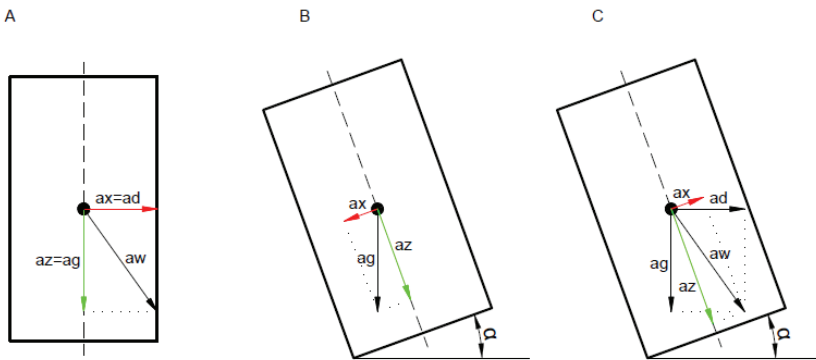
**Keywords:** *Tram rails; motion kinematics; comfort and safety*

W ostatnich latach zaobserwować można w Polsce przyspieszony proces wymiany wyeksploatowanego taboru tramwajowego na współczesne, niskopodłogowe konstrukcje. Nie zawsze kupowane są wagony nowe, bardzo często są to pojazdy używane, fabrycznie niskopodłogowe lub przebudowywane z wysokopodłogowych w ramach wykonywanych modernizacji. Najwięcej niskopodłogowych tramwajów kursujących obecnie w Polsce wyprodukowano według schematu konstrukcyjnego, rozwijanego od czasu opracowania tramwaju Siemens Combino [14, 15] (50,4% na koniec 2018 r, spadek z 54,3 % na koniec 2016 r.). Dodatkowo, w nowych zamówieniach (na początek 2019 r.) takie konstrukcje stanowią aż 71,2 %. Niewątpliwym prym pod względem tramwajów niskopodłogowych o opisywanej konstrukcji w Warszawie, zarówno pod względem liczby takich tramwajów (281) jak również ich udziału we flocie niskopodłogowej (90,7%). W przypadku producentów

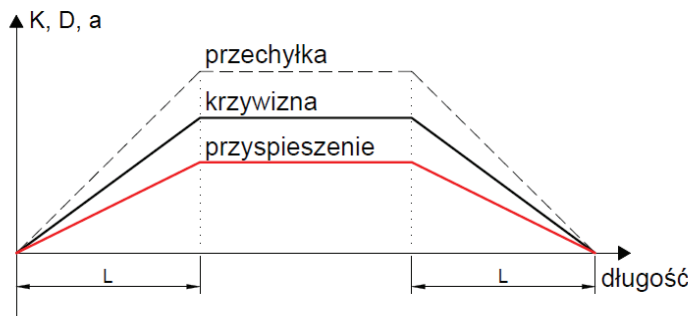
najczęściej spotykana jest Pesa ze swoimi tramwajami Tramicus, Swing oraz Jazz które stanowią 78,2% tramwajów o opisywanej powyżej konstrukcji w Polsce. Tramwaje takie składają się z nieparzystej liczby członów (3, 5, 7), z których skrajne i środkowe człony oparte są sztywno na wózku. Człony parzyste oparte są z obu stron na członach nieparzystych. Taka konstrukcja pozwoliła uzyskać (przy niewielkich kosztach zakupu i eksploatacyjnych) pojazdy w pełni niskopodłogowe, co niewątpliwie przyczyniło się do ich zdecydowanej przewagi nad innymi konstrukcjami.

Równoległe z zakupami nowych pojazdów, wykonuje się remonty i modernizacje istniejących dróg tramwajowych. Dzięki tym działaniom likwiduje się lokalne ograniczenia prędkości, wynikające w przeszłości ze złego stanu nawierzchni. Pozwala to na rozwijanie przez tramwaje pełnych prędkości na odcinkach międzyprzystankowych a co za tym idzie, skrócenie czasów jazdy.

Jednakże zauważono, że pomimo ulepszenia zarówno taboru, jak i drogi szynowej, pasażerowie skarżą się, że w nowych tramwajach odczuwają zdecydowanie większe szarpnięcia podczas przejazdu przez łuki. Najczęściej tłumaczy się, że tramwaje o konstrukcji wieloczlónowej na opartej na sztywnych wózkach są z założenia pojazdami mało komfortowymi i pasażerowie muszą się przyzwyczaić do niedogodności związanych z podróżą. Tymczasem analogiczne tramwaje z powodzeniem kursują po torach we Francji, gdzie są uznawane za bardzo komfortowy środek transportu. Stanowi to przesłankę do określenia tezy, że przyczyną zaburzeń komfortu w czasie podróży niskopodłogowymi tramwajami w Polsce jest niedopasowanie metod projektowania infrastruktury torowej do współczesnych pojazdów tramwajowych. Oznacza to, że niezbędnym jest opracowanie metod umożliwiających ocenę rzeczywistych warunków kinematycznych występujących na układach geome-



1. Idea obliczania przyspieszeń wypadkowych działających na pasażera



2. Schemat zmienności parametrów na łuku z krzywymi przejściowymi

trycznych oraz propozycji dostosowania ich do zmieniających się wagonów i zwiększających się prędkości jazdy.

