

Marek SITARZ, Jan RACZYŃSKI, Maciej LISOWSKI
Politechnika Śląska

MOŻLIWOŚCI TECHNICZNE WPROWADZENIA POCIĄGÓW DUŻEJ PRĘDKOŚCI W POLSCE

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd konstrukcji pociągów o dużej prędkości jazdy pod kątem wprowadzenia w przyszłości takiego taboru do eksploatacji w Polsce. Uwagę skupiono szczególnie na pociągach z mechanizmem przechylnego pudła. Umożliwiają one bowiem rozwinięcie dużych prędkości na torach krętych o małych promieniach łuków. Tym samym przy ich stosowaniu nie ma potrzeby budowania nowych linii kolejowych o nowej geometrii.

TECHNICAL POSSIBILITIES FOR ENTER OF HIGH SPEED TRAINS IN POLAND

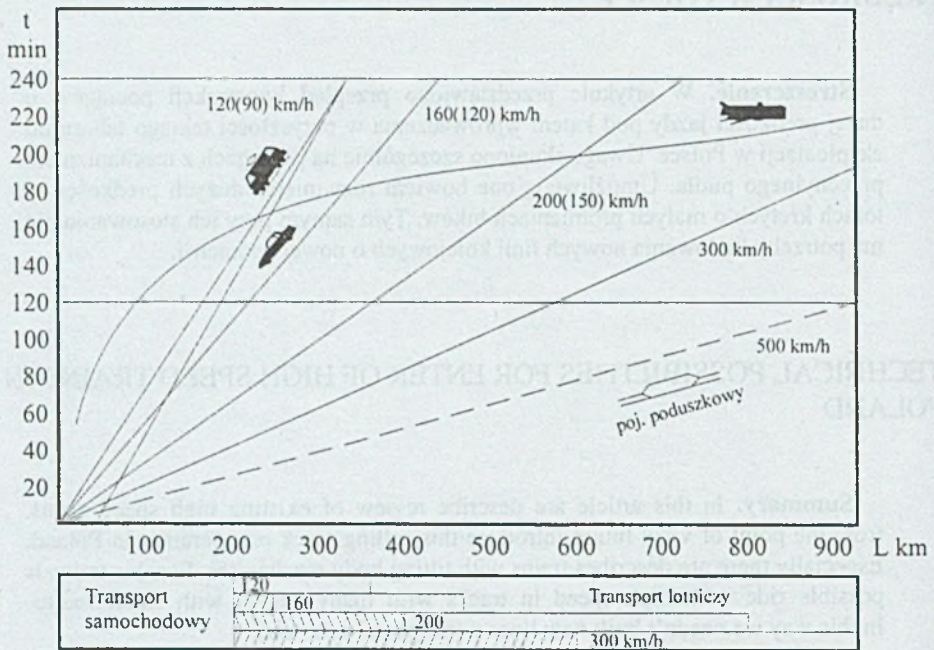
Summary. In this article are describe review of existing high speed trains, from the point of view future introduce this rolling stock on operation in Poland. Especially there are describes trains with tilting body mechanism. For this trains is possible ride with high speed in tracks with many curves with small radius. In this way we needn't built new lines with special geometry.

1. BUDOWA LINII DUŻYCH PRĘDKOŚCI

W ostatnich latach obserwujemy ciągły wzrost popytu na usługi transportowe w społeczeństwie. W skali całej gospodarki następuje ciągły wzrost przewozów osób. Jednak dotychczas przyrost ten jest realizowany głównie poprzez rozwój motoryzacji indywidualnej, przy jednoczesnym spadku przewozów środkami transportu zbiorowego. Charakterystyczny jest zwłaszcza spadek w ostatnich latach przewozów pasażerskich na kolei. Powstała sytuacja, w której sieć drogowa, projektowana dla znacznie mniejszego natężenia ruchu, jest permanentnie przeciążona, a przejazd samochodami przez centra ośrodków miejskich odbywa się z prędkościami średnimi niejednokrotnie zbliżonymi do prędkości pieszego, natomiast PKP likwiduje część połączeń kolejowych z uwagi na brak pasażerów, a tym samym nierentowność linii.

W obliczu postępującego spadku udziału kolei w przewozach pasażerskich niezbędne jest podjęcie właściwych działań reformatorycznych polegających na systemowym ujęciu całej sieci komunikacyjnej państwa. Należy bowiem pamiętać, że możliwie duży udział kolei w systemie transportowym - to nie tylko wzrost dochodów PKP, a więc pośrednio skarbu państwa, lecz także korzyści ekologiczne i społeczne.

Warunkiem tego, aby podróżny wybrał określony rodzaj środka transportowego, jest jego konkurencyjność względem innych sposobów podróżowania. Na rys. 1 przedstawiono zależność czasu podróży i odległości od rodzaju środka transportu. Z rysunku tego wynika, że transport kolejowy pociągami dużej prędkości jest konkurencyjny w stosunku do innych środków transportu w zakresie 200 do 900 km.



Rys. 1. Porównanie zakresu odległości dla różnych rodzajów transportu pasażerskiego i szybkości przewozu, przy czasie podróży 120 i 240 min [17]

Fig. 1. Limit of distance for different kind of passenger's transport and ride speed, when travel time is 120 and 240 min

Można wymienić wiele czynników wpływających na ocenę przez potencjalnego pasażera poszczególnych sposobów dotarcia do celu. Do najważniejszych spośród nich należałoby zaliczyć:

- koszty ponoszone przez podróżnego, czyli ceny biletów, a w przypadku własnego samochodu całkowite koszty utrzymania — odniesione do jednostki przebytej drogi;
- czas podróży, czyli średnia prędkość pojazdu (z uwzględnieniem czasu oczekiwania na ewentualne przesiadki);
- komfort (rozumiany całościowo, tzn. jako komfort fizyczny i psychiczny, związany np. z prowadzeniem samochodu w trudnych warunkach);
- minimalizacja koniecznych przesiadek;
- stopień utrudnień organizacyjnych — możliwie prosty system opłat i rezerwacji miejsc.

Już obecnie, pomimo braku najnowocześniejszego, szybkiego taboru kolejowego, są w Polsce szlaki transportowe, gdzie kolej wygrywa konkurencję z samochodem. Przykładem może być trasa Katowice - Warszawa, na której pociągi klasy InterCity zapewniają przejazd w czasie o wiele krótszym niż samochodem lub autobusem. Jednak warunkiem koniecznym dalszego rozwoju przewozów pasażerskich na PKP jest wprowadzenie nowoczesnego taboru, pozwalającego na jazdę z prędkościami rzędu 200 km/h i większymi.

W krajach, w których od lat funkcjonują linie obsługiwane przez szybkie pociągi, przewoźnicy kolejowi stanowią skuteczną konkurencję nie tylko dla transportu samochodowego, ale nawet dla lotniczego. Jeśli bowiem nawet prędkość przelotu samolotem jest jeszcze wyższa niż pociągu, to nieporównanie dłuższy jest czas obsługi podróży przed lotem. Tak więc czas, który pasażer musi przeznaczyć na całą podróż samolotem, jest już często dłuższy niż w przypadku podróży kolejowej.

W warunkach polskich najpoważniejszymi przeszkodami w realizacji planów modernizacyjnych są niewielkie potoki pasażerskie i niskie nakłady finansowe na transport kolejowy.

Sytuacja gospodarcza miała i nadal ma zdecydowany wpływ na tempo wdrażania programów inwestycyjnych, na szczęście nie miała wpływu na tworzenie programu kierunkowy rozwoju infrastruktury kolejowej w Polsce. Przemiany ustrojowo-gospodarcze w Polsce i innych krajach Europy Środkowo-Wschodniej wpłynęły na drastyczny spadek przewozów zarówno pasażerskich, jak i towarowych w transporcie kolejowym. Restrukturyzacja sektora transportowego oraz przestawienie go na rynkowe zasady działalności stało się koniecznością. Tylko tak postawione zagadnienie daje szansę kolejom polskim na konkurowanie z przewoźnikami innych rodzajów transportu.

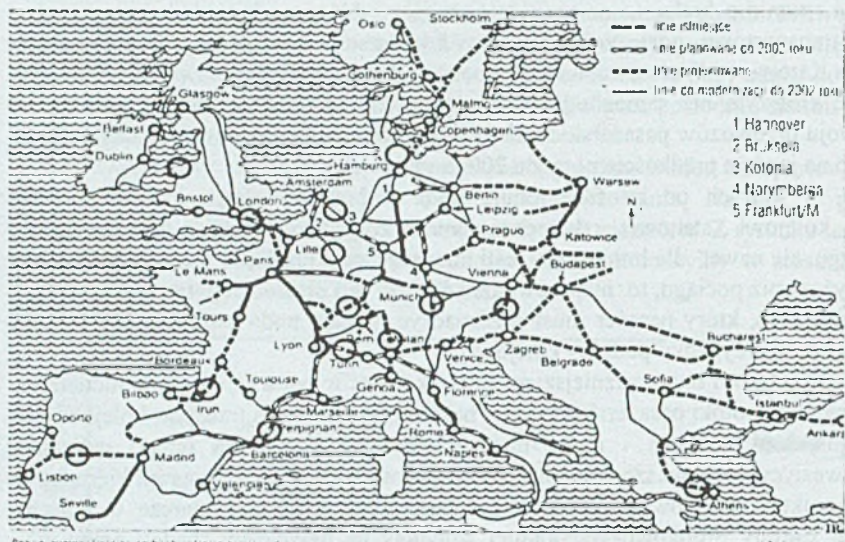
Współpracując w wielu międzynarodowych organizacjach nad wypracowaniem jednolitej i spójnej europejskiej sieci kolejowej (rys. 2 i 3), Polska zgłosiła współdziałanie w realizacji w okresie do roku 2030 [19]:

- europejskiej sieci linii kolejowych dużych (>200 km/h) i średnich prędkości (160 – 200 km/h), zmodernizowaniu 3362 km linii istniejących i wybudowaniu 1300 km nowych linii;
- europejskiej sieci kolejowej objętej umową AGC, tj. 3115 km linii kolejowych;
- europejskiej sieci kolejowej objętej umową AGTC (transport kombinowany) – 4319 km.

W wielu przypadkach są to te same linie kolejowe, dlatego globalna długość linii kolejowych wpisana do porozumień międzynarodowych wynosi 5308 km. Dalsze 781 km linii kolejowych oczekuje na zakończenie studiów i zgłoszenie ich do porozumień międzynarodowych.

