

O pewnych możliwościach zastosowania koncepcji probabilistycznej skrajni kinematycznej (5)

Niniejsza praca jest kontynuacją cyklu artykułów opisujących nowe podejście do określenia skrajni kinematycznej pojazdów szynowych. W pracy przedstawiono wyznaczanie współczynnika pochylenia pojazdów metodami doświadczalnymi. Stanowią one podstawę do weryfikacji przyjętych metod analitycznych do jego obliczania oraz do obliczeń zwężeń wewnętrznych oraz zewnętrznych na etapie projektowania pojazdu.

CZĘŚĆ V

METODY DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIA WSPÓLCZYNNIKA POCHYLENIA

1. Wprowadzenie

Niniejsza praca jest kontynuacją prac [1–4] wykonywanych w ramach projektu KBN nr 9 T12C 021 16 pt.: "Nowa koncepcja skrajni kinematycznej pojazdów szynowych." W pracy [3] przedstawiono analityczną metodę wyznaczania współczynnika pochylenia, która była oparta o statystyczny rozkład poszczególnych wielkości mających bezpośredni wpływ na jego ostateczną wartość. W metodzie statystycznej założono rozkład normalny poszczególnych wielkości (rozkład Gaussa). Poprawność zastosowanych metod obliczeniowych powinna być jednak zweryfikowana przez pomiar współczynnika pochylenia na gotowym obiekcie. Pozwala to na późniejszą ocenę poprawności obliczeń skrajni wykonanych na etapie projektowania wagonu. Procedura sprawdzania metodami doświadczalnymi współczynnika pochylenia wyznaczonego drogą analityczną jest tym bardziej pożądana, że jak się okazuje współczynnik pochylenia może być mniejszy aniżeli zalecana przez przepisy międzynarodowe UIC wartość 0,13 dla wagonów towarowych na wózkach standardowych. Zagadnienie to jest tym bardziej istotne, że ze zmniejszonej wartości współczynnika pochylenia "s" (tzn. poniżej zwyczajowo przyjętej wartości wynoszącej 0,13) wynikają korzyści dla producenta oraz użytkownika wagonów w postaci zwiększonego dopuszczalnego zarysu wagonu. Przypadek mniejszego współczynnika pochylenia niż 0,13 wyznaczono dla cysterny typu 432 R na wózkach standardowych typu Y25C_{ss} o oznaczeniu krajowym 25TNb/2, która była produkowana seryjnie i jest nadal eksploatowana [3]. Pomiary współczynnika pochylenia w praktyce wymagają jednak pewnych środków ostrożności polegających na wyeliminowaniu wpływu niesymetrii pudła pojazdu i tarcia w usprężynowaniu spowodowanym tłumikami. W usprężynowaniu pojazdu zawsze występuje tarcie, wyrażające się w postaci pętli histerezy mające wpływ na położenie pojazdu, które w ten sposób różni się od teoretycznego położenia równowagi. Przy pomiarach współczynnika pochylenia należy zabiegać i to, aby wyeliminować wpływ sił tarcia lub go uwzględnić. Jedną z metod eliminujących tarcie lub zbliżają-

cych je do poziomu występującego regularnie w eksploatacji są pomiary w czasie jazdy pojazdów szynowych. Dla pojazdów służących do transportu ładunków (wagony towarowe) oraz pasażerów (np zespoły trakcyjne, pojazdy trakcyjne, wagony osobowe) współczynnik pochylenia musi być ustalony dla określonych stanów obciążenia pojazdu. Dla pojazdów przeznaczonych dla transportu osobowego pomiar powinien odbywać się w stanie próżnym i ładownym. Pomiar w stanie ładownym powinien być symulowany np przez worki z piaskiem o masie 75 kg każdy i usytuowane tak, że środek ciężkości znajduje się 0,25 m ponad każdym miejscem siedzącym oraz dodatkowo o masie 5 kg każdy usytuowany nad półką bagażową. W przypadku wagonów osobowych przedziałowych przewidywanie dodatkowego obciążenia w korytarzach jest niepotrzebne, gdyż w tym przypadku dochodzi do zjawiska równomiernego rozkładu całości obciążenia. Przypadek ten może faktycznie występować podczas eksploatacji wagonu jednak w myśl przepisów [5] został on uznany jako mniej reprezentatywny. Oprócz tego wszystkie zbiorniki wodne muszą być napełnione, jak również pojazd musi być wyposażony we wszystkie akcesoria i części zapasowe, które są używane podczas regularnej eksploatacji. Dla wagonów towarowych ciężar ładunku jak również położenie środka ciężkości mogą znajdować się w bardzo szerokim przedziale wartości. Dla wagonów cystern jako miarodajny współczynnik pochylenia w stanie ładownym obowiązuje ten, przy którym zbiornik wagonu jest całkowicie napełniony. Natomiast w przypadku pozostałych wagonów współczynnik pochylenia w stanie ładownym wyznacza się dla całkowicie wypełnionej przestrzeni materiałem jednolitym o takiej gęstości, że całkowity ciężar tego ładunku jest równy granicy obciążenia. Niekiedy zasady i ustalenia przywołane powyżej są trudne do zrealizowania i w praktyce stosuje się metody pośrednie pomiaru współczynnika pochylenia. W niektórych specyficznych rodzajach usprężynowania [3] może się okazać, że współczynnik pochylenia w stanie próżnym ma większą wartość niż w stanie ładownym wagonu. Wówczas do dalszych obliczeń zwężeń zewnętrznych i wewnętrznych pojazdu należy przyjąć ten, który wykazuje większą wartość.

