

doi:10.15199/48.2017.02.36

Silnik synchroniczny liniowy jako napęd pojazdu typu PRT

Streszczenie. Artykuł opisuje możliwość wykorzystania silnika synchronicznego liniowego w napędzie przyszłościowego transportu miejskiego typu PRT (personal rapid transit). W artykule opisana została jedna z odmian „zautomatyzowanego transportu” jaką jest PRT. Przedstawiono istniejące rozwiązania systemów PRT w tym, z silnikiem liniowym. Zwrócono też uwagę na historię samych silników liniowych oraz ich zastosowanie. W artykule opisano również nowatorską metodę wykonania uzwojenia falistego dla silnika liniowego.

Abstract. This paper describe possibility of using linear synchronous motor as drive in PRT (personal rapid transit) vehicles. There are also information about Personal Rapid Transit as a type of automated transport. Authors describe some of existing solution of PRT systems. Some of them include linear motors as a drive. There are also some information about the history of linear motors and theirs application. Authors describes new method of making waves winding for linear synchronous motor application. **Possibility of using linear synchronous motor as drive in PRT (personal rapid transit) vehicles**

Słowa kluczowe: synchroniczny silnik liniowy, PRT personal rapid transit, ECO Mobilność, Tablica Halbacha.

Keywords: linear synchronous motor, personal rapid transit, Halbach array, permanent magnet .

Historia Silników Liniowych

Pierwsze prace związane z elektrycznymi silnikami liniowymi były dziełem Charlesa Weatstone'a w latach czterdziestych dziewiętnastego wieku. Czyli zaledwie kilkanaście lat od powstania pierwszego elektrycznego silnika. Jednakże pierwszy patent z dziedziny silników liniowych powstał prawie pół wieku później. W 1889r. dwaj Amerykanie Schuyler S. Wheeler i Charles S. Bradley opatentowali silnik liniowy synchroniczny i asynchroniczny. W Europie kilkanaście lat później prace nad pociągiem napędzanym silnikiem liniowym rozpoczął niemiecki wynalazca Alfred Zehden. Z kolei pierwsze prace nad lewitującymi pociągami napędzanymi przez silniki liniowe miały miejsce w Niemczech w późnych latach czterdziestych dwudziestego wieku. Pierwszy pełnowymiarowy działający model takiego pociągu został stworzony przez profesora Erica Laithwaite w Londynie mniej więcej w połowie dwudziestego wieku.



Rys.1. Pojazd systemu PRT ULTRA

PRT

W tym samym czasie w roku 1953 w USA powstała koncepcja innowacyjnego transportu miejskiego. Jej autorem był Donn Fitcher. Na podstawie jego książki kilkanaście lat później Amerykański Departament Mieszkalnictwa i Rozwoju Miasta w U.S.A zarekomendował ideę Donna Fitchera jako system transportu miejskiego. PRT czyli personal rapid transit to system transportu miejskiego obsługiwany przez lekkie kiluosobowe pojazdy poruszające się po specjalnych torach. Pojazdy poruszają się w systemie point-to-point co oznacza, że pasażer wybiera miejsce do którego chce dotrzeć a zautomatyzowany system zarządzający ruchem kieruje

pojazd bezpośrednio do miejsca docelowego bez zatrzymywania się na przystankach pośrednich.

Tory po których poruszają się pojazdy mogą być podwieszane, mogą znajdować się nad lub obok głównych dróg lub przebiegać w tunelach. Począwszy od roku 1967 przez kolejnych kilkanaście lat, w najbardziej rozwiniętych krajach świata próbowano wcielić w życie projekty PRT. Jednym z powodów takiego zainteresowania innowacyjnym systemem transportu był m.in. kryzys paliwowy w latach siedemdziesiątych. Dopiero w ostatnich latach dwudziestego wieku oraz na początku wieku dwudziestego pierwszego przełamano bariery techniczne uniemożliwiające wprowadzenie systemu PRT.