W tym celu wykonano analizę typowych układów geometrycznych, występujących na torach tramwajowych w Polsce, przy zastosowaniu teorii wykorzystywanej na kolei.

## Metoda bazy sztywnej w kolejnictwie

W czasie analiz kolejowych układów geometrycznych, powszechnie stosowana jest metoda analizy parametrów kinematycznych zakładająca modelowanie pojazdu przy pomocy punktu materialnego [3, 9, 10]. Zakłada się, że punkt materialny znajdować może się w jednym z trzech stanów:

- poruszanie się ruchem jednostajnym prostoliniowym (model ruchu na odcinku prostym),
- poruszanie się ruchem jednostajnym po stałej krzywiznie (model ruchu po łuku),
- poruszanie się ruchem jednostajnym po zmiennej krzywiznie (model ruchu po krzywej przejściowej).

Dla każdego ze stanów określa się

wartości przyspieszeń działających w płaszczyźnie poziomej, prostopadłe do osi toru. Dla ruchu punktu materialnego znajdującego się w łuku, wartość przyspieszenia poprzecznego wynosi:

$$a = \frac{V^2}{12,96 \cdot R} \quad (1)$$

Przyrost przyspieszenia w czasie, na długości krzywej przejściowej, o liniowym przyroście krzywizny, łączącej prostą z łukiem, określa się na podstawie zależności:

$$\frac{da}{dt} = \frac{V^3}{46,656 \cdot R \cdot L} \quad (2)$$

Podstawowym odejściem od traktowania pojazdu jako punktu materialnego jest schemat poruszania się pociągu po torze z przechyłką. W takim przypadku to pasażer traktowany jest jako punkt materialny. Wartość przyspieszenia ( $a_x$ ), działająca na pasażera znajdującego się w pojeździe, zależy od przechylenia pudła wagonu na przechyłce ( $\alpha$ ) oraz od wartości przyspieszenia ziemskiego ( $a_g$ ) oraz dośrodkowego ( $a_d$ , obliczonego jak dla modelu punktu materialnego). Na rysunku 1 przedstawiono stany w jakich znajdować się może poruszający się pojazd. Schemat A przedstawia po-

jazd poruszający się po łuku bez przechyłki, schemat B pojazd poruszający się po odcinku prostym z przechyłką, schemat C ruch po łuku z przechyłką.

Przyspieszenie  $a_x$  określa się miarą przyspieszenia niezrównoważonego i jego wartość oblicza się według zależności:

$$a_x = \frac{V^2}{12,96 \cdot R} - \frac{g \cdot D}{s} \quad (3)$$

Zależność pomiędzy krzywizną, przechyłką i przyspieszeniem na łuku z krzywymi przejściowymi pokazano na rysunku 2. Wartość przyrostu przyspieszenia niezrównoważonego w czasie, na długości krzywej przejściowej, o liniowym przyroście krzywizny, łączącej prostą z łukiem, z rampą przechyłkową o rzędnych rosnących zgodnie z rosnącą liniowo krzywizną opisuje się następującym wzorem:

$$\frac{da_x}{dt} = \frac{V \cdot \left( \frac{V^2}{12,96 \cdot R} - \frac{g \cdot D}{s} \right)}{3,6 \cdot L} \quad (4)$$

Drugi powód odejścia od traktowania pojazdu jako punktu materialnego ma miejsce w czasie analiz układów składających się ze stycznych połączeń łuków z prostymi (połączenie bez krzywej przejściowej). W kolejnictwie takie przypadki najczęściej występują na rozjazdach i układach torów stacyjnych, gdzie łuki wykonuje się bez przechyłki. Zakłada się, że przyrost przyspieszenia wystąpi na długości pomiędzy czopami skrótu wagonu (stanowiącą tak zwaną bazę sztywną wagonu) [3, 10]. Dla typowego wagonu pasażerskiego długość bazy sztywnej wynosi 20 m. Wartość przyrostu przyspieszenia w czasie, na długości bazy sztywnej wagonu opisuje się następującym wzorem:

$$\frac{da}{dt} = \frac{V^3}{46,656 \cdot R \cdot L_b} \quad (5)$$

Oprócz przyspieszeń, na długości ramp przechyłkowych określa się przyrost przechyłki w czasie (prędkość podnoszenia się koła po szynie) i przyrost przechyłki na długości (stromość rampy przechyłkowej). Wartości, dla prostoliniowej rampy przechyłkowej, o długości równej długości krzywej przejściowej, oblicza się na podstawie następujących zależności:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{V \cdot D}{3,6 \cdot L} \quad (6)$$

$$\frac{dD}{ds} = \frac{D}{L} \quad (7)$$

Obliczone wartości porównuje się następnie z wartościami dopuszczalnymi i na tej podstawie określa się czy projekt został wykonany poprawnie. Żeby uznać układ geometryczny za spełniający założenia, prawdziwe muszą być następujące zależności:

$$-a_t \leq a_x \leq a_{dop} \quad (8)$$

$$\left| \frac{da_x}{dt} \right| \leq \left( \frac{da}{dt} \right)_{dop} \quad (9)$$

$$\frac{dD}{dt} \leq \left( \frac{dD}{dt} \right)_{dop} \quad (10)$$

$$\frac{dD}{ds} \leq \left( \frac{dD}{ds} \right)_{dop} \quad (11)$$

Z uwagi na znaczące różnice w budowie wagonów tramwajowych i kolejowych oraz różne szerokości torów zdecydowano się na analizę parametrów kinematycznych metodą przyspieszeń. Wykorzystanie takiego podejścia w przeciwieństwie do niedomiaru przechyłki ułatwia znacząco analizę, gdyż nie ma konieczności tworzenia dużej liczby wariantów parametrów dopuszczalnych. Szczególnie dotyczy to dopuszczalnej wartości nagłej zmiany niedomiaru przechyłki, która to wartość musi odzwierciedlać zarówno parametry toru i taboru.

