



Pociąg Maglew, Szanghaj (19.10.2008 r.). Fot. T. Ravache

Marek Graff

## Pociągi z unoszeniem magnetycznym

*Pociągi oparte na zasadzie toczenia się kół po szynach osiągnęły przez prawie 200 lat ich eksploatacji wysoki poziom dojrzałości rozwiązań technicznych, co umożliwiło ich powszechne wykorzystanie. W komercyjnych zastosowaniach została również opanowana technologia umożliwiająca ich eksploatację z prędkością ponad 300 km/h z perspektywą osiągnięcia 400 km/h. Rekord prędkości dla układu koło-szyna wynosi 575 km/h. Od kilkudziesięciu lat prowadzone są jednak badania nad nowymi rodzajami napędu z magnetycznym unoszeniem i silnikiem liniowym z kilkoma praktycznymi zastosowaniami. Pojawiły się również koncepcje systemu hyperloop, dla którego nie przedstawiono jednak jeszcze żadnych rozwiązań technicznych. W artykule omówiono rozwiązania techniczne i eksploatacyjne systemu opartego na magnetycznym unoszeniu.*

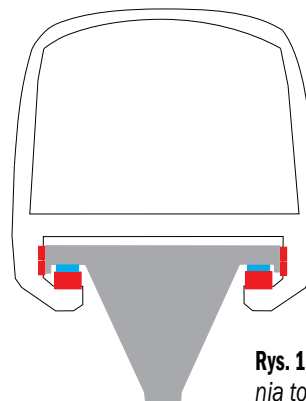
### Początki pociągów o unoszeniu magnetycznym

Maglew – czyli magnetyczna lewitacja jest zjawiskiem polegającym na unoszeniu się nad ziemią lub poruszaniu się ponad powierzchnią ziemi pod wpływem pola magnetycznego (dla pojazdów – będzie to ruch na tzw. poduszce magnetycznej). Szacuje się, iż przy zastosowaniu odpowiednich warunków (np. jazda w tunelu, pod zmniejszonym ciśnieniem) prędkość pojazdu może zostać zwiększona do ok. 6 500 km/h (obecnie jeden z pojazdów Maglew osiągnął prędkość maksymalną 603 km/h).

Idea pociągów Maglew wprawdzie pojawiła się już w I połowie XX w. w Niemczech i USA, jednak pozostała jedynie w fazie koncepcji. Pierwsze pociągi Maglew opracowano w latach 60. XX w. w Wiel-

kiej Brytanii jako pojazdy eksperymentalne. Pomysłodawcą był E. Laithwaite, który w ośrodku badawczym kolei brytyjskich w Derby zbudował tor testowy dla pociągów na poduszce magnetycznej. Jednak wskutek braku funduszy, w 1973 r. zapadła decyzja o całkowitym wstrzymaniu brytyjskiego programu pociągów Maglew.

Wielka Brytania była także krajem, który wdrożył technologię Maglew w regularnej eksploatacji: w latach 1984–1995 pomiędzy lotniskiem i dworcem kolejowym w Birmingham (~600 m) kursował pociąg poruszający się na poduszce magnetycznej (wysokość unoszenia nad torem wynosiła 15 mm). Pociąg ów ważył 3 t, jednak masa pojazdu mogłaby zostać w prosty sposób zwiększona do 8 t (poprzez wydłużenie składu), a prędkość maksymalna pojazdu wynosiła 42 km/h. Problemem był system elektroniczny nadzorujący funkcjonowanie całego systemu. Ostatecznie zrezygnowano z pociągów Maglew m.in. z powodu braku części zamiennych, a pojazd oznaczony jako RTV31 przekazano do muzeum kolejnictwa w Peterborough. Uczyniono to mimo przychylności lokalnych władz i przedstawicieli kół biznesu, faktu posiadania hipoteki gruntu, przez który przebiegała



Rys. 1. Unoszenie się pociągu nad powierzchnią toru w technologii Maglew EMS

linia pociągu Maglew oraz obecności tylko jednego skrzyżowania z drogą kołową na trasie pociągu.

W 1979 r. specjaliści niemieccy opracowali pociąg Maglew nazwany Transrapid 05 z wykorzystaniem elektrycznego silnika liniowego, wyposażonego w długi stojan, zapewniający możliwość uzyskiwania wzbudzenia na długiej drodze. Ów pojazd był przystosowany do przewozu pasażerów i został zaprezentowany opinii publicznej podczas wystawy przemysłowej w Hamburgu, gdzie kursował po torze o długości 908 m. Technologię tę wykorzystano w budowie tzw. M-Bahn (niem. *Magnetische Bahn* – kolej magnetyczna) w Berlinie Zachodnim: testowana od sierpnia 1989 r. została przekazana do regularnej eksploatacji w sierpniu 1991 r. Torowisko zostało poprowadzone na estakadach, a jedna ze stacji końcowych znajdowała się w pobliżu stacji metra Gleisdreieck. Jednak już po 2 miesiącach od momentu uruchomienia M-Bahn, kursy pociągów zostały zawieszono, a torowisko zdemontowane.

Technologia Maglew była niezależnie rozwijana także w Japonii począwszy od 1969 r. (dwa programy). Pierwszy z nich był opracowany całkowicie w Japonii: na zbudowanej linii doświadczalnej w Miyazaki osiągnięto prędkość 517 km/h w 1979 r. Wypadek, jaki zdarzył się na omawianej linii (nastąpiło zniszczenie pociągu) spowodował decyzję o przebudowie toru doświadczalnego w kierunku wydłużenia do 20 km w 1997 r., a nowe stanowisko doświadczalne nazwano Yamanashi. W tym samym roku osiągnięto prędkość 550 km/h (pociąg bezzałogowy) i 531 km/h (z pasażerami). W 2003 r. ustanowiono kolejny rekord – 581 km/h, poprawiony w 2015 r. na 603 km/h.

Drugi program rozwoju pociągów Maglew rozpoczęty w 1974 r. był rozwinięciem programu opracowanego w Niemczech (HSST). W 1985 r. w miejscowości Tsukuba zaprezentowano pociąg typu Maglew HSST-03 o nazwie *Linimo* podczas wystawy przemysłowej. Ów pojazd osiągał prędkość 30 km/h. Wersje rozwojowe pociągów HSST-04-1 i HSST-05 zaprezentowane w 1988 r. (Kumagaya) i 1989 r. (Yokohama) podczas wystaw przemysłowych, rozwijały prędkość odpowiednio 30 km/h i 42 km/h.

## Technologia Maglew

Pojęcie Maglew nie odnosi się ściśle do pojazdu, lecz do samego zjawiska unoszenia pojazdu przez pole magnetyczne. Torowisko Maglew jest całkowicie niekompatybilne z torowiskiem konwencjonalnym, zatem kolej Maglew musi istnieć jako całkowicie niezależna struktura. Wyjątkiem jest system *Applied Levitation SPM Maglev*, który dopuszcza kursowanie pociągów Maglew po konwencjonalnej sieci kolejowej.

Wśród typów pociągów Maglew można wyróżnić 3 rodzaje, w zależności od pola magnetycznego (pomiędzy pojazdem i szyną) poruszającego pociąg:

- ♦ EMS (ang. *electromagnetic suspension* – zawieszenie elektromagnetyczne) polegające na wykorzystaniu sił przyciągania,
- ♦ EDS (ang. *electrodynamic suspension* – zawieszenie elektrodynamiczne) poprzez zastosowanie sił odpychających pomiędzy dwoma polami magnetycznymi,
- ♦ SPM (ang. *stabilized permanent magnet suspension* – zawieszenie na magnesach stałych), zastosowano odpowiednie ustawienie magnesów stałych (tj. wykorzystano ich wewnętrzną strukturę).

Istnieje także technologia znana jako MDS (ang. *magnetodynamic suspension*), czyli zawieszenie magnetodynamiczne, wykorzystująca siły przyciągania magnesów trwałych w pobliżu szyny i utrzymująca w ten sposób pociąg nad torem. Technologia MDS znajduje się obecnie w fazie testów.



Pociąg Maglew kolei niemieckich w ośrodku testowym w Emsland, RFN (15.09.2008 r.). Fot. Thyssen-Krupp Transrapid GmbH



Zbudowana na podstawie technologii Siemens kolej magnetyczna wykorzystująca technologię EMS, Moskwa (18.06.2007 r.). Fot. P. Czech



Pociąg Maglew serii MLX-01 wykorzystujący zjawisko EDS, odcinek testowy Yamanashi, Japonia (23.11.2005 r.). Fot. Yosemite



Zbudowana na podstawie technologii Siemens kolej magnetyczna wykorzystująca technologię EMS, Moskwa (18.06.2007 r.). Fot. P. Czech

### EMS

Technologia EMS: pociąg unosi się ponad torze dzięki elektromagnesom umieszczonym w pojeździe, ukierunkowanym od podłoża do szyny. Elektromagnesy i zjawisko sprzężenia zwrotnego pozwalają na unoszenie się przez pociąg na stałej wysokości ponad torrem – 15 mm.

