

# Odporność pojazdów szynowych na wywracanie się przy silnych wiatrach poprzecznych

Andrzej Flaga

Laboratorium Inżynierii Wiatrowej, Instytut Mechaniki Budowli, Politechnika Krakowska, e-mail: LIWPK@windlab.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono i przeanalizowano zagadnienie odporności pojazdów szynowych na ich wywracanie się przy poprzecznym silnym wietrze porywistym. Wyprowadzane i przeanalizowane zostały podstawowe wzory opisujące to zagadnienie, łącznie z autorską metodologią wyznaczania prędkości krytycznej wiatru poprzecznego, przy której występuje 100% odciążenie kół pojazdu po stronie nawietrznej.

**Słowa kluczowe:** pojazd szynowy, wywracanie się, silny wiatr

## 1. Wstęp

Pojazdy szynowe w ogóle, a szczególnie puste wagony pociągów towarowych, jak również i puste kontenery przewożone na platformach wagonów towarowych mogą być wywracane przy silnych wiatrach wiejących poprzecznie do kierunku jazdy pociągu.

W pracy [1] opisywane i analizowane są dwa przypadki zdmuchnięcia pustych kontenerów z wagonów typu FEA-B dwóch różnych pociągów towarowych jadących w Anglii z prędkością 120km/h, przy wiejącym bardzo silnym wietrze poprzecznym (orkan Emma) o prędkości szczytowej 15-20m/s, w nocy 01.03.2008r.

Badania w tunelu aerodynamicznym zagadnienia wywracania się różnych wagonów pociągów towarowych przeprowadzono w pracy [2].

Zagadnieniom odporności pojazdów szynowych na wywracanie się przy silnych wiatrach poprzecznych poświęcone są dwa dokumenty normalizacyjne opracowane w Wielkiej Brytanii [3,4].

W pracy przedstawiono modele autorskie wyznaczania tzw. prędkości krytycznej wiatru  $V_w^{roll}$ , po przekroczeniu której może wystąpić wywrócenie się wagonu (ogólnie pojazdu szynowego), lub samego kontenera, gdy nie przewozi on towaru (ang. intrinsic roll-over wind speed).

## 2. Definicja i zasada wyznaczania prędkości krytycznej wiatru

$V_w^{roll}$

Prędkość krytyczna wiatru  $V_w^{roll}$  jest to taka prędkość szczytowa wiatru – wiejącego poprzecznie do pojazdu (wagonu) niezaladowanego pociągu jadącego z maksymalną prędkością operacyjną po prostym torze – przy której występuje 100 % odciążenie kół pojazdu od strony nawietrznej.

W takiej sytuacji granicznej (krytycznej) aerodynamiczny moment obrotowy pojazdu  $M_A$ , spowodowany wiatrem, jest zrównoważony przez moment utrzymujący pojazd  $M_R$ , wynikający z sił ciężkości działających na ten pojazd.

### 2.1. Minimalna akceptowalna prędkość krytyczna $V_w^{roll}$

Prędkość krytyczna wiatru  $V_w^{roll}$  dla pojazdu nie przewożącego ładunku przy maksymalnej prędkości operacyjnej pociągu na prostym poziomym torze nie powinna być mniejsza niż:

- a) 36.5 m/s [4] i 40.8m/s [3] dla pojazdów pociągów osobowych;
- b) 30.8 m/s [4] and 31.0 m/s [3] dla pojazdów pociągów towarowych i innych pojazdów szynowych nie przewożących ludzi.

