

Deformacje eksploatacyjne toru tramwajowego determinujące skrajnię budowli

W pracy przedstawiono deformacje toru tramwajowego powstające w wyniku eksploatacji a mające wpływ na skrajnię budowli.

1. Wstęp

Praca jest wynikiem realizacji projektu badawczego własnego nr N509 035 31/2367 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego pt.: *Metodyka wyznaczania kinematycznego zapotrzebowania przestrzeni oraz luzów bezpieczeństwa dla pojazdów tramwajowych celem ustalenia optymalnego zarysu pojazdu.*”

Celem opracowania jest wskazanie na czynniki wywołane deformacjami eksploatacyjnymi toru tramwajowego wpływającymi na skrajnię budowli.

Kontur koniecznej przestrzeni niezabudowanej (skrajni budowli) powstaje z zarysu odniesienia skrajni kinematycznej [1] w drodze poszerzenia tego zarysu o amplitudy (czynniki) ruchów pasożytniczych (szkodliwych) pojazdu wywołanych deformacjami eksploatacyjnymi toru.

Na torach w miarę upływu czasu ich eksploataowania zaczynają się pojawiać następujące deformacje mające wpływ na ruchy pasożytnicze pojazdu [2, 3]:

- zygzakowość toru (terminologia anglojęzyczna „track stagger”),
- przesunięcie się toru w poprzek („transversal track dislocation”),
- nierównomierne zużycie boków główek szyn („uneven wear of the rail sides”),
- zapadnięcie pionowe toru („vertical track subsidence”),
- zużycie główek szyn („wear of the rail tops”),
- wichrowatość toru („track twist”).

Rozpatrzmy po kolei wszystkie te deformacje.

2. Zygzakowość toru

2.1. Dopuszczalna wielkość zygzakowości toru
Według [2,3] dopuszcza się następującą zygzakowość toru (rys.1).

Zatem amplituda zygzakowości wynosi

$$e_{zygz} = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$$

a ćwierć długości fali zygzakowości wynosi co najmniej

$$A_{zygz} = \frac{10000}{2} = 5000 \text{ mm} = 5 \text{ m.}$$

Kąt zygzakowości wynosi

$$\alpha_{zygz} = \frac{e_{zygz}}{A_{zygz}} = \frac{0,025}{5} = 0,005 .$$

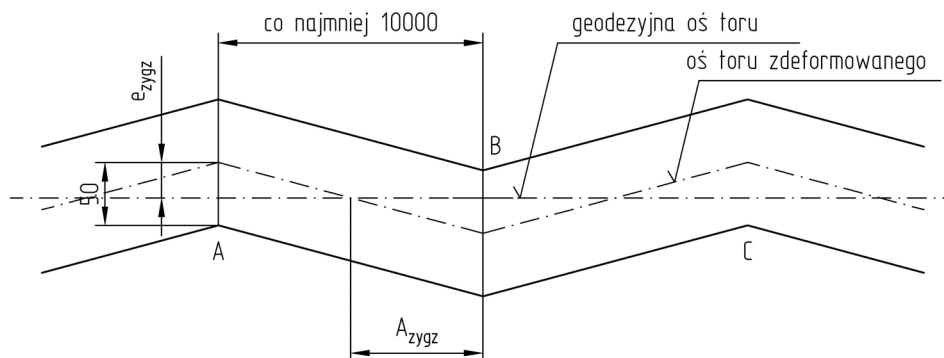
2.2. Ustawienie statyczne pojazdu w zygzaku toru, gdy zestawy kołowe zajmują środkowe położenie w torze (rys. 2).