### EDS

Pociąg porusza/unosie się dzięki zawieszeniu elektrodynamicznemu, przy czym szyna i pociąg znajdują się w polu magnetycznym, a pociąg porusza/unosie się dzięki sile odpychającej pomiędzy polami magnetycznymi. Pole magnetyczne w pociągu jest wytwarzane przez elektromagnesy lub przez strukturę magnesów stałych. Siła odpychająca w szynach jest generowana przez indukowane pole magnetyczne przewodów elektrycznych lub przez pasy przewodnictwa w torach. Przy niskich prędkościach napięcie indukowane w zwojach oraz powstający w konsekwencji strumień pola magnetycznego są zbyt małe, aby utrzymać pociąg ponad torrem. Zatem pociąg musi się wtedy poruszać na kołach, ewentualnie musi istnieć inny sposób zapewniający pojazdowi możliwość poruszania się po torze, zanim zacznie się nad torrem unosić. Zwoje napędowe powodują powstanie siły pomiędzy magnesami i zapewniają poruszanie się pociągu. Opisane zwoje działają podobnie jak silnik liniowy: prąd przepływający przez zwoje powoduje powstanie pola magnetycznego wzdłuż toru. Częstotliwość zmian napięcia jest zsynchronizowana z prędkością pociągu (jest to rodzaj silnika synchronicznego). Przesunięcie poprzeczne wywoływane przez magnesy w pociągu oraz przyłożone pole magnetyczne powodują ruch pociągu.

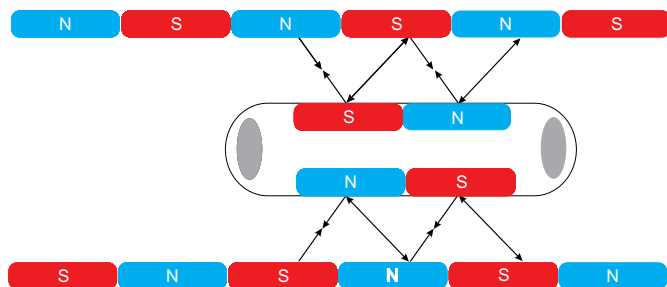


Pociąg Maglew kolei niemieckich na torze doświadczalnym w Emsland, RFN (16.09.2008 r.). Fot. Thyssen-Krupp Transrapid GmbH

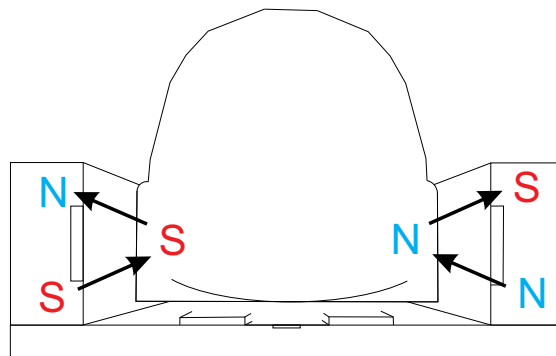
### SPM

System ten różni się od systemu EDS użyciem przeciwnie ustawionych magnesów zbudowanych z metali ziem rzadkich, np. stopy neodymu oraz struktura tablicy Halbacha<sup>1</sup> w pociągu oraz torze, które generują ciągłą i statyczną lewitację, to znaczy, że nie jest niezbędna siła do utrzymania stałej lewitacji. Ponieważ nie jest konieczne napięcie do utrzymania pojazdu nad torrem, zatem pobór mocy (energii) do poruszania pojazdu po torze jest mniejszy w porównaniu z EMS/EDS. W technologii SPM wykorzystuje się prawo Earnshawa<sup>2</sup>, z którego wynika, iż nie można ustawić dwóch magnesów tak, aby oba się odpychały, a jeden z nich unosił się nad drugim (wtedy magnes wiszący jest w stanie metastabilnym). Jeden ze sposobów zapewnienia stabilności to ustawienie zwojów wzdłuż kierunku jazdy w dolnej części pojazdu unoszącego się, przy czym do ustawienia centralnego pojazdu nad torrem niezbędne jest napięcie o niewielkiej wartości, a do utrzymania pociągu nad torrem nie jest konieczne napięcie.

Każda z technologii posiada swoje wady i zalety (szczegóły w tabeli 1).



Rys. 2. Układ biegunów magnesów w technologii Maglew EDS



Rys. 3. Schemat unoszenia się pociągu w technologii Maglew EDS pod wpływem pól magnetycznych oraz z wykorzystaniem magnesów nadprzewodzących

Tab. 1. Charakterystyka technologii używanych w pociągach Maglew

Technologia	Zalety	Wady
EMS	Pole magnetyczne w pojeździe i za pojazdem jest niewielkie, można osiągać bardzo duże prędkości (500 km/h), nie są potrzebne koła lub dodatkowy system napędowy.	Przeźródź pomiędzy pojazdem i torem musi być stale monitorowana i korygowana przez komputer, dla uniknięcia przypadków niejednorodności wzbudzenia elektromagnetycznego, cechą tego systemu jest niestabilność i konieczność ciągłego nadzoru, wibracje są częstym zjawiskiem.
EDS	Zamontowane magnesy pomiędzy szyną i pojazdem pozwalają na osiągnięcie bardzo dużych prędkości oraz przewożenie dużej masy (np. pasażerów). Pojazd, który osiągnął prędkość 581 km/h został wyposażony w nadprzewodniki wysokotemperaturowe chłodzone niedrogim ciekłym azotem.	Wysokie pole magnetyczne wewnątrz pojazdu może spowodować uszkodzenia rozruszników serca, danych na dyskach twardych, czy kart magnetycznych. Wymagane jest stosowanie ekranów wewnątrz pojazdów oraz na peronach, co ogranicza powstawanie indukcji prowadzącej, ograniczając jednocześnie prędkość pojazdu. Ponadto, pojazd przy niskich prędkościach musi poruszać się na kołach.
SPM	Do aktywowania magnesów nie jest konieczne napięcie. Pole magnetyczne obecne przy niskich prędkościach pojazdu pozwala mu na unoszenie się nad torem (zapewnia to bezpieczeństwo pasażerom podczas spadku napięcia i wyłączenia elektromagnesów). Struktura ustawienia Halbacha ( <i>Halbach arrays</i> ) magnesów trwałych powoduje, iż są one tańsze w eksploatacji niż elektromagnesy.	Wymagane są koła w pojeździe podczas postoju na stacji. Technologia jest obecnie w fazie testów i nie zbudowano jeszcze prototypu pociągu.

## Porównanie pociągów Maglew z pociągami konwencjonalnymi

### Zalety:

- ♦ łatwiejsze osiągnięcie bardzo dużych prędkości (400–500 km/h), jednak eksperymentalne pociągi konwencjonalne rozwijały podobne prędkości,
- ♦ mniejsza liczba części mechanicznych powoduje obniżenie kosztów eksploatacji (w przeliczeniu czas jazdy na osiąganą prędkość czy pokonywaną drogę),
- ♦ obniżona wrażliwość na pogodę, w tym wiatr, deszcz, śnieg czy lód; brak sieci trakcyjnej powoduje, iż nie jest konieczne wstrzymywanie ruchu pociągów podczas silnego wiatru, czy likwidacja oblodzenia samej sieci, brak kontaktu pojazdu z szyną skutkuje niewrażliwością na obecność lodu na torowisku, eliminuje zjawisko poślizgu,
- ♦ możliwość budowy linii Maglew ze znacznie większymi pochyleńkami, dzięki czemu zanika potrzeba drążenia tuneli,
- ♦ wyeliminowanie oporów toczenia, pozostaje tylko opór aerodynamiczny,
- ♦ uzyskuje się bardziej równomierny rozkład masy pociągu, co powoduje większą stabilność podczas jazdy,
- ♦ aerodynamiczny kształt wydajnie zmniejsza hałas generowany przez pociąg podczas jazdy,
- ♦ hamulce w pociągu ze względu na specyfikę systemu Maglew (poruszanie pociągu przez pole magnetyczne) są bardziej efektywne,
- ♦ prostszy system sterowania.