## 2.2. Wyznaczenie momentu utrzymującego pojazd $M_R$

Moment utrzymujący pojazdu określają wzory:

$$M_R = m \cdot g \cdot b_A - M_0 \quad (1)$$

$$m = m_0 + m_1 + m_2 \quad (2)$$

$$M_0 = g \cdot m_0 \cdot y_0 + m_1 \cdot y_1 + m_2 \cdot y_2 \quad (3)$$

gdzie:

$m$  - cała masa pustego pojazdu,  
 $g$  - przyspieszenie ziemskie (9.81 m/s<sup>2</sup>),  
 $b_A$  - połowa odległości między punktami kontaktu kół z szynami (0.75 m),  
 $M_0$  - moment obrotowy spowodowany przemieszczeniami bocznymi i obrotowymi

zawiesznień mas przy działaniu wiatru i innymi masami na mimośrodkie,

$m_0$  - masa nieresorowana,  
 $y_0$  - przemieszczenie poziome masy nieresorowanej,  
 $m_1$  - główna masa reserowana,  
 $y_1$  - przemieszczenie poziome głównej masy reserowanej względem osi toru,  
 $m_2$  - drugorzędna masa reserowana,  
 $y_2$  - poziome przemieszczenie drugorzędnej masy reserowanej z dodatkowymi masami na mimośrodkie względem osi toru.

## 2.3. Wyznaczenie momentu aerodynamicznego obrotowego pojazdu $M_A$

Moment aerodynamiczny obrotowy pojazdu można wyznaczyć ze wzoru:

$$M_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot A \cdot H \cdot C_{M,lee}(\beta) \quad (4)$$

gdzie:

$M_{A,lee}$  - aerodynamiczny moment obrotowy pojazdu względem punktu wierzchołkowego szyny zewnętrznej (tj. punktu obrotu przy ewentualnym wywracaniu się pojazdu),

$\rho$  - gęstość powietrza (1.225 kg/m<sup>3</sup>)

$A$  - powierzchnia boczna pojazdu (powierzchnia odniesienia),

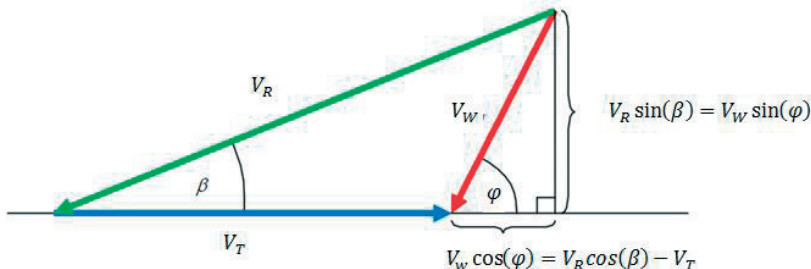
$H$  - wysokość dachu powyżej osi środkowej (wysokość referencyjna),

$C_{M,lee}(\beta)$  - aerodynamiczny współczynnik momentu obrotowego.

W sytuacji granicznej gdy  $M_A = M_R$ , równanie (4) można przekształcić w celu wyznaczenia względnej prędkości krytycznej wiatru  $V_R^{roll}$ :

$$V_R^{roll} = \sqrt{\frac{M_R}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot H \cdot C_{M,lee}(\beta^{roll})}} \quad (5)$$

Zależność między kątem natarcia wiatru  $\varphi$ , prędkością wiatru  $V_W$ , wypadkowym kątem wiatru do pociągu  $\beta$  (kątem względnym natarcia wiatru), wypadkową prędkością wiatru do pociągu  $V_R$  (prędkością względną wiatru) i prędkością pociągu  $V_T$  przedstawia rys. 2.1.



Rys. 1. Zależność kąta wiatru  $\varphi$  od względnego kąta wiatru  $\beta$ .