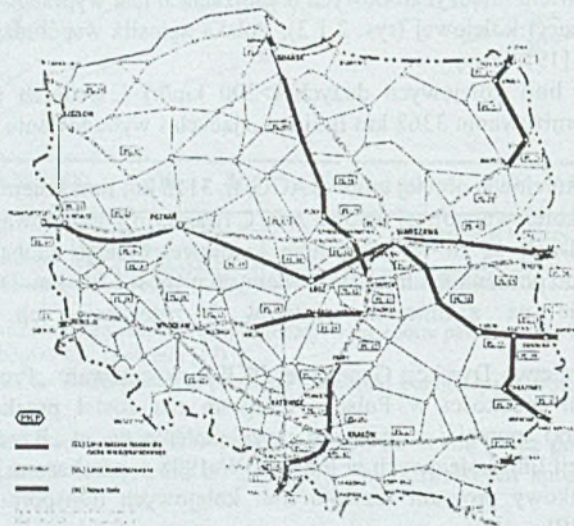
W 1995 r. kierownictwo Dyrekcji Generalnej PKP zaakceptowało „Program kierunkowy rozwoju linii dużych prędkości w Polsce”. Program ten został przekazany ministrowi transportu i gospodarki morskiej z prośbą o uwzględnienie go w „Rządowym programie budowy i modernizacji linii kolejowych w Polsce”. W 1998 r. przekazano ministrowi TiGM program pt. „Kierunkowy program rozwoju linii kolejowych transportu kombinowanego (AGTC) w Polsce” [19].

Opracowując programy nie kierowano się ograniczeniami wynikającymi z problemów okresu przejściowego, a aktualnymi międzynarodowymi tendencjami w tworzeniu spójnej sieci kolejowej spełniającej potrzeby szybkich, komfortowych i bezpiecznych przewozów pasażerskich i towarowych. Roboty modernizacyjne na istniejących liniach lub budowę nowych linii kolejowych, o których była mowa wcześniej, zaliczono do jednego z trzech okresów — do roku 2005, okres lat 2005 - 2015 i lata 2015 - 2030 [19].



Rys. 2. Rozwój europejskiej sieci szybkich połączeń kolejowych [6]

Fig. 2. Progress of European high speed railway lines



Rys. 3. Polska część europejskiej sieci linii kolejowych dużych (powyżej 200 km/h) i średnich prędkości (160 - 200 km/h) [19]

Fig. 3. Polish part of European railway lines for high (> 200 km/h) and middle speed (160 - 200 km/h)

Horyzont 2005 — zadania priorytetowe

W okresie tym zaplanowano tylko roboty modernizacyjne na liniach o najwyższym priorytecie, o łącznej długości 1736 km i szacunkowych kosztach modernizacji infrastruktury 3273 mln ECU, są to [19]:

- Linia E 20 układu AGC i AGTC, II korytarz kreteński (I etap realizacji), Berlin – granica DB AG/PKP – Poznań – Warszawa – Terespol – granica PKP/BC (- Mińsk – Moskwa). Linia długości 690 km będzie przystosowana do prędkości maksymalnej 160 km/h.
- Linia E 65 układu AGC i AGTC, VI i VIB korytarz kreteński, Gdynia – Warszawa – CMK – Katowice – Zebrydowice (- Bratysława – Budapeszt i Wiedeń). Linia długości 722 km będzie przystosowana do prędkości 160 km/h na całej długości, z wyłączeniem odcinka od Grodziska Maz. do Zawiercia (CMK) długości 225 km, gdzie pociągi będą mogły rozwijać prędkość do 250 km/h.
- Linia E 59 układu AGC, na odcinku Wrocław – Poznań długości 164 km będzie dostosowana do prędkości 160 km/h. Linia ta wraz ze zmodernizowaną linią E 20 będzie stanowiła najszybsze połączenie Wrocławia z Warszawą, Berlinem i Szczecinem.

Horyzont 2005 – 2015 – zadania priorytetowe

Na okres ten zaplanowano zmodernizowanie wszystkich pozostałych linii wpisanych do umowy AGC, linii objętych priorytetem korytarzy kreteńsko-helsińskich i niektórych najważniejszych linii transportu kombinowanego wpisanych do umowy AGTC. Łączna długość linii przewidzianych do modernizacji wynosi 1900 km. Ponadto w okresie tym planuje się wybudowanie nowych linii długości 331 km przy koszcie budowy 1859 mln ECU [19].

Horyzont 2015 – 2030

Opracowane międzynarodowe prognozy przewidują rozwój gospodarczy krajów Europy Środkowej i Wschodniej pozwalający w roku 2015 zbliżyć się krajom tego regionu do obecnego poziomu zamożności i mobilności społeczeństw krajów Europy Zachodniej. Przesłanka ta pozwala wysnuć wniosek, że obecne linie kolejowe na osi wschód – zachód i północ – południe staną się na tyle zapełnione, że po roku 2015 zaistnieje konieczność wybudowania całkowicie nowych linii kolejowych o parametrach pozwalających na prowadzenie ruchu pociągów z prędkością $v = 300$ km/h. Nowa linia, licząca 660 km na terytorium Polski, będzie przebiegała równoległe do istniejącej linii E 20 Berlin – Warszawa – Mińsk – Moskwa [19].

Lata 2015 – 2030 stanowią również wykorzystane na zakończenie modernizacji pozostałych linii kolejowych układu AGTC, łącznej długości 1043 km.

Realizacja programu rozwoju infrastruktury kolejowej

W ostatnich latach wykonano studia pozwalające podjąć decyzje strategiczne o budowie lub modernizacji linii kolejowych w Polsce [19]. Są to między innymi:

- prognoza ruchu w głównych kolejowych korytarzach międzynarodowych,
- plan strategiczny PKP do 2015 r.,
- wstępny program inwestycyjny dla PKP [19].

2. POCIĄGI DUŻYCH PRĘDKOŚCI

Pasażerskie pojazdy szynowe powinny spełniać szereg kryteriów i wymagań dotyczących: ekologii, eksploatacji, małej energochłonności i materiałochłonności.

W szczególności pojazdy te powinny [10]:

- być przyjazne dla środowiska naturalnego (brak zanieczyszczeń powietrza, wody i gruntu oraz brak wibracji i hałasu);
- wyróżniać się wysokim poziomem niezawodności;
- posiadać właściwą trwałość;
- posiadać odpowiednie przyspieszenie zarówno przy rozruchu, jak i hamowaniu (przyspieszenie ujemne);
- rozwijać założoną przez konstruktora prędkość;
- być ergonomiczne i zapewniać należyty komfort podróżowania (klimatyzacja) oraz bezpieczeństwo podróżnych;
- wyróżniać się podatnością obsługową, tj. technologicznością przeglądów i napraw;
- być przystosowane do diagnostyki i posiadać budowę modułową;
- być energooszczędne;
- być materiałoozczędne i niepalne;
- wyróżniać się estetyką sylwetki;
- odpowiadać wymaganiom krajowym i międzynarodowym w zakresie nacisku na oś, skrajni, drogi hamowania i innych ważnych parametrów.

Wszystkie te kryteria muszą być, oczywiście, spełnione w pociągach dużych prędkości, które ponadto powinny:

- mieć nadwozia dokładnie opracowane pod względem aerodynamiki (odpowiednie ukształtowanie czoła, ścian bocznych, połączeń między wagonami);
- mieć w najwyższym stopniu dopracowaną kinematykę i dynamikę układu biegowego, ponieważ to, co wywołałoby lekką wibrację przy małej prędkości, przy wyższej mogłoby grozić nawet wykolejeniem pociągu;
- posiadać odpowiednio wzmocniony układ hamulcowy.

Cechy charakterystyczne i podstawowe parametry techniczne pociągów i lokomotyw przeznaczonych dla wysokich prędkości eksploatowanych na świecie przedstawiono w tab. 1 i 2. Z analizy tablic wynika, że nie ma uniwersalnych pojazdów, które mogły by być stosowane np. w całej Europie.

Tabela 1

Pociągi zespołowe i zespoły trakcyjne do dużych prędkości [17]

Lp.	Kolej	Seria	Zasilanie kV Hz	Układ pociągu	Masa własna		Moc ciągiła kW	Liczba silni- ków trac.	Prę- kość max. [km/h]	Hamowanie clektr.		Długość całkow. [m]	Średnica kół [mm]	Liczba miejsz	Producent
					cal- kowita [t]	nap. [t]				rodzaj	moc [kW]				
1	SNCF	TGV-A	25 50 1,5	s+10d+s	444	2x68	2x4000 2x1840	2x4	300	oporowe	2x2900	237,54	920	485	GEC-Alstom De Dietrich, ANF
2	SNCF	TGV-R	25 50 1,5	s+8d+s	383	2x68	2x4400 2x1840	2x4	300	oporowe	2x2900	200,19	920	377	GEC-Alstom De Dietrich, ANF
3	SNCF	TGV- 2N	25 50 1,5	s+8d+s	380	2x68	2x4400 2x1840	2x4	300			200,19	920/910	545	GEC-Alstom De Dietrich, ANF
4	SNCF	Eurostar	25 50 3 0,75	s+18d+s	752,4	2x10 2	2x6110 2x2850 2x1700	2x6	300	oporowe	2x2900	393,72	920	794	GEC-Alstom De Dietrich, ANF
5	RENFE	AVE	25 50 3	s+8d+s	393	2x68	2x4400 2x2700	2x4	300	oporowe	2x3125	200,72	920	321	GEC-Alstom De Dietrich, ANF
6	DB	ICE1	15 16 ² / ₃	s+12d+s	792	2x78	2x4800	2x4	280	rek(magn)	2x4000	358,00	1040/920	619	AEG, ABB, Siemens, KM, Krupp, Thyssen- Henschel, DUEWAG, LHB, MAN
7	DB	ICE2	15 16 ² / ₃	s+6d+st	412	78	4800	4	280	rek(magn)	2000	205,40	1040	368	
8	DB	ICE2.2	15 16 ² / ₃	2x(s+d+ s+d)	394	~210	8000	16	330	rek(ind)	8200	200,00	920	398	
9	DB	ICT	15 16 ² / ₃	st+2s+d +2s+st	372	~110	4000	8	230	rek	4000	184,00	890	374	
10	FS	ETR 500	3	s+11d+s	598	2x68	2x4400	2x4	300	rek oporowe	2x3840	327,60	1100/890	594	Trevi (ABB-T, Ansaldo, Breda, Fiat, Firema)
11	SJ	X 2000	15 16 ² / ₃	s+4d+st	318	~73	3300	4	210	rek(magn)	3300	140,00	1100/880	257	ABB
12	FS	ETR 450	3	8s	365	183	5000	16	250	oporowe	7600	208,30	890	344	Fiat, Marelli
13	FS	ETR 460	3	3x(2s+d)	416,5	145	6000	12	250	oporowe	5100	236,60		456	Fiat, Parizzi
14	VR	S 220	25 50	2(2s+d)	302	105	4000	8	220	rek(magn)	3800	158,90		262	Fiat, OY, Transtech, VR-Osakeyhtio

s – człón z napędem

st – człón z kabiną sterowniczą

d – człón doczepny

Tabela 2

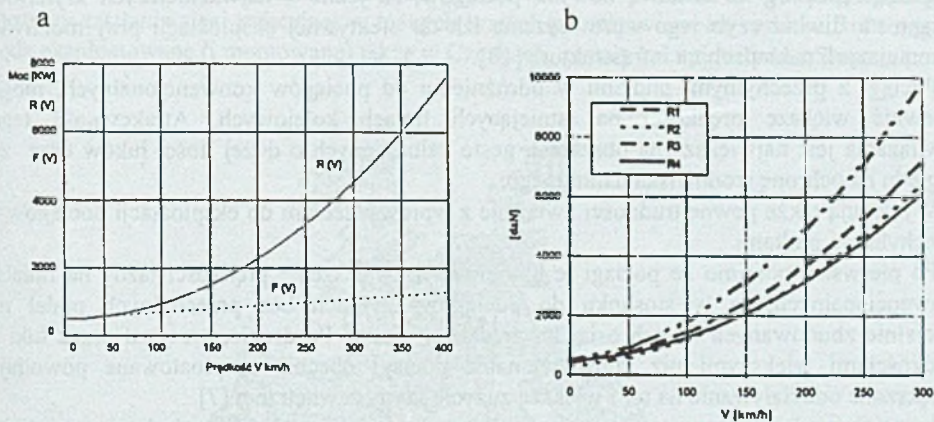
Podstawowe parametry lokomotyw elektrycznych do dużych prędkości [10]