Rys.2. Pojazd systemu PRT COASTER



Rys.3. Układ napędowy pojazdu COASTER

To właśnie projekty zapoczątkowane w okresie przełomu XX i XXI stulecia doczekały się realizacji. Należą do nich m.in. projekt ULTRA z rysunku 1 działający na

Londyńskim lotnisku Heathrow oraz projekt COASTER przedstawiony na rysunku 2 uruchomiony w 2006 roku w Szwajcarskim kurorcie narciarskim AROSA.

Powyższe dwa systemy do napędu swoich pojazdów używają tradycyjnych silników obrotowych. W przypadku ULTRY napęd stanowi silnik synchroniczny o mocy 7 kW, który przez przekładnię przekazuje moment na pneumatyczne, ogumione przednie koła. Z kolei COASTER napędzany jest dwoma silnikami indukcyjnymi wysokomomentowymi. Moment przekazywany jest poprzez przekładnię na którą składa się zębate koło które jest dociskane przez rolkę oraz rozłożone wzdłuż toru ogniwa łańcucha. Rozwiązanie napędu COASTERA przedstawiono na rysunku 3.

Silnik liniowy w PRT

Cecha poruszania się po specjalnym torze, która jest wspólna dla wszystkich systemów PRT sprawiła, że w napędzie pojazdów zaczęto rozważać zastosowanie silników liniowych. Taki rodzaj silników w swoim projekcie wykorzystali m.in. inżynierowie ze Szwecji i Korei. Ich wspólne badania doprowadziły do powstania projektu o nazwie Vectus. Pierwsze prace nad tym projektem rozpoczęły się na początku tego wieku. Do napędu pojazdu wykorzystano silnik synchroniczny liniowy. W zależności od potrzeb klienta producent umożliwia wybór jednej z dwóch topologii: magnesy umieszczone w podwoziu pojazdu z uzwojeniem umieszczonym i zasilanym w torze lub zasilanie i uzwojenie umieszczone na pojeździe a magnesy rozłożone w torze. Na rysunku 4 przedstawiono rozwiązanie z uzwojeniem umieszczonym w torze.



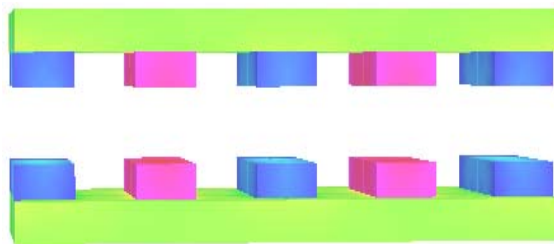
Rys.4. Przykładowe rozwiązanie napędu Vectus, uzwojenie w torze

W ramach projektu ECOMOBILNOŚĆ w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej opracowywany jest silnik liniowy do napędu pojazdu PRT. Rozpatrywane są dwa typy tego silnika czyli silnik synchroniczny oraz silnika asynchroniczny. W dalszej części artykułu przedstawiono projektowany silnik synchroniczny liniowy.

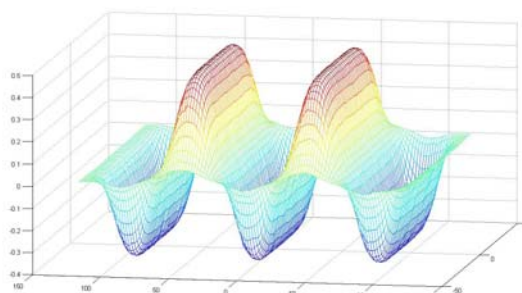
LSM

Na początku opracowywania konstrukcji silnika liniowego synchronicznego zdecydowano się, że ze względu na topologię uzwojenie będzie stanowiło część nieruchomą silnika a magnesy będą umieszczone na pojeździe.

Rozpatrzono trzy przypadki budowy części ruchomej z magnesami. W pierwszym przypadku zastosowano najbardziej znane i popularne ułożenie magnesów na stalowym jarzmie. Wektor magnetyzacji magnesów jest skierowany prostopadle do jarzma, i odwrócony o 180° względem sąsiednich magnesów. Zostało to pokazane na rysunku 5.