2. Metody doświadczalne wyznaczania współczynnika pochylania dla pojazdów szynowych

2.1. Klasyfikacja metod doświadczalnych

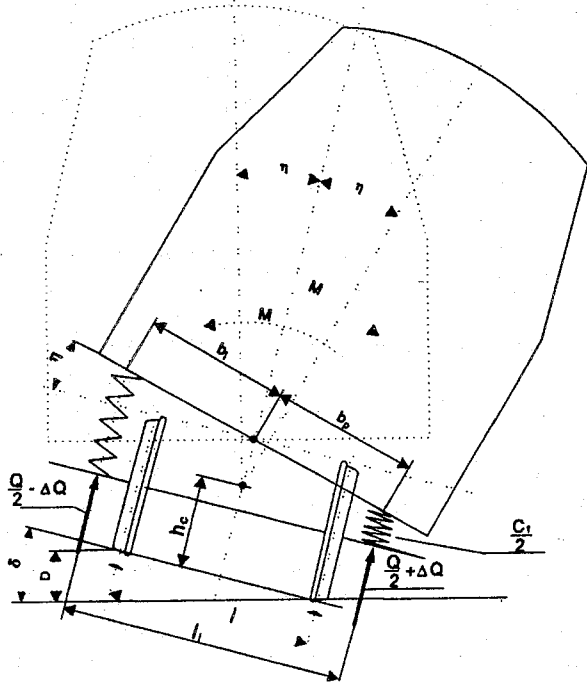
Metody doświadczalne wyznaczania współczynnika pochylania pojazdów można podzielić na następujące grupy:

- pomiary na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym, które z kolei można podzielić na pomiary z wytwarzaniem drgań oraz na pomiary bez wytwarzania drgań,
- pomiary warsztatowe, jeśli nie ma się do dyspozycji stanowiska badawczego,
- pomiary statyczne na torze,
- pomiary dla szczególnych przypadków wagonów towarowych,
- pomiary w czasie jazdy, które można z kolei podzielić na pomiary wynikające z niedostateczności przechyłki oraz pomiary wynikające z nierównoważonego przyspieszenia odśrodkowego.

2.2. Pomiary na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym

Pomiary na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym są zależne od tego czy pojazd można wprawić w drgania czy też nie.

- **Przy pomiarach z wytwarzaniem drgań pojazdu** rejestruje się wartości kątów "η" pudła pojazdu (rys. 1), realizowane dla różnych wartości przechyłek, tzn. 50, 100, 150 mm po każdorazowym wprowadzeniu pojazdu w drgania, w celu wyeliminowania sił tarcia. Porównanie wartości kąta "η" dla dwóch końców pojazdu umożliwia zmierzenie również zwichrowania pudła pojazdu o kąt η₀.



Rys. 1. Pochylenie pudła pojazdu usprężynowanego na łuku pod wpływem nadmiaru lub niedostateczności przechyłki (odpowiednio linia ciągła lub przerywana)

Współczynnik pochylania wyznacza się wówczas z następujących zależności:

$$s = \frac{\eta_{150} - \eta_{50}}{\delta_{150} - \delta_{50}} = \frac{\eta_{100} - \eta_{50}}{\delta_{100} - \delta_{50}} = \frac{\eta_{150} - \eta_{100}}{\delta_{150} - \delta_{100}}, \quad (1)$$

gdzie: 50, 100, 150 – przechyłki toru w [mm].

