

# Odkrywanie kolei przyszłości – Maglev

Janusz POLIŃSKI<sup>1</sup>

## Streszczenie

Rozwój techniczny transportu kolejowego opartego na układzie koło – szyna, na przestrzeni minionych siedemdziesięciu lat został wzbogacony o rozwiązania niekonwencjonalne, eliminujące tradycyjną drogę kolejową z jej głównym elementem – torem szynowym i koła pojazdów. Wysiłki części konstruktorów skierowały się na wykorzystanie zjawiska lewitacji magnetycznej. Takie rozwiązania nazwano systemem Maglev. W praktyce eksploatacyjnej sprowadzało się to do zastąpienia tradycyjnego torowiska układem elektromagnesów, a kół napędowych i tocznych pojazdów wraz z systemem zawieszenia – poduszką magnetyczną. W artykule przedstawiono efekty praktycznego wykorzystania lewitacji magnetycznej w pojazdach stosowanych do przewozu osób w Europie, Azji i USA. Przedstawiono również zaawansowane prace zmierzające do wykorzystania systemu w kolejowych przewozach pasażerskich, eliminujących ruch lotniczy na krótkich i średnich dystansach, a także w transporcie miejskim, co wpisuje się w działania ochrony środowiska naturalnego.

**Słowa kluczowe:** transport kolejowy, koleje dużych prędkości, lewitacja magnetyczna, system Maglev

## 1. Wstęp

Potrzeba szybkiego przemieszczania osób we współczesnym świecie jest źródłem powstawania nowych systemów transportu, spełniających coraz ostrzejsze ograniczenia ekologiczne i wymagania techniczne. Prace badawcze związane z wykorzystaniem zjawiska lewitacji magnetycznej w pojazdach pasażerskich, były prowadzone od przeszło 70 lat w Europie (głównie w Niemczech), Azji (w Japonii, Korei Południowej, Chinach) i w USA. Kolej magnetyczna, potocznie zwana Maglev (z jęz. angielskiego *magnetic levitation* – lewitacja magnetyczna), jest to rozwiązanie, w którym tradycyjne torowisko zastąpiono układem elektromagnesów, a koła napędowe i toczne pojazdów wraz z systemem zawieszenia – poduszką magnetyczną.

Określenie Maglev nie odnosi się do konkretnego rozwiązania pojazdu, lecz zjawiska unoszenia przez pole magnetyczne. W tego typu pojazdach wykorzystano indukcyjny silnik liniowy, za pomocą którego następuje wprawienie pojazdu w ruch. Pojazd jest utrzymywany w niewielkiej odległości od prowadnicy torowej za pomocą magnesów, w celu wytworzenia zarówno siły nośnej, jak i napędowej. Zainteresowania badawcze kierowano na wykorzystanie systemu w transporcie miejskim ( $v = 100 - 150$  km/h) oraz wypełnienia

luki pomiędzy konwencjonalnymi kolejami dużych prędkości, a transportem lotniczym ( $v = 350 - 800$  km/h).

## 2. Technologie wytwarzania pola magnetycznego do lewitacji pojazdów

W rozwiązaniach wykorzystujących lewitację magnetyczną można obecnie stosować jedną z kilku znanych technologii wytwarzania pola magnetycznego wykorzystwanego do lewitacji pojazdu, tj.:

### **EMS (ang. *electromagnetic suspension*) – zawieszenie elektromagnetyczne**

W zawieszeniu elektromagnetycznym lewitacja istnieje dzięki siłom przyciągania występującym pomiędzy torem i elektromagnesami, umieszczonymi w pojeździe. Elektromagnesy zainstalowane w dolnej części konstrukcji pojazdu są przyciągane przez żelazne szyny. Dolna część pojazdu wraz z elektromagnesami jest „owinięta” wokół szyn prowadzących, a siła przyciągania między prowadnicami a magnesami utrzymuje pojazd nad szyną prowadzącą. System ten jest niestabilny i wymaga stałego kontrolowania poprawności pracy przez komputer pokładowy

<sup>1</sup> Dr inż.; emerytowany pracownik Instytutu Kolejnictwa; e-mail: jpolin53@vp.pl.

w celu utrzymywania stałej odległości około 15 mm między pojazdem a prowadnicą [1]. W tej technologii lewitacja jest możliwa nawet przy braku ruchu pojazdu. Część pola magnetycznego elektromagnesów w pojeździe może pochodzić od magnesów trwałych. Można w ten sposób zmniejszyć prąd płynący przez elektromagnesy w pojeździe. W konsekwencji moc niezbędna do zachowania lewitacji może być bardzo niewielka, stąd zasilanie magnesów w pojeździe może pochodzić zarówno z systemu bateryjnego, jak i energii pobieranej z zewnątrz. Na rysunku 1a widać, że dolna część wagonu jest „owinięta” wokół toru. Z tego powodu pojazd wykorzystujący technologię EMS jest bezpieczniejszy i wygodniejszy niż pociąg na konwencjonalnych szynach. Natężenie pola magnetycznego wewnątrz kabiny pasażerskiej jest niewielkie, więc rozwiązanie jest bezpieczne dla pasażerów z rozrusznikami serca lub pasażerów noszących magnetyczne nośniki danych, takie jak karta kredytowa lub dysk twardy. Intensywność pola magnetycznego jest porównywalna z ziemskim polem magnetycznym i znacznie niższa od natężenia pola suszarki do włosów, wiertarki elektrycznej czy maszyny do szycia. Dzięki wyposażeniu w awaryjne zasilanie bateryjne, pojazd wykorzystujący technologię EMS, nie „zderzy się” z prowadnicą toru. Dotychczas, najbardziej udany i eksploatowany komercyjnie pociąg wykonany w ten sposób, to Shanghai Maglev kursujący w Chinach.

### EDS (*ang. electrodynamic suspension*) – zawieszenie elektrodynamiczne

W technologii EDS siła nośna powstaje dzięki indukowanemu prądowi wirowemu przepływającemu w przewodniku znajdującym się w zmiennym polu magnetycznym. Rozwiązanie to można podzielić na kilka kategorii [37]:

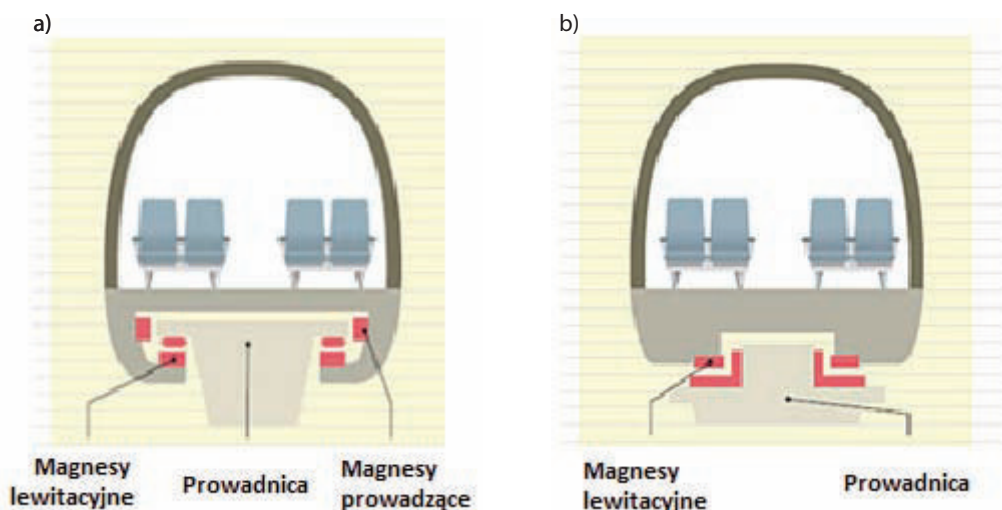
- Wykorzystanie lewitacji z prądem indukowanym w jednorodnej płycie z przewodnika (dobrego przewodnika, który nie wykazuje właściwości ferromagnetycznych, np. z miedzi). To rozwiązanie charakteryzuje prosta

