

Grzegorz Kamiński, Tomasz Wygonowski  
Politechnika Warszawska

## OPRACOWANIE MODELU POŁOWEGO LINIOWEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO

### VECTOR FIELD MODEL OF LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR

**Abstract:** This short document describes PRT propulsion solutions. There are information about most typical drive of PRT vehicle. One of them is Linear Synchronous Motor application. Authors present their proposition of Linear Synchronous Motor for PRT drive. The pole model of this type machine also present in this paper. There are also a lot of analyses between physical dimensions and nominal parameters.

#### 1. Wstęp

W Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej trwają prace nad wykonaniem napędu do pojazdu typu PRT. PRT jest to skrót od angielskich słów personal rapid transit czyli osobisty transport miejski. Pojazdy wykorzystywane w tego typu środkach transportu poruszają się po specjalnym torze.



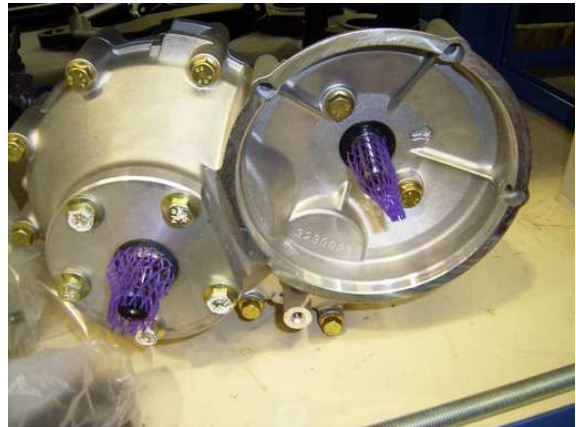
Rys.1. Podwozie pojazdu Coaster

Napęd pojazdu tworzą silniki elektryczne. W większości rozwiązań stosuje się tradycyjne silniki obrotowe np.: w pojazdach Ultra lub Coaster. Na rysunkach 1 i 2 przedstawione zostało rozwiązanie napędu w pojeździe Coaster.



Rys.2. Rozwiązanie napędu w pojeździe typu Coaster

Na rysunku 4 przedstawiono silnik synchroniczny zastosowany w napędzie pojazdu ULTRA.



Rys.3. Silnik AC 7 kW z magnesami trwałymi

Istnieje również kilka rozwiązań, w których zastosowanie w napędzie pojazdu PRT znalazł silnik liniowy. Przykładem takiego rozwiązania jest pojazd Vectus. Napędem tego pojazdu może być zarówno silnik liniowy indukcyjny, jak również silnik synchroniczny. Część pierwotna umieszczona w torze koreańsko-szwedzkiego projektu przedstawiona jest na rysunku 4.



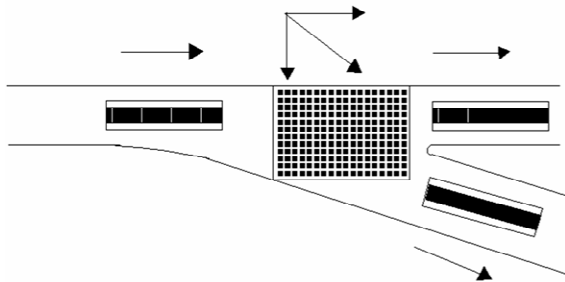
Rys. 4. Stojan silnika liniowego w pojeździe Vectus

Uzwojenie stanowi nieruchomą część toru. Część wtórna natomiast została ukryta w podwoziu wózka. Cały tor ma budowę modułową. Innym projektem PRT z silnikiem liniowym jest SkyWeb Express. Na rysunku 5 przedstawione zostało podwozie pojazdu SkyWeb Express.



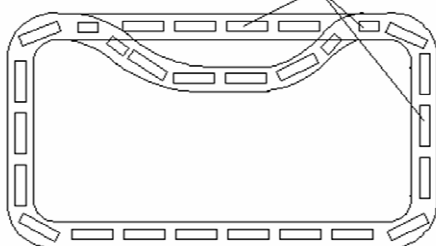
Rys.5. Podwozie pojazdu SkyWeb Express

Jednym z rozwiązań opracowywanych w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej jest wykorzystanie silnika liniowego o dwóch stopniach swobody w miejscach rozjazdów w systemie PRT. Sposób wykorzystania tego silnika obrazuje rysunek nr 6. Natomiast proponowany tor jazdy pokazano na rysunku 7.



