

## Analiza przejazdu wagonów towarowych dwuosiovych przez łuk toru o minimalnym promieniu (1)

*Celem niniejszej pracy jest wyznaczanie metodą analityczną najmniejszego promienia łuku toru, który jest w stanie przejechać wagon towarowy dwuosiovowy, którego parametry konstrukcyjne takie jak baza oraz typ zawieszenia są znane. Jak się okazuje z dotychczasowej praktyki parametr ten jest bardzo ważny z punktu widzenia własności użytkowych wagonu i w zasadzie powinien być podawany w materiałach reklamowych oraz w opisach technicznych będących częścią składową poszczególnych dokumentacji techniczno-ruchowej wagonu.*

### CZĘŚĆ I

#### WYZNACZANIE MINIMALNEGO PROMIENIA ŁUKU DLA PRZEJAZDU WAGONU TOWAROWEGO DWUOSIOWEGO WYPOSAŻONEGO ZESTAWY KOŁOWE W STANIE NOWYM

##### 1. Wprowadzenie.

Jednym z parametrów określających możliwości eksploatacyjne pojazdu szynowego jest minimalny łuk toru, przez który może on przejechać.

Łuk toru o minimalnym promieniu, który powinien przejechać pojazd może wynikać z następujących warunków eksploatacyjnych:

- eksploatacji na trasach danego zarządu kolejowego, który określają przepisy międzynarodowe [8,9] oraz krajowe np. [16],

- wymaganego zjazdu na bocnicę toru szlakowego, gdzie najmniejszy dopuszczalny promień łuku toru wynosi  $R=150$  m,

- wymaganego wjazdu na prom, którego charakterystyki konstrukcyjne jak np. kąt pochylenia, wraz z ewentualnym minimalnym promieniem łuku toru są podane w [10]

- wymaganego wjazdu na łuki toru znajdujące się na bocznicach zakładów produkcyjnych, wagonowni i zakładów naprawczych.

W ostatnim przypadku minimalny promień łuku toru nie jest w zasadzie obligatoryjnie wymagany jednak jak można wnioskować z przepisów międzynarodowych takich jak np. [13,14] oraz [17] wynosi on zwłaszcza dla standardowych wagonów towarowych czteroosiovych  $R=35$  m. Wartość minimalnego promienia łuku toru powinna być podana w formie napisu po obydwu stronach wagonu, jeśli ma on wartość różniącą się od  $R=35$  m. Metodyka wyznaczania najmniejszego łuku toru dla wagonów towarowych czteroosiovych jest przedstawiona szczegółowo w [5].

Metodyka ta sprowadza się do:

- wyznaczania maksymalnego możliwego kąta skrętu wózka  $\psi_1$  wagonu na wózkach wynikającego z geometrii łuku,

- wyznaczenia maksymalnego możliwego kąta skrętu  $\psi_2$  wózka względem nadwozia wynikającego z maksymalnego poszerzenia prześwitu toru na łuku zgodnego z przepisami [9,16] oraz literaturą [1] oraz minimalnego rozstawu zewnętrznego obrzeży kół wynikającego z maksymalnego

dopuszczalnego zużycia kół i wynoszącego  $d=1410$  mm wg [11].

Po wyznaczeniu sumarycznego kąta  $\psi_3 = \psi_1 + \psi_2$  przy założonym promieniu łuku dokonuje się sprawdzenia czy części umieszczone na wózku nie wchodzą w kolizję z częściami umieszczonymi na nadwoziu jak również stopień „pokrycia” (zachodzenia) powierzchni ślizgów umieszczonych na nadwoziu oraz ślizgów bocznych umieszczonych na wózku. Sprawdzenie występowania kolizji dokonuje się za pomocą analizy graficznej na etapie projektowania wagonu oraz doświadczalnie przy próbach odbiorczych prototypu. Zakłada się w tym przypadku, że wagony są wyposażone w standardowe wózki z kulistymi czopami skrętu zgodnie z [7]. Jeśli ww. warunki bezpieczeństwa przejazdu są spełnione, wówczas dany promień łuku można uznać za minimalny przejezdny promień łuku toru. Jak do tej pory nie podano w przepisach międzynarodowych (przepisy UIC oraz ORE/ERRI) jak również w krajowych (PN, BN) metodyki wyznaczania minimalnego przejezdnego promienia łuku dla wagonów towarowych dwuosiovych, pomimo, że stopień ich standaryzacji pod względem budowy poszczególnych typów jest dość zaawansowany [6,7,12].

##### 2. Przejazd wagonu towarowego dwuosiovego przez łuk o minimalnym promieniu.

Wyznaczenie minimalnego przejezdnego promienia łuku toru opiera się na założeniu, że przy badaniu położenia pojazdu szynowego w łuku, kołowe łuki szyn, można z wystarczającą dokładnością zastąpić łukami parabol.

Zakłada się również, że:

- łuki kołowe szyny zewnętrznej i szyny wewnętrznej można zastąpić dwoma identycznymi parabolami przesuniętymi tylko względem siebie wzdłuż osi  $\xi$  (rys.1),

- łuz w torze, położenia poszczególnych punktów pojazdu względem szyn, ich przemieszczenia można mierzyć po zastąpieniu łuków kołowych parabolami w kierunku równoległym do osi  $\xi$ , a nie w kierunku promieniowym.



Można wyróżnić pięć zasadniczych przypadków położenia osi pojazdu dwuosiowego:

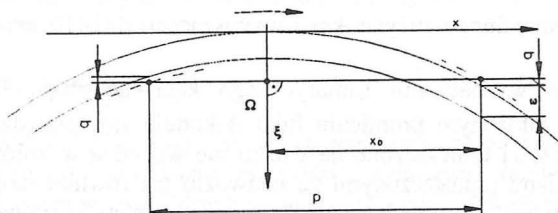
**-przypadek 1:** położenie, w którym oś prowadząca nabiega na szynę zewnętrzną, natomiast oś tylna nabiega na szynę wewnętrzną, przy czym obydwie osie wyczerpały luz poprzeczny  $q$ . Położenie to określa się w literaturze jako **położenie narożnikowe** (patrz rys.1).

**-przypadek 2:** położenie, w którym tylna oś prowadząca nie nabiega na żadną szynę, czyli pojazd biegnie w położeniu z tyłu swobodnym a oś przednia naciska obrzeżem na szynę zewnętrzną; położenie to określa się jako **położenie z tyłu swobodne**.

**-przypadek 3:** położenie, w którym przednia oś prowadząca nie nabiega na żadną z szyn, czyli zajmuje położenie swobodne, natomiast oś tylna naciska obrzeżem na szynę zewnętrzną wyczerpując luz poprzeczny  $q$ ; położenie to określa się jako **położenie z przodu swobodne**.

**-przypadek 4:** położenie, w którym obydwie osie pojazdu nabiegają na szynę zewnętrzną określane jako **położenie skrajnie zewnętrzne**,

**-przypadek 5:** położenie, w którym obydwie osie pojazdu nabiegają na szynę wewnętrzną określane jako **położenie skrajnie wewnętrzne**.



