

## Justification of application of a tilting body system to the high-speed trains

### Zasadność stosowania systemu przechylnego pudła w pociągach kolei dużych prędkości

*The paper presents a simplified analysis of theoretical travels of high-speed train units. The results of the analysis were based on theoretical travels of the trains in various variants and for various travel scenarios. The data so obtained lead to the conclusion that the tilting body system gives measurable benefits. Nevertheless, the effects obtained result in increased expenditure in the construction phase and later during the operation. Therefore, it is in any case necessary to make detailed analyzes of future advantages and costs to be incurred.*

*W artykule przedstawiono uproszczoną analizę dotyczącą przejazdów teoretycznych pociągów zespolonych na wysokie prędkości. Wyniki analizy oparto na przejazdach teoretycznych pociągów w różnych wariantach wykonania i dla różnych scenariuszy jazdy. Uzyskane dane pozwalają wyciągnąć wniosek, że system przechylnych pudła daje wymierne zyski, ale uzyskane efekty wiążą się z koniecznością poniesienia nakładów w fazie budowy i późniejszej eksploatacji. Konieczne jest zatem w każdym przypadku dokonania analiz szczegółowych późniejszych zysków i poniesionych kosztów.*

#### 1. Introduction

The United Aircraft TurboTrain operated by Canadian National Railways, travelling regularly in North America since 1968, is considered to be the first tilting body train in the world. It provided daily passenger service between Montreal and Toronto at a speed of 160 km/h. In 1982 it was replaced by Bombardier LRC United Aircraft (UAC) Turbo trains, used also by Amtrak between Boston and New York. The UAC Turbos were equipped with a passive tilting mechanism based on a four-bar system, providing inspiration for the second generation of the TALGO trains.

Before the decision on the use of the tilting body system in a newly built train unit, it is advisable to analyze the meaningfulness of the high-speed rail project, based on a profit and loss statement.

The profits and losses of the tilting body system used in HSR trains may be summarized as follows:

- the losses: the cost of installation of the tilting system of the body with respect to the bogies and the pantographs with respect to the body, adverse effect on the track;
- the profits: no slowing down and no accelerating to previous speed – resulting in energy saving, shorter travel time resulting in better attractiveness of the transport offer and less restrictions imposed on designing of the course of a new railway line.

#### 1. Wprowadzenie

Za pierwszy na świecie pociąg z przechylnym nadwoziem uważany jest eksploatowany przez Canadian National Railways pociąg United Aircraft TurboTrain, który zaczął regularnie kursować w Ameryce Północnej w 1968 roku. Zapewniał codzienną obsługę między Montrealem a Toronto z prędkością 160 km/h. W 1982 r. został zastąpiony przez pociągi Bombardier LRC United Aircraft Turbos, które były również używane przez Amtrak do połączeń między Bostonem a Nowym Jorkiem. UAC Turbos miał pasywny mechanizm przechyłu oparty na czteropasmowym układzie czterech belek i zainspirował drugą generację pociągów TALGO.

Przed podjęciem decyzji o zastosowaniu systemu przechylnego pudła w nowobudowanym pociągu zespolonym celowe jest wykonanie analizy pod kątem zasadności tego przedsięwzięcia dla kolei dużych prędkości, w oparciu o zestawienie strat i korzyści.

Straty i korzyści zastosowania systemu przechyłu w pociągach KDP można zestawić następująco:

- straty: koszty zabudowy systemu przechyłu pudła względem wózków i pantografów względem pudła, negatywne oddziaływanie na torowisko
- korzyści: brak przyhamowań i konieczności „odzyskiwania” prędkości, co wiąże się z oszczędnością energii, krótszy czas przejazdu, co zwiększa atrakcyjność oferty przewozowej oraz mniejsze

Therefore, in order to obtain objective arguments at least a simplified simulation of the travel on the route (e.g. of the length of 110 km at a speed of 250 km/h) should be made, without decreasing the travel speed and with twice repeated deceleration to e.g. 120 km/h at 500m track sections.

The result referred to the planned routes of operation of the Polish HSR train (with or without curves) shall enable assessing whether the profit consisting in shorter travel time and the amount of the energy necessary for two accelerations from 120 km/h to a maximum of 250 km/h justifies additional cost of the tilting system to be assembled on the train. The cost of such an additional system amounts to several percent of the cost of the bogies.

In the paper [2] are presented basic parameters of selected train units operated in Europe.

## 2. Restrictions related to the force of vehicle – track interaction and the passenger comfort

The basis for adopting allowable values of the forces acting between the railway vehicle wheelsets and the track as well as the accelerations arising on the vehicle is the PN-EN-14363 Standard. The Tables 1 and 2 below include the most important among these values.

ograniczenia w wyznaczeniu przebiegu nowej linii kolejowej.

W związku z tym, dla uzyskania obiektywnych argumentów, zasadne jest przeprowadzenie uproszczonej choćby symulacji przejazdu na trasie (np. o długości 110 km z prędkością 250 km/h) bez ograniczania prędkości jazdy i z przykładowo dwukrotnym ograniczeniem prędkości do np. 120 km/h na odcinku 500 m.

Wynik odniesiony do planowanych tras eksploatacji polskiego pociągu KDP (z łukami lub bez nich) pozwoli ocenić, czy zysk w postaci krótszego czasu przejazdu i oszczędności energii potrzebnej do dwóch rozruchów z prędkości 120 km/h do maksymalnej 250 km/h, uzasadnia dodatkowe koszty wyposażenia pociągu w system przechyłu. Koszt takiego dodatkowego systemu wynosi kilka procent kosztu wózków.

W publikacji [2] przedstawiono podstawowe parametry wybranych pociągów zespolonych (zespołów trakcyjnych) eksploatowanych w Europie.

