

Bezpieczeństwo jazdy dwuosioowego wagonu towarowego po zwichrowanym torze zakrzywionym

W artykule przedstawiono wpływ wybranych parametrów wagonu dwuosioowego takich, jak baza pojazdu, stopień jego obciążenia ładunkiem oraz pionowa sztywność zawieszenia na zagrożenie wykolejeniem na krzywej przejściowej i pełnym łuku w przypadku zwichrowania szyny zewnętrznej.

Wykorzystano możliwości obliczeniowe specjalistycznego programu Adams Rail, przeznaczonego do badania dynamiki pojazdów szynowych. Analizowano proces wykolejenia będący wynikiem wspinania się obrzeża koła na główkę szyny. We wszystkich podjętych działaniach ocenę poziomu zagrożenia bezpieczeństwa ruchu sprowadzono do analizy wskaźników wykolejenia i pionowego przemieszczenia rejestrowanego na kołach zestawu prowadzącego, z uwzględnieniem kąta nabiegania oraz pionowych nacisków kół na szyny wynikających z położenia zestawu kół w torze zakrzywionym.

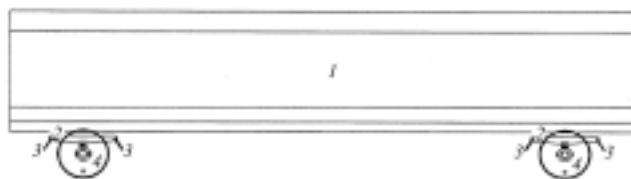
1. WPROWADZENIE

Znaczna liczba wykolejeń ma miejsce podczas przejazdu pojazdów szynowych przez tor zakrzywiony którego głównymi parametrami geometrycznymi są przechyłka oraz wichrowatość toru. W prezentowanym artykule jako punkt odniesienia przyjęto normę PN-EN 14363 („Badania właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu”) – [3]. Obszar badań symulacyjnych dotyczył bezpieczeństwa ruchu modelu dwuosioowego wagonu towarowego poruszającego się z małą prędkością (równą 3m/s) po torze zakrzywionym o małym promieniu łuku (w rozumieniu normy [3] jest łuk o promieniu 150 m). Bezpieczeństwo analizowano w aspekcie wykolejenia na krzywej przejściowej oraz na pełnym łuku, na którym zwichrowano szynę zewnętrzną zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 14363. Do badań symulacyjnych wykorzystano specjalistyczny program AdamsRail, należący do grupy programów MBS, przeznaczonych do badania dynamiki pojazdów szynowych.

2. OBIEKT BADAŃ

2.1. Pojazd

W badaniach symulacyjnych wykorzystano model dwuosioowego wagonu towarowego, znajdujący się w zasobach bibliotecznych programu AdamsRail. Rzeczywistym reprezentantem tego typu konstrukcji jest wagon z zawieszeniem wieszakowym UIC – rys.2.1.1. Elementy zawieszenia wagonu (wieszaki 3 oraz resory piórowe 2) przenoszą pionowe obciążenie z nadwozia 1 na obudowy łożysk zestawów kół 4. Zawieszenie umożliwia zestawom kół wzdluzne i poprzeczne przemieszczenia względem nadwozia.



Rys.2.1.1. Strukturalne elementy modelu wagonu towarowego z zawieszeniem wieszakowym UIC – [5]

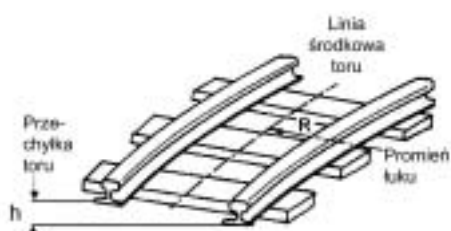
W zależności od obciążenia wagonu (wagon pusty – masa nadwozia równa 20 000 kg, wagon pełny - masa nadwozia równa 40 000 kg) pionowa sztywność zawieszenia przyjęta została zgodnie z progresywną, biliniową charakterystyką zawieszenia pojedynczego koła w kierunku pionowym, przedstawiona na rys.2.1.2. Oznaczało to uwzględnienie sztywności zawieszenia $k_z=5 \cdot 10^5$ N/m dla pustego wagonu oraz $k_z=5 \cdot 10^6$ N/m – dla całkowicie załadowanego wagonu – [4]. Sztywność poprzeczną i wzdluzną zawieszenia (w odniesieniu do pojedynczego koła) przyjęto odpowiednio na poziomie $5 \cdot 10^5$ N/m oraz $1 \cdot 10^7$ N/r



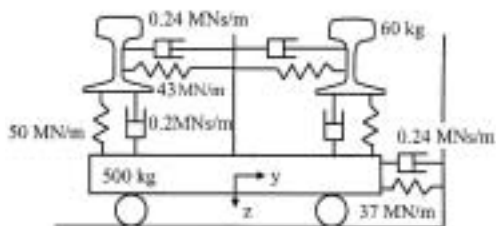
Rys.2.1.2. Charakterystyka zawieszenia pojedynczego koła w kierunku pionowym – [4]

2.2. Tor kolejowy

Geometria toru opisana została przez linię środkową toru, lokalny promień łuku R oraz lokalną przechyłkę h – rys.2.2.1. W przypadku odcinka toru prostego promień łuku $R \rightarrow \infty$ oraz $h = 0$.



Rys.2.2.1. Geometria toru kolejowego – [4]



Rys.2.2.2. Reologiczny model toru – [4]

Na krzywej przejściowej wielkości R , h są ciągłymi funkcjami bieżącej długości toru, natomiast na pełnym łuku pozostają stałe. Strukturę toru kolejowego tworzą: stalowe szyny, podkłady, elementy mocujące, podsypka oraz podłoże. Przyjęto reologiczny model toru opisany przez sprężynę o znanej sztywności, połączoną równolegle z liniowym elementem tłumiącym o znanym tłumieniu - rys.2.2.2. Uwzględniona w obliczeniach zastępcza masa szyny wynosiła 60 kg, natomiast zastępczą masę podkładu, obciążonego zestawem kół, przyjęto równą 500 kg. Do obliczeń sił stycznych pomiędzy kołami i szynami wykorzystano nieliniowy model jednopunktowego styku kół z szynami oraz tablicę kontaktową Kalkera, utworzoną w programie AdamsRail dla kół i szyn o profilach S1002 oraz UIC60. Obliczenia wykonano przy założeniu, że koła wagonu mają nominalną średnicę 0,920m, zaś współczynnik tarcia między kołem i szyną równy jest 0,4. Zdefiniowano następujące terminy dotyczące zakrzywionego odcinka toru kolejowego.