Rys.1 Położenie narożnikowe pojazdu przy wyczerpaniu przesuwu osi skrajnych.

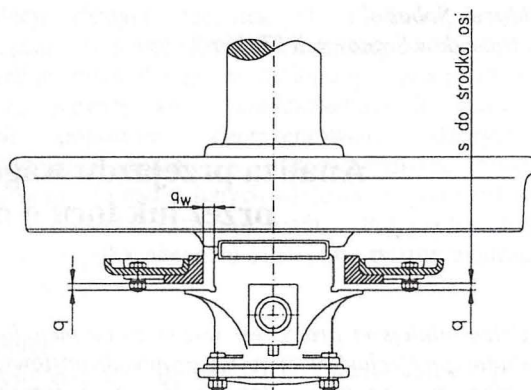
Jako przypadek zasadniczy dla określenia przejezdności wagonu towarowego dwuosiowego przyjęto położenie narożnikowe, które jest przedstawione na rys.1. Promień łuku toru prostopadły do pojazdu określa się jako promień główny, natomiast punkt przecięcia  $\Omega$  się tego promienia z osią podłużną pojazdu nazywa się biegunem.

Z rys 1 wynika następujące równanie:

$$\frac{x_0^2}{2R} - q = \frac{(p - x_0)^2}{2R} + \varepsilon + q \quad (1)$$

gdzie:

$x_0$  - odstęp biegunowy (bieguna  $\Omega$ ) względem przedniej osi prowadzącej,  
 $R$  - promień łuku toru,  
 $q$  - przesuw poprzeczny osi zestawu kołowego względem wideł maźniczych (rys.2),  
 $\varepsilon$  - luz zestawu kołowego w torze,  
 $p$  - baza pojazdu.



Rys.2 Zawieszenie wagonu towarowego dwuosiowego.

Po przekształceniu wzór (1) przyjmuje następującą postać:

$$x_0^2 - 2Rq = p^2 - 2px_0 + x_0^2 + 2R(\varepsilon + q) \quad (2)$$

Z równania (2) można wyznaczyć odstęp biegunowy  $x_0$ :

$$x_0 = \frac{R \cdot (\varepsilon + 2q)}{p} + \frac{p}{2} \quad (3)$$

Dla przypadku 2 odstęp biegunowy wynosi odpowiednio:

$$x_0 = \frac{R \cdot (\varepsilon_z + q)}{p} + \frac{p}{2} \quad (4)$$

gdzie:  $\varepsilon_z$  - przesuw osi przedniej w torze posiadającym luz  $\varepsilon$ ,

Dla przypadku 3 odstęp biegunowy wynosi odpowiednio:

$$x_0 = \frac{R \cdot (\varepsilon_w + q)}{p} + \frac{p}{2} \quad (5)$$

gdzie:  $\varepsilon_w$  - przesuw osi tylnej w torze posiadającym luz  $\varepsilon$ .

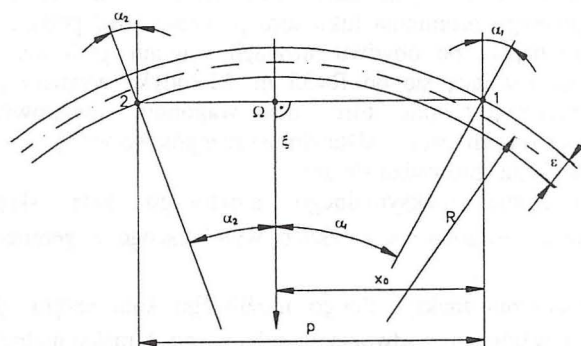
Dla przypadku 4 oraz 5 odstęp biegunowy wynosi  $x_0 = \frac{p}{2}$ .

Do dalszych analiz jako wzór bazowy wykorzystano wzór (3), gdzie odstęp biegunowy  $x_0$  przyjmuje największą wartość. W położeniu narożnikowym poszczególne zestawy kołowe nabiegają na szyny i tak:

- koło przedniego zestawu kołowego (tzw. zestawu lub osi prowadzącej) pod kątem  $\alpha_1$ ,

- koło tylnego zestawu kołowego pod kątem  $\alpha_2$ .

Obydwa kąty nabiegania  $\alpha_1$  oraz  $\alpha_2$  są przedstawione na rys 3.



Rys.3 Kąty nabiegania obrzeży kół na szynę.

Z rys.3 wynikają następujące zależności geometryczne:

$$\sin \alpha_1 = \frac{x_0}{R + \frac{\varepsilon}{2}} \quad (6)$$

oraz

$$\sin \alpha_2 = \frac{x_0 - p}{R - \frac{\varepsilon}{2}} \quad (7)$$

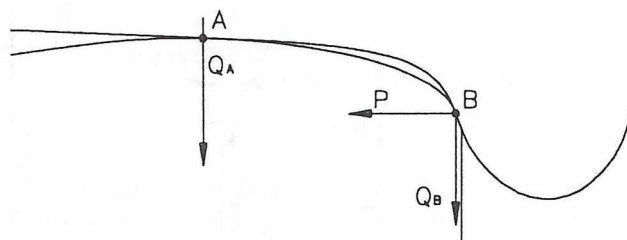
Ponieważ najbardziej istotny z punktu widzenia ewentualnego wpisywania się w łuk jest zestaw kołowy prowadzący, do dalszej analizy przyjęto kąt nabiegania  $\alpha_1$ . Przyjęcie tego kąta jest związane z bezpieczeństwem ruchu wagonu towarowego na łuku o promieniu R. Koło nabiegające na szynę opiera się początkowo na główce szyny w dwóch punktach: w punkcie A znajdującym się na powierzchni toczonej koła i w punkcie B znajdującym się na obrzeżu (rys.4). Ponieważ wagony towarowe dwuosiowe wyposażone są w następujące zawieszenia :

- zawieszenie dwuwieszakowe z resorem piórowym przystosowanym do przeniesienia obciążenia wynikającego z nacisku 20 ton/oś oraz 22,5 ton/oś [12],
- zawieszenie dwuwieszakowe z resorem parabolicznym przystosowanym do przeniesienia obciążenia wynikającego z nacisku 20 ton/oś oraz 22,5 ton/oś [12],
- nowe zawieszenia jednowieszakowe Niesky 1 oraz Niesky 2 z resorem parabolicznym przystosowanym do przeniesienia nacisku 22 ton/oś jak również zawieszeniem SNCF 2000 wyposażonym w sprężyny śrubowe przeznaczone dla wagonów o krótkich bazach  $6,5m < p < 8m$ , posiadają maksymalny wzdłużny luz przymaźniczy wynoszący  $q_w = \pm 22,5$  mm (luz na jedną stronę) [6].