Z Rys. 1 wynika, że:

$$\tan(\beta) = \frac{V_W \cdot \sin(\varphi)}{V_T + V_W \cdot \cos(\varphi)}, \beta = \tan^{-1} \left( \frac{V_W \cdot \sin(\varphi)}{V_T + V_W \cdot \cos(\varphi)} \right) \quad (6)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{V_R \cdot \sin(\beta)}{V_R \cdot \cos(\beta) - V_T}, \varphi = \tan^{-1} \left( \frac{V_R \cdot \sin(\beta)}{V_R \cdot \cos(\beta) - V_T} \right) \quad (7)$$

$$V_R \cdot \sin(\beta) = V_W \cdot \sin(\varphi), V_W = \frac{V_R \cdot \sin(\beta)}{\sin(\varphi)} \quad (8)$$

Ponadto ważne są następujące wyrażenia (por. Rys.2.1):

$$V_R \cos(\beta) = V_T + V_W \cos(\varphi) \quad (9)$$

$$(V_T + V_W \cos(\varphi))^2 + (V_W \sin(\varphi))^2 = V_R^2 \quad (10)$$

$$V_R = V_W \sqrt{1 + 2 \frac{V_T}{V_W} \cos(\varphi) + \left( \frac{V_T}{V_W} \right)^2} \quad (11)$$

Gdy wiatr wieje w kierunku prostopadłym do pociągu ( $\varphi = 90^\circ$ ):

$$V_R = \frac{V_W}{\sin(\beta)} = \frac{V_T}{\cos(\beta)} = \sqrt{V_T^2 + V_W^2} \quad (12)$$

$$V_W = V_R \sin(\beta) = V_T \operatorname{tg}(\beta) = \sqrt{V_R^2 - V_T^2} \quad (13)$$

## 2.4. Zagadnienie określenia krytycznej prędkości wiatru wywrócenia pociągu

Zagadnienie określenia krytycznej prędkości wiatru wywrócenia pociągu jest opisane czterema nieliniowymi równaniami z czterema niewiadomymi:  $V_R^{\text{roll}}, \beta^{\text{roll}}, \varphi^{\text{roll}}, V_W^{\text{roll}}$  (por. zależności (5), (6), (7), (8)):

$$V_R^{\text{roll}} = \sqrt{\frac{M_R}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot H \cdot C_{M,lee}(\beta^{\text{roll}})}} \quad (14)$$

$$\beta^{\text{roll}} = \tan^{-1} \left( \frac{V_W^{\text{roll}} \sin(\varphi^{\text{roll}})}{V_T + V_W^{\text{roll}} \cos(\varphi^{\text{roll}})} \right) \quad (15)$$

$$\varphi^{\text{roll}} = \tan^{-1} \left( \frac{V_R^{\text{roll}} \sin(\beta^{\text{roll}})}{V_R^{\text{roll}} \cos(\beta^{\text{roll}}) - V_T} \right) \quad (16)$$

$$V_W^{\text{roll}} = \frac{V_R^{\text{roll}} \sin(\beta^{\text{roll}})}{\sin(\varphi^{\text{roll}})} \quad (17)$$

## 2.5. Autorska metodologia obliczania krytycznej prędkości wiatru $V_W^{\text{roll}}$

### 2.5.1. Przypadek dowolnego kierunku wiatru $\varphi$

Własną propozycję procedury iteracyjnej ilustruje schemat przedstawiony na rys.2.

### 2.5.2. Szczególny przypadek gdy $\varphi=90^\circ$

W przypadku wiania wiatru prostopadle do jadącego pociągu, uproszczone równania można przedstawić następująco:

$$V_R^{\text{roll}} = \sqrt{\frac{M_R}{0,5 \rho A H C_{M,lee}(\beta^{\text{roll}})}} \quad (18)$$