1) Przechyłka toru kolejowego

Przechyłka toru oznacza różnicę wysokości toków szynowych w łuku, w przekroju toru dokonanym w płaszczyźnie pionowej, prostopadłej do linii środkowej toru.

2) Wichrowatość toru kolejowego

Wichrowatość toru kolejowego jest to różnica przechyłek toków szynowych w łuku na długości przyjętej bazy pomiarowej.

Badania przeprowadzone przez zarządy kolei DB, NS, OBB, PKP i SNCF pozwalają ustalić graniczną wartość wichrowatości toru w powiązaniu z

bazą wzdłużną pojazdu. Wg [3] graniczna wartość g_{lim} wichrowatości toru stosowana na europejskich kolejach wynosi:

$$g_{lim} = \min(7,0; \frac{20}{2a} + 3) [\%]. \quad (1)$$

W przypadku badania wichrowatości pojazdu dwuosowego spełniony powinien być warunek:

$$g_{lim}^* = \frac{20}{2a} + 2 [\%], \quad \text{jeśli } 4m < 2a \leq 20m. \quad (2)$$

W powyższych wzorach $2a$ oznacza bazę wzdłużną pojazdu wyrażoną w metrach, przy czym $2a \geq 20m$.

W wykonanych obliczeniach symulacyjnych zmieniano bazę pojazdu w zakresie od 5 do 10 metrów. Wartości wichrowatości toru na odcinku równym długości bazy pojazdu dwuosowego (obliczone wg wzoru (2)) zebrano w Tabeli 1.

Graniczne wartości wichrowatości toru na odcinku równym bazie pojazdu Tabela 1.

Baza $2a$ (m)	Wichrowatość toru na bazie rozstawu osi pojazdu ([%])
5	6
6	5,33
7	4,86
8	4,5
9	4,22
10	4

3. BEZPIECZEŃSTWO RUCHU POJAZDU SZYNOWEGO NA TORZE ZAKRZYWIONYM

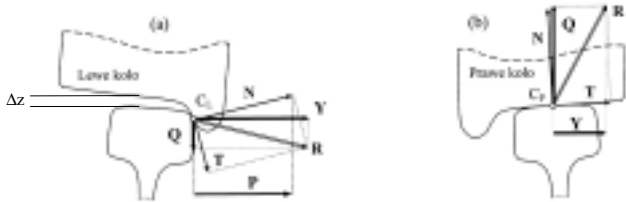
Pod uwagę wzięto dwa (najważniejsze zdaniem autorów) wskaźniki pozwalające ocenić poziom bezpieczeństwa modelu pojazdu na torze zakrzywionym. Są to wskaźnik zagrożenia wykołajeniem Y/Q oraz pionowe przemieszczenie koła Δz .

1) Wskaźnik zagrożenia wykołajeniem Y/Q

Niebezpieczeństwo wspinania się obrzeża koła na główkę szyny oceniane było na podstawie analizy stosunku poprzecznej siły prowadzącej Y do siły pionowego nacisku Q koła na szynę. Siła prowadząca Y jest poprzeczną składową, zaś Q - pionową składową siły wypadkowej R w punkcie styku koła z szyną, będącej geometryczną sumą siły N (normalnej do płaszczyzny styku) oraz siły T leżącej w płaszczyźnie styku i mającej dwie składowe T_x , T_y na kierunkach definiujących płaszczyznę styku – rys.3.1.

Wskaźnik zagrożenia wykołajeniem definiowany jest jako stosunek wartości sił Y/Q działających w obszarze styku, w odniesieniu do pojedynczego koła (lewego lub prawego) – rys.3.1. Dla pojedynczego koła wskaźnik ten można opisać analitycznie w następujący sposób (w położeniu równowagi quasi-statycznej zestawu kół wspinającego się na główkę szyny) – [4]:

$$Y/Q = \frac{-T_x \mu \sin \psi \cos \alpha / \cos \gamma - T_y \mu (\cos \psi - \sin \psi \sin \alpha \operatorname{tg} \gamma + \cos \psi \operatorname{tg} \gamma + \sin \psi \sin \alpha)}{T_x \mu \sin \alpha / \cos \gamma + T_y \mu \cos \alpha \operatorname{tg} \gamma + \cos \alpha} \quad (3)$$



We wzorze (3) kąt γ jest kątem styku koła z szyną, ψ jest kątem nabiegania koła na szynę (rys.5.1.6), α oznacza kąt wyprzedzenia nabiegania, natomiast μ jest ustaloną wartością współczynnika tarcia pomiędzy kołem i szyną.

Pojazd uważany jest za bezpieczny, jeśli w każdym punkcie pomiarowym (punkcie styku koła z szyną na badanym odcinku toru) spełniony jest warunek dotyczący wskaźnika wykolejenia:

w którym $(Y/Q)_{\max}$ oznacza maksymalną wartość występującą w punkcie styku koła z szyną na badanym odcinku toru, uzyskaną w trakcie obliczeń symulacyjnych, natomiast wartość graniczna $(Y/Q)_{\lim}$ definiowana jest zgodnie z [3], w następujący sposób:

We wzorze (5) kąt δ jest kątem zarysu zewnętrznego obrzeża, natomiast μ oznacza współczynnik tarcia. Dla $\delta=60^\circ$ oraz $\mu=0,4$ otrzymujemy $|(Y/Q)_{\lim}| = 0,78$. Jeżeli na danym kole wartość graniczna $|(Y/Q)_{\lim}|$ zostanie przekroczona, sprawdzane jest pionowe przemieszczenie powierzchni toczonej tego koła względem poziomej części główki szyny.

1) Pionowe przemieszczenie koła Δz

Pionowe przemieszczenie Δz powierzchni toczonej względem poziomej części główki szyny pokazane zostało na rys.3.1. Pojazd uważany jest za bezpieczny, jeśli w każdym punkcie pomiarowym spełniony jest następujący warunek – [3]:

gdzie Δz_{\max} oznacza maksymalna wartość pionowego przemieszczenia na odcinku pomiarowym, zaś Δz_{\lim} jest wartością graniczną.