Odbieganie punktu A pojazdu od osi toru idealnego wyniesie

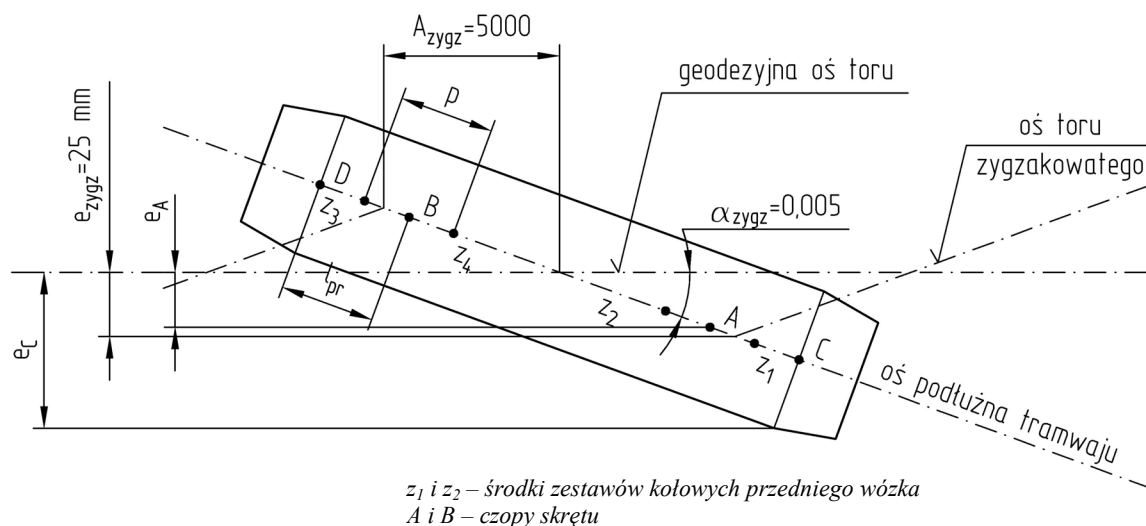
$$e_A = e_{zygz} - \frac{p}{2} \cdot \alpha_{zygz} = \left(1 - \frac{p}{2A_{zygz}}\right) \cdot e_{zygz} .$$

Odbieganie punktu C pojazdu od osi toru idealnego wyniesie

$$e_C = e_A + l_{pr} \cdot \alpha_{zygz} = \left(1 + \frac{2l_{pr} - p}{2A_{zygz}}\right) \cdot e_{zygz} \quad (1)$$



Rys. 1. Zygzakowość toru



Rys. 2. Ustawienie pojazdu

Nie ma raczej szans na to aby kiedykolwiek wartość p mogła być mniejsza od obecnej 1,9m [1]. Z kolei wydaje się, że największa możliwa wartość l_{pr} , jaka kiedykolwiek będzie mogła być zastosowana, nie będzie większa niż 3m. Przyjmując te wartości i podstawiając do e_c otrzymamy $e_c \approx 35$ mm.

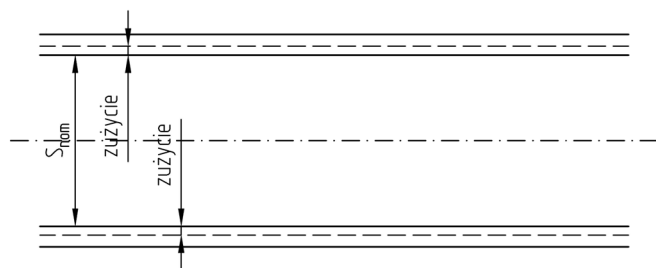
3. Przesunięcie się toru w poprzek

Dopuszczalne równoległe przesunięcie się toru w poprzek wynosi tak jak dopuszczalna zygzakowatość [2,3]

$$e_{przes} = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$$

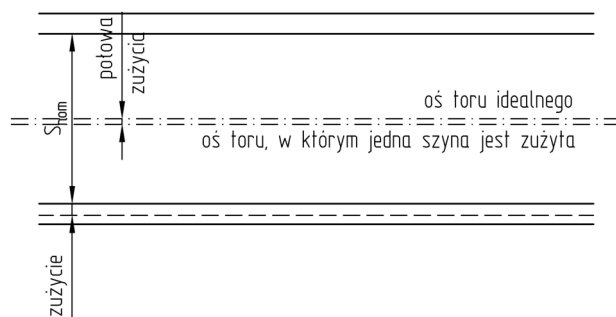
4. Nierównomierne zużycie boków szyn

Według [2, 3] dopuszczalne zużycie boku szyny wynosi 15 mm. Gdy boki szyny zużywają się jednakowo, to oś symetrii toru nie zmienia swego położenia i tor pozostaje idealny (rys. 3).