Kąt odpowiadający ewentualnej niesymetrii pojazdu na torze bez przechyłki można wyznaczyć z następującej zależności:

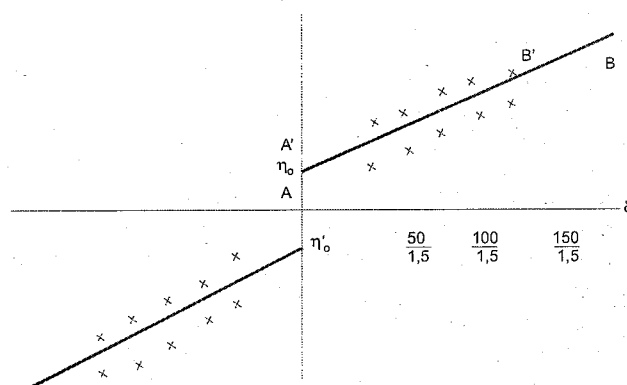
$$\begin{aligned} \eta_0 &= \eta_{150} - s \cdot \delta_{150} = \\ &= \eta_{100} - s \cdot \delta_{100} = \eta_{50} - s \cdot \delta_{50} \end{aligned} \quad (2)$$

Pomiar kąta η może być przeprowadzony w oparciu o wyznaczenie odległości dwóch punktów pudła pojazdu ze znaną wysokością od pionu lub za pomocą sprawdzianu pomiarowego przechyłki wyposażonego w poziomice, która jest położona na podłodze. W obydwu przypadkach z pomiarów otrzymuje się sumę kątów η + δ.

Gdyby okazało się, że ww trzy wartości znacznie różnią się między sobą, co może wynikać z wywołania drgań o zbyt małej amplitudzie, albo ze stosunkowo dużego tarcia występującego w układzie, wtedy wielkość współczynnika pochylania należy wyznaczyć na tym samym stanowisku badawczym, ale metodą bez wytwarzania drgań.

- **Pomiary bez wytwarzania drgań** polegają na ustaleniu wielu kątów pochylania "η" pojazdu dla wzrastających przechyłek toru, tzn. 50, 75, 100, 125 i 150 mm. Pomiarów bez przechyłki toru nie przeprowadza się.

Jeżeli pojazd znajduje się na stanowisku badawczym to należy brać pod uwagę fakt, że istniejące w usprężynowaniu tarcie nadaje mu takie położenie, które może wynikać z przechyłek lub pomiarów przechyłek, którym pojazd poprzednio podlegał i które nie są znane badającemu. Można na tej podstawie wnioskować, że punkt reprezentatywny może być dowolnym punktem znajdującym się pomiędzy punktem A i A' na wykresie krzywej histerezy (rys. 2).



Rys. 2. Krzywa histerezy występująca przy pomiarach współczynnika pochylania

Po serii pomiarów dokonanych dla ww przechyłek toru dokonuje się zwiększenia przechyłki powyżej 150 mm, jednak bez wykonywania dalszych pomiarów kąta pochylenia.

Przechyłka 150 mm musi być przekroczona, aby mieć pewność że bezpośrednie pomiary dla malejących przechyłek odpowiadają takim punktom, które leżą na odcinku BA' krzywej histerezy, a nie punktom leżącym na odcinku B'B, który nie byłby wykorzystany.

Przekroczenie przechyłki o wartości 150 mm musi być tym większe im silniejsze jest tarcie. A więc:

- dla wagonów osobowych wystarczy aby przechyłkę podnieść do 170 lub 180 mm.
- dla wagonów towarowych przechyłka musi być powiększona do 200 mm.

Gdyby zaistniał taki przypadek, że przechyłki nie można podwyższyć do ww wartości to wówczas pomiar dla przechyłki 150 mm musiałby pozostać nieuwzględniony.

Następnie należy przeprowadzić drugą serię pomiarów kąta pochylenia dla zmniejszających się wartości przechyłek, tzn. 150, 125, 100, 75 i 50 mm.

Wartości pomierzonych kątów pochylenia $\eta_1, \eta_2 \dots$ itd. wyznaczają krzywą histerezy abstrahując od błędów pomiarowych. Jeśli jednak pomiary na stanowisku badawczym są przeprowadzone starannie, to wówczas błędy pomiarowe kątów pochylenia η są bardzo małe (jak wynika z dotychczasowych doświadczeń wynoszą one od 2 do 3 minut (0,00058–0,00087 rad)). Pochylenie osi przedstawionej na pętli histerezy jest wielkością współczynnika pochylenia, natomiast współrzędna w punkcie zerowym osi (dla $\delta = 0$) jest średnią wartością kąta niesymetrii pudła.

Wartość współczynnika pochylenia wyznacza się wg metody najmniejszych kwadratów wg następującego wzoru:

$$s = \frac{\eta_1 \cdot \delta_1 + \eta_2 \cdot \delta_2 + \dots + \eta_n \cdot \delta_n - \frac{(\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_n) \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n)}{n}}{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots - \frac{(\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n)^2}{n}} \quad (3)$$

przy czym "n" oznacza liczbę przeprowadzonych pomiarów.