## 2. Ograniczenia w zakresie sił oddziaływania pojazdu na torowisko i komfortu pasażerów

Podstawą do przyjęcia wartości dopuszczalnych sił działających między zestawami kołowymi pojazdów kolejowych a torem oraz przyspieszeń na pojeździe

Table 1. Specification of evaluated parameters and threshold values relevant for running safety [5]

Tablica 1. Zestawienie wartości ocenianych i wartości granicznych dla bezpieczeństwa jazdy [5]

Assessment quantity L = to be compared with limit value; D = to be documented, but not to be compared with the limit value	Test method			Limit values		
	Normal	Simplified H-Force	Simplified acceleration	Locomotives, Traction units, passenger vehicles	Freight wagons with bogies	Freight wagons with single axles
<b>Running safety</b>						
Sum of guiding forces of left and right wheel	$\Sigma Y_{j,max}$ ( $Y_{l1} + Y_{r1}$ )	L	—	—	$k_1$ (10 kN + $P_{r0}/3$ ) $k_1 = 1,0$	$k_1$ (10 kN + $P_{r0}/3$ ) $k_1 = 0,85$
Quotient of lateral and vertical wheel force $\frac{Y}{Q}$	$(Y/Q)_{l,r,max}$	L	—	—	0,80 *	
Lateral axle box force	$H_{j,max}$	—	L	—	$k_2$ (10 kN + $P_{r0}/3$ ) $k_2 = 0,90$	$k_2$ (10 kN + $P_{r0}/3$ ) empty: $k_2 = 0,75$ ; loaded: $k_2 = 0,80$
Lateral acceleration on bogie frame above axle box	$\ddot{y}_{j,max}^*$ (only bogie vehicles)	$\frac{D}{D}$ $\frac{D}{D}$	$\frac{D}{D}$ $\frac{D}{D}$	L	12 m/s <sup>2</sup> – ( $m^* / 5 t$ ) · m/s <sup>2</sup>	
Lateral acceleration on vehicle body above running gear	$\ddot{y}_{r,max}$	D	D	L	Test zone 1, 2: 3,0 m/s <sup>2</sup> c Test zone 3: 2,8 m/s <sup>2</sup> c Test zone 4: 2,6 m/s <sup>2</sup> c	$P_{r0} \leq 60$ kN: 4,0 m/s <sup>2</sup> c 60 kN < $P_{r0} < 200$ kN: 4,43 m/s <sup>2</sup> – ( $P_{r0}/140$ kN) · m/s <sup>2</sup> c $P_{r0} \geq 200$ kN: 3,0 m/s <sup>2</sup> c
Vertical acceleration on vehicle body above running gear	$\ddot{z}_{r,max}$	D	L	L	3,0 m/s <sup>2</sup> single suspension or deflated air spring: 5,0 m/s <sup>2</sup>	5,0 m/s <sup>2</sup> d

The Table 3 below lists typical maximum approximate values relevant for the riding qualities.

Taking into account the high-speed rail, the force [in kN] shifting the track span laterally with regard to its axis, determined according to the formula  $2P_{P0}/3+10$  [3, 4, 5], is the most important threshold value. The force enables to induce the unbalanced lateral acceleration on the vehicle bogies reaching approximately up to 2.5 m/s<sup>2</sup> [5]. Assuming that the quasi-static part of the acceleration acting on the passengers amounts to 1.0 m/s<sup>2</sup>, being limited by the maximum value arising on

jest norma PN-EN-14363. Poniżej, w tablicach 1 i 2 przytoczono najistotniejsze z tych wartości.

W poniższej tablicy 3 podano typowe maksymalne przybliżone wartości dla właściwości biegowych.

Z punktu widzenia kolei dużej prędkości najistotniejszą wartością ograniczającą jest siła przesuwająca przęsło toru w kierunku poprzecznym do jego osi [w kN] wynikająca z wzoru  $2P_{P0}/3+10$  [3, 4, 5], umożliwiającą realizację niezrównoważonego przyspieszenia poprzecznego na wózkach pojazdu do ok. 2,5 m/s<sup>2</sup> [5]. Przyjmując, że quasi-statyczna część przyspieszenia działająca na

Table 2. Specification of evaluated parameters and threshold values relevant for track loading [5]

Tablica 2. Zestawienie wartości ocenianych i wartości granicznych dla obciążenia toru [5]

Assessment quantity L = to be compared with limit value; D = to be documented, but not to be compared with the limit value	Test method			Limit values		
	Normal	Simplified H-Force	Simplified acceleration	Locomotives, Traction units, passenger vehicles	Freight wagons with bogies	Freight wagons with single axes
<b>Track loading</b>						
Quasi-static guiding force	$Y_{j,qst}$	(L)*	—	—	60 kN	
Quasi-static vertical wheel force	$Q_{j,qst}$	L	—	—	$P_{r0} \leq 225$ kN: 145 kN $225$ kN < $P_{r0} \leq 250$ kN: 155 kN	
Max. vertical wheel force	$Q_{j,max}$	L	—	—	Test zones 1 and 2: $V_{dms} \leq 160$ km/h: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{2}$ ; 200 kN) $160$ km/h < $V_{dms} \leq 200$ km/h: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{2}$ ; 190 kN) $200$ km/h < $V_{dms} \leq 250$ km/h: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{2}$ ; 180 kN) $250$ km/h < $V_{dms} \leq 300$ km/h: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{2}$ ; 170 kN) $V_{dms} > 300$ km/h: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{2}$ ; 160 kN) Test zones 3 and 4: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{2}$ ; 200 kN) For all test zones with $V_{dms} \leq 100$ km/h and $225$ kN < $P_{r0} \leq 250$ kN: MIN(90 kN + $\frac{P_{r0}}{2}$ ; 210 kN)	
Quasi-static rail load parameter $f$ $ Y_{j,qst}  + 0,83 Q_{j,qst}$	$B_{j,qst}$	D	—	—	—	
Max guiding force $f$	$Y_{j,max}$	D	—	—	—	
Max rail load parameter $f$ $( Y +0,91 \cdot Q)_{max}$	$B_{j,max}$	D	—	—	—	
Rail surface damage quantity (see [3])	$T_{qt}$	$\frac{P_{r0}}{2}$ D $\frac{P_{r0}}{2}$ F	—	—	—	

the car body of the order of  $1.5 \text{ m/s}^2$  (see the table above), the train may run through horizontal track curves with the speed significantly exceeding the regular one if the car body is tilted by up to  $8^\circ$ . This is shown in Table 4 below, the data of which were used for purposes of further calculations.

pasażerów wyniesie  $1,0 \text{ m/s}^2$ , co jest ograniczone przez wartość maksymalną na nadwoziu rzędu  $1,5 \text{ m/s}^2$  (patrz tabela powyżej), stosując przechył nadwozi o kąt do  $8^\circ$ , można na łukach torowych poziomych poruszać się z prędkościami znacznie podwyższonymi w stosunku do regulaminowych. Przedstawiono to w poniższej tabelicy 4, z której dane wykorzystano w dalszych obliczeniach.

Table 3. Typical maximum approximate values relevant for the riding qualities [5]

Tablica 3. Typowe maksymalne przybliżone wartości dla właściwości biegowych [5]

Assessment, vehicle, test conditions	Typical maximum estimated values for accelerations in vehicle body [m/s <sup>2</sup> ]	
	$\ddot{y}_{q,max}^*$	$\ddot{z}_{q,max}^*$
Ride characteristics		
Locomotives, power cars (without shunting locomotives)	2,5	2,5
Shunting locomotives	to be defined.	to be defined.
Multiple units, passenger coaches	1,5	2,0
Freight wagons with bogies, empty	< 3 (preliminary)	< 5 (preliminary)
Freight wagons with bogies, loaded	3,5	5,0
Freight wagons without bogies, empty	to be defined.	to be defined.
Freight wagons without bogies, loaded	to be defined.	to be defined.