Taki przypadek rozpatrywano przy wyznaczaniu zarysu odniesienia skrajni kinematycznej.

Gdy tylko jedna szyna ulega zużyciu, to oś symetrii toru odbiega od swego początkowego położenia o połowę zużycia szyny (rys. 4).



Rys. 4. Tor – niesymetryczne zużycie szyn

Zatem

$$e_{zuż} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ mm} = 0,0075 \text{ m}$$

5. Jednoczesność zygzakowatości, przesunięcia równoległego i zużycia boku pojedynczej szyny toru

Na torze zygzakowatym zawsze zużywają się boki szyn w punktach A, B i C (rys.1). Zatem zużywanie się szyn jak gdyby stara się „wyprostować” zygzakowatości. Wobec tego zygzakowatość jest najbardziej niekorzystna gdy zaistnieje na nowym niez użytym torze, co może nastąpić na przykład w wyniku wysokiej temperatury latem.

Zatem przy zygzakowatości toru nie należy uwzględniać nierównomiernego zużywania się boków szyn.

Dla odmiany na torze przesuniętym w poprzek równoległe może wystąpić zużycie tylko jednej szyny i to dowolnej, czyli zużycie boku szyny może powiększyć przemieszczenie pasożytnicze (szkodliwe) pojazdu na przesuniętym torze. Łącznie przesunięcie wyniesie

$$e_p = e_{przes} + e_{zuż} \quad (2)$$

Liczbowo wyniesie to

$$e_p = 25 + 7,5 = 32,5 \text{ mm}$$

Tor nie może być jednocześnie zygzakowaty i przesunięty równolegle. Zatem zygzakowatość toru, dla której przesunięcie pasażerskie pewnej części pojazdu w bok wynosi $e_c=35$ mm jest przypadkiem bardziej niekorzystnym niż przesunięcie równoległe dające tylko 32,5 mm przemieszczenia pojazdu.

Wobec tego przemieszczenie pasażerskie pojazdu wynikające z deformacji poziomych toru może wynosić

$$e_{poz}=e_c=35 \text{ mm.}$$

6. Zużycie główek szyn i zapadnięcie toru (rys. 5)

6.1. Ustawienie statyczne pojazdu w zapadnięciu toru

Według [2, 3] dopuszczalne zużycie główki szyn wynosi 18 mm, a dopuszczalne zapadnięcie toru 25 mm.

Przyjmujemy tę bardziej niekorzystną wartość $h_{zap}=25$ mm. Im większa jest przy tym długość zapadnięcia, tym bardziej niekorzystna jest sytuacja dla skrajni. Jest nieprawdopodobne aby ta długość była większa niż 5000 mm. Przyjmujemy tę wartość.

Opadnięcie pierwszego koła K_1 wyniesie $h_{zap}=25$ mm. Opadnięcie czopa skreću wózka wyniesie

$$h_{cs} = h_{zap} - \frac{p}{2} \cdot \frac{h_{zap}}{A_{zap}} = \left(1 - \frac{p}{2A_{zap}}\right) h_{zap}$$

Opadnięcie punktu C pudła pojazdu wynosi

$$h_{dol} = \frac{a + l_{pr}}{a} \cdot h_{cs}$$

Podstawiając za h_{cs} powyższą wartość otrzymamy

$$h_{dol} = \left(1 + \frac{l_{pr}}{a}\right) \cdot \left(1 - \frac{p}{2A_{zap}}\right) \cdot h_{zap} \quad (3)$$

Kontur koniecznej przestrzeni niezabudowanej musi być tak wyznaczony, żeby pasował do wszelkich typów tramwajów, nawet takich których obecnie jeszcze nie ma, ale które mogą być skonstruowane kiedyś w przyszłości. Wobec tego we wzorze (3) trzeba przyjąć największą możliwą wartość l_{pr} , jaka kiedykolwiek może zostać zastosowana, najmniejszą możliwą wartość a , najmniejszą możliwą wartość p i najmniejszą możliwą wartość A_{zap} .

Obecnie na ogół a we wszystkich tramwajach na świecie wynosi około 6 m. Nie widać powodów, dla których wartość ta mogłaby kiedykolwiek zostać zmniejszona (raczej będzie występowała w przyszłości tendencja do zwiększenia wymiaru a).