Parametr Typ Kraj	BR 120 RFN	Re 4/4 Szwajcaria	S252 Hiszpania	E 402 Włochy	BB 26000 Francja	E 412 (EU43) Adtranz
Przeznaczenie	uniwersalna	uniwersalna	uniwersalna	uniwersalna	uniwersalna	uniwersalna
System zasilania	15 kV 16 ² / ₃ Hz	15 kV 16 ² / ₃ Hz	3 kV= 25 kV; 50 Hz	3 kV=	25 kV; 50 Hz	3 kV= 15 kV; 16 ² / ₃ Hz
Układ osi	Bo-Bo	Bo-Bo	Bo-Bo	Bo-Bo	B-B	Bo-Bo
Masa służbowa [Mg]	84	81	88	82	90	82 (88)
Prędkość max [km/h]	210	230	220	220	200	220
Moc ciągła [kW]	5600	4800	5600	5000	5600	6400 (4500)
Silniki trakcyjne	asynchroniczne	asynchroniczne	asynchroniczne	asynchroniczne	asynchroniczne	asynchroniczne
Siła rozr. (max.) [kN]	290	275	300	264	320	280
Moc hamulca	-/4000	-/4800	3300/5600	3800/5000	2900/-	4000/6000
Obwody pomocnicze	3x440 V; 60 HZ	3X395 V; 50 Hz	3x440 V; 60 HZ	3x450 V; 60 Hz	3x380 V; 60 Hz	3x440 V; 60 Hz
Przełoż. przekładni	4,12	3,667	brak danych	3,59	2,212	3,304
Długość lokomot. [m]	19,2	17,6	20,38	18,44	17,71	19,4
Baza lokomot. [m]	10,2	11,0	10,5	10,4	9,684	11,4
Baza wózka [m]	2,8	2,8	3,0	2,85	2,797	2,65
Sredn. toczna kół [m]	1,25	1,1	1,25	1,25	1,25	1,1

3. MOŻLIWOŚĆ PRĘDKOŚCI 200 - 250 KM/H I WPROWADZENIE POCIĄGÓW Z PRZECHYLNYM PUDŁEM

Warunkiem zapewnienia konkurencyjności przewozów kolejowych realizowanych przez PKP, oprócz budowy nowych linii, jest wprowadzenie w najbliższym czasie do eksploatacji szybkiego taboru kolejowego, zdolnego rozwijać prędkości powyżej 200 km/h. Wiele kolei na świecie eksploatuje taki tabor z powodzeniem już od wielu lat.

Istotną cechą pociągów szybkiego ruchu pasażerskiego jest ich jednolite ukształtowanie zewnętrzne pod względem oporu powietrza. Na rysunku 4 przedstawiono zależność oporów toczenia i aerodynamicznych w zależności od prędkości. Z analizy tego wykresu wynika, że już od prędkości ok. 80 km/h, opór powietrza jest większy od oporu toczenia, a przy prędkościach rzędu 300 km/h blisko 5-krotnie [9, 14]. Na wielkość oporu powietrza ma wpływ ukształtowanie czoła i krańca pociągu oraz jednolitość powierzchni zewnętrznej — szczególnie istotne jest eliminowanie przerw powierzchni między wagonami. Dlatego też pociągi szybkiego ruchu pasażerskiego są pociągami o stałym, pod względem ruchowym, składzie wagonów, takim samym ukształtowaniu czoła i krańca pociągu (bez względu na usytuowanie napędu) oraz specjalnie ukształtowanych strefach połączeń wagonów. W pociągach szybkich współczynnik oporu czołowego osiągnąć jest na poziomie 0,3 [17]. Ukształtowanie czoła i krańca pociągu powinno ograniczać falę wzrostu ciśnienia przy mijaniu pociągu na sąsiednim torze lub obiektów stałych. Współczynnik wzrostu ciśnienia C_p nie powinien być większy od 0,15 [17].



Rys. 4. Zależność oporów ruchu od prędkości jazdy [5]

a – moc niezbędna do pokonania oporów ruchu (linia przerywana – same opory tarcia)

b – zależność oporów ruchu od prędkości dla czterech różnych pociągów: R1 – TGV 001, R2 – TGV-PSE, R3 – „Corail”, R4 – ICE

Fig. 4. Resistance of ride in function speed

Istnieją dwa główne układy pociągów szybkich:

- pociągi zespołowe — w których napęd (najczęściej na dwa, niekiedy trzy wózki) jest umieszczony na jednym lub obu krańcach pociągu — w członie napędnym, w którym nie ma pomieszczeń dla pasażerów;
- zespoły trakcyjne — w których napęd rozmieszczony jest w kilku wagonach dla pasażerów.

Pierwszy z tych układów ma tę zaletę, że ułatwia proces utrzymania, a zwłaszcza przeglądów, ponadto oddziela źródła hałasu i wibracji od pomieszczeń dla pasażerów. Jego wadą jest natomiast trudność uzyskania nacisków kół na szyny nie przekraczających wymagań AGC, to jest odpowiadających masie 17 t [17].

Zaletą drugiego jest dowolność w rozmieszczeniu urządzeń w pociągu, możliwość uzyskania odpowiedniej przyczepności poprzez możliwość zwiększenia liczby zestawów napędnych, nawet przy znacznie ograniczonych naciskach kół na szyny. Wadą — trudność w pełnej izolacji pomieszczeń dla pasażerów od szkodliwego oddziaływania urządzeń napędu (drżania, hałas, pola elektromagnetyczne) oraz mniej dogodne warunki utrzymania, bardziej złożony ogólny układ konstrukcji.

Pod względem cech użytkowych, jak i cen wymienione układy pociągów są porównywalne [17].

Inne kryterium podziału pociągów szybkich stanowi zastosowanie w nich (lub brak) mechanizmu przechyłania nadwozia w łukach torowych.

Pociągi dużych prędkości bez tego mechanizmu wymagają specjalnie przystosowanych torowisk, odznaczających się minimalną liczbą łuków i to tylko o dużych promieniach. Eksploatacja takiego taboru ma sens jedynie w krajach posiadających sieć specjalnych linii, na których pociągi takiego typu, jak np. francuski TGV, włoski ETR 500 są w stanie jechać z prędkościami rzędu 300 km/h.

W warunkach polskich szybki tabor bez przechylnego pudła wymagałby wcześniejszego zainwestowania ogromnych funduszy w budowę nowych linii. Równocześnie cały proces unowocześnienia oferty przewozowej PKP przeciągnąłby się w czasie o kilka lat. Dlatego ogłaszając przetarg na dostawę nowych pociągów, za jedno z najważniejszych kryteriów uznano możliwość szybkiego wprowadzenia ich do efektywnej eksploatacji przy możliwie najmniejszych nakładach na infrastrukturę [18].

Pociągi z przechylnymi pudłami w odróżnieniu od pociągów konwencjonalnych, mogą zapewnić większe prędkości na istniejących liniach kolejowych. Atrakcyjność tego rozwiązania jest największa na obszarach gęsto zaludnionych o dużej ilości łuków oraz ze względu na ochronę środowiska naturalnego.

Występują także pewne trudności związane z wprowadzeniem do eksploatacji pociągów z przechylnymi pudłami.

Po pierwsze, pomimo że pociągi te umożliwiają zwiększenie prędkości jazdy na liniach konwencjonalnych, to w stosunku do pociągów szybkich bez przechylnych pudła na specjalnie zbudowanych liniach osiągają prędkości niższe. Po drugie, przejazd przez łuki z prędkościami większymi niż konwencjonalne pociągi obecnie eksploatowane powoduje zwiększone oddziaływanie na tor i większe zużycie szyny zewnętrznej [7].

Istnieją również przeciwstawne wymagania między wózkiem, który może łatwo wpisywać się w łuk, a zatem wózkiem podatnym i wózkiem przeznaczonym do dużych prędkości, który powinien być sztywny. Wózek sztywny jest mniej wrażliwy na ruch wężykujący i w ten sposób można ograniczyć zużycie zarówno koła, jak i szyny [7].

Można przypuszczać, że roczne koszty utrzymania wózków z układem przechyłowym będą większe niż wózków konwencjonalnych.

Przed wprowadzeniem pociągu z przechylnym pudłem na daną linię należy dokonać pomiarów jego skrajni kinematycznej, gdyż może się okazać, że wagony o normalnych gabarytach po wprowadzeniu przechyłu nie mieszczą się w skrajni dynamicznej i trzeba bądź zmniejszyć gabaryty wagonów, bądź powiększyć skrajnię linii. Wiele zależy od zastosowanego układu przechyłowego i układów tłumiących. W pociągach X-2000 i Pendolino układy tłumiące są zamontowane na zewnątrz ramy wózka [7].

Szybki przejazd przez łuk lub nagłe przejście z jednego łuku w drugi stawiają wysokie wymagania przed mechanizmem przechyłowym, ponieważ musi on odpowiednio szybko i pod odpowiednim kątem przechylić wagon, a ewentualne opóźnienie w działaniu może mieć negatywny wpływ na komfort pasażerów.

Niezależnie od tego, czy mamy do czynienia z taborem o przechylnym pudle, czy z taborem konwencjonalnym, wprowadzenie większych prędkości na istniejących liniach wymaga na ogół wydłużenia dróg hamowania, z czym wiąże się często konieczność przestawienia sygnalizatorów przytorowych, jeśli takie istnieją.

Każda propozycja wprowadzenia pociągu z przechylnym pudłem na istniejącą linię wymaga szczegółowej oceny kosztu tej inwestycji, a wynik zależy będzie od rodzaju danej linii, rodzaju przewozów, konkurencji ze strony innych przewoźników oraz ogólnego obciążenia przewozowej linii.

Ogólnie biorąc, zastosowanie pociągów z przechylnym pudłem wymaga inwestycji w zakresie infrastruktury, które są jednak wyraźnie mniejsze niż dla wprowadzenia szybkich pociągów bez tego systemu i w efekcie oszczędności z tego tytułu w połączeniu z oszczędnościami na czasie podróży powinny pokryć zwiększone koszty zakupu i utrzymania tego typu składów.

Z opinii większości obserwatorów wynika, że w przeważającej liczbie dotychczasowych zastosowań pociągów z przechylnymi pudłami są rzeczywistym krokiem naprzód [7].

