

Grzegorz Kamiński, Tomasz Wygonowski
Politechnika Warszawska, Warszawa

ZASTOSOWANIE SILNIKA LINIOWEGO W NAPĘDZIE POJAZDU FUTURYSTYCZNEGO TRANSPORTU MIEJSKIEGO

APPLICATION OF LINEAR MOTOR INTO VEHICLE PROPULSION OF FUTURISTIC URBAN TRANSIT

Abstract: The dissertation includes information concerning Personal Rapid Transit systems. The paper is divided into two mutually connected chapters. The first chapter presents the motives of the creation and the history of PRT, along with several examples of these systems. It describes the solutions that are on the most advanced stage of realization (e.g. ULTRA, MISTER, VECTUS). The second chapter comprises a short comparison of the systems mentioned above. Particular attention is drawn to the types of electric motors employed in the systems and the methods of supplying. The conclusion of the deliberation is a suggestion to apply a linear motor in the PRT system instead of a rotating one. Another solution for the PRT propulsion is the concept of hybrid combination of a linear and a rotating motor.

1. Wstęp

Futurystycznym transportem miejskim został określony system indywidualnego transportu miejskiego - z ang. Personal Rapid Transit, w skrócie PRT.

PRT jest to koncepcja transportu publicznego, oferująca bezprzystankowy przejazd na żądanie, używająca w tym celu małych niezależnych pojazdów poruszających się po specjalnym torze, którym przeważnie jest podwieszona szyna. Transport PRT stanowi jedną z form transportu AGT ("Automated Guidway Transit" - automatyczny transport prowadzony bez motorniczego). Mogłoby się wydawać, że kolejny rodzaj transportu publicznego jest niepotrzebny, przecież istnieje już i tak kilka typów tego transportu m.in. tramwaj, autobus, metro, kolej. System PRT posiada wiele zalet w porównaniu do w/w, np.: w godzinach pozaszczytowych tradycyjne środki transportu nie są w pełni wykorzystywane, tzn. ilość osób nimi podróżujących jest niewspółmiernie mała do ilości osób podróżujących w godzinach szczytu. W przypadku systemów PRT pojazdy są na żądanie, co wyklucza możliwość pustych przejazdów, w związku z czym, konwencjonalne środki transportu są w porównaniu z PRT nieekonomiczne. PRT jest również alternatywą dla stojących w „korkach” samochodów, w których przeważnie znajduje się tylko kierowca. Prawdopodobieństwo, że wielu użytkowników samochodów poruszających się codziennie w godzinach szczytu ze średnią prędkością poniżej 20 km/h chętnie przesiadłoby się do pojazdu, który zawióźłby

ich w wybrane miejsce dwa lub trzy razy szybciej jest duże. Oprócz wymienionych zalet motywami powstania koncepcji PRT są m.in.:

- a) zanieczyszczenie środowiska związane ze spalinami samochodów,
- b) coraz powszechniejsze „korki”,
- c) zwiększająca się wypadkowość w transporcie,
- d) zagrożenie terrorystyczne.

Zanieczyszczenie środowiska przez elektrycznie napędzane pojazdy wynosi zero, co w przypadku stojących w korkach samochodach jest rzeczą niemożliwą. Pojazdy poruszające się ze stałą prędkością (taką samą dla każdego pojazdu) w bezpiecznym odstępnie jeden za drugim sterowane automatycznie wykluczają możliwość kolizji. Również zagrożenie atakiem terrorystycznym na jedno- lub kilkoosobowy pojazd maleje do minimum.