konstrukcja, z czym jest związana niska cena. Wadą tego rozwiązania jest jednak relatywnie duży opór. Stosunek oporu do siły nośnej takiego systemu maleje ze wzrostem prędkości i wynosi około 1:5–1:20 przy prędkościach rzędu 540 km/h. Może on być zredukowany do około 1:40, przy zastosowaniu magnesów nadprzewodzących. System ten generuje istotne straty energii potrzebnej na wytworzenie siły nośnej.

- Zastosowanie toru typu *Indutrack*. Poruszające się magnesy trwałe wytwarzają prądy wirowe w zwartych cewkach położonych w torze, w wyniku czego powstają siły odpychające. System ten jest niewydajny dla małych prędkości, ale przy prędkości 500 km/h oczekiwany stosunek siły nośnej do oporu wynosi 200:1. Zaletą tego rozwiązania jest jego stabilność.
- Rozwiązanie *null flux*. W tym rozwiązaniu, w torze po obu stronach pojazdu umieszcza się zwarte zwoje ukształtowane na wzór cyfry „8”, położone w orientacji pionowej tak, aby magnesy w pojeździe poruszały się w połowie cewki. W taki sposób indukowane prądy wirowe wytwarzają siłę nośną. Rozwiązanie to jest o tyle interesujące, że w przypadku, gdy magnesy poruszają się w połowie wysokości takiego zwoju, napięcia indukowane w górnej i dolnej jego części znoszą się, a w przypadku przesunięcia się magnesu w górę lub dół, wystąpią siły korygujące położenie magnesu.

Rozwiązania wykorzystujące technologię EDS (rys. 1b) mają wspólną wadę, tj. nie działają przy małych prędkościach [1]. Z tego względu w pojeździe niezbędne jest zastosowanie dodatkowego systemu jezdnego (np. na ogumionych kołach), wykorzystywanego w miejscach zatrzymywania pojazdu, w celu wymiany podróźnych i kontynuowania jazdy.

Ponieważ pojazd z rozwiązaniem EDS indukuje pole magnetyczne o dużym natężeniu, część pasażerska oraz perony muszą być przed nim ekranowane, w przeciwnym



Rys. 1. Najpopularniejsze zawieszenia [36]: a) zawieszenie elektromagnetyczne, b) zawieszenie elektrodynamiczne

razie staną się niebezpieczne dla pasażerów z rozrusznikami serca. Duże pole magnetyczne może także trwale uszkodzić magnetyczne nośniki danych (karty bankomatowe, twarde dyski urządzeń elektronicznych itp.).

### **SPM (ang. *stabilized permanent magnet suspension*) – zawieszenie na magnesach stałych**

W zawieszeniu na magnesach stałych zastosowano ich odpowiednie ustawienie (tj. wykorzystano ich wewnętrzną strukturę). Nad tym rozwiązaniem są prowadzone zaawansowane badania m.in. w USA. Technologia SPM umożliwi stopniową modernizację istniejących konwencjonalnych systemów kolejowych i metra. Pojazdy Maglev mogą działać jednocześnie ze standardowymi pojazdami szynowymi (kolej, metro) dzięki zainstalowaniu prowadnic systemu SPM na tych samych torach, które są stosowane dla pojazdów szynowych (z jedną szyną magnetyczną na zewnątrz każdej z istniejących szyn stalowych i szyną silnikową pośrodku). W rezultacie, istniejące wagony kolejowe i metro mogą nadal poruszać się po zmodernizowanych torach. Jednocześnie mogą być stopniowo zastępowane nowymi pojazdami wykorzystującymi lewitację magnetyczną, które kosztują mniej i działają znacznie lepiej [32]. Ta możliwość pozwala uniknąć konieczności dostosowania istniejącej infrastruktury konwencjonalnej do nowych rozwiązań przy jednoczesnej minimalizacji kosztów.

### **MDS (ang. *magnetodynamic suspension*) – zawieszenie magnetodynamiczne**

W tej technologii, zawieszenie magnetodynamiczne wykorzystuje siły przyciągania magnesów trwałych znajdujących się w pobliżu szyny i w ten sposób utrzymuje pociąg nad torem. Rozwiązanie to znajduje się obecnie w fazie testów [1]. Praktyczne wykorzystanie tego typu zawieszenia magnetycznego jest głównie wykorzystywane w systemach EMS (np. w niemieckiej kolei Transrapid) i EDS (np. pojazdy japońskie).

## **3. Rozwiązania pojazdów wykorzystujących lewitację magnetyczną**

Historia wykorzystania silników liniowych w konstrukcji pojazdów sięga pierwszej połowy XX wieku. Pierwsze badania eksperymentalne z lewitacją magnetyczną przeprowadził w 1922 roku niemiecki inżynier Hermann Kemper. W 1933 roku skonstruował działający obwód do unoszenia się na zasadzie lewitacji elektromagnetycznej, wykorzystujący przyciąganie elektromagnetyczne. W 1934 roku opatentował swój wynalazek, który przyczynił się do opracowania pojazdu o nazwie Transrapid.

Pełnowymiarowy model pojazdu zbudowano pod koniec lat 40. XX wieku na podstawie prac Erica Laithwaite'a, profesora Imperial College London. W latach 70. ubiegłego wieku, pod jego kierunkiem opracowano nowy układ magnesów, umożliwiając pojedynczemu silnikowi zarówno unoszenie, jak i przesuwanie pojazdu. Jednak dopiero

w 1984 roku nastąpiło komercyjne wykorzystanie rozwiązania na trasie długości 600 m między lotniskiem Birmingham, a stacją kolejową Birmingham International. Pojazd unosił się 15 mm nad prowadnicą. Jego prędkość maksymalna wynosiła zaledwie 42 km/h. Przewozów zaniechano w 1995 roku z powodu narastających problemów z niezawodnością [2]. Rozwiązanie kolei magnetycznej Maglev było także brane pod uwagę podczas studium wstępnego szybkiego połączenia Londynu z północną częścią kraju.