### Wady:

- ❖ niekompatybilność systemu Maglew z istniejącą infrastrukturą i konieczność budowania torowisk wyłącznie dla pociągów Maglew; pociągi konwencjonalne np. Shinkansen czy TGV mogą korzystać z istniejącej infrastruktury,
- ❖ w niektórych krajach (np. Niemcy, Hiszpania) konwencjonalne linie dużych prędkości są także wykorzystywane w ruchu towarowym, wykorzystanie linii Maglew w podobny sposób jest niemożliwe,
- ❖ mniejsza efektywność systemu Maglew przy niższych prędkościach,
- ❖ konieczność stosowania nadprzewodników dla obniżenia zużycia energii, elektromagnesy napędzające pociąg Maglew Transrapid o masie 70 t zużywały 70–140 kW energii (>100 km/h), z których większość była użyta w celu pokonania oporu aerodynamicznego,

- ❖ konieczne jest wykonanie bardziej wytrzymałej mechanicznie konstrukcji pociągu z powodu osiągania wyższych prędkości,
- ❖ znacznie wyższe koszty budowy linii,
- ❖ większa wrażliwość magnesów na wyższe temperatury.

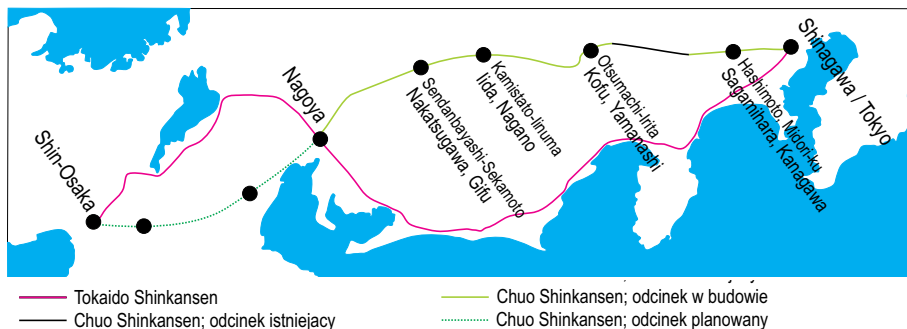
### Koszty

Specyfiką pociągów Maglew jest to, iż przy niskich prędkościach pobór energii elektrycznej przez pociąg jest przetwarzany głównie na utrzymanie się powietrza (lewitację), a przy wyższych prędkościach – na pokonanie oporów powietrza (tzw. opór aerodynamiczny, wzrastający proporcjonalnie do kwadratu prędkości). Poszczególne wersje pociągów typu Maglew różnią się między sobą. Przykładowo, niemiecki Transrapid, w odróżnieniu od japońskiego HSST (*Linimo*) oraz koreańskiego Rotem, ma zdolność unoszenia się podczas poruszania się z prędkością 10 km/h, czerpiąc napięcie z baterii pokładowych. W pociągu jest także zamontowany hamulec elektrodynamiczny odzyskowy – podczas hamowania pociąg może wytwarzać elektryczność.

Jak wspomniano wcześniej, pociągi typu Maglew są całkowicie niekompatybilne z istniejącą infrastrukturą kolejową i wymagają budowy własnych torów czy stacji, co wiąże się z wysokimi kosztami (wysokie ceny gruntów w centrach miast). Przykładowo, pociągi TGV mogą korzystać z dworców kolei konwencjonalnej, a Maglew – nie.



Pociąg Maglew kolei niemieckich na torze doświadczalnym w Emsland, RFN (18.09.2008 r.). Fot. Thyssen-Krupp Transrapid GmbH



Rys. 4. Schemat linii Chūō Shinkansen

Inną cechą pociągów na poduszce magnetycznej jest brak oporu mechanicznego przy jeździe z dużymi prędkościami (nie występuje fizyczny kontakt koła z szyną), co znacząco zmniejsza opory ruchu. Hamowanie pociągu polega – w uproszczeniu – na wyłączeniu zasilania lub odwróceniu biegunów magnesów. Mniejszy jest

także poziom wytwarzanego hałasu pochodzącego praktycznie od oporów powietrza. Ponieważ zużycie energii elektrycznej jest duże przy jeździe z dużymi/bardzo dużymi prędkościami, zatem drogą do zmniejszenia energochłonności pociągów Maglew jest zastosowanie nadprzewodników.

Pociągi Maglew w porównaniu z transportem lotniczym (samoloty odrzutowe) wprawdzie zużywają mniej energii w przeliczeniu na 1 km, jednak to transport lotniczy jest bardziej elastyczny i możliwe jest uruchamianie połączeń lotniczych nawet

z niewielką frekwencją. Przewagą technologii Maglew jest możliwość czerpania energii elektrycznej np. z elektrowni atomowych lub wodnych, czy źródeł odnawialnych, czyli z niewielką lub zerową emisją CO<sub>2</sub> do atmosfery. Samoloty zużywają bardzo duże ilości paliwa (średnio 7–8 t na godzinę lotu). Należy również uwzględnić niebezpieczeństwo wypadku (lub katastrofy) podczas startu i lądowania (zwłaszcza tego ostatniego) samolotu. Z drugiej strony, koszty budowy torowiska dla pociągów Maglew są bardzo wysokie – przykładowo koszt budowy linii łączącej lotnisko z centrum Szanghaju wyniósł 1,2 mld USD (łącznie z budową stacji i serwisem), czyli 30 mln USD za 1 km, zatem porównywalnie z kosztem budowy konwencjonalnej linii dużych prędkości. Przy cenie przejazdu 6 USD oraz obecnej liczbie pasażerów – 7 tys. dziennie, roczne wpływy z biletów oscylują na poziomie 15,33 mln USD, zatem amortyzacja projektu nastąpi dopiero po 78 latach. Obecnie eksploatację pierwszej kolei magnetycznej w Chinach można potraktować bardziej jako ciekawostkę techniczną niż realne rozwiązywanie problemów komunikacyjnych. Dodatkowo, planowano budowę linii Maglew łączącej Szanghaj z Pekinem, jednak plany zarzucono na rzecz konwencjonalnej kolei dużej prędkości.

Obecnie, w celu poprawienia rentowności chińskiego pociągu Maglew, linia została wydłużona do dworca kolejowego z dotychczasowego miejsca – stacji metra Longyand Road. Według pobieżnych szacunków jest możliwe obniżenie kosztów budowy 1 km z 30 mln USD do 25 mln USD. Dla porównania, koszty budowy autostrad w USA są zbliżone – 31 mln USD za 1 km (4+4 pasma), a koszty pracy w Chinach stanowią niewielki procent podobnego wskaźnika w USA.

Koszty budowy planowanej linii Maglew w Japonii – Chūō Shinkansen Maglew/Tōkaidō Maglew (Tokio–Osaka, ok. 450 km) będą równie wysokie – wstępnie oszacowano je na 82 mld USD (dochodzi konieczność drążenia długich tuneli), czyli 160 mln USD za 1 km. Koszty te można obniżyć do 100 mln USD redukując prędkość do 100 km/h, jednak wtedy ów pociąg ma zastosowanie jedynie do obsługi centrów miast. Jest to zatem droga technologia, która ma uzasadnienie jedynie przy bardzo wysokich potokach pasażerskich.

## Bezpieczeństwo

Pociągi Maglew, ze względu na fakt, iż poruszają tuż za polem magnetycznym „wędrującym” wraz z pociągiem, nie są narażone na zderzenie z pociągiem jadącym z przeciwną (jest to niemożliwe ze względu na prawa fizyki), zatem powinny być pociągami bardzo bezpiecznymi dla pasażerów. Dodatkowo, na trasie nie występują przejazdy kolejowe. Jednak pociągi Maglew uległy już kilku wypadkom, w tym jednej katastrofie pod Emsland w Niemczech. We wrześniu 2006 r. niemiecki Transrapid uległ zderzeniu z pojazdem serwisowym, nie poruszającym się na poduszce magnetycznej, w wyniku którego zginęły 23 osoby. Przyczyną katastrofy było



Pociąg Maglew kolei chińskich, Szanghaj (08.10.2003 r.). Fot. Thyssen-Krupp Transrapid GmbH



Pociąg Maglew kolei chińskich: a) wnętrze, b) aktualna informacja o prędkości (13.02.2013 r.). Fot. A. Drzewiecki

błędne opracowanie systemu bezpieczeństwa, który nie dopuszczał możliwości pomyłki człowieka (system wykrywał obecność pojazdów jedynie na poduszce magnetycznej, zatem ów pojazd serwisowy był dla niego niewidoczny). Dodatkowo, japoński pociąg MLU002 został zniszczony przez ogień w Miazaki, a chiński Transrapid ucierpiał w pożarze krótko po wyjeździe ze stacji Longyang.