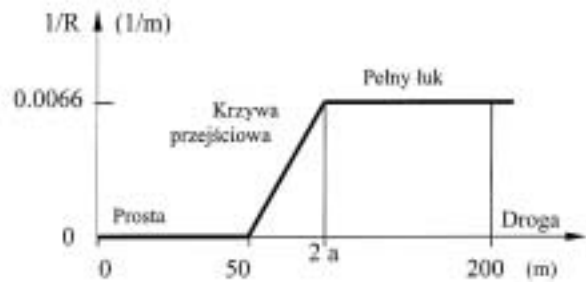
4. ETAPY BADAŃ SYMULACYJNYCH

Zaplanowano dwa etapy badań modelu dwuosioowego wagonu towarowego na zwichrowanym torze badawczym. W każdym przypadku tor był idealnie gładki, natomiast wichrowatość realizowano po-

przez zmianę wysokości położenia szyny zewnętrznej. Ustalona prędkość pojazdu wynosiła za każdym razem $v = 3 \text{ m/s}$.

Etap pierwszy

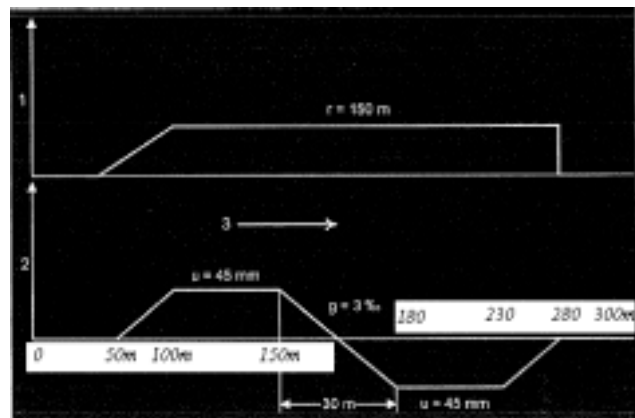
Zwichrowana została zewnętrzna szyna na krzywej przejściowej o promieniu $R = 150 \text{ m}$, na długości toru równej bazie pojazdu. Tor pozostawał idealnie gładki na całej długości – rys.4.1.



Rys.4.1. Sekcje toru kolejowego ze zwichrowaną zewnętrzną szyną na krzywej przejściowej o promieniu $R = 150 \text{ m}$

Drugi etap

Zwichrowana została zewnętrzna szyna na pełnym łuku toru o stałym promieniu łuku $R = 150 \text{ m}$ i przechyłce $0,045 \text{ m}$. Wichrowatość równą 3 [‰] , wprowadzono zgodnie z normą [3], obniżając na długości 30 metrów wysokość szyny zewnętrznej (z $0,045 \text{ m}$ do $-0,045 \text{ m}$) względem poziomej płaszczyzny poprzecznej, przechodzącej przez szynę wewnętrzną – rys.4.2. Tor pozostawał idealnie gładki na całej długości.



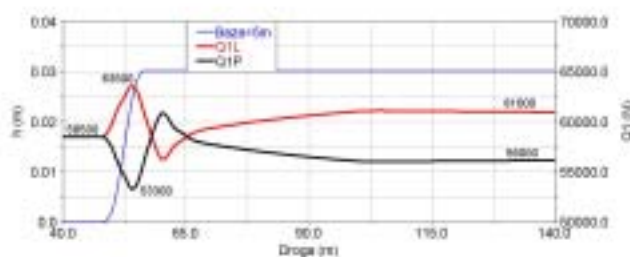
Rys.4.2. Sekcje toru ze zwichrowaną zewnętrzną szyną na pełnym łuku toru o stałym promieniu $R = 150 \text{ m}$ i wichrowatości 3 [‰] na długości 30 metrów. 1-promień łuku; 2-przechyłka; 3-kierunek jazdy – [3]

5. WYNIKI OBLICZEŃ

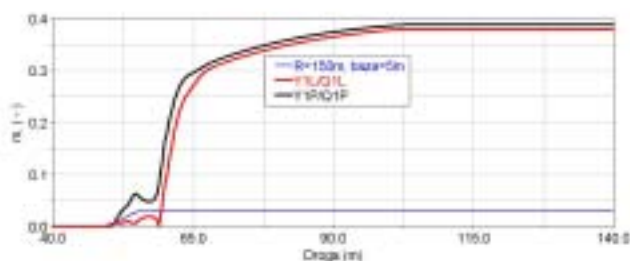
5.1. Zwichrowanie szyny zewnętrznej na krzywej przejściowej

Pierwsza grupa wyników dotyczyła przejazdu pustego i pełnego wagonu z prędkością 3 m/s przez idealnie gładki tor zakrzywiony, składający się

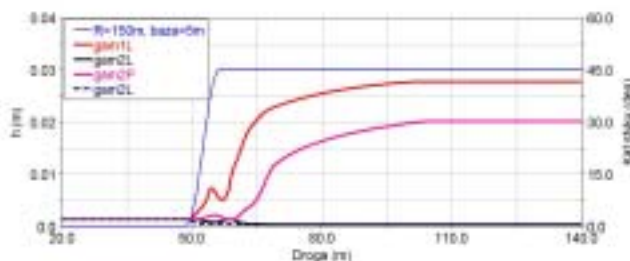
z krzywej przejściowej o długości równej bazie wagonu i pełnego łuku o promieniu $R=150$ m ze stałą przechyłką – rys.4.1. Badano zachowanie się pustego oraz całkowicie obciążonego wagonu. Założono, że nadwozie pojazdu jest bryłą idealnie sztywną, posiadającą masę oraz momenty bezwładności. W celu przykładowej wizualizacji wyników przedstawiono (na rysunkach od 5.1.1 do 5.1.4) wartości: pionowych nacisków, wskaźników wykolejenia oraz pionowych przemieszczeń kół zestawu prowadzącego w funkcji drogi (dla pustego wagonu o bazie 5 m). Na rys.5.1.5 pokazano również wielkości sił prowadzących na lewym kole zestawu prowadzącego (dla pustego i pełnego wagonu, na krzywej przejściowej i rozwiniętym łuku o promieniu $R=150$ m) w funkcji drogi, dla różnych baz wagonu i wartości pionowej sztywności zawieszenia.