We wszystkich przypadkach wagon może zajmować położenie w łukach toru zmniejszające kąt nabiegania  $\alpha_1$  o

$$\text{wartość } \Delta\alpha = \arctg \frac{q_w}{s} = 1,408^\circ, \text{ gdy } s=915\text{mm}$$

Zgodnie z obowiązującymi przepisami międzynarodowymi [4,9] w zawieszeniach klasycznych luz wzdłużny  $q_w$  między maźnicą a widłami maźniczymi wyrażony w mm powinien być równy conajmniej 2,5 krotnej liczbie przedstawiającej rozstaw osi pojazdu wyrażony w m. Nie może on jednak przekroczyć 22,5 mm. Zgodnie z tą regułą  $q_w = 22,5$  mm odpowiadałby bazie wynoszącej 9 m. Jeśliby przyjąć najmniejszy dopuszczalny rozstaw zestawów kołowych zgodnie z [7] wynoszący 4,5 m to minimalny dopuszczalny luz  $q_w = 11,25$  mm. Jednak im większy jest luz  $q_w$  wówczas większa jest możliwość radialnego ustawiania się zestaw kołowych.

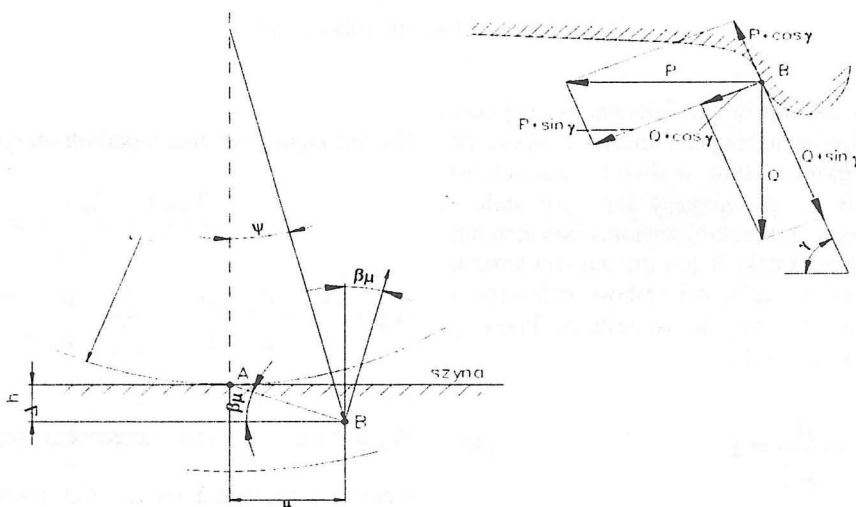


Rys 4. Dwupunktowy styk koła z szyną.

W związku z tym w zależności (7) należy uwzględnić zmniejszenie kąta  $\alpha_1$  o  $\Delta\alpha$  przy założeniu, że dla małych kątów obowiązuje  $\sin \alpha_1 \approx \alpha_1$ :

$$\alpha'_1 = \alpha_1 - \Delta\alpha = \frac{x_0}{R + \frac{\varepsilon}{2}} - \frac{q_w}{s} \quad (8)$$

Z rys. 4 wynika, że w punkcie B działa na główkę szyny siła kierująca P a nacisk pionowy koła na szynę Q rozkłada się na punkt A i punkt B. Przy wzroście siły kierującej koło może się podnieść i opiera się na główce szyny tylko w punkcie B, w którym działa na główkę cały nacisk Q i siła kierująca P (rys.5).

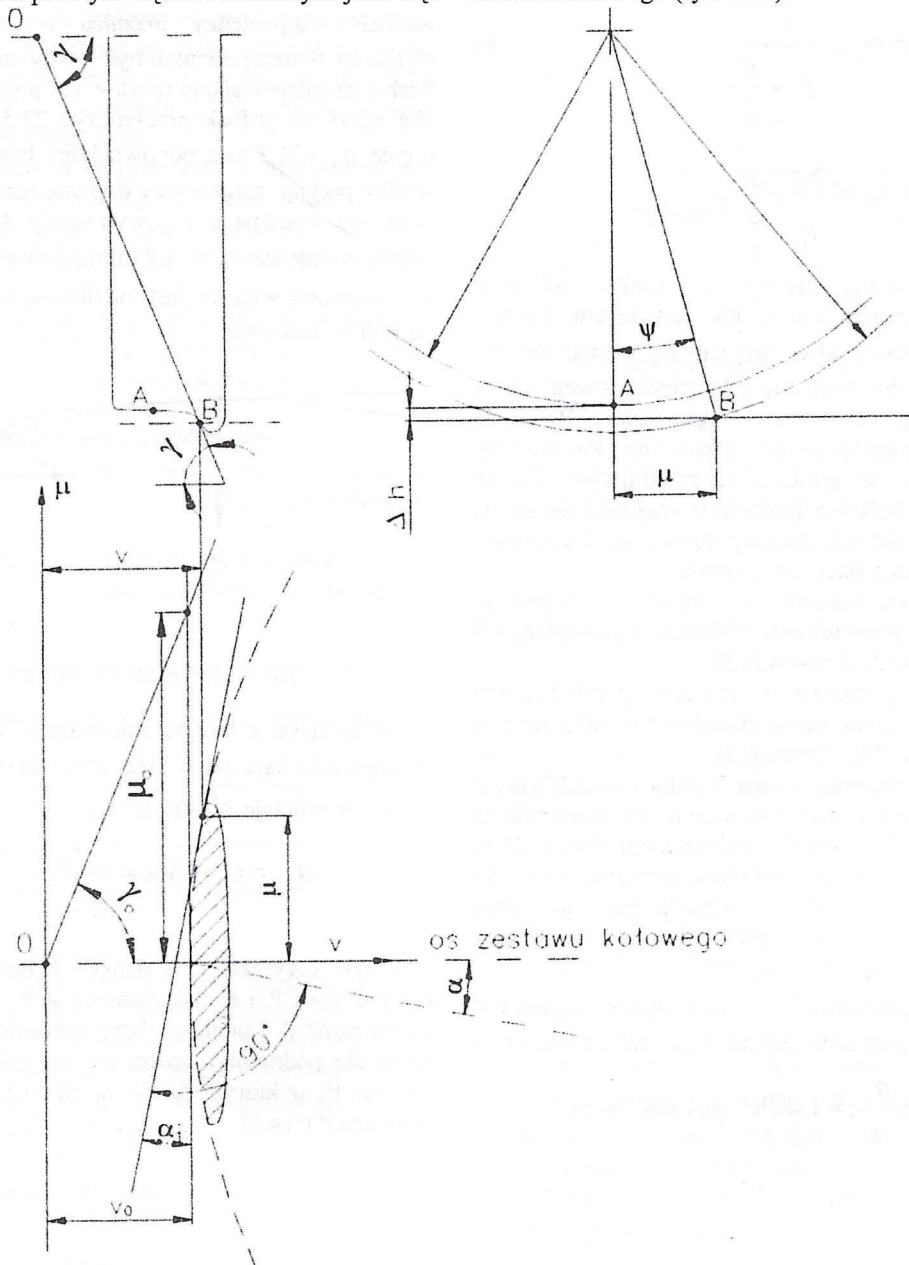


Rys.5. Siły działające w punkcie styku obrzeża z szyną.