NOTE The stated ranges for the vehicle types represent the maximum estimated values measured on several vehicles during tests according to UIC 518 [11] or EN 14363:2005. For each vehicle the highest evaluated values of the different measuring points according to Table 3 were used (in normal and not in fault mode condition).

**Table 4. Relationship between the train permissible speed and the curve radius**  
**Tablica 4. Zależność dopuszczalnej prędkości jazdy od promienia łuku**

Zależność dopuszczalnej prędkości jazdy $V_{dop}$ [km/h] od promienia łuku $R$ i niezrównoważonego przyspieszenia dośrodkowego $bg$ / Dependence of the train permissible speed $V_{dop}$ on the curve radius $R$ and unbalanced centripetal acceleration $bg$							
Dopuszczalne przyspieszenie poprzeczne dla pasażerów / Allowable transverse acceleration of the passenger							
$ay^*$ [m/s <sup>2</sup> ]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Wymagana przechyłka nadwozi względem toru (PGS) / Required tilt of the vehicle body with regard to the track (RHL)							
$fx^*$ [deg]	8,76	5,84	2,92	0,00	0,00	0,00	0,00
Niezrównow. przyspieszenie dośrod. (na PGS) / Unbalanced centripetal acceleration (on RHL)							
$bg$ [m/s <sup>2</sup> ]	2,50	2,00	1,50	1,00	0,50	0,00	
Promień łuku torowego na odcinku / Radius of the track curve on the section							
$R$ [m]	$V_{dop} = ((bg+1)*R)^{0.5} * 3.6$						
300	117	108	99	88	76	62	
600	165	153	139	125	108	88	
900	202	187	171	153	132	108	
1200	233	216	197	176	153	125	
1500	261	241	220	197	171	139	
1800	286	265	241	216	187	153	
2100	309	288	261	233	202	165	
2400	330	305	279	249	216	176	
2700	350	324	296	265	229	187	
3000	369	342	312	279	241	197	
3300	387	358	327	292	253	207	
3600	404	374	342	305	265	216	
3900	421	389	355	318	275	225	
4200	436	404	369	330	286	233	
4500	452	418	382	342	296	241	
4800	467	432	394	353	305	249	
5100	481	445	406	364	315	257	
5400	495	458	418	374	324	265	
5700	508	471	430	384	333	272	
6000	522	483	441	394	342	279	
6300	535	495	452	404	350	286	
6600	547	507	462	414	358	292	
6900	559	518	473	423	366	299	
7200	571	529	483	432	374	305	
7500	583	540	493	441	382	312	

### 3. Simulation of the high-speed train passage on a line section

The travel time values and the energy consumption (net) for traction purposes are determined and presented below, for the trains with maximum speeds of 200, 250 and 300 km/h and selected curve scenarios on the line and car body tilting. In order to implement these scenarios, the examples of theoretical traction, starting up and braking characteristics shown in Figures 1÷6 were used.

The simulation results of several variants of the train passages, including the travel times and energy consumption values, are presented in Tables 5 and 6.

In case of all the scenarios the traction powers 8, 6.4 and 4.8 MW were adopted. The scenarios differ each from other by the following parameters:

- unbalanced centripetal acceleration - 0 or 2 m/s<sup>2</sup>;
- permissible curve speed - 125, 176 or 305 km/h.

The results included in the tables and graphs, showing the travel time and traction energy consumption necessary for the travel on an exemplary section of the 110 km long railway line, give evidence of their dependence on maximum operating speed of the travel, that is consistent with the intuition. The travel time values decrease approximately in an inverse linear proportion to the speed values, equal to 200, 250 and 300 km/h. At the same time, the energy consumption grows in proportion to speed square, which is a result of the loss of kinetic energy necessary for accelerating of the train and irretrievably lost when braking, as well as the loss related to

### 3. Symulacja przejazdu odcinka linii pociągami dużych prędkości

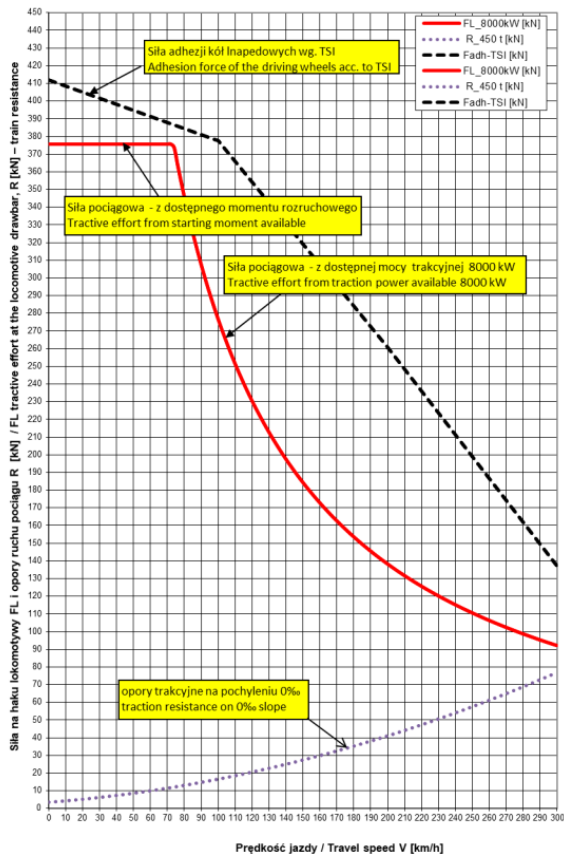
Poniżej określono i przedstawiono czasy przejazdu i zużycie energii (netto) na cele trakcyjne dla pociągów o prędkościach maksymalnych 200, 250 i 300 km/h dla wybranych scenariuszy łuków na linii i przechyłania nadwozi. Dla zrealizowania tych scenariuszy zastosowano przykładowe teoretyczne charakterystyki trakcyjne oraz rozruchowe i hamowania dla toru płaskiego, przedstawione na poniższych rysunkach 1÷6. Wyniki symulacji przejazdów kilku wariantów pociągów pod kątem czasów przejazdu i zużycia energii przedstawiono w tablicach 5 i 6.