W najbliższym okresie PKP zamierzają wprowadzić do eksploatacji pociągi z przechylnym pudłem Pendolino produkcji włoskich zakładów Fiat Ferroviaria. Jest to konstrukcja sprawdzona w eksploatacji, nie wymagająca przeróbek w instalacji elektrycznej z uwagi na taki sam system zasilania sieci trakcyjnej w Polsce i we Włoszech (3 kV prądu stałego). Systemy zasilania sieci trakcyjnej w różnych krajach przedstawiono na rysunku 5. Pociągi te będą eksploatowane (i montowane) także w Czechach, zostały zakupione przez Słowenię.



Rys. 5. Systemy zasilania trakcji w Europie

Fig. 5. Systems of power in Europe

4. ZASADA DZIAŁANIA POCIĄGU Z PRZECHYLNĄ PRZECHYŁKĄ

Podczas ruchu pojazdu z prędkością v po łuku torowym o promieniu R , ale bez przechyłki toru u na pudło wagonu, a tym samym na pasażera, działa przyspieszenie odśrodkowe o wartości $a = v^2/R$. W celu zapewnienia odpowiedniego komfortu jazdy, ograniczenie wielkości przyspieszenia poprzecznego uzyskuje się poprzez wprowadzenie w łuku przechyłki toru u , podnosząc szynę zewnętrzną w stosunku do szyny wewnętrznej. Powoduje to nachylenie toru i wagonu o kąt α w stosunku do poziomu. W środku ciężkości na pudło działają dwie siły równoległe do podłogi wagonu, przeciwnie do siebie skierowane, określające siłę wypadkową C [18]:

$$C = F \cdot \cos \alpha - G \cdot \sin \alpha$$

$$m \cdot a_q = m \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos \alpha - m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

gdzie:

a_q – nierównoważone przyspieszenie toru przyspieszenie odśrodkowe,

g – przyspieszenie ziemskie,

m – masa wagonu.

Siły te pokazane są na rysunku 6.

Dla małych wartości kątów α wartość $\cos \alpha \cong 1$, a ponadto $\sin \alpha = u/b_A$. Wobec tego nierównoważone przyspieszenie odśrodkowe działające na pudło (równoległe do podłogi) wynosi [18]:

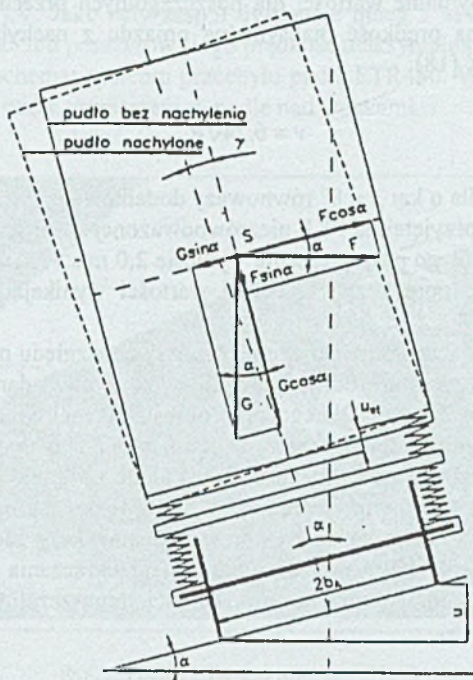
$$a_q = m \cdot \frac{v^2}{R} - g \cdot \frac{u}{2b_A} \quad (2)$$

Właśnie to wypadkowe przyspieszenie skierowane równoległe do podłogi jest odczuwane przez pasażera podczas przejazdu wagonu przez łuki. Pożądane jest, aby wartość tego przyspieszenia była równa zero. Teoretycznie można wprowadzić w łuku dla danej prędkości maksymalnej przechyłkę o takiej wartości, aby to przyspieszenie odśrodkowe zostało zrównoważone ($a_q = 0$). Nie stosuje się jednak takiego rozwiązania ze względu na fakt przejeżdżania po tych samych torach wolniejszych pociągów towarowych, należy ponadto założyć możliwość zatrzymania się pociągu na łuku. W praktyce przechyłkę równoważącą ($a_q = 0$) wprowadza się dla prędkości pośredniej v ($0 < v < v_{max}$). Prędkość jazdy, przy której $a_q = 0$, nosi nazwę prędkości wyrównawczej. Przy prędkościach wyższych od niej siła odśrodkowa jest tylko częściowo kompensowana — występuje tzw. niedobór przechyłki u_n . W różnych zarządach kolejowych przyjmuje się dopuszczalne wartości nieskompensowanych przyspieszeń odśrodkowych w łukach w granicach $0,65 \div 1 \text{ m/s}^2$. Przejściowo też stosowana była wartość $1,2 \text{ m/s}^2$, ale występowały trudności z utrzymaniem toru [18].

Największą wartość prędkości w łuku, dozwolonej ze względu na komfort jazdy, można określić wzorem [18]:

$$v = \sqrt{\frac{R \cdot u}{11,8}} \quad [\text{km/h}] \quad (3)$$

Na liniach PKP stosuje się niedobór przechyłki 100 mm, co odpowiada przyspieszeniu $a_q = 0,65 \text{ m/s}^2$ [18].



Rys. 6. Siły oddziałujące na pudło wagonu w czasie jazdy przez łuk torowy [18] S - środek ciężkości; G - masa pudła wagonu ($G = mg$); F - siła bezwładności; α - kąt nachylenia płaszczyzny toru do poziomu; γ - dodatkowy kąt nachylenia pudła w łuku od sterowanej w wagonach przechyłki ust. (kontur nachylenego pudła w postaci linii przerywanej); $2b_A$ - rozstaw okręgów toczeniowych równy 1500 mm odpowiadający nominalnemu rozstawowi środków szyn 2s

Fig.1. The forces acting upon the car body when the car is going over a curve [12] S - centre of gravity; G - car body mass ($G = mg$); F - force of inertia; α - angle of inclination of the track plane to the level; γ - additional car body tilt angle generated by the car-controlled tilt (the outline of the body tilt is drawn as a dashed line); $2b_A$ - the wheel track of 1500mm corresponding to the nominal track gauge 2s

W wagonach z przechylnym pudłem poprzez dodatkowy przechył o kąt γ w łukach torowych otrzymuje się pozorne dodatkowe przechyłki u_{st} . Po uwzględnieniu niedoboru przechyłki, dozwoloną prędkość jazdy w łuku określa wzór [18]:

$$v = \sqrt{\frac{R}{11,8} \cdot (u + u_n)} \quad [\text{km/h}] \quad (4)$$

Przyjmując np. $\gamma = 8^\circ$ otrzymuje się największą wartość przechyłki $u_{st} = 210$ mm. Wzór na maksymalną prędkość w łuku torowym przyjmuje wtedy postać [18]:

$$v = \sqrt{\frac{R}{11,8} \cdot (u + u_n + u_{st})} \quad [\text{km/h}] \quad (5)$$

Jeżeli założy się maksymalne wartości dla poszczególnych przechyłek, tj. $u = 100$ mm, $u_{sr} = 210$ mm, to wzór na prędkość maksymalną pojazdu z nachylnym pudłem w łuku torowym przyjmuje postać [18]:

$$v = 6,24\sqrt{R} \quad (6)$$

Sterowane nachylenie pudła o kąt $g = 8^\circ$ równoważy dodatkowe przyspieszenie odśrodkowe o wartości $1,35 \text{ m/s}^2$. Przy przyjętej na PKP niezrównoważonej wartości przyspieszenia równej $0,65 \text{ m/s}^2$, wartość całkowitego przyspieszenia wyniesie $2,0 \text{ m/s}^2$. Na tor kolejowy przekazuje się jednak przyspieszenie poprzeczne w pełnej wartości wynikające z prędkości jazdy i promienia łuku.

Konieczne jest jednak zachowanie określonej rezerwy ze względu na kryterium deformacji toru, zależnej przede wszystkim od konstrukcji wózka przy danej prędkości jazdy i parametrach geometrycznych łuku. Dlatego przy określaniu maksymalnych prędkości jazdy dla wagonów z nachylnymi pudłami powinny być mierzone sumaryczne siły przekazywane na prześło toru. Dopuszczalne wartości tych sił są określone kartą UIC-515.

Wagony z pudłami przechylnymi w łukach torowych mogą poruszać się po łukach z prędkością o $25 \div 30\%$ wyższą niż wagony konwencjonalne, przy zachowaniu wymaganego komfortu podróżowania i spełnieniu warunku nieprzekraczania przez oddziaływanie dynamiczne na tor w kierunku poprzecznym wartości dopuszczalnych sił ze względu na deformację toru [18].

5. DOTYCHCZASOWE DOŚWIADCZENIA W EKSPLOATACJI POCIĄGÓW Z PRZECHYLNYM PUDŁEM

5.1. Konstrukcje włoskie (Fiat Ferroviaria)

Zakłady Fiat Ferroviaria są najbardziej znanym, światowym producentem pociągów z przechylnym pudłem, a także samych urządzeń do przechyłu [7]. Prace studyjne nad zastosowaniem mechanizmu przechylnego pudła pociągu rozpoczęto w koncernie Fiata w roku 1967. Były one kontynuowane przez pierwszą połowę lat 70., potwierdzając słuszność przyjętej koncepcji.

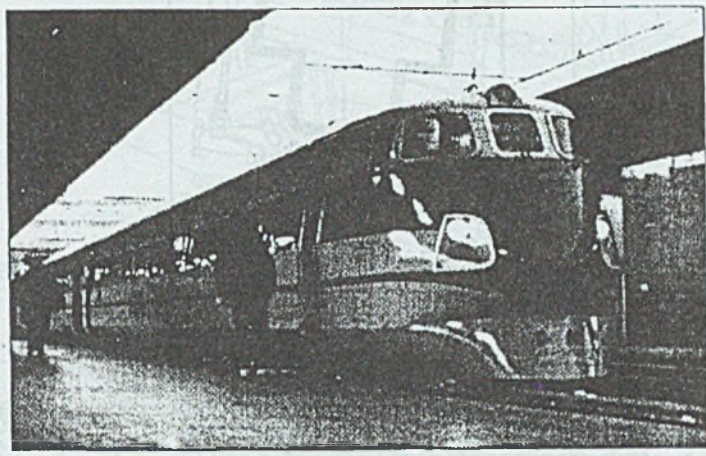
W roku 1971 zbudowano prototypowy pociąg wykorzystujący ten patent, składający się z jednego wagonu silnikowego, o oznaczeniu fabrycznym Y0160. Na przestrzeni lat 1971 ÷ 1974 przy udziale tego pociągu przeprowadzono liczne testy sprawdzające przydatność nowej konstrukcji.

W roku 1974 wprowadzono do produkcji pociąg ETR401, określane jako pierwsza generacja Pendolino. Składał się on z czterech wagonów, a regularne przewozy na kolejach włoskich przy jego użyciu rozpoczęto w 1976 roku. Doświadczenia wyniesione z eksploatacji tej serii posłużyły do optymalizacji przyjętych rozwiązań [1].