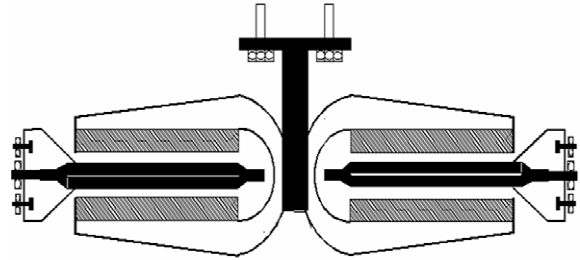
Rys.6. Wykorzystanie silnika liniowego płaskiego o dwóch stopniach swobody w miejscach rozjazdów w systemie PRT

PROPOZYCJA TORU JAZDY DLA MODELU LAB.  
WZBUDNIKI SILNIKÓW LINIOWYCH PŁASKICH.



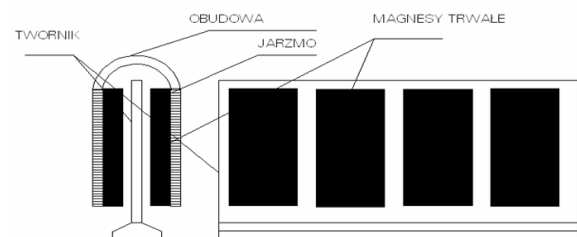
Rys.7. Propozycja toru jazdy w systemie PRT

Na rysunku 8 przedstawiono propozycję instalacji silnika synchronicznego w podwoziu pojazdu. W podwoziu umieszczono dwa silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. W zależności od wytycznych konstrukcyjnych projektu istnieje możliwość wyboru części ruchomej silnika czyli biegnik z magnesami poruszający się wzdłuż rozłożonego uzwojenia, ewentualnie magnesy trwałe stanowiące tor wzdłuż którego poruszałyby się pojazdy z zainstalowanym w podwoziu uzwojeniem.



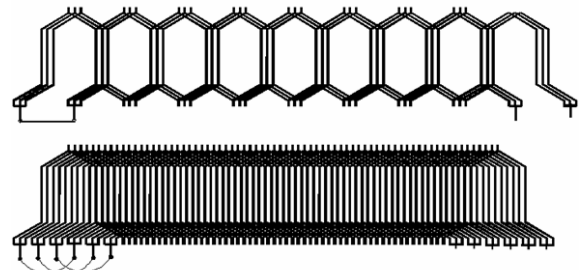
Rys. 8. Podwozie projektowanego pojazdu

Rysunek 9 przedstawia pojedynczy silnik synchroniczny liniowy z magnesami trwałymi zaproponowany w realizacji napędu PRT.



Rys. 9. Schemat silnika synchronicznego liniowego

Jednym z zaproponowanych uzwojeń twornika silnika synchronicznego jest uzwojenie typu meander przedstawione na rysunku 10.



Rys. 10. Uzwojenia meandrowe twornika silnika synchronicznego liniowego

## 2. Parametry napędu elektrycznego wagonika

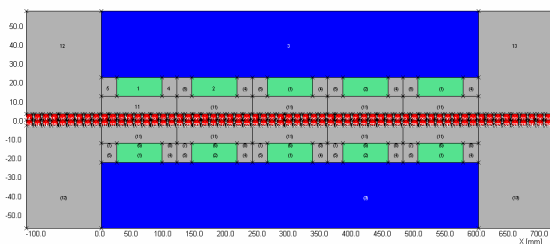
Według wymogów rozpoczętego projektu napęd pojedynczego wagonika powinien spełniać poniższe parametry. Prędkość pomiędzy przystankami  $V=12$  m/s. Masa całkowita obciążonego wagonika wynosi około 1000 kg. Współczynnik sprawności mechanicznej napędu wynosi 0,75. Moc silników wagonika powinna wynosić około 10 kW a moc rozruchowa około 27,5 kW. Z powyższych danych obliczona została stała  $\tau$  podziałki biegunowej. Zgodnie ze wzorem (1) na prędkość silnika synchronicznego:

$$V = 2 \cdot \tau \cdot f \quad (1)$$

Dla częstotliwości  $f=50$  Hz stała  $\tau$  wynosi 12 mm. W związku z zastosowaniem falownika w zasilaniu silnika istnieje możliwość zwiększenia częstotliwości co automatycznie spowoduje zmniejszenie stałej  $\tau$ .