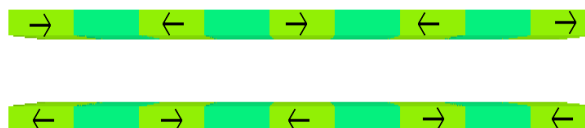


Rys.5. Przykład standardowego i najczęściej stosowanego rozmieszczenia magnesów względem jarzma.



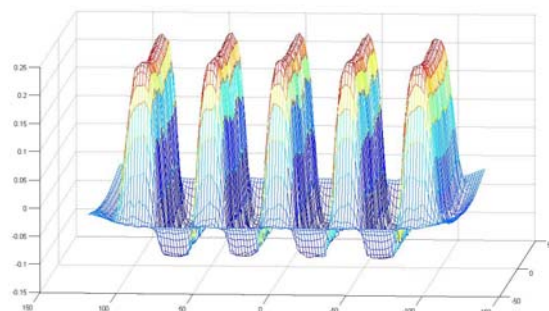
Rys. 5a. Rozkład indukcji magnetycznej w szczeliny biegnika ze standardowym rozłożeniem magnesów.

Kolorem zielonym zaznaczono jarzmo. Kolorami niebieskim i różowym zaznaczono magnesy o przeciwnym namagnesowaniu. W drugim rozważanym rozwiązaniu zastąpiono jarzmo z pierwszego przypadku stalowymi zębami wprowadzonymi pomiędzy magnesy. Również kierunek wektora magnetyzacji magnesów uległ zmianie na przeciwny do zębów magnesów, przy czym zasada o przeciwnym namagnesowaniu sąsiadujących magnesów pozostała nie zmieniona.



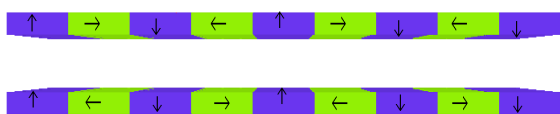
Rys.6. Rozmieszczenie zębów jarzma i magnesów z poziomym kierunkiem namagnesowania.

Na rysunku 6 przedstawiono część ruchomą silnika liniowego z magnesami oraz stalowymi zębami jarzma. Strzałkami zaznaczono kierunek namagnesowania magnesów.



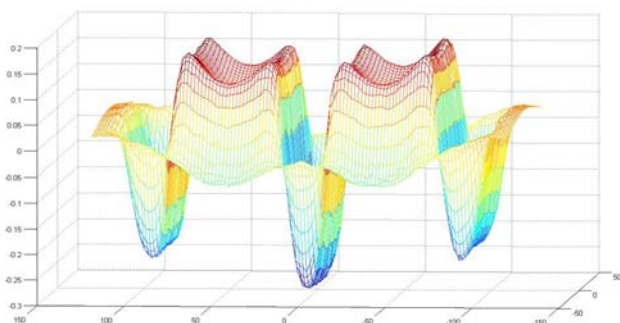
Rys.6a. Rozkład indukcji magnetycznej w szczeliny biegnika ze stalowymi zębami.

W trzecim przypadku zdecydowano się na rozmieszczenie magnesów zgodnie ze wzorem Halbacha. W porównaniu do przypadku poprzedniego stalowe zęby jarzma zastąpiono magnesami których namagnesowanymi prostopadłe do kierunku ruchu biegnika. Konstrukcję opartą o tablicę Halbacha pokazano na rysunku 7.