Kolejnym etapem rozwoju było zaprezentowanie przez Fiata w roku 1986 pociągu serii ETR450 (czyli drugiej generacji Pendolino), przedstawionego na rys. 7. Rozpoczął on regularną obsługę linii FS w maju 1988 roku. Jest to już pociąg dopracowany konstrukcyjnie i eksploatowany do dzisiaj, chociaż jego produkcji już zaprzestano. W rekomendowanej przez producenta specyfikacji składa się z 9 wagonów (8 silnikowych i 1 doczepnego). Jest zasilany

z sieci prądu stałego 3 kV. Jako cały zespół dysponuje mocą 5 MW, ma długość 226,7 m, masę 405 t i może zabrać 386 pasażerów. Jego prędkość maksymalna to 250 km/h [15].

Na rys. 8 pokazano schemat systemu przechyłu pudła ETR450. W tej generacji Pendolino mechanizm ten zabierał część przestrzeni w pudle nad wózkami.



Rys. 7. Pociąg ETR 450 [6]

Fig. 7. Train ETR 450

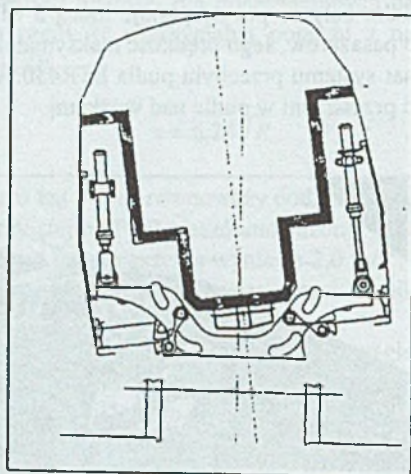
Obecnie podstawową odmianę pociągu Pendolino stanowi seria ETR460, czyli Pendolino trzeciej generacji. Do eksploatacji wprowadzono ją na jesieni roku 1995. W wyglądzie zewnętrznym uwagę zwraca klinowe, aerodynamiczne ukształtowanie kabiny maszynisty.

W porównaniu z generacją poprzednią pociąg udoskonalono, m.in. dzięki szerokiemu zastosowaniu nowych rozwiązań z dziedziny sterowania elektronicznego. Przekonstruowano także mechanizm przechyłu pudła. Jego elementy składowe przedstawia rysunek 9.

Ulepszeniami wprowadzonymi w III generacji pociągów Pendolino w stosunku do poprzednich wersji są: ulokowanie całego mechanizmu przechyłowego w wózku, co daje więcej miejsca wewnątrz wagonów oraz uproszczenie połączenia pudło – wózek, ułatwiające utrzymanie tego węzła.

Elektronicznie sterowane boczne zawieszenie pudła w zespołach III generacji zapewnia utrzymanie pudła w osi wózka i nie pozwala na wypychanie go na zewnątrz łuku pod wpływem działającej siły odśrodkowej. Wózki wykonane są na prędkość maksymalną 250 km/h i mogą przejeżdżać przez łuki o promieniu minimalnym 250 m.

Mechanizm przechyłowy Fiata ma sterowanie mikroprocesorowe i napęd hydrauliczny. Zastosowany układ rozmieszczenia czujników i przetworników do identyfikacji luków przed pociągiem pozwolił na ograniczenie liczby żyroskopów i mierników przyspieszenia zainstalowanych na wózkach, pomimo zastosowania przez producenta ze względów bezpieczeństwa kryterium przewymiarowania układu.



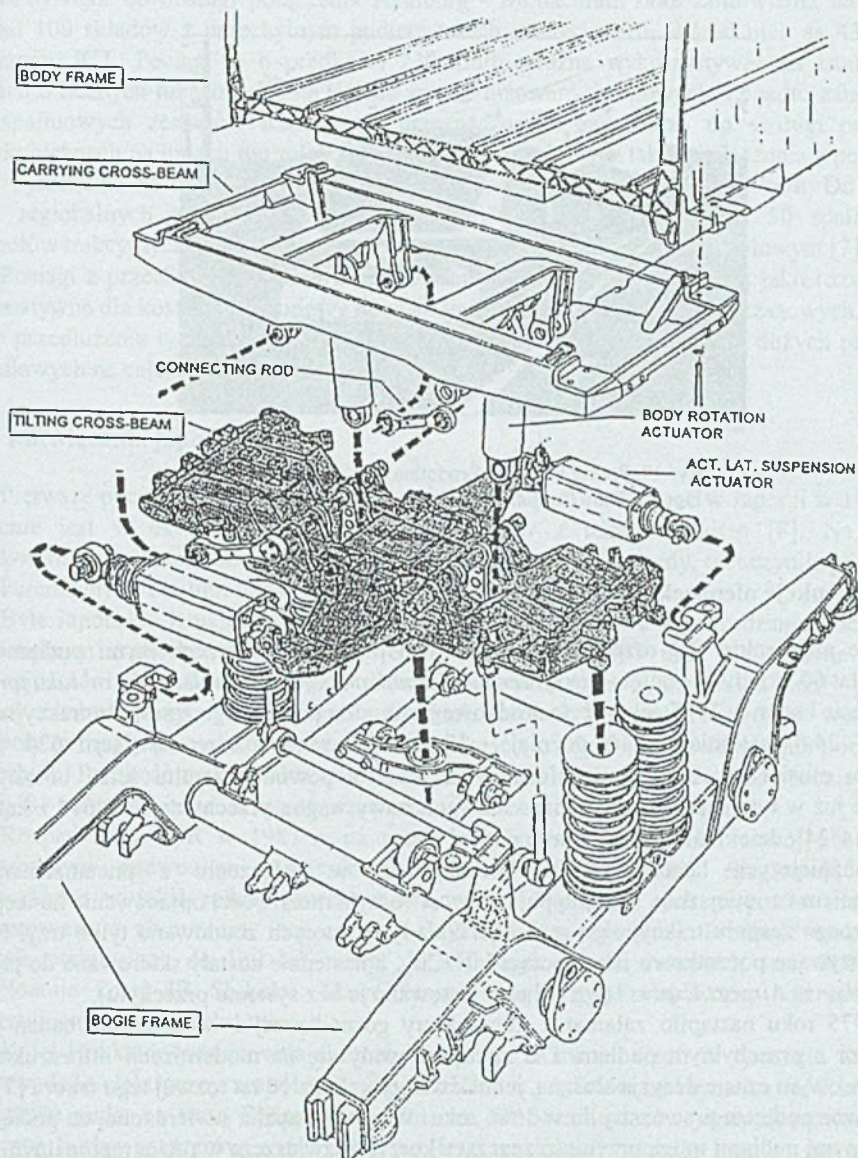
Rys. 8. System przechyłu pudła w ETR 450 [15]

Fig. 8. Tilting system in ETR 450

Proces sterowania przechyłem polega na wysyłaniu w regularnych odstępach czasu danych do głównego mikroprocesora pociągu przez miernik przyspieszenia, żyroskopy i przeliczniki, do których to wartości dodawana jest aktualna prędkość pociągu i wartość boczno, nierównoważonego przyspieszenia. Systemem przechyłki sterują bezpośrednio mikroprocesory w poszczególnych wagonach, które otrzymują sygnały z mikroprocesora głównego w zależności od miejsca ich znajdowania się w pociągu i przeliczają ten sygnał na wartość kąta przechyłu.

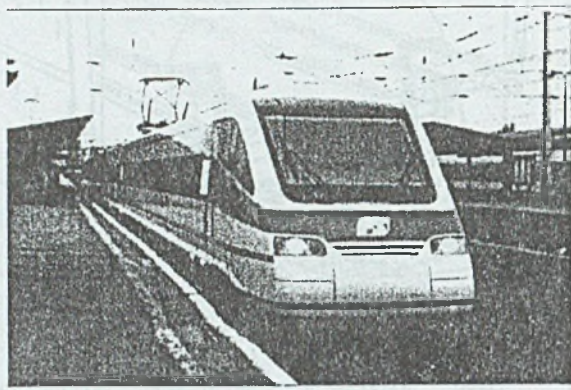
Hydrauliczny układ napędowy składa się z wysokociśnieniowej pompy i siłowników. Po uruchomieniu serwowaworów następuje zadziałanie siłowników zainstalowanych po dwa na każdą stronę wagonu – łącznie 4 pod wagonem – i pudło zostaje przechylone. Przechył wagonu może nastąpić tylko wówczas, gdy spełnione są jednocześnie wszystkie niżej wymienione warunki:

- nastąpi rozpoznanie huku przed pociągiem;
- prędkość pociągu będzie wynosiła co najmniej 70 km/h;
- przechyłka toru osiągnie pewną minimalną wartość i będzie miała tendencję do dalszego wzrastania;
- nierównoważone boczne przyspieszenie osiągnie pewną wartość progową.



Rys. 9. Wózek pociągu ETR 460 z elementami systemu przechyłu [15]
Fig.9. The ETR460 train bogie with the tilt mechanism elements [4]

Na rysunku 10 przedstawiono pociąg ETR 460 Pendolino.



Rys. 10. Pociąg ETR 460 Pendolino [6]

Fig. 10. Train Pendolino ETR 460 produced by Fiat Ferroviaria

5.2. Konstrukcje niemieckie

Koleje niemieckie DB rozpoczęły badania nad pociągami z przechylnymi pudłami w połowie lat 60., kiedy to podjęto pracę *Sterowanie pudłem pojazdu w zależności od łuku toru*.

W czasie badań w 1965 roku użyto środkowego wagonu doczepnego z zespołu trakcyjnego serii VT 24.6, natomiast 7 lat później – 12 przebudowanych wagonów serii 624. Kąt przechyłu musiał być wtedy ograniczony do $2^{\circ}52'$ z powodu kształtu ścian bocznych. Jednakże już w tym samym roku zaprezentowano nowy wagon przechylny serii 614 z kątem wychyłu $4^{\circ}24'$, dzięki zmianom kształtu pudła [7].

W późniejszych latach technika przechyłowa, w połączeniu z pneumatycznym zawieszeniem i zmniejszoną skrajnią pojazdów, stworzyła możliwości opracowania koncepcji elektrycznego zespołu trakcyjnego serii 403. Składy te, których zbudowano tylko trzy, były wykorzystywane początkowo jako pociągi InterCity, a następnie zostały skierowane do pracy jako *Lufthansa Airport Express* (wg [7] eksploatowano je bez systemu przechyłu).

W 1975 roku nastąpiło załamanie koniunktury gospodarczej i wstrzymanie badań nad pojazdami z przechylnym pudłem. DB skoncentrowały się na modernizacji infrastruktury. Była to w owym czasie decyzja słuszna, jednak wstrzymała na 10 lat rozwój tego taboru [7].

Ponowne podjęcie prac nastąpiło w 1986 roku. W wyniku analiz stwierdzono, że pociągi z przechylnymi pudłami mogą przynieść znaczące korzyści, zwłaszcza w ruchu regionalnym. W tym celu postanowiono przebudować istniejący już włoski pociąg Pendolino z aktywnym systemem przechyłu i hiszpański pociąg Talgo z pasywnym systemem przechyłu.