Najbardziej prawdopodobna wartość kąta niesymetrii pudła pojazdu (w stanie bez przechyłki) wynosi:

$$\eta_0 = \frac{1}{n} [(\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_n) - s \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \dots)] \quad (4)$$

Następnie przeprowadza się te same pomiary na przechyłkach o tych samych wartościach, ale w przeciwnym kierunku (najpierw dla wzrastających wartości przechyłek, a następnie dla malejących wartości przechyłek). Porównując pomiary tzw prawo i lewostronne może okazać się, że np wskutek różnicy tarcia w usprężynowaniu kąty pochylenia mają różne wartości (przypadek ten jest pokazany na rys. 2).

W tabeli 1 przedstawiono wyniki eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika pochylenia oraz kąta niesymetrii pudła dla wagonów osobowych z wózkiem typu Y28 kolei francuskich SNCF. Pomiary odbyły się na specjalnie skonstruowanym stanowisku do badań metodą bez wytwarzania drgań. Stanowiskiem takim dysponuje ośrodek badawczy Stowarzyszenia Kolei Francuskich SNCF we Vitry-sur-Seine.

Koleje zachodnioeuropejskie dokonują pomiarów współczynnika pochylenia na wszystkich typach pojazdów szynowych wprowadzonych do eksploatacji.

Tabela 1

Zestawienie wyników pomiarów kątów pochylenia η oraz odpowiadającym im kątów przechyłki δ w celu wyznaczenia współczynnika pochylenia metodą pomiarową przeprowadzoną na specjalnym stanowisku badawczym bezwytwarzania drgań pojazdu dla wagonu osobowego na wózkach SNCF typu Y28

Przeprowadzone pomiary			Przynależne obliczenia	
Przechyłka [mm]	Kąt δ [min]	Kąt pochylenia η [min]	$\eta\delta$	δ^2
50	115	43,47	4999,05	13 225
75	172	70,78	12 174,16	25 584
100	229	91,08	20 857,32	52 441
125	286	115,7	33 090,20	81 796
150	343	135,5	46 476,50	117 649
150	343	149,5	51 278,50	117 649
125	286	123,6	35 349,60	81 796
100	229	105,8	24 228,20	52 441
75	172	86,74	14 919,28	25 584
50	115	59,48	6 840,20	13 225
Σ	2290	981,65	250 213,01	589 390

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 1 można wyznaczyć w oparciu o zależności (3) oraz (4) współczynnik pochylenia oraz kąt niesymetrii własnej pudła i tak:

$$s = \frac{250213,01 - \frac{2290 \cdot 981,65}{10}}{589390 - \frac{2290^2}{10}} = 0,3911 \quad (5)$$

$$\eta_0 = \frac{1}{10} [981,65 - 2290 \cdot 0,3911] = 8,6' \quad (6)$$

Duża wartość "s" odpowiada bardzo miękkiemu usprężynowaniu wózka osobowego typu Y28.

2.3. Pomiary warsztatowe współczynnika pochylenia

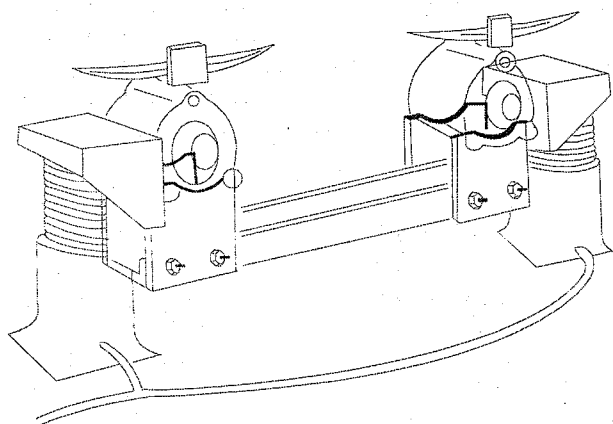
Pomiary warsztatowe współczynnika pochylenia stosuje się wtedy, gdy nie dysponuje się specjalnym stanowiskiem badawczym. Pomiary te wykonuje się przez unoszenie zestawów kołowych za pomocą urządzenia dźwignicowego (dźwigarki – rys. 3).

W tym przypadku należy uwzględnić, że zastosowanie urządzeń dźwignicowych może powodować pewne trudności, a mianowicie:

- podłoga lub belka poprzeczna, na których one spoczywają muszą posiadać wystarczającą wytrzymałość aby zapewnić bezpieczeństwo pomiarowe,

- konstrukcja dźwigarki musi być dostosowana do układu maźnic z łożyskami osi.