W przypadku ogólnym zwłaszcza, gdy na łukach koło nabiega na szynę pod pewnym kątem określanym jako kąt

nabiegania punkt B znajduje się w pewnej odległości  $\mu$  od osi zestawu kołowego (rys. 5 i 6).



Rys.6. Skośne nabieganie koła na szynę.

Z uwagi na niewielką stożkowatość powierzchni toczonej koła i niewielkie wartości kątów nabiegania można przyjąć, że gdy koło opiera się na główce szyny w dwóch punktach, to odległość  $\Delta h$  punktu B od płaszczyzny toru jest stała i niezależna od kąta nabiegania. Przekrój poziomy powierzchni obrzeża przechodzący przez punkt B jest przekrojem stożka, którego wierzchołek znajduje się na osi zestawu kołowego a tworzące są nachylone pod kątem  $\gamma$  do osi zestawu. Przekrój ten wyznacza hiperbolę o równaniu:

$$\frac{v^2}{v_0^2} - \frac{\mu^2}{\mu_0^2} = 1 \quad (10)$$

gdzie:  $\mu_0 = v_0 \cdot \operatorname{tg} \gamma$

Różniczkując równanie hiperboli otrzymuje się:

$$\frac{2v dv}{v_0^2} - \frac{2\mu d\mu}{\mu_0^2} = 0 \quad (11)$$

skąd:  $\frac{dv}{d\mu} = \frac{v_0^2}{\mu_0} \cdot \frac{\mu}{v} = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \gamma} \cdot \frac{\mu}{v}$

Wyrażenie  $\frac{dv}{d\mu}$  jest tangensem nachylenia stycznej do hiperboli względem osi  $\mu$ . Kąt nachylenia tej stycznej w punkcie B równa się kątowi nabiegania  $\alpha'_1$  koła na szynę, skąd wynika następująca zależność:

$$\frac{1}{tg^2 \gamma} \cdot \frac{\mu}{v} = tg \alpha'_1 \quad (12)$$

Współrzędne punktu B wynoszą:

$$\mu = r' \cdot \sin \psi \quad i \quad v = \frac{r'}{tg \gamma} \quad (13)$$

Wstawiając powyższe wartości  $\mu$  i  $v$  do wzoru (12) otrzymuje się zależność następującą:

$$\sin \psi = tg \alpha'_1 \cdot tg \gamma \quad (14)$$

Z rys.6 wynika następująca zależność określająca kąt  $\Psi$ :

$$\cos \psi = \frac{r + \Delta h}{r + \Delta r} \quad (15)$$

gdzie:

$r$ - promień toczy zestawu kołowego,

$\Delta h$ -wysokość odpowiadająca punktowi na szynie, gdzie następuje styk obrzeża w punkcie B; dla typowego zarysu o wysokości obrzeża wynoszącej 28 mm i kącie pochylenia obrzeża wynoszącym  $\gamma=70^\circ$  wynosi ona około 10 mm.

$\Delta r=15,675$  i odpowiada punktowi F1 na rys.7 wg [7].

Punkt  $F_1$  jest punktem końcowym leżącym na prostej pochylonej pod kątem  $70^\circ$  na obrzeżu, który może zagwarantować jeszcze styk koła z szyną. Zależność (14) przy uwzględnieniu równania (15) przyjmuje następującą postać:

$$\sin \arccos \frac{r + \Delta h}{r + \Delta r} = tg \alpha'_1 \cdot tg \gamma \quad (16)$$

Ponieważ dla małych kątów można przyjąć  $tg \alpha'_1 = \alpha'_1$  wówczas otrzymuje się następującą zależność przy uwzględnieniu równań (3) oraz (9):

$$\sin \arccos \frac{r + \Delta h}{r + \Delta r} = \left[ \frac{\frac{R(\varepsilon + 2q)}{p} + \frac{p}{2}}{R + \frac{\varepsilon}{2}} - \frac{q_w}{s} \right] \cdot tg \gamma \quad (17)$$

Z zależności (17) można wyznaczyć minimalny przejezdny promień toru R:

$$R = \frac{\frac{p}{2} - \left[ \frac{\sin \arccos \frac{r + \Delta h}{r + \Delta r} + \frac{q_w}{s} \right] \cdot \frac{\varepsilon}{2}}{\left[ \frac{\sin \arccos \frac{r + \Delta h}{r + \Delta r} + \frac{q_w}{s} - \frac{\varepsilon + 2q}{p} \right]} \quad (18)$$

W oparciu o powyższy wzór przedstawiono w tabeli 2 obliczenia minimalnego przejezdnego promienia łuku toru dla wagonu dwuosowego o bazie 10 m wyposażonego w standardowe zestawy kołowe o średnicy toczy  $\phi 0,920$  m oraz luzu poprzecznego  $q=0,020$  m. Przy wariantowaniu luzu zestawu kołowego w torze  $\varepsilon$  należy uwzględnić rzeczywiste warunki eksploatacji, które są określone w przepisach.

Luz  $\varepsilon$  zmienia się w rzeczywistych warunkach:

-z tytułu tolerancji budowy i eksploatacji toru [1,3,16],

-z tytułu budowy i dopuszczalnego zużycia zestawu kołowego w trakcie eksploatacji [11].

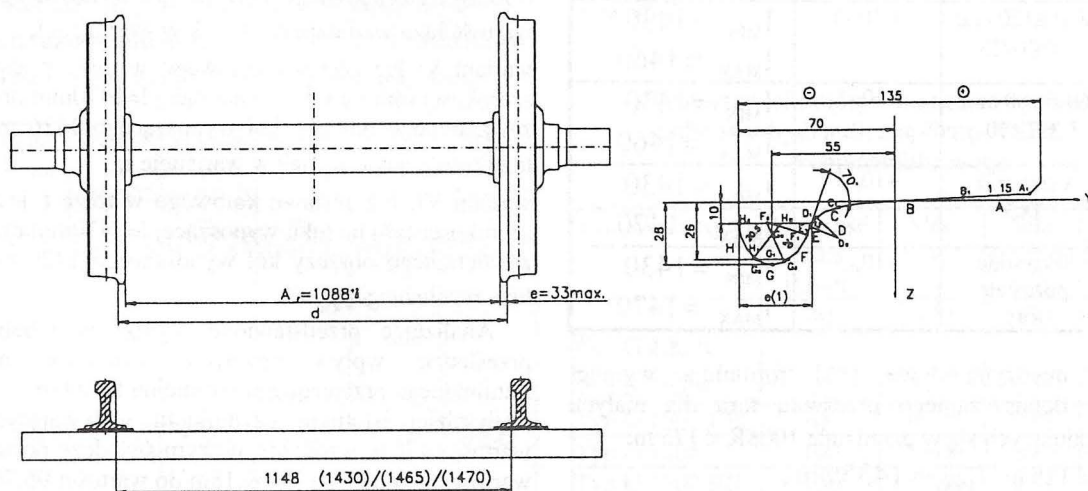
Wielkość luzu  $\varepsilon$  określa się z następującej zależności:

$$\varepsilon = l - d \quad (19)$$

gdzie:

$l$ -wartość prześwitu toru w m,

$d$ -wartość rozstawu zewnętrznego obrzeży kół (rys.7)



Rys.7 Zasadnicze wymiary zestawu kołowego pomocne przy określaniu wymiaru d.