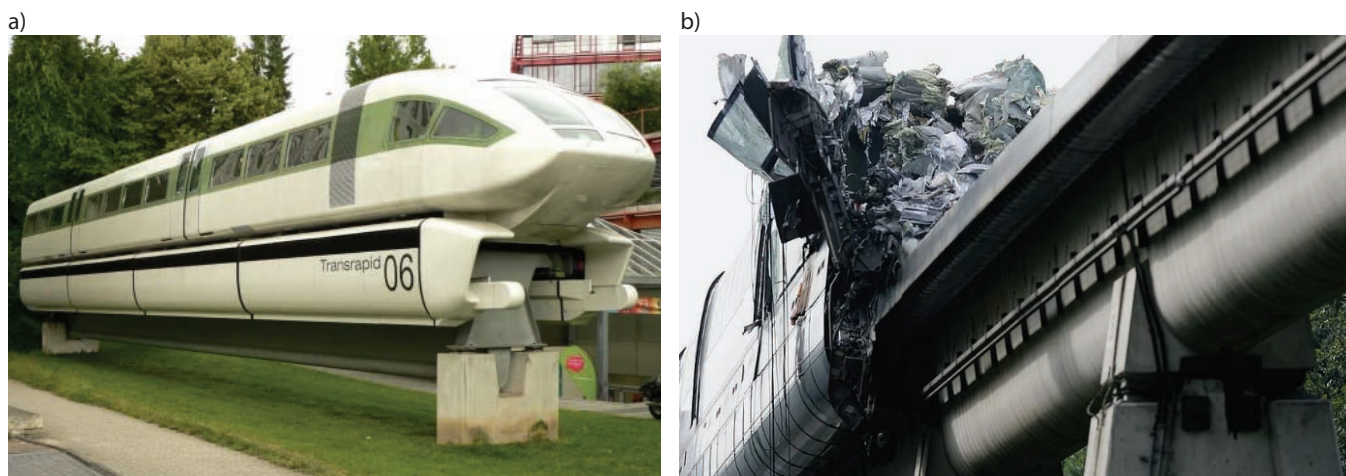
Technologia lewitacji magnetycznej była równolegle rozwijana w Niemczech, gdzie rozwój badań sponzorował rząd niemiecki. W 1969 roku w Emsland rozpoczęły się prace projektowe na torze próbnym o długości 31,5 km, na którym badano pojazd Transrapid rozwijający prędkość 50 km/h. Kolejne trzy wersje pojazdów powstały w latach 1971–1973, które umożliwiły uzyskanie prędkości wynoszącej 157 km/h. W latach 1979–1987 powstały kolejne generacje pojazdu, który w 1989 roku osiągnął prędkość 280 km/h. Ostatnia wersja pojazdu – Transrapid 09, była przeznaczona do jazdy z prędkością 500 km/h. Rozwój systemu został nagle przerwany w 2006 roku na skutek poważnego wypadku. Pociąg przy prędkości 162 km/h wbił się w stojący na torze pojazd obsługi technicznej. Śmierć poniosły 23 osoby, a 11 podróżnych zostało rannych. W 2011 roku tor zamknięto [2, 3]. Zachowany fragment toru z pojazdem i skutek zderzenia pociągu pokazano na rysunku 2.

W Niemczech, na uwagę zasługują również projekty, takie jak tor pokazowy w Hamburgu o długości 900 m, który zbudowano na potrzeby międzynarodowej wystawy transportowej (IVA) w 1979 roku. W latach 1989–1991 funkcjonował tor magnetyczny w Berlinie (tzw. M-Bahn) o długości 1600 metrów, łączący Gleisdreieck i Kemperplatz. Pojazdy rozwijały prędkość 80 km/h. Ostatecznie konstrukcję toru uznano za zbędną i usunięto ją podczas rozbudowy miasta [3].

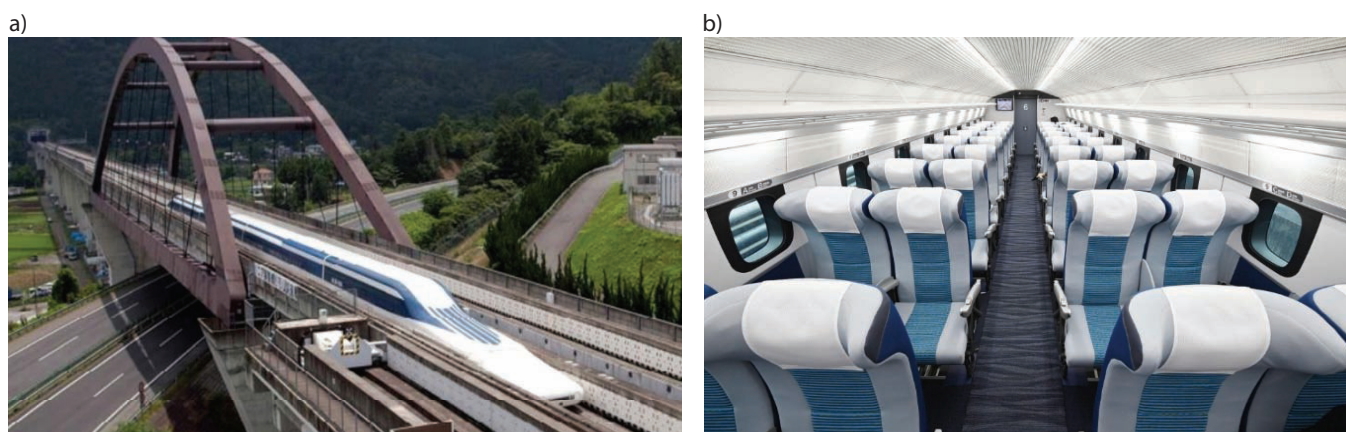
Obecnie komercyjnie działające linie kolei magnetycznych znajdują się w Azji. Prekursorem rozwoju kolei magnetycznych na tym kontynencie jest Japonia. Prace w tym zakresie zapoczątkowano jeszcze w latach 60. XX wieku. Pierwszy testowy tor o długości 7 km uruchomiono w latach 70. XX wieku w prefekturze Miyazaki. Po pomyślnych testach w 1997 roku wybudowano kolejny odcinek testowy między Ōtsuki i Tsuru w prefekturze Yamanashi. W 2013 roku linię wydłużono o kolejne 25 km. Obecnie linia ma długość 42,8 km i jest włączona do powstającej linii Chuo Shinkansen. Pociągi na tej linii, traktowanej jako tor testowy, osiągały prędkość eksploatacyjną przekraczającą 500 km/h [4, 9], co umożliwiło rozwój konstrukcji pojazdów dla tej linii.

W 2015 roku ustanowiono kilka rekordów: 16 kwietnia siedmiowagonowy skład osiągnął prędkości 590 km/h i utrzymał ją przez 19 sekund, 21 kwietnia rekord ten został pobity. Pociąg Maglev serii LO ustanowił światowy rekord prędkości pociągu niekonwencjonalnego, jadąc z prędkością 603 km/h. Prędkość udało się utrzymać przez 10,8 sekundy. W tym czasie pojazd przejechał 1,8 km [12, 13]. Pociąg pokazano na rysunku 3, tor i jazdę pociągu można zobaczyć na filmie [7].