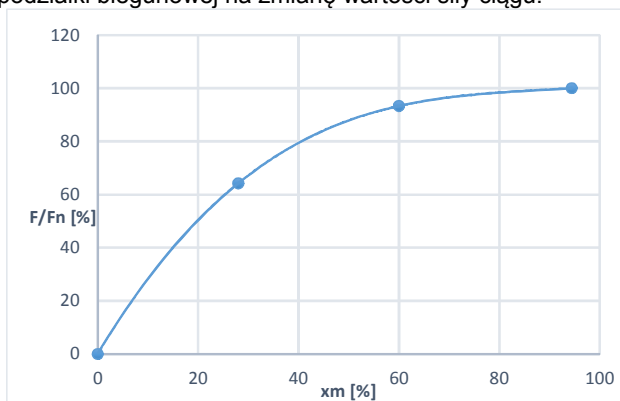
Rys.7. Model biegnika z magnesami ułożonymi w tablicę Halbacha

Wykonano wiele badań i analiz mających na celu porównanie trzech wyżej przedstawionych konstrukcji. Na rysunkach 5a, 6a, 7a, przedstawiono wykresy indukcji magnetycznej w szczelinie każdego z trzech opisywanych biegników.



Rys.7a. Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie biegnika z magnesami ułożonymi w tablicę Halbacha.

Porównano wartości siły ciągu dla trzech przypadków budowy biegnika i okazało się, że dla założonej szczeliny powietrznej wartość siły ciągu jest największa dla przypadku standardowego. Dlatego kolejne badania zostały ukierunkowane w stronę optymalizacji konstrukcji z rysunku 5. Zbadano wpływ zmiany szerokości magnesu względem podziałki biegunowej na zmianę wartości siły ciągu.



Rys.8. Wpływ zmiany wielkości magnesu na wzrost wartości siły

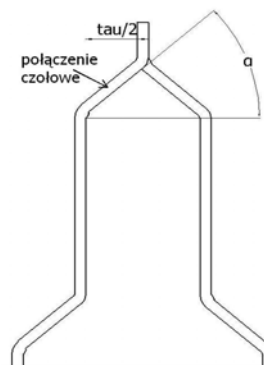
Okazało się, że im większe jest wypełnienie magnesem podziałki biegunowej tym siła ciągu będzie większa. Jednakże zależność pomiędzy wielkością magnesu a uzyskaną siłą ciągu nie narasta proporcjonalnie liniowo.

Analizę wykonano dla czterech wartości wypełnienia podziałki biegunowej magnesem (0.3, 0.6, 0.95). Wykres zależności pomiędzy przyrostem wypełnienia podziałki biegunowej magnesem (zmianą wielkości magnesu) a przyrostem siły ciągu przedstawiono na rysunku 8. Innym ważnym aspektem w analizowanej konstrukcji biegnika okazał się rozmiar jarzma w kierunku ruchu biegnika. W tym

przypadku chodzi o fakt aby jarzmo nie wychodziło poza obszar magnesu co mogłoby doprowadzić do zmniejszenia strumienia magnetycznego w szczelinie poprzez jego rozproszenie na krańcach jarzma. Taka sytuacja nie ma miejsca jeżeli koniec jarzma pokrywa się z końcem skrajnych magnesów.

Uzwojenie silnika synchronicznego liniowego

Od początku prac nad projektowanym silnikiem rozważano zastosowanie jednego z dwóch rodzajów uzwojeń: faliste lub pętlicowe. Zdecydowano też, że konstrukcja uzwojenia będzie bezdrzeniowa. Jednym z etapów prac było zaprojektowanie i wykonanie uzwojenia dla modelu laboratoryjnego silnika w skali 1:3. Określono, że podziałka biegunowa dla modelu laboratoryjnego wynosi 45 mm. W związku z czym szerokość prętów jednej fazy uzwojenia jest mniejsza od 15 mm. Ważnym aspektem uzwojeń są połączenia czołowe. Powinno się dążyć do ich zmniejszenia chociażby ze względu na straty mocy. Dla uzwojenia falistego rozmiar połączenia czołowego zależy od długości podziałki biegunowej oraz od wysokości. Przy podanej podziałce biegunowej istnieje możliwość zmiany tylko wysokości czoł uzwojenia poprzez zmianę kąta nachylenia. Zostało to pokazane na rysunku 9.