Wobec tego przyjmujemy $a=6$ m.

Wydaje się, że największa wartość l_{pr} (odległość na zewnątrz czopa skreću, na której będą wisiały na podwoziu niskozawieszane urządzenia), jaka kiedykolwiek zostanie zastosowana, nie będzie nigdy większa niż 3 m i tę wartość przyjmujemy.

Wartość p wynosi w obecnych tramwajach 1,9 m. Nie wydaje się możliwe zmniejszenie w przyszłości tej wartości, to też przyjmujemy $p=1,9$ m.

Podstawiając powyższe dane do zależności (3) opadnięcie punktu C wyniesie

$$h_{dol} \approx 30 \text{ mm.}$$

Z kolei punkt D pojazdu uniesie się w górę o

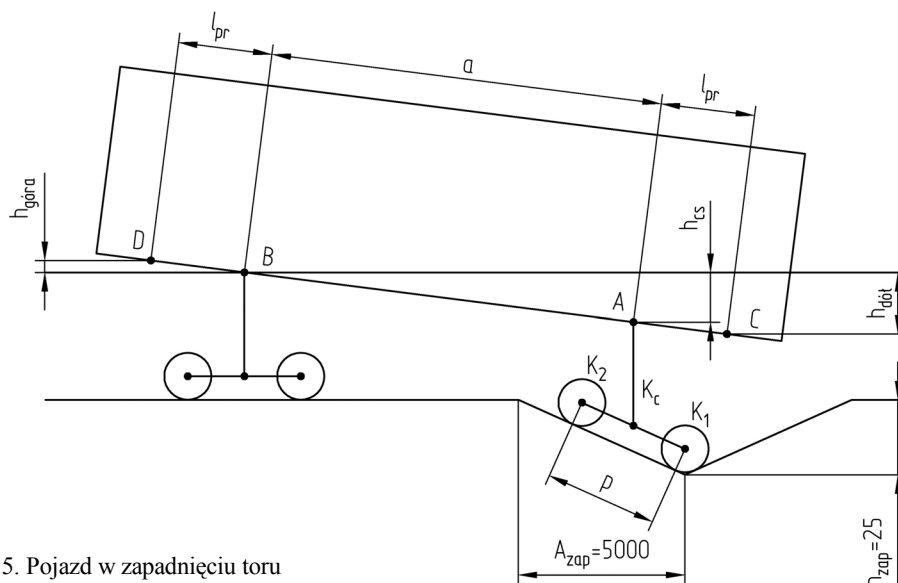
$$h_{gora} = \frac{l_{pr}}{a} \cdot h_{cs}$$

czyli

$$h_{gora} = \frac{l_{pr}}{a} \left(1 - \frac{p}{2A_{zap}}\right) \cdot h_{zap} \quad (4)$$

podstawiając dane otrzymamy

$$h_{gora} \approx 10 \text{ mm.}$$



Rys. 5. Pojazd w zapadnięciu toru

6.2. Ustawienie kinematyczne pojazdu w zapadnięciu toru

Ponieważ wyczerpanie wszystkich możliwych ugięć usprężynowania zostało już uwzględnione przy wyznaczaniu zarysu odniesienia skrajni kinematycznej, przeto powyżej wyznaczone wartości $h_{\text{górn}}$ i h_{dol} są jedynymi dodatkowymi przemieszczeniami pasożytniczymi tramwaju na zapadnięciu toru.

Zatem przemieszczenia pasożytnicze części pojazdu z tytułu deformacji pionowych toru wynosi:

- dla dolnych krawędzi pojazdu $h_{\text{dol}}=30$ mm
- dla górnych krawędzi pojazdu $h_{\text{górn}}=10$ mm.