Rys. 2. Pociąg Transrapid: a) zachowany fragment toru wraz z pojazdem [2], b) zmiądzony pojazd podczas wypadku w 2006 roku [3]



Rys. 3. Pociąg Chuo Shinkansen: a) testy pociągu czterowagonowego [15], b) wnętrze wagonu [14]

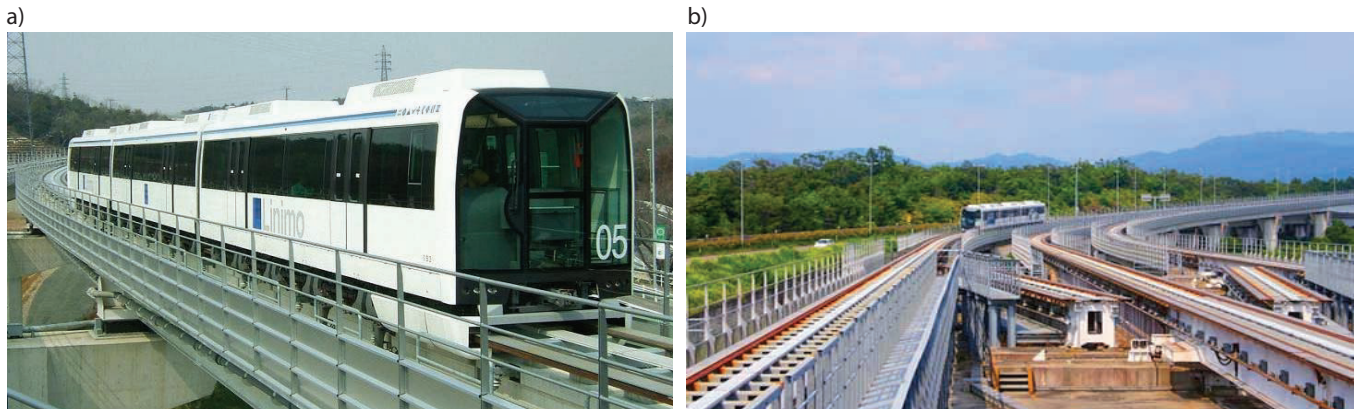
Chuo Shinkansen to japońska linia Maglev między Tokio a Nagoją, której budowę rozpoczęto w 2014 roku. Linia będzie przedłużona do Osaki. Trasa Tokio – Nagoja o długości 286 km, z czterema stacjami pośrednimi w miejscowościach Sagami-hara, Kōfu, Iida i Nakatsugawa ma być pokonywana w ciągu 40 minut. Trasa Tokio – Osaka ma być pokonywana w ciągu 67 min. Ze względu na ukształtowanie terenu, 90% trasy stanowią tunele. Koleje japońskie zamierzają uruchomić tę linię w 2027 roku, natomiast jej przedłużony odcinek do Osaki w 2045 roku [8]. Obecnie, budowniczowie tej linii napotykają duże problemy związane z przeciekami wody do tuneli, co może wydłużyć zakładane terminy oddania linii do eksploatacji [8, 11, 12]. Więcej informacji technicznych pokazują filmy [9, 10].

Na potrzeby światowej wystawy Expo 2005, w Japonii w prefekturze Aichi, uruchomiono linię Linimo o długości około 9 km. Jest to pierwsza, w pełni automatyczna kolej magnetyczna. Pojazdy kolei Maglev, służące obecnie lokalnej społeczności unoszą się 8 mm nad torem, rozwijając prędkości do 100 km/h [4], rysunek 4. Więcej informacji zawiera film [17].

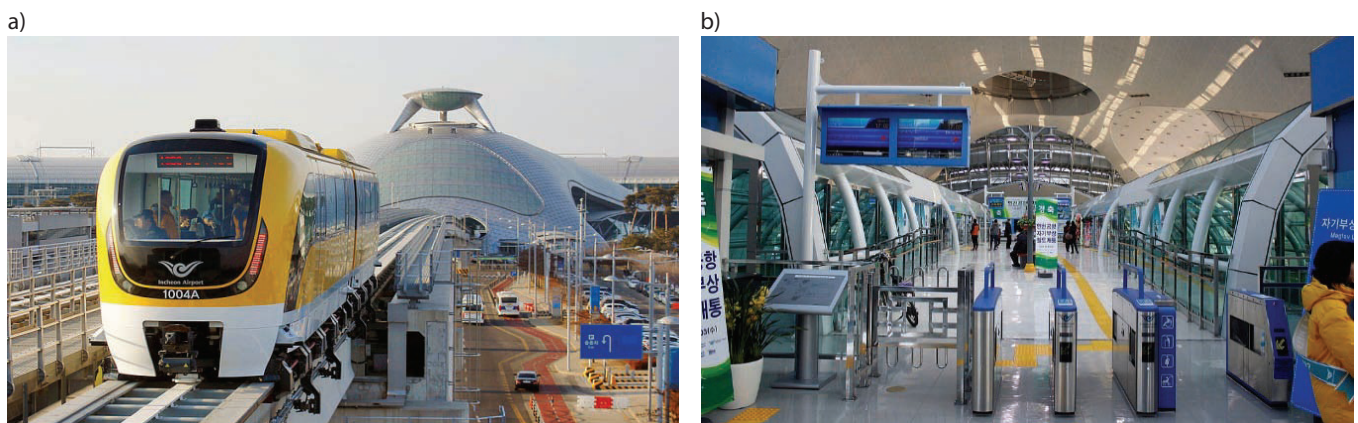
W 2016 roku uruchomiono automatyczną kolej typu Maglev na lotnisku w Incheon (Incheon Airport Maglev) w Korei Południowej. Na linii o długości 6,1 km, wykorzystującej system unoszenia elektromagnetycznego, pociągi rozwijają prędkość do 110 km/h. Linia ma być rozbudowana o dwa odcinki długości 9,7 km i 37,4 km, tworząc linię okólną [18]. W rozwiązaniu zastosowano napęd z zawieszeniem elektromagnetycznym (EMS) i liniowym silnikiem indukcyjnym (LIM).

Pociąg Maglev, nazwany Ecobee, został wspólnie opracowany przez Koreański Instytut Maszyn i Materiałów (znany jako KIMM, który jest częścią Koreańskiego Uniwersytetu Nauki i Technologii) oraz firmę Hyundai Rotem, znaną z dostarczonych do Warszawy pojazdów tramwajowych. Pociąg ten był częścią koreańskiego programu Urban Maglev (UMP), który rozpoczął się w grudniu 2006 roku. Program, prowadzony także obecnie, ma na celu opracowanie systemu transportu lewitacji magnetycznej, który w Korei Południowej zastąpi obecne środki transportu miejskiego [19]. Przejazdy pociągiem są bezpłatne. Tor wraz z pociągiem oraz infrastrukturę pasażerską stacji pokazano na rysunku 5. Funkcjonowanie kolejki wraz z infrastrukturą torową można zobaczyć na filmie [20].