Rys.9. Kąt nachylenia połączenia czołowego pręta uzwojenia falistego.

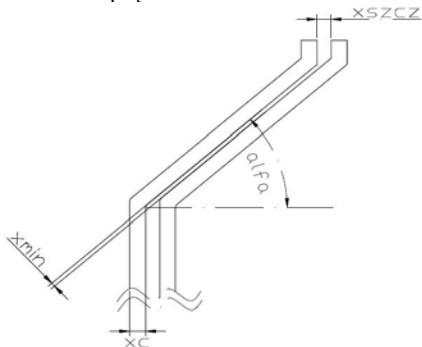
Wyznaczono wpływ szerokości prętów oraz szczeliny pomiędzy prętami na wartość kąta nachylenia uzwojenia falistego. Kąt ten oblicza się zgodnie ze wzorem

$$(1) \quad \alpha = \arcsin\left(\frac{xc + x_{min}}{xc + xszcz}\right)$$

gdzie: α – kąt nachylenia połączeń czołowych, xc – szerokość pręta (prętów), x_{min} – minimalna odległość pomiędzy prętami uzwojenia, $xszcz$ – szerokość szczeliny powietrznej pomiędzy prętami w części czynnej uzwojenia.

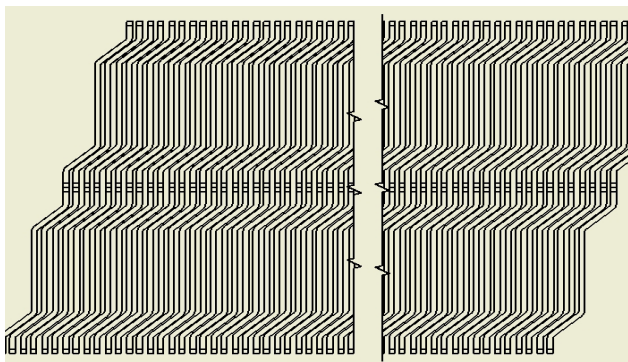
Na rysunku 10 uwidocznione zostały wymiary na podstawie których można wyznaczyć kąt nachylenia uzwojenia falistego. Należy zwrócić uwagę na wartość minimalnej odległości pomiędzy sąsiadującymi prętami oznaczoną we wzorze 1 jako x_{min} . Odległość ta znajduje się w części czołowej uzwojenia, pomiędzy dwoma kolejnymi prętami. Wartość ta jest istotna ze względu na bezpieczną przerwę pomiędzy prętami zapewniającą odpowiednią izolację. W projektowanym modelu silnika przyjęto, że wartość minimalnej przerwy pomiędzy sąsiadującymi prętami wyniesie co najmniej 1 mm. Dla takiego ograniczenia dokonano analizy liczby prętów na fazę i biegun oraz ich szerokości. Za najlepsze rozwiązanie uznano, że liczba prętów na fazę i biegun wynosić ma 2 a szerokość pręta wynosi 7 mm. Następnie wykonano serię obliczeń połowych mających na celu zmierzenie wartości

siły ciągu w zależności od gęstości prądu w uzwojeniu. W ich wyniku okazało się, że zależność siły ciągu w funkcji gęstości prądu jest liniowo proporcjonalna. Kolejnym ważnym aspektem jest wykonanie takiego rodzaju uzwojenia. Jednym ze sposobów jest użycie do tego celu odpowiedniego płaskownika o przekroju kwadratowym (w tym przypadku o wymiarach 4x4 mm) i ukształtowanie z niego pojedynczych prętów uzwojenia. Innym sposobem jest opracowywana technologia wykonania takiego uzwojenia metodą wycinania z blachy o odpowiedniej grubości szablonu prętów.



Rys.10. Wymiary pręta decydujące o wartości kąta nachylenia połączeń czołowych uzwojenia falistego.