## Istniejące odcinki kolei na poduszce magnetycznej

### Niemiecki Transrapid

Podczas międzynarodowej wystawy transportowej w Hamburgu w 1979 r. zaprezentowano pojazd o nazwie Transrapid 05. Był to pojazd prototypowy, zdolny rozwinąć prędkość 90 km/h (długość toru doświadczalnego wynosiła ~1 km). W latach 80. XX w. pojazdy z rodziny Transrapid zostały przetestowane na torze doświadczalnym w Emsland (*Transrapid Verkehrs Emsland*), a owocem prób był pojazd nazwany Transrapid 07, zdolny rozwinąć bezpieczną prędkość do 436 km/h. Charakterystykę pociągu Transrapid przedstawiono do zaopiniowania kierownictwu kolei niemieckich DB w 1991 r. Przedstawiciele DB wydali pozytywną opinię, nie tylko w zakresie budowy pojazdu, ale także sposobu zasilania w energię, rozwiązania napędu, czy systemu bezpieczeństwa ruchu, opracowanych według nowatorskich technologii. Projekt Transrapid realizowały wspólnie: Siemens AG, Thyssen Industrie AG, oraz spółka córka DB AG i Lufthansy – MPV (*Versuchs- und Planungsgesellschaft fuer Magnetbahnsysteme GmbH*, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Kolei Magnetycznej). Pod koniec 1999 r. zaprezentowano kolejny projekt – TR08, różniący się od poprzednika nowocześniejszym układem elektrycznym (zastosowano falowniki tyrystorowe GTO). Przedstawiono także harmonogram produkcji seryjnej TR08 oraz komercyjnie wdrożenie pojazdu do obsługi linii Berlin–Hamburg. Niemiecki pociąg Maglew – Transrapid wykorzystuje technologię EMS (rys. 1).

Pociąg Transrapid składa się dwóch członów końcowych oraz do 8 członów środkowych. Nie przewidziano eksploatacji pojazdów w trakcji podwójnej. Unoszenie się (lewitacja) jest możliwa dzięki elektromagnesom umieszczonym w wózkach, o budowie modułowej, zamontowanym wzdłuż całego pojazdu. Napęd i hamowanie jest zapewnione dzięki synchronicznemu liniowemu silnikowi ferromagnetycznemu z długim wzbudnikiem. Zjawisko wzbudzenia następuje poprzez magnesy unoszące, zamontowane w pojeździe (jest to rodzaj wirnika), przy czym wzbudniki (stojany) silnika są umieszczone w torowisku. Zasilanie jest realizowane przez podstacje rozmieszczone od 10 do 40 km. Zmniejszanie prędkości następuje poprzez użycie elektrycznych hamulców wiroprądowych. Bez-

pieczeństwo ruchu oraz sterowanie pojazdem czy torem jazdy (np. przestawianie zwrotnic) realizuje automatyczny system sterowania i zasilania. Łączność jest zapewniona drogą radiową z cyfrowym przesyłaniem sygnałów (~50 GHz) oraz poprzez łącza światłowodowe. Torowiska są budowane na powierzchni ziemi ewentualnie na estakadach, na wysokości odpowiednio 1,25–2,20 m i 4,70–5,50 m. Odległość pomiędzy torami waha się od 4,40 m do 5,10 m, co pozwala na rozwinięcie prędkości w zakresie 300–500 km/h.

Każdy wagon składa się z pudła i podwozia magnetycznego. Wprowadzono zasadę standaryzacji i modułowości, w celu zmniejszenia liczby różniących się elementów. W celu poprawy komfortu jazdy zastosowano elementy metalowo-gumowe. Stabilizacja magnesów jest zrealizowana poprzez system elektroniczny i unoszenie w zakresie dwóch stopni swobody. Pozwoliło to na wykorzystanie elementów aluminiowych wykonanych jako odlewy w formach piaskowych i ze standardowych profili. Magnesy unoszące i magnesy napędowe oraz magnesy hamowania są mocowane elastycznie z wykorzystaniem elementów gumowych. W celu ułatwienia montażu, a także przeglądów technicznych magnesy montuje się jako jeden, łatwy do wymiany zespół. W każdym członie pojazdu znajdują się 4 zespoły unoszące, połączone z pudłem,



Peron pociągu Maglew kolei chińskich, Szanghaj (13.02.2013 r.). Fot. A. Drzewiecki



Stacja pociągów Maglew kolei chińskich, Szanghaj (19.02.2013 r.).  
Fot. A. Drzewiecki

na stałe zwrócone w kierunku jazdy. W pozostałych kierunkach umieszczono amortyzatory pneumatyczne i przewodniki z pewnym stopniem swobody. Każdy zespół unoszący składa się z 4 ram osadzenia modułów magnetycznych, połączonych parami poprzeczną belką nośną stanowiącą element obejmujący tor jazdy, które dzięki środkowym połączeniom wzdłużnym, tworzą konstrukcję ramy unoszącej. Ramy te są obudowane w celu zapewnienia ochrony przed czynnikami atmosferycznymi. Przykładowo, wózek jest obudowany w ten sposób, iż elementy ochronne wykonano w technologii *sandwich* (wielowarstwowej) z pokrywaniami aluminiowymi i spawanymi laserowo profilami aluminiowymi. System zamknięć otrzymał wizualną kontrolę i elastyczne, tłumiące drgania elementy zamocowane do ramy.

Elementy podwozia magnetycznego zostały umieszczone pod pudłem wagonu, przy czym od strony toru jest to gładka konstrukcja, będąca jednolitą płaszczyzną powstałą z aluminiowych profili. Na nich zostały umieszczone podzespoły: elektryczne, elektroniczne i pneumatyczne, wykonane w postaci wysuwanych paneli. Przewody zasilające są umieszczone w oddzielnym kanale kablowym, odizolowanym od wpływu pól magnetycznych. Wysuwanie paneli z oprzyrządowaniem następuje w kierunku prostopadłym



Zwrotnica pociągu Maglew, Szanghaj (19.10.2008 r.). Fot. T. Ravache

do kierunku jazdy. Prawidłowość ich zamocowania kontroluje system elektroniczny.

Pudło wagonu zostało wykonane jako hermetyczne, z aluminiowych profili zamkniętych i warstwowych paneli (system mieszany typu *sandwich*). Takie rozwiązanie, oprócz sztywności (koniecznej do jazdy z dużymi prędkościami), ułatwia montaż wyposażenia wewnętrznego. Materiały użyte do wykonania foteli czy wykładzin są niepalne i nietoksyczne. Opływowe fragmenty pudeł wagonów końcowych wykonano z żywicy poliestrowej, wzmacnianej włóknem szklanym. Montaż elementów pudła (podłogi, ścian bocznych i dachu) odbywa się poprzez spawanie laserowe. Na podstawie wyników badań wykonanych przez ośrodki w RFN i USA, można stwierdzić, iż pole magnetyczne w pojeździe jest niskie, niższe niż naturalne ziemskie pole magnetyczne. Dodatkowo, nie stwierdzono zakłóceń pracy rozruszników serca, czy pracy systemu telekomunikacyjnego.

Sposób napędu pojazdu jest następujący: pojazd jest unoszony 10–20 mm nad torem i napędzany silnikiem synchronicznym w ten sposób, iż uzwojenie stojana znajduje się wzdłuż toru (po obu stronach bieżni) od spodniej strony. Podczas poruszania się pociągu zasilane są te sekcje toru, pod/przed którymi znajduje się aktualnie pociąg. Odpowiednie sekcje są przełączane w ten sposób, aby wytworzyć „wędrujące” pole magnetyczne, za którym porusza się pojazd. Magnesy stojana wytwarzają siłę, która pociąga za sobą zwoje wirnika, zamontowane w pojeździe, a w konsekwencji pojazd porusza się. Regulacja prędkości jest częstotliwościowa. Ponieważ pojazd obejmuje bieżnię z dwóch stron nie zachodzi niebezpieczeństwo wykolejenia pojazdu. Poza magnesami bocznymi, zamontowano także magnesy utrzymujące pojazd w osi toru. Przyspieszenie pociągu Maglew jest imponujące – osiągnięcie prędkości 400 km/h następuje w czasie 160 s na drodze 10 km, czyli 2–3 razy szybciej niż dla pociągu konwencjonalnego. Hałas emitowany przez pociąg Transrapid (w odległości 25 m od toru) wynosi 88,5 dB i pochodzi głównie od oporów aerodynamicznych (nie występuje zjawisko tarcia koło-szyna, w większości odpowiedzialne za hałas pociągu konwencjonalnego). Za bezpieczeństwo ruchu odpowiada system OCS oraz radiowa łączność na częstotliwości 38 GHz, plus zdublowane urządzenia związane z bezpieczeństwem pasażerów. Prace związane z utrzymaniem toru w odpowiednim stanie technicznym związane są z oceną trwałości konstrukcji czy poprawnością pracy części elektrycznej. Zatem kontrola toru jazdy polega na diagnostyce zmian w rozmieszczeniu wyposażenia (panele stojana, szyny prowadzące, itp.), a także optycznej kontroli z cyfrowym przetwarzaniem wyników, przeprowadzanej przez system w celu sprawdzenia stanu powierzchni górnej toru na obecność pęknięć, rys czy zjawiska korozji.