Unoszenie zestawów kołowych odbywa się na wysokość wynoszącą 170–200 mm. Z uwagi na fakt unoszenia na stosunkowo dużą wysokość jak również to, że dźwigarki są ustawione skośnie 5 do 6° (0,087–0,104 rad) w odniesieniu do łożysk, muszą one być tak skonstruowane aby umożliwić ruch przechylający pojazd i zapewnić ich odpowiednią nośność aby uniknąć ich uszkodzenia lub odkształcenia części podporowej.



Rys. 3. Urządzenie dźwiganicowe do pomiarów warsztatowych współczynnika pochylenia

Skośne ustawienie dźwigarki wywołuje siłę składową, która oddziaływać na dźwigarkę w kierunku wypychającym ją na zewnątrz. Z tego też powodu należy zwrócić uwagę na odpowiednie zamocowanie dźwigarek aby uniknąć wypadków nagłego ich wysunięcia.

Metoda pomiaru współczynnika pochylenia jest taka sama jak dla pomiarów na stanowisku badawczym bez wytwarzania drgań, z zachowaniem takiego samego toku obliczeń. Jeśli pomiary wg ww metody będą przeprowadzone starannie, to wówczas przypadkowe błędy pomiarowe dotyczące kątów pochylenia nie będą przekraczać 5 do 6 minut (0,00145–0,00174 rad).

2.4. Pomiary statyczne współczynnika pochylenia na torze

Statyczne pomiary współczynnika pochylenia na torze przeprowadza się wtedy, gdy dysponuje się odcinkami toru z różnymi wartościami przechyłek, tzn. 50, 100 i 150 mm. Pomiary przeprowadza się w dwóch seriach – dla wzrastających wartości przechyłek toru (pierwsza seria pomiarów) oraz dla zmniejszających wartości przechyłek toru (druga seria pomiarów).

Zaleca się aby pomiary wykonywać dla przejazdów po dokonaniu obrócenia pojazdu. Pomiary i obliczenia realizuje się analogicznie jak dla stanowiska bez wytwarzania drgań. Zaleca się, aby wartość przechyłki toru mierzyć pod pojazdem znajdującym się w stanie spoczynku (a nie przed lub po przejeździe) w celu uniknięcia błędu spowodowanego elastycznością toru. Jak wynika z dotychczasowej praktyki metoda ta jest o wiele mniej dokładna aniżeli w poprzednio opisanych przypadkach.

2.5. Pomiary współczynnika pochylenia dla szczególnych przypadków wagonów towarowych

Pomiary dla szczególnych przypadków wagonów towarowych różnią się tym od wyżej przedstawionych metod pomiarowych, w których pojazd jest wprowadzany na przechyłkę toru, że pojazd obciąża się jednostronnie. Jest to metoda pośrednia pomiaru współczynnika pochylenia. Gdy wagon towarowy, który jest załadowany przy warunkach dla ustalenia współczynnika pochylenia jest ustawiony na torze z przechyłką D i kątem $\delta = \frac{D}{1,5}$, wyrażonym w radianach, to

wówczas podłoga wagonu, pod działaniem siły ciężkości, pochyła się o kąt δ do normalnej do płaszczyzny szyn i współczynnik pochylenia wynosi $s = \frac{\eta}{\delta}$.

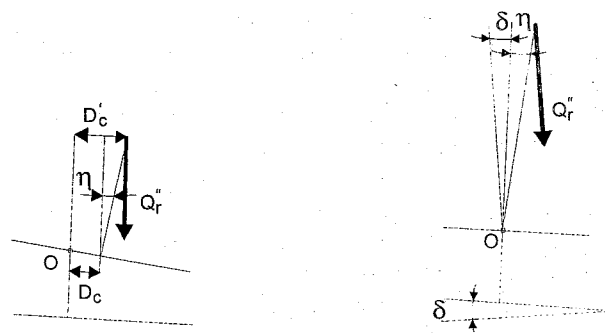
Jeśli środek ciężkości obciążonej usprężynowanej masy pojazdu znajduje się na wysokości "h" od bieguna przechylenia (rys. 4) to wówczas:

$$\sum M_c = Q_r'' \cdot h \cdot (\eta + \delta) \quad (7)$$

gdzie:

$\sum M_c$ – moment siły ciężkości masy usprężynowanej względem bieguna przechylenia "C",

Q_r'' – ciężar masy usprężynowanej wagonu.