Dla wszystkich zestawionych scenariuszy przyjęto moce trakcyjne: 8, 6.4 i 4.8 MW. Scenariusze różnią się następującymi parametrami:

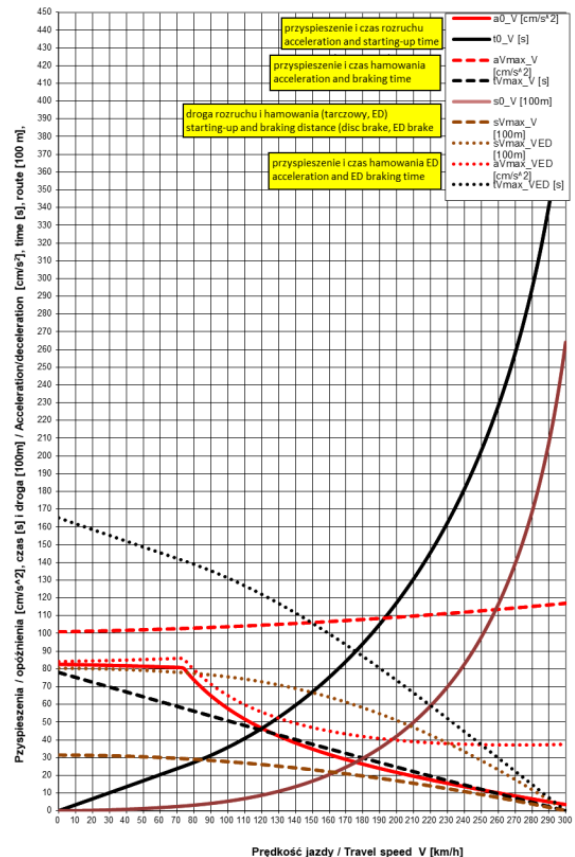
- nierównoważone przyspieszenie dośrodkowe - 0 lub 2 m/s<sup>2</sup>
- dopuszczalne prędkość na łuku - 125, 176 lub 305 km/h.

Z pokazanych w tablicach i na wykresach wyników czasu przejazdu i zużycia energii trakcyjnej na pokonanie przykładowego odcinka linii kolejowej o długości 110 km wynika intuicyjna ich zależność od zastosowanej maksymalnej prędkości eksploatacyjnej. Czasy przejazdu spadają w przybliżeniu w odwrotnej liniowej proporcji do prędkości jazdy 200, 250 i 300 km/h, natomiast zużycie energii rośnie w proporcji kwadratowej, co jest uzasadnione stratą energii kinetycznej włożonej na rozpędzenie pociągu i bezpowrotnie traconej przy jego hamowaniu, a także stratą na

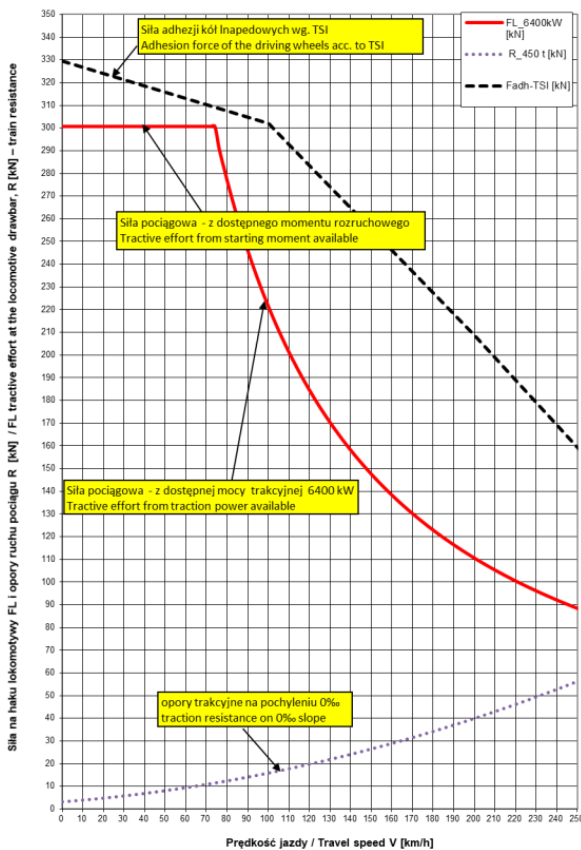




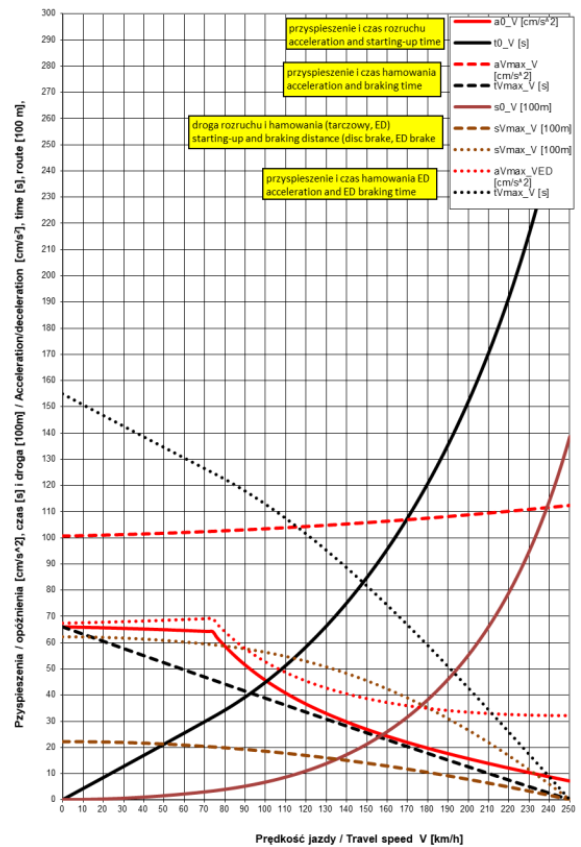
Rys. 1. Charakterystyka trakcyjna pociągu o mocy 8 MW i masie 450 t  
Fig. 1. Traction characteristics of an 8 MW and 450 t train



