

prof. dr hab. inż. Włodzimierz Gąsowski
Politechnika Poznańska
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”
mgr inż. Marek Sobaś
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

O pewnych możliwościach zastosowania koncepcji probabilistycznej skrajni kinematycznej pojazdów szynowych (3)

Niniejsza praca kontynuuje cykl artykułów ujmujących nowe podejście do określenia skrajni kinematycznej pojazdów szynowych. W tej części pracy przedstawiono próbę oszacowania przemieszczenia poprzecznego na drodze statystycznej na przykładzie wagonów towarowych czteroosiowych wyposażonych w układy biegowe z zawieszeniem typu „Y25”.

CZĘŚĆ III

ZASTOSOWANIE RACHUNKU PRAWDOPODOBIENSTWA W OBLICZENIACH PRZEMIESZCZENIA POPRZECZNEGO W STREFIE PRZYMAŹNICZNEJ

1. Wprowadzenie

Poprzeczne przemieszczenia pojazdu w torze mają dwójaki charakter: kinematyczny i dynamiczny. W konsekwencji na wartość zwężeń zarysu odniesienia skrajni kinematycznej, określających maksymalne wymiary pojazdu w przekroju poprzecznym, mają wpływ, obok przemieszczeń geometrycznych pojazdu względem toru, także przemieszczenia dynamiczne wynikające z możliwości wyczerpania luzu w konstrukcji układu biegowego pojazdu. Analizie powinno więc podlegać przemieszczenie ostoji lub ramy wózka pojazdu wózkowego względem zestawu kołowego (oznaczone w obliczeniach zwężeń skrajni jako q). W żadnym z dotychczasowych opracowań dotyczących skrajni nie analizowano, czy wymiar ten podczas eksploatacji może być wyczerpany wskutek oddziaływania dynamicznego. Niniejsza część pracy obejmuje zagadnienia dynamicznych przemieszczeń poprzecznych. W analizie oddziaływań dynamicznych istotne jest ustalenie wartości przyspieszenia odśrodkowego, które może jako ekstremalne, działać na wagon znajdujący się w łuku toru, ze wszystkimi konsekwencjami tego procesu. Następnie wyznaczono wartość przyspieszenia odśrodkowego metodą statystyczną. W oparciu o tak wyznaczone przyspieszenie określono wartość prawdopodobnego ugięcia.

2. Analiza wielkości przyspieszenia niezerównoważonego

Jak wynika z [11] wartością przyspieszenia poprzecznego, przyłożonego w środku ciężkości, w kierunku poprzecznym, którą przyjmuje się do obliczeń wytrzymałościowych zestawów kołowych wagonów towarowych, jest tzw. $\beta = 0,15 \cdot g = 1,47 \text{ m/s}^2$. Według przepisów krajowych [14] największe dopuszczalne, niezerównoważone przyspieszenie w ruchu towarowym nie może przekroczyć $a_n \leq 0,6 \text{ m/s}^2$. Zbliżoną wartość niezerównoważonego przyspieszenia odśrodkowego, wynoszącą $0,7 \text{ m/s}^2$ dla łuków $R = 250 \text{ m}$, przyjmuje się również do analiz układów sterowania pudła [3]. Jest to maksymalna wartość, która w rzeczywistości rzadko jest osiągnięta. Z reguły wartość niezerównoważonego przyspieszenia jest znacznie mniejsza. Dobór wartości dopuszczalnego przyspieszenia niezerównoważonego ma związek z efektywną przechyłką zastosowaną na łuku. W celu uzyskania możliwie małych różnic w odkształceniu i zużyciu obu toków szyn na liniach o różnych prędkościach pociągów towarowych i pasażerskich należy zastosować przechyłkę uwzględniającą:

największą prędkość pociągów pasażerskich na danym szlaku,
prędkość pociągów towarowych,
natężenie przewozów.

Zgodnie z przepisami krajowymi [14] wartość przechyłki nie może być mniejsza niż przechyłki minimalnej dla pociągów pasażerskich:

$$h_{\min} = \frac{11,8 \cdot v_{\max}^2}{R} - 153 \cdot a_{\max} \quad (1)$$

gdzie: h_{\min} – minimalna przechyłka toru w mm,

v_{\max} – największa prędkość pociągów pasażerskich w [km/h],

a_{\max} – największe przyspieszenie nie zrównoważone, wynoszące 0,6 [m/s²], dla warunków PKP,

R – promień łuku toru w [m].

Jednocześnie wartość przechyłki nie może być większa niż przechyłka graniczna dla pociągów towarowych, które wyznacza się ze wzoru:

$$h_{\max} = \frac{11,8 \cdot v_t^2}{R} + 153 \cdot a_n \quad (2)$$

gdzie: h_{\max} – maksymalna przechyłka toru w [mm],

v_t – prędkość pociągów towarowych w [km/h],

a_n – graniczne przyspieszenie nie zrównoważone w ruchu towarowym w [m/s²].

Graniczne przyspieszenia $a_n = f(q)$, w zależności od obciążenia danej linii w $\left[m \ln \frac{t}{\text{rok}} \text{brutto} \right]$ są przedstawione w tabeli 1 [14].

Z wzorów (1) i (2) można zestawić nierówność, służącą do określenia efektywnej przechyłki toru h i wynikających nie zrównoważonych przyspieszeń występujących na danej linii w ruchu towarowym i pasażerskim:

$$\frac{11,8 \cdot v_{\max}^2}{R} - 153 \cdot a_{\max} \leq h \leq \frac{11,8 \cdot v_t^2}{R} + 153 \cdot a_n \quad (3)$$

Zestawienie granicznych nie zrównoważonych przyspieszeń w ruchu towarowym w funkcji wielkości przewozów wg [14]

Tabela 1

Wielkość przewozów na danej linii w $\left[m \ln \frac{\text{ton}}{\text{rok}} \text{brutto} \right]$	Graniczne nie zrównoważone przyspieszenie w ruchu towarowym a_n [m/s ²]	Dopuszczalny nadmiar przechyłki Δh_t [mm] dla pociągów towarowych
$0 \leq q \leq 5$	0,6	92
$5 \leq q < 10$	0,5	76
$10 \leq q < 15$	0,4	61
$15 \leq q < 20$	0,3	46
$q \geq 20$	0,2	31

Biorąc pod uwagę powyższe dane można założyć, że najbardziej niekorzystną sytuację na łuku $R = 250$ osiągnie się wtedy, gdy $0 \leq q < 5 m \ln \frac{\text{ton}}{\text{rok}}$ oraz $a_n = 0,6 m/s^2$. Wte-

dy można korzystając z wzoru (2) lub (3), wyznaczyć dopuszczalną prędkość na łuku $R=250$ m przy założeniu mak-

symalnej przechyłki $h = 150$ mm. Wynosi ona $v_t \approx 35$ km/h. Analizując inne wyciągi z przepisów, których wartości są podane w [4] można zauważyć, że np. koleje niemieckie przyjmują zbliżoną wartość dopuszczalnego przyspieszenia wynikającego z nadmiaru przechyłki Δh_t . Na przykład dla natężenia przewozów wynoszących $0 < q < 5,5 m \ln \frac{t}{\text{rok}}$ dopuszczalny nadmiar przechyłki $\Delta h_t = 90$ mm, co odpowiadałoby przyspieszeniu $a_n = 0,59 m/s^2$ oraz $\Delta h_t = 50$ mm dla $a_n = 0,33 m/s^2$. Przyspieszenie to skierowane do wewnętrznej strony łuku toru jest oznaczane w przepisach zagranicznych oraz w literaturze jako a_t . Problem ten jest bardziej złożony w przepisach francuskich przytoczonych w [1]. Mają one trzy ekstremalne dopuszczalne wartości nadmiaru przechyłki oraz dopuszczalnego przyspieszenia wynikającego z nadmiaru przechyłki na łuku $R = 250$ m:

- dla natężenia przewozów $q < 3,7 m \ln \frac{\text{ton}}{\text{rok}}$ dla pociągów z wagonami towarowymi starych typów o nacisku osi 200 kN, przyjmuje się odpowiednio:
 - $\Delta h_t = 100$ mm i $a_n = 0,65 m/s^2$ w normalnych warunkach ruchu oraz
 - $\Delta h_t = 135$ mm i $a_n = 0,88 m/s^2$ w drodze wyjątku,
- dla natężenia przewozów $q \approx 7,3 m \ln \frac{\text{ton}}{\text{rok}}$ dla ruchu towarowego z naciskami na oś 200 kN i prędkością $v_t = 100$ km/h, przyjmuje się odpowiednio:
 - $\Delta h_t = 70$ mm i $a_p = 0,46 m/s^2$ w normalnych warunkach ruchu oraz
 - $\Delta h_t = 105$ mm i $a_p = 0,69 m/s^2$ w drodze wyjątku,
- dla natężenia przewozów $q \approx 3,7 m \ln \frac{\text{ton}}{\text{rok}}$, dla ruchu towarowego z naciskami na oś 200 kN i prędkością $v_t = 120$ km/h, wyłączając wagony wózkowe, przyjmuje się:
 - $\Delta h_t = 110$ mm i $a_p = 0,72 m/s^2$ w normalnych warunkach ruchu.