Rys. 4. Pociąg Linimo: a) widok pociągu [16], b) widok toru wraz z elementami zwrotnicowymi [17]

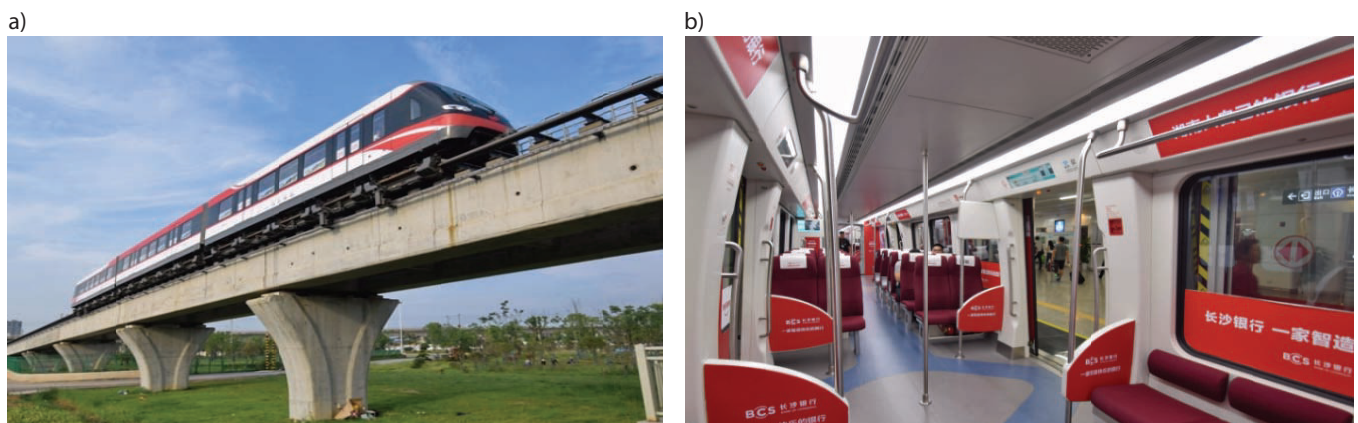


Rys. 5. Pociąg Incheon Airport Maglev [18]: a) widok pojazdu i toru, b) widok stacji i jej infrastruktury pasażerskiej

Kolejne rozwiązanie wykorzystujące technikę Maglev funkcjonuje w chińskim mieście Changsha, rysunek 6. Linia ma 18,55 km długości i łączy dworzec kolei dużych prędkości z portem lotniczym. Budowę rozpoczęto w maju 2014 roku. Rozruch próbny nastąpił 26 grudnia 2015 roku. Próbną eksploatację rozpoczęto 6 maja 2016 roku, dwa lata od rozpoczęcia inwestycji! Przedsięwzięcie kosztowało 749 mln USD. Obecnie jest realizowane przedłużenie linii o długości 4,5 km, które ma połączyć się z budowanym Terminalem 3,

po wschodniej stronie lotniska. W ramach rozbudowy, jednocześnie są wykonywane dwie stacje metra, co nie wykluczyło jednego z dwóch rozwiązań, pomimo pokrywających się tras. Budowa rozpoczęła się 25 kwietnia 2021 roku. Jazdy testowe kolejki można zobaczyć na filmie [6].

Analizując wykorzystywane rozwiązania kolei magnetycznych w Chinach należy opisać pierwszą komercyjną linię magnetyczną na świecie, funkcjonującą pod nazwą Shanghai Maglev. Budowę rozpoczęto w marcu 2001 roku, a oddanie



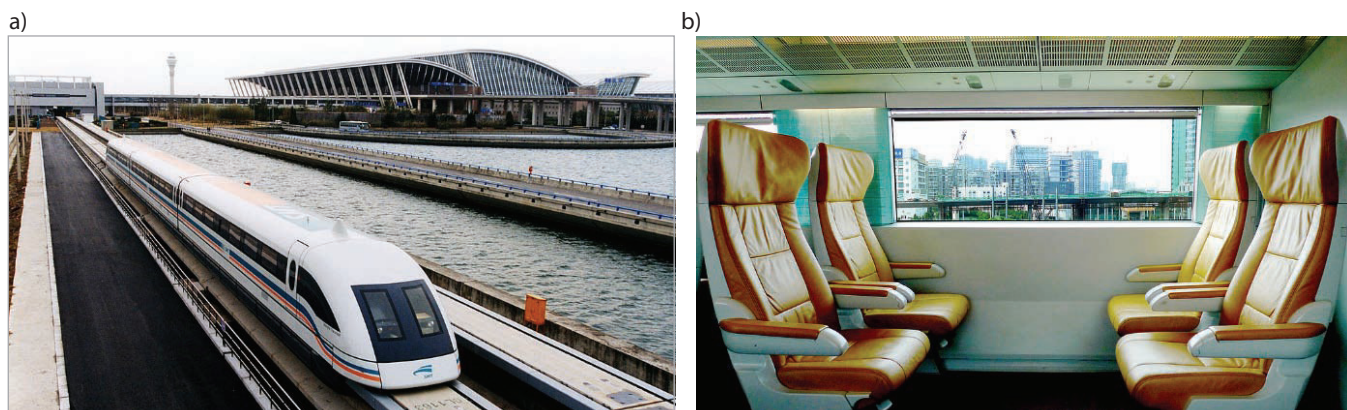
Rys. 6. Pociąg Maglev w Changsha: a) widok ogólny [5], b) wnętrze pojazdu [5]



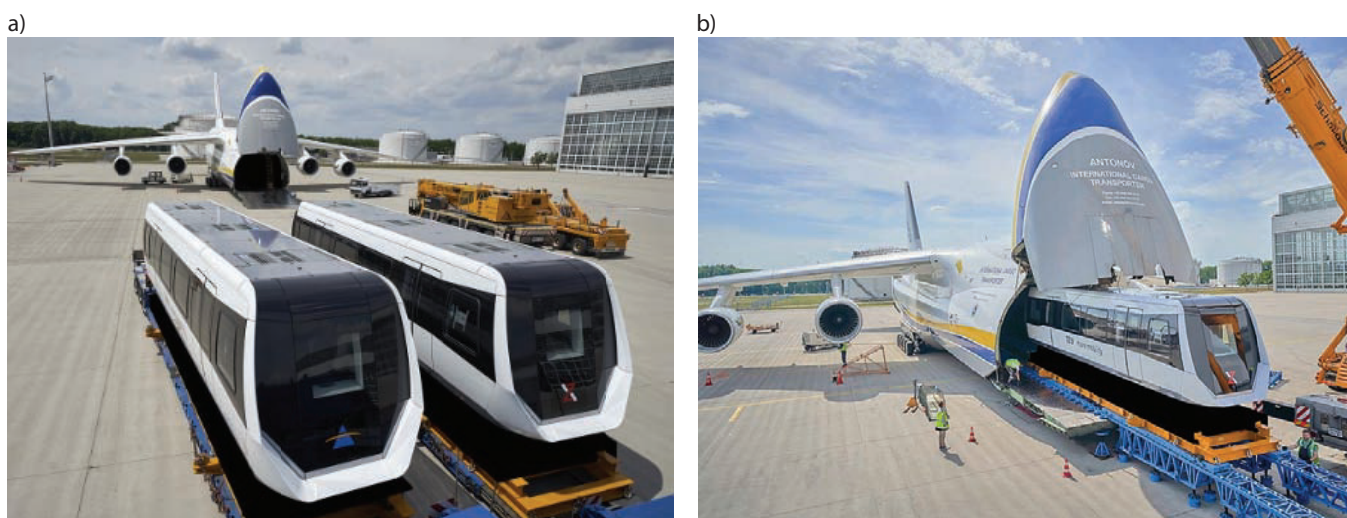
kolei do eksploatacji nastąpiło trzy lata później, 1 stycznia 2004 roku. Pociągi zostały wyprodukowane w Niemczech. Linia o długości 30,5 km, na której znajdują się jedynie dwie stacje (początkowa i końcowa) biegnie od stacji Longyang Road w dzielnicy Pudong do stacji Port Lotniczy Szanghaj-Pudong. Dodatkowe tory prowadzą z lotniska do stacji postojowej. Czas przejazdu całej trasy wynosi około 8 minut, prędkość 350 km/h jest osiągana w ciągu 2 minut, a osiągnięta prędkość na prostych odcinkach wynosi 431 km/h. Podczas testu 12 listopada 2003 roku, pociąg osiągnął maksymalną prędkość wynoszącą 501 km/h. Budowa linii pochłonęła 10 mld juanów (2 mld €) i trwała 2,5 roku [21].