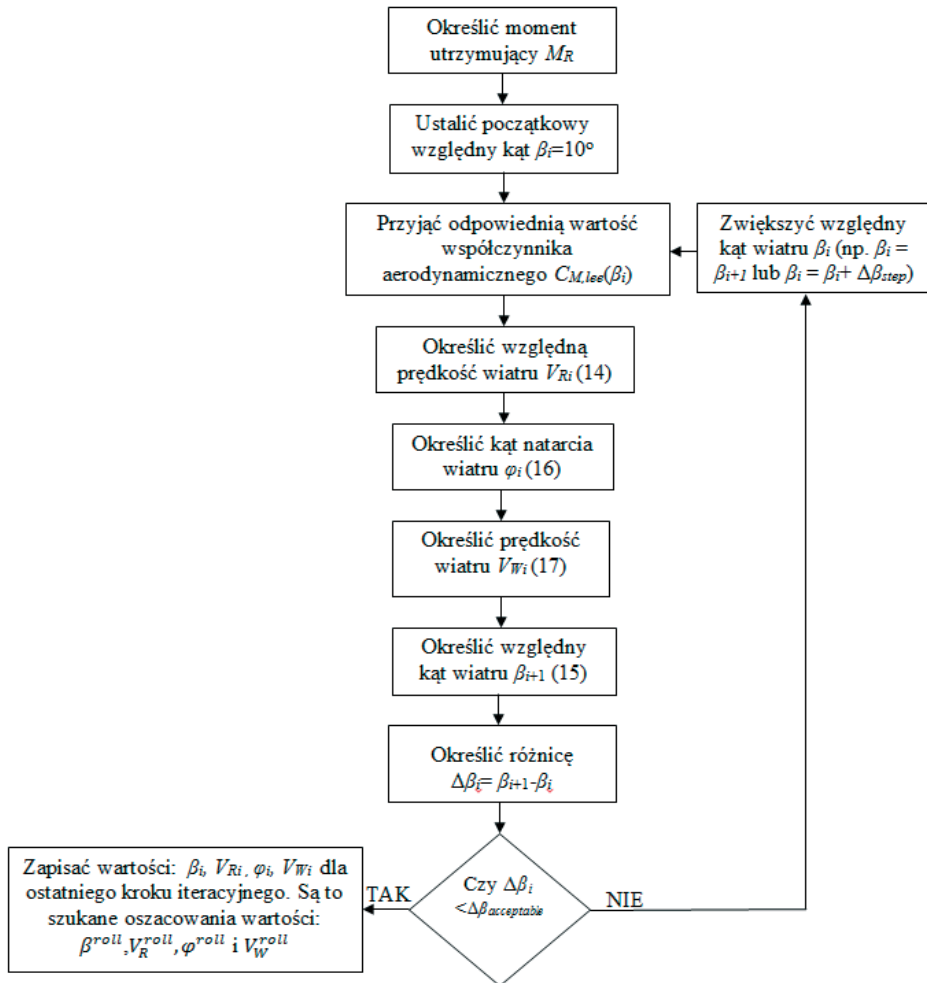
$$V_R^{\text{roll}} = \frac{V_T}{\cos(\beta^{\text{roll}})} \quad (19)$$