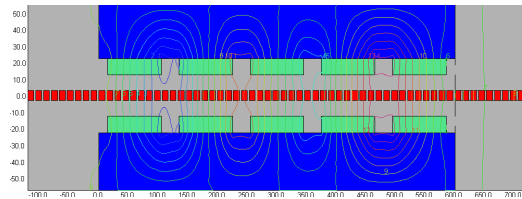
### 2.2. Model polowy

W początkowym etapie prac nad projektem, wykonano sparametryzowany model silnika liniowego synchronicznego w programie PC Opera. Pozwoliło to na przeprowadzenie wielu analiz dotyczących wpływu zmian parametrów konstrukcyjnych i wielkości elektrycznych na osiągi projektowanego silnika. Na rysunku 11 przedstawiono model silnika synchronicznego wykonanego w programie PC Opera 2\_D.



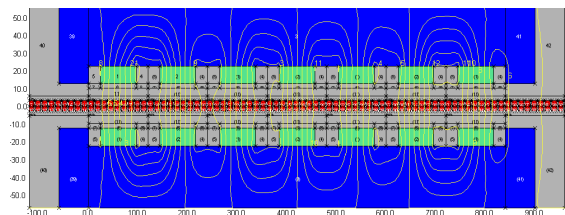
Rys. 11. Model silnika synchronicznego z nieparzystą liczbą par biegunów

Kolorem niebieskim zaznaczony jest obszar żelaza biegnika. Kolor szary określa obszar powietrza. Jasnozielonym kolorem określone zostały magnesy neodymowe. Uzwojenie zaznaczone zostało na czerwono. Rysunek 12 obrazuje rozkład potencjału magnetycznego w rejonie silnika.



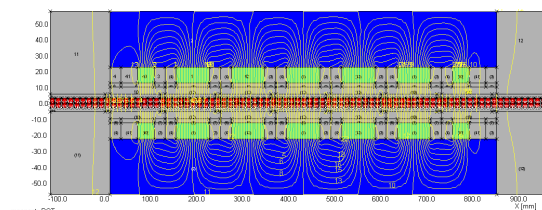
Rys. 12. Rozkład linii sił pola magnetycznego

Nierównomierny rozkład pola magnetycznego zwłaszcza na brzegach silnika należało wyeliminować. W pierwszym etapie dodano zęby na końcach silnika, które miały zmniejszyć opór magnetyczny w szczeliny powietrznej w pobliżu krańcowych magnesów. Rozwiązanie to wraz z wynikiem w postaci obrazu rozkładu linii sił pola przedstawiono na rysunku 13. Jednakże przy tak dużej szczeliny powietrznej (25 mm) związanej z wymogami mechanicznymi projektowanego silnika nie osiągnięto zamierzonego efektu w postaci wyrównania rozkładu potencjału w jarzmie.



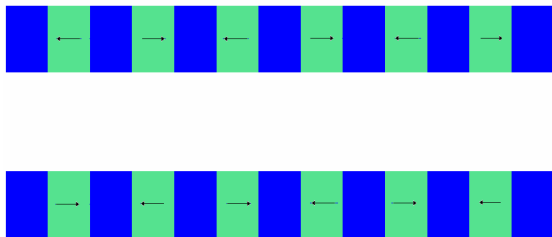
Rys. 13. Rozkład linii sił pola magnetycznego w obszarze silnika z nieparzystą liczbą par biegunów oraz zębami na końcach silnika

W związku z powyższym dokonano zmiany długości magnesów znajdujących się na końcach silnika na równą  $\frac{1}{2}$  długości. Na rysunku 14 przedstawiony jest rozkład linii sił pola dla opisanego przypadku.



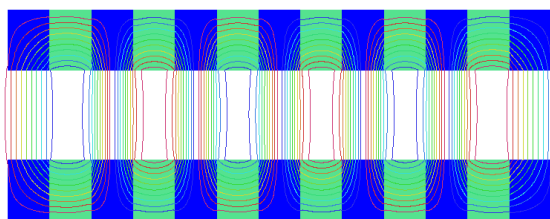
Rys. 14. Rozkład linii sił pola z zastosowaniem półówek magnesów na końcach silnika

Równomierny rozkład indukcji magnetycznej pozwoli na zminimalizowanie grubości stalowego jarzma. W dalszym etapie projektu wykonano kolejne dwa modele.



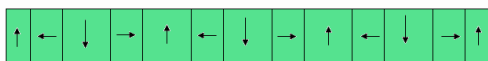
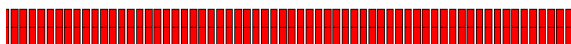
Rys. 15. Model z poziomym kierunkiem namagnesowania magnesów

W pierwszym z nich przedstawionym na rysunku 15 zmieniono wektor magnetyzacji magnesów na kierunek poziomy (w osi X) oraz w obszarze pomiędzy magnesami wprowadzono żelazo. W tym przypadku bieguny magnetyczne są wytworzone w metalowych zębach poprzez poziomo namagnesowane magnesy. Obraz linii sił pola dla tego przypadku pokazano na rysunku 16. Zaletą tej konstrukcji w porównaniu do modelu tradycyjnego jest ograniczenie ilości użytego żelaza, które występuje tylko w rejonie zębów.