Rys. 4. Sposób wyznaczania współczynnika pochylenia dla wagonów towarowych

Moment spowodowany siłą ciężkości masy usprężynowanej na przechyłce toru D jest równoważny momentowi, który powstałby w stanie spoczynku pojazdu znajdującego się na poziomym torze przy mimośrodowości obciążenia. Jeśli więc zostanie stwierdzone, że przesunięcie ładunku w stanie spoczynku, na poziomym torze, w zakresie granicy obciążenia wywołuje pochylenie podłogi o kąt "eta", to wówczas wzór na współczynnik pochylenia przedstawia się następująco:

$$s = \frac{\eta \cdot h}{D} \quad (8)$$

Zamiast mierzyć kąt "eta" można zmierzyć wzajemne przesunięcie ładunku na wysokości "h" w odniesieniu do prostopadłej przechodzącej przez punkt obrotu usprężynowania wynoszące $\Delta D_c = D_c' - D_c$.

W związku z tym kątem pochylenia "η" i współczynnik pochylenia "s" wynoszą odpowiednio:

$$\eta = \frac{D'_c - D_c}{h} \quad \text{oraz} \quad s = \frac{D'_c}{D_c} - 1 \quad (9)$$

korzystając z zależności $\delta = \frac{D_c}{h}$ i $s = \frac{\eta}{\delta}$.

Stosując tę metodę pomiaru należy koniecznie uwzględnić tarcie, analogicznie jak w poprzednich metodach pomiarowych. Z tego powodu wykonuje się pierwszą serię pomiarów ze wzrastającymi mimośrodowościami obciążenia oraz drugą serię pomiarów ze zmniejszającymi się mimośrodowościami obciążenia wywołanymi ładunkiem. Metoda ta nie wymaga zastosowania ładunku o określonej gęstości, a tylko znajomości wysokości środków ciężkości masy usprężynowanej wagonu.

2.6. Pomiar współczynnika pochylenia podczas jazdy

Pomiary współczynnika pochylenia podczas jazdy wymagają wyposażenia pojazdu w przyrządy pomiarowe w celu wyznaczenia kąta pochylenia "η" pudła pojazdu w stosunku do normalnej do płaszczyzny szyn np na podstawie różnicy ugięć sprężyn nośnych (mierzonej za pomocą czujników pomiarowych), jak również jednocześnie w celu wyznaczenia niedostateczności przechyłki oraz niezrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego. Kąt "η" jest wyznaczany za pomocą różnicy ugięć sprężyn nośnych mierzonej za pomocą czujników przemieszczeń. Ustalenie współczynnika pochylenia za pomocą tej metody może odbyć się kilkoma sposobami i tak:

- sposób 1 – za pomocą ustalenia niedostateczności przechyłki polegający na jednoczesnym zarejestrowaniu przechyłki, promienia łuku i kąta pochylenia "η".

Ustalając niedostateczność przechyłki za pomocą konwencjonalnego wzoru i wyrażając prędkość v w km/h:

$$I = \frac{1 \cdot v^2}{g \cdot R} - D = \frac{0,0118 \cdot v^2}{R} - D \quad (10)$$

oraz rozpatrując dwa punkty pomiarowe-jeden z dużą niedostatecznością przechyłki I_1 natomiast drugi z małą niedostatecznością przechyłki I_2 – otrzymuje się wyraz "s" oraz "η₀" z zależności wyprowadzonych wg [5]:

$$\eta_0 = \eta_1 - s \cdot \frac{I_1}{1,5} = \eta_2 - s \cdot \frac{I_2}{1,5} \quad (11)$$

Z powyższej zależności (9) można wyznaczyć współczynnik pochylenia "s":

$$s = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\frac{I_1}{1,5} - \frac{I_2}{1,5}} \quad (12)$$

Przy korzystaniu z tej metody pomiaru należy zwrócić uwagę na dokładny pomiar prędkości.

- sposób 2 – za pomocą ustalenia niezrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego polegający na jednoczesnym rejestrowaniu przyspieszenia poprzecznego "γ" na podłodze pojazdu i jednoczesnym pomiarze kąta "η". Ponieważ obowiązuje zależność [5]:

$$\frac{a}{g} = \frac{I}{1,5} + (\eta - \eta_0) \quad (13)$$

to można uniknąć błędów spowodowanych obliczeniem niedostateczności przechyłki "I" z trzech pomiarów. Przy uwzględnieniu dwóch punktów pomiarowych (jednego z dużym i drugiego z małym przyspieszeniem poprzecznym) otrzymuje się następującą zależność zgodną z [5]:

$$\eta_0 = \eta_1 - \frac{s}{1+s} \cdot \frac{a_1}{g} \quad \text{i} \quad \eta_0 = \eta_2 - \frac{s}{1+s} \cdot \frac{a_2}{g} \quad (14)$$

Z zależności (12) można wyznaczyć współczynnik pochylenia:

$$s = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\frac{a_1 - a_2}{g} - (\eta_1 - \eta_2)} \quad (15)$$

Metoda ta posiada zaletę polegającą na tym, że współczynnik pochylenia "s" jest mierzony w normalnych warunkach eksploatacyjnych.