Przeprowadzone z pomyślnym wynikiem próby doprowadziły do zakupów [7]:

- 20 pociągów spalinowych zespołów trakcyjnych serii 610 wyposażonych w system przechyłowy firmy Fiat, do obsługi połączeń Regio Express w rejonie Norymbergii;
- 4 składy wagonów Talgo, ciągniętych lokomotywami i wykorzystujących pasywny system przechyłu, dający poprawę komfortu jazdy w pociągach InterCityNight, które wprowadzono na trasach Berlin – Bonn i Berlin – Monachium.

Na tym się nie skończyło, ponieważ złożono zamówienia na dwa nowe pociągi InterCityNight do obsługi połączenia Hamburg - Monachium oraz zamówienia na łącznie ponad 100 składów z przechylnym pudłem trzech różnych serii. Wśród nich są 43 składy pociągów ICT. Pociągi te o prędkości 230 km/h, można wykorzystywać na istniejących liniach o licznych łukach, jak i na liniach zmodernizowanych i nowych. Ponadto zamówiono 14 spalinowych zespołów trakcyjnych przeznaczonych zasadniczo do obsługi pociągów dalekobieżnych na liniach nie zelektryfikowanych, ale zdolnych także do łączenia z pociągami ICT i jeżdżenia na odcinkach zelektryfikowanych z prędkościami do 200 km/h. Do obsługi linii regionalnych z prędkościami do 160 km/h zamówiono wreszcie 50 spalinowych zespołów trakcyjnych VT 611 z nowo opracowanym mechanizmem przechyłowym [7].

Pociągi z przechylnym pudłem są traktowane na kolejach niemieckich jako rozwiązanie alternatywne dla kosztownej budowy nowych linii lub modernizacji dotychczasowych, a także jako przedłużenie tych linii na każdym z jej końców w celu zapewnienia dużych prędkości handlowych na całej trasie podróży.

5.3. Rozwiązania japońskie

Pierwsze pociągi z przechylnym nadwoziem zostały wprowadzone w Japonii w 1973 r., a obecnie jest w eksploatacji prawie 700 wagonów z takim układem [8]. Na liniach wąskotorowych Japonii pociągi te umożliwiły skrócenie czasów jazdy, co uczyniło je bardziej konkurencyjnymi dla linii lotniczych.

Byłe Japońskie Koleje Państwowe (JNR) były pionierami we wprowadzaniu pociągów z przechylnym nadwoziem na swojej sieci wąskotorowej 1067 mm. Elektryczne zespoły trakcyjne serii 381, 6-wagonowe, z nadwoziem wykonanym z aluminium miały przechył bierny z wbudowanymi między pudło a wózek rolkami, a przechył wagonów wynosił 5°. Zespoły te mogły przejeżdżać przez łuki z prędkością o 15-20 km/h większą niż pociągi bez przechyłu. Prędkość maksymalna zespołów 381 wynosiła 120 km/h. Jednak obecnie zespoły serii 381 mają już ponad 20 lat, są przestarzałe i wzrosła ich awaryjność [8].

Rozpad kolei JNR w 1987 r. na sześć grup spowodował szybki rozwój pociągów z przechylnym nadwoziem. Obecnie wszystkie koleje japońskie eksploatują pociągi wyposażone w jakiś rodzaj przechyłu aktywnego. Nadwozia tych zespołów nie są już wykonywane z aluminium, lecz ze stali zwykłej lub nierdzewnej. Prędkość maksymalna została podniesiona do 130 lub nawet do 160 km/h, jak w zespołach serii 8000, które eksploatuje kolej JR Shikoku. Nowe zespoły mają napęd elektryczny lub spalinowo-hydrauliczny i rozrząd ukrotniony.

Kolej Hokkaido postanowiła skracać czas jazdy na swojej sieci. W tym celu w 1990 r. wprowadziła elektryczny zespół trakcyjny serii 785 o prędkości maksymalnej 130 km/h, bez przechyłu pudła na trasę Sapporo - Asahikawa. Skrócenie czasów jazdy doprowadziło do wzrostu liczby pasażerów o ok. 10%, co jeszcze raz potwierdziło zasadę, że wzrostem szybkości zdobywa się pasażerów [8]. Zachęcone tym sukcesem koleje JR Hokkaido zwróciły uwagę na kolejną linię, jaką była nieelektryfikowana linia Sapporo-Hakodate, długości 319 km. Czas przejazdu pociągiem na tej trasie wynosił wówczas 3 godziny 29 minut, a konkurencyjne linie lotnicze uruchamiały wówczas między tymi miastami 8 par lotów na dobę. Aby pokonać rywala, konieczne było osiągnięcie czasu przejazdu co najwyżej 3 godziny. Po krótkiej analizie uznano, że ze względu na to, że linia na 1/3 swojej długości ma dużą ilość łuków i tylko w połowie jest zelektryfikowana, a ponadto wąskotorowa, należy zastosować spalinowe zespoły trakcyjne z przechylnym nadwoziem. Kolej Hokkaido nie była w pełni usatysfakcjonowana eksploatacją odziedziczonych po kolejach JNR zespołów trakcyjnych z pasywnym systemem przechyłu, które miały zastosowane rolki pomiędzy

podłębem a wózkami. Wprawdzie nadwozia tych zespołów przechyły się na łukach samoczynnie z powodu działania siły odśrodkowej, tym niemniej bezwładność podłęb i opory tarcia mechanizmu przechyłowego opóźniały niwelowanie oddziaływania siły odśrodkowej na pasażerów i obniżały w ten sposób komfort jazdy, zwłaszcza podczas wjazdu w łuk i przy wyjeździe z niego [8].

Problem ten został rozwiązany przez wprowadzenie sterowanego, pasywnego systemu przechyłki. Polega on na tym, że komputer pokładowy pociągu zawiera wprowadzone do pamięci dane odnośnie do lokalizacji, promienia i długości każdego łuku na linii, po której jedzie pociąg. Przy zbliżaniu się do łuku komputer oblicza położenie pociągu przyjmując jako punkty odniesienia elektromagnesy przytorowe urządzeń służących do zatrzymania pociągu i ustala właściwy kąt przechyłu i czas jazdy z tym przechyleniem. Przechył jest sterowany cylindrami pneumatycznymi wbudowanymi pomiędzy podłęb pojazdu i wózki. Zastosowany układ jest absolutnie niezawodny, gdyż nawet jeśli ulegnie uszkodzeniu w czasie jazdy, to przechył pasywny i tak nastąpi skutek działania siły odśrodkowej.

Dotychczasową trudnością dla producentów taboru jest to, że kolej JR Hokkaido wymaga, aby pociągi jeździły niezawodnie także w warunkach zimowych, przy silnych opadach śniegu i temperaturach do -20°C . Jest to trudne do spełnienia, gdyż urządzenia przechyłu znajdują się na wózkach i są w zasięgu śniegu unoszącego się z torowiska w czasie jazdy. Śnieg przedostawał się do urządzeń i zakłócał pracę mechanizmu przechyłowego, co powodowało, że działał on z mniejszą dokładnością lub był w ogóle eliminowany z pracy. Wpływało to na obniżenie komfortu jazdy, a w ostateczności prowadziło do konieczności ograniczenia prędkości pociągu. Po próbach z prototypem zespołu serii 281, który pierwotnie był 2-wagonowym spalinowym zespołem trakcyjnym z rolkami w mechanizmie przechyłowym, zdecydowano się na dodanie trzeciego wagonu wyposażonego w prowadnik łożyskowy. Uzyskano w ten sposób mniejsze tarcie niż przy poprzednim łożysku rolkowym i możliwość dalszego zminiaturyzowania układu. Sterownik układu umieszczono ponadto w pyłoszczelnej obudowie, co zatamowało przedostawanie się do niego śniegu i wilgoci. W ten sposób urządzenie przechyłu zaczęło pracować bezawaryjnie [8].

Nowszą konstrukcją w tym zakresie są zespoły serii 281, które mają kąt przechyłu 5° i mogą przejeżdżać przez łuki o promieniu 600 m z prędkością 120 km/h, czyli o 30 km/h szybciej niż pociągi konwencjonalne. Wprowadzenie tych zespołów na trasę Sapporo – Hakodate w 1994 r. spowodowało skrócenie czasu jazdy o 30 minut, do 2 godzin 59 minut, w wyniku tego wspomniane wyżej linie lotnicze musiały zredukować liczbę lotów między tymi miastami, gdyż część podróżnych przesiadła się na pociąg [8].

Następnym celem kolei Hokkaido stało się skrócenie czasu jazdy pomiędzy Sapporo a Kushiro, na trasie długości 349 km, do 3 godzin 40 minut, czyli o 45 minut. Aby to osiągnąć konieczne było zbudowanie nowego spalinowego zespołu trakcyjnego, oznaczonego serią 283, który mógłby pracować w jeszcze niższych temperaturach i przy jeszcze większych opadach śniegu niż te, które występują na linii Sapporo – Hakodate. Ponadto nowy zespół powinien pokonywać jeszcze ostrzejsze łuki i jeszcze słabiej oddziaływać na tor, gdyż omawiana linia jest położona na niestabilnym podłożu [8].

Zespół serii 283 wszedł do eksploatacji w 1997 r. Ma on wózki z nową konstrukcją naroży i samosterujące zestawy kołowe, które mają mniejsze poprzeczne oddziaływanie na tor przy ostrych łukach. W ten sposób zespół serii 283 jest bardziej stabilny od zespołu 281, gdyż ma w porównaniu z nim o 50% mniejsze siły poprzeczne średnie, o 10 - 15% mniejszą maksymalną siłę poprzeczną i o 10 - 15% niższy współczynnik wykołowania [8].

Chociaż zespoły serii 283 są wzorowane na serii 281, to jednak mają szereg ulepszeń, a mianowicie niżej położony środek ciężkości (1,35 m wobec 1,47 m), niżej położoną oś obrotu

pułta w czasie przechyłu (1,9 m wobec 2,3 m) i większy kąt przechyłu (6° zamiast 5°). W wyniku tych zmian zespoły serii 283 mogą przejeżdżać przez łuki o 10 km/h szybciej niż zespoły serii 281 [8].

Kontrolowany przechył bierny wyraźnie poprawia komfort jazdy na łukach i zachowanie się samego pociągu na łuku. Układ sterujący składa się z żyroskopu mierzącego przechyłkę i przyspieszeniomierza, który wykrywa wjazd pociągu na łuk [8].

Kolej JR Hokkaido modernizuje obecnie linię Soya w celu wprowadzenia nowych pociągów ekspresowych od wiosny 2000 r. Nowe ekspresy będą oparte na zespołach serii 201, ale z ulepszonym systemem -przechyłu, dostosowanym do topografii linii. Oczekuje się skrócenia czasu jazdy pomiędzy Sapporo i Nayoro, przy odległości 213 km, o 35 minut, z 2 godzin 53 minut do 2 godzin 18 minut [8].