Rys. 16. Rozkład linii sił pola magnetycznego w obszarze silnika z poziomym namagnesowaniem magnesów i metalowymi zębami

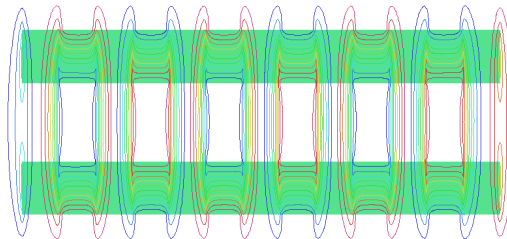
Wariant ten jest wariantem pośrednim pomiędzy modelem tradycyjnym a kolejnym przedstawionym na rysunku 14 modelem z magnesami ułożonymi zgodnie ze wzorem Halbacha. Model takiego silnika przedstawiony został na rysunku 17. Rozkład linii sił pola dla tego modelu pokazano na rysunku 18.



Rys. 17. Model silnika liniowego Halbacha z zaznaczonym kierunkiem magnesowania magnesów

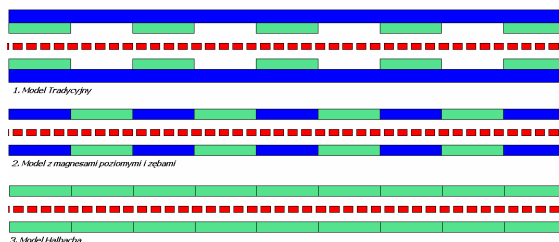
Główną zaletą ułożenia magnesów w tablicę Halbacha jest zwiększenie pola magnetycznego

z jednej strony tablicy kosztem osłabienia go z drugiej strony. Najprościej zjawisko to zaobserwować na podstawie rozkładu linii sił pola, który dla tego modelu przedstawiono na rysunku 18.



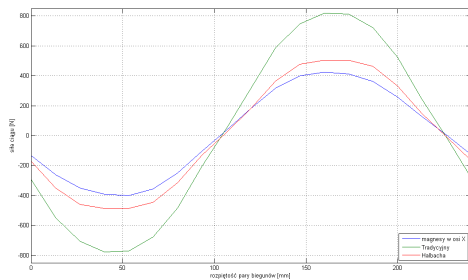
Rys. 18. Rozkład linii sił pola w obszarze silnika z magnesami ułożonymi zgodnie ze wzorem Halbacha

W układzie Halbacha magnesy skierowane poziomo wymuszają przepływ strumienia magnetycznego w kierunku szczeliny powietrznej. Zaletą konstrukcji Halbacha jest pozbycie się metalowego jarzma w porównaniu z konstrukcją modelu tradycyjnego. Wadą może okazać się cena, która dla modelu Halbacha będzie większa ze względu na większą liczbę magnesów niż w przypadku modelu tradycyjnego i modelu z zębami metalowymi pomiędzy magnesami. Dla trzech przedstawionych wyżej konstrukcji dokonano pomiaru siły ciągu w zależności od położenia biegnika z magnesami względem nieruchomego uzwojenia. Pomiaru dokonano dla takich samych wartości prądu oraz szerokości szczeliny powietrznej. Modele dla których dokonano analizy przedstawione zostały na rysunku 19.



Rys. 19. Analizowane modele

Istotne dla wykonywanych obliczeń aby wszystkie modele miały taką samą długość biegnika z magnesami. W tym przypadku długość wynosiła  $4,5\tau$ . W celu lepszego zobrazowania wyników dokonano założenia, że część czynna prętów uzwojenia wynosiła 250 mm.



Rys. 20. Wykres siły ciągu w zależności od położenia biegnika względem uzwojenia dla trzech typów biegnika.

Siłę policzono z zależności 2 :

$$F = B \times I \cdot l, \quad (2)$$

$B$  – wartość średnia indukcji w przecie uzwojenia,

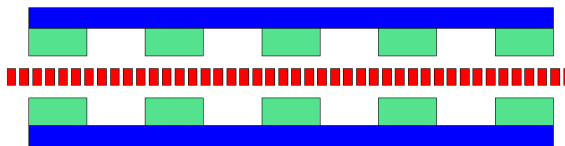
$I$  – wartość prądu w przecie uzwojenia,

$l$  – długość prętów uzwojenia.