Dla takiego rozwiązania dokonano analizy liczby prętów na fazę i biegun oraz ich szerokości. Za najlepsze rozwiązanie uznano rozwiązanie z liczbą prętów na fazę i biegun równą 2 i szerokość pręta 4 mm. Następnie wykonano serię obliczeń polowych mających na celu zmierzenie wartości siły ciągu w zależności od gęstości prądu w uzwojeniu. W ich wyniku okazało się, że zależność siły ciągu w funkcji gęstości prądu jest liniowo proporcjonalna. Kolejnym ważnym aspektem jest wykonanie takiego rodzaju uzwojenia. Jednym ze sposobów jest użycie do tego celu odpowiedniego płaskownika o przekroju kwadratowym (w tym przypadku o wymiarach 4x4 mm) i ukształtowanie z niego pojedynczych prętów uzwojenia. Innym sposobem jest opracowywana technologia wykonania takiego uzwojenia metodą wycinania z blachy o odpowiedniej grubości szablonu prętów. Po wycięciu takiego szablonu następuje jego złożenie na i połączenie końców prętów. Na rysunku 11 przedstawiono szablon uzwojenia falistego dwuwarstwowego, który jest projektowany do wycięcia.



Rys.11. Szablon uzwojenia dwuwarstwowego falistego

Szablon przygotowany jest do obróbki mechanicznej cięcia strumieniem wody. Cięcie laserem blachy miedzianej jest trudne do wykonania ze względu na to, iż miedź rozprasza (odbija) światło lasera. Wykonanie szablonu z rysunku 11 polega na wycięciu każdego pręta oddzielnie. W celu zmniejszenia kosztów wycinania uzwojenia zdecydowano się na wykonanie szablonu ze wspólną linią cięcia. Oznacza to, iż między prętami będzie jedna linia cięcia wzdłuż której poruszać będzie się głowica tnąca. W związku z tym szerokość pręta w części czynnej będzie większa niż w części czołowej. Pozwoli to jednak na zmniejszenie ilości blachy miedzianej potrzebnej do wykonania całego uzwojenia oraz zaoszczędzi czas wycinania. Wniesione zostało podanie o udzielenie patentu na wynalazek pt: „Sposób wykonania uzwojenia trójfazowego falistego zwłaszcza na potrzeby silnika synchronicznego liniowego”. Urząd Patentowy RP uznał zgłoszenie za dokonane dnia 14.02.2012 r. pod nr Z-398109 na rzecz Politechniki Warszawskiej.

Badania finansowane z projektu ECO Mobilność.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński, Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych, Zakład maszyn Elektrycznych ul. Nowowiejska 20a, 00-661 Warszawa, E-mail: G.Kaminski@ime.pw.edu.pl; mgr inż. Tomasz Wygonowski, Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych, Zakład maszyn Elektrycznych, Nowowiejska 20a, 00-661 Warszawa, E-mail: wygonowt@ime.pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Hellinger R., Mnich P., Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status and Future Outlook , *Proceedings of the IEEE*, Vol.97, No. 11, November 2009, 1892-1900
- [2] Kamiński G., Wygonowski T., Zastosowanie silnika liniowego w napędzie pojazdu futurystycznego transportu miejskiego, *Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe*, 83 (2009), 167-171
- [3] Kamiński G., Wygonowski T., Opracowanie modelu polowego liniowego silnika synchronicznego, *Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe*, 87 (2010), 45-50
- [4] Pawluk K., Szczepański W., *Silniki Elektryczne Liniowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1974,
- [5] Kamiński G., Wygonowski T., Sposób wykonania uzwojenia trójfazowego falistego zwłaszcza na potrzeby silnika synchronicznego liniowego, Zgłoszenie Patentowe Z-398109 (14.02.2012)
- [6] Rys.1. <http://www.ultraprt.com/media/pictures/vehicle-2/>
- [7] Rys.2. <http://www.citycoaster.com/en/applications/realized-projects.html>
- [8] Rys.3. <http://www.citycoaster.com/en/product.html>
- [9] Rys.4. <http://www.vectusprt.com/system/propulsion.php>