Zdolność przewozowa funkcjonującego rozwiązania jest niewielka ze względu na krótkie godziny otwarcia, długość linii, wysoką cenę biletów i nieatrakcyjne położenie (tylko 2 stacje). W związku z tym pojawiły się głosy krytyki mówiące, że Shanghai Maglev został wybudowany na pokaz i było to marnotrawienie pieniędzy, niepraktyczne dla mieszkańców (brak stacji pośrednich). Pojazd i jego wnętrze pokazano na rysunku 7, natomiast więcej informacji można zobaczyć na filmie [22].

Bazując na doświadczeniach zdobytych w trakcie przygotowywania projektu Shanghai Maglev, niemiecka firma Bögl zajmująca się budownictwem i infrastrukturą transportową zaprojektowała nowe, w pełni zautomatyzowane rozwiązanie w zakresie mobilności miejskiej nazwane Transport System Bögl (TSB). Podczas gdy w Europie prowadzi się obecnie studia wykonalności dla rozwiązania, pojazdy dla systemu były już demonstrowane na specjalnym torze w Chinach. Założono, że aby przekonać lokalnych klientów do zalet chińskiego systemu, niemiecka firma i jej chiński partner Chengdu Xinzhu Road & Bridge Machinery Co, Ltd. zbudowali 3,5-kilometrowy tor demonstracyjny w południowo-zachodniej chińskiej prowincji Syczuan, gdzie pojazd TSB może osiągać prędkości niemal 160 km/h. Wspomniana firma chińska otrzymała wyłączne prawa do produkcji i marketingu systemu w Chinach. Chińskie zainteresowanie tym systemem wynika m.in. z faktu, że niemiecka firma oferuje pełen pakiet rozwiązania, tj. tory, pojazdy, technologię eksploatacji i utrzymania [23]. Załadunek prototypowych wagonów do ukraińskiego samolotu w 2020 roku w celu przewozu do Chin, pokazano na rysunku 8.



Rys. 7. Shanghai Maglev: a) widok pojazdu [21], b) wnętrze pojazdu [21]



Rys. 8. Załadunek wagonów TSB [24]: a) wagony na płycie lotniska w Monachium oczekujące na załadunek, b) załadunek wagonów do samolotu transportowego Antonov An-124

Rozwiązanie TSB jest wolniejsze. Pociągi poruszają się z prędkością 150–160 km/h, są cichsze i niemal nie emitują hałasu oraz drgań. System może funkcjonować w wielu różnych środowiskach miejskich, tj. jako nadziemna linia kolejowa, jeździć na poziomie gruntu lub stać się systemem transportu podziemnego. Połączenie zautomatyzowanej, bezobsługowej pracy eliminującej błędy ludzkie z zaletami technologii lewitacji magnetycznej, zmniejsza koszty eksploatacji o 20% w porównaniu z konwencjonalnymi, kołowymi systemami kolejowymi. Jednocześnie, pojazdy TSB można uruchamiać na żądanie, co pozwala uniknąć pustych przejazdów poza godzinami szczytu i na obszarach wiejskich [24].

Eksploatacja pociągów odbywa się bez zużywania się elementów podwozia, co czyni je o wiele bardziej ekonomiczne od rozwiązań konwencjonalnych. W przeciwieństwie do stosowanego, np. w przypadku tramwajów, rozwiązania opartego na zastosowaniu kół i szyn, w systemie TSB nie ma kontaktu między torem a podwoziem. Nie dochodzi również do kontaktu stojana z innymi elementami, ponieważ rozwiązanie TSB wykorzystuje krótki stojan w pojeździe, zamiast długiego w szynie. Tor dla systemu pokazano na rysunku 9.

Firma Bögl od kilku lat testuje swój pociąg Maglev na torze testowym w Sengenthal w Bawarii. Federalne Ministerstwo Transportu i Infrastruktury Cyfrowej (BMVI) w Niemczech przeprowadza badania w zakresie wykorzystania TSB w porcie lotniczym w Monachium. Stanowi to potencjalną podstawę do wdrożenia tego rozwiązania w Niemczech. Prace wstępne dotyczące przyszłych projektów dotyczą także Berlina oraz obszaru metropolitalnego Monachium [24, 26].

W Chinach są obecnie opracowywane dwa konkurencyjne projekty rozwiązań szybkich pociągów magnetycznych typu Maglev, które są rozwijane i testowane. Jeden jest produktem firmy China Railway Rolling Stock Corporation (oznaczony jako CRRC 600) z wykorzystaniem wielu patentów niemieckich, nad którym prace są prowadzone

w Qingdao. Pociąg w tym systemie będzie mógł poruszać się z prędkością do 600 km/h. Drugi projekt zaprezentowany w Chengdu dotyczy pociągu, który może rozwijać prędkość do 620 km/h.

Według specjalistów od transportu, pociągi magnetyczne systemu Maglev są przyszłością Chin. Są ciche, bardziej niezawodne, mają niskie vibracje i dużą pojemność pasażerską. Kolejną zaletą takich kolei, to eliminowanie hałasu emitowanego przez samoloty i dużo mniejsze wymagania związane z wykorzystaniem terenów, a także możliwość wjazdu do centrów miast, co znacznie skraca czas podróży. Obecne strategie rozwoju transportu w Chinach wykorzystujące pociągi magnetyczne zakładają eliminowanie transportu lotniczego w zasięgu 1500 km (nie licząc dojazdu do lotnisk, podróż z Pekinu do Szanghaju trwa około 2 godzin samolotem, a około 5,5 godziny pociągiem dużych prędkości). Analizy wykazały, że taka podróż pociągiem Maglev zajęłaby około 2,5 godziny. Obecnie dużym utrudnieniem w szybkim rozwoju pociągów magnetycznych są bardzo wysokie koszty budowy torów, niekompatybilnych z infrastrukturą torową konwencjonalnych kolei dużych prędkości i duże zużycie energii. Z tego powodu, mniejsze zużycie energii przez kolej magnetyczną, jest jednym z najważniejszych walorów przesądzających o prowadzeniu prac badawczo-rozwojowych [23, 26]. Pociąg na linii testowej China Railway Rolling Stock Corporation pokazano na rysunku 10.

Pociąg ten może składać się od 2 do 10 pojazdów (wagonów), z których każdy może przewozić po 100 pasażerów. W pracach rozpoczętych w 2016 roku skupiono się nad rozwiązaniami mającymi wpływ na postęp technologiczny w zakresie praktycznego wykorzystania lewitacji magnetycznej w systemach transportowych, przy założeniu koniecznego obniżania przyszłych kosztów eksploatacyjnych. Założono, że zasada preferowania rozwiązań dotyczących obniżenia kosztów, w tym kosztów zużywanego energii, będzie przekładała się na powszechność wykorzystywania rozwiązań.