Wielkość rozstawu zewnętrznego obrzeży kół wynosi maksymalnie w stanie nowym 1426mm dla wszystkich typów zestawów kołowych w zakresie dopuszczalnych nacisków od 10 do 22,5 ton na oś i związanych z tym zakresem średnic osi; w stanie zużyтым wymiar ten wynosi odpowiednio 1410 mm dla zestawów kołowych o średnicach w stanie nominalnym większym niż 840 mm oraz 1415 dla średnic nominalnych mniejszych niż 840 mm. Szerokość toru na łukach wynika z przepisów krajowych i zagranicznych tzn. [15,16].

**Tabela 1**  
**Poszerzenia łuku toru  $e$  w zależności od promienia łuku toru w stanie nowym.**

| Promień łuku toru $R$ [m] | Poszerzenie toru $e$ [mm] | Szerokość (prześwit) toru w stanie nominalnym |
|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|
| $R > 300$                 | 0                         | 1435                                          |
| $300 > R \geq 250$        | 5                         | 1440                                          |
| $250 > R \geq 200$        | 10                        | 1445                                          |
| $200 > R \geq 180$        | 15                        | 1450                                          |
| $180 > R \geq 160$        | 20                        | 1455                                          |
| $R < 160$                 | 25                        | 1460                                          |

W trakcie eksploatacji określono dla służb budowlanych infrastruktury odpowiedzialnych za budowę i eksploatację toru odchyłki szerokości toru zgodnie z [16], które są przedstawione w tabeli 2:

**Tabela 2**  
**Odchyłki szerokości toru dla różnych kategorii wg [16]**

| Kategoria toru | Dopuszczalna prędkość [km/h] oraz natężenie przewozów $T$<br>$\left[ \frac{\text{mln t brutto}}{\text{rok}} \right]$ | Tolerancja szerokości (prześwitu) toru [mm] | Maksymalna i minimalna dopuszczalna szerokość (prześwit) toru [mm] |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 0              | $v \geq 120$ km/h oraz $T \geq 25$                                                                                   | +5,-5                                       | $l_{\text{MIN}} = 1430$<br>$l_{\text{MAX}} = 1450$                 |
| 1              | $80 < v \leq 120$ oraz $10 \leq T < 25$                                                                              | +10,-5                                      | $l_{\text{MIN}} = 1430$<br>$l_{\text{MAX}} = 1460$                 |
| 2              | $60 < v \leq 80$ oraz $3 \leq T < 10$                                                                                | +10,-5                                      | $l_{\text{MIN}} = 1430$<br>$l_{\text{MAX}} = 1460$                 |
| 3              | $v \leq 60$ oraz $T < 3$                                                                                             | +10,-5                                      | $l_{\text{MIN}} = 1430$<br>$l_{\text{MAX}} = 1470$                 |
| 4              | wszystkie pozostałe tory                                                                                             | +10,-5                                      | $l_{\text{MIN}} = 1430$<br>$l_{\text{MAX}} = 1470$                 |

Przepisy międzynarodowe [15] formułują wymogi minimalnego dopuszczalnego prześwitu toru dla małych promieni znajdujących się w przedziale  $100 \leq R < 175$  m:

- dla  $100 \leq R < 125$  m  $l_{\text{MIN}} = 1435\text{mm}$ ,
- dla  $125 \leq R < 150$  m  $l_{\text{MIN}} = 1440\text{mm}$ ,
- dla  $150 \leq R < 175$  m  $l_{\text{MIN}} = 1445\text{mm}$ .

**Tabela 3**  
**Minimalny przejezdny promień łuku toru  $R$  dla różnych wartości luzu wzdłużnego  $q_w$ , oraz luzu zestawu kołowego w torze  $\epsilon$  (dla bazy wagonu  $p=10\text{m}$ ).**

| Nr wariantu                                | Wariant I<br>$\epsilon=0,004$ m<br>$q_w=0,0225$ m | Wariant II<br>$\epsilon=0,009$ m<br>$q_w=0,0225$ m | Wariant III<br>$\epsilon=0,019$ m<br>$q_w=0,0225$ m | Wariant IV<br>$\epsilon=0,039$ m<br>$q_w=0,0225$ m | Wariant V<br>$\epsilon=0,044$ m<br>$q_w=0,0225$ m | Wariant VI<br>$\epsilon=0,044$ m<br>$q_w=0$ m |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Minimalny przejezdny promień łuku toru [m] | $R=65,57$                                         | $R=66,00$                                          | $R=66,89$                                           | $R=68,71$                                          | $R=69,18$                                         | $R=96,76$                                     |
| Odstęp biegunowy [m]                       | 5,288                                             | 5,323                                              | 5,3946                                              | 5,542                                              | 5,58                                              | 5,425                                         |
| Kąt nabiegania                             | $3,211^\circ$                                     | $3,211^\circ$                                      | $3,211^\circ$                                       | $3,211^\circ$                                      | $3,211^\circ$                                     | $3,211^\circ$                                 |

Opis poszczególnych wariantów przedstawia się następująco:

wariant I: luz zestawu kołowego w torze  $\epsilon$  jest wynikiem najmniejszej dopuszczalnej szerokości toru wynoszącej  $l=1430\text{mm}$  oraz rozstawu zewnętrznego obrzeży kół wynoszącego  $d=1426\text{mm}$ , natomiast wartość luzu wzdłużnego  $q_w=0,0225\text{m}$  przyjęto jako maksymalną dopuszczalną zgodnie z [11],

wariant II: luz zestawu kołowego w torze  $\epsilon$  jest wynikiem szerokości toru na łuku wynoszącej  $1435\text{mm}$  oraz rozstawu zewnętrznego obrzeży kół wynoszącego  $d=1426\text{mm}$ , wartość luzu wzdłużnego  $q_w$  jak w wariantcie I,

wariant III: luz zestawu kołowego w torze jest wynikiem szerokości toru wynoszącej  $1445\text{mm}$  dla łuku dla zakresu promieni  $125\text{m} > R > 100\text{m}$ , natomiast wartość rozstawu zewnętrznego obrzeży kół wynoszącego  $d=1426\text{mm}$ , wartość luzu wzdłużnego  $q_w$  jak w wariantcie I,

wariant IV: luz zestawu kołowego w torze  $\epsilon$  jest wynikiem szerokości toru na łuku wynoszącej  $l=1465\text{mm}$  [16] oraz rozstawu zewnętrznego obrzeży kół wynoszącego  $1426\text{mm}$ , wartość luzu wzdłużnego  $q_w$  jak w wariantcie I,

wariant V: luz zestawu kołowego w torze  $\epsilon$  jest wynikiem szerokości toru na łuku wynoszącej  $l=1470\text{mm}$  oraz rozstawu zewnętrznego obrzeży kół wynoszącego  $1426\text{mm}$ , wartość luzu wzdłużnego  $q_w$  jak w wariantcie I,

wariant VI: luz zestawu kołowego w torze  $\epsilon$  jest wynikiem szerokości toru na łuku wynoszącej  $l=1470\text{mm}$  oraz rozstawu zewnętrznego obrzeży kół wynoszącego  $1426\text{mm}$ , wartość luzu wzdłużnego  $q_w=0$ .

