

## Wpływ parametrów konstrukcyjnych 4-osiowych wagonów cystern ze sprzęgiem samoczynnym na bezpieczeństwo jazdy.

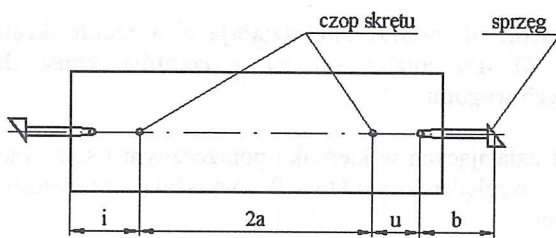
Praca jest kontynuacją artykułów związanych z bezpieczeństwem jazdy wagonów towarowych. W pracy przedstawiono analizę wpływu wielkości zwisu 4-osiowych wagonów cystern wyposażonych w sprzęg samoczynny na bezpieczeństwo jazdy. Sprzęg samoczynny wprowadza w porównaniu ze sprzęgiem śrubowym istotną zmianę w rozkładzie sił poziomych poprzecznych. Zmiana wartości tych sił jest zdeterminowana parametrami konstrukcyjnymi wagonów, które są treścią rozważań pracy w świetle bezpieczeństwa biegu pociągu.

### 1. Wstęp

Wprowadzenie sprzęgu samoczynnego w miejsce śrubowego z jednoczesnym wyeliminowaniem zderzaków wnosi istotną zmianę w oddziaływaniu na pojazd sił wzdłużnych.

Ulega zmianie ich rozkład i sposób przenoszenia z nadwozia na zestawy kołowe, a stąd na tor.

Dla wagonów towarowych wyposażonych w sprzęg samoczynny jedną z przyczyn sprzyjających wykolejeniu jest powstanie nadmiernej siły poprzecznej działającej w czopach skrzytu. Siły te powstają na skutek pojawienia się sił wzdłużnych w procesie hamowania. Wagon w trakcie tego procesu przyjmuje różne położenia w torze (narożnikowe, z jednej strony swobodne, skrajne) [1,2]. Motywem rozważań przedstawionych w opracowaniu jest analiza dwóch wariantów konstrukcyjnych wagonów cystern typu 425R na układach biegowych 25TNa (Y25Cs) z punktu widzenia bezpieczeństwa jazdy. Na rys.1 podano parametry będące przedmiotem rozważań, oraz ich wartości dla poszczególnych wariantów konstrukcyjnych.



Rys.1. Schemat i parametry wagonu.

2a - baza wagonu [m]

u - zwis [m]

i - odległość czołownicy od czopa skrzytu [m]

b - odległość płaszczyzny sprzęgania od przegubu sprzęgu samoczynnego [m]

Wariant I : 2a=8

u=1,52

b=1,025

i=1,9

Wariant II : 2a=7,5

u=1,77

b=1,025

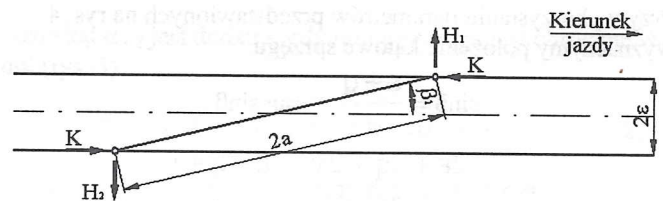
i=2,15

Ustalenie, które z wyżej wymienionych rozwiązań jest bezpieczniejsze sprowadza się do określenia, który wariant powoduje powstanie mniejszej wartości siły poprzecznej dla

tej samej siły wzdłużnej dla różnych położenia wagonu w torze.

### 2. Położenie wagonu w torze prostym

Najbardziej niekorzystnym położeniem wagonu w torze jest położenie narożnikowe. Powoduje ono powstanie największej siły poprzecznej w stosunku do innych możliwych położenia. W związku z powyższym położenie to przyjmujemy do analizy. Na rys. 2 i 3 przedstawiono położenia narożnikowe wagonu wózkowego w torze prostym.



Rys.2. Położenie narożnikowe wagonu bez luzów poprzecznych; maźnica - rama wózka oraz rama wózka - pudło wagonu.