Z przedstawionego porównania można wywnioskować, że największe zarządy kolejowe w Europie, tj. SNCF oraz DB, dobierały zasadniczo wartość maksymalnego nie zrównoważonego przyspieszenia dośrodkowego wynikającego z nadmiaru przechyłki opierając się na podobnych założeniach i dochodząc do zbliżonych wartości liczbowych. Wydaje się więc, że przyjęcie wartości wynoszącej $a_p = 0,60 m/s^2$ jest reprezentatywne i uzasadnione. Zwiększanie wartości a_p na PKP wydaje się być niewskazane ze względu na wysoce zróżnicowany ruch pociągów na liniach magistralnych i pierwszorządowych, jak też ze względu na określone trudności w utrzymaniu nawierzchni na tych liniach. Okazuje się jednak, że nie jest to jeszcze wartość, którą by można uznać jako ostateczną do analiz skrajniowych. Źródła literaturowe [1, 10] podkreślają zgodnie, że ograniczenie przez zarządy dopuszczalnych wartości nie zrównoważonego przyspieszenia a_p jest wynikiem tego, że w torze podczas eksploatacji nie-

równości poprzeczne wywołują dodatkowe przyspieszenia około $0,3 \text{ m/s}^2$. W wyniku dodawania się drgań wywołanych nierównościami toru stwierdzono duże różnice pomiędzy przyspieszeniami założonymi teoretycznie a_{tr} i przyspieszeniami zmierzonymi a_p . Z dotychczasowej praktyki pomiarowej wynika, że można przyjąć następującą zależność:

$$a_{POM} = 1,5 \cdot a_{tr} + 0,15 \quad (4)$$

Przyjmując $a_{tr} = 0,6 \text{ m/s}^2$ i podstawiając do wzoru (4) otrzymuje się wartość przyspieszenia pomierzonego $a_{POM} = 1,05 \text{ m/s}^2$.

Z danych literaturowych zawartych w [10] wynika, że na PKP (stacja Strażów, 1979 rok) odnotowano kilka wjazdów lokomotyw i wagonów z prędkością 80 km/h na tor zwrrotny rozjazdu o promieniu $R = 300 \text{ m}$. W przypadku tym, w którym nie doszło do wykolejenia wartość nie zrównoważonego przyspieszenia wyniosła $1,65 \text{ m/s}^2$. W literaturze zagranicznej można spotkać opisy badań, w których wartości przyspieszeń mas usprężynowanych przekroczyły $3 \div 4 \text{ m/s}^2$ [4]. Podając jednak takie ekstremalne wartości przyspieszeń warto podkreślić, że podstawą warunków projektowania pojazdów szynowych, jak również określenia i utrzymania nawierzchni są nie tylko kryteria bezpieczeństwa ruchu, ale znacznie ostrzejsze od nich kryteria spokojności jazdy. Biorąc pod uwagę kryteria komfortu jazdy przyjęto, przy ustalaniu dopuszczalnego niezrównoważonego przyspieszenia Paryż–Lyon, przeznaczonej do prędkości 300 km/h , wartość niezrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego wynoszącą $0,07 \cdot g$, tj. ok. $0,68 \text{ m/s}^2$, natomiast wyjątkowo $0,125 \cdot g = 1,22 \text{ m/s}^2$. Na liniach klasycznych we Francji dopuszcza się wartość całkowitego niezrównoważonego przyspieszenia poprzecznego wynoszącą $0,15 \cdot g \approx 1,47 \text{ m/s}^2$. To samo kryterium zastosowano również na kolejach japońskich, chociaż według [6] przyspieszenie wynoszące $0,09 \cdot g \approx 0,88 \text{ m/s}^2$ zostało uznane jako niewygodne przez pięciu spośród 100 pasażerów uczestniczących w badaniach. Można więc przyjąć, że wartości dopuszczalnych przyspieszeń, które można przyjąć do obliczeń skrajni wynoszą:

- $0,9 \text{ m/s}^2$ – ta wartość przyspieszenia wynika z analiz przepisów krajowych,
- $0,15 \cdot g = 1,47 \text{ m/s}^2$ – ta wartość przyspieszenia wynika z analiz przepisów zagranicznych.

3. Parametry sztywności prowadzenia zestawu kołowego

Po ustaleniu danych wyjściowych w postaci przyspieszeń można przystąpić do określenia sztywności poprzecznej usprężynowania wagonów w stanie próżnym oraz w stanie ładownym. Przykładowo wykonano to dla wagonu towarowego czteroosiowego, na wózkach standardowych (Y25Lsd lub Y25Lsd1), przystosowanych do nacisku $22,5 \text{ t/oś}$ oraz prędkości 100 km/h , przy uwzględnieniu danych konstrukcyjnych zawartych w tabeli 2.

Sztywność sprężyny zewnętrznej oraz wewnętrznej została ustalona z następujących wzorów:

$$k_z = \frac{G \cdot d_z^4}{8 \cdot z_{cz} \cdot d_z^4} \quad \text{oraz} \quad k_w = \frac{G \cdot d_w^4}{8 \cdot z_{cw} \cdot d_w^4} \quad (5)$$

gdzie: G – moduł sprężystości poprzecznej (do niniejszych obliczeń przyjęto 78480 N/mm^2).

Sztywność poprzeczna sprężyny zewnętrznej oraz sprężyny wewnętrznej została ustalona z następujących zależności:

$$k_{yz} = \frac{P_{iz}}{2 \left(1 + \frac{P_{iz}}{\beta} \right) \cdot \text{tg} \frac{q \cdot H}{2} - H} \quad \text{lub} \quad (6)$$

$$k_{yw} = \frac{P_{iw}}{2 \left(1 + \frac{P_{iw}}{\beta} \right) \cdot \text{tg} \frac{q \cdot H}{2} - H} \quad (6)$$

gdzie:

$$q = \sqrt{\frac{P_{iz}}{\alpha} \left(1 + \frac{P_{iz}}{\beta} \right)} \quad \text{lub} \quad q = \sqrt{\frac{P_{iw}}{\alpha} \left(1 + \frac{P_{iw}}{\beta} \right)} \quad (7)$$

Współczynniki α i β wynoszą odpowiednio:

$$\alpha = 0,324 \cdot \frac{H \cdot d_z^4}{D_z^3} \cdot G \quad \text{oraz} \quad \beta = 0,0352 \cdot \frac{H \cdot d_w^4}{D_z} \cdot G \quad (8)$$

$$\alpha = 0,324 \cdot \frac{H \cdot d_w^4}{D_w^3} \cdot G \quad \text{oraz} \quad \beta = 0,0352 \cdot \frac{H \cdot d_w^4}{D_w} \cdot G \quad (9)$$

Powyższe zależności zwane wzorami Haringxa [7] posłużyły do obliczenia sztywności poprzecznej sprężyn.

Zestawienie danych konstrukcyjnych wagonów czteroosiowych, na wózkach standardowych typu Y25Lsd (Y25Lsd1) przystosowanych do nacisku 22,5 tony/oś i prędkości $v = 100$ km/h

Tabela 2

L.p.	Oznaczenie	Jednostki	Wartość	Uwagi
1.	Masa wagonu próżnego	kg	20 000	
2.	Masa wagonu ładownego	kg	90 000	
3.	Masa nieusprężynowana wagonu, tj. czterech omażnicowanych zestawów kołowych	kg	$\approx 5651 + 5851$	niniejszy zakres masowy został ustalony w zależności od typu zestawu kołowego
4.	Dane sprężyny zewnętrznej			
	Średnica podziałowa D_Z	mm	$163^{+2}_{-1,5}$	
	Średnica drutu d_Z	mm	31	
	Liczba zwojów czynnych Z_{ZC}	-	4,2	
	Całkowita liczba zwojów Z_Z	-	5,7	
	Wysokość swobodna H_Z	mm	260	
	Wysokość w stanie próżnym pod obciążeniem $P_{1Z} = 880$ daN - H_{Z1}	mm	242^{+1}_{-3}	obciążenie ekwiwalentne 20 000 kg
	Wysokość w stanie ładownym pod obciążeniem $P_{2Z} = 2747,5$ daN - H_{Z2}	mm	204,83	
	Wysokość w stanie ładownym i w stanie pracy dynamicznej z nadwyżką $\pm 30\% - H_{Z3}$	mm	$204,83 \pm 11,75$	
	Sztywność pionowa k_Z	N/mm	49,80	
	Sztywność poprzeczna k_{Y1Z} w stanie próżnym wagonu	N/mm	444,45	
	Sztywność poprzeczna k_{Y2Z} w stanie ładownym wagonu	N/mm	469,61	
	Sztywność poprzeczna k_{Y3Z} w stanie pracy dynamicznej w kierunku pionowym z nadwyżką $\pm 30\%$	daN/mm	472,42	
5.	Dane sprężyny wewnętrznej			
	Średnica podziałowa D_W	mm	$90^{+1,5}_{-2}$	
	Średnica drutu d_W	mm	24	
	Liczba zwojów czynnych Z_{CW}	-	5,9	
	Całkowita liczba zwojów Z_W	mm	7,4	
	Wysokość swobodna H_W	mm	234 ± 2	
	Wysokość H_{W1} w stanie ładownym pod obciążeniem $P_{2W} = 2421,01$ daN	mm	204,83	
	Sztywność pionowa k_{ZW}	daN/mm	82,17	
	Sztywność poprzeczna k_{Y1W} w stanie ładownym wagonu	daN/mm	366,56	
	Sztywność poprzeczna k_{Y2W} w stanie ładownym wagonu i w stanie pracy dynamicznej w kierunku pionowym z nadwyżką $\pm 30\%$	daN/mm	293,88	

4. Przesuw poprzeczny zestawu kołowego względem pojazdu

Korzystając z wcześniej wyprowadzonych wartości przyspieszeń poprzecznych oraz wartości sztywności poprzecznych zawartych w tabeli 1, wyliczonych w oparciu o zależności 5÷9, można przykładowo wyznaczyć przesuw poprzeczny zestawu kołowego względem ramy wózka czteroosiowego wagonu towarowego w poszczególnych stanach załadowania.

