

Odkrywanie kolei przyszłości – MagRail

Janusz POLIŃSKI¹

Streszczenie

W artykule z cyklu „Odkrywanie kolei przyszłości” przedstawiono rozwiązania wykorzystujące lewitację magnetyczną na istniejącej sieci konwencjonalnej. Ideę takiego transportu rozważano w USA, jednak istotna rola w tym temacie należy do polskiej myśli technicznej, której efekty są widoczne w kolejnych krokach rozwoju technologii systemu nazwanego MagRail. Decydującą rolę w tym zakresie odegrała spółka Hyper Poland, założona w 2016 roku na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa (MEL) Politechniki Warszawskiej. Jej działania kontynuuje obecnie spółka Nevomo współpracująca z wieloma specjalistami z różnych dziedzin technicznych. Technologia MagRail została już doceniona przez europejski przemysł kolejowy. Potwierdza to kilka podpisanych umów, w tym z włoskim zarządcą infrastruktury Rete Ferroviaria Italiana, największym niemieckim portem śródlądowym Duisport i kolejami francuskimi SNCF. Pierwsza wersja demonstracyjna 1:5 MagRail została zaprezentowana przez Nevomo w 2019 roku. Udane testy na torze 1000 mm przeprowadzono w grudniu 2020 roku. W 2022 roku w Nowej Sarzynie, Nevomo zakończyło budowę pełnowymiarowego toru testowego, który jest najdłuższym torem do testowania pasywnej lewitacji magnetycznej w Europie. Testy nowych rozwiązań dotyczących lewitacji magnetycznej na Podkarpaciu już się rozpoczęły. W kolejnym etapie, przy współpracy z firmą GATX Rail Europe, będą rozszerzone o testy MagRail Booster z konwencjonalnymi wagonami towarowymi.

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

1. Wstęp

Lewitacja magnetyczna to zjawisko fizyczne, które może być wykorzystane do nowych konstrukcji pojazdów stosowanych w transporcie osób i towarów. W rozwiązaniach tego typu są wykorzystywane dwa zestawy elektromagnesów: jeden z nich służy do kilkucentymetrowego unoszenia pojazdu ponad specjalnym torem (prowadnicą elektromagnesów), drugi zaś – wykorzystujący brak tarcia, do przesuwania podniesionego pojazdu. Elektromagnesy kontrolują stabilność ruchu i prędkość pojazdu, a tego rodzaju napęd i lewitacja nie wymagają ruchomych części. Niektóre projekty pojazdów dostosowanych do lewitacji, wymagają wsparcia przez koła i są stosowane przy niskich prędkościach poruszającego się pojazdu. Dzięki znacznemu uproszczeniu zawieszenia pojazdu nad torem i zastosowanego napędu, jego przemieszczanie jest ciche i płynne, co ma duże znaczenie dla komfortu podróżowania. Ponadto, ten rodzaj napędu umożliwi osiągnięcie znacznie większych prędkości niż rozwiązania konwencjonalne. Do innych znaczących zalet, w porównaniu z konwencjonalnymi systemami kolejowymi,

należy zaliczyć niższe koszty eksploatacji i konserwacji. Elementy pojazdu nie zużywają się tak szybko jak w rozwiązaniach konwencjonalnych, przez co nie zachodzi potrzeba częstej wymiany części. Ze względu na konstrukcję występuje znacznie mniejsze prawdopodobieństwo wykolejenia podczas jazdy. Przemieszczanie pojazdu może odbywać się po znacznie większych pochyleniach, co eliminuje konieczność budowy tuneli oraz ingerowania w krajobraz wynikający z projektowania tradycyjnych torów do zachowania odpowiedniego, dopuszczalnego pochylenia. Rozwiązania wykorzystujące lewitację magnetyczną cechuje niewielkie zanieczyszczenie powietrza.

Te niezaprzeczalne wartości niekonwencjonalnych rozwiązań były już wykorzystywane wiele lat temu, stąd patenty na różne rozwiązania wykorzystujące lewitację magnetyczną były przyznawane wynalazcom na całym świecie. W ujęciu historycznym, pierwszy patent został wydany Albertowi C. Albertsonowi, na opracowanie wykorzystania lewitacji magnetycznej do odciążania kół pojazdów kolejowych i drogowych podczas korzystania z konwencjonalnego napędu. Patent wydano 2 grudnia 1902 roku w USA (U.S.

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

Patent 714,851) [11, 19]. Dwa patenty Stanów Zjednoczonych na pociąg z napędem liniowym zostały przyznane także niemieckiemu wynalazcy Alfredowi Zehdenowi. Pierwszy patent USA (U.S. Patent 782,312) wynalazca otrzymał 14 lutego 1905 roku, drugi patent (U.S. RE 12700) zaś 21 sierpnia 1907 roku [11, 19]. W 1915 roku burmistrz Cleveland Tom L. Johnson złożył wniosek patentowy na bezkołową „szybką kolej” lewitującą przez indukowane pole magnetyczne. Seria niemieckich patentów na pociągi lewitacji magnetycznej napędzane silnikami liniowymi została przyznana Hermannowi Kemperowi w latach 1937–1941. Wczesny pociąg wykorzystujący lewitację magnetyczną został 25 sierpnia 1959 roku opisany w patencie USA 3,158,765 „Magnetic system of transportation” przez G.R. Polgreena [11, 19]. W dalszych latach odnotowywano kolejne patenty twórców nowych rozwiązań w tej dziedzinie transportu. Z przytoczonych danych wynika, że problematyka wykorzystania lewitacji magnetycznej w transporcie kolejowym ma ponad stuletnią tradycję, a dzięki pieniądзом Elona Muska został nadany jej impuls do dalszego rozwoju niekonwencjonalnej kolei w drugiej dekadzie XXI wieku.

W poprzednich artykułach cyklu „Odkrywanie kolei przyszłości”, zamieszczonych na łamach Prac Instytutu Kolejnictwa, omówiono m.in. różne technologie wytwarzania pola magnetycznego wykorzystywanego do zawieszenia lewitujących pojazdów zarówno określanych jako technologia Maglev [3], jak i Hyperloop [4].

W niniejszym artykule przedstawiono działania wykorzystujące technologię lewitacji magnetycznej do skonstruowania pojazdów poruszających się po konwencjonalnych liniach kolejowych, których nawierzchnię torową uzupełniono dodatkowymi elementami. Pokazano rozwiązanie opracowane w USA, a także drogę rozwoju polskiego pomysłu, którego efektem stały się zaawansowane obecnie prace związane z technologią nazwaną przez Polaków systemem MagRail.

2. Prace w USA

W pierwszej dekadzie XXI wieku, badania koncepcyjne nad rozwiązaniem wykorzystującym możliwość poruszania się lewitujących pojazdów po odpowiednio uzupełnionych torowiskach kolei konwencjonalnej podjęto w USA. Innowacyjne rozwiązanie powstało w firmie Applied Levitation LLC. Dzięki pomocy finansowej partnerów przedsięwzięcia z firm LaunchPoint Technologies Inc. i Fastransit Inc. opracowano koncepcję technologii stabilizacji elektromagnetycznej, która pozwoli pojazdom lewitować nad torem magnetycznym bez potrzeby stosowania bocznych szyn do kontrolowania pozycji bocznej. Technologia zawieszenia ze stabilizowanym magnesem trwałym (SPM)

została opatentowana 3 lutego 2004 roku w USA (Patent 6 684 794) [6, 12].

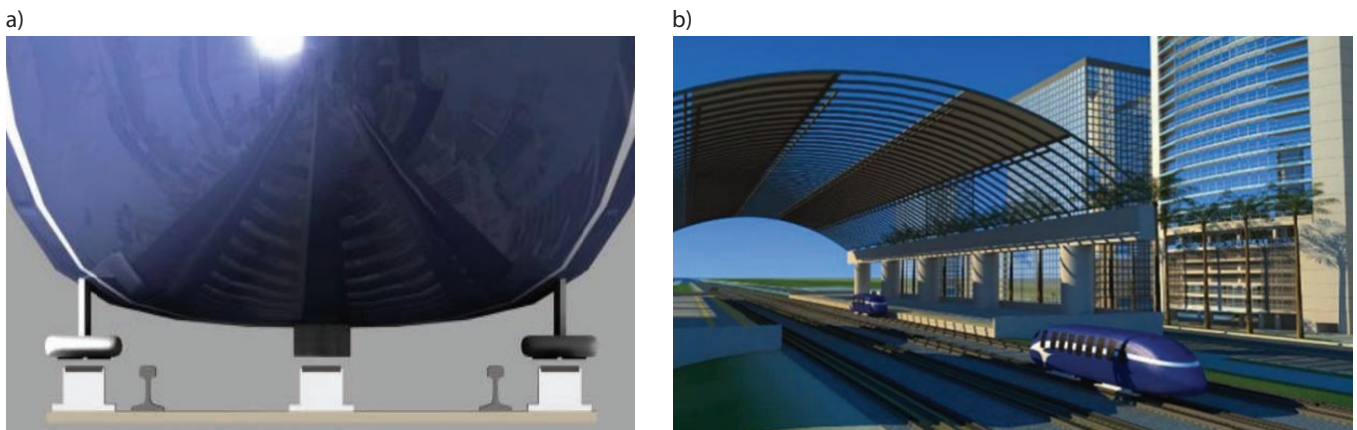
Barierą w szerszym wykorzystaniu kolei konwencjonalnej jest ograniczona możliwość budowy nowych linii. Spowodowało to ukierunkowanie prac na wykorzystanie istniejących powierzchni zajmowanych przez infrastrukturę liniową kolei konwencjonalnej. Warto zauważyć, że sieć kolei USA jest nadal największą na świecie i pomimo skrócenia (w ciągu ostatnich 25 lat) długości linii o 48%, to na koniec 2021 roku wynosiła 148 553,3 km [49].