Rys.5.1.1. Pionowe naciski kół na szyny zestawu prowadzącego dla pustego wagonu o bazie równej 5 m, na krzywej przejściowej i rozwiniętym łuku o promieniu $R=150$ m

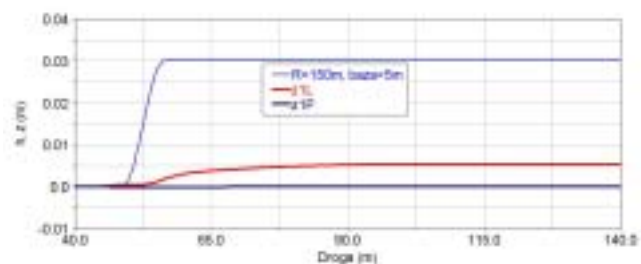


Rys.5.1.2. Wskaźniki wykolejenia $|Y/Q|$ na kołach zestawu prowadzącego dla pustego wagonu o bazie równej 5 m, na krzywej przejściowej i rozwiniętym łuku o promieniu $R=150$ m

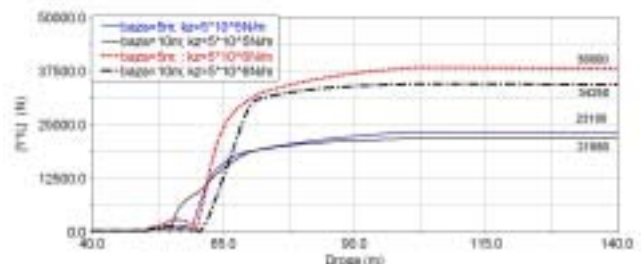


Rys.5.1.3. Kąty styku kół zestawu prowadzącego i zestawu nr 2 dla pustego wagonu o bazie równej 5 m, na krzywej przejściowej i rozwiniętym łuku o promieniu $R=150$ m

Wstępne wnioski dotyczące gładkiego toru zakrzywionego z krzywą przejściową i stałą przechyłką na pełnym łuku bez wichrowania szyny zewnętrznej

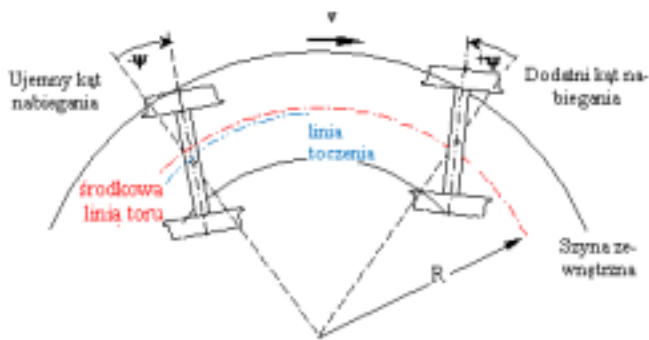


Rys.5.1.4. Pionowe przemieszczenie kół zestawu prowadzącego dla pustego wagonu o bazie równej 5 m, na krzywej przejściowej i rozwiniętym łuku o promieniu $R=150$ m

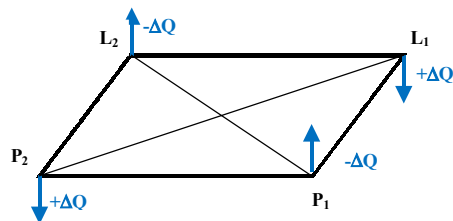


Rys.5.1.5. Siły prowadzące na lewym kole zestawu prowadzącego, dla pustego i pełnego wagonu, na krzywej przejściowej i rozwiniętym łuku o promieniu $R=150$ m

- 1) Na torze zakrzywionym zestawy kół pojazdu dwuosiowego przyjmują położenia prowadzące do zmiany pionowych nacisków kół na szyny. Położenia te charakteryzują się tym, że prowadzący zestaw kół przemieszcza się w kierunku szyny zewnętrznej i nabiega na tę szynę pod dodatnim kątem nabiegania. Drugi zestaw kół przemieszcza się natomiast w kierunku szyny wewnętrznej i nabiega na nią pod ujemnym kątem nabiegania – rys.5.1.6.
- 2) Na torze zakrzywionym zmiana nacisków kół na szyny określona jest przez skośno-symetryczny układ zrównoważonych sił. W efekcie tego dwa koła pojazdu są odciążone (zmniejszenie nacisków na kole przednim prawym i tylnym lewym) oraz dwa koła pojazdu są dociążone (zwiększenie pionowych nacisków przedniego lewego i tylnego prawego koła na szynę) – rys.5.1.7.
- 3) Na krzywej przejściowej występują duże, skokowe zmiany wartości pionowych nacisków kół na szyny. Gdy pojazd znajdzie się na pełnym łuku, wartości pionowego dociążenia/odciążenia kół ulegają zmniejszeniu i stabilizują się – rys.5.1.1.
- 4) W obrębie krzywej przejściowej bezwzględne wartości wskaźników wykolejenia $|Y/Q|$ oraz pionowych przemieszczeń kół są co najmniej o 1 rząd wielkości mniejsze od granicznych wartości, podawanych przez normę – [3]. Zwiększają się one i stabilizują dopiero na pełnym łuku toru kolejowego – rys.5.1.2, rys.5.1.4.