## Układy geometryczne występujące na drogach tramwajowych

Obecnie w Polsce drogi tramwajowe projektuje się w oparciu o zapisy występujące w Rozporządzeniu [4] oraz w Wytycznych Technicznych [7]. Rozporządzenie dotyczy projektowania torów tramwajowych usytuowanych w szerokości pasa drogowego i podaje wyłącznie parametry graniczne dla promieni łuków poziomych, pionowych oraz pochyłeń podłużnych. Nie ma wymogu stosowania analiz parametrów kinematycznych jak również nie określono parametrów granicznych. Stanowi to znaczące utrud-

nienie oceny jakości wykonanego projektu, w odniesieniu do komfortu i bezpieczeństwa jazdy jak również do trwałości eksploatacyjnej nawierzchni szynowej. Z tego powodu zarządcy infrastruktury zalecają projektantom stosowanie zapisów zawartych w Wytycznych Technicznych. Dokument ten stanowi, nieobowiązkowe do stosowania, rozszerzenie zapisów występujących w Rozporządzeniu. Zaleca się w nim, stosowanie łuków o większym promieniu (na szlaku 150 m zamiast minimalnie 50 m), co miało umożliwić przejazd tramwajów bez zmniejszania prędkości na łukach. Jednocześnie nadal nie wymaga się analiz parametrów kinematycznych, projektant może skorzystać z tabeli w której dla konkretnych wartości promienia łuku i prędkości jazdy, określono wartości przechyłki. Również projektowanie połączeń prostych z łukami zostało bardzo uproszczone. Dla łuków o promieniu ponad 100 m nie wymaga się projektowania krzywych przejściowych, a dla łuków o mniejszych promieniach projektowania maksymalnie uproszczono. Najczęściej stosowana jest krzywa przejściowa w postaci stycznych do siebie łuków o promieniach stopniowo malejących.

Alternatywnie, wytyczne zalecają projektowania krzywych przejściowych w postaci paraboli trzeciego stopnia, opisanej równaniem:

$$y = \frac{x^3}{6 \cdot c} \quad (12)$$

gdzie  $c$  jest parametrem stałym o wartości 250-1000, a długość krzywej przejściowej oblicza się z zależności:

$$L = \frac{c}{R} \quad (13)$$

Wyraźnie widać, że długość krzywej przejściowej, określana według przedstawionej w Wytycznych metody, nie zależy od parametrów kinematycznych, a wyłącznie od promienia łuku oraz uznaniowo dobranego parametru  $c$  (w Wytycznych nie określono na jakiej podstawie należy dobierać wartość tego parametru).

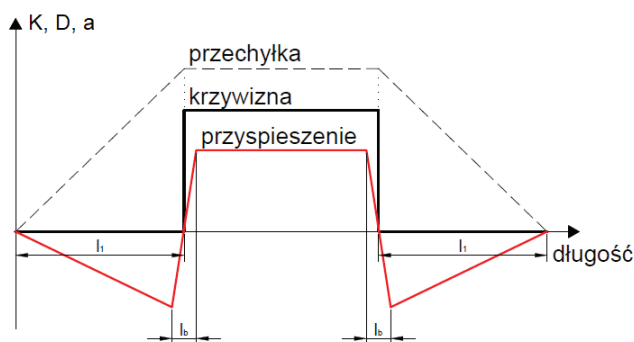
Całkowicie osobno przyjęto metodę projektowania ramp przechyłkowych, dla których jedynym analizo-

wanym parametrem jest pochylenie rampy. Nie muszą być one w żadne sposób związane z długością krzywych przejściowych ani z prędkości poruszających się po torze tramwajów. Nieco inne podejście pokazano w Tymczasowych Wytycznych [8], które zostały opracowane na początku lat osiemdziesiątych. W dokumencie podano zalecenie, że krzywa przejściowa powinna być powiązana z długością rampy przechyłkowej. Długość rampy obliczana była analogicznie jak w przypadku kolejowym, jednakże nie podano wartości dopuszczalnej prędkości przyrostu przechyłki w czasie, a jedynie gotowy wzór na długość rampy:

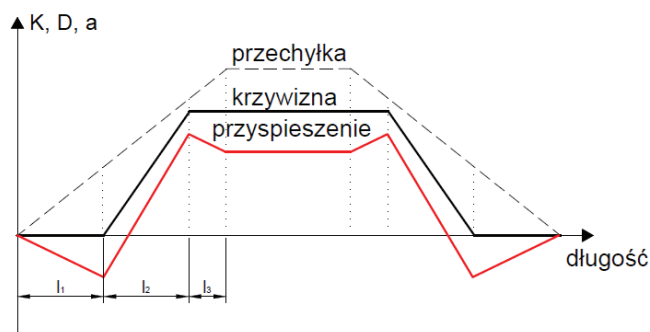
$$L = 10 \cdot V \cdot D \quad (14)$$

Występujący w dokumencie brak wymogu oceny prędkości przyrostu przyspieszenia w czasie, może skłaniać do stosowania układów bez krzywych przejściowych w przypadku łuków bez przechyłki. Tymczasowe wytyczne nigdy nie weszły jednak do powszechnego stosowania, z uwagi na zatrzymanie inwestycji tramwajowych w kryzysowych latach osiemdziesiątych. Obecnie bardzo rzadko zarządcy odwołują się do zapisów z tego dokumentu, z uwagi na utrudnioną dostępność.