We wszystkich dotychczasowych rozwiązaniach torów pojazdów technologii Maglev lub Hyperloop, dużym ograniczeniem stały się rozjazdy skomplikowanej konstrukcji, wymagające znacznych ograniczeń prędkości w trakcie eksploatacji i dużej zajętości terenu ze względu na przestrzenną konstrukcję. Zainteresowanie tą technologią wynikało z tego, że może umożliwić stopniową modernizację istniejących konwencjonalnych systemów kolejowych i metra. Rozwiązanie wymagało zainstalowania przewodnic SPM² do zastosowania technologii wytwarzania pola magnetycznego – po jednej przewodnicy magnetycznej na zewnątrz każdej szyny toru i szyny magnetycznej między tokami szyn, umieszczonych na tych samych podkładach, co istniejące tory dla pojazdów szynowych. Dzięki temu pojazdy wykorzystujące technologię SPM mogą poruszać się po tych samych liniach, które wykorzystują konwencjonalne pojazdy szynowe (kolej, metro). Takie rozwiązanie umożliwia stopniowe zastępowanie pojazdów tradycyjnej kolei nowymi konstrukcjami wykorzystującymi lewitację magnetyczną, które kosztują mniej i działają praktycznie bezawaryjnie [7, 8]. Pojazdy wykorzystujące technologię SPM mają stabilną szczelinę lewitacji wynoszącą kilka centymetrów [9].

Zaproponowane rozwiązanie umożliwia pojazdom z technologią SPM na kursowanie po odpowiednio wyposażonych torach linii kolejowych, daje możliwość kursowania lewitującym pojazdom oraz prowadzenia ruchu konwencjonalnych pociągów, a także pozwala na wykorzystywanie istniejącej infrastruktury punktowej do obsługi podróży i ładunków (dworce, przystanki, punkty ładunkowe i bocznice). Schemat zawieszenia pojazdu pokazano na rysunku 1a, wizualizację stacji przedstawiono na rysunku 1b, natomiast wizualizację ruchu pojazdów można zobaczyć na filmie [10].

Dalsze działania związane z rozwojem konstrukcji zmierzającej do budowy prototypów zostały wstrzymane z powodu trudności finansowych. Rozwiązanie lewitującego pojazdu wykorzystującego istniejące linie kolejowe stało się podstawą projektów naukowo-badawczych także w Europie. Na starym kontynencie wiodącą jednostką stała się polska firma Hyper Poland, znana obecnie pod nazwą Nevomo.

² SPM – (ang. *stabilized permanent magnet suspension*) – zawieszenie na magnesach stałych.



Rys. 1. a) Schematyczne przedstawienie zawieszenia rozwiązania SPM Maglev wykorzystujące istniejącą sieć kolei konwencjonalnych [6], b) wizualizacja wykorzystania istniejącej stacji kolei konwencjonalnej [1]

3. Konkursy Elona Muska i pierwsze koncepcje biorących w nich udział Polaków

Środek transportu (zaproponowany w 2013 r. przez Elona Muska oraz jego spółki Tesla i SpaceX), oparty na wcześniejszych koncepcjach wykorzystujących lewitację magnetyczną, ma w przyszłości umożliwić bardzo szybkie i energooszczędne przemieszczanie się na duże odległości.

Rozwiązania wykorzystujące lewitację magnetyczną do ruchu pojazdów są znane od wielu lat, a w różnych rejonach świata wykorzystuje się je do przewozu podróżnych na krótkich dystansach. W wielu krajach, koncepcja wykorzystania tego rozwiązania na znacznie większą skalę (poparta posiadanymi przez Elona Muska środkami finansowymi), zainteresowała osoby profesjonalnie zajmujące się rozwojem technologicznym taboru kolejowego, a także studentów kierunków technicznych różnych uczelni. Zainspirowani ideą szerokiego wykorzystania tej technologii, rozpoczęli tworzenie interdyscyplinarnych zespołów dla rozwoju technologii niekonwencjonalnej kolei.

Spółka SpaceX zainicjowała budowę pierwszego toru w zmniejszonej skali o długości około 1,6 km. Powstał on na potrzeby konkursu pod nazwą Hyperloop Pod, związanego z projektem pojazdu. Firma przeprowadziła pierwszy konkurs w swojej siedzibie w Hawthorne w Kalifornii. Konkurs został ogłoszony w czerwcu 2015 roku, a jego finał miał miejsce w roku 2016 [14]. Do konkursu na projekt pojazdu zgłosiło się ponad 700 zespołów z całego świata. Po wstępnej weryfikacji nadesłanych materiałów, do kolejnego etapu zakwalifikowało się 120 zespołów. W styczniu 2016 roku zespoły te nadesłały swoje szczegółowe projekty do firmy SpaceX. Następnie, zaproszone zespoły

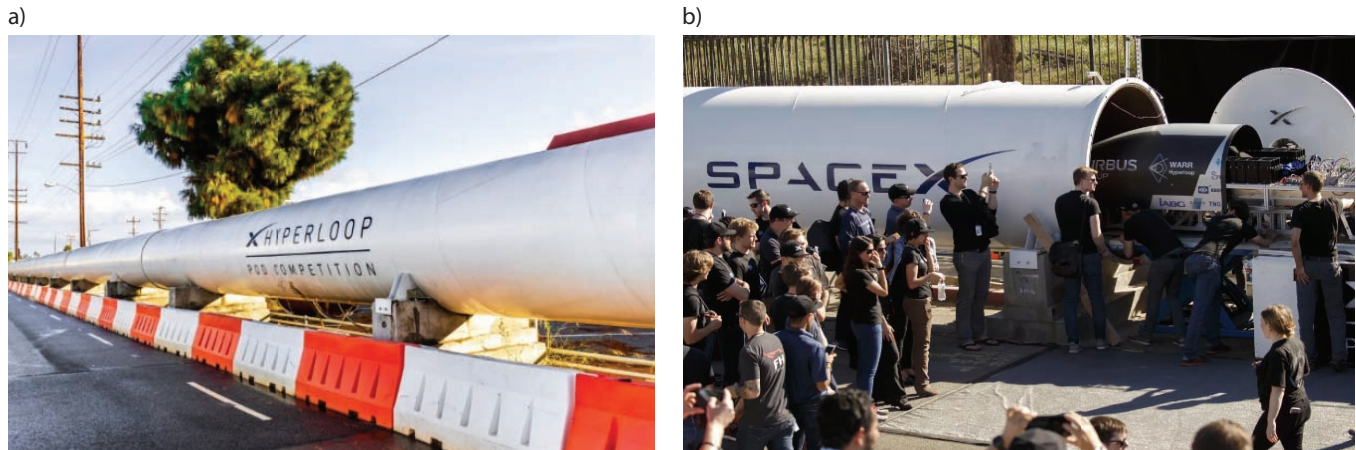
spotkały się na uniwersytecie w Teksasie, gdzie wybrano najciekawsze projekty. Zwycięzcą konkursu został Massachusetts Institute of Technology. University of Washington zdobył wyróżnienie w zakresie bezpieczeństwa, a Delft University, który uplasował się na drugim miejscu, nagrodę za „wyróżniającą się innowację” [14].

Kolejne edycje konkursu odbyły się ponownie w roku 2016 i w latach 2018–2019. W drugiej edycji konkursu brała udział między innymi spółka Hyper Poland – polski start-up³, pierwszy w centralnej Europie, który rozpoczął opracowywanie technologii dla nowoczesnej kolei wykorzystującej lewitację magnetyczną. Spółka powstała w 2016 roku na Politechnice Warszawskiej, a dokładnie na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa (MEL). Firma od razu wytyczyła sobie ambitny cel – zgłosiła się do wspomnianego konkursu „Hyperloop Pod”, czyli konkursu na kapsułę systemu Hyperloop. Przy pomocy Politechniki Wrocławskiej i prof. Janusza Piechny stworzono pierwszą koncepcję polskiego pojazdu kolei magnetycznej [5]. Start-up zakwalifikował się do finału, a jego projekt zebrał bardzo pozytywne recenzje.