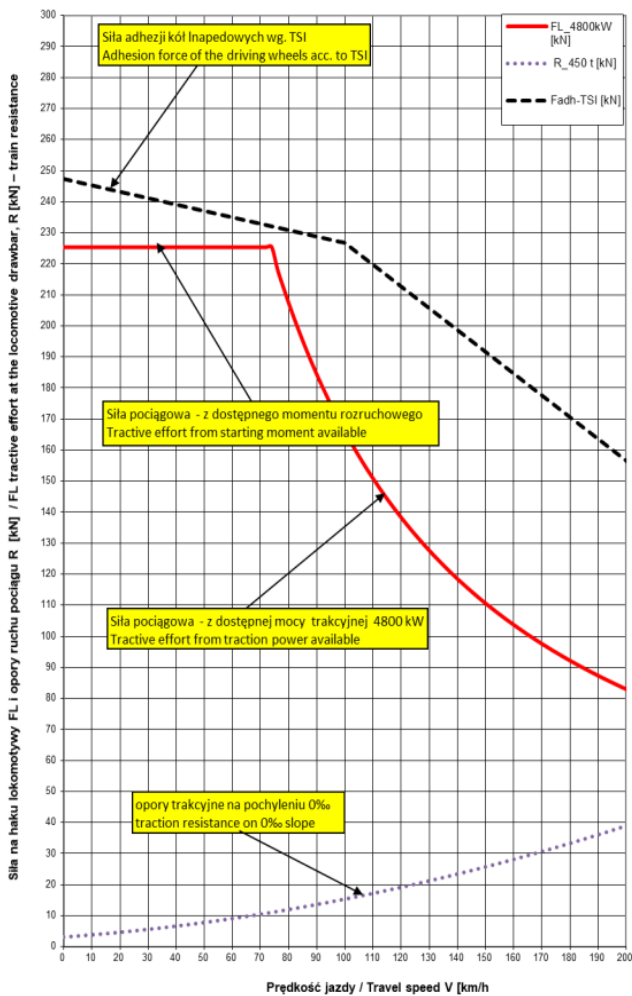
Rys. 2. Parametry rozruchu pociągu o mocy 8 MW i hamowania pociągu o masie 450 t na torze poziomym  
Fig. 2. Starting up parameters of an 8 MW train and braking parameters of 450 tons mass train on horizontal track



Rys. 3. Charakterystyka trakcyjna pociągu o mocy 6,4 MW i masie 450 t  
Fig. 3. Traction characteristics of an 6,4 MW and 450 t train

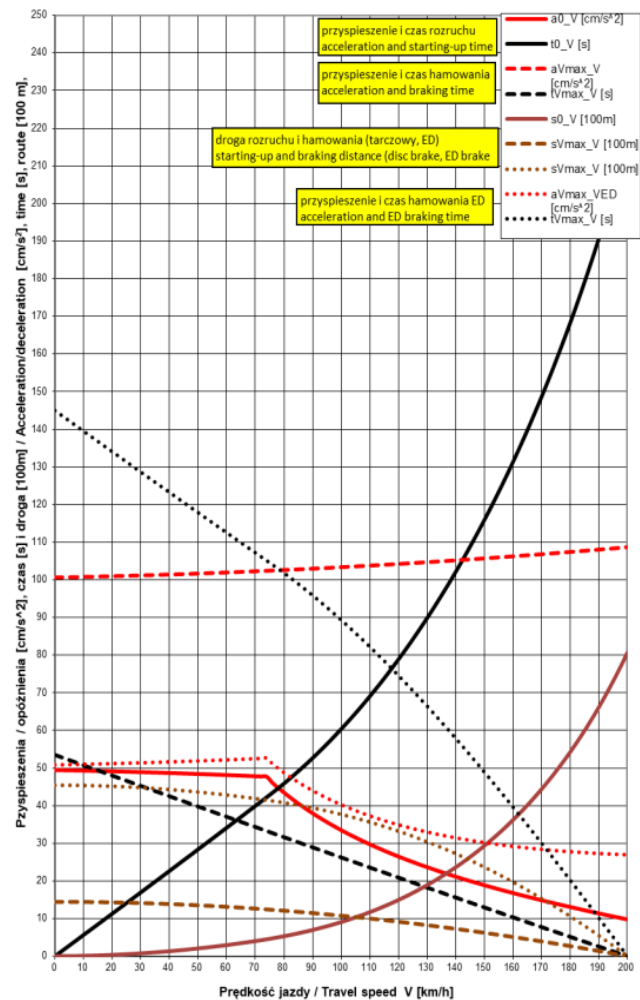


Rys. 4. Parametry rozruchu pociągu o mocy 6,4 MW i hamowania pociągu o masie 450 t na torze poziomym  
Fig. 4. Starting up parameters of a 6.4 MW train and braking parameters of 450 tons mass train on horizontal track



Rys. 5. Charakterystyka trakcyjna pociągu o mocy 4,8 MW i masie 450 t  
 Fig. 5. Traction characteristics of an 4,8 MW and 450 t train

overcoming aerodynamic resistance while driving, which is also proportional to the speed square. Maximum loss of the travel time on the line section results from accelerating of the train to its maximum speed. The loss several times exceeds the one while using a friction brake. On the other hand, while using an electrodynamic brake, the time loss is much higher and nearly equal to that arising while accelerating. Electrodynamic braking entails significantly lower operating costs than friction braking, nevertheless, the travel lasts longer, that should be taken into account while formulating the future timetables. The use of a structure provided with active body tilting, that counteracts the unbalanced centripetal accel-



Rys. 6. Parametry rozruchu pociągu o mocy 4,8 MW i hamowania pociągu o masie 450 t na torze poziomym  
 Fig. 6. Starting up parameters of a 4.8 MW train and braking parameters of 450 tons mass train on horizontal track

pokonanie aerodynamicznych oporów jazdy proporcjonalnych do kwadratu prędkości. Największe straty czasu przejazdu odcinka linii wynikają z rozpędzania pociągu do prędkości maksymalnej, które są wielokrotnie większe od czasów hamowania hamulcem ciernym. W przypadku hamowania pociągu hamulcem elektrodynamicznym straty czasu są znacznie wyższe i prawie jednakowe jak te przy rozpędzaniu. Hamowanie elektrodynamiczne generuje znacznie niższe koszty eksploatacji niż hamulce ciernie, ale wydłuża czasy przejazdu, co trzeba brać pod uwagę formułując w przyszłości rozkłady jazdy. Zastosowanie konstrukcji z aktywnym przechyłem nadwozi, przeciwdziałającym niezrównoważonemu

eration (bg), is complex and expensive, both under the construction phase and later during the operation. The advantages resulting from body tilting that enable maintenance of maximum travel speed on horizontal curves, allow to reduce the total train travel time and to decrease the traction energy consumption.

A tilting box offers significant advantages in case of building a high-speed rail line in an area imposing the restrictions resulting from the terrain topography, requiring a large number of curves (bypassing the hills, bypassing unstable ground, the problems with land purchase).

It should be taken into account that any train speed reduction before a curve gives rise to the losses caused by braking (wear of the brake components, loss of the power necessary to cool braking resistors, growth of the travel time) and by further increase in the speed from its value permissible on the curve to the operating speed at the line.