Analizując przedstawione wyniki w tabeli 1 można prześledzić wpływ pewnych czynników na wartość minimalnego przejezdnego promienia łuku toru.

Najbardziej istotnym czynnikiem wpływającym na jego wartość są luzy wzdłużne, o czym świadczy poważny wzrost wartości promienia z  $R=69,18\text{m}$  do wartości  $96,76\text{m}$  (wariant V oraz wariant VI); większe luzy wzdłużne gwarantują poza tym większą możliwość ustawiania się radialnego zestawów kołowych.



Jeśli przyjąć z zależności (8) kąt  $\Delta\alpha' = \frac{q_w}{s}$  to wówczas minimalny promień łuku toru, przy którym zestawy kołowe o bazie p będą ustawiały się radialnie można wyznaczyć z następującego równania:

$$\frac{q_w}{s} = \frac{x_o}{R} \quad (20)$$

Z zależności (20) można wyznaczyć promień, przy którym zestawy kołowe ustawiają się radialnie przy wykorzystaniu wzoru (3):

$$R = \frac{p}{2 \left( \frac{q_w}{s} - \frac{\varepsilon + 2q}{p} \right)} \quad (21)$$

Wyniki promienia łuku toru R, przy którym zestawy kołowe ustawiają się radialnie dla wybranych baz p wagonów towarowych przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4**

**Minimalny promień łuku toru, przy którym zestawy kołowe ustawiają się radialnie dla różnych baz (rozstawów środków zestawów kołowych) dla  $\varepsilon=0,009$  m oraz  $q=0,020$  m.**

| Baza wagonu [m]  | p=4,5  | p=6    | p=7   | p=8    | p=9    | p=10   |
|------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Promień łuku [m] | 117,73 | 137,40 | 137,4 | 152,17 | 182,25 | 199,20 |

Zwiększenie luzu zestawu kołowego w torze  $\varepsilon$  zwiększa minimalny przejezdny promień łuku toru, co wykazują kolejne warianty od I do V.

W oparciu o wzór (18) przedstawiono w tabeli 5 obliczenia minimalnego przejezdnego promienia łuku toru dla wagonu dwuosowego o bazie 10 m wyposażonego w standardowe zestawy kołowe o średnicy tocznej  $\phi$  0,920 m oraz zmiennego luzu poprzecznego q dla sześciu wariantów; jako parametry stałe założono luz zestawu kołowego w torze  $\varepsilon=0,039$  m oraz luz wzdłużny  $q_w=0,0225$  m.

**Tabela 5**

**Minimalny przejezdny promień łuku toru R dla różnych wartości luzu poprzecznego q przy założonych wartościach luzu wzdłużnego  $q_w=0,0225$  m luzu zestawu kołowego w torze  $\varepsilon=0,039$  m (baza wagonu 10 m).**

| Nr wariantu                                | Wariant I<br>q=0 m, | Wariant II<br>q=0,005 m, | Wariant III<br>q=0,010 m, | Wariant IV<br>q=0,015 m, | Wariant V<br>q=0,0175 m, | Wariant VI<br>q=0,020 m |
|--------------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Minimalny przejezdny promień łuku toru [m] | R=65,13             | R=65,99                  | R=66,87                   | R=67,78                  | R=68,24                  | R=68,71                 |
| Odstęp biegunowy [m]                       | 5,254               | 5,323                    | 5,394                     | 5,467                    | 5,504                    | 5,542                   |
| Kąt nabiegania                             | 3,211°              | 3,211°                   | 3,211°                    | 3,211°                   | 3,211°                   | 3,211°                  |

Jak wynika z tabeli 4 wpływ luzu poprzecznego q na wartość minimalnego promienia łuku toru dla wagonu towarowego dwuosowego, przez który może przejechać pojazd jest stosunkowo niewielki, jeśli weźmie się pod uwagę bardzo duży zakres zmienności tzn. od 0 do 20 mm. Dla luzu zestawu kołowego w torze  $\varepsilon=0,004$  m, oraz luzu poprzecznego  $q=0$  otrzymuje się najmniejszy promień  $R=62,30$  m.

Z przedstawionych analiz wynika, że granicznym kątem określającym bezpieczeństwo przejazdu przez minimalny łuk toru dla założonego przypadku ( $p=10$  m,  $q_w=0,0225$  m) jest kąt określony z zależności (8) wynoszący  $\alpha_1=3,211^\circ$ . Należy wziąć również pod uwagę, że pojazd powinien przejeżdżać przez zadeklarowany łuk toru dla każdej określonej dopuszczalnym zużyciem średnicy zestawu kołowego tzn. w zakresie średnic 0,920÷0,870 m (zestaw kołowy monoblokowy). Jeśli uwzględni się ostatnią dopuszczalną reprofilację zestawu kołowego tzn. dla  $r=0,435$  m i uwzględni się we wzorze (18) dla wariantu z luzami poprzecznymi  $\varepsilon=0,004$  m,  $q=0,020$  m oraz  $q_w=0,0225$  m wówczas otrzymuje się wartość minimalnego promienia  $R=71,25$  m, co daje kolejną różnicę w stosunku do wyliczonego promienia dla średnicy tocznej w stanie nowym tzn.  $R=65,57$  m.

### 3. Minimalny promień łuku toru dla przejazdu lokomotyw manewrowych.

Przy określaniu parametrów niniejszej analizy ważnym czynnikiem określającym przejezdność przez łuk toru są parametry przejezdności lokomotyw manewrowych, które są używane np. do wtoczenia wagonu do zakładu naprawczego czy też wagonowni. Z najnowszych osiągnięć europejskich w zakresie produkcji lokomotyw manewrowych np. lokomotyw z napędem spalinowo-hydraulicznym wynika, że przejazd przez stosunkowo małe promienie nie powinien stanowić poważniejszego problemu. Jako przykładowe przeanalizowano typoszereg lokomotyw firmy VSFT Vossloh Schienenfahrzeuge GmbH. Parametry tych lokomotyw podano w tabeli 6. Typoszereg krajowych lokomotyw manewrowych oraz elektrycznych przedstawiono w tabeli 7.