Uczestnicy trzeciej edycji konkursu, w której brali udział także Polacy, mieli za zadanie skonstruowanie możliwie najszybszego środka transportu, który pokona zbudowany do tego celu tor doświadczalny. Najlepszymi okazali się niemieccy studenci z Technicznego Uniwersytetu w Monachium (WARR Hyperloop). Na rysunku 2 pokazano fragment doświadczalnego toru rurowego w Kalifornii oraz ładowanie pojazdu przez zwycięski zespół.

Ważnym czynnikiem dalszych rywalizacji okazał się wybór rzeczywistych tras, które jako pierwsze powinny doczekać się wdrożenia projektu Hyperloop i w tym celu firma Hyperloop One ogłosiła konkurs o zasięgu światowym na

³ Start-up, także startup – nowo utworzone przedsiębiorstwo lub tymczasowa organizacja poszukująca modelu biznesowego, który zapewniłby jej zyskowy rozwój [15].



Rys. 2. a) Fragment toru spółki SpaceX w Hawthorne [18], b) zespół studentów z Niemiec umieszcza w tunelu swój pojazd podczas zawodów Hyperloop Pod w 2017 roku, organizowanych przez SpaceX w Hawthorne [17]

opracowanie modelu rozwiązań pierwszych tras, opartych na technologii Hyperloop.

Konkurs okazał się zwycięski dla następujących tras:

- KANADA: Toronto – Montreal: 640 km, czas przejazdu 39 min.,
- USA: Cheyenne – Denver – Pueblo: 580km, czas nieznanym,
- USA: Miami – Orlando: 414 km, 25 min.,
- USA: Dallas – Laredo – Houston: 1030 km, czas nieznanym,
- USA: Chicago – Pittsburgh: 785 km, 47 min.,
- MEKSYK: Mexico City – Guadalajara: 532 km, 38 min.,
- UK: Edinburg – London: 666 km, 50 min.,
- UK: Glasgow – Liverpool: 545 km, 47 min.,
- INDIE: Bengaluru – Chennai: 334 km, 23 min.,
- INDIE: Mumbai – Chennai: 1102 km, 63 min.

Polski zespół z firmy Hyper Poland przedstawił projekt z modelem trasy Warszawa – Wrocław, pokonywanej przez 37 min. Projekt zajął w konkursie jedno z 35 miejsc półfinałowych. Zajęcie takiego miejsca w światowych zawodach było bardzo dużym wyróżnieniem dla Polski. W miarę rozwoju firmy Hyper Poland, zespół pozyskał nowych ekspertów z wielu branż. W chwili opracowywania projektu, tworzyło go ponad 30 osób. W skład projektu stworzonego przez spółkę Hyper Poland wchodziły opracowania i projekty [5]:

- kompresora, który umożliwi znacznie zwiększyć prędkość pojazdu,
- dyszy wylotowej, pozwalającej uzyskać dodatkową siłę ciągu,
- pojazdu pasażerskiego, który zapewnia bezpieczeństwo pasażerów także w sytuacjach awaryjnych,
- dworca pasażerskiego zaprojektowanego tak, aby użytkownicy mogli intuicyjnie odnajdować drogę do celu,
- dworca towarowego, pozwalającego na przyspieszenie czynności procesu załadunku i przewozu ładunków,
- modułowej konstrukcji umożliwiającej kursowanie pojazdów nawet co 1 minutę,
- zaplecza technicznego, pozwalającego na sprawną naprawę oraz konserwację pojazdów,

- rurowej arterii, gwarantującej bezpieczeństwo kursowania pojazdów oraz minimalizującej ryzyko uszkodzenia elementów konstrukcyjnych.

Na uwagę zasługuje istotny szczegół, na który zwrócili uwagę przedstawiciele firmy Hyper Poland. Doszli do wniosku, że do rozwiązania preferowanego przez Elona Muska należy podchodzić stopniowo. W przeciwieństwie do innych światowych firm, Hyper Poland opracowało trójstopniowy sposób na zastosowanie lewitacji magnetycznej technologii Hyperloop. Rozwiązanie techniczne pojazdów wraz z wymaganą infrastrukturą w każdym etapie otrzymało swoją oryginalną nazwę [16]:

- **MagRail** – pierwszy etap, to otwarta platforma logistyczna. Prędkość pojazdów MagRail powinna wynosić 300 km/h lub 550 km/h – w przypadku wykorzystywania konwencjonalnych linii kolei dużych prędkości. Zakłada się w nim utrzymanie równoległego funkcjonowania na wspólnych liniach kolejowych pojazdów MagRail i pociągów konwencjonalnych. Firma zakłada wykorzystanie istniejących korytarzy kolejowych. W tym etapie będzie możliwe uruchomienie niekonwencjonalnego systemu pasażerskiego na wybranych trasach.
- **HyperRail** – drugi etap, to próżniowy system pasażerski i towarowy. Prędkość ma wynosić 600 km/h lub 1000 km/h w przypadku wykorzystywania konwencjonalnych linii kolei dużych prędkości. Podobnie jak w pierwszym etapie, mają być wykorzystane istniejące korytarze transportowe.
- **Hyperloop** – trzeci etap, to próżniowy system pasażerski. Planowana prędkość ma wynieść 1200 km/h. W tym etapie mają powstać nowe korytarze transportowe, oparte na rurowych arteriach dla taboru przewozowego.

Idea etapowego rozwoju systemu kolei przyszłości przedstawionego przez Polaków sprawia, że polskie rozwiązanie zaczyna pozyskiwać coraz więcej zagranicznych zwolenników, a z uwagi na realność realizacji koncepcji

– przychylność instytucji finansowych. Sprawia to, że wdrożenie tej technologii może się stać faktem w perspektywie do 2030 roku.

W 2017 roku spółka Hyper Poland została nagrodzona w konkursie Build Earth Live: Hyperloop, który odbył się w Dubaju [14]. Firma uzyskała nagrodę za system BIM (*Building Information Modeling*) służący do modelowania informacji w automatyce budowlanej. Zespół Hyper Poland współpracujący ze specjalistami z USA (*Wheeler Kearns Architects*) i ZEA (*Asem Zabin z iTech Management Consultancy*) otrzymał nagrodę za najbardziej innowacyjne podejście do technologii projektowania wykorzystującej system BIM. Głównym celem było zaprojektowanie w ciągu 48 godzin towarowych i pasażerskich pojazdów Hyperloop, tuneli oraz trzech dworców na trasie między Dubajem a Fu-dżajrą. Spośród 65 zespołów pochodzących z 29 krajów, do ścisłego finału zakwalifikowało się 6 drużyn. Oprócz Hyper Poland, w finale znalazła się Systra, jedna z największych na świecie firm zajmujących się projektowaniem infrastruktury transportowej oraz zwycięzca zawodów SpaceX Hyperloop POD w kategorii non-student team: rLoop. Zespół Hyper Poland został wyróżniony za spójną inżyniersko i architektonicznie koncepcję oraz innowacyjne podejście do procesu projektowania.

Umiejętność wykorzystywania systemu BIM jest szczególnie istotna dla przyszłej realizacji wszelkich inwestycji związanych z wdrożeniem nowych technologii w kolejnictwie. O tym systemie, który już obecnie staje się powszechnie używany, pisano w artykule zamieszczonym w Pracach Instytutu Kolejnictwa [2].

W roku 2018 firma Sistra pokonała konkurencję z USA, Izraela i Niemiec, kiedy zakwalifikowała się do konkursu organizowanego przez Renfe (koleje hiszpańskie) i firmę

Telefonica na rozwiązanie kolei niekonwencjonalnej. W następnym roku polski start-up został uznany przez jury złożone z przedstawicieli Parlamentu Europejskiego, Komisji Europejskiej oraz firmę Boston Consulting Group za jeden z pięćdziesięciu najlepszych start-upów w sektorze transportowym [14]. Także w 2018 roku firma Hyper Poland sfinalizowała opracowania swoich rozwiązań silnika, układu napędowego i zawieszenia tworzonego pojazdu. Opracowana technologia uzyskała ochronę patentową.

4. Rozwój koncepcji technologii MagRail

W 2019 roku, zgodnie z wcześniejszymi planami, spółka Nevomo zorganizowała w Warszawie międzynarodową prezentację projektu pojazdu MagRail. Tor wraz z pojazdem został wykonany w skali 1:5. Na testowym torze magnetycznym o długości 48 m było możliwe przetestowanie prototypu pojazdu w ruchu. Pojazd wraz z torem pokazano na rysunku 3, a film z prezentacji [34].

Oprócz pokazu makiety pojazdu spółka zorganizowała panele dyskusyjne, podczas których eksperci z zakresu finansowania nowatorskich technologii, logistyki i kolejnictwa dyskutowali na temat wdrażania zaprezentowanej technologii w kolejnictwie. Wśród ekspertów zaproszonych na prezentację znaleźli się między innymi specjaliści z Indii, Izraela, portów morskich, a także przedstawiciele spółek z sektora kolejowego z Włoch, Niemiec i Holandii.