Rys. 9. Transport System Bögl: a) skład pociągu TSB na torze [23], b) różne rozwiązania techniczne toru [25]





Rys. 10. Pociąg Maglev zdolny do rozwijania prędkości 600 km/h na torze testowym China Railway Rolling Stock Corporation [26]

W ramach projektu opracowano i wyprodukowano prototyp pociągu składający się z pięciu wagonów o przewidywanej prędkości maksymalnej 600 km/h. Pokonano przy tym wiele trudności technologicznych związanych m.in. z przyspieszeniem, przystosowaniem do skomplikowanego środowiska i lokalizacją głównych systemów napędowych [27, 28].

Pomimo znacznego postępu w rozwoju technologii nad koleją magnetyczną, jej podstawową wadą nadal jest koszt. Nie jest łatwo podać liczby, chociaż jeden z bardzo krytycznych raportów amerykańskich informuje, że Maglev może być 1,5 razy droższy niż konwencjonalna kolej dużych prędkości. Przytoczono tu koszty budżetu zrealizowanego projektu Shanghai Maglev, które wyniosły około 1,2 miliarda dolarów na tor o długości 30,5 km, czyli około 39,3 miliona dolarów na kilometr (wliczając koszt dwóch stacji). Zwykły koszt szybkiej kolei w Chinach szacuje się na 17–21 milionów dolarów za kilometr. Pomimo tego, że władze chińskie zakładają, że powszechny rozwój przedstawionego rozwiązania transportowego nastąpi pod koniec obecnej dekady [28], prototyp pojazdu można zobaczyć na filmie [29].

W Stanach Zjednoczonych w Powder Springs (Georgia) zbudowano tor testowy o długości 610 m, na którym są prowadzone badania i testy pełnowymiarowego pociągu lewitacji magnetycznej, stanowiącego oryginalne

rozwiązanie amerykańskie. Przeprowadzono już wiele badań z zakresu bezpieczeństwa, lewitacji, rozwiązań napędu, stabilności, obciążeń i prędkości przekraczających 60 km/h. Firma AMT (autor projektu) umieściła magnesy i elementy sterujące w lekkim pojeździe oraz opracowała znacznie prostsze rozwiązanie toru, przez co obniżyła koszt budowy i eksploatacji systemu do poziomu kolei konwencjonalnej [32, 34, 35]. Pojazd pokazano na rysunku 11.

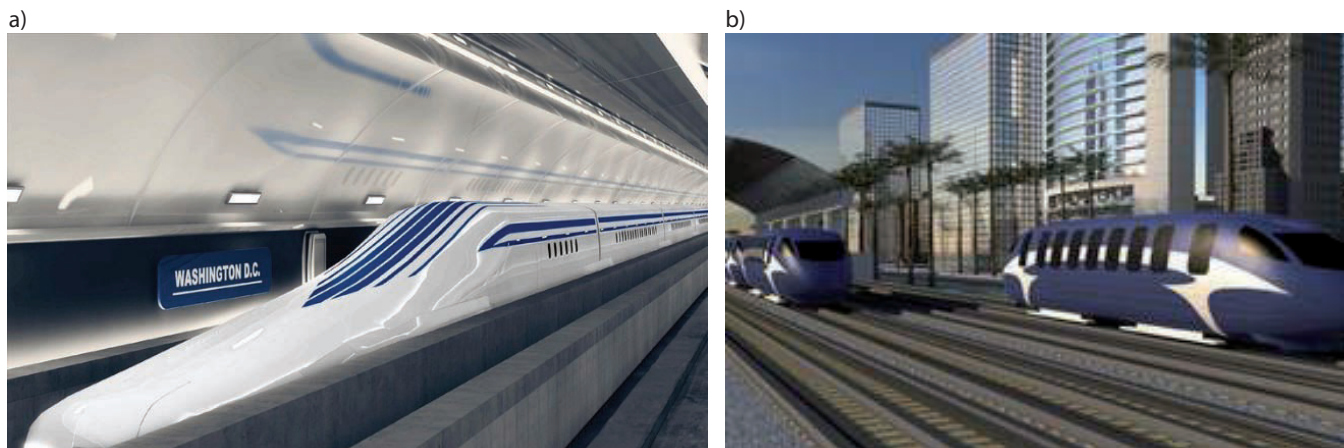
Na uwagę zasługuje powstający w USA projekt nazwany „Północno-wschodni Maglev” (*Northeast Maglev*) połączenia koleją magnetyczną Waszyngtonu z Nowym Jorkiem. Amerykański zespół powołany do tego zadania ściśle współpracuje z Central Japan Railway Company, aby przyspieszyć prace nad budową i uruchomieniem pierwszej linii kolei magnetycznej w Stanach Zjednoczonych. Do obsługi trasy przewiduje się analogiczne pojazdy jak Chuo Shinkansen, będące najbardziej zaawansowaną niekonwencjonalną technologią kolejową na świecie. Zakłada się jazdę pociągów z prędkością 500 km/h, co zapewni dotarcie z Nowego Jorku do Waszyngtonu w ciągu godziny. W pierwszej fazie realizacji przewiduje się wykonanie projektu między Waszyngtonem a Baltimore w stanie Maryland, z przystankiem na międzynarodowym lotnisku Baltimore Washington Thurgood Marshal. Ta 15-minutowa podróż jest początkowym projektem, który w przyszłości będzie rozszerzony o Nowy Jork. Obecnie dla tej fazy jest przygotowywana decyzja środowiskowa [32]. Wizualizację pociągu pokazano na rysunku 12a, natomiast pociągi w ruchu przedstawia film [30].

W Stanach Zjednoczonych powstała jedna z ciekawszej, nieco futurystycznej koncepcji wykorzystania lewitacji magnetycznej, która eksploatuje istniejące linie kolejowe. To wspomniana na wstępie technologia SPM Maglev, która zdaniem twórców koncepcji umożliwi w przyszłości stopniową modernizację obecnych, konwencjonalnych systemów kolejowych i metra. W miarę posiadanych środków, konwencjonalne rozwiązania można stopniowo zastępować nowymi pojazdami Maglev, które kosztują mniej i mogą działać w systemie kolei autonomicznych (bez maszynistów). Zwolennicy tej technologii zwracają uwagę na zmniejszone zużycie szyn i kół pojazdów, będące wynikiem odciążenia



Rys. 11. Koncepcja American Maglev Technology (AMT): a) pojazd przy peronie [34], b) tor doświadczalny wraz z pojazdem [35]





Rys. 12. Projekty w Stanach Zjednoczonych: a) północno-wschodni Maglev [32], b) technologia SPM Maglev [33]

pojazdu przez poduszkę magnetyczną. Akceptacja i sukces tego częściowo lewitującego systemu może ostatecznie doprowadzić do w pełni lewitującej technologii transportu kolejowego, rysunek 12b. Wskazują jednocześnie, że czasami konieczne jest podjęcie mniejszych kroków, aby osiągnąć określony cel w przyszłości, zwłaszcza jeżeli przedsięwzięcia są kapitałochłonne [31, 33]. Wizualizacja działania systemu została pokazana na filmie [38].