3. Wyznaczanie bieguna przechylenia dla wagonów towarowych

Ponieważ wyznaczanie bieguna przechylenia na drodze analitycznej jest dość trudne, a stosowane metody obliczeniowe stanowią pewne uproszczenia, można go wyznaczyć w oparciu o ustalony wcześniej na drodze eksperymentalnej współczynnik pochylenia. Zgodnie z [3] współczynnik pochylenia można wyznaczyć z zależności:

$$s = \frac{Q_r'' \cdot (h_o - h_c)}{c_{kl} - Q_r'' \cdot (h_o - h_c)} \quad (16)$$

gdzie:

- Q_r'' – ciężar części usprężynowanej pojazdu,
- h_o – wysokość środka ciężkości wagonu od główki szyny,
- h_c – wysokość bieguna przechylenia wagonu od główki szyny (rys. 1),
- c_{kl} – ztywność usprężynowania pojazdu na kołysanie określona w [3].

Wyznaczając h_C ze wzoru (16) otrzymuje się co następuje:

$$h_C = h_O - \frac{s \cdot c_k}{(1+s) \cdot Q_r} \quad (17)$$

Poprawność wzoru potwierdzają następujące obliczenia dla wagonu – cysterny o parametrach przyjętych zgodnie z [3]. Po wstawieniu danych liczbowych $h_O = 2,403$ oraz $s = 0,08672$ (jako współczynnik nominalny), $c_k = 1,84064 \cdot 10^7$ N·m oraz $Q_r = 729363$ N (stan ładowny) otrzymuje się:

$$h_C = 2,403 - \frac{0,08672 \cdot 1,84064 \cdot 10^7}{(1+0,08672) \cdot 729363} = 0,389 \text{ m} \quad (18)$$

co odpowiada dokładnie wartości przyjętej z zależności (78) wg [3].

Uznając poprawność wzoru (17) można wnioskować o jego zastosowaniu w celu wyznaczania bieguna przechylenia jeśli znany jest współczynnik pochylenia wyznaczony na drodze eksperymentalnej. Można odnotować ciekawe spostrzeżenie jeśli weźmie się pod uwagę zgodnie z [5] skojarzenie wartości $s = 0,13$ oraz $h_C = 0,5$ m dla tego typu wagonu. Wówczas przyjmując zadaną przepisami wartość współczynnika pochylenia wynoszącą $s = 0,13$ otrzymuje się:

$$h_C = 2,403 - \frac{0,13 \cdot 1,84064 \cdot 10^7}{(1+0,13) \cdot 729363} = -0,500 \text{ m} \quad (19)$$

co jest wartością nierealną, jeśli bierze się pod uwagę przypadki wagonów towarowych.

Powyższa zależność jest więc dowodem na to, że wartość współczynnika pochylenia wynosząca 0,13 nie musi być w sposób bezwzględny przyjmowana.

4. Podsumowanie

W nowej koncepcji probabilistycznej skrajni kinematycznej, którą podano na przykładzie wagonów towarowych, jednym z podstawowych zagadnień są przesunięcia quasistatyczne oraz współczynnik pochylenia. Jak wynika z przedstawionych metod doświadczalnych mogą one przyczynić się do tworzenia materiału poznawczego dla ustalenia rzeczywistych wartości współczynników pochylenia oraz zwiężeń quasistatycznych wyznaczonych dla wagonów towarowych. Metodę analityczną wyznaczania współczynnika pochylenia w oparciu o bazę danych zawierającą wyniki badań doświadczalnych przedstawiono w [3]. W przypadku wagonów towarowych, z uwagi na ich duży stopień standaryzacji, jest celowe aby przeprowadzać badania w celu wyznaczenia współczynnika pochylenia na każdym typie wagonu wraz z jego odmianami. Wtedy będzie można na etapie projektowania nowych wagonów określić dość dokładnie wartość współczynnika pochylenia dla wagonu pokrewnego. Celowość dokładnego wyznaczenia współczynnika pochylenia uzasadniają wyniki obliczeń zwiężenia quasistatycznego "z" dla cysterny typu "432R" przedstawione w tabeli 2.