Dla niemieckiego pociągu Maglew – Transrapid zbudowano odcinek testowy w miejscowości Emsland o długości całkowitej 31,5 km: jest to tor biegnący pomiędzy miejscowościami Dörpen i Lathen wraz z pętlami na obu końcach (umożliwiającymi zawracanie). Całość wybudowano w latach 1980–1984, a prędkość maksymalna wynosi 420 km/h. Transrapid wykorzystuje zwrotnice o napędzie hydraulicznym, przy czym jazda po skosie może odbywać się z prędkością 100–200 km/h. Zwrotnice składają się z elastycznych stalowych belek o przekroju skrzynkowym.

W czerwcu 1997 r. minister transportu Niemiec zgłosił zamiar wybudowania linii pociągu typu Maglew pomiędzy Berlinem i Hamburgiem (292 km). Jednak już na samym wstępie koszty wzrosły o 10% w stosunku do zamierzonych (szacowano je na ok. 4,5 mld euro). W realizację kontraktu zaangażowały się firmy Adtranz, Thyssen i Siemens (tabor), Philipp Holzmann, Bilfinger&

Berger i Hochtief (budowa linii). Przewoźnikami miały być koleje niemieckie DB. Jeden z pociągów – Transrapid 08 – w momencie ogłoszenia decyzji znajdował się w fazie montażu w fabryce w Kassel. Masa niemieckiego pociągu Maglew wynosi 188 t, a prędkość konstrukcyjna – 550 km/h. Jednak pojawiły się głosy, iż znacznie korzystniej będzie wprowadzić pociągi ICE-T (wyposażone w hydrauliczny mechanizm przechyłu pudła), kursujące z prędkością maksymalną 250 km/h, na linię Berlin–Hamburg. Ostatecznie linię konwencjonalną zmodernizowano kosztem 220 mln euro: przez wybudowanie wiaduktów zlikwidowano 9 przejazdów kolejowych, przebudowano most nad kanałem Grosser Havelländische oraz most w Nauen. Największy zakres przebudowy linii (podniesienie prędkości) wykonano na odcinku Nauen i Neustadt (Dosse). Czas przejazdu skrócił się o 25 min (264 km), do 93 min. Skutkiem było zarzucenie planów budowy komercyjnej linii Maglew. Dodatkowo, planowano zbudować połączenie pomiędzy lotniskiem i centrum Monachium za sumę 1,85 mld euro (beneficjentami kontraktu zostali Siemens i ThyssenKrupp), z wykorzystaniem pociągu Transrapid, jednak w marcu 2007 r. wskutek wzrostu kosztów do 3,3 mld euro decyzją ministra transportu Niemiec program Maglew został anulowany. Natomiast eksploatacja odcinka doświadczalnego po katastrofie pociągu w 2008 r. („Technika Transportu Szynowego” 2016, nr 4) ostatecznie zakończyła się w 2011 r., po oficjalnym ogłoszeniu, iż koncepcja pociągów Maglew nie została komercyjnie wdrożona w Niemczech. W październiku 2016 r. władze DB ogłosiły, iż cały ośrodek testowy zostanie rozebrany kosztem 40 mln euro, z wykorzystaniem funduszy przydzielonych przez rząd federalny, ewentualnie przebudowany przez potencjalnego nabywcę.

Propozycje wprowadzenia pociągów Maglew postulowano na linii łączącej lotniska z centrami miast, oprócz Monachium, także Berlina, czy Kolonii–Bonn. Ostatecznie zakupem technologii Maglew zainteresowali się przedstawiciele kolei chińskich i w styczniu 2002 r. podpisano umowę na wybudowanie linii o długości około 30 km pomiędzy stacją metra Longyang Road położoną na przedmieściach Szanghaju i lotniskiem Pudong. Linia powstała w okresie jednego roku, przy czym praktycznie całość wyposażenia elektrycznego dostarczyła strona niemiecka. Dodatkowo, specjaliści z Chin opracowali nadprzewodniki wysokotemperaturowe, które mogą być chłodzone tanim ciekłym azotem ( $t_w -195^\circ\text{C}$ ), zamiast drogiego helu ( $t_w -269^\circ\text{C}$ ). Czas przejazdu jest równy 7 min (31 km), pociągi kursują w odstępach 10 min i z prędkością maksymalną 430 km/h; w początkowej fazie była równa 270 km/h, a maksymalna prędkość uzyskana na trasie wyniosła 501 km/h. Koszt budowy linii wyniósł 1,25 mld euro, przy czym 100 mln stanowił grant rządu niemieckiego przeznaczony na promocję produktów rodzimego przemysłu. Otwarcie linii nastąpiło na początku marca 2003 r. Obecnie eksploatowane są 3 pociągi Transrapid kursujące pomiędzy lotniskiem i miastem Szanghaj, złożone z 5–6 wagonów. Planowano zbudować linię o długości 200 km do miasta Hangzhou (Shanghai–Hangzhou Maglev Train), jednak planów tych nie zrealizowano. Budowę linii Pekin–Szanghaj o długości 1 300 km i przybliżonym koszcie 40 mld USD należy także potraktować jako jeden z rozważanych projektów niż realną potrzebę i faktyczne możliwości. Kierownictwo Kolei Chińskich zdecydowało się na budowę konwencjonalnych linii dużych prędkości Pekin–Szanghaj, a nie torowisk dla pociągów na poduszce magnetycznej, ze względu na możliwość korzystania z tych pierwszych przez pociągi towarowe. Udział przewozów pasażerskich linii Pekin–Szanghaj w przewozach całych Chin wyniósł 51% w 1997 r. i wzrósł do 60% w 2000 r.



Pociąg Maglew, Szanghaj (28.03.2007 r.). Fot. © Siemens

## Japoński Maglew

Pierwsze pomysły na wykorzystanie lewitacji do poruszania pociągów pojawiły się w Japonii już w latach 60. XX w., przed pojawieniem się pociągów Shinkansen. Projekt, w który były zaangażowane koleje japońskie (JNR), Instytut Badawczo–Rozwojowy Kolejnictwa (ang. *Railway Technical Research Institute*) oraz linie lotnicze Japan Air Lines, rozpoczęto w 1962 r. Planowano uruchomić komunikację z wykorzystaniem pociągów Maglew pomiędzy Tokio i miejscowym lotniskiem Narita, a pociągi miały być napędzane silnikiem liniowym. W dwa lata po rozpoczęciu prób, w 1964 r. przetestowano pierwsze nadprzewodniki i zbudowano prototypowy pociąg oznaczony ML-100 w ośrodku Kokubani położonym na przedmieściach Tokio. Pociąg ów poruszał się po torze w kształcie litery T. Na początku lat 70. XX w. w pobliżu stacji Mimitsu (prefektura Miyazaki) zbudowano 7 km tor biegnący do Higashitsuno, otwarty w 1977 r. Już 2 lata później nastąpiło ustanowienie rekordu prędkości – 517 km/h przez pociąg napędzany silnikiem odrzutowym. Opracowane pociągi z napędem odrzutowym – MLU001 i MLU002 – wprawdzie przekroczyły barie-



Torowisko pociągu Maglew (EMS) kolei chińskich, Szanghaj (19.02.2013 r.). Fot. A. Drzewiecki





Pociąg Maglew kolei chińskich, Szanghaj (13.02.2013 r.). Fot. A. Drzewiecki

re 400 km/h, ale pożar, w którym zniszczeniu uległ jeden z nich (1991 r.), spowodował, iż władze centralne Japonii zdecydowały się na rozpoczęcie testów z koleją na poduszce magnetycznej. Zatwierdzono program nazwany *Linear Chuo Express Construction Promotion Federation*. Jednym z powodów decyzji o rozpoczęciu programu rozwoju kolei magnetycznej był zamiar powstrzymania rozrostu miasta i aglomeracji Tokio i zapewnienie szybszych niż dotychczas możliwości dojazdu do stolicy<sup>3</sup>. Wspomniany wcześniej odcinek Miyazaki, biegnący po mostach, tunelach i wzniesieniach, został rozbudowany i nazwany ostatecznie Yamanashi, i znajdował się pomiędzy miastami Ōtsuki i Tsuru. Dla zapewnienia przychylności okolicznych mieszkańców zapewniono im darmowe przejazdy, z oferty skorzystało ponad 200 tys. osób.