Osobą która wymyśliła system PRT był planista transportu miejskiego Donn Fitcher. Przedstawił on swoją koncepcję w 1953 r. Kilkanaście lat później tj. w 1964 r. opublikował książkę, w której zaproponował swoją koncepcję jako futurystyczną wizję transportu końca XX wieku. Dwa lata później Departament Mieszkalnictwa i Rozwoju Miasta USA w swoim raporcie zarekomendował propozycję Donna Fitchera jako system transportu w miastach. Rok później we Francji rozpoczęto pracę nad projektem Aramis, którego celem było uruchomienie pilotażowej linii PRT w okolicach Paryża. Niestety próba ta była nieudana. W kolejnych latach po-

dejmowane były kolejne podejścia w realizacji futurystycznego transportu. Wszystkie kończyły się niepowodzeniami, a wymaganiom systemu PRT nie podołały m.in. takie kraje jak Japonia, USA, Niemcy. Przyczynami, które miały wpływ na nieudane projekty PRT były:

- a) niedostateczny rozwój informatyki, telematyki i elektroniki,
- b) brak regulacji prawnych związanych z systemem PRT,
- c) brak zrozumienia dla problemów ekologii,
- d) brak standardów i wzorców.

Jednakże od lat siedemdziesiątych do terażniejszości niektóre z tych przeszkód zostały wyeliminowane. W naukach technicznych dokonał się znaczący postęp, a także problemy ekologii stały się bardzo istotne.

2. Koncepcje systemów PRT

Koncepcji budowy systemów PRT jest wiele. Stworzenie indywidualnego transportu miejskiego postawiły sobie za cel największe i najbogatsze kraje świata (Rosja, USA, Wielka Brytania). W niniejszym artykule przedstawiono cztery projekty systemów PRT, przy wyborze których kierowano się stopniem zaawansowania pod względem ich wdrożenia.

Do tej grupy należą Ultra, Vectus, Mister i Coaster.

Ultra jest projektem brytyjskim, nad którym prace zapoczątkowano w 1995 r. Od 2002 r. pojazd jest badany na torze w Cardiff.



Rys. 1. Ultra

System Ultra ma zapewnić transport pasażerów na lotnisku Heathrow, pomiędzy Terminalem 5, a parkingiem. Projekt ma zostać oddany do użytku wiosną 2009 r. Pojazd napędzany jest silnikiem synchronicznym o mocy 7 kW. Średnie zużycie energii wynosi około 2 kWh. Energia czerpana jest z czterech akumulatorów o pojemności 45 Ah każdy. Takie zestawienie zasi-

lania z napędem pozwala na podróżowanie z prędkością 40 km/h. Ładowność pojazdu wynosi 500 kg, a masa całkowita około 1300 kg.



Rys. 2. Vectus

Szwedzko-Koreański Vectus jest projektem, nad którym pierwsze prace rozpoczęto w 2002 r. W roku 2007 powstał doświadczalny tor w Szwecji. Czteruosobowe pojazdy napędzane są silnikami liniowym indukcyjnym osiągając prędkość max 45 km/h. Tor jezdny ma budowę modułową i tworzy go podwieszona szyna. Vectus waży 1200 kg wliczając w to czterech pasażerów.



Rys. 3. Coaster

Projekt austriacki o nazwie Coaster posiada dwie wersje miejską i górską przedstawioną na rysunku 3. Pojazdy poruszają się z prędkością do 80 km/h. Mogą zabrać na swój pokład 8 osób. Pomimo całkowitej masy około 2500 kg potrafią pokonywać wzniesienia o nachyleniu 55%. Pojazdy napędzane są dwoma indukcyjnymi silnikami wysokomomentowymi o mocy 25/53 kW. Zasilanie odbywa się za pomocą specjalnej chlorowo-niklowo-sodowej (NaNiCl) baterii o napięciu 300 V. Silniki są przystosowane do zwrotu energii podczas hamowania.

Ładowanie baterii odbywa się na stacjach. W 2006 r., w Szwajcarskim kurorcie Arosa wdrożono pierwsze rozwiązanie projektu Coaster.