Spotkaniu patronowała spółka Microsoft, firma Seedrs⁴ oraz spółka TME – partner strategiczny start-upu. Dzięki przeprowadzonym próbom i testom było możliwe zweryfikowanie założeń konstrukcyjnych i funkcjonalnych pojazdu. Wpłynęło to również na ocenę założeń projektowych



Rys. 3. a) Model pojazdu MagRail [20], b) przejazd pojazdu MagRail na torze próbnym [21]

⁴ Seedrs to firma zajmująca się finansowaniem społecznościowym online, z siedzibą w Tech City we wschodnim Londynie, założona w 2009 roku. Od 2022 roku jest spółką zależną od amerykańskiej firmy Republic zajmującej się finansowaniem społecznościowym [49].

poszczególnych elementów finalnego toru testowego w pełnej skali.

Debata, poświęcona rozwiązaniu MagRail na Kongresie Infrastruktury Polskiej, przyniosła wiele ważnych informacji, wzbudzając duże zainteresowanie słuchaczy. Entuzjastą tej technologii był m.in. ówczesny dyrektor Instytutu Kolejnictwa dr inż. Andrzej Żurkowski. Wskazywał na możliwość wykorzystania opanowanych już technologii ruchu pojazdów bezzałogowych, czy doświadczeń kolejowych w zakresie standaryzacji, którą zajmuje się UIC. (...) *W Żmigrodzie mamy sporo wolnej przestrzeni na ewentualny tor doświadczalny. Na miejscu jest już niezbędne zaplecze socjalne – zauważył. Zespół Hyper Poland oraz władze Instytutu podpisały w tej sprawie list intencyjny (...) [23].* Plan budowy systemu MagRail w Polsce zakładał wówczas rozpoczęcie w drugiej połowie 2020 roku budowy toru testowego, który miał być zbudowany na terenie Okręgu Doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie [22].

Nie zabrakło też sceptyków. (...) *Bardziej sceptyczne stanowisko zajął profesor Andrzej Chudzikiewicz z Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej. – Czy Hyperloop powinien być alternatywą dla istniejących segmentów transportu? Trudno powiedzieć. One rozwijają się od dłuższego czasu i są przewidywalne, on – nie. Na razie jego praktyczne wykorzystanie pozostaje w sferze marzeń – stwierdził. Ewentualne zastąpienie pociągów dużych prędkości przez kapsuły w tunelu z rozrzedzonym powietrzem może, według profesora, nastąpić najwcześniej w perspektywie 30–40 lat. (...) Wprawdzie nauka powinna zawsze popierać wszelkie inicjatywy rozwoju, trzeba jednak być realistą. Dlatego, szukając możliwości rozwoju w najbliższym czasie innowacyjnych środków transportu, stawiałbym raczej na drony – argumentował prof. Chudzikiewicz (...) [23].* Warto przypomnieć, że przed dwudziestoma laty podstawą łączności był telefon stacjonarny, a pojęcie sztucznej inteligencji występowało w powieściach science fiction.

Budowa pełnowymiarowego demonstratora technologii wraz z systemem testowym miała być możliwa dzięki

włączeniu w proces finansowania Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR). Centrum przeznaczyło 16,5 miliona złotych w postaci grantu na rozwój technologii kolei magnetycznej opracowanej przez Hyper Poland. Finansowania na pewno nie zabraknie. Rządowi oraz wielu firmom finansowym zależy na tym, aby transport w Polsce osiągnął wyższy poziom. Zakłada się, że od sprawnego transportu w dużej mierze zależy rozwój kraju. W projekt Hyper Poland zaangażowano wielu światowej klasy ekspertów, którzy pracowali w krajach azjatyckich, gdzie m.in. budowano superszybką kolej magnetyczną Maglev. Swoje doświadczenia przeniosą teraz na polski grunt [30].

Zainteresowanie technologią systemu MagRail wynika w dużym stopniu z możliwości wykorzystywania istniejących korytarzy transportowych kolei konwencjonalnych i ich infrastruktury (linie kolejowe, stacje i dworce w centrach miast). Pociągi konwencjonalne oraz pojazdy wykorzystujące lewitację magnetyczną mogą używać wymiennie tych samych torów, co upraszcza integrację systemu z istniejącymi liniami kolejowymi. Nie ma konieczności budowy nowych linii, z czym są zawsze związane liczne wyłączenia, ani rezygnowania z eksploatowanego taboru kolejowego. Pojazdy systemu MagRail będą osiągały niemalże dwa razy większą prędkość na istniejących liniach niż zwykłe pociągi. Tam gdzie maksymalna dopuszczalna prędkość wynosi 160 km/h, pojazdy MagRail będą mogły kursować z prędkością do 300 km/h, a na trasach kolei dużych prędkości – nawet do 415 km/h. Tak więc system Magrail jest brakującym ogniwem między koleją konwencjonalną a Hyperloopem (rys. 4). Osiąganie takich prędkości eksploatacyjnych, w połączeniu z wykorzystaniem istniejącej infrastruktury w centrach miast, pozwoli kolei konkurować z transportem lotniczym na trasach regionalnych, przyczyniając się tym samym do redukcji emisji CO₂ w sektorze transportowym [23].

Kreowana w Polsce technologia systemu MagRail wykorzystuje silnik liniowy, którego elementem jest trzecia szyna, zamontowana w osi toru, służąca do napędu



Rys. 4. Pojazd systemu MagRail: a) na trasie [24], b) na istniejącym dworcu kolejowym [27]

oraz hamowania pojazdów. Szyny lewitacyjne będą służyły do unoszenia pojazdu nad powierzchnią oraz stabilizacji bocznej pojazdu. Z informacji dotyczących systemów Transrapid i Maglev, zamieszczonych w Pracach Instytutu Kolejnictwa [3] wynika, że ich technologie wymagają budowy ciągów transportowych od podstaw, z czym wiąże się wysokie koszty i długi czas realizacji inwestycji. Ponadto są to tzw. systemy aktywne, co oznacza, że do uzyskania lewitacji jest niezbędne bezpośrednie dostarczenie energii do elektromagnesów zarówno w pojeździe, jak i w torze. Technologię systemu MagRail oparto na rozwiązaniu pasywnym, w którym lewitacja jest efektem ruchu pojazdu. Pociąg przy pewnej prędkości samoistnie zaczyna „odpychać się” od toru [24].

W 2020 roku spółka Hyper Poland zmieniła nazwę na Nevomo. W 2021 roku spółka Nevomo wspólnie z IDOM⁵ wykonała studium wykonalności dla technologii systemu MagRail na tzw. linii Y (*Preliminary study of MagRail Implementation*), czyli pierwszej polskiej linii kolei dużych prędkości między Warszawą, Łodzią, Poznaniem i Wrocławiem. W 2014 roku przebieg linii zgłoszono do Unii Europejskiej. Z opracowania wynika, że korzyści z wdrożenia rozwiązania byłyby znaczące – zarówno pod względem gospodarczym, jak i społecznym. W studium porównano dwa warianty:

- scenariusz podstawowy, który zakładał budowę nowej linii tylko dla pociągów konwencjonalnych, poruszających się z prędkością do 300–350 km/h oraz
- scenariusz inwestycyjny oparty na technologii systemu MagRail, który umożliwi osiągnięcie prędkości do 550 km/h.

Jak wskazano w opracowaniu [13], korzyści ekonomiczne z wdrożenia rozwiązania scenariusza inwestycyjnego byłyby znaczące. Całkowity koszt inwestycji w wysokości 57,1 mld zł (12,6 mld euro) obejmowałyby 33,8 mld zł (7,5 mld euro) na podstawową infrastrukturę KDP oraz dodatkowe 23,3 mld zł (5,1 mld euro) na komponenty MagRail. Jak wynika z opracowania, inwestycja przyniosłaby zwrot poniesionych kosztów w ciągu 30 lat. Łączne korzyści ekonomiczne dla społeczeństwa wyniosłyby 19,6 mld zł (4,3 mld euro). Współczynnik korzyści i kosztów dla tej inwestycji wyniósłby 1,42. Ekonomiczna wartość bieżąca netto (ENPV) projektu osiągnęłaby 5,8 mld zł (1,3 mld euro), co daje ekonomiczną stopę zwrotu (ERR) na poziomie 4,01% [13]. Badanie, na podstawie którego zostało opracowane studium, było zgodne z wytycznymi do analizy kosztów i korzyści projektów inwestycyjnych opublikowanych przez Komisję Europejską w 2015 roku.