Rys.5.1.6. położenie zestawów kół pojazdu dwuosiowego na zwichrowanym torze zakrzywionym – [4]



Rys.5.1.7. Odciążenie/dociążenie kół pojazdu dwuosiowego na gładkim torze zakrzywionym (z krzywą przejściową i stałą przechyłką na pełnym łuku)

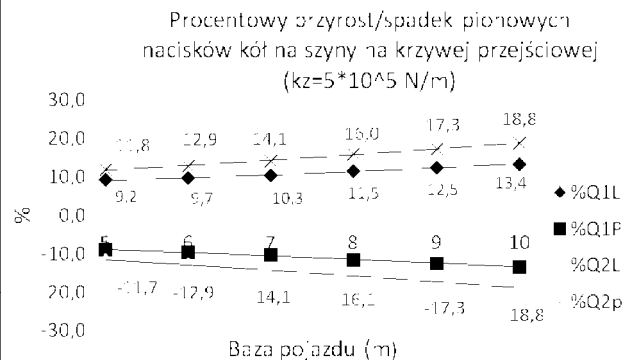
5.2. Wpływ pionowej sztywności zawieszenia i bazy pojazdu na bezpieczeństwo ruchu pojazdu dwuosiowego po torze zakrzywionym

5.2.1. Krzywa przejściowa

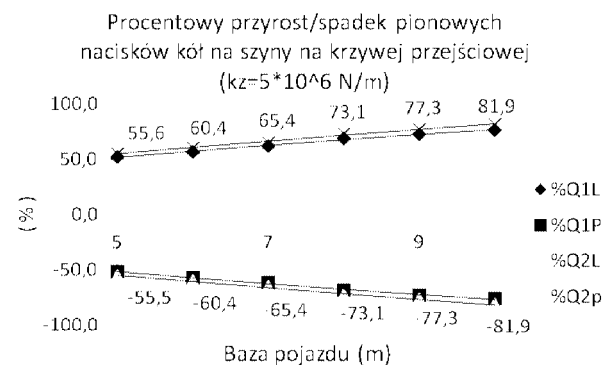
Wyniki przedstawiono w formie graficznej (rysunki od 5.2.1.1 do 5.2.1.6), w funkcji bazy pojazdu oraz pionowej sztywności zawieszenia. Wnioski dotyczące krzywej przejściowej są następujące:

- 1) Procentowe zmiany pionowych nacisków kół pojazdu na szyny na krzywej przejściowej (w odniesieniu do nacisków statycznych na torze prostym) zależą od pionowej sztywności zawieszenia. Zwiększenie pionowej sztywności zawieszenia o jeden rząd wielkości (z 10^5 N/m do 10^6 N/m) powoduje niemal **czterokrotne** zwiększenie wartości przyrostu/spadku pionowych nacisków kół na szyny na krzywej przejściowej – rys.5.2.1.1, rys.5.2.1.2.
- 2) Nie stwierdzono wyraźnej zależności pomiędzy pionową sztywnością zawieszenia, a wielkościami wskaźników wykołowania i pionowych przemieszczeń kół – rys.5.2.1.3, rys.5.2.1.4.
- 3) Można przyjąć, że zarówno zmiany wartości pionowych nacisków kół na szyny, jak i zmiany wartości wskaźników wykołowania na kołach oraz zmiany pionowych przemieszczeń kół w funkcji bazy pojazdu dają się opisać wielomianami drugiego stopnia.
- 4) Największe wartości wskaźników wykołowania na krzywej przejściowej skręcającej w prawo obserwowane są **na prawym kole zestawu prowadzącego** – rys.5.2.1.3.

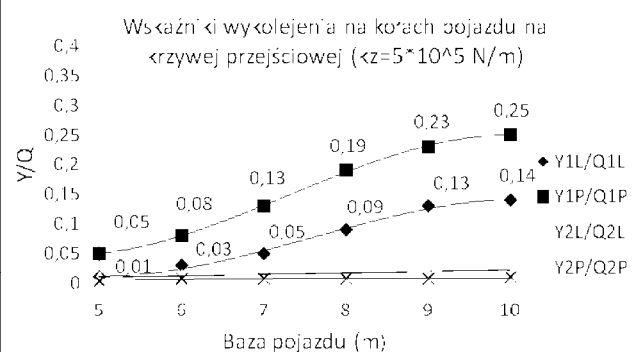
- 5) Pionowe przemieszczenia kół na krzywej przejściowej występują na kołach odciążonych, a ich maksymalne wartości na lewym kole zestawu prowadzącego nie stanowią realnego zagrożenia wykołowaniem – rys.5.2.1.5.



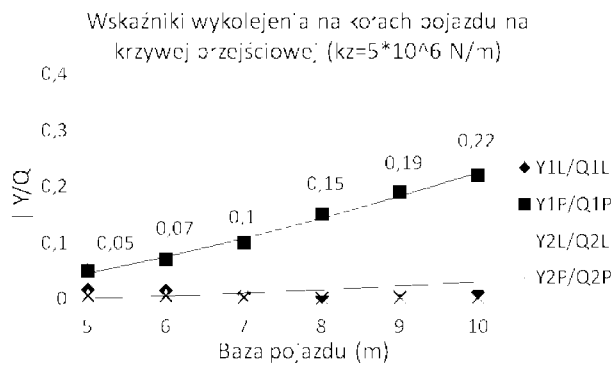
Rys.5. 2.1.1. Procentowy przyrost/spadek wartości pionowych nacisków kół na szynie w funkcji bazy pojazdu, dla pustego wagonu dwuosiowego na krzywej przejściowej



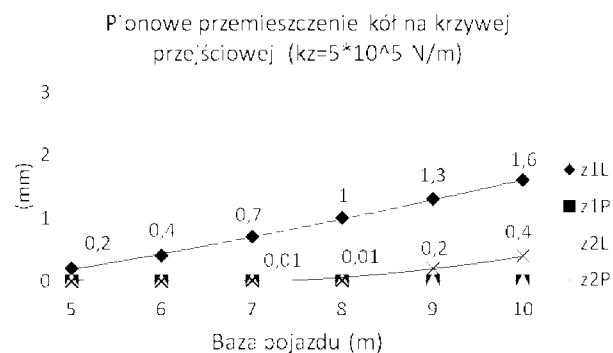
Rys.5.2.1.2. Procentowy przyrost/spadek wartości pionowych nacisków kół na szynie w funkcji bazy pojazdu, dla całkowicie obciążonego wagonu dwuosiowego na krzywej przejściowej



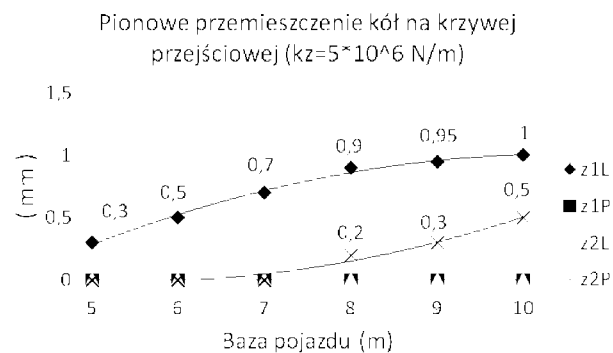
Rys.5.2.1.3. Wskaźniki wykołowania na kołach w funkcji bazy pojazdu, dla pustego wagonu dwuosiowego na krzywej przejściowej