W kwietniu 1997 r. otwarto pierwszą część (18,4 km) odcinka, a w sierpniu 1997 r. rozpoczęto testy. Dodatkowo, odcinek został wydłużony do 42,8 km (prace zakończono w czerwcu 2013 r.). Biegnie przez 16 km w tunelach, a 11,4 km jako dwutorowy. Pla-



Pociąg Maglew serii MLX-01, wykorzystujący zjawisko EDS, odcinek testowy Yamanashi, Japonia (23.11.2005 r.). Fot. Yosemite

nowana jest budowa kolejnych odcinków – 24 km dwutorowego i 34,6 km biegnącego w tunelach. Decyzja o budowie kolejnych 25 km linii jest uzależniona od wyników testów na odcinkach już istniejących (badany jest zwłaszcza wpływ ciśnienia powietrza na stabilność jazdy w tunelach oraz przy wyjazdach z tuneli) w pobliżu Ōtsuki w prefekturze Yamanashi. Przez kolejny miesiąc podczas prób trójwagowego pociągu prototypowego nie przekraczano prędkości 200 km/h. Pociąg był napędzany silnikiem synchronicznym składającym się ze zwojów umieszczonych wzdłuż torowiska (tworzących trójfazowy stator), a prędkość była regulowana częstotliwościowo. W torowisku zostały zamontowane magnesy nadprzewodzące oraz wykorzystano technologię EDS (rys. 2 i 3). Producentem pociągu MLX01 jest krajowy koncern Kawasaki (Kawasaki Heavy Industries), a pojazd powstał we współpracy z JR Central. Testy przez okres dwóch tygodni wykonywano w ten sposób, iż badano zachowanie pociągu przy jeździe na gumowych kołach, przy czym pociąg był prowadzony przez specjalny ciągnik serwisowy. Następnie wykonano testy lokalizacji pociągu na szlaku przez system bezpieczeństwa ruchu. Kolejnym etapem były testy z prędkościami od 150 do 200 km/h, mające wykazać dostateczne unoszenie się pociągu ponad torowiskiem (prześwit pomiędzy pociągiem i torem wynosił około 100 mm). Następnie wykonano jazdy próbne z prędkościami 400–500 km/h. Na torze doświadczalnym Yamanashi dnia 02.12.2003 r. osiągnięto rekord prędkości pociągu Maglew – 581 km/h (seria MLX01), poprawiony pod koniec kwietnia 2015 r. na 603 km/h. Podczas testów byli obecni przedstawiciele ministerstwa transportu Japonii, naukowcy specjalizujący się w dziedzinie elektromagnetyzmu (zwłaszcza pola elektromagnetycznego), bioelektromagnetyzmu, inżynierii lądowej, budownictwa oraz kierownicy zespołów producentów pociągu uczestniczących w programie Maglew. Wykorzystano doświadczenia zdobyte podczas testów z pociągami MLU002 na odcinku testowym Miyazaki w latach 80. XX w. Zamontowano 3 typy zwrotnic:

- o długości części ruchomej 88,2 m i prędkości maksymalnej przy jeździe po skosie 70 km/h oraz napędzie hydraulicznym, jest to rozwinięcie wcześniejszego opracowania zwrotnicy;
- o długości części ruchomej 73 m i prędkości maksymalnej przy jeździe po skosie 45 km/h oraz napędzie elektrycznym;
- zwrotnica montowana w zakładzie taboru, o prędkości przy jeździe po skosie 45 km/h, dostosowana do jazdy pociągu na kołach gumowych.

Czas przestawienia zwrotnicy jest krótszy niż 20 s. Dla uniknięcia fali akustycznej powstającej przy wyjeździe z tunelu (tutaj Kuki) przy prędkości 500 km/h zamontowano komorę wewnątrz tunelu o długości 100 m. Koszt budowy odcinka testowego wyniósł około 2,5 mld USD, przy czym 94% tej sumy pokryła JR Central (pozostałą część rząd centralny i samorządy), a koszty budowy taboru, aparatury elektrycznej czy systemu bezpieczeństwa ruchu sfinansowały: JR Central – 35%, Kolejowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy (ang. *Railway Technical Research Institute*) – 30%, rząd centralny – 25% i samorządy – 10%. W celu utrzymania odpowiednio niskiego pola magnetycznego pomiędzy panelami pociągu a głównym elementem indukcyjnym został umieszczony ekran magnetyczny. Przejścia zostały także odgródzone (włączone do ekranowania magnetycznego), pomiędzy stacją a wejściem do drzwi pojazdu, czyli przy wylotach przejść peronowych. Nie przewidziano budowy otwartych peronów. Dane techniczne odcinka testowego Yamanashi zamieszczono w tabeli 2.

Istotnym problemem było utrzymanie pola wewnątrz pojazdu poniżej 20 gaussów oraz dobranie odpowiedniego materiału pudła pociągu w celu zgodności magnetycznej. Wnętrze pociągu urzą-

**Tab. 2. Dane odcinka testowego Yamanashi**

Długość	18,4 km
Maksymalne pochylenie	40‰
Minimalny promień łuku (poziomy)	8 000 m
Minimalny promień łuku (pionowy)	37 000 m
Odległość pomiędzy osiami torów	5,8 m
Maksymalny kąt przechyłu toru na łukach	10°
Maksymalna wysokość tunelu	7,7 m
Maksymalna szerokość tunelu	12,6 m

**Tab. 3. Dane techniczne pociągu Maglev MLX-01**

Liczba wagonów	3
Długość całkowita	77 600 mm
Liczba wózków lewitujących	4
Długość wagonu prowadzącego	28 000 mm
Długość wagonu środkowego	21 600 mm
Przekrój pociągu	8,9 m <sup>2</sup>
Wysokość lewitacji	3 280 mm
Wysokość podczas postoju na kołach	3 320 mm
Wysokość unoszenia się	100 mm
Liczba miejsc pasażerskich	
– wagon Kofu	46
– wagon Tokyo	30
Długość podwójnego siedzenia	1 060 mm
Szerokość środkowego przejścia	470 mm
Szerokość	2 900 mm
Masa wagonu z pasażerami	
– prowadzący	32 t
– środkowy	20 t

dzono podobnie do wnętrza samolotu, szeroko stosując materiały lekkie. Okna w pojeździe wykonano w wymiarach 300x400 mm, siedzenia w układzie 2+2, a odległość pomiędzy dwoma fotelami pasażerskimi ustalono na 880 mm. Fotele wyposażono w pasy bezpieczeństwa (w pojazdach seryjnych nie przewiduje się ich montażu). Urządzono także niewielki przedział dla załogi wraz z ekranem wyświetlającym najważniejsze parametry podczas jazdy pociągu (w pociągach Maglev, ze względu na specyfikę prowadzenia ruchu, nie ma maszynistów w ścisłym tego słowa znaczeniu). W przedniej części pojazdu zamontowano belkę pochłaniającą energię podczas zderzenia. Przednia szyba jest odporna na uderzenie z obcym przedmiotem (np. ptakiem). Pudło pociągu wykonano w opływowych kształtach z aluminium, uzyskując przy tym dobry wynik – masa pudła wynosi 2,6 t, a dla zespołów Shinkansen serii 300 – 6 t (pudło stalowe).

Interesującą kwestią jest dobór hamulca w pociągu Maglev. Najprostszym jest oczywiście odwrócenie kierunku „przełączania” pola magnetycznego, możliwe jest także wytracanie energii w rezystorach, czy jej oddawanie do źródeł (hamulec elektrodynamiczny odzyskowy). W pociągu Maglev MLX01 zamontowano hamulce aerodynamiczne na dachu pociągu, o kształcie pojedynczych zajęczych uszu. Na osiach pojazdu umieszczono wzmocnione włóknami węglowymi tarcze hamulcowe, zdolne zatrzymać pojazd z prędkości <550 km/h. Dla podwyższenia komfortu jazdy pomiędzy pudłem pociągu i elektromagnesem oraz elektromagnesem i wózkami znajdują się poduszki powietrzne, będące usprężynowaniem odpowiednio pierwszego i drugiego stopnia. Zwoje przewodzące w torowisku wykonano z aluminium z izolacją z tworzyw

sztucznych i umieszczono w betonowych panelach. Szczegółowe dane techniczne pociągów Maglev MLX-01 znajdują się w tabeli 3.