Wyraźnie widać, że pomimo iż tramwaje są częścią grupy pojazdów szynowych, podejście do projektowania dróg tramwajowych jest wyraźnie inne niż w przypadku kolei. Nieodpowiednio sformułowane założenia projektowe, prowadzą do powszechnego stosowania układów uproszczonych, bez krzywych przejściowych oraz z rampami przechyłkowymi zlokalizowanymi na odcinkach prostych. Stanowią one jedno ze źródeł powszechnego w Polsce przekonania, że tramwaje są niekomfortowym środkiem lokomocji, gdyż w czasie pokonywania łuków pasażerowie odczuwają nieprzyjemne szarpnięcia.



3. Schemat zmienności parametrów na łuku z przechyłką bez krzywych przejściowych



4. Schemat zmienności parametrów na łuku z przechyłką i krzywymi przejściowymi o długości nie związanej z długością rampy przechyłkowej

## Obliczenia parametrów kinematycznych na układach tramwajowych

W czasie prowadzonych na torach tramwajowych badań [5, 6, 11] określono, że najpowszechniej występującym układem geometrycznym w Gdańsku, w miejscu zmiany kierunku trasy, jest układ bez krzywych przejściowych (ponad 75 % przypadków), bez przechyłki na łuku (analogiczny do występującego na torach kolejowych), lub z przechyłką (typowy dla torów tramwajowych). Na rysunku 3 pokazano analizę przebiegu zmienności przyspieszenia, przyjmując zasadę określania przyrostów przyspieszenia zgodnie z metodą bazy sztywnej wagonu.

Zachowanie wymaganego, wysokiego komfortu jazdy na takim układzie geometrycznym wymaga, aby spełnione były zależności przedstawione we wzorach (8-11). Zależności dotyczące przyrostów przechyłki zależą od prędkości i od długości rampy przechyłkowej, tak więc są analogiczne jak w przypadku kolejowym. Zależność dotycząca przyrostu przyspieszenia nie zrównoważonego przedstawia się odmiennie. Należy sprawdzić wartość przyrostu przyspieszenia w dwóch przedziałach, na długości rampy przechyłkowej oraz w miejscu połączenia prostej z łukiem. Na rampie przechyłkowej, przyspieszenie wynikać będzie z występowania ruchu po odcinku prostym z przechyłką (zgodnie z rysunkiem 1 B) i skierowane będzie przeciwnie do kierunku działania przyspieszenia na łuku kołowym (w przypadku nie występo-

wania nadmiaru przechyłki na łuku). Z tego powodu przyrost przyspieszenia w czasie na długości rampy określa się następującą zależnością:

$$\left(\frac{da_x}{dt}\right)_r = \frac{V \cdot g \cdot D}{3,6 \cdot s \cdot L_r} \leq \left(\frac{da}{dt}\right)_{dop} \quad (15)$$

A przyrost przyspieszenia na połączeniu prostej z łukiem, na długości bazy sztywnej wagonu:

$$\begin{aligned} \left(\frac{da_x}{dt}\right)_b &= \frac{V \cdot \Delta a_x}{3,6 \cdot L_b} = \frac{V \cdot \left(\frac{V^2}{12,96 \cdot R} - \frac{g \cdot D}{s} + \frac{g \cdot D}{s}\right)}{3,6 \cdot L_b} \\ &= \frac{V^3}{46,656 \cdot R \cdot L_b} \leq \left(\frac{da}{dt}\right)_{dop} \quad (16) \end{aligned}$$

Zaprezentowane powyżej przekształcenie pokazuje, że wartość przyrostu przyspieszenia w czasie, na długości bazy sztywnej wagonu, przy stycznym połączeniu prostej z łukiem, nie zależy od wartości przechyłki na łuku.

Wśród układów z krzywymi przejściowymi, występują układy w których długości ramp przechyłkowych są powiązane z długościami krzywych przejściowych (układ zgodny z rozwiązaniami kolejowymi, rys. 2) oraz układy z krzywymi przejściowymi niezwiązanymi z rampami przechyłkowymi. Układ może być składać się z krzywej przejściowej w postaci paraboli trzeciego stopnia i dłuższej od niej, prostoliniowej rampy przechyłkowej, zachodzącej zarówno na odcinek prosty jak i na łuk kołowy. Zależność pomiędzy przechyłką, krzywizną i przyspieszeniem na takim układzie pokazano na rysunku 4.