The decision to provide the train with a tilting box (installation of the tilting mechanisms on the bogies and in the pantograph systems) should be preceded by detailed studies based on specific input data (the parameters of the route, assumed travel times, equipment and operating costs, the energy, wear of the brake components).

Summary of the gain related to the traction energy consumption in kWh in case of the travels of the trains provided with tilting mechanisms as compared to the ones without such a device is presented in Table 7 below.

#### **4. Conclusions**

The presented juxtaposition gives evidence that, depending on the train parameters and running variants, the saving of the energy consumption on the assumed 110 km long theoretical route with two curves in case of a train provided with tilting body amounts from 81 kWh to 491 kWh (i.e. from 3.2 to 28.7%), while the time saving is 100 s up to 363 s, respectively, (equal from 4.8 to 21.6%).

As it may be noticed, in some cases the energy savings are significant. The amount of speed reduction before the curves, the radii of which depend only on the railway line design, is predominant in this case. On newly built lines, and even more often on the modernized lines, the increase in the curve radii is usually subject to severe restriction caused by the terrain configuration or the amount of land acquisition costs. The need to increase the train speed on winding lines, the modernization of which turns out to be difficult, imposes the use of the body and pantograph tilting devices being the only possible solution.

Final assessment of significance of the benefits estimated this way should be made with consideration of future price of the energy and reduction of the impact on the environment. Undoubtedly, in the nearest

przyspieszeniu dośrodkowemu (bg), jest skomplikowane i kosztowne, zarówno w fazie budowy, jak i późniejszej eksploatacji. Korzyści wynikające z zastosowania przechyłu nadwozi pozwalające na utrzymanie maksymalnych prędkości przejazdu na łukach poziomych, muszą być odnoszone do mniejszych sumarycznych czasów przejazdu pociągu i mniejszego zużycia energii na cele trakcyjne.

Przechylne pudło daje istotne korzyści w przypadku konieczności budowy linii kolei dużych prędkości w terenie narzucającym ograniczenia wynikające z ukształtowania terenu narzucającego dużą liczbę łuków (omijanie dużej liczby wzniesień, omijanie gruntu słabo związanego, problemy z przejściem gruntu).

Należy mieć na uwadze, że każde zwolnienie pociągu przed łukiem związane jest ze stratami związanymi z hamowaniem (zużycie elementów hamulca, straty mocy koniecznej do wychłodzenia oporników hamowania, wydłużenie czasu jazdy) oraz z ponownym zwiększeniem prędkości od prędkości dopuszczalnej na łuku do prędkości eksploatacyjnej na danej trasie.

Podjęcie decyzji o wyposażeniu pociągu w przechylne pudło (zabudowa mechanizmu przechyłu na wózkach i w układzie pantografów) wymaga wykonania szczegółowych opracowań w oparciu o konkretne dane wyjściowe (parametry danej trasy, zakładane czasy jazdy, koszty wyposażenia i koszty eksploatacyjne: energia, zużycie elementów hamulca).

Zestawienie wartości zysku w zużyciu energii trakcyjnej w kWh przy przejazdach pociągu z mechanizmami przechyłu w stosunku do pociągu bez przechyłu, przedstawiono w poniższej tablicy 7.

#### **4. Wnioski**

Z przedstawionego zestawienia wynika, że zysk w zużyciu energii przez pociąg z przechylnym pudłem na trasie z dwoma łukami wynosi, w zależności od parametrów pociągu i wariantów jazdy, od 81 kWh do 491 kWh (co stanowi 3,2 do 28,7%), a zysk czasu odpowiednio 100 sek. do 363 sek. (co stanowi 4,8 do 21,6%) dla przyjętej do analizy teoretycznej trasy o długości 110 km.

Jak widać w części przypadków oszczędności energii są znaczące. Dominujące znaczenie w tym względzie ma poziom redukcji prędkości przed zakrętami, których promienie zależą wyłącznie od projektu linii kolejowej. Na liniach nowo budowanych, ale częściej na liniach modernizowanych, zwiększanie promieni łuków jest najczęściej bardzo ograniczone przez konfigurację terenu lub wysokość kosztów pozyskania gruntów. Potrzeba zwiększenia prędkości pociągów na liniach krętych, a trudnych do modernizacji narzuca wykorzystanie urządzeń do przechyłu nadwozi i pantografów, jako rozwiązania jedyne go możliwego do zastosowania.

Przy ostatecznej ocenie znaczenia tak oszacowanej korzyści należy wziąć pod uwagę także ceny dostępu







cd. tabl. 5

Droga jazdy z prędkością ustaloną Vmax / Distance of the travel with constant speed Vmax	21991	26705	42941	33357	78051	78051	62837	68643	91497	77391	91497	91497	66446	91322	98082	95682	98082	98082
Energia kinetyczna pociągu przy Vmax / Kinetic energy of the train at the speed Vmax	434	434	434	434	434	434	301	301	301	301	301	301	193	193	193	193	193	193
Zużycie energii na rozruch do prędkości Vmax / Energy consumption for start up to the speed Vmax	846	846	846	846	846	846	455	455	455	455	455	455	253	253	253	253	253	253
Zużycie energii na rozruch z prędkości VR<Vmax do Vmax / Energy consumption for acceleration from the speed VR<Vmax to Vmax	768	679	436	572	0	0	376	283	0	166	0	0	173	73	0	0	0	0
Zużycie energii trakcyjnej na przejazd całego odcinka Sodc / Energy consumption for the travel at the whole Sodc section	2885	2822	2712	2762	2634	2634	2251	2171	1994	2086	1994	1994	1713	1438	1369	1369	1369	1369
Zużycie energii na przejazd całego odcinka ze stałą prędkością Vmax / Energy consumption for the travel at the whole section with constant speed Vmax	2444	2444	2444	2444	2444	2444	1803	1803	1803	1803	1803	1803	1222	1222	1222	1222	1222	1222
Czas przejazdu pociągu z ustaloną prędkością Vmax / Duration of the train travel with constant speed Vmax	264	320	515	400	937	937	905	988	1318	1114	1318	1318	1196	1644	1765	1722	1765	1765
Czas przejazdu pociągu z ustaloną prędkością VR<Vmax / Duration of the train travel with constant speed VR<Vmax	35	25	17	20	14	14	35	25	17	20	17	17	35	25	22	22	22	22
Czas przejazdu pociągu po całym odcinku Sodc / Duration of the train travel at the whole Sodc section	1613	1542	1458	1494	1447	1447	1819	1749	1697	1708	1697	1697	2221	2090	2080	2080	2080	2080
Czas przejazdu całego odcinka ze stałą prędkością Vmax / Duration of the travel at the whole section with constant speed Vmax	1320	1320	1320	1320	1320	1320	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1980	1980	1980	1980	1980	1980