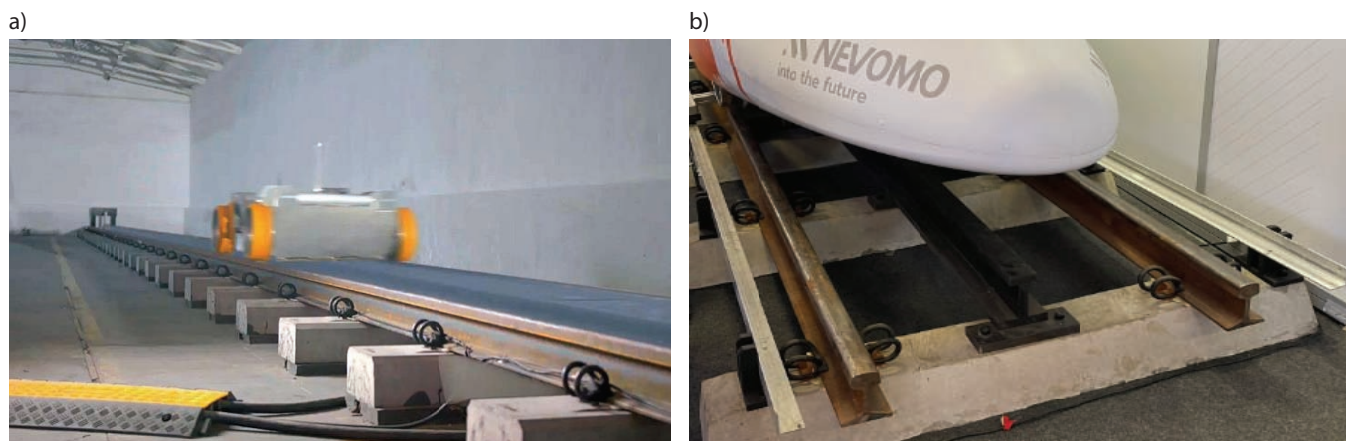
Niekonwencjonalna kolej dużej prędkości przyciągnęłaby podróźnych dotychczas korzystających z drogowego i krótkodystansowego transportu lotniczego. Byłoby to związane ze zmniejszeniem kosztów wypadków, redukcji emisji CO₂, a także poziomu hałasu. Całkowity efekt ekonomiczny w tym zakresie wyniósłby nawet 2,5 mld zł (0,6 mld euro), a ilość emisji CO₂ zmniejszyłaby się o co najmniej 2,1 mln ton w stosunku do wariantu z konwencjonalną linią KDP [13]. Jak wskazano w studium, istotną kwestią był wpływ technologii systemu MagRail na elastyczność regulacji dostaw transportowych. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że rozwiązanie ma wiele zalet, a także potencjał do przekształcenia całego sektora przez zwiększoną prędkość przejazdów, zmniejszone emisje zanieczyszczeń przez sektor transportu lotniczego i drogowego, niskie koszty i wysoką dostępność. Zaletą technologii systemu MagRail, której nie omówiono w dyskusjach, są znacznie częstsze przewozy pasażerów i zwiększona zdolność operacyjna przewoźników kolejowych. Przyspieszenia i opóźnienia oraz system sygnalizacji powinny umożliwić uruchamianie pojazdów z dużymi częstotliwościami, nawet co kilka minut [13].

Technologia systemu MagRail wzbudza zainteresowanie w różnych krajach Europy. Firma nawiązała niedawno współpracę badawczą z Uniwersytetem Nauk Stosowanych Emden/Leer w Niemczech oraz z EUREF-Campus w Düsseldorfie, czyli drugim po Berlinie kampusem innowacji w Niemczech. Zrzesza on firmy, naukowców oraz start-upy działające w obszarach nowoczesnych technologii dla energii, mobilności oraz zrównoważonego rozwoju. Firma Nevomo otworzyła również biuro w Szwajcarii. Ma ono zapewnić obsługę potencjalnych klientów nie tylko w tym kraju, ale także we Francji i we Włoszech [21].

W 2021 roku firma Nevomo przeprowadziła kompleksowe testy silnika liniowego drugiej generacji na torze o rozstawie 1000 mm i długości 45 metrów, co przedstawia rysunek 5 oraz film z testów [38].

Przejazdy podczas badań odbywały się z prędkością 36 km/h. W trakcie przejazdów przetestowano oprogramowanie Power Electronics i elementy sprzętowe energoelektroniki mocy, w tym zaawansowane algorytmy sterowania. W wyniku testów stwierdzono, że dotychczasowe oprogramowanie pozwala kontrolować lokalizację pojazdu z dokładnością do kilku milimetrów. W swoim komunikacie firma Nevomo poinformowała również, że (...) *przeprowadzono testy układu przetwornika dwufalowego, algorytmów sterowania napędem z prędkością i komunikacją zwrotną (sprzężenie radiowe), sprawdzono odbiór danych z dwóch źródeł pomiarowych oraz działanie dwukierunkowej*

⁵ IDOM (*Ingeniería y Dirección de Obras y Montaje*) – Globalna firma wywodząca się z Hiszpanii, operująca w obszarze usług inżynierskich i architektonicznych oraz studiów wykonalności z ponad 60-letnim doświadczeniem. IDOM zatrudnia na całym świecie blisko 3 tysiące osób, działa na 5 kontynentach i ma na swoim koncie udział w ponad 13 tysiącach projektów. W Polsce jest znana m.in. z przeprowadzenia studium wykonalności budowy kolei dużych prędkości, mającej połączyć Warszawę, Poznań, Wrocław oraz Łódź.



Rys. 5. a) Platforma lewitacyjna z silnikiem liniowym na torze badawczym [36], b) przekrój toru o prześwicie 1000 mm [37]

komunikacji radiowej. Wyniki są niezwykle zadowolające i udało nam się połączyć je z wynikami badań zawieszenia wykonywanych na platformie lewitacyjnej (...) [36]. Wyniki badań umożliwiły zaprojektowanie wózka i toru testowego o prześwicie 1435 mm.

W 2021 roku firma Nevomo nawiązała współpracę ze spółką technologiczną Rete Ferroviaria Italiana (RFI), należąca do grupy Ferrovie dello Stato Italiane, odpowiedzialną za zarządzanie włoską infrastrukturą kolejową. Spółki będą wspólnie ubiegały się o środki z Unii Europejskiej potrzebne na sfinansowanie pilotażowego wdrożenia rozwiązania MagRail na wykonanym do tego celu torze testowym należącym do RFI w Bolonii San Donato. W ramach umowy o współpracy firmy dokonają analizy włoskiej sieci kolejowej pod względem technicznej i ekonomicznej wykonalności wdrożenia MagRail na wybranych trasach, a także przetestowania jej w celu ułatwienia integracji z konwencjonalnym systemem kolejowym. Będzie to ostatni etap testów, który poprzedzi procesy certyfikacji i homologacji niezbędne do komercyjnego wdrożenia technologii [26]. Polska firma Nevomo ocenia, że włoska współpraca to istotny krok w stronę wprowadzenia technologii systemu MagRail na europejski rynek. Szacuje się nawet wzrost prędkości jazdy pojazdów MagRail o 75% w stosunku do klasycznych pociągów, bez konieczności budowy nowej infrastruktury [39].

Omawiane rozwiązanie może znaleźć zastosowanie także do transportu ładunków. Zwiększona prędkość przewozu ładunków stwarza nowe możliwości przewozu towarów po konwencjonalnych liniach kolejowych, zapewniając dostawę przesyłek do odbiorców nawet tego samego dnia. Rozwój szybkiego transportu ładunków może przyczynić się do wzrostu gospodarczego, szczególnie w krajach słabo rozwiniętych, w których technologia MagRail może zrewolucjonizować przestarzałą infrastrukturę kolejową przy stosunkowo niewielkich nakładach finansowych.

Technologia może spowodować zwiększenie udziału transportu kolejowego w przewozach ładunków. Przywrócenie konkurencyjności istniejących linii kolejowych przez modernizację istniejącej infrastruktury konwencjonalnej

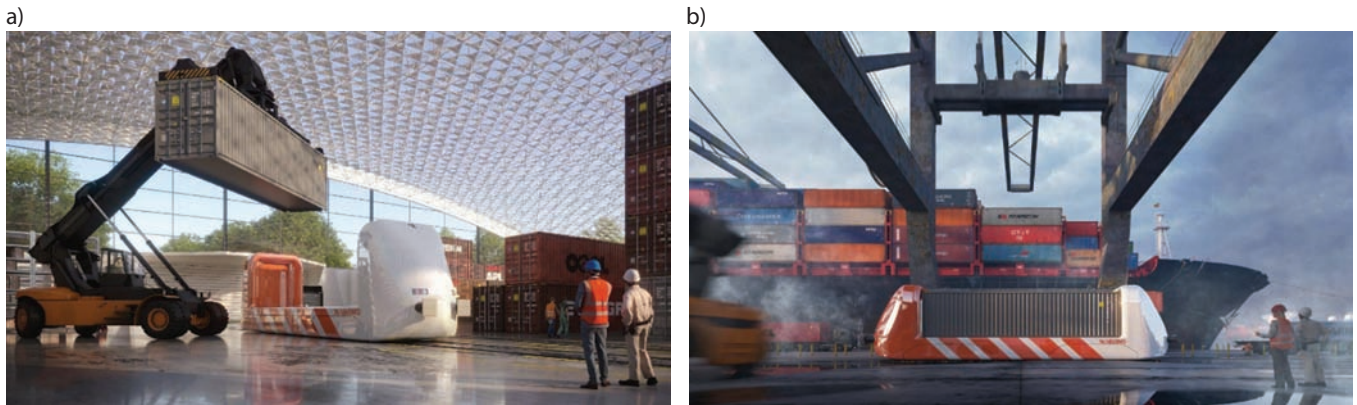
do standardu kolei dużych prędkości i wysokiej częstotliwości przejazdów, doprowadzi do przejścia znacznej części przewozów towarowych z transportu drogowego i lotniczego, co jest niezmiernie trudne przy obecnych technologiach konwencjonalnych stosowanych przez kolej. Obecnie transport drogowy opanował 75% rynku transportowego. Większy udział towarowych przewozów kolejowych, to lepsza sytuacja makroekonomiczna i ważne rozwiązanie dla europejskiego wzrostu transportu, zgodnego z ochroną środowiska naturalnego [24].