Określono ogólne zależności pozwalające na obliczenie parametrów kinematycznych. Maksymalna wartość przyspieszenia dośrodkowego, na od-

ciunku prostym z przechyłką wynosi:

$$a_x = \frac{g \cdot D \cdot L_1}{s \cdot (L_1 + L_2 + L_3)} \leq a_t \quad (17)$$

Maksymalna wartość niezrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego wynosi:

$$a_x = \frac{V^2}{12,96 \cdot R} - \frac{g \cdot D \cdot (L_1 + L_2)}{s \cdot (L_1 + L_2 + L_3)} \leq a_{dop} \quad (18)$$

Na długości rampy przechyłkowej zachodzącej na odcinek prosty i na łuk ( $L_1$  oraz  $L_3$ ), występuje identyczna wartość przyrostu przyspieszenia w czasie, określona zależnością:

$$\left(\frac{da_x}{dt}\right)_r = \frac{V \cdot g \cdot D}{3,6 \cdot s \cdot (L_1 + L_2 + L_3)} \leq \left(\frac{da}{dt}\right)_{dop} \quad (19)$$

Na długości krzywej przejściowej występuje przyrost przyspieszenia w czasie o wartości:

$$\left(\frac{da_x}{dt}\right)_{kp} = \frac{V^3}{46,656 \cdot R \cdot L_2} - \frac{V \cdot g \cdot D}{3,6 \cdot s \cdot (L_1 + L_2 + L_3)} \leq \left(\frac{da}{dt}\right)_{dop} \quad (20)$$

Przedstawione powyżej zależności są uniwersalne i można je stosować do dowolnych układów, w których długości  $L_1$  oraz  $L_3$  mogą być równe zero. Drugi przypadek łuku z krzywymi przejściowymi o długościach niezwiązanych z długością ramp przechyłkowych występuje w przypadku krzywej przejściowej zaprojektowanej przy pomocy serii łuków o promieniach stopniowo malejących. Zależność pomiędzy przechyłką, krzywizną i przyspieszeniem na takim układzie pokazano na rysunku 5.

Zauważyć należy, że tak skonstruowany układ składać się może ze znacznie większej liczby łuków przejściowych niż zaprezentowany w polskich Wytycznych. Przykładowo w



wytycznych australijskich, występuje kosztowa krzywa przejściowa, składająca się z aż 11 łuków przejściowych o stopniowo malejących promieniach [19]. Określono, że możliwe jest zapisanie ogólnych zależności umożliwiających obliczenie wartości przyspieszeń w poszczególnych punktach, oraz przyrostów przyspieszeń na poszczególnych odcinkach. Wyróżniono dwa odcinki poddawane analizie, odcinek na którym następuje stopniowy spadek wartości przyspieszenia z uwagi na przyrost przechyłki przy stałym promieniu łuku, oraz odcinek na który następuje skokowy przyrost przyspieszenia (baza sztywne wagonu). Wartość minimalna przyspieszenia niezrównoważonego na każdym z przedziałów wynosi:

$$-a_t \leq a_x = \frac{V^2}{12,96 \cdot R_{(k-1)}} - \frac{g \cdot D \cdot \sum_{i=1}^k L_{(i)}}{s \cdot \sum_{i=1}^n L_{(i)}} \leq a_p \quad (21)$$

Wartość maksymalna przyspieszenia niezrównoważonego na każdym z przedziałów wynosi:

$$-a_t \leq a_x = \frac{V^2}{12,96 \cdot R_{(k)}} - \frac{g \cdot D \cdot \sum_{i=1}^k L_{(i)}}{s \cdot \sum_{i=1}^n L_{(i)}} \leq a_p \quad (22)$$

Przyrost przyspieszenia w czasie, na długości łuków przejściowych oraz na długości rampy przechyłkowej na odcinku prostym wynosi:

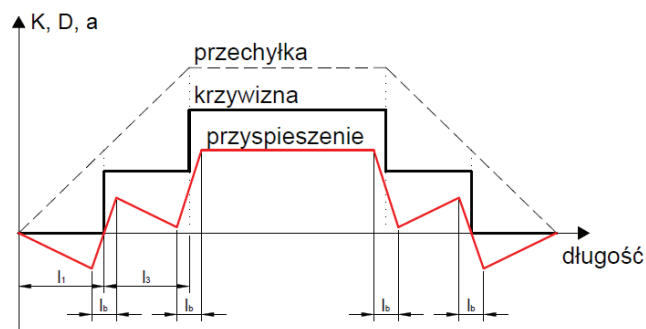
$$\left(\frac{da_x}{dt}\right)_r = \frac{V \cdot g \cdot D}{3,6 \cdot s \cdot \sum_{i=1}^n L_{(i)}} \leq \left(\frac{da}{dt}\right)_{dop} \quad (23)$$

Przyrost przyspieszenia na długości bazy sztywnej wagonu, na stycznym połączeniu między odcinkami o różnych krzywiznach wynosi:

$$\left(\frac{da_x}{dt}\right)_b = \frac{V^3}{46,656 \cdot R_{(k+1)} \cdot L_b} - \frac{V^3}{46,656 \cdot R_{(k)} \cdot L_b} \leq \left(\frac{da}{dt}\right)_{dop} \quad (24)$$

## Określenie długości bazy sztywnej w wielocłonowych tramwajach niskopodłogowych

Przedstawione w poprzednim rozdziale zależności dotyczące przyrostu przyspieszenia niezrównoważonego wynikają bezpośrednio z przyjętej w