Zwiężenia "z" wyznaczono w oparciu o wzór przedstawiony w [5]:

$$z = \left[\frac{s}{30} + \operatorname{tg}(\eta'_0 + \alpha(1+s) - 1^0) \right] \cdot (h - h_C) \quad (20)$$

Przyjmując $\eta'_0 = 1^0$, luz na ślizgach bocznych $J = 12$ mm oraz $h_C = 0,389$ m powyższy wzór przyjmuje postać:

$$z = \left[\frac{s}{30} + \operatorname{tg} 0,4718369295 \cdot (1+s) \right] \cdot (h - h_C) \quad (21)$$

Tabela 2

Obliczenia zwiężenia quasistatycznego "z" dla różnych wariantów współczynnika pochylenia dla czteroosiowej cysterny "432 R"

Określenie zwiężenia skrajni kinematycznej	Zwiężenie skrajni kinematycznej "z" obliczone dla h			
	1,170 m	3,250 m	3,700 m	4,010 m
średni współczynnik pochylenia $s = 0,08703$	0,00920 m $\Delta z = -6,9 \cdot 10^{-5}$ m	0,03391 m $\Delta z = 3,5 \cdot 10^{-3}$ m	0,03924 m $\Delta z = 4,40 \cdot 10^{-3}$ m	0,04291 m $\Delta z = 4,95 \cdot 10^{-3}$ m
współczynnik pochylenia $s_{STATMAX} = 0,09461$ (statystyczny)	0,00950 m $\Delta z = -3,6 \cdot 10^{-4}$ m	0,03481 m $\Delta z = 2,69 \cdot 10^{-3}$ m	0,04028 m $\Delta z = 3,35 \cdot 10^{-3}$ m	0,04406 m $\Delta z = 3,81 \cdot 10^{-3}$ m
współczynnik pochylenia $s_{STATMIN} = 0,07945$ (statystyczny)	0,00901 m $\Delta z = 1,2 \cdot 10^{-4}$ m	0,003301 m $\Delta z = 4,4 \cdot 10^{-3}$ m	0,03820 m $\Delta z = 5,44 \cdot 10^{-3}$ m	0,04177 m $\Delta z = 6,09 \cdot 10^{-3}$ m
współczynnik pochylenia $s = 0,13$ oraz biegun przechylenia $h_C = 0,5$ m	0,00913 m	0,03750 m	0,04364 m	0,04787 m

Wzór ten obowiązuje dla $\alpha = \arctg \frac{J-5}{b_G} = \arctg \frac{12-5}{850} = 0,4718369295^{\circ}$, gdzie $b_G = 850$ mm (odległość osi symetrii ślizgu od osi wzdłużnej wózka). Przeprowadzono również obliczenia dla tego typu wagonu biorąc pod uwagę wartości wyliczone w [3], tzn. $s = 0,08703 \pm 0,00758$ i $h_C = 0,389$ m oraz zalecane w przepisach, tzn. $s = 0,13$ i $h_C = 0,5$ m.

Wyniki ujęte w tabeli wykazują, że dokładne wyznaczenie współczynnika pochylania i bieguna przechylenia drogą analityczną daje dość duże korzyści w stosunku do przyjmowanych wartości $s = 0,13$ oraz $h_C = 0,5$ m, jeśli chodzi o zważenia zewnętrzne oraz wewnętrzne wagonu oraz dopuszczalny zarys wagonu. Korzyści dla tej ostatniej wielkości są proporcjonalne do wysokości rozpatrywanego punktu.

Potwierdza się również duża przydatność metod doświadczalnych w celu wyznaczania rzeczywistego współczynnika pochylania. Metody te w zależności od stopnia ich dokładności mogą potwierdzić wyliczone wartości współczynnika pochylania dla poszczególnych typów wagonów towarowych oraz wielkość ich rozrzutu.

Literatura

- [1] Gąsowski W., Sobaś M.: O pewnych możliwościach zastosowania koncepcji probabilistycznej skrajni kinematycznej pojazdów szynowych (1). *Pojazdy Szynowe*, nr 4/1999.
- [2] Gąsowski W., Sobaś M.: O pewnych możliwościach zastosowania koncepcji probabilistycznej skrajni kinematycznej pojazdów szynowych (3). *Pojazdy Szynowe*, nr 3/2000.
- [3] Gąsowski W., Sobaś M.: O pewnych możliwościach zastosowania koncepcji probabilistycznej skrajni kinematycznej pojazdów szynowych (4). *Pojazdy Szynowe*, nr 4/2000.
- [4] Sobaś M.: O pewnych możliwościach zastosowania koncepcji probabilistycznej skrajni kinematycznej pojazdów szynowych (2). *Pojazdy Szynowe* nr 1/2000.
- [5] Karta UIC 505-5. Wspólne podstawowe warunki dla kart 505-1 do 505-4. Komentarz uwzględniający opracowanie i przepisy dotyczące tych kart. II wydanie z 01.01.1997, zmiana z 01.01.1980.