**Tabela 6**

**Parametry lokomotyw manewrowych z trakcją spalinowo-hydrauliczną firmy VSFT Vossloh Schienenfahrzeuge**

| Typ lokomotywy | Prędkość max. [km/h] | Moc [kW] | Siła pociągowa [kN] | Minimalny promień łuku toru [m] |
|----------------|----------------------|----------|---------------------|---------------------------------|
| Typ G 400 B    | 40                   | 390      | 130                 | 40                              |
| Typ G 765 B    | 47                   | 560      | 194                 | 50                              |
| Typ G 1000 BB  | 100                  | 1.100    | 259                 | 60                              |
| Typ G 1206     | 100                  | 1.500    | 273                 | 60                              |
| Typ G 1700 BB  | 100                  | 1.700    | 259                 | 60                              |
| Typ G 2000 BB  | 120                  | 2.240    | 282                 | 80                              |



**Tabela 7**  
**Parametry lokomotyw manewrowych spalinowych oraz elektrycznych używanych na PKP**

| Typ lokomotywy | Prędkość eksploatacyjna max. [km/h]  | Moc [kW] | Siła pociągowa [kN]                          | Minimalny promień łuku toru [m] |
|----------------|--------------------------------------|----------|----------------------------------------------|---------------------------------|
| Ls 40          | opcjonalnie 2.83, 4.64, 7.44, 11.35  | 32,4     | 2874*                                        | 80                              |
| Ls 75          | opcjonalnie 5,10,18                  | 55,1     | 4120*                                        | 80                              |
| Ls 150         | opcjonalnie 5.13, 9.42, 15.69, 25.69 | 110,3    | 6180*                                        | 50                              |
| 401D (10D)     | opcjonalnie 60,10                    | 257,4    | 132 przy rozruchu, 53 przy prędkości ciągłej | 80                              |
| 401 Da         | max 60, min 11.3                     | 257,4    | 110<br>54                                    | 80                              |
| Ls 60          | 11.35                                | 44,1     | 4306*                                        | 50                              |
| 409 Da         | max 30.8, min 6.87                   | 132,4    | 41,6                                         | 50                              |
| 6D/M           | 15                                   | 590      | 100-223                                      | 80                              |
| 410 D          | max 22.4, ciągła 12.36               | 110      | 13,734-22,661                                | 50                              |
| 411 D          | max 80, ciągła 12.3                  | 888      | 165-360                                      | 80                              |
| 405 E/405Ea    | max 80, ciągła 28.2                  | 960      | 122.2-250                                    | 80                              |

\*z braku odpowiednich danych podano ciężar doczepny

Jak widać z przedstawionego porównania możliwości lokomotyw manewrowych zagranicznych i krajowych w wielu przypadkach nie są spełnione wymogi w zakresie przejezdności minimalnego promienia łuku toru określonego przez przepisy dla wagonów towarowych np.  $R=75$  m a już kompletnie warunek ten nie jest spełniony dla łuku  $R=35$  m. Wynika z tego, że możliwości ich zastosowania w zakresie prac manewrowych dla poszczególnych typów wagonów towarowych są ograniczone albo w ogóle niemożliwe.

#### 4. Stan toru.

Stan toru jest ważny o tyle, że już na etapie projektowania należy przewidzieć konsekwencje, które mogą wynikać podczas wykonywania odpowiedniej próby. Zasadniczym parametrem jest promień łuku toru, przez który wagon powinien przejechać. Tolerancje tej wielkości wynikają z dopuszczalnej strzałki łuku toru, która zależy bezpośrednio od prędkości, do której tor jest dostosowany (tabela 8).

**Tabela 8**  
**Zależność tolerancji strzałki łuku toru wyrażonej przez  $\Delta f_s$  od obowiązującej prędkości na torze zgodnie z [16].**

| Prędkość maksymalna obowiązująca na torze w [km/h] | Dopuszczalne różnice sąsiednich strzałek na łuku $\Delta f_s$ [mm] |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| ponad 120                                          | 4,0                                                                |
| 119 do 80                                          | 4,0-6,0                                                            |
| 79 do 60                                           | 7-10                                                               |
| do 60                                              | 12,0                                                               |

Dopuszczalne różnice strzałek  $\Delta f_s$  odnoszą się do cięciwy 10 m. Dopuszczalna różnica strzałek  $\Delta f_s$  odnoszą się do cięciwy 10 m. W celu wyboru zakresu dopuszczalnej prędkości na małych łukach posłużono się zależnością przedstawioną w [2] dla łuków bezprzechyłkowych:

$$v = 2,78\sqrt{R} \quad (22)$$

Wstawiając odpowiednio

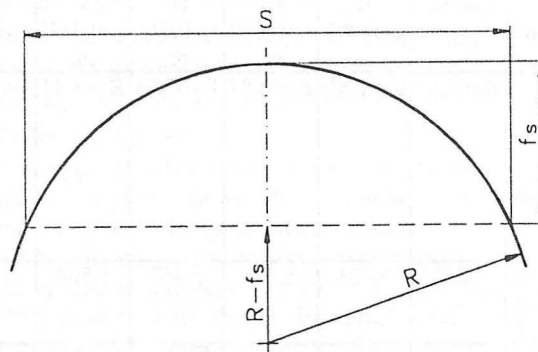
$$R_1 = 150\text{m}, R_2 = 100\text{m}, R_3 = 75\text{m}, R_4 = 35\text{m}$$

otrzymuje się prędkości

$v_1 = 34,04\text{ km/h}$ ,  $v_2 = 27,8\text{ km/h}$ ,  
 $v_3 = 24,07\text{ km/h}$ ,  $v_4 = 16,44\text{ km/h}$ . Jeśli by założyc maksymalną przechyłkę 150 mm (przypadek hipotetyczny) zgodnie z wzorami wg [4] tzn.  $v = 3,57\sqrt{R}$  oraz  $v = 4,33\sqrt{R}$  wówczas dopuszczalne prędkości wynosiłyby odpowiednio:  $v_1=43,72\text{ km/h}$  oraz  $v_1=53,03\text{ km/h}$  dla  $R_1=150\text{m}$ ,  $v_2=35,7\text{ km/h}$  oraz  $v_2=43,3\text{ km/h}$  dla  $R_2=100\text{m}$ ,  $v_3=30,91\text{ km/h}$  oraz  $v_3=37,49\text{ km/h}$  dla  $R_3=75\text{m}$ , oraz  $v_4=21,12\text{ km/h}$  oraz  $v_4=25,61\text{ km/h}$  dla  $R_4=35\text{m}$ . Wynika z tego, że zastosowanie dopuszczalnej odchyłki  $\Delta f_s$  na poziomie 12 mm jest uzasadnione.

Wychodząc z definicji tolerancji i pomiaru pośredniego łuku toru można zapisać następującą zależność w oparciu o rys.8:

$$(R - f_s)^2 + \frac{S^2}{4} = R^2 \quad (23)$$



Rys.8. Schemat pomiaru łuku R.