Poszczególne wartości jego przemieszczeń poprzecznych wynoszą odpowiednio:

1. Stan próżny wagonu-nie zrównoważone przyspieszenie wynoszące $0,9 \text{ m/s}^2$:

$$f_y = \frac{m \cdot a_{1y}}{16 \cdot k_{Y1Z}} = \frac{(20000 - 5651) \cdot 0,9}{16 \cdot 444,55} = 1,81 \text{ mm} \quad (10)$$

2. Stan próżny wagonu-nie zrównoważone przyspieszenie wynoszące $1,47 \text{ m/s}^2$:

$$f_y = \frac{m \cdot a_y}{16 \cdot k_{Y1Z}} = \frac{(20000 - 5651) \cdot 1,47}{16 \cdot 444,55} = 2,96 \text{ mm} \quad (11)$$

3. Stan ładowny wagonu – nie zrównoważone przyspieszenie wynoszące $0,9 \text{ m/s}^2$:

$$f_y = \frac{m \cdot a_y}{16(k_{Y2Z} + k_{Y1W})} = \frac{(90000 - 5651) \cdot 0,9}{16 \cdot (469,42 + 366,56)} = 5,67 \text{ mm} \quad (12)$$

4. Stan ładowny wagonu-nie zrównoważone przyspieszenie wynoszące $1,47 \text{ m/s}^2$:

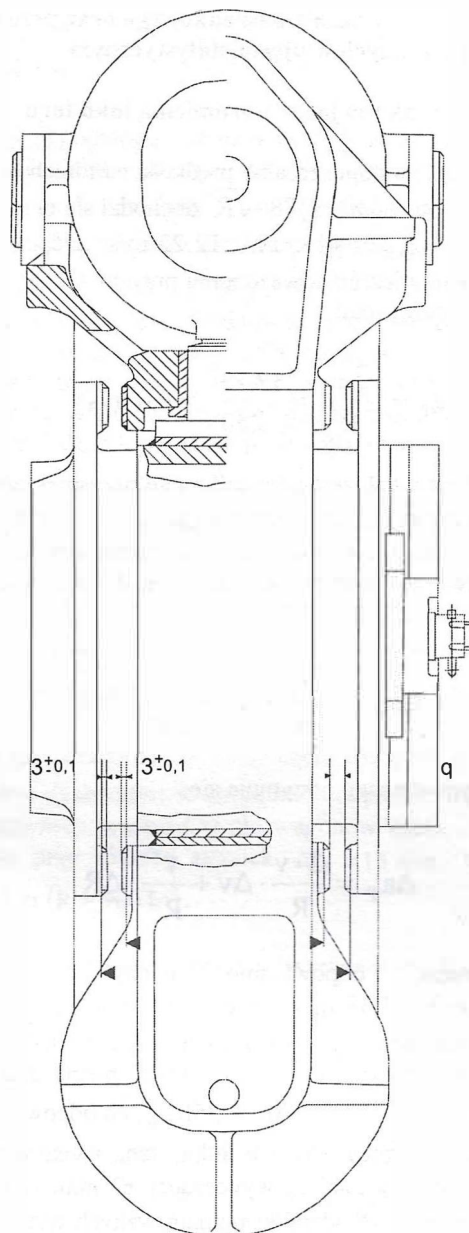
$$f_y = \frac{m \cdot a_y}{16 \cdot (k_{Y2Z} + k_{Y1W})} = \frac{(90000 - 5651) \cdot 1,47}{16 \cdot (469,42 + 366,56)} = 9,26 \text{ mm} \quad (13)$$

5. Stan ładowny wagonu z 30% pionową nadwyżką dynamiczną-nie zrównoważone przyspieszenie wynoszące $0,9 \text{ m/s}^2$:

$$f_y = \frac{m \cdot a_y}{16(k_{Y3Z} + k_{Y2W})} = \frac{(90000 - 5651) \cdot 0,9}{16 \cdot (472,42 + 293,88)} = 6,19 \text{ mm} \quad (14)$$

6. Stan ładowny wagonu wraz z 30 % pionową nadwyżką dynamiczną-nie zrównoważone przyspieszenie wynoszące $1,47 \text{ m/s}^2$:

$$f_y = \frac{m \cdot a_y}{16 \cdot (k_{Y3Z} + k_{Y2W})} = \frac{(90000 - 5651) \cdot 1,47}{16 \cdot (472,42 + 293,88)} = 10,11 \text{ mm} \quad (15)$$



Rys. 1. Luz poprzeczny pomiędzy korpusem maźnicy i korpusem prowadnicy w usprężynowaniu pierwszego stopnia wózków typu „Y25”

Z przedstawionego porównania wynika, że wymiar luzu poprzecznego w pierwszym stopniu usprężynowania pomiędzy korpusem maźnicy i korpusem prowadnicy, wynoszącym nominalnie 10 mm (rys. 1), może być wyczerpany dopiero wtedy, gdy przyjmie się przyspieszenie $1,47 \text{ m/s}^2$, a ponadto uwzględni się $\pm 30\%$ nadwyżkę dynamiczną w pionie. Jak się okazuje nawet przy tak przyjętej dość wysokiej wartości nie zrównoważonego przyspieszenia dośrodkowego wymiar luzu poprzecznego dla wagonów towarowych czteroosiowych, z wózkami typu „Y25”, przyjęty zgodnie z przepisami międzynarodowymi [12], nie może być wyczerpany. Jeśliby przyjąć wartość przyspieszenia dośrodkowego wskutek nadmiaru przechyłki, wyprowadzoną na podstawie przepisów krajowych [14] oraz danych literaturowych [10], wówczas dochodzi się do jeszcze większego zapasu niewyczerpalnego luzu poprzecznego.

5. Analiza przyspieszenia odśrodkowego oraz przemieszczeń poprzecznych w ujęciu statystycznym

5.1. Wpływ prędkości jazdy i promienia łuku toru

Przyjmując, że dopuszczalna prędkość na torach bezprzechyłkowych wynosi $v = 2,78 \cdot \sqrt{R}$ dochodzi się przy łuku $R = 250$ m do $v_{MAX} \approx 44$ km/h = 12,22 m/s. Odpowiada to maksymalnemu niezrównoważonemu przyspieszeniu odśrodkowemu wynoszącemu:

$$a_p = \frac{v_{MAX}^2}{R} = \frac{12,22^2}{250} \approx 0,6 \text{ m/s}^2$$

Wychodząc z założenia, że całkowite przyspieszenie wynosi $a = a_p + a_{DYN-POP}$, gdzie $a_{DYN-POP}$ – jest to dynamiczne przyspieszenie spowodowane nierównościami toru można przedstawić następujący rachunek dla przyspieszenia dośrodkowego:

$$\Delta a_p = \frac{\partial a_p}{\partial v} \cdot \Delta v + \frac{\partial a_p}{\partial R} \cdot \Delta R \quad (15)$$

W wyniku powyższego otrzymuje się:

$$\Delta a_p = \frac{2 \cdot v}{R} \cdot \Delta v + \frac{v^2}{R^2} \cdot \Delta R \quad (16)$$

Podstawiając odpowiednio odchyłki prędkości $\Delta v = \pm 5$ km/h = 1,38 m/s zgodnie z przyjętymi przepisami międzynarodowymi dotyczącymi błędów trakcyjnych podczas wykonywania prób spokojności biegu oraz prób eksploatacyjnych [10] oraz $\Delta R = 250_{-10}^{+10}$, co odpowiadałoby dopuszczalnej różnicy strzałek łuku, tzn. rzeczywistej w stosunku do teoretycznej f_s wynoszącej ± 2 mm, otrzymuje się przy założeniu, że odchyłki rozpatrywanych wielkości są zmiennymi niezależnymi oraz ich rozkład jest zgodny z rozkładem normalnym następującą zależność, która jest wprowadzona w oparciu o opracowanie [5]:

$$a_{NSTAT} = a_N \pm \Delta a \quad (17)$$

$$\Delta a = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot v}{R}\right)^2 \cdot T_v^2 + \left(\frac{v^2}{R^2}\right)^2 \cdot T_R^2} \quad (18)$$

przy czym: $T_v = 2 \cdot \Delta v$ oraz $T_R = 2 \cdot \Delta R$.

Po wstawieniu wartości liczbowych otrzymuje się statystyczną wartość przyspieszenia odśrodkowego wynoszącą:

$$\begin{aligned} \Delta a &= \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 12,22}{250}\right)^2 \cdot 2,76^2 + \left(\frac{12,22^2}{250^2}\right)^2 \cdot 20^2} = \\ &= \pm \frac{1}{2} \sqrt{0,0728 + 0,0022} = 0,136 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

Po wstawieniu wartości liczbowych do wzoru (17) otrzymuje się wartość statystyczną przyspieszenia odśrodkowego wynoszącą $a_{NSTAT} = 0,6 \pm 0,136 \text{ m/s}^2$. Trudniejsze jest określenie odchyłek przyspieszenia wynikającego z poprzecznych nierówności toru. Zagadnienie to wymaga bardziej szczegółowego omówienia.