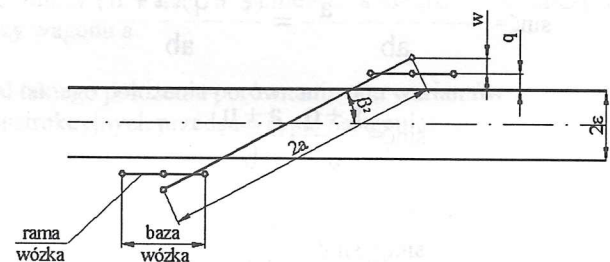
2ε - luz poprzeczny zestawu kołowego w torze,

K - siła wzdłużna,

H<sub>1,2</sub> - siła poprzeczna w czopach skrzytu

Wartość kąta β<sub>1</sub> pod jakim ustawi się wagon w torze (rys. 2) wyznaczmy z zależności:

$$\beta_1 = \arcsin \frac{\varepsilon}{a} \quad (1)$$



Rys. 3. Położenie narożnikowe wagonu z luzami poprzecznymi.

q - luz pomiędzy maźnicą a ramą wózka

w - luz pomiędzy ramą wózka a pudłem wagonu

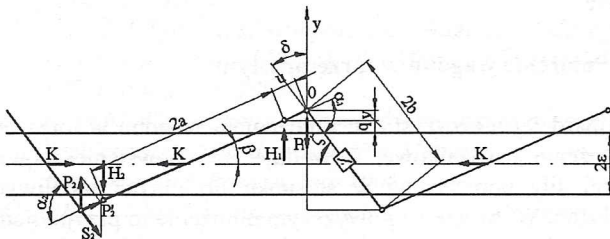
Wartość kąta  $\beta_2$  pod jakim ustawi się wagon w torze (rys. 3) wyznaczmy z zależności:

$$\beta_2 = \arcsin \frac{\varepsilon + w + q}{a} \quad (2)$$

Ponieważ pudło wagonu oparte jest na wózkach 25TNa wyposażonych w czopy kuliste, w związku z tym  $w=0$ , wówczas

$$\beta_2 = \arcsin \frac{\varepsilon + q}{a} \quad (3)$$

### 3. Określenie kąta pomiędzy osią wzdłużną pudła wagonu i osią sprzęgu przy położeniu narożnikowym w torze prostym oraz sił działających w przegubie sprzęgu samoczynnego



Rys. 4. Wagon sprzęgnięty w położeniu narożnikowym – rozkład kątów i sił.

Przy wykorzystaniu parametrów przedstawionych na rys. 4 wyznaczmy położenie katowe sprzęgu.

$$\begin{aligned} \sin \beta &= \frac{\varepsilon + q}{a} \quad v = u \cdot \sin \beta \\ \cos \delta &= \frac{2\varepsilon + 2q + 2v}{2b} = \frac{\varepsilon + q + v}{b} \\ \delta &= 90^\circ - \zeta \\ \cos(90^\circ - \zeta) &= \sin \zeta = \frac{\varepsilon + q + v}{b} \\ \sin \zeta &= \frac{\varepsilon + q + u \sin \beta}{b} \\ \sin \zeta &= \frac{\varepsilon + q + u \cdot \frac{\varepsilon + q}{a}}{b} = \frac{(\varepsilon + q)(1 + \frac{u}{a})}{b} \\ \sin \zeta &= \frac{a(\varepsilon + q)(1 + \frac{u}{a})}{ab} = \frac{(\varepsilon + q)(a + u)}{ab} \\ \sin \zeta &= \frac{\varepsilon + q}{a} \cdot \frac{a + u}{b} \\ \sin \zeta &= \sin \beta \cdot \frac{a + u}{b} \quad (4) \end{aligned}$$

Wartość sił  $P_2'$  i  $S_2$  zapiszemy w postaci

$$P_2' = \frac{K}{\cos \beta} \quad (5)$$

$$S_2 = \frac{K}{\cos \zeta} \quad (6)$$

Wobec tego siłę poprzeczną działającą w przegubie sprzęgu określa wzór:

$$P_2 = P_2' \sin \beta + S_2 \sin \zeta$$

$$P_2 = K \frac{\sin \beta}{\cos \beta} + K \frac{\sin \zeta}{\cos \zeta}$$

$$P_2 = K(\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \zeta) \quad (7)$$