Z zależności (23) wynika następujący wzór:

$$R = \frac{S^2}{8 \cdot f_s} + \frac{f_s}{2} \quad (24)$$

Z powyższego wzoru (24) wynika maksymalny błąd pomiaru oraz wykonania promienia  $\Delta R$ :

$$\Delta R = \pm \left[ \left| \frac{\partial R}{\partial S} \right| \cdot |\Delta S| + \left| \frac{\partial R}{\partial f_s} \right| \cdot \Delta f_s \right] \quad (25)$$

Po dokonaniu różniczkowania otrzymuje się następującą zależność:

$$\Delta R = \pm \left[ \frac{S}{4 \cdot f_s} \cdot |\Delta S| + \left| \frac{1}{2} - \frac{S^2}{8 \cdot f_s^2} \right| \cdot \Delta f_s \right] \quad (26)$$

Tolerancję pomiaru przy pomiarze cięciwy łuku  $\Delta S$  można ograniczyć przy współczesnej technice pomiarowej do 0,001 m oraz przyjmując  $\Delta f_s = 0,012$  m otrzymuje się wartości  $\pm \Delta R$ , które zebrano w tabeli 9.

**Tabela 9**

**Wartości tolerancji dla łuków toru o promieniach R=150 m, R=100m, R=75 m oraz R=35 m**

| Nominalna wartość promienia łuku [m] | Nominalna wartość strzałki łuku [m] | Tolerancja strzałki łuku $\Delta f_s$ [m] | Tolerancja promienia łuku $\Delta R$ [m] | Minimalna i maksymalna wartość promienia łuku $R_{MAX}, R_{MIN}$ [m] |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| R=150                                | 0,0833                              | $\pm 0,012$                               | $\pm 21,647$                             | $R_{MAX} = 171,647$<br>$R_{MIN} = 128,353$                           |
| R=100                                | 0,1250                              | $\pm 0,012$                               | $\pm 9,614$                              | $R_{MAX} = 109,614$<br>$R_{MIN} = 90,386$                            |
| R=75                                 | 0,1668                              | $\pm 0,012$                               | $\pm 5,400$                              | $R_{MAX} = 80,4$<br>$R_{MIN} = 69,6$                                 |
| R=35                                 | 0,3589                              | $\pm 0,012$                               | $\pm 1,164$                              | $R_{MAX} = 36,164$<br>$R_{MIN} = 33,836$                             |

Analizując wartości otrzymane w tabeli 9 można stwierdzić, że odchyłki promieni zwłaszcza powodujące zmniejszenie wartości nominalnych muszą być uwzględnione już na etapie projektowania wagonu. Oznacza to, że konstrukcja wagonu musi być przygotowana tak, aby można było spełnić przejazd przy najbardziej niekorzystnych, ale możliwych w rzeczywistości warunkach eksploatacyjnych.

## 5. Wnioski.

Jak wynika z przeprowadzonych analiz istnieje możliwość obliczeniowego wyznaczenia minimalnego promienia łuku toru co wymaga opracowania specjalnej metodyki analityczno-eksperymentalnej. Należy również zwrócić uwagę na to, że przejazd przez łuk toru o

minimalnym promieniu musi odbywać się w każdych warunkach eksploatacyjnych a więc przy różnych stanach zużycia zestawu kołowego, co może mieć wpływ na wysokość styku obrzeża z główką szyny, jak również kąty pochylenia obrzeża v. Parametry te jak wynika z zależności (18) mają wpływ na określenie minimalnego przejezdznego promienia łuku toru. Wymaga to przeprowadzenia dalszych prac analitycznych nad tym zagadnieniem.

## Literatura

- [1] Bałuch H.: *Optymalizacja układów geometrycznych toru*. WKŁ. Warszawa 1983.
- [3] Gąsowski W., Sobaś M.: *O pewnych możliwościach zastosowania koncepcji probabilistycznej skrajni kinematycznej pojazdów szynowych (3)*. Pojazdy Szynowe 3/2000
- [2] Smolarz W., Sobołewski H., Basiewicz T., Bałuch H., Statkiewicz J.: *Przystosowanie kolei do zwiększonych prędkości*. WKiŁ. Warszawa 1969.
- [4] Sobaś M.: *Analiza możliwości zmian skrajni kinematycznej*. Rozprawa doktorska, 2001.
- [5] ERRI B12/DT 135. *Güterwagen. Allgemein verwendbare Berechnungsmethoden für die Entwicklung neuer Güterwagendrehgestelle oder neuer Güterwagendrehgestelle*. (3 Ausgabe). Utrecht. 10. 1995.
- [6] ERRI B12/Rp 67. *Güterwagen. Dynamisches Laufverhalten zweiachsiger Güterwagen mit 22,5 t Radsatzlast und einem Radsatzabstand <8 m für 100 km/h und 120 km/h*. Utrecht. 10. 1997
- [7] Karta UIC 432. *Wagony towarowe. Prędkości jazdy*. 7 wydanie z 1.07.1998.
- [8] Karta UIC 505-1. *Pojazdy kolejowe. Skrajnie pojazdów*. 8 wydanie z 01.01.1997.
- [9] Karta UIC 505-5. *Wspólne podstawowe warunki dla kart 505-1 do 505-5. Komentarz uwzględniający opracowanie i przepisy dotyczące kart*. 2 wydanie 01.01.1997, zmiana z 01.01.1980.
- [10] Karta UIC 507. *Wagony towarowe. Warunki, którym powinny odpowiadać wagony towarowe w komunikacji promowej*. 1 wydanie z 1.01.1977.
- [11] Karta UIC 510-2. *Wagony. Warunki dla stosowania kół o różnych średnicach*. 3 wydanie z 1.01.1998.
- [12] Karta UIC 517. *Wagony towarowe. Części zawieszenia resorowego. Normalizacja*. 6-te wydanie z 1.01.1989, zmiana 10-ta z 1.07.1997.
- [13] Karta UIC 571-1. *Ujednolicone wagony towarowe. Wagony towarowe dwuosowe ogólnego przeznaczenia. Charakterystyki*. 4 wydanie z 01.01.1983. Nowy nakład 01.01.1996.
- [14] Karta UIC 571-3. *Ujednolicone wagony towarowe typu specjalnego. Charakterystyki*. 5 wydanie z 01.10.1996.
- [15] Karta UIC 710. *Poszerzenie łuków na torach*. 2 wydanie z 1.01.1978.
- [16] Przepisy D1. *Przepisy techniczne utrzymania i eksploatacji nawierzchni na liniach kolejowych normalotorowych użytku publicznego*. Ministerstwo Komunikacji. Warszawa 1982.
- [17] RIV 2000. *Umowa o wymianie i użytkowaniu wagonów towarowych przez kolejowe przedsiębiorstwa przewoźowe* RIV-2000. Obowiązujące od 07.2000.