5.2. Poprzeczne nierówności toru

Niezbędne dane do wyznaczenia wartości powyższej tolerancji zawiera praca [8]. Z przeprowadzonych badań wynika, że przy powszechnie przyjętym bezpośrednim pomiarze strzałek łuku przy podziale łuku na odcinki 10-metrowe nie ma całkowitej pewności ujawnienia rzeczywistych największych nierówności toru, które są istotne dla płynności i spokojności biegu pojazdów szynowych. Wykorzystane pomiary i porównania ich wyników osiągniętych za pomocą korektora krzywizn, dającego ciągły zapis strzałek oraz zwykłego strzałkomierza świadczą, że bardzo często krótkie miejscowe krzywizny o mniejszym promieniu trafiają między punkty podziału łuku i nie zostają odwzorowane na sporządzonym później wykresie. Wynikające stąd różnice między odczytami przy jednym i drugim sposobie pomiaru są niekiedy bardzo duże. Sprawdzenie nierówności, po których mogą kursować pociągi z dużą prędkością powinno być wykonywane za pomocą korektora krzywizn, a wyniki tego sprawdzenia w postaci ciągłych wykresów strzałek poddawane analizie. Przy ustalaniu dopuszczalnych różnic strzałek łuku, metodą zapisu w ruchu ciągłym, powinno się rozpatrywać fragment krzywej przedstawiającej zmiany przyspieszeń bocznych pudła (rys. 2).

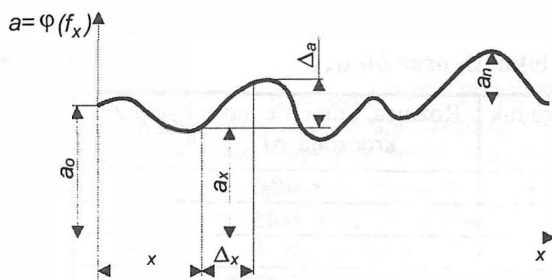
Przyspieszenie odśrodkowe w dowolnym punkcie łuku na osi o odciętej x , przy niezmiennej prędkości v [m/s] jest równe:

$$a_x = \frac{v^2}{R_x} = \frac{2 \cdot v^2}{\lambda^2} \cdot f_x \quad (20)$$

gdzie: λ – połowa długości cięciwy korektora (odpowiada połowie cięciwy pomiarowej S na rys. 8 [13]),

f_x – strzałka w dowolnym punkcie łuku o odciętej x .

Pomijając ruch wężykowy w łuku można założyć, że zmiany przyspieszenia a w czasie t wynikają wskutek zmian krzywizny.



Rys. 2. Fragment krzywej przedstawiającej zmiany przyspieszeń bocznych masy odsprężynowanej pojazdu

Ograniczeniem przyrostu przyspieszenia w czasie jest warunek:

$$\frac{\Delta a}{\Delta t} = y_{\max} \quad (21)$$

gdzie:

Δa – przyrost przyspieszenia,

Δt – przyrost czasu.

Zakładając, że czas potrzebny do przebycia drogi na odcinku $\Delta x = v \cdot t$ oraz przy założeniu $\Delta x = \frac{S}{2} = \lambda$, na którym występuje różnica strzałek Δf_s można napisać następującą zależność:

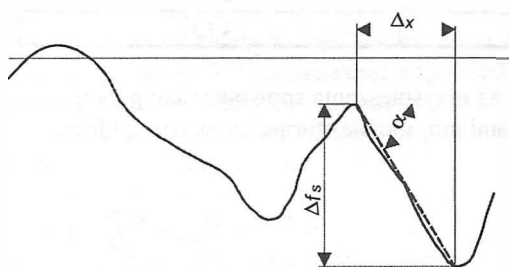
$$\psi = \frac{2 \cdot v^3}{\lambda^2} \cdot \frac{\Delta f_s}{\Delta x} = \frac{2 \cdot v^3}{\lambda^2} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (22)$$

gdzie:

α – kąt zawarty pomiędzy osią odniesienia a fragmentem wykresu strzałek zastąpionych prostą (rys. 3).

Przyjmując, że przyrost przyspieszenia nie powinien przekroczyć określonej wartości, oblicza się wielkość tangensów kąta α . Ze wzoru (22) otrzymuje się następującą zależność:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\psi \cdot \lambda^2}{2 \cdot v^2} \quad (23)$$



Rys. 3. Fragment wykresu strzałek zastąpiony prostą $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta f_s}{\Delta x}$

W praktyce łatwiejszą formą przedstawiania tego warunku jest operowanie wielkościami wyrażonymi w jednostkach technicznych, tj. stosunkiem strzałki w milimetrach do długości Δx w metrach oraz prędkością w km/h v , co dla $\lambda = 5$ m prowadzi do następującej zależności:

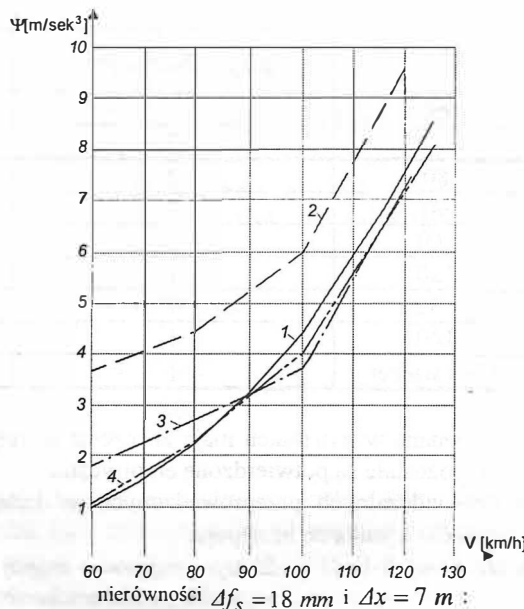
$$\frac{\Delta f_s \text{ mm}}{\Delta x \text{ m}} = \frac{1000 \cdot 3,6^3 \cdot 5^2}{2 \cdot v^3} \approx \frac{583200 \cdot \psi}{v^3} [\text{‰}] \quad (24)$$

W pracy [8] opierając się na danych doświadczalnych proponuje się, aby przyjąć wartość graniczną wynoszącą $\psi = 0,7 \text{ m/s}^3$. Przepisy [14] rozgraniczają dopuszczalny przyrost przyspieszenia na dwa przypadki, tzn. przy projektowaniu $\psi = 0,3 \text{ m/s}^3$ oraz w eksploatacji $\psi = 0,7 \text{ m/s}^3$. Tę ostatnią wartość należy traktować jako dopuszczalną w eksploatacji, a jednocześnie kwalifikującą łuk do regulacji. Maksymalną dopuszczalną zmianę przyspieszenia próbowało określić też wielu badaczy, podając wartości przyrostu przyspieszenia, które jest podane w poniższej tabeli 3.

Nazwisko badacza	Schort	Schwanter	Kozijczuk
Wartość masymalnego przyrostu przyspieszenia	0,3 m/s ³	0,5 m/s ³	0,56 m/s ³
Nazwisko badacza	Szarojko	Jerszkow	Kal
Wartość masymalnego przyrostu przyspieszenia	0,6 m/s ³	0,8 m/s ³	1,0 m/s ³

Z praktyki wiadomo, że osiągnięcie wartości $\psi = 1,0 \text{ m/s}^3$ powoduje dyskomfort w samopoczuciu pasażerów. Na rys. 4 przedstawiono przebieg ψ dla wagonów osobowych i lokomotywy przy różnicy strzałek $\Delta f_s = 18 \text{ mm}$, na długości $\Delta x = 7 \text{ m}$ ($R = 980 \text{ m}$).

Rys. 4. Wykres szybkości przyrostu przyspieszenia w łuku $R = 980 \text{ m}$ przy



1 – wartość teoretyczna, 2 – wartość pomierzona na lokomotywie EU06, 3 – wartość pomierzona na wagonie osobowym 7A na wózkach typowych, 4 – wartość pomierzona na wagonie 7A na wózkach COB-M3

Na podstawie wzoru (24) oraz zależności dla zmian przyspieszenia $\psi = 0,7 \text{ m/s}^3$ oraz $\psi = 1,0 \text{ m/s}^3$ w opracowaniu [8] podano tabelę, w której przedstawiono dopuszczalną różnicę strzałek łuku w eksploatacji.

Zestawienie dopuszczalnych różnic strzałek łuku Δf_S oraz $\Delta f_{S\text{ MAX}}$

Tabela 4

Prędkość v [km/h]	Różnica dopuszczalna w eksploatacji, kwalifikująca łuk do regulacji $\Delta f_{S\text{ MAX}}$ [‰]	Różnica, która nie może być prze- kroczona $\Delta f_{S\text{ MAX}}$ [‰]
100	0,40	0,60
110	0,30	0,45
120	0,25	0,35
130	0,25 (0,20)	0,35 (0,25)
140	0,25 (0,15)	0,35 (0,20)
150 i więcej	0,25 (0,10)	0,35 (0,15)

Wartości podane w nawiasach mają znaczenie jedynie teoretyczne, natomiast pozostałe są możliwe do osiągnięcia w praktyce. Przy odbiorze prac remontowych można stosować wartości zmniejszone o połowę podane w kolumnie 2. Idąc za źródłem [8] osiągnięcie mniejszej różnicy sąsiednich strzałek niż 3 mm między punktami oddalonymi od siebie o 10 m jest trudne i pracochłonne i należałoby realnie przyjąć jako kres możliwej regulacji w planie wartości odpowiadające prędkości 120 km/h. Wynika stąd wniosek, że dla większych prędkości pociągów należałoby wprowadzić tabor, który przy takich samych nierównościach toru nie będzie oznaczał się gorszymi własnościami biegowymi. Oprócz ustalenia dopuszczalnych różnic pomiędzy sąsied-

nimi strzałkami trzeba określić różnice Δf pomiędzy strzałką teoretyczną f_{NOM} odpowiadającą danemu promieniowi łuku R , a największą strzałką, jaka na nim pozostała niezależnie od tego, gdzie się ona znajduje. Przy wcześniejszych analizach członu $\frac{a \cdot n - n^2}{R}$ przyjęto, że $\Delta f = \Delta f_S$, czyli

odchyłki sąsiednich strzałek łuku są równe odchyłkom pomiędzy strzałką teoretyczną a dopuszczalną, niezależnie od tego gdzie się ona znajduje [14]. Opracowanie [8] przytacza doświadczenia w tym zakresie wielu zarządów kolei, jak również doświadczenia krajowe (tabela 5).