Ponieważ kąt  $\beta$  i  $\zeta$  jest mniejszy od  $5^\circ 40'$  można przyjąć:

$$P_2 = K(\beta + \zeta) = K \cdot \alpha \quad (8)$$

gdzie  $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$

i dalej po odpowiednich przekształceniach

$$P_2 = K(\beta + \beta \cdot \frac{a + u}{b}) = K \cdot \beta (1 + \frac{a + u}{b})$$

$$P_2 = K \cdot \frac{\varepsilon + q}{a} \cdot (1 + \frac{a + u}{b}) \quad (9)$$

$$P_{1,2} = K \cdot \frac{\varepsilon + q}{a} \cdot \frac{b + a + u}{b} \quad (10)$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{\varepsilon + q}{a} \cdot \frac{a + b + u}{b} \quad (11)$$

### 4. Określenie siły poprzecznej działającej w czopie skreću (rys. 4) dla analizowanych wariantów konstrukcyjnych wagonu

Sumę sił działających w kierunku poprzecznym i sumę momentów względem punktu 0 wyrażają następujące zależności:

$$\sum P_y = -P_1 + H_1 - H_2 + P_2 = 0 \quad (12)$$

$$\sum M_0 = H_1 u \cos \beta - H_2 (2a + u) \cos \beta + 2P_2 (a + u) \cos \beta = 0 \quad (13)$$

$$H_1 = -H_2 = H \quad (14)$$

Uwzględniając zależności (10) i (11) otrzymamy wzór na siłę H.

$$\begin{aligned} H &= \frac{-2P_2 (a + u) \cos \beta}{u \cos \beta - (2a + u) \cos \beta} \\ H &= \frac{-2P_2 (a + u)}{u - 2a + u} \end{aligned}$$

$$H = P_{1,2} \left(1 + \frac{u}{a}\right) \quad (15)$$

$$H = K \frac{\varepsilon + q}{a} \cdot \frac{a + b + u}{b} \left(1 + \frac{u}{a}\right) \quad (16)$$

$$H = K \cdot \alpha \left(1 + \frac{u}{a}\right)$$

Zakładając jako wielkości stałe: K, q, b, (a+u)

$$H = K \frac{(\varepsilon + q)(a + u + b)}{b} \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{u}{a^2}\right) \quad (17)$$

$$H = A \left(\frac{1 + \frac{u}{a}}{a}\right)$$

Wartości siły H dla analizowanych wariantów konstrukcyjnych wynoszą:

Wariant I:

$$H_{(I)} = A \cdot \left(\frac{1 + \frac{1,52}{4}}{4}\right) = A \cdot \left(\frac{1,38}{4}\right) = 0,345A$$

Wariant II:

$$H_{(II)} = A \cdot \left(\frac{1 + \frac{1,77}{3,75}}{3,75}\right) = A \cdot \left(\frac{1,469}{3,75}\right) = 0,392A$$

$$\text{gdzie; } A = \frac{1}{b} (\varepsilon + q)(a + u + b)$$

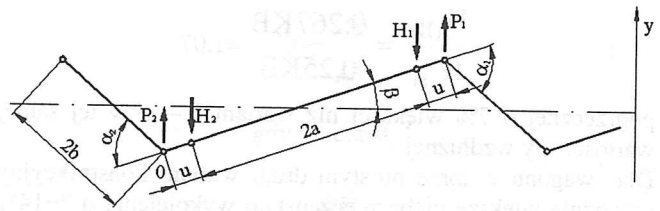
Układ konstrukcyjny wg wariantu II-go powoduje powstanie przy tej samej sile wzdłużnej o 14%

$$\frac{H_{(II)}}{H_{(I)}} = \frac{0,392A}{0,345A} = 1,14$$

większą siłę porzeczną.

Wartość ta obowiązuje tylko dla toru prostego i dla położenia narożnikowego pojazdu w torze.

## 5. Określenie siły poprzecznej działającej w czopie skrętu dla wagonu w położeniu dowolnym



Rys. 5. Wagon sprzęgnięty w położeniu dowolnym – rozkład kątów i sił.