Rys. 4. Mister

Mister przedstawiony na rysunku 4 jest polskim projektem. Od swoich zagranicznych konkurentów różni się m.in. tym, że pojazd jest podwieszony do szyny a nie tak jak w innych rozwiązaniach gdzie pojazdy umieszczone były na szynie. Główną zaletą takiego rozwiązania jest możliwość wypoziomowania podłogi tak by pasażer zawsze znajdował się w tym samym położeniu. Inną zaletą w porównaniu z projektami konkurencji jest zasilanie pojazdu podobne do zasilania trolejbusu, co pozwala do zniwelowania masy własnej pojazdu do około 300 kg, co jest niewykonalne w przypadku pojazdów wyposażonych w autonomiczne źródła energii. Pojazdy Mister napędzane są dwoma silnikami. Mniejszy o mocy 10 kW służy do poruszania się po płaskich odcinkach toru ze stałą prędkością. Większy silnik o mocy 30 kW jest używany do przyspieszania i hamowania pojazdem. System Mister budowany jest do poruszania się z prędkością 50 km/h. Istnieją już pierwsze miasta w Polsce zainteresowane budową tego systemu. Należą do nich m.in. Warka i Opole. Przedstawione projekty mimo, iż mają wspólne cele różnią się między sobą znacząco. Różne są sposoby zasilania pojazdów. Do ich napędu zastosowano różne rodzaje silników. Sposób zasilania pojazdu, tzn. autonomiczny lub zewnętrzny, oraz zastosowane rozwiązanie napędu, tj. silnik liniowy lub silnik obrotowy, determinują masę pojazdu. Masa przenoszonego ładunku określa jakiej siły trzeba użyć do przeniesienia tego ładunku oraz ile trzeba zużyć do tego

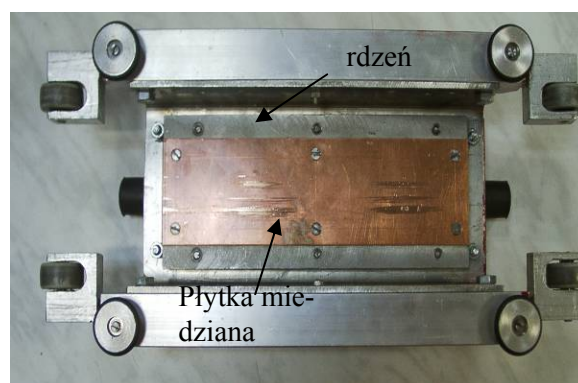
energii w związku z czym należałoby dążyć do tego, aby masa pojazdu była jak najmniejsza. Pomimo, iż projektów PRT jest bardzo wiele to i tak istnieje jeszcze szeroki wachlarz technologicznych rozwiązań, które spowodują dalszy rozwój tego typu transportu.

W Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej podjęto działania w celu wykonania silnika liniowego i wykorzystania go jako napęd pojazdu PRT.



Rys. 5. Model liniowego silnika indukcyjnego

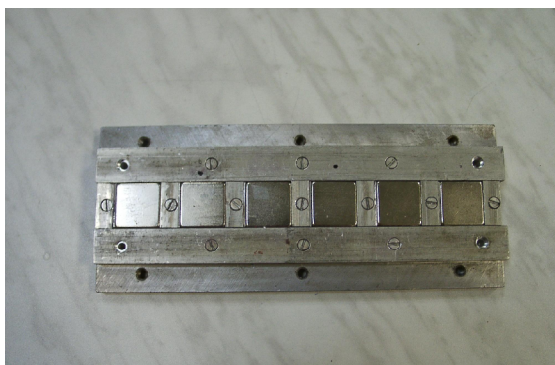
W 2007 r. został wykonany model fizyczny jednostronnego indukcyjnego silnika liniowego. Uzwojenie stojana rozłożone jest na czterometrowej aluminiowej szynie, a rdzeń uzwojenia wykonany jest z pakietu blach stalowych.