Wartości dopuszczalnych różnic między strzałką łuku największą i teoretyczną Δf_{10} mierzonymi na cięciwie 10 m

Tabela 5

Prędkość w [km/h]	Dopuszczalna różnica między strzałką największą i teoretyczną Δf_{10} [mm]		
	przy odbiorze prac	w eksploatacji, kwalifikująca	maksymalna
60	4	9	13
70	3	6	10
80	2	5	8
90	2	4	6
100	2	3	5
120	1	3 (2)	4 (3)
130	1	3 (2)	4 (3)
140	1	3 (2)	4 (3)
150 i więcej	1	3 (1)	4 (3)

Wartości podane w nawiasach mają znaczenie teoretyczne, natomiast pozostałe są potwierdzone empirycznie.

Zjazd doświadczalnych przeprowadzonych na kolejach różnych zarządów wynika co następuje:

- na torze nowym bądź poddanym naprawie ciągłej dopuszczalne przyspieszenia wywołane nierównościami na łukach i krzywych przejściowych wynoszą $a_{\text{DYN-POP}} = 0,1 \text{ m/s}^2$,
- na torze eksploatowanym $a_{\text{DYN-POP}}$ mogą wzrosnąć wskutek odkształceń toru do $0,2 \text{ m/s}^2$,
- na torze z maksymalnymi różnicami Δf_{10} przyspieszenia $a_{\text{DYN-POP}}$ nie przekraczają $0,3 \text{ m/s}^2$.

Wzór na przyspieszenia spowodowane poprzecznymi nierównościami toru można sformułować następująco:

$$a_{\text{DYN-POP}} = \frac{v^2}{R_{\text{min}}} - \frac{v^2}{R} = \frac{2 \cdot v^2}{\lambda^2} \cdot f_{\text{max}} - \frac{2 \cdot v^2}{\lambda^2} \cdot f = \frac{2 \cdot v^2}{\lambda^2} \cdot \Delta f_{10} \quad (25)$$

Analizując dane otrzymane na drodze empirycznej oraz wyższy wzór (25) można przyjąć:

$$a_{\text{DYN-POP}} = 0,2 \pm 0,1 \text{ m/s}^2 \quad (26)$$

5.3. Koncepcja rozkładu losowego

Zależność (25) dla $a_{DYN-POP}$ stwarza przesłanki do sformułowania rozkładu losowego w uproszczonej formie. Można postawić tezę, że odchyłki dopuszczalnego przyspieszenia mają rozkład normalny. Bardziej dokładne wyniki otrzymuje się jeśli przyjmie się, że wielkości wchodzące w skład zależności (25) posiadają rozkład normalny. Po zróżniczkowaniu wzoru (25) i uwzględnieniu że cięciwa $S = 2\lambda$ otrzymuje się następującą zależność:

$$\pm \Delta a_{DYN-POP} = \frac{\partial a_{DYN-POP}}{\partial v} \cdot \Delta v + \frac{\partial a_{DYN-POP}}{\partial S} \cdot \Delta S + \frac{\partial a}{\partial \Delta f_{10}} \cdot \Delta f_{10} \quad (27)$$

skąd wynika:

$$\pm \Delta a_{DYN-POP} = \frac{16 \cdot v}{S^2} \cdot \Delta f_{10} \cdot \Delta v + \frac{16 \cdot v^2}{S^3} \cdot \Delta f_{10} \cdot \Delta S + \frac{8 \cdot v^2}{S^2} \cdot \Delta(\Delta f_{10}) \quad (28)$$

Przyjmując w zależności (28) odchyłki $v = \pm 5 \text{ km/h} = \pm 1,38 \text{ m/s}$ oraz $\lambda = \pm 0,001 \text{ m}$ (dokładność zmierzonej cięciwy wynoszącej 5 m) jak również dokładność pomiaru strzałki łuku na poziomie $\Delta(\Delta f_{10}) = \pm 0,004 \text{ m}$ oraz wcześniej wyznaczone przy analizie $v = 44 \text{ km/h} = 12,22 \text{ m/s}$, $S = 10 \text{ m}$ oraz $\Delta f = \pm 0,009 \text{ m}$ otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \pm \Delta a_{DYN-POP} &= \\ &= \pm \left(\frac{16 \cdot 12,22}{100} \cdot 0,009 \cdot 1,38 + \frac{16 \cdot 12,22^2}{1000} \cdot 0,009 \cdot 0,001 + \frac{8 \cdot 12,22^2}{100} \cdot 0,004 \right) = \\ &= \pm 0,07209 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (29)$$

$$a_{DYN-POP} = 0,107 \pm 0,07209 \text{ m/s}^2 \quad (30)$$

We wzorze (29) przyjęto, że tor mógł osiągnąć największą możliwą odchyłkę eksploatacyjną wynoszącą $\pm 0,009 \text{ m}$, natomiast dodatkowe odchyłki $\pm 0,004 \text{ m}$ mogą być osiągnięte zgodnie z tabelą 3. Dostosowując odpowiednio wzory na przyspieszenie odśrodkowe z zależności (2) można przyjąć, że jeśli nawet wyjściowa strzałka łuku różniła się od nominalnej odpowiadającej łukowi $R = 250 \text{ m}$ wynoszącej $0,050 \text{ m}$ (mierzona na cięciwie 10 m), to w stanie nominalnym wynosi ona $f_s = 0,050 \text{ m}$. Ponieważ w obliczeniach przyspieszenia spowodowanego nierównościami toru przyjęto, że nierówność już w torze istnieje (oczywiście z określonym prawdopodobieństwem) i wynosi ona $-\Delta f_{10} = 0,009 \text{ m}$, w związku z tym przeliczono przyspieszenie odśrodkowe w stanie nominalnym wynikające z faktycznego łuku wynoszącego:

$$R_R = R - \Delta R = 250 - 44,9955 = 205,0045 \text{ m} \approx 205 \text{ m}$$

Taki promień łuku R wynika z przyjęcia, że Δf podlega rozkładowi losowemu normalnemu. Można więc uznać, że prawdopodobieństwo wystąpienia łuku większego lub równego 205 metrów wynosi $p(R \geq 205 \text{ m}) \approx 0,980$. Otrzymany promień $R = 205 \text{ m}$ różni się niewiele w stosunku do wartości obliczonej z zależności (19) wg [9], tj. $R \approx 212 \text{ m}$ dla $f_s = f_{10} = 0,059 \text{ m}$, która odpowiada łukowi $R = 205 \text{ m}$ (wartości te różnią się od siebie o około 3,3 %). Ta różnica nie ma istotnego wpływu na dalszy tok obliczeń.

Przyspieszenie odśrodkowe na łuku $R = 205 \text{ m}$ wynosi:

$$a_p = \frac{v^2}{R} = \frac{12,22^2}{205} = 0,728 \text{ m/s}^2 \quad (31)$$

Ponieważ strzałka łuku może w tej konkretnej sytuacji przyjąć wartości wynoszące odpowiednio $\Delta f_{10} = 0,009_{-0,022}^{+0,004} \text{ m}$ odchyłki od tej wartości nominalnej wynoszą odpowiednio:

- odchyłka górna (dla $\Delta = +5 \text{ km/h} = 1,38 \text{ m/s}$ oraz zmniejszenie łuku o promieniu $R = 205 \text{ m}$ o $\Delta R = 14,363 \text{ m}$ wskutek wzrostu strzałki Δf_{10} o dodatkowe $0,004 \text{ m}$); wartość ΔR wyznaczono z zależności (21) wg [9] podstawiając strzałkę $f_s = f_{10} = 0,059 \text{ m}$, która odpowiada łukowi $R = 205 \text{ m}$

$$\begin{aligned} \Delta a_p &= \frac{2 \cdot v \cdot \Delta v}{R} + \frac{v^2}{R^2} \cdot \Delta R = \\ &= \frac{2 \cdot 12,22 \cdot 1,38}{205} + \frac{12,22^2}{205^2} \cdot 14,363 = 0,1645 + 0,0510 = \\ &= 0,2155 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (32)$$

- odchyłka dolna (dla $\Delta v = -5 \text{ km/h} = 1,38 \text{ m/s}$ oraz $\Delta R = 78,989 \text{ m}$ wskutek zmniejszenia strzałki łuku Δf_{10} o dodatkowe $0,022 \text{ mm}$); wartość ΔR wyznaczono z zależności (21) wg [9] podstawiając strzałkę $f_s = f_{10} = 0,059 \text{ m}$, który odpowiada łukowi $R = 205 \text{ m}$

$$\begin{aligned} \Delta a_p &= \frac{2 \cdot v \cdot \Delta v}{R} + \frac{v^2}{R} \cdot \Delta R = \\ &= \frac{2 \cdot 12,22 \cdot 1,38}{205} + \frac{12,22^2}{205^2} \cdot 78,989 = 0,1645 + 0,2806 = 0,4451 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (33)$$