Suma sił działających na wagon i rzutowanych na oś y (rys.5) oraz suma momentów względem punktu 0 przedstawia się następująco:

$$\sum P_y = P_2 + P_1 - H_2 - H_1 = 0 \quad (18)$$

$$\sum M_0 = H_2 u \cos \beta + H_1 (2a + u) \cos \beta - 2P_1 (a + u) \cos \beta = 0 \quad (19)$$

Po uporządkowaniu i uwzględnieniu zależności  $P_{1,2} = K \cdot \alpha_{1,2}$  otrzymamy:

$$H_{1,2} = K \left( \alpha_{1,2} \left(1 + \frac{u}{2a}\right) - \alpha_{1,2} \frac{u}{2a} \right) \quad (20)$$

gdzie kąt  $\alpha_{1,2}$  jest dodatni, gdy ramię sprzęgu jest obrócone w dół (rys. 5).

$$\text{Dla } \alpha_1 > 0, \alpha_2 < 0 \text{ i } \alpha_1 < 0, \alpha_2 > 0 \rightarrow |\alpha_1| = |\alpha_2| \quad (21)$$

pojazd przyjmuje położenie skrajne, w którym siła poprzeczna

$$H_{1,2} = \pm K \cdot \alpha \quad (22)$$

nie zależy od wyrażenia

$$1 + \frac{u}{a}$$

a kąt

$$\alpha = |\alpha_{1,2}| = \frac{\varepsilon + q}{a} \cdot \frac{a + b + u}{b}$$

nie zależy od zwisu u, ponieważ  $a + u = \text{const.}$ , ale zależy od bazy wagonu a.

Dal takiego położenia porównanie obu wariantów konstrukcyjnych przedstawia się następująco;

$$\text{Wariant I: } H_{(I)} = K \cdot \frac{B}{a} = K \cdot \frac{B}{4} = 0,25KB$$

$$\text{Wariant II: } H_{(II)} = K \cdot \frac{B}{a} = K \cdot \frac{B}{3,75} = 0,267KB$$

Tak więc dla położenia skrajnego wagonu w torze prostym wariant II powoduje powstanie siły

$$\frac{H_{(II)}}{H_{(I)}} = \frac{0,267KB}{0,25KB} = 1,07$$

poprzecznej o 7% większej niż wariant I – przy tej samej wartości siły wzdłużnej.

Dla wagonu w torze prostym drugi wariant konstrukcyjny powoduje większe niebezpieczeństwo wykolejenia o 7÷14% w stosunku do pierwszego wariantu konstrukcyjnego w zależności od położenia (od położenia skrajnego, poprzez swobodne do narożnikowego).

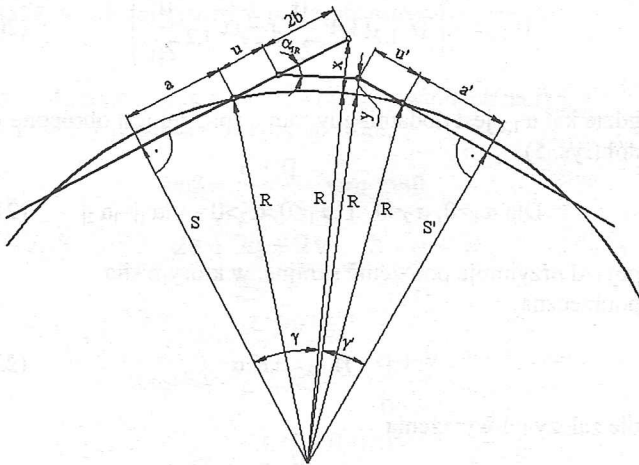
## 6. Określenie wartości kątów dla wagonu w łuku

Wielkość kąta  $\alpha_1$  (rys. 6) jest sumą dwu składników:

$$\alpha_1 = \alpha_{1R} + \alpha_{1\varepsilon} \quad (23)$$

gdzie:  $\alpha_{1R}$  - oznacza kąt pomiędzy osią wzdłużną wagonu a osią sprzęgu przy położeniu wagonu w łuku bez luzu ( $\varepsilon=0$ ),

$\alpha_{1\varepsilon}$  - oznacza kąt wynikający z położenia wagonu w torze prostym dla  $\varepsilon=0$ .



Rys. 6. Położenie wagonu w łuku.