7. Wichrowatość toru

7.1. Dopuszczalna wichrowatość toru

Dopuszczalna różnica poziomu obu szyn na torze prostym o szerokości 1435 mm wynosi $W=30$ mm, a dla toru o szerokości 1000 mm $W=20$ mm [2, 3]

Kąt poprzeczny wichrowatości toru

$$\delta = \frac{W}{S_t}$$

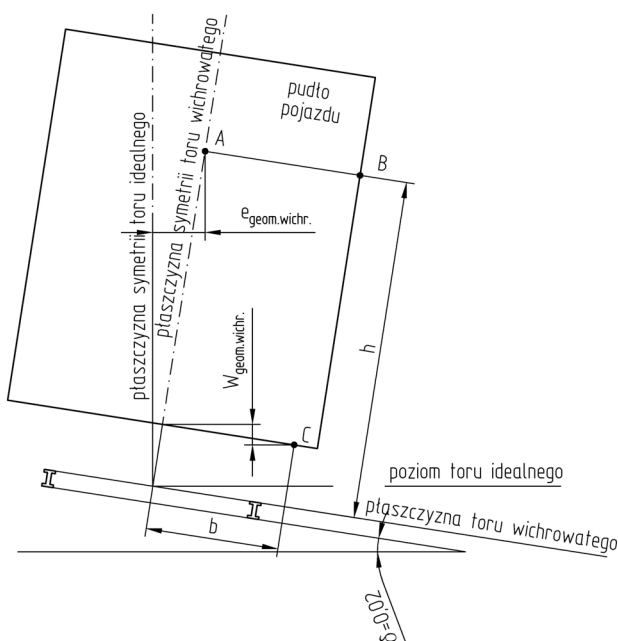
Gdzie S_t - rozstaw kręgów tocnych zestawu kołowego

Dla toru 1435 $\delta = \frac{30}{1500} = 0,02$ a dla toru 1000-

$$\delta = \frac{20}{1065} \approx 0,019$$

W dalszych rozważaniach przyjmujemy jednolicie $\delta = 0,02$.

7.2. Skutek geometrycznych wichrowatości toru



Rys.6. Odchylenie pudła pojazdu

Odchylenie punktu A od płaszczyzny toru idealnego wynosi (rys.5)

$$e_{\text{geom.wichr}} = h \cdot \sin \delta \approx h \cdot \delta \quad (5)$$

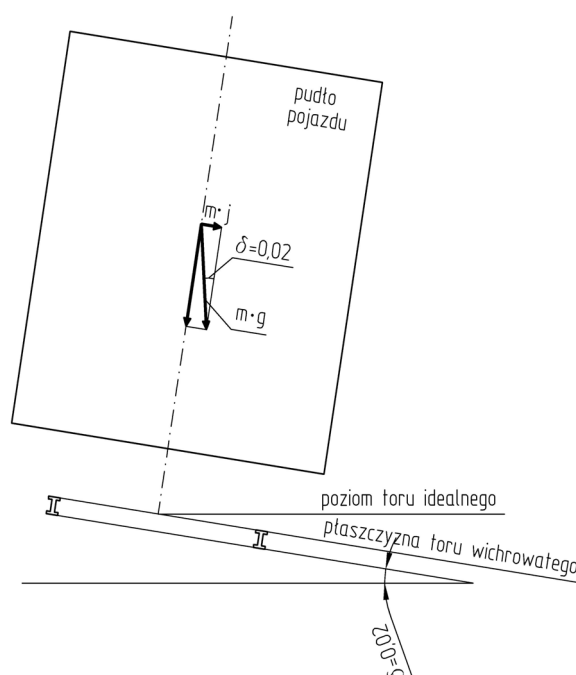
Temu jest też równe odchylenie punktu B od jego położenia na torze.

Analogicznie obniżenie się punktu C w stosunku do jego położenia na torze idealnym wynosi

$$W_{\text{geom.wichr}} = b \cdot \sin \delta \approx b \cdot \delta \quad (6)$$

7.3. Skutek statyczny wchrowatości toru

Na torze wchrowatym na pojazd, choćby stojący nieruchomo, działa siła poprzeczna podobna do nierównoważonej siły odśrodkowej działającej na łuku toru, gdy na tym łuku występuje niedobór lub nadmiar przechyłki (rys.7).



Rys. 7. Odchylenie pudła pojazdu – siła poprzeczna

Z rys. 7 wynika że, $\frac{j}{g} = \sin \delta \approx \delta \quad (7)$

gdzie j - przyspieszenie poziome

Pod wpływem siły poprzecznej równej $m \cdot j$ podparcie sprężyste pojazdu odkształca się a pojazd ulegnie dalszemu przechyleniu o kąt ϵ (rys.8).