Rys.5.2.1.4. Wskaźniki wykołowania na kołach w funkcji bazy pojazdu, dla całkowicie obciążonego wagonu dwuosowego na krzywej przejściowej



Rys.5.2.1.5. Pionowe przemieszczenie kół w funkcji bazy pojazdu, dla pustego wagonu dwuosowego na krzywej przejściowej



Rys.5.2.1.6. Pionowe przemieszczenie kół w funkcji bazy pojazdu dla całkowicie obciążonego wagonu dwuosowego na krzywej przejściowej

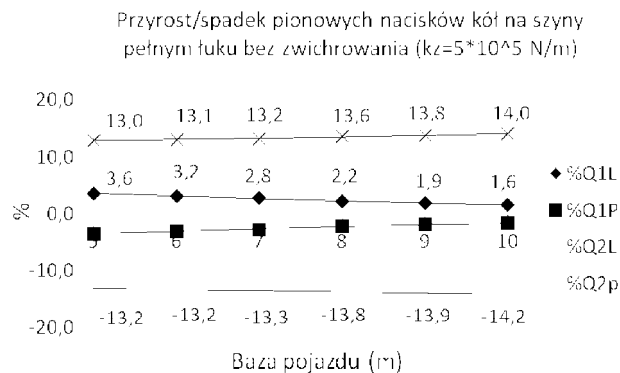
5.2.2. Pełny łuk toru zakrzywionego ze stałą przechyłką bez zwichrowania szyny zewnętrznej

Wnioski dotyczące pełnego łuku bez jego zwichrowania są zbliżone do tych dla krzywej przejściowej:

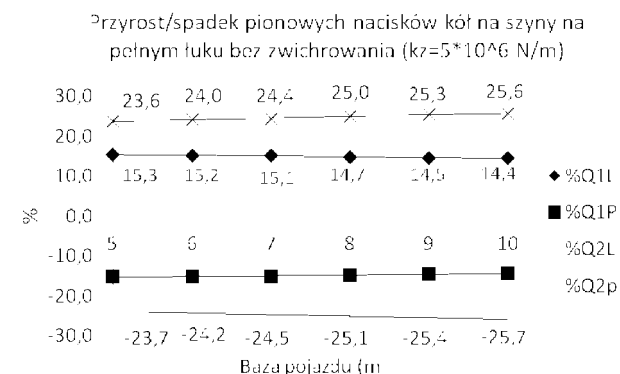
- 1) Procentowe zmiany nacisków (w odniesieniu do nacisków statycznych) na kołach pojazdu zależą od pionowej sztywności zawieszenia.
- 2) Zwiększenie pionowej sztywności zawieszenia o jeden rząd wielkości (z 10^5 N/m do 10^6 N/m) powoduje prawie **dwukrotne** zwiększenie/spadek wartości pionowych nacisków kół na szyny –

rys.5.2.2.1, rys.5.2.2.2.

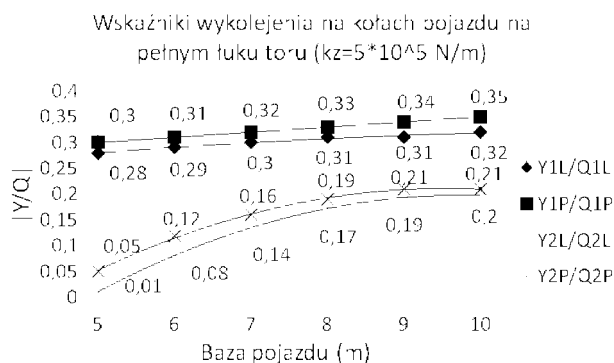
- 3) Wartości wskaźników wykołowania na kołach oraz pionowych przemieszczeń kół w funkcji bazy pojazdu dają się opisać wielomianami drugiego stopnia.
- 4) Największe wartości wskaźników wykołowania obserwowane są na **prawym kole zestawu prowadzącego** – rys.5.2.2.4.
- 5) Maksymalne wartości pionowe przemieszczeń kół obserwowane są w wagonie całkowicie obciążonym na **lewym kole zestawu prowadzącego** – rys.5.2.2.6.



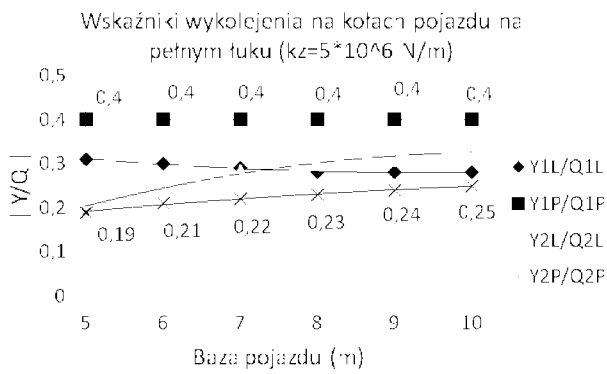
Rys.5. 2.2.1. Procentowy przyrost/spadek wartości pionowych nacisków kół na szyny w funkcji bazy pojazdu, dla pustego wagonu dwuosowego na pełnym łuku bez zwichrowania



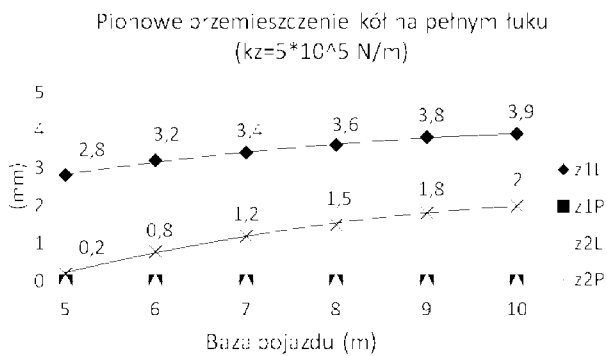
Rys.5.2.2.2. Procentowy przyrost/spadek wartości pionowych nacisków kół na szyny w funkcji bazy pojazdu, dla całkowicie obciążonego wagonu dwuosowego na pełnym łuku bez zwichrowania