Kąt  $\alpha_{1R}$  określimy z zależności:

$$\alpha_{1R} \cong \frac{x-y}{2b} \text{ [rad]} \quad (24)$$

gdzie wyprowadzone przy wykorzystaniu zależności wynikających z rys. 6 wielkości x, y, przedstawiają się następująco:

$$x \cong \frac{1}{2R} [(c+2b)^2 - a^2] \quad (25)$$

$$y \cong \frac{1}{2R} (a'+u')^2 - a'^2 = \frac{1}{2R} (c'^2 - a'^2) \quad (26)$$

Jeżeli w łuku o promieniu R znajdują się dwa równe geometrycznie wagony tzn.  $a'=a$ ,  $c'=c$ , to wówczas:

$$x-y = \frac{2b(c+b)}{R} \quad (27)$$

a kąt  $\alpha_{1R}$  wyniesie

$$\alpha_{1R} = \frac{2b(c+b)}{R \cdot 2b} = \frac{c+b}{R} = \frac{a+u+b}{R} \quad (28)$$

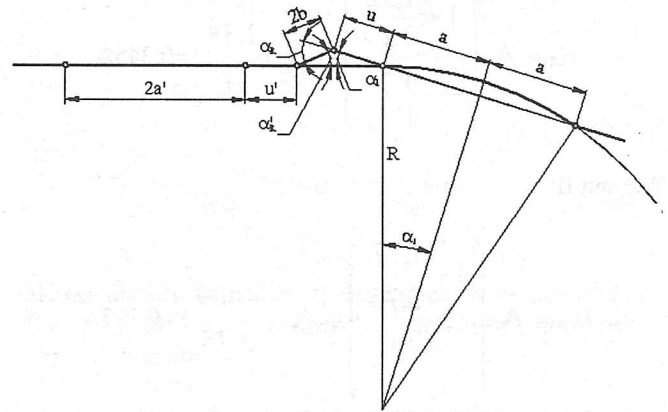
Tak więc dla I i II wariantu konstrukcyjnego wagonu cysterny kąt  $\alpha_{1R}$  ma wartość

$$\alpha_{1R} = \frac{a+u+b}{b} = \frac{a+u}{R} \left( 1 + \frac{b}{a+u} \right) \quad (29)$$

Parametr  $a+u = \text{const}$ .

Wobec powyższego kąt  $\alpha_{1R}$  nie zależy więc od bazy wagonu i od zwisu gdy:  $a+u = \text{const}$ .

## 7. Wartość kąta pomiędzy osią wagonu a osią sprzęgu przy wchodzeniu wagonu w łuk



Rys. 7. Położenie wagonu przy wejściu w łuk.

Wyznaczamy wartości kątów:

$$\alpha_R = \alpha'_R + \alpha_1 \quad (30)$$

$$\alpha_1 \cong \frac{a}{R} \quad (31)$$

$$\frac{2b}{\alpha_1} = \frac{u}{\alpha'_R}$$

$$\alpha'_R = \frac{u \cdot \alpha_1}{2b} \cong \frac{u \cdot \frac{a}{R}}{2b} = \frac{u \cdot a}{R \cdot 2b} \quad (32)$$

$$\alpha'_R = \frac{u \cdot a}{R \cdot 2b} = \frac{1,52 \cdot 4}{R \cdot 2b} = 6,08 \cdot \frac{1}{R \cdot 2b}$$

$$\alpha_R = \frac{a}{R} \left( 1 + \frac{u}{2b} \right) = \frac{4}{R} \left( 1 + \frac{1,52}{2,05} \right) = 6,97 \frac{1}{R}$$

Wariant II:

$$\alpha'_R = \frac{1,77 \cdot 3,75}{R \cdot 2b} = 6,64 \cdot \frac{1}{R \cdot 2b}$$

$$\alpha_R = \frac{3,75}{R} \left( 1 + \frac{1,77}{2,05} \right) = 6,99 \frac{1}{R}$$

Porównanie obu wariantów konstrukcyjnych wagonu cysterny przedstawia się następująco:

-dla wagonu znajdującego się jeszcze na prostej

$$\frac{\alpha'_{R(II)}}{\alpha'_{R(I)}} = 1,09$$

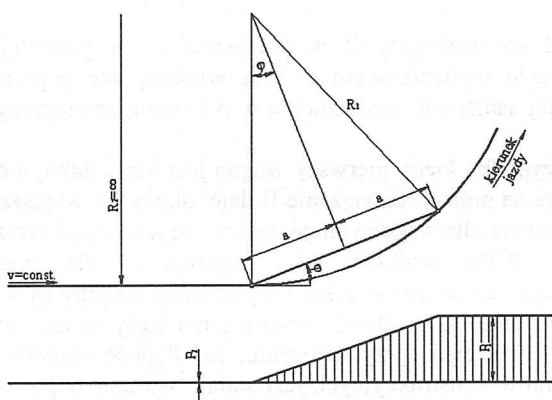
Rozwiązanie I-sze powoduje około 9% mniejszą siłę poprzeczną.