Dla pociągów Maglev wybudowano zajezdnię w Tokio, wyposażoną w 2 tory, przy czym jeden z torów pomieści 5 pociągów, a drugi 4. Przewidziano montaż stanowiska technicznego umożliwiającego wymianę gumowych kół. Ponieważ pociągi Maglev podczas poruszania się wykorzystują nadprzewodniki (Nb-Ti-Cu), zatem niezbędne jest ich chłodzenie ciekłym helem. Używa się również ciekłego azotu jako chłodziwa wspomagającego: tuż przed jazdą nadprzewodniki (zwoje/cewki w pociągu) są schładzane wstępnie ciekłym azotem i zasadniczo helem. Zapotrzebowanie na chłodziwo dla MLX-01 jest o 60% większe niż dla MLU002N.

W połowie grudnia 1997 r. w Japonii 3-wagonowy pociąg MLX01 osiągnął prędkość 531 km/h, a kilka dni później – 542 km/h i 545 km/h (podczas jazdy bez pasażerów). Na podstawie uzyskanych w trakcie prób wyników dwukrotnie zmieniano kształt „nosa” wagonu w kierunku maksymalnego wydłużenia (ostateczna długość wagonu wynosiła 28 m), co znacznie poprawiło cechy aerodynamiczne. Zmieniono nieznacznie sposób mocowania kół do podwozia pociągu w celu obniżenia oporu aerodynamicznego. W połowie kwietnia 2015 r., z użyciem pociągu serii L0, ustanowiono nowy rekord prędkości – 590 km/h, kilka dni później poprawiony na 603 km/h. Zestawienie rekordów prędkości pociągów Maglev znajduje się w tabeli 4.

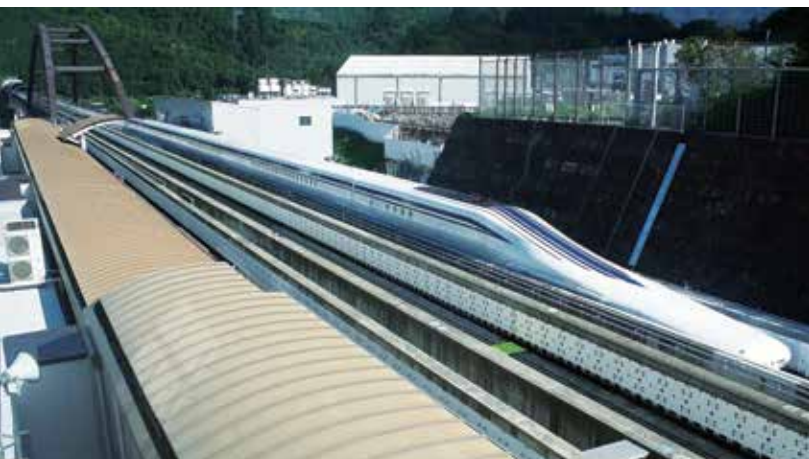
**Tab. 4. Zestawienie rekordów prędkości pociągów typu Maglev**

Rok	Państwo	Pociąg	Prędkość maksymalna [km/h]	Uwagi
1971	RFN	Prinzipfahrzeug	90	
1971	RFN	TR-02 (TSST)	164	
1972	Japonia	ML100	60	
1973	RFN	TR04	250	
1974	RFN	EET-01*	230	
1975	RFN	Komet*	401	z dopalaniem parą wodną pod ciśnieniem
1978	Japonia	HSST-01*	308	z pomocniczym silnikiem odrzutowym
1978	Japonia	HSST-02*	110	
1979	Japonia	ML-500R	504	pierwszy pociąg, który przekroczył prędkość 500 km/h
1979	Japonia	ML-500R*	517	
1987	RFN	TR06	406	
1987	Japonia	MLU001	401	
1988	RFN	TR-06	413	
1989	RFN	TR-07	436	
1993	RFN	TR-07	450	
1994	Japonia	MLU002N*	431	
1997	Japonia	MLX01	531	
1997	Japonia	MLX01*	550	
1999	Japonia	MLX01*	548	
1999	Japonia	MLX01	552	
2003	Chiny	TR-08	501	
2003	Japonia	MLX01	581	
2015	Japonia	L0	590	
2015	Japonia	L0	603	

\* pojazd bezzałogowy.



Maglew serii LO należący do JR Central jako pociąg 7-wagonowy podczas testów na torze doświadczalnym Yamanashi, Japonia (8.08.2014 r.).  
Fot. Hisagi



Maglew serii LO należący do JR Central jako pociąg 5-wagonowy podczas testów na torze doświadczalnym Yamanashi, Japonia (5.09.2013 r.).  
Fot. S. Hirobano

Obecnie w fazie testów znajduje się pociąg Maglew serii LO należący do JR Central, a odcinek testowy stanie się w przyszłości częścią planowanej linii Chūō Shinkansen pomiędzy Tokio i Osaką. Pojazdy serii LO należą do rodziny SCMaglev, zaprojektowanej w Japonii przez krajowe koncerny Mitsubishi Heavy Industries i Nippon Sharyo, ze wsparciem finansowym JR Central i wyprodukowane w liczbie prototypowych 14 pojazdów. W regularnej eksploatacji planuje się nie przekraczać 505 km/h, co pozwoli na skrócenie czasu przejazdu pomiędzy Tokio i Osaką do 1 h 7 min. Wagon skrajny pociągu serii LO ma długość 28 m, z których na przednią część („nos”) przypada 15 m, a wagon środkowy 24,3 m. Planuje się zastosować aranżację siedzeń dla pasażerów 2+2. Bardziej opływowy nos pozwoli na zmniejszenie hałasu generowanego przez pociąg, a także poprawienie własności aerodynamicznych podczas przejazdów przez tunele. Pierwszy z pociągów LO został dostarczony do ośrodka testowego Yamanashi w listopadzie 2012 r., a wkrótce otrzymano kolejne 4 pociągi, które przygotowano do wykonania testów do czerwca 2013 r. W lipcu 2013 r. osiągnięto prędkość 500 km/h. Testy wykonywano po wydłużeniu pociągu z wersji 5-wagonowej do 7-wagonowej we wrześniu

2013 r., a w czerwcu 2014 r. – wersji 12-wagonowej. Po skróceniu pociągu do wersji 7-wagonowej, w listopadzie 2014 r. rozpoczęto testy otwarte także dla szerokiej publiczności.

## Linia Chūō Shinkansen

Linia Chūō Shinkansen w założeniach ma połączyć Tokio z Osaką przez Nagoję: magistrala będzie mieć początek na dworcu Shinagawa w Tokio oraz koniec na dworcu w Nagoi (pierwszy etap), ze stacjami pośrednimi Sagami-hara (prefektura Kanagawa), Kōfu (prefektura Yamanashi) i Nakatsugawa, (prefektura Gifu), plus jedna stacja w prefekturze Nagano, której lokalizacja nie została jeszcze zatwierdzona (rys. 4). Docelowo ma docierać do Osaki (odcinek jest w fazie planowania). Pierwsze oficjalne plany budowy linii Chūō Shinkansen, zgłoszone przez JR Central i zaakceptowane przez rząd, pojawiły się w październiku 2008 r., przy czym JR Central promowała koncepcję maksymalnie prostoliniowego odcinka. Pojawiły się głosy, iż istniejąca linia Tōkaidō Shinkansen jest całkowicie wystarczająca, a inwestycja w pociąg typu Maglev nie spowoduje wzrostu potoków podróżnych, tym samym będzie nieuzasadniona ekonomicznie. Koleje japońskie przeznaczają na program Maglev 2,7 mld euro rocznie. Jednak w czerwcu 2009 r. zaproponowano 3 warianty linii Maglev – A, B i C (tab. 5) i ostatecznie wybrano plan C, z przebiegiem linii przez pasmo górskie Akaishi w połowie października 2010 r., jako najbardziej efektywny. Długość linii byłaby równa 286 km, z których ~90% przebiegałoby w tunelach. Przyjęto minimalny promień łuku 8 000 m oraz maksymalne pochylenie 40%. Linia Chūō Shinkansen ma stać się zwieńczeniem japońskiego programu Maglev, kontynuowanego od lat 70. XX w. Linia przebiegałaby przez obszary o znacznym zaludnieniu oraz przez pasmo górskie Akaishi, przy czym sam przebieg linii jest bardziej prostoliniowy niż dotychczasowej linii Tōkaidō Shinkansen. Podczas projektowania linii Chūō Shinkansen założono, iż ma zastąpić linię Tōkaidō podczas np. trzęsień ziemi czy silnych wiatrów (wtedy kursowanie pociągu Shinkansen jest wstrzymywane). Na odcinku Nagoya–Osaka planuje się budowę jednej stacji w Nara, co zostało zaakceptowane przez rząd Japonii. Projekt budowy linii został zatwierdzony przez rząd pod koniec maja 2011 r. Decyzja budowy została wydana przez ministra ziemi, infrastruktury, transportu i turystyki Japonii pod koniec października 2014 r. W grudniu 2014 r. rozpoczęła się budowa linii, z jednym postojem w Nagoi, a pierwszy odcinek do Nagoi powinien być ukończony w 2027 r., przy szacowanych kosztach 50 mld euro. Drugi odcinek – Nagoya–Osaka powinien być ukończony do 2045 r. Czas przejazdu z Tokio do Nagoi skróciłby się do 46 min, a z Tokio do Osaki do 1 h 7 min.