cd tabl. 6

Droga rozruchu z prędkości VR<Vmax do Vmax / Distance of vehicle acceleration from the speed VR<Vmax to Vmax	sVR_Vmax x [m]	25447	23653	16634	20880	0	0	12664	10325	0	6505	0	0	0	0	6423	3059	0	0	0	0
Droga hamowania z prędkości Vmax do V=0 / Braking distance from the speed Vmax to V=0	sVmax_0 [m]	8028	8028	8028	8028	8028	8028	6217	6217	6217	6217	6217	6217	6217	6217	4554	4554	4554	4554	4554	4554
Droga jazdy z prędkością ustaloną Vmax / Distance of the travel with constant speed Vmax	sVmax [m]	7878	14000	34232	22530	73172	73172	51779	59541	87513	70741	87513	87513	87513	87513	53998	86350	94982	92582	94982	94982
Energia kinetyczna pociągu przy Vmax / Kinetic energy of the train at the speed Vmax	E <sub>k</sub> Vmax [kWh]	434	434	434	434	434	434	301	301	301	301	301	301	301	301	193	193	193	193	193	193
Zużycie energii na rozruch do prędkości Vmax / Energy consumption for start up to the speed Vmax	Ezu0_Vmax [kWh]	846	846	846	846	846	846	455	455	455	455	455	455	455	455	253	253	253	253	253	253
Zużycie energii na rozruch z prędkości VR<Vmax do Vmax / Energy consumption for acceleration from the speed VR<Vmax to Vmax	EzuVR_Vmax [kWh]	768	679	436	572	0	0	376	283	0	166	0	0	0	0	173	73	0	0	0	0
Zużycie energii trakcyjnej na przejazd całego odcinka Sodc / Energy consumption for the travel at the whole Sodc section	Ezuodc [kWh]	2572	2540	2518	2521	2525	2525	2070	2021	1929	1977	1929	1929	1929	1929	1574	1383	1335	1335	1335	1335
Zużycie energii na przejazd całego odcinka ze stałą prędkością Vmax / Energy consumption for the travel at the whole section with constant speed Vmax	EzuVmax [kWh]	2444	2444	2444	2444	2444	2444	1803	1803	1803	1803	1803	1803	1803	1803	1222	1222	1222	1222	1222	1222
Czas przejazdu pociągu z ustaloną prędkością Vmax / Duration of the train travel with constant speed Vmax	TVmax [s]	95	168	411	270	878	878	746	857	1260	1019	1260	1260	1260	1260	972	1554	1710	1666	1710	1710
Czas przejazdu pociągu z ustaloną prędkością VR<Vmax / Duration of the train travel with constant speed VR<Vmax	TVR [s]	35	25	17	20	14	14	35	25	17	20	17	17	17	17	35	25	22	22	22	22
Czas przejazdu pociągu po całym odcinku Sodc / Duration of the train travel at the whole Sodc section	Todc [s]	1683	1594	1490	1533	1476	1476	1883	1792	1729	1743	1729	1729	1729	1729	2292	2127	2115	2115	2115	2115
Czas przejazdu całego odcinka ze stałą prędkością Vmax / Duration of the travel at the whole section with constant speed Vmax	Todc_Vmax [s]	1320	1320	1320	1320	1320	1320	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1980	1980	1980	1980	1980	1980



**Table 7. Juxtaposition of the energy consumption**

Wariant hamowania hamulcem tarczowym/ Braking with a disc brake							
Moc / Power 8 [MW]							
		a dośrodkowe / centripetal = 0 [m/s <sup>2</sup> ]			a dośrodkowe / centripetal = 2 [m/s <sup>2</sup> ]		
V na łuku / on the curve	[km/h]	125	176	249	216	305	432
E bez przechyłu / without tilt	[kWh]	2885	2822	2712	2672	2634	2634
E z przechyłem with tilt	[kWh]	2444	2444	2444	2444	2444	2444
różnica / difference E	[kWh]	<b>441</b>	<b>378</b>	<b>268</b>	<b>318</b>	<b>190</b>	<b>190</b>
Zysk energii / Energy saving	[%]	<b>15,3</b>	<b>13,4</b>	<b>9,9</b>	<b>11,9</b>	<b>7,2</b>	<b>7,2</b>
Czas z przyhamowaniem / Duration with braking	[s]	1613	1542	1458	1494	1447	1447
Czas bez przyhamowania / Duration without braking	[s]	1320	1320	1320	1320	1320	1320
Różnica czasu / Duration difference	[s]	293	222	138	174	127	127
Zysk czasu / Saving of the duration	[%]	<b>18,2</b>	<b>14,4</b>	<b>9,5</b>	<b>11,6</b>	<b>8,8</b>	<b>8,8</b>
Moc / Power 6,4 [MW]							
		a dośrodkowe / centripetal = 0 [m/s <sup>2</sup> ]			a dośrodkowe / centripetal = 2 [m/s <sup>2</sup> ]		
V na łuku / on the curve	[km/h]	125	176	249	216	305	432
E bez przechyłu / without tilt	[kWh]	2251	2171	1994	2086	1994	1994
E z przechyłem with tilt	[kWh]	1803	1803	1803	1803	1803	1803
różnica / difference E	[kWh]	<b>448</b>	<b>368</b>	<b>191</b>	<b>283</b>	<b>191</b>	<b>191</b>
Zysk energii / Energy saving	[%]	<b>19,9</b>	<b>17,0</b>	<b>9,6</b>	<b>13,6</b>	<b>9,6</b>	<b>9,6</b>
Czas z przyhamowaniem / Duration with braking	[s]	1819	1749	1697	1708	1697	1697
Czas bez przyhamowania / Duration without braking	[s]	1584	1584	1584	1584	1584	1584
Różnica czasu / Duration difference	[s]	235	165	113	124	113	113
Zysk czasu / Saving of the duration	[%]	<b>12,9</b>	<b>9,4</b>	<b>6,7</b>	<b>7,3</b>	<b>6,7</b>	<b>6,7</b>
Moc / Power 4,8 [MW]							
		a dośrodkowe / centripetal = 0 [m/s <sup>2</sup> ]			a dośrodkowe / centripetal = 2 [m/s <sup>2</sup> ]		
V na łuku / on the curve	[km/h]	125	176	249	216	305	432
E bez przechyłu / without tilt	[kWh]	1713	1438	1369	1369	1369	1369
E z przechyłem with tilt	[kWh]	1222	1222	1222	1222	1222	1222
różnica / difference E	[kWh]	<b>491</b>	<b>216</b>	<b>147</b>	<b>147</b>	<b>147</b>	<b>147</b>
Zysk energii / Energy saving	[%]	<b>28,7</b>	<b>15,0</b>	<b>10,7</b>	<b>10,7</b>	<b>10,7</b>	<b>10,7</b>
Czas z przyhamowaniem / Duration with braking	[s]	2221	2090	2080	2080	2080	2080
Czas bez przyhamowania / Duration without braking	[s]	1980	1980	1980	1980	1980	1980
Różnica czasu / Duration difference	[s]	241	110	100	100	100	100
Zysk czasu / Saving of the duration	[%]	<b>10,9</b>	<b>5,3</b>	<b>4,8</b>	<b>4,8</b>	<b>4,8</b>	<b>4,8</b>
Wariant hamowania hamulcem elektrodynamicznym / Braking with an electrodynamic brake							
Moc / Power 8 [MW]							
		a dośrodkowe / centripetal = 0 [m/s <sup>2</sup> ]			a dośrodkowe / centripetal = 2 [m/s <sup>2</sup> ]		
V na łuku / on the curve	[km/h]	125	176	249	216	305	432
E bez przechyłu / without tilt	[kWh]	2572	2540	2518	2521	2525	2525
E z przechyłem with tilt	[kWh]	2444	2444	2444	2444	2444	2444
różnica / difference E	[kWh]	<b>128</b>	<b>96</b>	<b>74</b>	<b>77</b>	<b>81</b>	<b>81</b>
Zysk energii / Energy saving	[%]	<b>5,0</b>	<b>3,8</b>	<b>2,9</b>	<b>3,1</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>
Czas z przyhamowaniem / Duration with braking	[s]	1683	1594	1490	1533	1476	1476
Czas bez przyhamowania / Duration without braking	[s]	1320	1320	1320	1320	1320	1320
Różnica czasu / Duration difference	[s]	363	274	170	213	156	156
Zysk czasu / Saving of the duration	[%]	<b>21,6</b>	<b>17,2</b>	<b>11,4</b>	<b>13,9</b>	<b>10,6</b>	<b>10,6</b>
Moc / Power 6,4 [MW]							
		a dośrodkowe / centripetal = 0 [m/s <sup>2</sup> ]			a dośrodkowe / centripetal = 2 [m/s <sup>2</sup> ]		
V na łuku / on the curve	[km/h]	125	176	249	216	305	432
E bez przechyłu / without tilt	[kWh]	2070	2021	1929	1977	1929	1929
E z przechyłem with tilt	[kWh]	1803	1803	1803	1803	1803	1803