Na początku 2022 roku firma Nevomo zawarła umowę o partnerstwie w zakresie rozwoju systemu MagRail z jedną z największych niemieckich firm konsultingowych Dornier Consulting International, stającą się kolejnym strategicznym partnerem polskiej firmy. Firma niemiecka jest zainteresowana unikalną technologią pozwalającą nadać istniejącym liniom kolejowym nowe znaczenie w zakresie konkurencyjności przewozów, co przy doświadczeniach uzyskanych na Bliskim Wschodzie pomoże zabiegać o nowe rynki dla systemu [40].

Technologia systemu MagRail została wysoko oceniona przez głównych graczy w europejskim transporcie towarów. MagRail zapewnia również możliwość jazdy po torach nieelektryfikowanych, a także możliwość obsługi infrastruktury punktowej, takiej jak terminale, centra logistyczne i porty morskie, którą obsługują manewrowe lokomotywy spalinowe. Wizualizację wykorzystania technologii MagRail w transporcie ładunków przedstawiono na rysunku 6.

5. Tor testowy w Nowej Sarzynie

W 2021 roku firma Nevomo zawarła umowę ze spółką CIECH Sarzyna należąca do Grupy CIECH. Na mocy umowy, na terenie spółki położonym w województwie podkarpackim, wybudowano najdłuższy w Europie tor o długości 750 m i prześwicie 1435 mm. Tor posłuży do testowania napędu liniowego oraz pasywnej lewitacji magnetycznej, a także systemów energoelektronicznych do zasilania



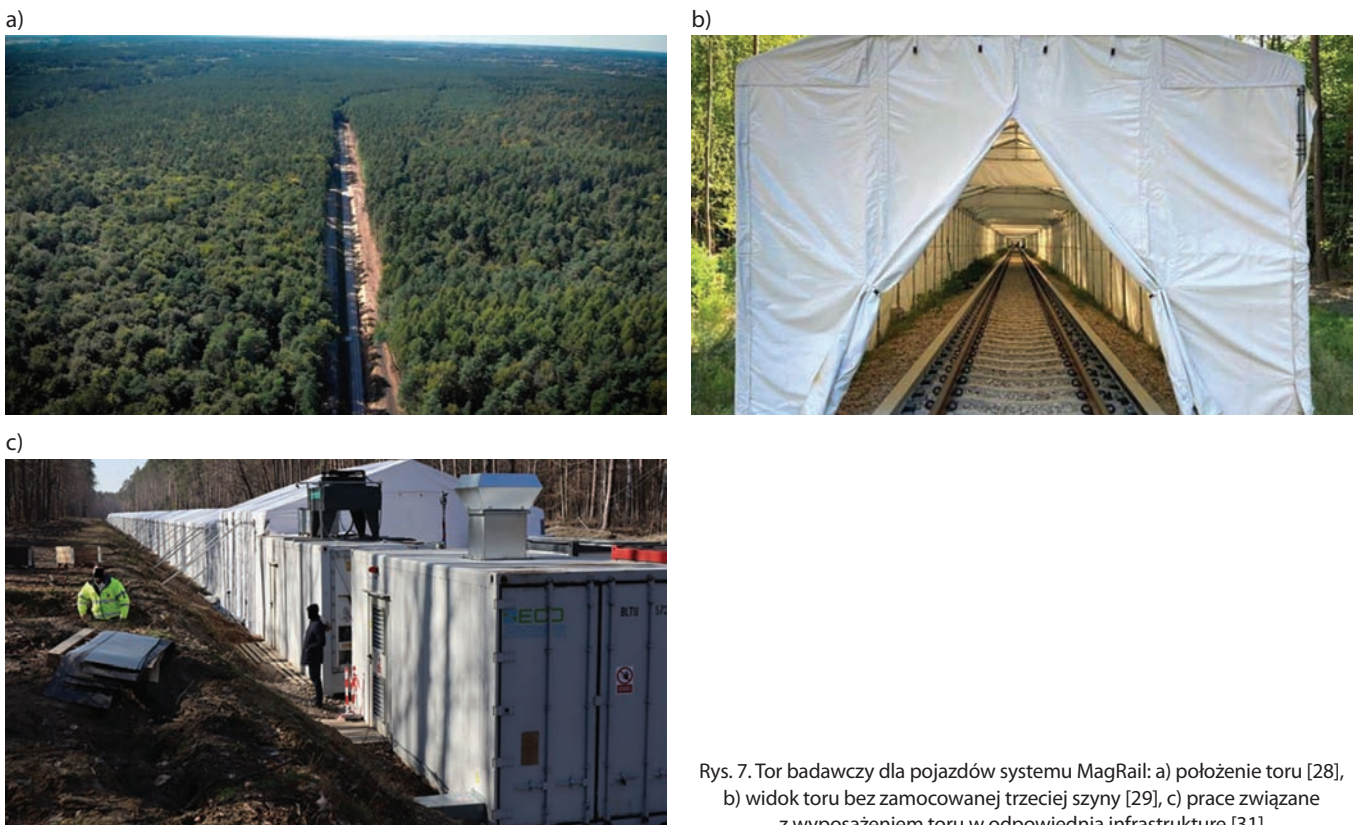
Rys. 6. Wizualizacje pojazdu systemu MagRail do przewozu ładunków: a) załadunek kontenera 40-stopowego [32], b) kontener załadowany na pojazd systemu MagRail w Duisburgu [33]

i sterowania wielosegmentowym silnikiem liniowym. Na potrzeby rozwoju badań przekazano sąsiadującą z nim infrastrukturę oraz m.in. budynek biurowy i magazyn znajdujący się na terenie gminy Nowa Sarzyna. Prace rozpoczęto latem 2021 roku [25, 41] i zakończono je latem 2023 roku.

Budowa toru testowego w skali 1:1, to kolejny kamień milowy w rozwoju technologii MagRail. Założono, że pomyślne przeprowadzenie zaplanowanych testów otwoczy drogę do pilotażowych wdrożeń technologii systemu, które są planowane do 2024 roku. Zakłada się, że od strony technicznej, technologia systemu Magrail już w 2025 roku będzie w pełni gotowa do wprowadzenia na rynek [41].

W pierwszym kwartale 2022 roku spółka Nevomo zakończyła budowę infrastruktury torowej na najdłuższym w Europie torze do testowania pasywnej lewitacji magnetycznej systemu MagRail, pozwalającym na lewitowanie pojazdów kolejowych z prędkością do 160 km/h. Tor badawczy pokazano na rysunku 7.

Na początku marca 2022 roku rozpoczęto instalację infrastruktury niezbędnej do lewitacji magnetycznej, tj. silnika liniowego między szynami, bieżni lewitacyjno-stabilizującej na zewnętrznym obszarze szyn i układu zasilania. Wraz z ukończeniem budowy toru, do Nowej Sarzyny dostarczono również pierwszy, naturalnej wielkości pojazd testowy,



Rys. 7. Tor badawczy dla pojazdów systemu MagRail: a) położenie toru [28], b) widok toru bez zamocowanej trzeciej szyny [29], c) prace związane z wyposażeniem toru w odpowiednią infrastrukturę [31]

wyposażony we wszystkie niezbędne komponenty, pozwalające na rozpoczęcie testów. Zakończono również prace nad zasilaniem systemu. Tor testowy w Nowej Sarzynie współfinansowała Unia Europejska ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Inteligentny Rozwój. Projekt był realizowany w ramach grantu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju o nazwie Szybka Ścieżka [29].