$$V_W^{\text{roll}} = V_T \operatorname{tg}(\beta^{\text{roll}}) \quad (20)$$

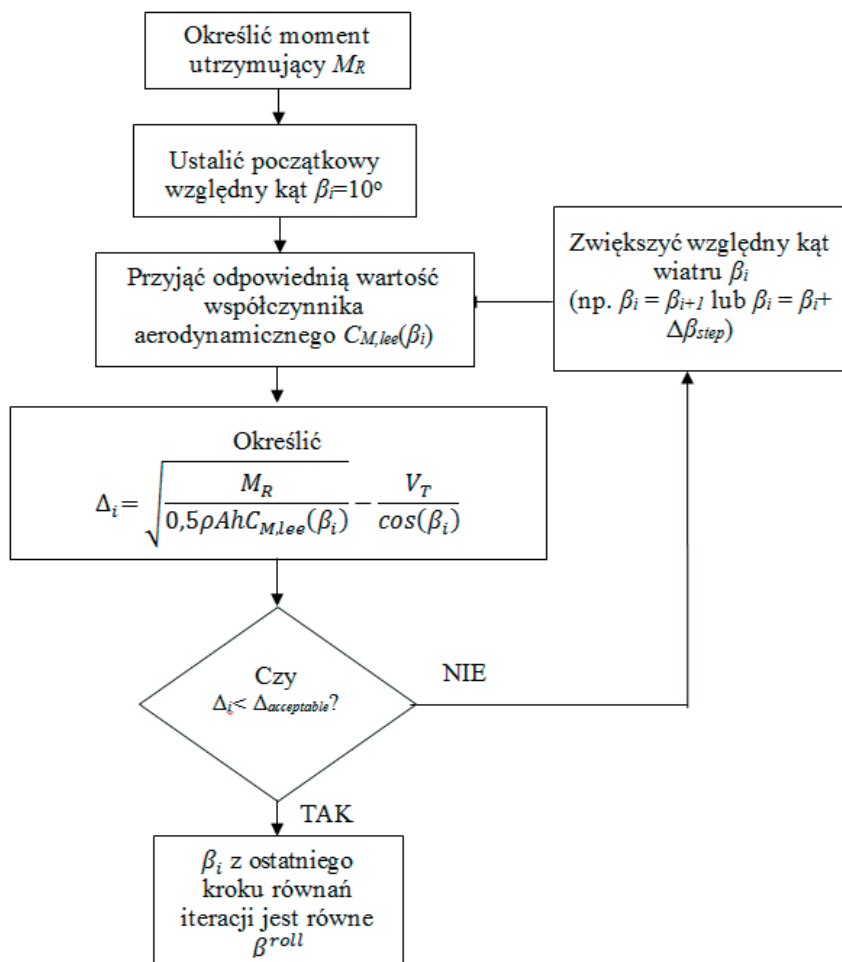
Wzory (21) i (22) można przekształcić do postaci:

$$\sqrt{\frac{M_R}{0,5 \rho A H C_{M,lee}(\beta^{\text{roll}})}} - \frac{V_T}{\cos(\beta^{\text{roll}})} = 0 \quad (21)$$

Jest to nieliniowe równanie do określenia  $\beta^{roll}$ . Również w tym przypadku potrzebna jest procedura iteracyjna. Schemat przedstawiono na rys. 3. Po określeniu wartości  $\beta^{roll}$ , oszacowaną wartość  $V_W^{roll}$  można obliczyć z wzoru 20.



Rys.2. Schemat proponowany przez autora do obliczania krytycznej prędkości wiatru  $V_W^{roll}$  dla dowolnego kierunku wiatru  $\varphi$ .

Rys. 3. Schemat określania względnego kąta wiatru  $\beta^{roll}$ .

### 2.5.3. Przykłady obliczeniowe wyznaczania prędkości krytycznej $V_W^{roll}$ .

- **Przykład 1 - pojazd FEA-B wagon + 1x40ft contener [5]**

Dane wejściowe:

$$\varphi = 90^\circ$$

$$M_R = 180995 \text{ Nm}$$

$$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 42,266 \text{ m}^2$$

$$H = 3,117 \text{ m}$$

$$B = \frac{M_R}{0,5\rho AH} = 2243,02 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$V_T = 33,33 \text{ m(s)} \text{ (120 km/h)}$$

$\beta$	$C_{M,lee}(\beta)$	$\sqrt{\frac{B}{C_{M,lee}(\beta)}}$	$\frac{V_T}{\cos(\beta)}$	$\Delta_c = \sqrt{\frac{B}{C_{M,lee}(\beta)}} - \frac{V_T}{\cos(\beta)}$	$V_T \operatorname{tg}(\beta)$
[°]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
5	0.05	211.80	33.67	178.14	2.90
10	0.1	149.77	34.01	115.76	5.87
15	0.2	105.90	34.72	71.18	8.93
20	0.29	87.95	35.46	52.49	12.13
25	0.41	73.96	36.63	37.34	15.53
30	0.55	63.86	38.31	25.55	19.23
35	0.68	57.43	40.65	16.79	23.33
40	0.77	53.97	43.29	10.69	27.96
45	0.8	52.95	46.94	6.01	33.33
50	0.8	52.95	52.08	0.87	39.73
55	0.79	53.28	58.47	-5.19	-47.60
90	0.79	53.28	-	-	-