Rys. 6. Wzbudnik silnika liniowego indukcyjnego

Obwód magnetyczny wzbudnika stanowi stalowy rdzeń. Lite uzwojenie wzbudnika wykonane zostało z miedzianej blachy. Oba elementy zostały pokazane na rysunku 6. Zastępując płytkę miedzianą magnesami neodymowymi otrzymano silnik synchroniczny. Zastosowane magnesy neodymowe pokazano na rysunku 7. Konstrukcją odwrotną do zaprezentowanej, tzn.

z nieruchomym twornikiem rozłożonym wzdłuż toru, po którym porusza się bieżnik zasilany z autonomicznego źródła energii jest wcześniej zaprezentowany Szwedzko-Koreański Vectus.



Rys. 7. Wkład z magnesami neodymowymi wzbudnika silnika synchronicznego liniowego

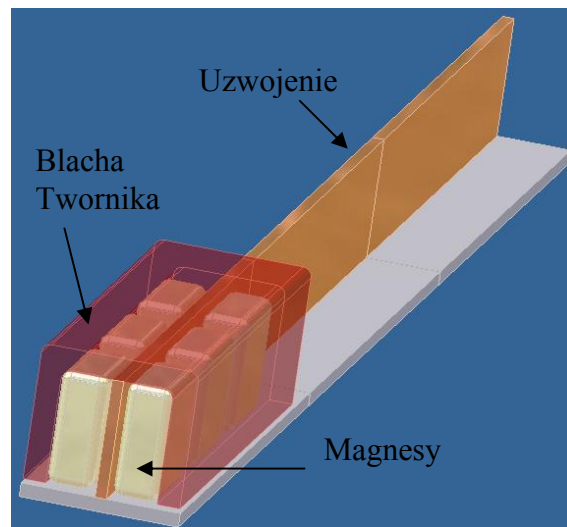
Innym systemem, w którym wykorzystano pojazd napędzany silnikiem liniowym z własnym źródłem energii jest projekt Skyweb Express z USA. Widok podwozia z elementami napędu tego rozwiązania przedstawiony jest na rysunku 8.



Rys. 8. Podwozie pojazdu Skyweb Express

W porównaniu do rozwiązań PRT z silnikami obrotowymi aplikacje zawierające silniki liniowe wyróżniają się mniejszą ilością ruchomych części, np.: brak przekładni, co zmniejsza koszty eksploatacyjne. Projekty z silnikami liniowymi indukcyjnymi charakteryzuje też większe bezpieczeństwo związane z pierwotnym systemem hamowania silnika, co również zmniejsza wydatki eksploatacyjne. Oprócz wyżej zaprezentowanych, rozważa się kolejne rozwiązania technologiczne silników liniowych. Jednym z nich jest bezrdzeniowy silnik liniowy z magnesami trwałymi. Bezrdzeniowe uzwojenie stojana jest rozłożone wzdłuż szyny, po której porusza się twornik z magnesami neodymowymi. Przykładowe rozwiązanie takiego silnika poka-

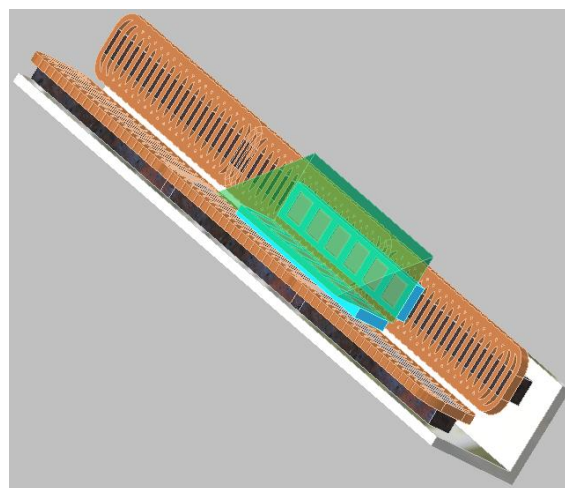
zono na rysunku 9. Główną zaletą takiego silnika jest brak strat w żelazie stojana.