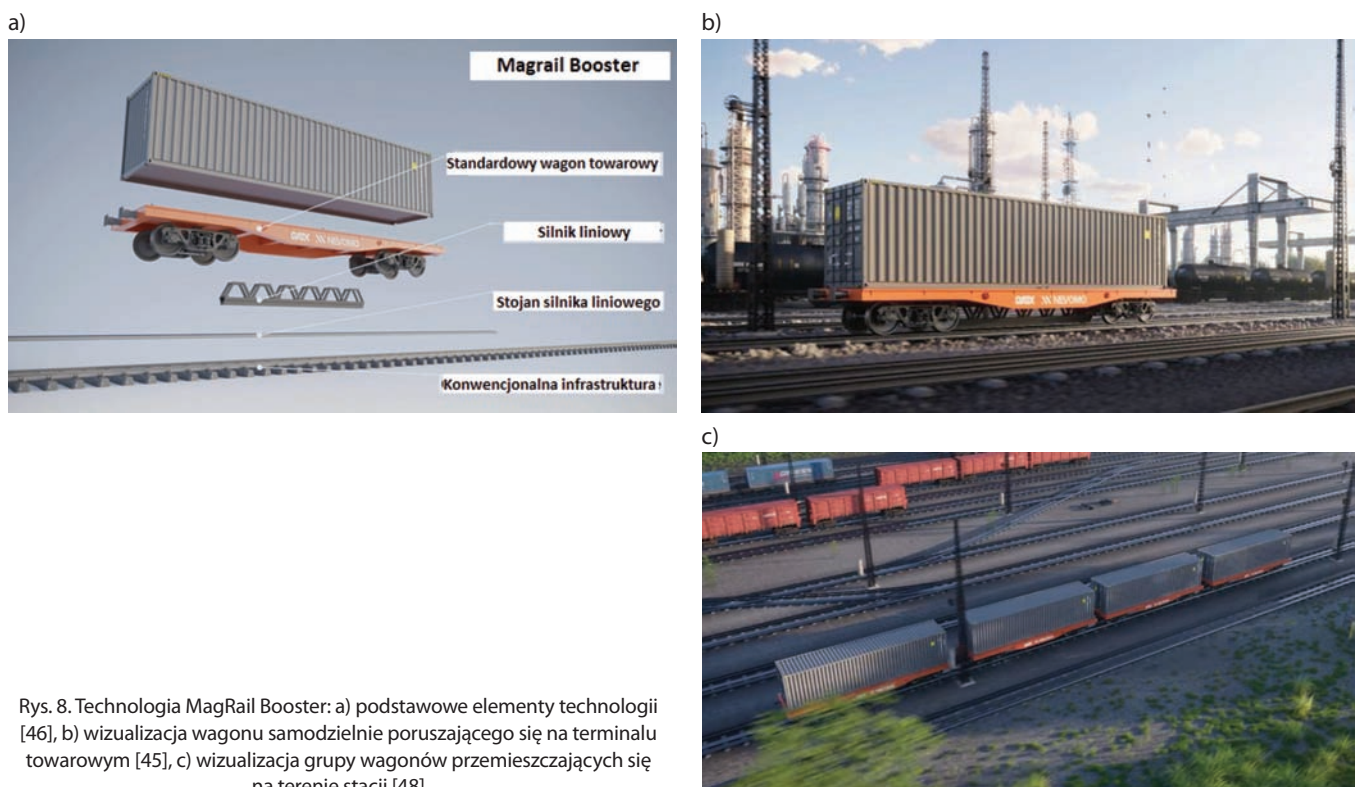
W maju 2022 roku spółka Nevomo i niemiecki Duisport, właściciel i operator portu Duisburg, największego na świecie portu śródlądowego, podpisały umowę o współpracy w celu zbadania możliwości rozbudowy przepustowości Duisportu i wdrożenia technologii MagRail w sieci transportowej portu [35].

W marcu 2023 roku francuska państwowa spółka kolejowa SNCF i firma Nevomo podpisały w Paryżu umowę o współpracy w celu oceny korzyści, płynących z zastosowania technologii systemu MagRail na francuskiej sieci kolejowej, do zwiększenia wydajności i przepustowości istniejących linii. Wstępnie założono, że to rozwiązanie może wspierać strategię SNCF zarówno w rozwoju przewozów pasażerskich, jak i towarowych. Ocena korzyści będzie obejmowała trzy obszary [42], tj.:

- zwiększenie wydajności pociągów towarowych w celu uzyskania wyższych limitów załadunku i większej przepustowości na liniach towarowych,
- zwiększenie przepustowości na zatłoczonych miejskich liniach pasażerskich,
- wykorzystanie technologii systemu MagRail jako alternatywnego napędu dla linii lokalnych, w połączeniu z lekkimi pojazdami pasażerskimi.

Te założenia są częścią działań kolei francuskich w zakresie poszukiwań innowacyjnych rozwiązań i technologii oraz ich naukowych ocen dla kolei przyszłości. Zdaniem SNCF, wprowadzenie technologii systemu MagRail do istniejącej infrastruktury kolejowej umożliwi jej optymalną modernizację, co może przyspieszyć proces uznania kolei jako preferowanego, ekologicznego, szybkiego, wydajnego oraz interoperacyjnego środka transportu XXI wieku. Jednocześnie zwrócono uwagę, że technologia systemu MagRail powinna umożliwić stopniowe ulepszanie istniejących linii kolejowych. Rozwiązanie będące przełomem technologicznym, może doprowadzić do nowego traktowania tej gałęzi transportu, dzięki czemu koleje mogą w końcu znacząco zwiększyć swój udział w rynku i zmniejszyć emisję CO₂ w transporcie [42].

Kolejnym krokiem w rozwoju systemu MagRail w Europie, było nawiązanie w 2023 roku współpracy z firmą GATX Rail Europe i przedstawienie nowego produktu – MagRail Booster. To innowacyjne technologicznie i eksploatacyjnie rozwiązanie dotyczy zainstalowania na konwencjonalnych wagonach towarowych, dostarczonych przez GATX Rail Europe, napędu z silnikiem liniowym (tzw. komponenty Booster), a następnie przetestowania ich na infrastrukturze kolejowej wyposażonej w urządzenia przytorowe związane z systemem. Komponenty te umożliwiają szybkie zmodernizowanie istniejących wagonów kolejowych przez doposażenie ich w napęd z silnikiem liniowym. Nowe rozwiązanie pokazano na rysunku 8 oraz filmie [44].



Rys. 8. Technologia MagRail Booster: a) podstawowe elementy technologii [46], b) wizualizacja wagonu samodzielnie poruszającego się na terminalu towarowym [45], c) wizualizacja grupy wagonów przemieszczających się na terenie stacji [48]

Atrakcyjność technologii MagRail Booster firmy Nevomo polega na zdolności unowocześnienia istniejących linii kolejowych zarówno z punktu widzenia infrastruktury, jak i wykorzystywanego taboru przewozowego. Zastosowanie rozwiązania MagRail Booster, przez prostą modernizację eksploatowanego taboru kolejowego, jest obecnie przedmiotem oceny przez wiodące koleje europejskie, np. w zakresie zwiększenia limitów załadunku na wzniesieniach terenu lub większego, ponownego przyspieszenia pociągów towarowych po wyprzedzeniu ich przez szybsze pociągi pasażerskie. Ponadto, MagRail Booster umożliwi ruch kolejowy w nieelektryfikowanych tunelach i pod wiaduktami o niskim prześwicie.

Technologia MagRail Booster firmy Nevomo stanowi odpowiedź na wyzwania związane z transportem towarowym i logistyką, przed którymi stają przewoźnicy kolejowi, operatorzy terminali oraz zarządcy infrastruktury kolejowej. Jedną z kluczowych zalet systemu jest możliwość samodzielnego poruszania się pojedynczych wagonów Booster bez wykorzystywania lokomotyw. Otwiera to możliwości nowych zastosowań, w których wagony mogą być organizowane w małe grupy zamiast pełnych składów pociągów. Ta cecha jest szczególnie przydatna w obszarach tzw. „ostatniej mili”, takich jak terminale towarowe, centra logistyczne i obiekty przemysłowe, w których wysoki poziom elastyczności i automatyzacja ruchu są bardzo pożądane [45].

Takie podejście do technologii systemu pozwoli na szybsze unowocześnienie kolei i zwiększenie przepustowości, co jest bardzo potrzebne dla zrównoważonej i wydajnej logistyki, przy jednoczesnym zachowaniu kompatybilności i interoperacyjności z obecnymi systemami przewozów [43]. Zastosowanie technologii systemu MagRail to rozwiązanie, które może być całkowicie zeroemisyjne. Do zeroemisyjnej eksploatacji wystarczy, że energia niezbędna do zasilenia przyszłych magnetycznych składów będzie pochodziła ze źródeł odnawialnych i zeroemisyjnych np. elektrownie wodne, fotowoltaika, wiatraki, a nie elektrownie węglowe (elektrownie jądrowe są zeroemisyjne, lecz nie są źródłem odnawialnym).

W maju 2023 roku pierwsze przebudowane wagony kolejowe, na których można umieścić kontenery 20-stopowe, dotarły na miejsce testów w Nowej Sarzynie, aby wkrótce można było rozpocząć jazdy próbne [47], rysunek 9. Fragmenty testów można zobaczyć na filmach [50, 51].