5.4. Inne rozwiązania

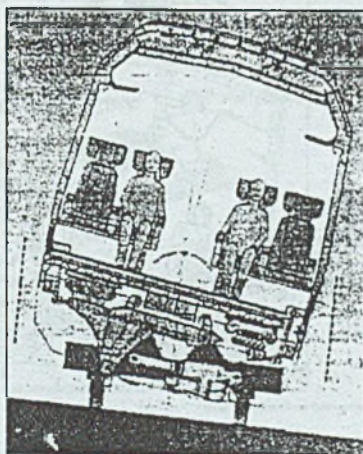
Liczba nowo opracowywanych mechanizmów przechyłu pułta zarówno aktywnych, jak i pasywnych, rośnie prawie proporcjonalnie do uruchamianych w tym systemie pociągów, ponieważ nie ustają poszukiwania przez producentów nowych, tańszych rozwiązań.

Neicontrol-E [7]

Urządzenie o nazwie Neicontrol-E znalazło zastosowanie jako sterownik mechanizmu przechyłowego w nowych spalinowych zespołach trakcyjnych serii 611, zamówionych przez koleje niemieckie (50 zespołów serii 611 do obsługi ruchu lokalnego).

Urządzenie Neicontrol-E może być przydatne do elektrycznie napędzanego układu przechyłowego w pociągach o prędkości do 160 km/h. Maksymalny kąt przechyłu może wynieść 8° . Nowy system wykorzystuje rozwiązanie napędu zastosowane w urządzeniach typu Geadrive i opracowane niegdyś do celów wojskowych przez firmę Dasa, będącą filią zakładów AEG. Impulsy pochodzące od czujników przetwarzane są elektronicznie na sygnały wykonawcze dla mechanizmu przechyłowego.

Zaletami urządzenia Neicontrol-E mają być: niskie zużycie energii, mała masa, bezpośrednie uzyskiwanie przechyłu i niskie koszty utrzymania.



Rys. 11. Zasada przechyłu pułta w systemie Neicontrol-E [7]

Fig. 11. Tilting system Neicontrol-E

Jak widać na schemacie (rys. 11), urządzenie Neicontrol-E nie zajmuje miejsca w przedziale pasażerskim, ponieważ jest całkowicie zbudowane w wózku i przechyla pudło poprzez belkę poprzeczną wózka.

ContRoll [7]

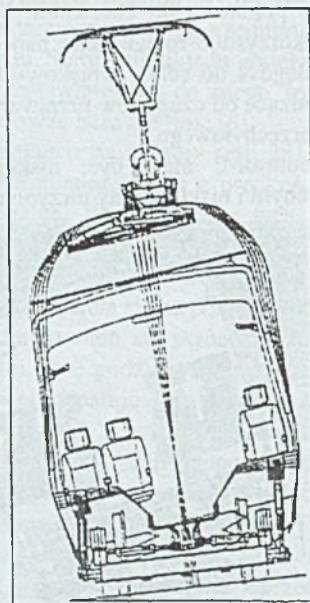
Firma Talbot — obecnie część koncernu Bombardiera — twierdzi, że wynalazła nowy, prostszy sposób uzyskania przechyłu pudła poprzez zastosowanie stabilizatorów stateczności poprzecznej.

System Talbota, zwany ContRoll, został przebadany w duńskim pociągu IC3 przy przechylenie do 2,5 stopnia, a ostatnio podjęto próby z przechyłem do 6,5 stopnia na kolejach niemieckich. Układ przechyłowy Talbota ma na każdym wózku po dwa siłowniki hydrauliczne do przechyłu pudła, dwa siłowniki hydrauliczno-pneumatyczne boczne (kompensatory) i jeden stabilizator stateczności poprzecznej (rys. 12).

Kinematyka układu ContRoll polega na współdziałaniu:

- siłowników hydraulicznych pionowych, które obracają pudło wokół jego osi poziomej,
- siłowników hydrauliczno-pneumatycznych poziomych sterowanych zaworami i działających jednocześnie jako tłumiki.

Siłowniki pionowe poruszają się jednocześnie w przeciwnych kierunkach, przechylając pojazd odpowiednio do pozycji stabilizatora stateczności poprzecznej. Zadaniem podsystemu kontrolującego przesuw boczny pudła względem wózka jest kompensowanie bocznego przyspieszenia o wysokiej, prawie stałej wartości i zapewnienie bocznego usprężynowania pneumatycznego przeciwdziałającego ewentualnym uderzeniom na nierównościach łuku, co obniża także zużycie energii przez pojazd.



Rys. 12. Stabilizatory stateczności poprzecznej pojazdu w systemie przechyłu ContRoll firmy Talbot [7]
 Fig. 12. System of lateral stability ContRoll of Talbot

Współdziałanie siłowników przechylających i poziomych wyznacza oś obrotu pudła, która znajduje się prawie zawsze w tym samym miejscu. Jej wysokość ponad główką szyny musi uwzględniać przeciwstawne sobie czynniki, jakimi są: komfort jazdy pasażerów, profil pudła wagonu i zużycie energii. Zmiana któregoś z tych czynników, np. profilu pojazdu, zmienia położenie osi obrotu.

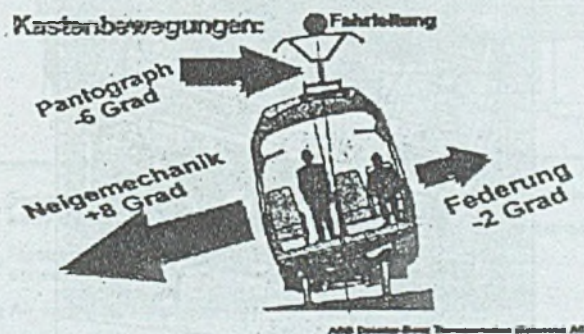
ICN [9]

W szwajcarskim pociągu ICN zastosowano rozwiązanie firmy Fiat-SIG. Konstrukcja ta została opracowana specjalnie w odniesieniu do wymagań Szwajcarskich Kolei Związkowych dla tras o dużej częstotliwości występowania odcinków łukowych o małym promieniu oraz do dużych prędkości.

Sterowane pudłem promieniowe ustawienie zestawu kołowego „Nawigator” zmniejsza siły oddziaływania pomiędzy kołem i szyną, a tym samym powoduje zmniejszone zużycia obu tych elementów. Prowadzi to do mniejszych obciążeń toru, jak również do wydłużenia okresów pomiędzy ponownym profilowaniem kół.

Pudło wagonu wspiera się w wózku poprzez centralny amortyzator powietrzny na wahaczu i zabezpieczone jest przed wywróceniem się stabilizatorem typu „wank”, zastosowanym na każdym wózku. Aby zmniejszyć oddziaływanie na pasażerów przyspieszenia w kierunku poprzecznym, a tym samym podwyższyć komfort jazdy na łukach, pudło wagonu zostało pochylone do wnętrza łuku za pomocą elektromechanicznych napędów układu przechyłu. Kąt pochylenia może dochodzić do 8° (rys. 13). W przypadku awarii elektronicznych układów sterowania lub napędu przechyłu, pudło wagonu ustawia się samoczynnie, za przyczyną odpowiednio uformowanej prowadnicy wałeczkowej, poprzez działanie siły ciężkości w bezpieczne położenie środkowe.

Napęd przenoszony jest poprzez wał przegubowy, który łączy podwieszony do pudła wagonu silnik z napędem osiowym wózka. Powstające w przypadkach awaryjnych wysokie impulsy momentu obrotowego silnika asynchronicznego zostają przechwytywane przez sprzęgła przeciążeniowe, i w ten sposób unika się uszkodzeń układu przenoszenia momentu obrotowego. Wyważone i ukształtowane w postaci kosza urządzenia zabezpieczające obejmują przeguby krzyżowe oraz kołnierze napędowe w ten sposób, że awaria wału lub jakiegoś łączącego się z nim elementu nie powinna w następstwie spowodować żadnych szkód.



Rys. 13. Rysunek pociągu ICN w czasie jazdy z przechyłem [9]

Fig. 13. Train ICN in ride with body tilt

Pantograf także jest wyposażony w system przechyłu. Układ przechyłu pantografu sprzężony jest bezpośrednio z układem przechyłu wagonu poprzez tzw. "wał elektryczny". Niezależny nadzór obydwu kątów przechyłu powoduje, że w przypadku awarii pantografu jest natychmiast opuszczany, a system jest wyłączany. Pantograf za pomocą mechanicznych sprężyn wprowadzany jest na pozycję środkową, zapewniającą poprawną pracę. W ten sposób wykluczane jest niebezpieczeństwo uszkodzenia przewodu jezdnego.

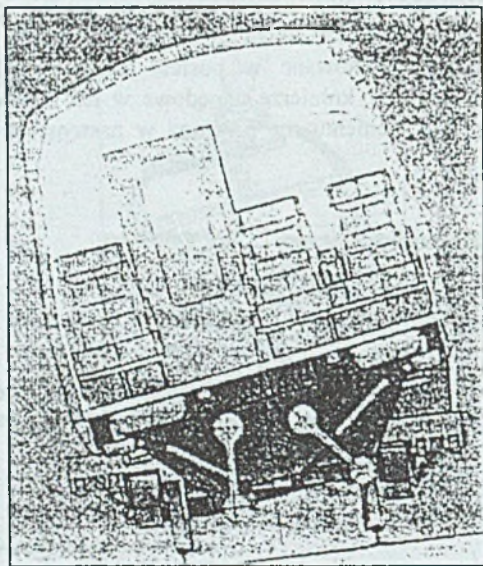
X-2000 [17.7]

Szwedzkie zakłady Adtranz wyprodukowały dotychczas 43 pociągi zespołowe serii X-2000, które są eksploatowane w Szwecji. Mają także zamówienia z Norwegii, ubiegają się o zamówienia w Stanach Zjednoczonych i Portugalii.

Mechanizm przechyłowy pociągu X-2000 (rys. 14) jest uruchamiany przez komputerowo sterowany pomiar przyspieszenia pierwszego wagonu. Przechył jest więc inicjowany przez siłę odśrodkową oddziałującą na czujnik umieszczony na pierwszym wózku pociągu. Czujnik przekazuje sygnał do komputera, który w zależności od aktualnej prędkości jazdy oblicza, kiedy i pod jakim kątem każde pudło wagonu ma się przechylić

Przechył jest dokonywany za pomocą urządzeń hydraulicznych znajdujących się na każdym wózku, z wyjątkiem wagonu silnikowego, który nie przechyla się. Maksymalny kąt przechyłu wynosi 6,5 stopnia, a maksymalna prędkość przechyłu 4 stopnie/sekundę.

Pociągi z przechylnymi pudłami w połączeniu z pewnymi pracami modernizacyjnymi w zakresie infrastruktury poprawiły znacznie poziom podróży koleją w Szwecji poprzez skrócenie czasów podróży, a na niektórych liniach umożliwiły stworzenie konkurencji z komunikacją lotniczą. Szwedzkie koleje wskazują np., że ich udział w całości przewozów na trasie Sztokholm - Goeteborg wzrósł z poniżej 40% przed wprowadzeniem pociągów X-2000 w 1990 roku do 53% w 1994 roku [7].



Rys. 14. System przechyłu pociągu X-2000 [7]
Fig. 14. Tilting system in train X-2000

6. PRZYSTOSOWANIE TORU KOLEJOWEGO I SIECI TRAKCYJNEJ DLA POCIĄGÓW SZYBKICH

Tor

Dobrym przykładem prac dostosowujących dotychczasowe tory kolejowe do zwiększenia prędkości jazdy mogą być doświadczenia Norweskich Kolei Państwowych NSB [4]. Analiza tych doświadczeń może być istotna dla PKP, mając na uwadze planowane zwiększenie prędkości jazdy pociągów w Polsce na dotychczasowej sieci torowej.