5. Schemat zmienności parametrów na łuku z przechyłką i krzywymi przejściowymi w postaci łuków o promieniach stopniowo malejących

kolejnictwie metodologii obliczeń. Zgodnie z przepisami kolejowymi [3] długość bazy sztywnej wagonu  $L_b$  przyjmuje się jako odległość pomiędzy czopami skrzyżowania wózków wagonu. Takie podejście może zostać zastosowane bezpośrednio do analiz układów geometrycznych po których poruszają się wielowagonowe pociągi tramwajowe złożone z wagonów opartych na wózkach obrotowych (np. 105N i pochodne). W takich pojazdach konstrukcja wagonu pozwala na jednoznaczne określenie takiej odległości, która wynosi 6 m. Tymczasem Wymagania Techniczne Tramwajów Warszawskich określają długość obliczeniowej bazy sztywnej na 10 m [17]. W pracy [16] określono, że dla bazy sztywnej długości 6 m możliwe jest styczne łączenie prostych z łukami, w sytuacji jeżeli dla danej prędkości przejazdu promień łuku jest nie mniejszy niż podano w tabeli 1. Wartości przedstawiono dla przyrostu przyspieszenia 1 m/s<sup>3</sup>. Jest to maksymalna dopuszczalna wartość dla przepisów kolejowych [3] jak również dla tramwajowych w Polsce i na świecie [1, 17, 18]. Projektowanie infrastruktury z założeniem maksymalnych wartości przyrostów przyspieszeń powoduje jednak wystąpienie odczuwalnych przez pasażerów szarpnięć, dlatego zaleca się przyjmowanie wartości mniejszych niż 0,5 m/s<sup>3</sup>.

Wyraźnie widać, że komfortowy przejazd z prędkościami na jakie pozwalają warunki konstrukcyjne tramwaju typu 105N, jest wyraźnie utrudnione przy typowych dla dróg tramwajowych niewielkich promieniach łuków i braku krzywych przejściowych. Wagon 105N i pochodne są

jednak konstrukcjami wysokopodłogowymi i obecnie już przestarzałymi, które są sukcesywnie wymieniane na nowoczesne niskopodłogowe tramwaje wielocłonowe. Współczesne pojazdy charakteryzują się zdecydowanie inną budową, nieprzypominającą typowych pojazdów kolejowych. Pierwszy tramwaj niskopodłogowy, Alstom TFS-1, składał się z trzech członów opartych na obrotowych wózkach [14]. Stworzony został na bazie tramwaju wysokopodłogowego, przegubowego, z tocznym wózkiem jacobsa. Określenie długości bazy sztywnej dla takiego tramwaju nie stanowi większego problemu i wynosi w przybliżeniu 6 m (tak jak dla wagonu 105N). Obecnie jednak odchodzi się od takich konstrukcji (z uwagi na brak niskiej podłogi na całej długości pociągu) i produkowane są tramwaje o całkowicie odmiennej konstrukcji. Najczęściej obecnie kupowanymi tramwajami w Polsce są wagony o konstrukcji wielocłonowej wzorowanej na modułowym tramwaju Combino [15]. Składają się one z dwóch typów członów: człony oparte na sztywnym wózku oraz człony wiszące pomiędzy członami opartymi. Tramwaje mogą być w całości niskopodłogowe, bez stopni poprzecznych oraz pochylni (jak na przykład Pesa Jazz), są również stosunkowo nieskomplikowane i niedrogie. Zdecydowana trudność eksploatacyjna tych pojazdów wynika z zastosowania sztywnych wózków (bez

Tab. 1. Minimalne wartości promieni łuków pozwalające na połączenie z prostą bez krzywizną przejściową dla  $L_b=6$  m

	V = 40 km/h	V = 50 km/h	V = 60 km/h	V = 47 km/h
$R_m$	300 m	500	800	1400

**Tab. 2.** Maksymalna wartość przyrostu przyspieszenia z uwagi na prędkość i promień łuku

V[km/h] R[m]	10	15	20	25	30	40	50	60	70
20	0,161	0,504	1,232						
25	0,107	0,323	0,804						
30	0,071	0,202	0,520	1,048					
35	0,054	0,181	0,429	0,701					
40	0,054	0,181	0,429	0,701	1,284				
50	0,054	0,181	0,429	0,772	1,365				
75	0,036	0,121	0,286	0,558	0,883	2,178			
100	0,054	0,181	0,429	0,837	1,369	3,322			
150	0,036	0,121	0,286	0,558	0,965	2,182	4,331	7,555	
200	0,027	0,090	0,214	0,419	0,723	1,715	3,219	5,624	9,000
300	0,018	0,060	0,143	0,279	0,482	1,143	2,233	3,702	5,944
400	0,013	0,045	0,107	0,209	0,362	0,857	1,674	2,894	4,413
500	0,011	0,036	0,086	0,167	0,289	0,686	1,340	2,315	3,676
750	0,007	0,024	0,057	0,112	0,193	0,457	0,893	1,543	2,451
1000	0,005	0,018	0,043	0,084	0,145	0,343	0,670	1,157	1,838
2000	0,003	0,009	0,021	0,042	0,072	0,171	0,335	0,579	0,919

możliwości swobodnego obrotu). W przypadku poruszania się pojazdu po krzywiźnie, wraz z obrotem wózka, obraca się cały człon oparty.