Kąt quasistatycznego przechylenia pojazdu wywołany nierównoważoną siłą poprzeczną wynosi

$$\epsilon = s \cdot \frac{j}{g}$$

gdzie s - współczynnik przechylenia pojazdu [1]

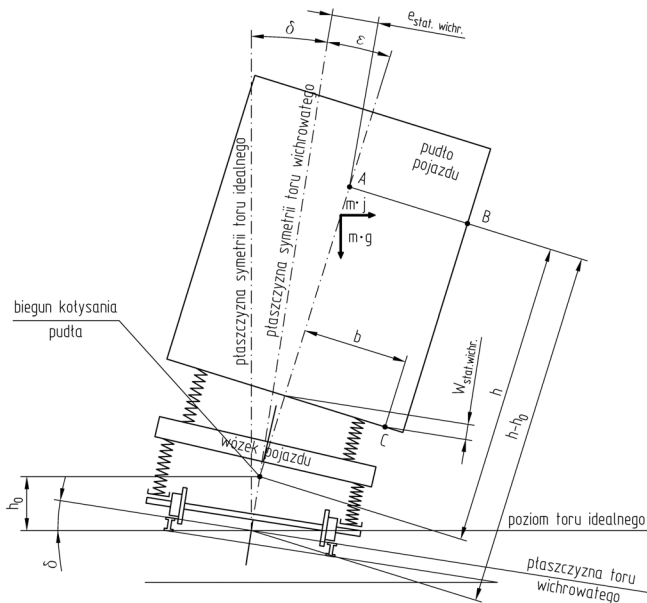
Wykorzystując zależność (7) mamy

$$\epsilon = s \cdot \delta$$

Przyjęta wartość współczynnika $s=0,4$ [1] to

$$\epsilon = 0,4 \cdot \delta$$

Odchylenie punktu A od płaszczyzny symetrii toru wchrowatego może zatem wynieść



Rys.8.Przechylenie pojazdu

$$e_{\text{stat wiatr}} = |h-h_0| \cdot \sin \epsilon \approx |h-h_0| \cdot \epsilon$$

czyli
$$e_{\text{stat wiatr}} = |h-h_0| \cdot \sin \epsilon \approx |h-h_0| \cdot 0,4 \cdot \delta$$

gdzie: h -wysokość rozpatrywanego punktu nad główkę szyny
 h_0 -wysokość bieguna kołysania tramwaju nad główkę szyny

Im mniejsze h_0 , tym większe odchylenie $e_{\text{stat wiatr}}$. Zatem trzeba wziąć pod uwagę najmniejsze możliwe h_0 . Jest nieprawdopodobne aby kiedykolwiek skonstruowano tramwaj o wysokości bieguna przechylenia h_0 mniejszej niż 0,3 m.

Zatem

$$e_{\text{stat wiatr}} = |h-0,3| \cdot 0,4 \cdot \delta \quad (8)$$

Analogicznie obniżenie punktu C wyniesie

$$W_{\text{stat wiatr}} = b \cdot 0,4 \cdot \delta \quad (9)$$

7.4. Skutek dynamiczny wchrowatości toru

Dynamicznym skutkiem wchrowatości toru jest kołysanie się pojazdu wokół bieguna kołysania, przy czym środkowym położeniem podczas tego kołysania jest położenie wywołane przez quasistatyczny skutek wchrowatości toru, określony w poprzednim punkcie.

Przyjmując współczynnik nadwyżki dynamicznej obciążenia poprzecznego $K_d = 1,3$ taki sam, jaki przyjęto dla kołysania się tramwaju na torze idealnym [1], otrzymujemy amplitudę kołysania na wchrowatym torze równą