Rys. 9. Pierwsze zmodyfikowane wagony dotarły na poligon testowy w Nowej Sarzynie [47]

Wdrożenie technologii systemu MagRail oraz dalsze doskonalenie rozwiązań technicznych wraz z zaangażowaniem w prowadzenie ruchu elementów sztucznej inteligencji zapewne doprowadzi do budowy w Polsce pierwszej linii w technologii systemu Hyperloop, czego wizualizację pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Trzeci stopień wdrożenia koncepcji systemu magnetycznej kolei dużych prędkości – wizualizacja stacji kolei przyszłości z zastosowaniem technologii systemu Hyperloop [48]

6. Zakończenie

Technologia systemu MagRail opracowana i sukcesywnie rozwijana przez polską firmę Nevomo stanowi brakującą ogniwo, wypełniającą lukę pomiędzy eksploatowaną infrastrukturą kolejową, a nowymi systemami transportu kolejowego. Dotychczasowe zainteresowanie liczących się firm działających na tym rynku pozwala twierdzić, że przedstawione rozwiązanie wdrożone do eksploatacji na europejskiej sieci kolejowej powinno przynieść korzyści zarządcom infrastruktury kolejowej, operatorom i klientom tej gałęzi transportu. Ponadto, technologia systemu wpisuje się w cele Europejskiego Zielonego Ładu i cyfrową modernizację transportu kolejowego, co jest priorytetem Unii Europejskiej w nadchodzących latach.

Bibliografia

1. Fiske O.J., Long G.A.: *Switching, Networks and Maglev*. LaunchPoint Technologies, Inc, 5735B Hollister Ave., Goleta, CA 93117-3420, USA. Artykuł dostępny na stronie internetowej: http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2008/topic6/IMT_CP_M2008_T6_8.pdf [dostęp: 30.09.2023].
2. Poliński J.: *Metodyka BIM – czym jest i komu służy*. Prace IK Instytutu Kolejnictwa, Zeszyt 167.
3. Poliński J.: *Odkrywanie kolei przyszłości – Maglev*. Prace Instytutu Kolejnictwa, 2023, z. 172.
4. Poliński J.: *Odkrywanie kolei przyszłości – Hyperloop*. Prace Instytutu Kolejnictwa, 2023, z. 174.
5. Szwedun N., Stępniański T.: *Założenia i obecne etapy realizacji transportu lotniczo-kolejowego według Elona Muska – projekt Hyperloop*. JOURNAL OF TRANSLOGISTICS 127/2017. Artykuł dostępny na stronie Internetowej:

- <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-6793fb52-c2d4-4682-b308-31273af6415c> [dostęp: 08.05.2023].
- Wykorzystane strony Internetowe
6. <https://www.nextbigfuture.com/2014/08/stabilized-permanent-magnet-maglev.html> [dostęp: 14.06.2023].
 7. <https://railroads.dot.gov/elibrary/report-congress-costs-and-benefits-magnetic-levitation> [dostęp: 15.06.2023].
 8. <https://www.maglev.net/maglev-in-the-usa> [dostęp: 18.03.2023].
 9. https://www-juliantrubin-com.translate.goog/encyclopedia/electricity/maglev_train.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pl&_x_tr_hl=pl&_x_tr_pto=sc [dostęp: 14.04.2023].
 10. <https://www.youtube.com/watch?v=vxfCyCSl6js> [dostęp: 18.07.2023].
 11. <https://en.wikipedia.org/wiki/Maglev> [dostęp: 19.06.2023].
 12. <https://patentimages.storage.googleapis.com/ff/c9/06/ad4985c2f4f75a/US6684794.pdf> [dostęp: 29.07.2023].
 13. <https://www.isbtech.pl/2021/05/nevomo-ma-wstepne-studium-wykonalnosci-magrail-w-polsce/> [dostęp: 06.05.2023].
 14. <https://botland.com.pl/blog/hyperloop-i-hyperpoland-przyszlosc-transportu/> [dostęp: 08.05.2023].
 15. <https://pfr.pl/sloownik/sloownik-startup.html> [dostęp: 17.05.2023].
 16. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Nevomo> [dostęp: 17.05.2023].
 17. <https://www.latimes.com/california/story/2022-11-05/elon-musk-hyperloop-tunnel-hawthorne-removed> [dostęp: 17.05.2023].
 18. <https://www.connectcre.com/stories/spacex-dismantles-hyperloop-in-hawthorne/> [dostęp: 17.05.2023].
 19. <https://www.nevomo.tech/pl/bim-innovation-award/> [dostęp: 17.05.2023].
 20. https://ecotechdaily-net.translate.goog/hyper-poland-reveals-their-magrail-transport-technology/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pl&_x_tr_hl=pl&_x_tr_pto=sc [dostęp: 17.05.2023].
 21. <https://forsal.pl/transport/kolej/artykuly/8-167573,magrail-kolej-magnetyczna-linia-y-kolej-duzych-predkosci.html> [dostęp: 17.05.2023].
 22. <https://kopalniawiedzy.pl/HyperPoland-hyperloop-kolej-magnetyczna-Zmigrod,30077> [dostęp: 17.05.2023].
 23. <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/czy-w-polsce-jest-miejsce-na-hyperloop-58822.html> [dostęp: 17.05.2023].
 24. <https://www.nevomo.tech/pl/qa/> [dostęp: 18.05.2023].
 25. <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/duze-pieniadze-dla-nevomo-z-komisji-europejskiej--108560.html> [dostęp: 18.05.2023].
 26. <https://biznes.newseria.pl/biuro-prasowe/transport/polska-technologie-magrail,b1763795807> [dostęp: 18.05.2023].
 27. <https://www.motocaina.pl/artykul/magrail-451041.html> [dostęp: 18.05.2023].
 28. <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/nevomo-zakonczylo-budowe-toru-testowego-magrail-109697.html> [dostęp: 18.05.2023].
 29. <https://geekweek.interia.pl/podroze/news-magrail-czyli-superszybka-kolej-przyszlosci-ktora-polaczy-po,nld,5545908> [dostęp: 18.05.2023].
 30. https://twitter.com/NEVOMO_tech/status/1638506683990175752/photo/1 [dostęp: 21.05.2023].
 31. <https://www.railtech.com/innovation/2023/03/14/sncf-and-nevomo-to-cooperate-on-magrail/?gdpr=deny> [dostęp: 18.05.2023].
 32. <https://www.wnp.pl/logistyka/magrail-trafi-do-portu-w-duisburgu,576601.html> [dostęp: 18.05.2023].
 33. <https://www.youtube.com/watch?v=vZdLG7YxowA&t=13s> [dostęp: 18.05.2023].
 34. <https://www.railtech.com/innovation/2022/11/25/why-develop-new-infrastructure-for-hyperloop-when-existing-rail-tracks-can-be-used/> [dostęp: 18.05.2023].
 35. <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/nevomo-przeprowadzilo-testy-magrail-na-torze-1000-mm-102372.html> [dostęp: 20.05.2023].
 36. <https://twitter.com/FlywheelMedia1/status/1572174587265163266/photo/1> [dostęp: 20.05.2023].
 37. <https://www.youtube.com/watch?v=p6cPzihgY5I> [dostęp: 20.05.2023].
 38. <https://evertiq.pl/news/27625> [dostęp: 20.05.2023].
 39. <https://evertiq.pl/news/28760> [dostęp: 20.05.2023].
 40. <https://evertiq.pl/news/27534> [dostęp: 20.05.2023].
 41. <https://hyperloop-denmark.dk/frances-national-railway-company-sncf-and-nevomo-sign-a-cooperation-agreement-in-paris/> [dostęp: 20.05.2023].
 42. <https://polskiprzemysl.com.pl/wiadomosci/wagony-towarowe-magrail-booster/> [dostęp: 21.05.2023].
 43. <https://www.youtube.com/watch?v=VWCBrC4Y4sU> [dostęp: 21.05.2023].
 44. <https://kurier-kolejowy.pl/aktualnosci/42360/nevomo-nawiazuje-wspolprace-z-gatx-rail-europe-i-przedstawia-nowy-produkt--magrail-booster.html> [dostęp: 21.05.2023].
 45. <https://www.railwaygazette.com/freight/gatx-supports-magrail-booster-linear-motor-wagon-test/64073.article> [dostęp: 21.05.2023].
 46. <https://nieuwssite.duurzaam-mobiel.be/met-magrail-booster-bouwt-nevomo-conventionele-spoorwagons-om-tot-magneettreinen/> [dostęp: 21.05.2023].
 47. <https://mambiznes.pl/wlasny-biznes/polski-hyperloop-zebral-700-tys-zl-zmodyfikowalismy-pomysl-elona-musk-a-91154> [dostęp: 21.05.2023].
 48. https://en-m-wikipedia-org.translate.goog/wiki/Seedrs?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pl&_x_tr_hl=pl&_x_tr_pto=sc [dostęp: 21.05.2023].
 49. <https://knoema.com/atlas/United-States-of-America/Length-of-rail-lines#:~:text=United%20States%20of%20America%20length%20of%20rail%20lines,previous%20year%2C%20this%20is%20a%20change%20of%200.13%25> [dostęp: 30.07.2023].
 50. https://www.youtube.com/watch?v=CQOEP7_euXQ [dostęp: 17.10.2023].
 51. https://www.youtube.com/watch?v=g9cL9pre_g4 [dostęp: 17.10.2023].