Można również zauważyć, że wobec faktu dopuszczalnych strzałek łuku różniących się od wartości nominalnej dla łuku $R = 250 \text{ m}$ o $\pm 0,013 \text{ m}$, tzn. $0,050 \pm 0,013 \text{ m}$, co daje $R = 250 \pm 64,99 \approx 250 \pm 65 \text{ m}$, obliczony przypadek mieści się w zasadniczym polu tolerancji, gdyż:

$$\begin{aligned} R_{\text{MIN}} &= 205 - 14,363 = 190,637 \text{ m} \quad \text{oraz} \\ R_{\text{MAX}} &= 205 + 78,989 = 283,989 \text{ m} \end{aligned}$$

Zakładając, że odchyłki wszystkich składowych rozkładają się zgodnie z rozkładem normalnym oraz korzystając z zależności (24) wg [9] można zapisać zależność następującą:

$$M_{a_p} = \left(\frac{12,22^2}{205^2} \right) \cdot \left(\frac{14,363 - 78,989}{2} \right) = -0,1148 \text{ m/s}^2 \quad (34)$$

Tolerancja całkowita niezrównoważonego przyspieszenia przy wykorzystaniu zależności (25) wg [9] wynosi wobec powyższego:

$$T_{astat} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 12,22}{205} \right)^2 (2,76)^2 + \left(\frac{12,22}{205} \right)^4 (93,352)^2} = 0,4672 \text{ m/s}^2 \quad (35)$$

$$\delta_{STAT} = \pm \frac{T_{astat}}{2} = \pm \frac{0,4672}{2} = 0,2336 \text{ m/s}^2 \quad (36)$$

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki można napisać zależność następującą:

$$a_{PSTAT} = a_{PNOM} + M_{a_p} \pm \delta_{STAT} = 0,728 - 0,1148 \pm 0,2336 = 0,6132 \pm 0,2336 \text{ m/s}^2 \quad (37)$$

Sumaryczne przyspieszenie w kierunku poprzecznym wynosi odpowiednio:

$$a = a_p + a_{DYN-POP} \quad (38)$$

Zależność tę biorąc pod uwagę otrzymane odchyłki poszczególnych wartości przyspieszeń można zapisać następująco:

$$a = 0,728_{-0,4451}^{+0,2155} + 0,107_{-0,07209}^{+0,07209} = 0,835_{-0,51719}^{+0,28759} \text{ m/s}^2 \quad (39)$$

Z algebraicznego dodawania odchyłek wynika, że maksymalne przyspieszenie w kierunku poprzecznym wynosi: $a_{MAX} = 1,1225 \text{ m/s}^2$ oraz $a_{MIN} = 0,3178 \text{ m/s}^2$.

Zakładając, że odchyłki wszystkich składowych rozkładają się zgodnie z rozkładem normalnym oraz korzystając z zależności (24) oraz (25) wg [9] można zapisać następującą zależność:

$$T_{astat} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 12,22^2}{205} \right) \cdot (2,76)^2 + \left(\frac{12,22^4}{205^2} \right) \cdot (93,352)^2 + \left(\frac{161,222}{100} \cdot 0,009 \right)^2 \cdot (2,76)^2 + \left(\frac{161,222}{1000} \cdot 0,009 \right)^2 \cdot (12,22)^2 + \left(\frac{8 \cdot 12,22^2}{100} \right)^2 \cdot (0,009)^2} \quad (40)$$

$$T_{astat} = 0,4792 \text{ m/s}^2$$

a zatem:

$$\delta_{STAT} = \pm \frac{T_{astat}}{2} = \pm 0,2396 \text{ m/s}^2 \quad (41)$$

Przyjmując wyraz M_{a_p} wg zależności (34) oraz powyższe wyniki można zapisać:

$$a_{STAT} = 0,728 + 0,107 - 0,1198 \pm 0,2396 = 0,7202 \pm 0,2396 \text{ m/s}^2 \quad (42)$$

Poprawność otrzymanego wyniku sprawdzono obliczając średnią z wcześniej wyznaczonych przyspieszeń, która wynosi: $\frac{a_{max} + a_{min}}{2} = \frac{1,1225 + 0,3178}{2} = 0,72015 \text{ m/s}^2$. Wyniki są więc zbliżone, co świadczy o prawidłowości dokonanych przeliczeń.

Analiza rozkładu statystycznego odchyłek wykazuje, że:

$$a_{STAT-MAX} = 0,959 \text{ m/s}^2$$

$$a_{STAT-MIN} = 0,4806 \text{ m/s}^2$$

Wynika z tego, że można przyjąć z trzysigmowym przedziałem ufności (prawdopodobieństwo 0,997), że wartość przyspieszenia maksymalnego w kierunku poprzecznym wynosi $a_{STAT-MAX} \leq 0,959 \text{ m/s}^2$. Jest to przyspieszenie w kierunku poprzecznym, które wynika z maksymalnej odchyłki teoretycznej wynoszącej 0,009 m oraz dodatkowej odchyłki 0,004 m wynikającej z dopuszczalnej prędkości na łukach wynoszącej max 60 km/h (tabela 3).

W celu porównania wyników związanych z różnicą promieni łuku $R = 205 \text{ m}$ oraz $R = 212 \text{ m}$ (odpowiednio wzory (19) i (20) oraz (21) wg [9]).

Przyspieszenie odśrodkowe na łuku $R = 205 \text{ m}$ wynosi:

$$a_p = \frac{v^2}{R} = \frac{12,22^2}{212} = 0,704 \text{ m/s}^2 \quad (43)$$

- odchyłka górna (dla $\Delta v = +5 \text{ km/h} = 1,38 \text{ m/s}$ oraz zmniejszenie łuku o promieniu $R = 212 \text{ m}$ o $\Delta R = 13,55 \text{ m}$ wskutek wzrostu strzałki o dodatkowe 0,004 m; wartość ΔR wyznaczono z zależności (19) wg [9] podstawiając strzałkę $f_s = f_{10} = 0,059 \text{ m}$, która odpowiada łukowi $R = 212 \text{ m}$

$$\Delta a_p = \frac{2v \cdot \Delta v}{R} + \frac{v^2}{R^2} \cdot \Delta R = \frac{2 \cdot 12,22 \cdot 1,38}{212} + \frac{12,22^2}{212} \cdot 16,655 = 0,2144 \text{ m/s}^2 \quad (44)$$

- odchyłka dolna (dla $\Delta v = -5 \text{ km/h} = 1,38 \text{ m/s}$ oraz zwiększenie łuku o promieniu $R = 212 \text{ m}$ o $\Delta R = 125,85 \text{ m}$ wskutek zmniejszenia strzałki o dodatkowe 0,022 m, wartość ΔR wyznaczono z zależności (19) wg [9] podstawiając strzałkę $f_s = f_{10} = 0,059 \text{ m}$, która odpowiada łukowi $R = 212 \text{ m}$

$$\Delta a_p = \frac{2 \cdot v \cdot \Delta v}{R} + \frac{v^2}{R} \cdot \Delta R = \frac{2 \cdot 12,22 \cdot 1,38}{212} + \frac{12,22^2}{212^2} \cdot 125,89 = 0,5773 \text{ m/s}^2 \quad (45)$$

Tak więc wartość niezrównoważonego przyspieszenia wynosi $a_p = 0,708^{+0,2144}_{-0,5773}$.

Sumaryczne przyspieszenie w kierunku poprzecznym wynosi odpowiednio:

$$a = 0,704^{+0,2144}_{-0,5773} + 0,107^{+0,07209}_{-0,07209} = 0,811^{+0,28649}_{-0,64939} \text{ m/s}^2 \quad (46)$$

Z algebraicznego dodawania odchyłek wynika, że maksymalne przyspieszenie w kierunku poprzecznym wynosi: $a_{\max} = 1,0974 \text{ m/s}^2$ oraz $a_{\min} = 0,1616 \text{ m/s}^2$.

Zakładając, że odchyłki wszystkich składowych rozkładają się zgodnie z rozkładem normalnym oraz korzystając z zależności (40) można zapisać co następuje:

$$M_{a_p} = \left(\frac{12,22}{212} \right)^2 \left(\frac{13,55 - 125,85}{2} \right) = -0,1865 \text{ m/s}^2 \quad (47)$$

$$T_{\text{stat}} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 12,22}{212} \right)^2 (2,76)^2 + \left(\frac{12,22}{212} \right)^4 (142,54)^2 + \left(\frac{16 \cdot 12,22}{100} \cdot 0,009 \right)^2 (2,76)^2 + \left(\frac{16 \cdot 12,22^2}{1000} \cdot 0,009 \right)^2 (0,002)^2 + \left(\frac{8 \cdot 12,22^2}{100} \right)^2 (0,008)^2} \quad (48)$$

$$T_{\text{astat}} = 0,5785 \text{ m/s}^2$$

$$\delta_{\text{STAT}} = \pm \frac{T_{\text{astat}}}{2} = \pm \frac{0,5785}{2} = \pm 0,2892 \text{ m/s}^2 \quad (49)$$

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki można napisać:

$$a_{\text{STAT}} = 0,708 + 0,107 - 0,1865 \pm 0,2892 = 0,6285 \pm 0,2892 \text{ m/s}^2 \quad (50)$$

Analiza rozkładu statystycznego odchyłek pokazuje, że:

$$a_{\text{STAT-MAX}} = 0,9177 \text{ m/s}^2$$

$$a_{\text{STAT-MIN}} = 0,3393 \text{ m/s}^2$$

Z powyższych przeliczeń wynika, że przedziały przyspieszeń poprzecznych, które zostały wyznaczone odpowiednio z zastosowania promienia $R = 205 \text{ m}$ oraz z promienia $R = 212 \text{ m}$ są bardzo zbliżone. Jako bardziej miarodajny przyjęto do dalszych rozważań przedział przyspieszeń wynikający z zastosowania promienia łuku $R = 205 \text{ m}$, gdyż daje on większą wartość przyspieszenia maksymalnego, co zwiększa zapas bezpieczeństwa.