W tramwaju wielocłonowym, wyróżnić należy dwie strefy o odmiennych długościach baz sztywnych:

- Pierwsza strefa znajduje się w członach opartych, charakteryzująca się gwałtownymi szarpnięciami. Obrót członu opartego jest minimalnie zmniejszany przez odsprężynowanie względem wózka, jednak przy tych samych warunkach eksploatacyjnych (prędkość, promień, długość i typ krzywej przejściowej) pasażerowie odczuwają znacząco większe szarpnięcia niż w przypadku podróży tramwajem z obrotowymi wózkami. W tych członach brakuje możliwości określenia długości bazy sztywnej (według zasad kolejowych). W literaturze spotkać można analizy wskazujące, że w przypadku wózków sztywnych długość bazy sztywnej oblicza się na podstawie rozstawu osi w wózku (1,9 m) [11]. Z uwagi na to, że wózki w analizowanych tramwajach nie są całkowicie sztywne i posiadają możliwość niewielkiego obrotu, obserwowane wartości przyrostów przyspieszeń były mniejsze niż wynikałoby z obliczeń. Analiza porównawcza (przy użyciu akcele-

rometrów MEMS w tramwaju Pesa Swing oraz N8C), pozwoliły na określenie że obliczeniowa baza sztywna dla takiej strefy wynosi około 4 m [13].

- Druga strefa znajduje się w członach wiszących, gdzie nie odczuwa się zwiększonych szarpnięć w porównaniu z przejazdem tramwajem klasycznym. Wynika to z faktu, że baza sztywna dla tych członów odnosi się do odległości pomiędzy środkami przejść Hubnera (przeguby z możliwością ruchu w dwóch płaszczyznach) i jest często dłuższa niż w przypadku wagonów 105N.

### Obliczenia parametrów kinematycznych dla tramwajów niskopodłogowych

Obecnie trwa w Polsce intensywny proces wymiany taboru. Miasta przechodzą z eksploatacji pojazdów wagonowych, na wielocłonowe tramwaje niskopodłogowe. Najczęściej planuje się zachowanie parametrów eksploatacyjnych (bądź ich polepszenie z uwagi na zwiększenie prędkości) na niezmienionym układzie geometrycznym torów, dostosowanych do kursowania tramwajów na wózkach obrotowych. Jak pokazano wcześniej, długości baz sztywnych (a co za tym idzie przyrosty przyspieszeń) różnią się

znacząco pomiędzy współczesnymi a klasycznymi konstrukcjami. Z tego powodu, po wprowadzeniu nowych tramwajów, bardzo często słyszalne są opinie pasażerów, że pojazdy są niewątpliwie wygodne, ale mocno szarpią podczas jazdy. Jednocześnie pasażerowie nie zdając sobie sprawy ze zmienności warunków podróżowania w różnych częściach tramwaju, najczęściej o zmniejszony komfort jazdy obwiniają motorniczego. Z tego powodu postanowiono dokonać obliczeń przyrostów przyspieszeń na układach zaprojektowanych zgodnie z Wytycznymi [7], przyjmując długość bazy sztywnej 4 m (jak dla członu opartego w tramwaju wielocłonowym). Dla łuków o promieniu poniżej 100 m obliczenia wykonano przy założeniu, że krzywe przejściowe są zaprojektowane w postaci łuków stycznych (z rampą przechyłkową niezwiązaną z długością łuków przejściowych), a dla łuków o większym promieniu bez krzywej przejściowej. W tabeli 2 podano maksymalne wartości przyrostu przyspieszenia na danym układzie obliczonym dla minimalnej przechyłki. Wartości podawane dla przechyłki normalnej są porównywalne, jednak zmniejszony byłby zakres obliczeń (mniejsza prędkość maksymalna). Wartości przekraczające  $1 \text{ m/s}^3$  (maksymalnie dopuszczalna wartość) oznaczono kolorem czarnym, a wartości przekraczające  $0,5 \text{ m/s}^3$  (wartość po przekroczeniu której pasażerowie odczuwają zmniejszenie komfortu jazdy) oznaczono kolorem jasnoszarym. Należy zauważyć, dopiero przy przyjęciu dopuszczalnej wartości przyrostu przyspieszenia o wartości  $1 \text{ m/s}^3$ , istnieje możliwość prowadzenia ruchu tramwajów niskopodłogowych z prędkością 70 km/h, po układach geometrycznych zaprojektowanych według Wytycznych [7].

### Wnioski

Zaburzenia komfortu jazdy tramwajami na łukach wynikają z braku krzywych przejściowych lub ich niedostatecznej długości. W przypadku braku krzywych, lub stosowania układów złożonych z łuków o promieniach

stopniowo malejących, przyspieszenie niezrównoważone przyrasta na długości bazy sztywnej wagonu. Przy większych prędkościach jazdy, bardzo krótkie bazy którymi charakteryzują się współczesne niskopodłogowe wagony tramwajowe, stanowią niedostateczną długość dla zapewnienia akceptowalnego komfortu podróży.

Wprowadzanie do eksploatacji nowoczesnych niskopodłogowych tramwajów powinno odbywać się jednocześnie z procesem dostosowania infrastruktury do zwiększonych prędkości poruszania się nowych tramwajów w porównaniu ze starymi oraz różnic we współpracy pomiędzy torem a pojazdem. Pojazdy ze sztywnym oparciem członów na wózkach (lub zapewniające możliwość niewielkiego obrotu), w analizach powinny być traktowane w taki sposób, jakby długość bazy sztywnej wagonu była bardzo krótka (proponowana długość obliczeniowa 4 m).