Rys. 9. Model silnika bezrdzeniowego liniowego

Rozważa się zastosowanie jednego z dwóch typów uzwojenia meandrowego, o kształcie prostokątnym lub trójkątnym. Innym sposobem budowy technologicznej silnika liniowego jest zastosowanie dwóch stojanów umieszczonych w układzie „V”, między którymi umieszczony zostałby twornik. Takie wzajemne położenie względem siebie stojanów powoduje, że siły naciągu magnetycznego działające na twornik od jednego stojana równoważą siły naciągu magnetycznego pochodzące od drugiego stojana.

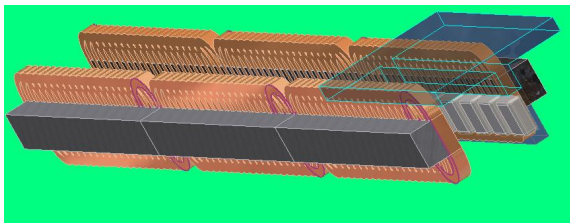
Przykład silnika z położeniem stojanów w układzie „V” pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Model silnika liniowego w układzie „V”

Kolejnym rozwiązaniem jest umieszczenie stojanów przeciwsobnie, tak jak pokazano na ry-

sunku 11. W tym układzie twornik umieszczony jest między dwoma stojanami. W zależności od elementów zastosowanych do budowy twornika można uzyskać silnik liniowy indukcyjny lub silnik liniowy synchroniczny.



Rys. 11. Przykład silnika dwustronnego

Z powyższych rozważań można wysnuć wniosek, że zarówno w transporcie typu PRT jak również w temacie silników liniowych nie powiedziano jeszcze ostatniego słowa. Obie technologie mają jeszcze dużo do zaoferowania pod względem innowacyjności i zastosowań. Jak do tej pory nie wynaleziono jedynego właściwego rozwiązania. Wszystkie z zaprezentowanych rozwiązań konstrukcyjnych, czy to systemów PRT, czy też silników liniowych mają swoje wady i zalety.

Głównym celem prac prowadzonych w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej jest znalezienie najlepszego rozwiązania silnika liniowego do napędu pojazdów PRT.

3. Literatura

- [1] <http://www.taxi2000.com/images/Generic1.pdf>
- [2] http://www.mist-er.com/MISTER_Ogolnie-2008.pdf
- [3] <http://prt-sitin.pl/>
- [4] http://pl.wikipedia.org/wiki/Personal_Rapid_Transit

- [5] <http://www.atsltd.co.uk/>
- [6] <http://www.tomw.net.au/technology/transport/coaster.shtml>
- [7] http://www.brusa.biz/e_applications.htm
- [8] http://www.vectus.se/eng_om.html

4. Spis rysunków

- [1] Rysunek 1. Ultra:
<http://www.atsltd.co.uk/media/pictures/vehicle-development/>
- [2] Rysunek 2. Vectus:
<http://www.vectus.se/images/Pressbilder/grey%20body%20yellow%20doors.jpg>
- [3] Rysunek 3 Coaster:
<http://www.tomw.net.au/technology/transport/coaster.shtml>
- [4] Rysunek 4 Mister:
http://www.mist-er.com/MISTER_Ogolnie-2008.pdf
- [5] Rysunek 5. Model liniowego silnika indukcyjnego.
- [6] Rysunek 6. Wzbudnik silnika liniowego indukcyjnego
- [7] Rysunek 7. Wkład z magnesami neodymowymi wzbudnika silnika synchronicznego liniowego
- [8] Rysunek 8. Podwozie pojazdu Skyweb Express
<http://www.taxi2000.com/images/Generic1.pdf>
- [9] Rysunek 9. Model silnika bezrdzeniowego liniowego.
- [10] Rysunek 10. Model silnika liniowego w układzie „V”.
- [11] Rysunek 11. Przykład silnika dwustronnego.

Autorzy

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński,
e-mail: G.Kaminski@ime.pw.edu.pl
Mgr inż. Tomasz Wygonowski,
e-mail: wygi@op.pl
Instytut Maszyn Elektrycznych,
Politechnika Warszawska,
Pl. Politechniki 1, 00-662 Warszawa