$$e_{\text{dyn wiatr}} = (K_d - 1) \cdot e_{\text{stat wiatr}}$$

czyli

$$e_{\text{dyn wiatr}} = (K_d - 1) \cdot |h-0,3| \cdot 0,4 \cdot \delta$$

czyli

$$e_{\text{dyn wiatr}} = (1,3 - 1) \cdot |h-0,3| \cdot 0,4 \cdot \delta$$

albo

$$e_{\text{dyn wiatr}} = 0,3 \cdot |h-0,3| \cdot 0,4 \cdot \delta \quad (10)$$

Analogicznie będzie

$$W_{\text{dyn wiatr}} = 0,3 \cdot b \cdot 0,4 \cdot \delta \quad (11)$$

7.5. Łączne przesunięcie pasożytnicze wynikające z wchrowatości toru

$$e_{\text{wiatr}} = e_{\text{gem wiatr}} + e_{\text{stat wiatr}} + e_{\text{dyn wiatr}}$$

czyli

$$e_{\text{wiatr}} = h \cdot \delta + |h-0,3| \cdot 0,4 \cdot \delta + 0,3 \cdot |h-0,3| \cdot 0,4 \cdot \delta$$

i ostatecznie

$$e_{\text{wiatr}} = |h + 0,52 \cdot |h-0,3| \cdot \delta \quad (12)$$

Analogicznie otrzymamy

$$W_{\text{wiatr}} = |b + 0,52 \cdot b \cdot \delta$$

czyli

$$W_{\text{wiatr}} = 1,52 \cdot b \cdot \delta \quad (13)$$

Podstawiając tu $\delta = 0,02$ otrzymamy

$$e_{\text{wiatr}} = |h + 0,52 \cdot |h-0,3| \cdot 0,02 \quad (14)$$

$$W_{\text{wiatr}} = 1,52 \cdot b \cdot 0,02$$

czyli

$$W_{\text{wiatr}} = 0,0304 \cdot b \quad (15)$$

Liczbowo wartości te wynoszą jak następuje:

- Na wysokości $h = 3,2$ m

$$e_{\text{wiatr}} = (3,2 + 0,52 \cdot |3,2 - 0,3|) \cdot 0,02 = (3,2 + 0,52 \cdot 2,9) \cdot 0,02 = (3,2 + 1,503) \cdot 0,02 = 4,708 \cdot 0,02 = 0,09416 \text{ m} \approx 94 \text{ mm}$$

- Na wysokości $h = 0,3$ m

$$e_{\text{wiatr}} = (0,3 + 0,52 \cdot |0,3 - 0,3|) \cdot 0,02 = (0,3 + 0,52 \cdot 0) \cdot 0,02 = 0,3 \cdot 0,02 = 0,006 \text{ m} = 6 \text{ mm}$$

- Na wysokości $h = 0,060$ m

$$e_{\text{wiatr}} = (0,060 + 0,52 \cdot |0,060 - 0,3|) \cdot 0,02 = (0,060 + 0,52 \cdot 0,24) \cdot 0,02 = (0,08 + 0,1248) \cdot 0,02 = 0,1848 \cdot 0,02 = 0,003696 \text{ m} \approx 4 \text{ mm}$$

- Na szerokości $b = 1,35$ m

$$W_{\text{wiatr}} = 0,0304 \cdot 1,35 = 0,04104 \text{ m} \approx 40 \text{ mm}$$

8. Jednoczesność wchrowatości i zygzakowatości toru

Wchrowatość i zygzakowatość toru mogą występować jednocześnie, ale prawdopodobieństwo tej jednoczesności jest takie, że można zastosować do niego prawa rozkładu zmiennych losowych.

Wypadkowe pasożytnicze ruchy poziome pojazdu wyniosą wtedy

- Na wysokości $h = 3,2$ m

$$D = \sqrt{e_{\text{wiatr}}^2 + e_{\text{poz}}^2} \quad (16)$$

$$D = \sqrt{94^2 + 35^2} \approx 100 \text{ mm}$$

- Na wysokości $h = 0,3$ m

$$D = \sqrt{6^2 + 35^2} = \sqrt{36 + 1225} \approx 36 \text{ mm}$$

- Na wysokości $h = 0,060$ m

$$D = \sqrt{4^2 + 35^2} = \sqrt{16 + 1225} \approx 35 \text{ mm}$$

9. Jdnoczesność wichrowatości i zapadnięcia toru

Wichrowatość i zapadnięcie toru wykluczają się nawzajem. Zatem wystarczy uwzględnić albo jedno albo drugie. Przy tym należy pamiętać o tym, że zarys odniesienia skrajni kinematycznej został opracowany w [1] w ten sposób, że ujmuje wszystkie pionowe ruchy pasożytnicze pojazdu na idealnym torze w takim rozmiarze, który wyczerpuje pionowe luzy elementów sprężystych do wyczerpania. Pojazd o wyczerpanych luzach pionowych nie może się kołysać, a zatem decydującym wymiarem jest przemieszczenie powstające przy zapadnięciu toru.