-dla wagonu znajdującego się w łuku

$$\frac{\alpha'_{R(II)}}{\alpha'_{R(I)}} = 1,003$$

Rozwiązanie I-sze daje o 0,3% mniejszą siłę poprzeczną dla rozważanych wariantów konstrukcyjnych wagonu znajdującego się w łuku.

## 8. Określenie wielkości uderzenia i wielkości sił w procesie wjazdu wagonu w łuk



Rys. 8. Wykres sił przy wejściu wagonu w łuk.

Uderzenie zdefiniować można jako przyrost przyspieszenia w czasie:

$$\Psi = \frac{dp}{dt} \quad (34)$$

gdym  $\Psi = \text{const.}$

$$\text{to } \Psi = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \text{const.} \quad (35)$$

gdzie:  $\Delta p = p_1 - p_2$  – przyrost bezwzględny przyspieszenia w czasie  $\Delta t = t_1 - t_2$

Przyspieszenie odśrodkowe w ruchu po okręgu wynosi:

$$p_R = R \cdot \omega^2 \quad (36)$$

gdzie  $\omega = \frac{v}{R}$  – prędkość kątowa

$$p_R = R \frac{v^2}{R^2} = \frac{v^2}{R} \quad \text{gdzie; } v[\text{m/s}], R[\text{m}], p_R[\text{m/s}^2]$$

$$p_R = \frac{v^2}{3,6^2 \cdot R} = \frac{v^2}{12,96 \cdot R}, \quad v[\text{km/h}] \quad (37)$$

Uderzenie od sił prowadzących wyniesie więc:

$$\Psi = \frac{p_1 - p_2}{\Delta t} \quad (38)$$

$$p_1 = \frac{v^2}{12,96 \cdot R_1} \quad p_2 = \frac{v^2}{12,96 \cdot R_2} \quad (39)$$

$$\Delta t = \frac{x}{v} = \frac{3,6}{v} \cdot x \quad (40)$$

gdzie:  $x$  – droga jaką przebędzie pierwszy czop skreću wózka w łuku.

$$x = 2\varphi R_1 \quad (41)$$

$$\text{ponieważ } \sin\varphi < 0,05, \varphi < 3^\circ \quad (42)$$

$$\text{to } \sin\varphi = \frac{a}{R_1} \approx \varphi \quad (43)$$

$$\text{czyli } x \approx 2a \quad (44)$$

$$\Delta t = \frac{3,6}{v} \cdot 2a = 7,2 \frac{a}{v} \quad (45)$$

Wyrażenie opisujące uderzenie przyjmuje postać:

$$\Psi = \frac{P_1 - P_2}{\Delta t} = \frac{v}{7,2a} \left( \frac{v^2}{12,96R_1} - \frac{v^2}{12,96R_2} \right) \quad (46)$$

Gdy  $R_2 \rightarrow \infty$ , to uderzenie wyniesie

$$\Psi = \frac{v^3}{93,2aR_1} \quad (47)$$

Dla I-szego wariantu konstrukcyjnego:

$$\Psi = \frac{1}{4} \cdot \frac{v^3}{93,2R_1} = 0,25 \frac{v^3}{93,2R_1}$$

Dla II-iego wariantu:

$$\Psi = \frac{1}{3,75} \cdot \frac{v^3}{93,2R_1} = 0,267 \frac{v^3}{93,2R_1}$$

Porównanie obu wariantów konstrukcyjnych wykazuje, że;

$$\frac{\Psi_{(II)}}{\Psi_{(I)}} = \frac{0,267}{0,25} = 1,07$$

wariant II powoduje powstanie większego uderzenia w momencie wchodzenia w łuk o około 7%.