5.4. Przemieszczenia poprzeczne

Poszczególne wartości przemieszczeń poprzecznych wagonu w stanie próżnym i ładownym wynoszą odpowiednio (korzystając z zależności (10) do (16)):

1. Stan próżny wagonu-niezrównoważone przyspieszenie wynoszące $0,959 \text{ m/s}^2$:

$$f_y = \frac{m \cdot a_{1\text{YSTAT}}}{16 \cdot k_{Y1Z}} = \frac{(20000 - 5651) \cdot 0,959}{16 \cdot 444,55} = 1,934 \text{ mm} \quad (51)$$

2. Stan ładowny wagonu-niezrównoważone przyspieszenie wynoszące $0,959 \text{ m/s}^2$:

$$f_y = \frac{m \cdot a_{1\text{YSTAT}}}{16 \cdot (k_{Y2Z} + k_{Y1W})} = \frac{(90000 - 5651) \cdot 0,959}{16 \cdot (469,69 + 366,56)} = 6,04 \text{ mm} \quad (52)$$

3. Stan ładowny wagonu z 30% pionową nadwyżką dynamiczną niezrównoważone przyspieszenie wynoszące $0,959 \text{ m/s}^2$:

$$f_y = \frac{m \cdot a_{1\text{YSTAT}}}{16 \cdot (k_{Y3Z} + k_{Y2W})} = \frac{(90000 - 5651) \cdot 0,959}{16 \cdot (472,42 + 293,88)} = 6,59 \text{ mm} \quad (53)$$

Przyjmując przyspieszenie średnie w stanie próżnym, wynoszące $a_{\text{YSTAT}} = 0,7202 \pm 0,2396 \text{ m/s}^2$, można powyższy rachunek przedstawić następująco:

$$f_{\text{YSTAT}} = \frac{m \cdot a_{\text{YSTAT}}}{16 \cdot k_{Y1Z}} = \frac{(20000 - 5651) \cdot (0,7202 \pm 0,2396)}{16 \cdot 444,55} = 1,453 \pm 0,483 \text{ mm} \quad (54)$$

Przyjmując przyspieszenie średnie w stanie ładownym wynoszące $a_{\text{YSTAT}} = 0,7202 \pm 0,2396 \text{ m/s}^2$, przemieszczenie poprzeczne wynosi odpowiednio:

$$f_{\text{YSTAT}} = \frac{m \cdot a_{\text{YSTAT}}}{16(k_{Y2Z} + k_{Y1W})} = \frac{(90000 - 5651)(0,7202 \pm 0,2396)}{16 \cdot (469,69 + 366,56)} = 4,54 \pm 1,51 \text{ mm} \quad (55)$$

Przyjmując przyspieszenie średnie wynoszące $a_{\text{YSTAT}} = 0,7202 \pm 0,2396 \text{ m/s}^2$ w stanie ładownym z 30% pionową nadwyżką dynamiczną, przemieszczenie poprzeczne wynosi odpowiednio:

$$f_{YSTAT} = \frac{m \cdot a_{STAT}}{16 \cdot (k_{Y3Z} + k_{Y2W})} = \frac{(90000 - 5651)(0,7202 \pm 0,2396)}{16 \cdot (472,42 + 293,88)} = 4,95 \pm 1,64 \text{ mm} \quad (56)$$

Można więc sformułować wniosek, że dla wagonów towarowych wyposażonych w wózki dwuosiove typu „Y25” przystosowane do obciążenia 22,5 tony na oś, zakładając trzysigimowy przedział ufności, można przyjąć wartości ugięć poprzecznych usprężynowania zamieszczone w tabeli 6.

Zestawienie przemieszczeń poprzecznych wagonu czterosioowego wyposażonego w dwuosiove wózki typu „Y25” przystosowane do obciążenia 22,5 tony na oś

Tabela 6

	Przemieszczenie poprzeczne usprężynowania w stanie próżnym	Przemieszczenie poprzeczne usprężynowania w stanie ładowym	Przemieszczenie poprzeczne usprężynowania z 30% nadwyżką dynamiczną
f_{YSTAT}	1,453±0,483 mm	4,54±1,51 mm	4,95±1,64 mm
$f_{YSTATMAX}$	1,9364 mm	6,05 mm	6,59 mm
$f_{YSTATMIN}$	0,97 mm	3,03 mm	3,31 mm
$f_{YMAX} (a = 1,1225 \text{ m/s}^2)$	2,264 mm	7,07 mm	7,72 mm
$f_{YMIN} (a = 0,3178 \text{ m/s}^2)$	0,6411 mm	2,00 mm	2,18 mm

Wartości ujęte w tabeli wskazują, że przesuw poprzeczny $q = 10 \text{ mm}$ (przyjęty jako wymiar nominalny w wózkach typu „Y25”) oraz $11,5 \text{ mm}$ (uwzględniający $1,5 \text{ mm}$ zużycie płytek ciernych), zalecany do obliczeń skrajni kinematycznej zgodnie z [12], w tym wypadku nie jest przekroczony. Można wyciągnąć stąd wniosek, że twórcy przepisów międzynarodowych i krajowych wyszli z założenia najniekorzystniejszego przemieszczenia jakim było maksymalne wyczerpanie luzu poprzecznego, nie wchodząc w to, czy jest to realne czy nie. Najbardziej nieprawdopodobne wydaje się wyczerpanie luzu w stanie próżnym wagonu, co może mieć pewne konsekwencje jeśli chodzi o kształtowanie części górnych wagonu wyposażonego w wózki rodziny „Y25”. Analogiczne obliczenia można wykonać dla wagonów towarowych, czterosioowych, wyposażonych w inne typy wózków dopuszczonych do ruchu międzynarodowego przez obowiązujący dokument [13]. Powyższe przeliczenia można uzupełnić wnioskami, które nasuwają się z dotychczasowych analiz. Z prze-

liczeń promienia R , przy analizie wyrazu $\frac{a \cdot n - n^2 + \frac{p^2}{4}}{R}$, jak

również z przemieszczenia poprzecznego q można sformułować wniosek, że ujemna odchyłka strzałki łuku $\Delta f_s = \Delta f_{10}$ od tzw. strzałki nominalnej $f_s = f_{10}$ odpowiadającej łukowi $R = 250 \text{ m}$ działa na korzyść zwiększenia skrajni kinematycznej. Mogłoby to być spożytkowane przez konstruktorów pojazdów szynowych, zwłaszcza odnośnie danych zawartych w tabeli 1 wg [9] i przedstawionych propozycji odchyłek eksploatacyjnych. Po analizie wyrazu q można postawić wniosek, że z wybranych odchyłek eksploatacyjnych wg tabeli 1 opracowania [13] realna odchyłka z punktu widzenia utrzymania łuku może wynosić maksymalnie ${}_{-12}^{+2}$ lub ${}_{-14}^{+2}$. Z drugiej zaś strony można zapisać, że po przekształceniu wzoru (25) przez podstawienie $\psi = 1,0 \text{ m/s}^3$, $\lambda = 5 \text{ m}$ i v w km/h otrzymuje się następującą zależność:

$$\Delta f = 162 \cdot \frac{a_p}{v^2} \quad (57)$$

Opierając się na badaniach krajowych i zagranicznych można przyjąć wartości graniczne do ustalenia odchyłek dopuszczalnych $\psi = 1,0 \text{ m/s}^3$ i $a_p = 0,3 \text{ m/s}^2$ w celu obliczenia różnicy strzałek łuku Δf , która wynosi:

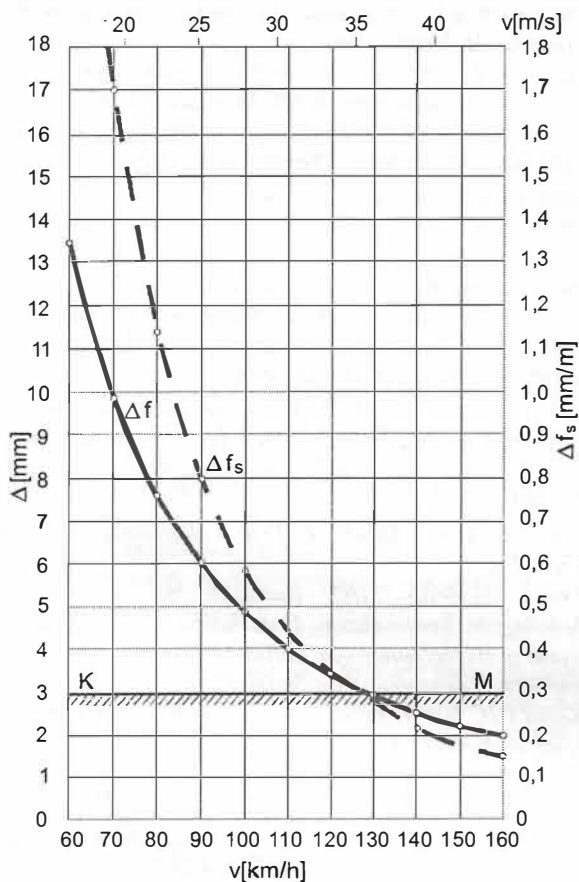
$$\Delta f = 162 \cdot \frac{100 \cdot 0,3}{v^2} = \frac{48600}{v^2} \quad (58)$$

Jak wynika z [10] koleje belgijskie stosują bardzo podobny wzór w oparciu o przyspieszenie wynikające z poprzecznych nierówności toru $a_p = 0,25 \text{ m/s}^2$:

$$\Delta f = \frac{40000}{v^2} \quad (59)$$

Prędkość w zależności (59) podstawia się w km/h .