Należy odchodzić od stosowania uproszczonych układów geometrycznych, bez krzywych przejściowych i z rampami przechyłkowymi zlokalizowanymi na odcinkach prostych przed łukami, gdyż nie zapewniają one łagodnych przyrostów przyspieszenia niezrównoważonego. W przypadku jeżeli istnieje taka możliwość, należy projektować łuki poprzedzone krzywymi przejściowymi w postaci klotoidy o odpowiedniej długości. W przypadku braku możliwości wprowadzenia krzywych przejściowych (na przykład na rozjazdach), należy wprowadzić zasadę wykonywania obliczeń rzeczywistych parametrów kinematycznych i w zależności do potrzeb wprowadzać ograniczenia prędkości.

Jeżeli nie istnieje możliwość dostosowania infrastruktury do wymogów eksploatacji tramwajów o bardzo krótkiej obliczeniowej długości bazy sztywnej wagonu, należy rozważyć takie formułowanie warunków przetargowych na zakup nowych wagonów, aby nowe pojazdy charakteryzowały się większymi długościami bazy. Można to osiągnąć, poprzez założenie odpowiedniej konstrukcji wózków (wszystkie wózki obrotowe) oraz ich

rozmieszczenie na długości wagonu (w równych odległościach). Przykładem takich konstrukcji mogą być tramwaje zamawiane przez Kraków, na przykład Bombardier NGT8 czy Pesa Krakowiak, które pomimo wyższej ceny cechują się wyższymi właściwościami trakcyjnymi i łagodniejszym wpasowywaniem się w łuki. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Der Schweizerische Bundesrat: Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung, EBV), 1983
- [2] Koc W., Specht C., Nowak A., Szulwic J., Szmagliński J., Skóra M., Specht M., Czapnik M.: Dostępność fazowych rozwiązań GPS/GLONASS podczas geodezyjnej inwentaryzacji dróg szynowych - na przykładzie linii tramwajowej Gdańska, Technika Transportu Szynowego 9/2012
- [3] Dz. U. 1998 nr 151 poz. 987: Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 roku w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie
- [4] Dz. U. 1999 nr 43 poz. 430, Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie
- [5] Koc W., Specht C., Chrostowski P., Szmagliński J.: Możliwości satelitarnej oceny położenia geometrycznego tramwajowych węzłów rozjazdowych. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 2 (zeszyt 101), Kraków 2013
- [6] Koc W., Specht C., Chrostowski P., Szmagliński J.: Ocena kształtu geometrycznego torów tramwajowych na podstawie pomiarów satelitarnych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 98/2013
- [7] Ministerstwo Administracji, Gospodarki Terenowej i Ochrony Środowiska, Departament Komunikacji Miejskiej i Dróg: Wytyczne techniczne projektowania, budo-

wy i utrzymania torów tramwajowych, Warszawa 1983

- [8] Ministerstwo Administracji, Gospodarki Terenowej i Ochrony Środowiska. Departament Komunikacji Miejskiej i Dróg: Tymczasowe wytyczne do projektowania szybkiej komunikacji tramwajowej, Warszawa 1981
- [9] PN-EN 13803-1: 2010: Kolejnictwo - Tor - Parametry projektowania toru w planie - Tor o szerokości 1435 mm i większej - Część 1: Szlak
- [10] PN-EN 13803-2: 2010: Kolejnictwo - Tor - Parametry projektowania toru w planie - Tor o szerokości 1435 mm i większej - Część 2: Rozjazdy, skrzyżowania i inne porównywalne przypadki z nagłymi zmianami krzywizny
- [11] Rychlewski J., Firlik B., Straszewski W.: Wytyczne projektowania torów tramwajowych a obecnie używany tabor tramwajowy, Archiwum instytutu inżynierii lądowej 25/2017
- [12] Specht C., Koc W., Nowak A., Szulwic J., Szmagliński J., Skóra M., Specht M., Czapnik M.: Dostępność fazowych rozwiązań GPS/Glonass podczas geodezyjnej inwentaryzacji dróg szynowych - na przykładzie linii tramwajowej Gdańska. Technika Transportu Szynowego 2012, nr 9.
- [13] Szmagliński J.: Projektowanie tras tramwajowych przy wykorzystaniu mobilnych pomiarów satelitarnych, Archiwum instytutu inżynierii lądowej 25/2017
- [14] Szmagliński J.: Tramwaje niskopodłogowe. Geneza, konstrukcje, Infrastruktura Transportu 4/2014
- [15] Szmagliński J.: Tramwaje niskopodłogowe w Polsce, Infrastruktura Transportu 6/2014
- [16] Szwaczekiewicz K., Szmagliński J.: Propozycja wykorzystania praktyki kolejowej przy modernizacji torów tramwajowych, Logistyka 4/2015
- [17] Tramwaje Warszawskie: Wymagania techniczne dotyczące projektowania i budowy torowisk tramwajowych na sieci Tramwajów Warszawskich, 2016
- [18] Transit Cooperative Research Program: Track Design Handbook for Light Rail Transit, Washington D.C. 2012
- [19] Yarra Trams, Tram track design guidelines, Melbourne 2003.