JR Central planowała zbudowanie linii Chūō Shinkansen z wykorzystaniem własnych środków, bez rządowego dofinansowania w grudniu 2007 r. Koszty budowy oscylowały w granicach 45 mld euro w 2007 r., jednak w 2011 r. wzrosły do 79,9 mld euro. Przychody roczne są szacowane na minimum 621 mln euro w 2026 r., gdy sytuacja finansowa linii Maglev będzie ustabilizowana. Należy dodać, iż pierwszy odcinek będzie przebiegał w tunelach, z których część będzie położona 40 m pod powierzchnią gruntu na drodze sumarycznie 100 km. Na linii powstaną m.in. tunele – w prefekturach Yamanashi i Shizuoka, odpowiednio o długości 7 km oraz 25 km (ukończenie obu tuneli planowane jest w 2025 r.). Obecnie w fazie budowy znajduje się stacja w Nagoi, gdzie powstaje wysoki (220 m) dworzec, którego ukończenie jest planowane w 2016 r. Stacja zostanie nazwana „Nagoya-eki Shin-biru” (nowy dworzec w Nagoi). Stacja Kōfu powinna być gotowa do 2020 r. wraz z zorganizowaną tamże letnią olimpiadą sportową.

**Tab. 5. Parametry techniczne linii Chūō Shinkansen**

Linia	Wariant	Dolina Kiso (wariant A)		Inatani (wariant B)		Akaishi (wariant C)	
		Maglew	Shinkansen	Maglew	Shinkansen	Maglew	Shinkansen
Tokio-Nagoya	Parametry techniczne linii						
	Długość linii [km]	334		346		286	
	Czas przejazdu	46 min	1 h 27 min	47 min	1 h 30 min	40 min	1 h 19 min
	Szacowany poziom przewozów (2025 r.) [mld paskm]	156	72	153	68	167	82
	Koszty budowy [mld euro]	50,0	39,5	51,0	40,0	45,3	37,1
	Koszty utrzymania i eksploatacji linii* [mld euro]	15,7	9,9	16,1	10,1	14,4	9,1
Tokio-Osaka	Długość linii [km]	486		498		438	
	Czas przejazdu	1 h 13 min	2 h 08 min	1 h 14 min	2 h 11 min	1 h 07 min	2 h 00 min
	Szacowany poziom przewozów (2025 r.) [mld paskm]	396	198	392	190	416	219
	Koszty budowy [mld euro]	79,7	59,6	80,7	60,1	74,9	56,8
	Koszty utrzymania i eksploatacji linii* [mld euro]	29,2	16,8	29,6	17,0	27,3	15,7
	Koszty utrzymania wyposażenia linii* [mld euro]	11,1	5,4	11,3	5,5	10,3	5,0

\* w okresie 50 lat

Źródło: JR Central.

Obecnie w fazie budowy jest także stacja Shinagawa nad istniejącą stacją Shinkansen wyposażoną w dwa perony i 4 krawędzi peronowe, a zakończenie prac jest planowane w okresie 10 lat, aby uniknąć zakłóceń w funkcjonowaniu linii Tōkaidō Shinkansen. JR Central szacuje, iż linia Maglew nie tylko zwiększy wielkość przewozów pasażerskich, ale także wygeneruje przychody od 44 do 150 mld euro podczas 50 lat funkcjonowania.

### Pozostałe kraje wykorzystujące technologię Maglew

Kolej Maglew istnieje także w Korei Południowej. W 1988 r. rozpoczął się południowokoreański program rozwoju kolei na poduszce magnetycznej. Zbudowano dwa prototypy – HML-01 i HML-02, a trzecia seria pojazdów HML-03 doczekała się zastosowania w 1993 r. podczas wystawy Daejeon Expo. Producentem jest krajowy koncern Hyundai Heavy Industries. Pierwszą kolej magnetyczną z zastosowaniem komercyjnym o długości 1 km otwarto w kwietniu 2008 r. Pociągi oznaczone są UTM-02 i są wersją prototypową, a inny krajowy koncern Rotem prowadzi badania nad kolejną wersją pociągu – UTM-03. Zostanie on wykorzystany przy tworzeniu połączenia pomiędzy lotniskiem Incheon zbudowanym na wyspie Incheon's Yeongjong w 2012 r.

Mniej ambitne projekty pociągów Maglew opracowano także w USA i Wielkiej Brytanii (głównie połączenia lotnisk z centrami miast), jednak wskutek wysokich kosztów te projekty znajdują się obecnie w fazie koncepcji.

### Przypisy:

<sup>1</sup> Tablica/Ustawienie Halbacha (ang. *Halbach array*) jest określonym ustawieniem pól magnetycznych w magnesach trwałych, przy czym zjawisko polega na tym, iż po jednej stronie magnesu ustawienie składowych wzmacnia pole magnetyczne, a po drugiej stronie pole magnetyczne znosi się do zera.

<sup>2</sup> W próżni nie istnieje żadne statyczne (tj. niezmiennające się w czasie) ustawienie pól elektrycznych, magnetycznych i grawitacyjnych, dla którego energia potencjalna osiągałaby minimum lokalne.

<sup>3</sup> Rozrost miasta stołecznego niesie ze sobą także negatywne skutki – wzrost cen nieruchomości, a także wzrost ruchu ulicznego (i obniżenie średniej prędkości pojazdów poruszających się po mieście), problemy z dojazdem (konieczność obsłużenia większej liczby pasażerów przez metro, czy komunikację miejską). Podobne zjawisko – zachęcanie mieszkańców do osiedlania się poza stolicą (terenem miasta i aglomeracji) przez władze lokalne czy centralne – obserwuje się w Wielkiej Brytanii.

### Bibliografia:

1. Coey J. M. D., Mhóicháin N. T. R., *Permanent Magnets*, [in:] Herlach F., Miura N., *High Magnetic Fields: Science and Technology*, „World Scientific Publishing” 2003, vol. 1.
2. Cugat O., Bloch F., *4-Tesla Permanent Magnetic Flux Source Proc.*

*15th International Workshop on Rare Earth Magnets and Their Applications*, MAT INFO, Dresden 1998.

3. Fechner H., *Transrapid na trasie Hamburg–Berlin*, „Technika Transportu Szybowego” 1998, nr 11.
4. Heller A., *A New Approach for Magnetically Levitating Trains and Rockets*, „Science & Technology Review” 1998.
5. Hood C. P., *Shinkansen – From Bullet Train to Symbol of Modern Japan*, Routledge, London 2006.
6. Moon F. C., *Superconducting Levitation Applications to Bearings and Magnetic Transportation*, Wiley-VCH, New York 1994.
7. Rabsztyn M., *Pierwsza kolej magnetyczna w Chinach*, „Technika Transportu Szybowego” 2002, nr 9.
8. Semmens P., *High speed in Japan. Shinkansen – the world's busiest high-speed railway*, second edition, Platform 5 Publishing Ltd. Sheffield, 2000.
9. Simmons J., Biddle G., *The Oxford Companion to British Railway History: From 1603 to the 1990s*, Oxford University Press, Oxford 1997.
10. Volkening W., *Przewozy pasażerskie dużych prędkości w systemie koło-szyna i na poduszce magnetycznej*, „Technika Transportu Szybowego” 2000, nr 3.

### Vehicles with the magnetic levitation

Conventional trains based on the principle of turning their wheels on the rails, have reached by nearly 200 years of operation relatively advanced technical level, enabling widespread use of them. In commercial applications, it is possible their exploitation at speeds over 300 km/h with the real chance of achieving 400 km/h using the technology: steel wheel – steel rail. Speed record for the conventional trains of 575 km/h was achieved in April 2007 by the modified TGV built by Alstom. For decades, however, trains equipped in new types of propulsion with a magnetic linear motor have been built, with a number of practical applications, in addition. The new idea known as the Hyperloop system is born, but no technical solutions have been developed yet. This article is a review of the applications of the system based on the magnetic levitation phenomena (Maglev), and describing a summary of present-day experiences with the Maglev technology.