#### 4. Zakończenie

Z przytoczonego przeglądu rozwiązań wynika, że największą przeszkodą w realizacji projektów kolei magnetycznych są koszty wdrożenia, które znacznie przekraczają koszty budowy kolei konwencjonalnej. Wynika to przede wszystkim z konieczności organizowania całej infrastruktury od zera. Także koszty eksploatacji są wysokie, jednocześnie doświadczenia z komercyjnej eksploatacji poszczególnych systemów są wciąż ograniczone. Wynika to stąd, że poszczególne rozwiązania są wdrażane jednostkowo, a bez szerokiego rozpowszechnienia, nie można liczyć na ich szybki spadek.

#### Bibliografia

- Graff M.: *Pociągi z unoszeniem magnetycznym*. TTS Technika Transportu Szynowego, 2016, nr 10.
- <https://mediarail.wordpress.com/are-futuristic-maglev-train-could-revolutionize-railways/> [dostęp: 14.04.2023].
- <https://businessinsider.com.pl/technologie/nowe-technologie/transrapid-licytacja-pociagu-magnetycznego-w-niemczech/wtsl22w> [dostęp: 14.04.2023].
- <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/dluga-historia-magleva-53853.html> [dostęp: 14.04.2023].
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Changsha\\_Maglev\\_Express](https://en.wikipedia.org/wiki/Changsha_Maglev_Express) [dostęp: 14.04.2023].
- <https://www.youtube.com/watch?v=fxatoWQYs8E> (Changsha Maglev Express Testing) [dostęp: 14.04.2023].
- [https://www.youtube.com/watch?v=AhrdVoGw\\_Ks](https://www.youtube.com/watch?v=AhrdVoGw_Ks) (Jazda najszybszym pociągiem świata) [dostęp: 14.04.2023].
- [https://en-m-wikipedia-org.translate.google.com/wiki/Ch%C5%AB%C5%8D\\_Shinkansen?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pl&\\_x\\_tr\\_hl=pl&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://en-m-wikipedia-org.translate.google.com/wiki/Ch%C5%AB%C5%8D_Shinkansen?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pl&_x_tr_hl=pl&_x_tr_pto=sc) [dostęp: 15.04.2023].
- <https://www.youtube.com/watch?v=p1ndbx8ggpk> (Chuo Shinkansen japan maglev train) [dostęp: 15.04.2023].
- [https://www.youtube.com/watch?v=AhrdVoGw\\_Ks](https://www.youtube.com/watch?v=AhrdVoGw_Ks) (Jazda najszybszym pociągiem świata) [dostęp: 16.04.2023].
- [https://en-m-wikipedia-org.translate.google.com/wiki/Railway\\_speed\\_record?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pl&\\_x\\_tr\\_hl=pl&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://en-m-wikipedia-org.translate.google.com/wiki/Railway_speed_record?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pl&_x_tr_hl=pl&_x_tr_pto=sc) [dostęp: 15.04.2023].
- <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/chuo-shinkansen--pierwszy-miedzynastowy-maglev-79664.html> [dostęp: 15.04.2023].
- <https://english.kyodonews.net/news/2020/10/13693ab8c34b-jr-central-holds-test-ride-unveils-design-of-revised-maglev-train.html> [dostęp: 15.04.2023].
- [https://www.researchgate.net/figure/Chuo-Shinkansen-route-map\\_fig7\\_258289351](https://www.researchgate.net/figure/Chuo-Shinkansen-route-map_fig7_258289351) [dostęp: 15.04.2023].
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Linimo#/media/File:Linimo-2.jpg> [dostęp: 15.04.2023].
- <https://www.japan-rail-pass.com/plan-your-trip/travel-by-train/train-in-japan/linimo> [dostęp: 15.04.2023].
- [https://www.youtube.com/watch?v=WZ\\_PdCgz7ik](https://www.youtube.com/watch?v=WZ_PdCgz7ik) (Linimo Maglev Switch) [dostęp: 15.04.2023].
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Incheon\\_Airport\\_Maglev#Stations](https://en.wikipedia.org/wiki/Incheon_Airport_Maglev#Stations) [dostęp: 15.04.2023].
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Incheon\\_Airport\\_Maglev](https://en.wikipedia.org/wiki/Incheon_Airport_Maglev) [dostęp: 15.04.2023].
- <https://www.youtube.com/watch?v=qY2HiAKDBTO> (Incheon Airport /Ecobee/ Maglev open! Seoul Korea) [dostęp: 15.04.2023].
- [https://pl.wikipedia.org/wiki/Transrapid\\_Szanghaj](https://pl.wikipedia.org/wiki/Transrapid_Szanghaj) [dostęp: 16.04.2023].
- <https://www.youtube.com/watch?v=-qlwklyVWA> (Shanghai Transrapid Maglev 2015) [dostęp: 15.04.2023].
- <https://www.autodesk.pl/customer-stories/max-boegl-maglev-technology> [dostęp: 16.04.2023].

24. <https://www.airfreight-logistics.com/antonov-airlines-flies-maglev-train-to-china/> [dostęp: 16.04.2023].
25. <https://www.tuev-nord.de/explore/en/explains/how-do-you-test-a-maglev-train/>. Różne rozwiązania toru w systemie TSB [dostęp: 16.04.2023].
26. <https://asiatimes.com/2021/08/china-unveils-600-km-h-transrapid-train/> [dostęp: 16.04.2023].
27. <https://www.nzherald.co.nz/sponsored-stories/the-train-that-rivals-a-plane/KO4WRVYJPRCMA7V6NLO-UHCLZ2M/> [dostęp: 16.04.2023].
28. <https://hackaday.com/2021/08/10/china-maglev-train-aspirations-boosted-by-new-600-km-h-design/> [dostęp: 16.04.2023].
29. <https://www.youtube.com/watch?v=Y-yJlloZ11M> [dostęp: 16.04.2023].
30. <https://www.youtube.com/watch?v=fkH2KQb8l-s> Maglev Holdings USA - SPM Maglev Group Rapid Transit [dostęp: 17.04.2023].
31. <https://www.nextbigfuture.com/2014/08/stabilized-permanent-magnet-maglev.html> [dostęp: 17.04.2023].
32. <https://www.maglev.net/maglev-in-the-usa> [dostęp: 18.04.2023].
33. <https://www.launchpnt.com/hs-fs/hub/53140/file-14462770-jpg/images/ec058e3f57.jpg> [dostęp: 18.04.2023].
34. <http://american-maglev.com/maglev> [dostęp: 18.04.2023].
35. <https://www.globalatlanta.com/marietta-company-ready-to-send-maglev-technology-abroad/> [dostęp: 18.04.2023].
36. [https://emt18-blogspot-com.translate.goog/2008/10/maglev-suspension-systems.html?\\_x\\_tr\\_sch=http&\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pl&\\_x\\_tr\\_hl=pl&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://emt18-blogspot-com.translate.goog/2008/10/maglev-suspension-systems.html?_x_tr_sch=http&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pl&_x_tr_hl=pl&_x_tr_pto=sc) [dostęp: 18.04.2023].
37. <https://www.gov.pl/attachment/a1964b1a-7016-4b5f-b4a1-03f8ace52af1> (Raport zawierający wynik prac Zespołu Ekspertów, powołanego przez NCBR w zakresie analizy gotowości technologicznej systemu transportu, wykorzystującego pojazdy poruszające się z dużą prędkością w środowisku o obniżonym ciśnieniu) [dostęp: 01.07.2023].
38. <https://www.youtube.com/watch?v=eAe6SydygwQ> [dostęp: 01.07.2023].