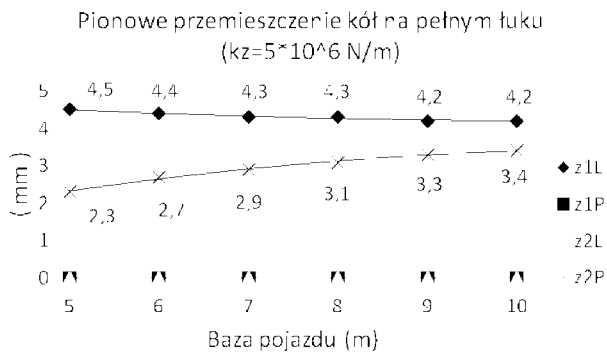
Rys.5.2.2.3 Wskaźniki wykołowania na kołach w funkcji bazy pojazdu, dla pustego wagonu dwuosowego na pełnym łuku bez zwichrowania



Rys.5.2.2.4. Wskaźniki wykolejenia na kołach w funkcji bazy pojazdu, dla całkowicie obciążonego wagonu dwuosioowego na pełnym łuku bez wichrowania



Rys.5.2.2.5. Pionowe przemieszczenie kół w funkcji bazy pojazdu, dla pustego wagonu dwuosioowego na pełnym łuku bez wichrowania



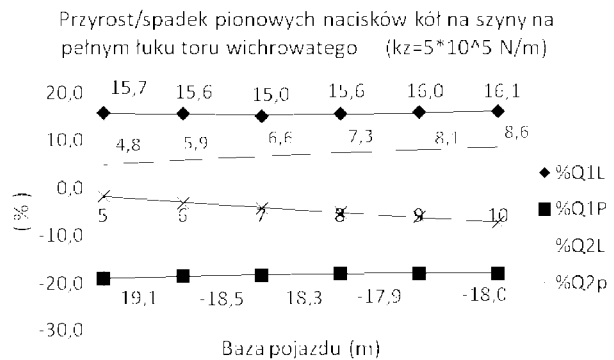
Rys.5.2.2.6. Pionowe przemieszczenie kół w funkcji bazy pojazdu dla całkowicie obciążonego wagonu dwuosioowego na pełnym łuku bez wichrowania

5.2.3. Pełny łuk toru zakrzywionego ze zwichrowaną szyną zewnętrzną

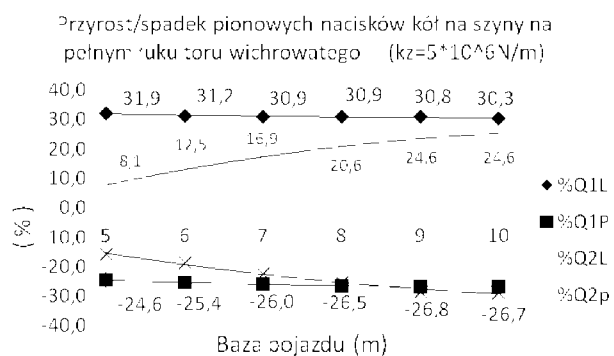
Zewnętrzną szynę toru gładkiego zwichrowano na pełnym łuku, zgodnie z PN-EN 14363. Wyniki przedstawiono w funkcji bazy pojazdu oraz pionowej sztywności zawieszenia. Wnioski dotyczące toru zakrzywionego zwichrowanego na pełnym łuku są następujące:

- 1) Procentowe zmiany nacisków (w odniesieniu do nacisków statycznych) na kołach pojazdu zależą od pionowej sztywności zawieszenia.

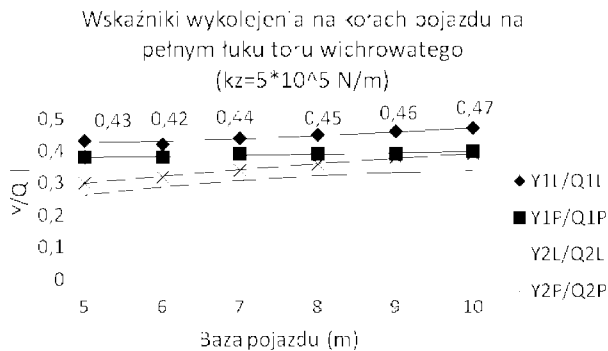
- 2) Zwiększenie pionowej sztywności zawieszenia o jeden rząd wielkości (z 10^5 N/m do 10^6 N/m) powoduje prawie **dwukrotne** zwiększenie wartości przyrostu/spadku pionowych nacisków kół na szynie – rys.5.2.3.1, rys.5.2.3.2.
- 3) Wartości wskaźników wykolejenia na kołach oraz pionowych przemieszczeń kół w funkcji bazy pojazdu dają się opisać wielomianami drugiego stopnia.
- 4) Największe wartości wskaźników wykolejenia obserwowane są na **lewym kole zestawu prowadzącego**. Liczbowe wartości tych wskaźników osiągają poziom $|Y/Q| = 0,71$ dla wagonu całkowicie załadowanego (o bazie 10 m) i zbliżają się do wartości granicznych – rys.5.2.3.4.
- 5) Pionowe przemieszczenia kół występują na kołach odciążonych, a ich maksymalne wartości dla każdej rozpatrywanej bazy pojazdu przekraczają dopuszczalne wartości graniczne podawane w normie ($\Delta z_{\max} > 5$ mm) – rys.5.2.3.5, rys.5.2.3.6.