Moment siły bezwładności działający na wagon w ruch po okręgu zależy od przyspieszenia kąowego i momentu bezwładności można przedstawić w następującej postaci:

$$M = J \cdot \ddot{\varphi} \quad (48)$$

gdzie:  $\ddot{\varphi}$  - przyspieszenie kąowe [ $s^{-2}$ ]

J - moment bezwładności pudła względem osi pionowej przechodzącej przez czop skreću [ $KGms^2$ ]

Drogę kąową  $\varphi$  wyznaczmy z zależności:

$$\varphi = \int_{t_1}^{t_2} \omega dt = \int_0^{\Delta t} \dot{\varphi} dt = \dot{\varphi} \frac{(\Delta t)^2}{2} \quad (49)$$

Zatem przyspieszenie kąowe przyjmie postać

$$\ddot{\varphi} = \frac{2\varphi}{(\Delta t)^2} \quad (50)$$

podstawiając za  $\Delta t = 7,2 \frac{a}{v}$ , a za  $\varphi = \frac{a}{R}$

przyspieszenie kąowe  $\ddot{\varphi}$  będziemy wyrażać:

$$\ddot{\varphi} = \frac{2}{(7,2)^2} \cdot \frac{v^2}{R \cdot a} \quad (51)$$

Ostatecznie moment siły działający na wagon w ruchu po okręgu przedstawimy w postaci:

$$M = J \cdot \ddot{\varphi} = J \cdot \frac{v^2}{2 \cdot (3,6)^2 R \cdot a} \quad [KGm] \quad (52)$$

Siła działająca w czopie skreću wagonu wchodzącego w łuk wyniesie:

$$P = \frac{M}{2a} = \frac{Jv^2}{2a2(3,6)^2 Ra}$$

$$P = \frac{Jv^2}{a^2(7,2)^2 R} \quad [KG] \quad (53)$$

Dla I-ego wariantu:

$$P = \frac{1}{4^2} \cdot \frac{Jv^2}{(7,2)^2 R} = 0,063 \frac{Jv^2}{(7,2)^2 R}$$

Dla II-ego wariantu:

$$P = \frac{1}{(3,75)^2} \cdot \frac{Jv^2}{(7,2)^2 R} = 0,071 \frac{Jv^2}{(7,2)^2 R}$$

Porównanie sił dla obu wariantów wykazuje, że:

$$\frac{P_{(II)}}{P_{(I)}} = \frac{0,071}{0,063} = 1,13$$

wariant II-gi powoduje powstanie większej siły prowadzącej o około 13% w stosunku do wariantu I-szego [3].

## 9. Wnioski

Układ konstrukcyjny II w porównaniu z I powoduje w położeniu narożnikowym o 14% większą siłę poprzeczną przy tej samej sile wzdłużnej, a w położeniu zewnętrznym o 7%.

W przypadku kiedy pierwszy wagon jest już w łuku, a drugi jeszcze na prostej rozwiązanie II daje: około 9% większe siły poprzeczne, dla wagonu znajdującego się jeszcze na prostej, około 0,3% większe siły poprzeczne, dla wagonu znajdującego się już w łuku. Gdy obydwa wagony są w tym samym łuku, to wielkość zwidu nie ma wpływu na wartość siły poprzecznej (przy założeniu, że długość wagonu obu wariantów konstrukcyjnych jest stała). Wariant II powoduje większe o 7% uderzenie przy wpisywaniu się w łuk. Przy wpisywaniu się w łuk wariant II powoduje powstanie większej siły prowadzącej o 13%.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że II wariant konstrukcyjny wagonu cysterny ustępuje wariantowi I po względem bezpieczeństwa jazdy.

Z punktu widzenia powyższej analizy należy dążyć aby konstrukcja wagonu zapewniała jak najmniejszy wpływ niekorzystnych zjawisk oddziaływujących na tor, a tym samym zwiększyła bezpieczeństwo jazdy.

## Literatura

- [1] Gąsowski W.: *Kolejowe sprzęgi samoczynne*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1976.
- [2] Tatar F., Sobaś J.: *Analiza geometryczna i statyczna biegu pojazdów szynowych na łukach*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1976.
- [3] Szymański M.: *Analiza bezpieczeństwa biegu 4-osiowego wagonu cysterny wskutek zmiany masy i parametrów geometrycznych*. IPS „Tabor” w Poznaniu, *Pojazdy Szynowe - 1/2001*.