Dla wyliczonej wcześniej dopuszczalnej prędkości na torach bezprzechyłkowych $v = 12,22 \text{ m/s} \approx 44 \text{ km/h}$ dopuszczalny przyrost strzałki łuku Δf wynosi odpowiednio $25,1 \text{ mm}$ (zależność (58)) oraz $20,66 \text{ mm}$ (zależność (59)). Tę tezę potwierdza wykres przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Wykres wartości Δf i Δf_s (dla $a_1 = 0,3 \text{ m/s}^2$ i $\psi = 1,0 \text{ m/s}^3$ oraz $\lambda = 5 \text{ m}$) KM-kres dokładności uzyskiwanej w czasie napraw nawierzchni

Dalszych danych dostarcza opracowanie [8], które przytacza różne podejścia poszczególnych zarządów kolejowych na ten temat.

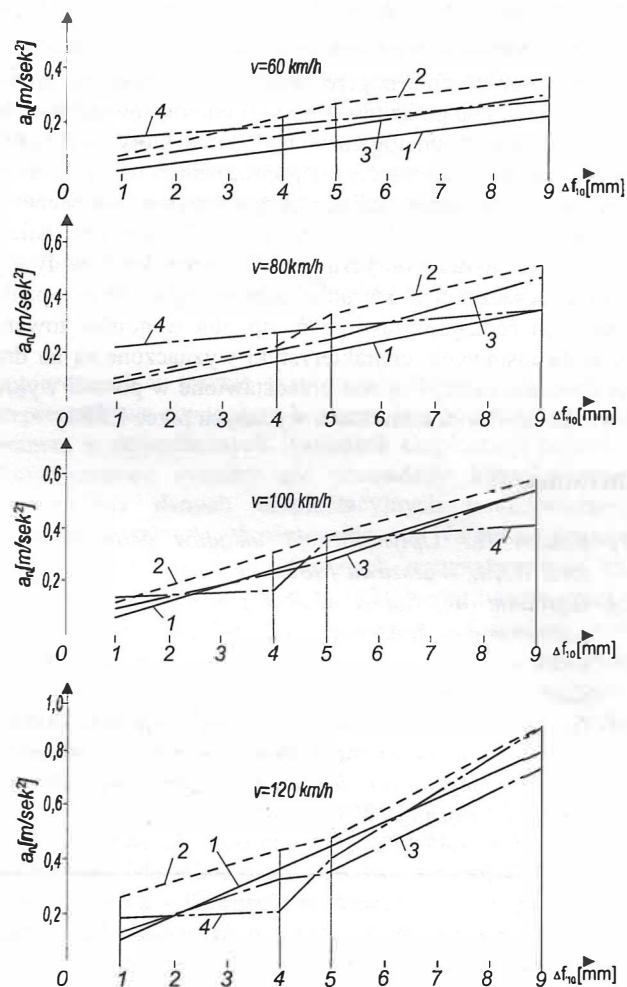
Jedno z ciekawszych prezentują koleje japońskie, które wychodzą z następujących założeń:

- przy cięciwie $S = 10 \text{ m}$ dopuszczalna różnica strzałek od wartości nominalnej wynosi $\pm 3 \text{ mm}$, natomiast przy cięciwie $S = 20 \text{ m}$ – $\pm 4 \text{ mm}$,
- przy układaniu toru różnica strzałek od wartości nominalnej nie może przekroczyć $\pm 2 \text{ mm}$,
- na liniach klasy A (prędkość $v = 110 \text{ km/h}$, 28 tbr rocznie) na łukach $R \geq 800 \text{ m}$ odchyłka strzałek od wartości nominalnej wynosi 5 mm ,
- natomiast na łukach o promieniu $R < 800 \text{ m}$ dopuszczalna różnica strzałek łuku od wartości nominalnej wynosi 7 mm .

Zarząd Kolei Francuskich SNCF przyjął następujące warunki:

- przy układaniu toru dopuszczalna różnica pomiędzy strzałką pomierzoną i teoretyczną, przy cięciwie 10 m , wynosi $\pm 1 \text{ mm}$,
- w eksploatacji dopuszczalna różnica pomiędzy strzałką pomierzoną i teoretyczną, przy cięciwie 10 m , wynosi $\pm 3 \div 4 \text{ mm}$.

Wyniki przeprowadzonej analizy dotyczącej działającego przyspieszenia, spowodowanego poprzecznymi nierównościami, potwierdzają również wyniki badań, które przeprowadzono na pojazdach i które wynikają z rys 6. Z tych wykresów wynika, że przyspieszenie to jest jednoznacznie zależne od prędkości jazdy jak również od odchyłki strzałki łuku Δf_{10} od strzałki teoretycznej. Przyspieszenia były pomierzone na łuku o promieniu $R = 980 \text{ m}$.



Rys. 6. Wykresy przyspieszeń a_p wywołanych nierównościami krzywizn 1 – wartość teoretyczna, 2 – pomiary przeprowadzone na lokomotywie EU06, 3 – pomiary przeprowadzone na wagonie osobowym 7A na wózkach typowych, 4 – pomiary przeprowadzone na wagonie osobowym 7A na wózkach typu COB-M3

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że przemieszczenie poprzeczne q , będące wynikiem poprzecznego przyspieszenia na łuku $R = 250$ m wyliczone w oparciu o rachunek statystyczny, nie przekracza założonej wartości 11,5 m wymaganej przez przepisy międzynarodowe UIC dla wagonów towarowych czteroosiowych na wózkach standardowych. Przyjmując koncepcję probabilistyczną skrajni kinematycznej można zaproponować aby w obliczeniach zwężeń wewnętrznych E_i oraz zwężeń zewnętrznych E_a uwzględniać w tego typu pojazdach wartość maksymalnego przemieszczenia poprzecznego wyliczonego na drodze statystycznej. Dla pojazdów z innymi typami zawiesznień należałoby wykonać analogiczny rachunek, który wykazałby jakie wartości przemieszczenia poprzecznego mogą wystąpić przy założeniu maksymalnego przyspieszenia poprzecznego wyznaczonego na drodze statystycznej. W tym celu należy przeanalizować dane dotyczące zawieszienia, które wpływają na przemieszczenia w kierunku poprzecznym. W przypadku niektórych rodzajów zawiesznień, np. dla wagonów towarowych dwuosiowych, charakterystyki wyznaczone są na drodze doświadczalnej i są one przedstawione w postaci wykresów oraz tabel w dokumentach wydanych przez ERRI.

Literatura

- [1] Bałuch H.: *Optymalizacja układów geometrycznych toru*. WKiŁ, Warszawa 1983.
- [2] Gąsowski W., Sobaś M.: *O pewnych możliwościach zastosowania koncepcji probabilistycznej w obliczeniach skrajni kinematycznej pojazdów szynowych*. *Pojazdy Szynowe* 4/1999.
- [3] Gąsowski W., Marciniak Z.: *Konstrukcje oraz modele wózków i układów zawiesznień wagonów i lokomotyw przeznaczonych do jazdy z dużymi prędkościami*. Wyd.P.P., Poznań 1993.
- [4] Erskov O.P., Melentev L.P., Jachov M.S.: *Rasčoty železnodorožnogo puti v krivyh i normy jego ustrojstva*. *Trudy CNII, Moskva* 1980, nr 192.
- [5] Jezierski J.: *Analiza tolerancji i niedokładności pomiarów w budowie maszyn*. WNT, Warszawa 1982.
- [6] Matsudaira T.: *How High Can Train Speed Be Increased?. A Review of Present and Future*. *Japanese Railway Engineering*, 1966 June vol 7, nr 2.
- [7] Ofierzyński M., Sobczak M.: *Poprzeczna praca cylindrycznych sprężyn śrubowych w ujęciu charakterystyk mechanicznych*. *Pojazdy Szynowe* nr 1/1975.
- [8] Smolarz W., Sobolewski H., Basiewicz T., Bałuch H., Statkiewicz J.: *Przystosowanie kolei do zwiększonych prędkości*. WKiŁ, Warszawa 1969.
- [9] Sobaś M.: *O pewnych możliwościach zastosowania koncepcji probabilistycznej w obliczeniach skrajni kinematycznej pojazdów szynowych*. *Pojazdy Szynowe* 1/2000.
- [10] Sysak J.: *Drogi kolejowe*. Praca zbiorowa, Warszawa 1982, PWN.
- [11] Frage B136/Rp 11/D. *Radsatze mit aufgesattelten Achslagern: Konstruktion, Unterhaltung und Standardisierung. Berechnung von Radsatzwellen für Güterwagen und Reisezugwagen*. Utrecht 04.1979.
- [12] Karta UIC 505-1. *Pojazdy kolejowe. Skrajnie pojazdów*. 8-me wydanie z 01.01.97
- [13] Karta UIC 432. *Wagony towarowe-prędkości jazdy*. Zmiana z dnia 01.01.1994.
- [14] *Przepisy D1. Przepisy techniczne utrzymania i eksploatacji nawierzchni na liniach kolejowych normalnotorowych użytku publicznego*. Ministerstwo Komunikacji, Warszawa 1982.