cd tabl. 7

różnica / difference E	[kWh]	267	218	126	174	126	126
Zysk energii / Energy saving	[%]	12,9	10,8	6,5	8,8	6,5	6,5
Czas z przyhamowaniem / Duration with braking	[s]	1883	1792	1729	1743	1729	1729
Czas bez przyhamowania / Duration without braking	[s]	1584	1584	1584	1584	1584	1584
Różnica czasu / Duration difference	[s]	299	208	145	159	145	145
Zysk czasu / Saving of the duration	[%]	15,9	11,6	8,4	9,1	8,4	8,4
Moc / Power 4,8 [MW]							
		$a$ dośrodkowe / centripetal = 0 [m/s <sup>2</sup> ]			$a$ dośrodkowe / centripetal = 2 [m/s <sup>2</sup> ]		
V na łuku / on the curve	[km/h]	125	176	249	216	305	432
E bez przechyłu / without tilt	[kWh]	1574	1383	1335	1335	1335	1335
E z przechyłem with tilt	[kWh]	1222	1222	1222	1222	1222	1222
różnica / difference E	[kWh]	352	161	113	113	113	113
Zysk energii / Energy saving	[%]	22,4	11,6	8,5	8,5	8,5	8,5
Czas z przyhamowaniem / Duration with braking	[s]	2292	2127	2115	2115	2115	2115
Czas bez przyhamowania / Duration without braking	[s]	1980	1980	1980	1980	1980	1980
Różnica czasu / Duration difference	[s]	312	147	135	135	135	135
Zysk czasu / Saving of the duration	[%]	13,6	6,9	6,4	6,4	6,4	6,4

future generation of energy, regardless of its source, will always result in adverse impact on the environment.

Another effect that cannot be ignored is reduction of the travel time, which improves attractiveness of the transport offer. Unfortunately, a significant additional cost must be born with a view to reduce the speed with friction brakes, since electrodynamic braking is rather ineffective, in particular taking into account the energy recovery.

On the other hand, the costs of the tilting system the train must be equipped with as well as its maintenance for the train lifetime should be also considered. Additionally, maintenance of the railway line is also more expensive due, among others, to higher lateral forces acting on the curved track when the trains are equipped with a tilting system.

*The problems itemized in the present paper have been referred to in the report [1].*

do energii w przyszłości oraz fakt ograniczenia oddziaływania na środowisko, bowiem uzyskanie energii, niezależnie od źródła jej pozyskania, w najbliższym horyzoncie czasowym zawsze będzie się wiązało z negatywnym oddziaływaniem na środowisko.

Drugim efektem nie do pominięcia jest skrócenie czasu przejazdu, co zwiększa atrakcyjność oferty przewozowej. Także w tym względzie trzeba niestety ponieść spory dodatkowy koszt przy redukcji prędkości hamulcami ciernymi, bowiem zbyt mało efektywne jest hamowanie hamulcami elektrodynamicznymi, szczególnie w odniesieniu do odzysku energii.

Na drugiej szali jest koszt wyposażenia pociągu w taki system i koszt utrzymania systemu przez okres eksploatacji pociągu. Nie do pominięcia są również zwiększone koszty utrzymania linii kolejowej, spowodowane między innymi większymi obciążeniami poprzecznymi torowiska na zakrętach przez pociągi wyposażone w system przechyłu.

*Zagadnienia przedstawione w niniejszym artykule zostały wykorzystane w opracowaniu [1].*

## BIBLIOGRAPHY / BIBLIOGRAFIA

- [1] Krajowy potencjał technologiczny w obszarze budowy taboru dla kolei dużych prędkości. OR-11667. Instytut Pojazdów Szynowych "Tabor". Poznań, maj 2019
- [2] Rusak R.: Pociągi z wychylnym nadwoziem w Europie. Technika Transportu Szynowego nr 11/2008.
- [3] Klaus Knothe, Sebastian Stichel: Schienenfahrzeugdynamik. Springer – Berlin.
- [4] Dietrich Wende: Fahrdynamik des Schienenverkehrs. Teubner – Stuttgart, September 2003.
- [5] EN-14363:2016: Railway applications - Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Running behaviour and stationary tests.