Zatem dla dolnej krawędzi skrajni, kiedy możliwość kolizji występuje przy dużych ugięciach resorów pojazdu, mamy

$$W = h_{\text{dol}} = 30 \text{ mm}$$

Dla odmiany dla górnych krawędzi skrajni, kiedy możliwość kolizji występuje przy małych ugięciach resorów pojazdu mamy:

$$W = W_{\text{wicht}}$$

co na szerokości $b = 1,35 \text{ m}$ wynosi

$$W = 40 \text{ mm}$$

10. Dodatkowe przemieszczenia pasożytnicze pantografu

Z uwagi na elastyczną konstrukcję pantografu można przyjąć, że na odkształceniach toru pantograf będzie starał się utrzymać poprzednie położenie nie ulegając dodatkowym ruchom pasożytniczym.

11. Poszerzenie konturu koniecznej przestrzeni niezabudowanej na łukach

Poszerzenie to jest identyczne jak poszerzenie zarysu odniesienia skrajni kinematycznej.

12. Wnioski końcowe

1. Kontur koniecznej przestrzeni niezabudowanej skrajni budowli omawiany w niniejszym opracowaniu ważny jest wtedy, gdy deformacje toru powstające w wyniku eksploatacji nie przekroczą następujących wartości:

- przesunięcie się osi podłużnej toru w poprzek mierzone od osi geodezyjnej toru – 25 mm
- zygzakowatość toru (lub wielokątny kształt łuku toru) mierzony od osi geodezyjnej toru – 25 mm
- zapadnięcie się toru mierzone od poziomu geodezyjnego toru (włącznie z pionowym zużyciem główek szyn) – 25 mm

- wichrowatość toru (niejednakowy poziom główek obu szyn) - 30 mm na torze o szerokości 1435 mm, a 20 mm na torze o szerokości 1000 mm.

Wszystkie powyższe deformacje mogą występować jednocześnie w tym samym punkcie toru, o ile ze swej natury same się nie wykluczają wzajemnie (jak np. przesunięcie i zygzakowatość, albo zapadnięcie i wichrowatość).

2. Kontur koniecznej przestrzeni niezabudowanej skrajni budowli omawiany w niniejszym opracowaniu ważny jest wtedy, gdy po torze będą jeździły wagony tramwajowe, których cechy charakterystyczne będą następujące:

- wagon będzie kinematycznie zgodny z zarysem odniesienia skrajni kinematycznej (to znaczy w żadnym jego położeniu czy to na torze prostym, czy też na łuku toru żadna część wagonu nie będzie wystawać poza ten zarys odniesienia na idealnie niezdeformowanym torze zarówno w stanie spoczynku jak i w stanie jazdy z prędkościami od 0 do maksymalnej i z uwzględnieniem maksymalnych amplitud wszelkich ruchów pasożytniczych wagonu spowodowanych prędkościami jazdy),
- prosta ściana boczna wagonu nie będzie wysięgała poza czop skrzytu wózka o więcej niż 3 m,
- na podwoziu nisko zawieszane części i mechanizmy nie będą rozmieszczone na długości większej niż 3m mierzonej od czopa skrzytu w kierunku do czoła lub tyłu wagonu,
- współczynnik przechylenia wagonu s nie będzie większy niż 0,4.

Literatura

- [1] IPS „Wymiary dopuszczalne przekrojów wagonu tramwajowego w świetle obowiązującej skrajni kinematycznej.” Nr OR-9130 opracowano 02.2007r.
- [2] BN-89/9396-05/03: „Komunikacja miejska. Skrajnia budowli.” (Unieważniona 2.01.1998)
- [3] PN-K-92009: styczeń 1998 „Komunikacja miejska –Skrajnia budowli – wymagania”