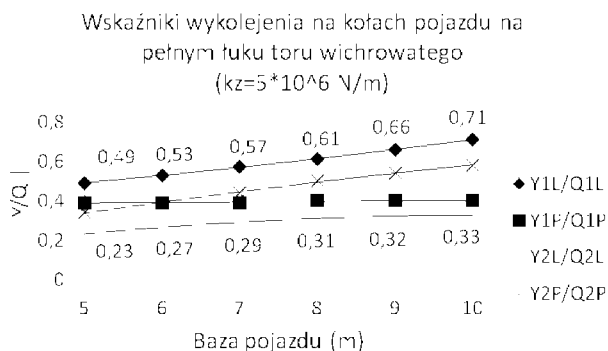
Rys.5. 2.3.1. Procentowy przyrost/spadek wartości pionowych nacisków kół na szynie w funkcji bazy pojazdu, dla pustego wagonu dwuosioowego na pełnym łuku zwichrowanym



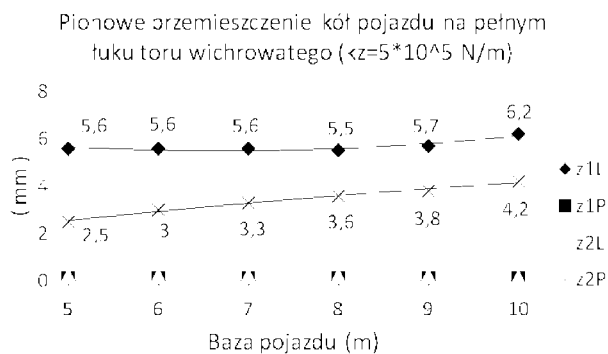
Rys.5.2.3.2. Procentowy przyrost/spadek wartości pionowych nacisków kół na szynie w funkcji bazy pojazdu, dla całkowicie obciążonego wagonu dwuosioowego na pełnym łuku zwichrowanym



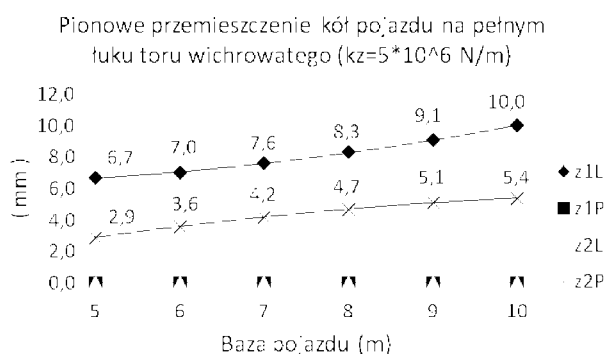
Rys.5.2.3.3. Wskaźniki wykołowania na kołach w funkcji bazy pojazdu, dla pustego wagonu dwuosowego na pełnym łuku zwichrowanym zgodnie z PN-EN 14363



Rys.5.2.3.4. Wskaźniki wykołowania na kołach w funkcji bazy pojazdu, dla pełnego wagonu dwuosowego na pełnym łuku zwichrowanym zgodnie z PN-EN 14363



Rys.5.2.3.5. Pionowe przemieszczenie kół w funkcji bazy pojazdu, dla pustego wagonu dwuosowego na pełnym łuku zwichrowanym zgodnie z PN-EN 14363



Rys.5.2.3.6. Pionowe przemieszczenie kół w funkcji bazy pojazdu, dla pełnego wagonu dwuosowego na pełnym łuku zwichrowanym zgodnie z PN-EN 14363

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Po analizie uzyskanych wyników obliczeń, autorzy artykułu doszli do następujących wniosków:

1) Duże, skokowe zmiany wartości pionowych nacisków kół na szynę występują tylko na krzywej przejściowej. Gdy pojazd znajdzie się na pełnym łuku, wartości pionowego dociążenia/odciążenia kół ulegają zmniejszeniu i stabilizują się. Pionowe odciążenie kół dwuosowego pojazdu szynowego na krzywej przejściowej nie jest jednak główną przyczyną wykołowania. Zauważono bowiem, że w obrębie krzywej przejściowej bezwzględne wartości wskaźników wykołowania $|Y/Q|$ oraz pionowych przemieszczeń kół (czyli głównych wskaźników, na podstawie których wnioskowano o bezpieczeństwie) są co najmniej o 1 rząd wielkości mniejsze od granicznych wartości, podawanych przez normę PN-EN 14363. Bezwzględne wartości tych wskaźników zwiększają się i stabilizują dopiero na pełnym łuku toru kolejowego.

2) Wcześniejszy wniosek wypływa z faktu, że w procesie wykołowania związanego ze wspinaniem się obrzeża koła na główkę szyny, decydującą rolę odgrywa położenie zestawu kół w torze kolejowym oraz siły prowadzące.

Do kontaktu obrzeża koła z szyną i wspinania się jego na główkę szyny najczęściej dochodzi w wyniku zwiększenia się wartości siły prowadzącej, działającej na to koło.

Taka sytuacja ma zawsze miejsce na pełnym łuku toru zakrzywionego. Dlatego uzasadnione jest badanie pojazdu na pełnym łuku toru zakrzywionego w sytuacji, gdy zwichrowaniu ulega szyna zewnętrzna, co w całości pokrywa się z wymogami stawianymi przez normę PN-EN 14363.

3) Na zwichrowanym łuku toru zakrzywionego najbardziej narażonym na wykołowanie jest prowadzący zestaw kół.

4) Stwierdzono istotny wpływ sztywności pionowej zawieszenia, zarówno na graniczne wartości wskaźników wykołowania, jak i na wartości pionowych przemieszczeń koła ponad główkę szyny.

Zwiększenie sztywności pionowej zawieszenia o 1 rząd wielkości (od $1 \cdot 10^5 \text{ N/m}$ do $1 \cdot 10^6 \text{ N/m}$) powoduje zwiększenie wartości wskaźników wykołowania o ok. 50% oraz wartości pionowych przemieszczeń koła o ok. 70%.

LITERATURA

[1] Chojnacki, A., Walczak, S.: *Badania bezpieczeństwa jazdy po wichrowatym torze. Porównanie wymagań wg ORE, PN-EN i TSI. Pojazdy Szynowe*, nr 2/2011, s.34-38.

- [2] Gąsowski, W., Marciniak, Z.: *Konstrukcje oraz modele wózków i układów zawieszonych wagonów i lokomotyw przeznaczonych do jazdy z dużymi prędkościami*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1993.
- [3] Norma PN-EN 14363.: *Badania właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu*. PKN, Warszawa 2007.
- [4] Matej, J.: *Modelowanie oraz symulacyjne badania wagonów bimodalnych w kategoriach zagrożenia wykojeniem*. *Prace Naukowe, Mechanika*, z. 234. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
- [5] Matej, J.: *Symulacyjna metoda oceny poziomu zagrożenia wykojeniem wagonu towarowego na torze prostym*. *Przegląd Mechaniczny*, Nr 1/2011, s. 20-25.