W 1993 r. przeprowadzono w Norwegii pomyślne próby z pociągami typu X2 i VT 610. Wykonane w czasie tych prób pomiary sił w torze wykazały, że są one w granicach dopuszczalnych. Podczas dalszych prób z pociągiem X2 (skrócona wersja pociągu X 2000) w roku 1996 r. stwierdzono także zadowalające współczynniki spokojności biegu [4].

Koleje norweskie prowadzą prace nad zwiększeniem bezpieczeństwa ruchu poprzez wzmacnianie stabilności toru, a w tym poszerzanie ławy torowiska i zwiększanie warstwy podsypki, a także jej wymianę. Przesuwane są semafora w celu dostosowania odstępów blokowych do wydłużonych dróg hamowania. Ogranicza się ilość przejazdów drogowych w poziomie szyn, zarówno poprzez likwidację mniej uczęszczanych, jak i budowanie wiaduktów. Na pozostawionych przejazdach poprawia się widoczność z drogi w kierunku toru.

Inne działania koncentrują się na zlikwidowaniu nieregularności toru w celu zmniejszenia drgań taboru oraz dostosowania rampy przechyłkowej do promienia łuku, o ile nie koliduje to z krzywymi przejściowymi.

Projektując układ geometryczny linii kolejowej i ustalając przechyłki należy wybierać rozwiązania, które umożliwią uzyskiwanie największej dopuszczalnej prędkości. Można wyliczyć, uwzględniając istniejące ograniczenia, że pociągi z przechylnym nadwoziem mogą przejeżdżać przez łuki z prędkościami do 67% wyższymi niż pociągi konwencjonalne [4]. Jednak w zakresie nadającego się do przyjęcia komfortu jazdy najlepsze wyniki uzyskuje się w zakresie prędkości o 20 – 31% wyższej niż dla pociągów konwencjonalnych i na łukach o przechyłce 150 mm, a także przy całkowitym braku przechyłki.

Sieć trakcyjna

W związku z przewidywanym zwiększeniem prędkości jazdy na liniach kolejowych w Polsce, badane były ograniczenia, jakie mogą wystąpić w zakresie dostawy mocy i energii do pociągów o napędzie elektrycznym dużej mocy przy istniejącym wyposażeniu infrastruktury kolejowej. Chodziło o to, czy będzie możliwa dostawa energii do nowych lokomotyw lub zespołów trakcyjnych o mocy rzędu 6 MW przewidzianych do kursowania z prędkością 200 km/h, w założeniu spełnienia warunku utrzymania w sieci trakcyjnej napięcia nie niższego od 2800 V.

Badania takie przeprowadzone zostały w licznych pracach studialnych w związku z przygotowaniem linii kolejowych do wprowadzenia ruchu pociągów z większymi prędkościami, a więc większymi mocami pojazdów trakcyjnych [6, 7, 8].

Dla dużych prędkości jazdy najbardziej przygotowana została na PKP linia CMK, na której już w przyjętych założeniach projektowych miały kursować pociągi z prędkościami do 250 km/h. W tym okresie jednak brak było uregulowanych wymagań w zakresie jakości dostawy energii do szybkich pociągów, przypuszczano więc, że wystarczającym wyposażeniem odmiennym niż dla pozostałych linii będzie zwiększenie mocy podstacji trakcyjnych i obniżenie ich wzajemnych odległości. Uzyskano przez to zwiększenie mocy liniowej do ok. 0,43 MW/km, wobec ok. 0,2 MW/km dla innych magistralnych linii

kolejowych. Nie przewidywano wówczas jednak zwiększonych wymagań w zakresie konieczności utrzymania w sieci trakcyjnej dostatecznie sztywnego napięcia.

Takie podejście do ukształtowania układu zasilania już wówczas odbiegało od wdrażanych w Europie unowocześnionych systemów zasilania trakcyjnego. Gdy się porówna np. wyposażenie w układy zasilania elektroenergetycznego linii kolejowych we Włoszech, budowanych dla prędkości 250 km/h, o takim samym systemie zasilania, co w Polsce, to wymienić można pewne rozwiązania lepiej dostosowane do dużych prędkości.

Odmiennością zastosowanego systemu zasilania we Włoszech są przede wszystkim [16]:

- jednolite warunki zasilania i wyposażenia technicznego wszystkich podstacji zasilających tę samą linię, włączonych do pracy równoleglej;
- zasilanie podstacji trakcyjnych z wydzielonego układu energetycznego wysokiego napięcia 132 kV o dostatecznie dużej mocy zwarciowej;
- zasilanie podstacji trakcyjnych z układów o znacznej przewodze mocy w stosunku do mocy pobieranej przez pociągi elektryczne;
- wprowadzenie na wszystkich poziomach transformacji napięcia, regulacji napięcia, co umożliwiało utrzymanie sztywnego napięcia w sieci dla warunków dużych obciążeń prądowych (do 3000 A);
- zmniejszenie odległości między podstacjami do ok. 10 + 12 km, tzn. do połowy w stosunku do odległości poprzednich.

Te wszystkie wprowadzone modyfikacje spowodowały, że warunki zasilania pociągów elektrycznych uległy znacznej poprawie zarówno w zakresie jakości dostaw mocy i energii, jak też obniżania oddziaływania w formie zakłóceń na stronę energetyczną odbiorców trakcyjnych.

Pozostawienie w systemach trakcyjnych w Polsce zasilania podstacji trakcyjnych z poziomu 15 kV, przy stosunkowo małych mocach transformatorów zasilających, np. 6.3 MVA lub 10 MVA, i niestosowania automatycznej regulacji napięcia w podstacjach trakcyjnych, z góry uniemożliwiało utrzymanie sztywnego napięcia w sieci trakcyjnej. Dlatego też należało się liczyć z ograniczonymi możliwościami wdrożenia na liniach kolejowych w Polsce nowoczesnych pociągów o zwiększonym poborze mocy, a więc zwiększonych prędkościach jazdy.

Jedynie wprowadzenie zasilania podstacji trakcyjnych na liniach magistralnych w Polsce z poziomu napięcia 110 kV, co jest obecnie pilotowo realizowane, przy jednoczesnym wdrożeniu automatycznej regulacji napięcia pod obciążeniem, może poprawić warunki energetyczne linii kolejowych.

7. UWAGI I WNIOSKI

1. Wprowadzenie do eksploatacji pociągów dużej prędkości jest obecnie rozwiązaniem koniecznym w celu zapewnienia konkurencyjności transportu szynowego względem innych rodzajów transportu.
2. Pociągi z mechanizmem przechyłnego pudła stwarzają możliwość wprowadzenia dużych prędkości jazdy na dotychczasowych układach torowych.
3. Pociągi dużej prędkości z mechanizmem wychyłnego pudła są szansą na unowocześnienie w krótkiej perspektywie czasowej oferty przewozowej kolei w krajach nie posiadających, jak dotąd, specjalnych linii dla dużych prędkości.
4. W konstrukcji nowoczesnych pasażerskich pojazdów szynowych dużą wagę przywiązuje się do zagadnień komfortu pasażerów.

LITERATURA

1. di Majo F., Nascimbene A.: Pendolino. Storia e prospettive di un treno italiano.
2. Ferrari P.: Pendolini con tante novità. Arrivano gli ETR.460. iTreni 1993, nr 143.
3. First Siemens bogie with active tilting. International Railway Journal 1999, nr 1.
4. Gåsemyr H., Kufver B.: Norwegian adapt tracks for tilting trains. International Railway Journal 1999, nr 1.
5. Gąsowski W.: Aerodynamika pociągu. OBRPS - Poznań 1998.
6. Harassek A., Raczwiński J.: Najszybsze pociągi świata. Świat Kolei nr 2/1998.
7. Harassek A., Raczwiński J.: Pociągi z przechylnym pudłem - za i przeciw. TTS 1996, nr 9.
8. Japan's tilting fleet is one of world's largest. International Railway Journal 1999, nr 1.
9. König C., Forrer D.: Der SBB-Neigezug ICN. EI - Eisenbahningenieur 1998, nr 10.
10. Marciniak J.: Kolejowe pojazdy szynowe nowych generacji. Politechnika Radomska, Radom 1998.
11. Molinari L.: L'ETR 480. Continua l'evoluzione del „Pendolino”. La Tecnica Professionale 1998, nr 5.
12. Myśliwiec H.: Dlaczego właśnie Pendolino? Maszynopis Dyrekcji PKP 1998.
13. Obliczenia i analizy wydolności układu zasilania linii kolejowej CMK pod kątem wprowadzenia wysokich prędkości jazdy. Opracowanie PW, Warszawa 1996.
14. Opracowanie zespołowe: Analiza układu zasilania modernizowanej linii E20. Spółdzielnia „ELMECHEM”, Warszawa 1993.
15. „Pendolino” the active tilting train of Fiat Ferroviaria. Materiały Fiat Ferroviaria.
16. Roman Z.: Możliwości zwiększenia prędkości jazdy pociągów na liniach magistralnych PKP. tts 1998, nr 12.
17. Romaniszyn Z., Wolfram T.: Nowoczesny tabor szynowy. Wydawnictwo Specjalne Instytutu Pojazdów Szynowych. Kraków 1997.
18. Zajęcki E.: Dlaczego pociągi z przechylnymi pudłami. tts 1996, nr 9.
19. Zalewski J.: Modernizacja infrastruktury kolejowej w Polsce. tts 1998, nr 10.

Recenzent: Dr hab.inż. Sylwester Markusik

Abstract

There are two primary types of high speed trains:

- trainsets - where the drive, usually divided between two or three bogies, is located at one or both ends of the train, in the passengerless motorcar;
- EMUs - where the drive is placed in several passenger cars.

The first of these systems provides the benefit of the easier servicing and repairs. It isolates the noise and vibration sources from the passenger cars. At the same time, it is more difficult to achieve the axle loads not exceeding the AGC demands, i.e. corresponding to 17t mass [9].

The advantage of the second system lies in the arbitrary placement of the drive system mechanisms in the train, the possibility of gaining a sufficient adhesion through an increase in the number of the drive bogies, even if the axle loads are greatly reduced. Its drawback is that

is difficult to fully isolate the passenger compartments from the damaging influence of drive systems. The service and repair conditions are less pliable and the design structure is more complex.

Another criterion for the classification of high speed trains is the presence (or absence) of body tilt mechanism in the track curves.

Without this mechanism the high speed trains require a specially built lines, with a minimum number of curves, and these curves of with a great radius.

The trains with tilted bodies may provide greater speeds on existing lines (the modification of the track is trifling). This is an attractive solution, in particular in densely populated areas.

The tilted body trains possess also some weak points.

First of all, even though these trains make possible the increase of travel speed on traditional lines, the speed attained is not as high as the speed achieved on newly-built lines. Next, going over curves at higher speeds generates an increased interaction with the track and a greater wear of the outer rail [11].