$$\beta^{roll} = 50 + \frac{5 \cdot 39.73}{5 + 47.60} = 53.78^\circ$$

$$V_W^{roll} = 33.33 \cdot \operatorname{tg}(53.78^\circ) = 45.50 \text{ m/s}$$

$$V_W^{roll, stationary} = 53.28 \text{ m/s dla } \beta = 90^\circ$$

• **Przykład 2 – sam kontener 3x20ft na wagonie FEA-B**

Dane wejściowe:

$$\varphi = 90^\circ$$

$$m_c = 3 \cdot 2400 = 7200 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$w_c = 2,438 \text{ m}$$

$$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

$$A_c = 3 \cdot 15,474 = 46,422 \text{ m}^2$$

$$H_c = 2,591 \text{ m}$$

$$B_c = \frac{m_c g w_c}{\rho A_c H_c} = 1168,71 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$V_T = 33,33 \text{ m/s (120 km/h)}$$

$\beta$	$C_{Mc}(\beta)$	$\sqrt{\frac{B_c}{C_{Mc}(\beta)}}$	$\frac{V_T}{\cos(\beta)}$	$\Delta_c = \sqrt{\frac{B_c}{C_{Mc}(\beta)}} - \frac{V_T}{\cos(\beta)}$	$V_T \operatorname{tg}(\beta)$
[°]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
5	0.08	120.87	33.67	87.20	2.90
10	0.17	82.91	34.01	48.90	5.87
15	0.27	65.79	34.72	31.07	8.93
20	0.4	54.05	35.46	18.60	12.13
25	0.58	44.89	36.63	8.26	15.53
30	0.78	38.71	38.31	0.40	19.23
35	0.94	35.26	40.65	-5.39	-23.33
40	1.06	33.20	43.29	-10.08	-27.96
45	1.09	32.74	46.94	-14.20	-33.33
50	1.09	32.74	52.08	-19.33	-39.73
90	1.11	32.45	-	-	-

$$\beta^{roll} = 30 + \frac{5 \cdot 19.23}{5 + 23.33} = 33.39^\circ$$

$$V_{Wc}^{roll} = 33.33 \cdot tg(33.39^\circ) = 21.97 \text{ m/s}$$

$$V_{Wc,stationary}^{roll} = 32.45 \text{ m/s}$$

## Literatura

- 1 Detachment of containers from freight wagons near Cheddington and Hardendale. 1 March 2008. Raport 12/2009 May 2009, RAIB, Department of Transport.
- 2 Investigation of freight vehicle aerodynamic performance in accordance with GM/RT 2142 Resistance of Railway Vehicles to Roll-Over in Gales. March 2012 RSSB.
- 3 Resistance of Railway Vehicles to Roll-Over in Gales GM/RT 2142 Issue 2. October 2000.
- 4 Resistance of Railway Vehicles to Roll-Over in Gales GM/RT2142 Issue 3. August 2009
- 5 Flaga A. Expert opinion on resistance of railway vehicles to roll-over in gales and on possibility of blowing off 20ft and 40ft freight containers from S04a FEA-B wagons running in the draft of wagons at maximum velocity 120 km/h. Wagony Świdnica S.A. 35 Strzebińska Street, 58-100 Świdnica, 2013.

## Resistance of railway vehicles to roll-over in strong across winds

**Andrzej Flaga**

*Wind Engineering Laboratory, Cracow University of Technology, e-mail: LIWPK@windlab.pl*

**Abstract:** In the paper, the problem of resistance of railway vehicles to roll-over in gales was presented and analysed. Basic formulae describing this problem together with the authorial methodology of determination of the intrinsic roll-over wind velocity for a vehicle were derived and analysed.

**Keywords:** railway vehicles, roll-over, strong wind.