Obliczeń dokonano dla każdego z prętów uzwojenia oddzielnie. Następnie zsumowano wartości sił dla poszczególnych prętów znajdujących się w regionie biegnika w danym położeniu względem uzwojenia. Wynikiem obliczeń jest wykres siły przedstawiony na rysunku 20. Z wykresu wynika wniosek, że największa wartość siły przypada na model tradycyjny z magnesami o magnetyzacji prostopadłej do kierunku ruchu i metalowym jarzmem. Najniższą wartością siły charakteryzuje się model o magnesach z poziomym wektorem magnetyzacji. Natomiast model z magnesami ułożonymi w tablicę Halbacha jest opcją pośrednią pod względem siły elektrodynamicznej działającej na biegnik. Maksymalna siła jaką uzyskano podczas obliczeń wynosi dla silnika tradycyjnego około 820 N.

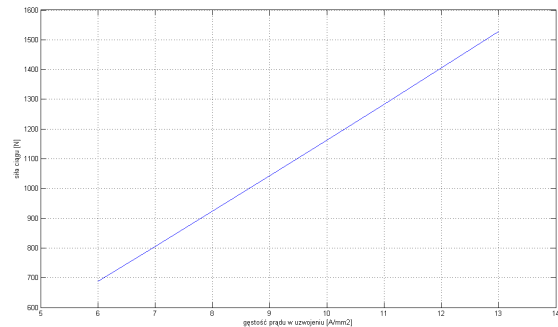
### 3. Analiza wybranego modelu

Dalszej analizie obliczeniowej ze względu na uzyskaną największą siłę poddano model tradycyjny przedstawiony na rysunku 21.



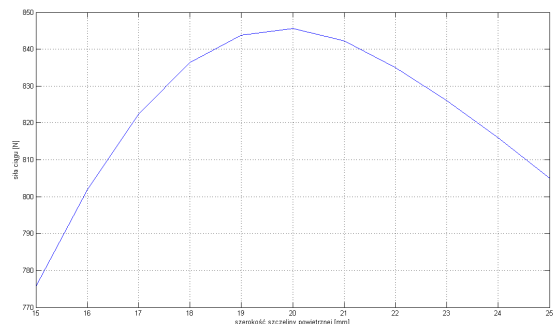
Rys.21. Model tradycyjny silnika synchronicznego z magnesami

Na rysunku 22 przedstawiono wykres zależności siły ciągu od gęstości prądu płynącego w uzwojeniu.



Rys. 22. Wykres zależności siły od gęstości prądu płynącego w uzwojeniu

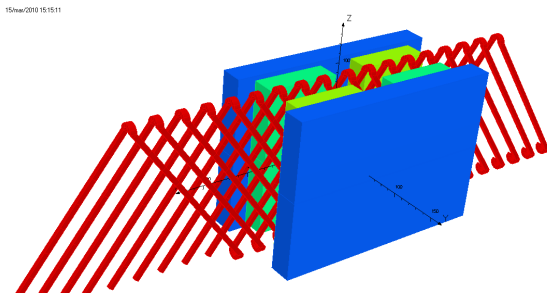
Z wykresu można wywnioskować, iż wartość siły zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości prądu w uzwojeniu. Na rysunku 23 przedstawiono wykres zależności siły ciągu od szerokości szczeliny. Optymalna szerokość dla analizowanego modelu wynosi 20 mm.



Rys. 23. Wykres zależności siły od szerokości szczeliny powietrznej

Kolejnym etapem prac nad projektem ma być wykonanie modelu przestrzennego badanego silnika oraz dalsza analiza wpływu wielkości konstrukcyjnych na parametry znamionowe silnika.

Na rysunku 24 przedstawiono przykładowy model przestrzenny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi z uzwojeniem trójkątnym.



Rys. 24. Model przestrzenny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

### Literatura

- [1] [www.ultraprt.com](http://www.ultraprt.com)
- [2] [www.vectusprt.com](http://www.vectusprt.com)
- [3] [www.ultraprt.com](http://www.ultraprt.com)
- [4] [www.citycoaster.com](http://www.citycoaster.com)
- [5] Gieras J.: *Silniki indukcyjne liniowe*, WNT Warszawa 1990
- [6] Rawa H.: *Podstawy Elektromagnetyzmu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1996

[7] Gieras J., Piech Z.: *Linear Synchronous Motors Transportation and automation Systems*, CRC Press 2000

Referat został napisany w ramach finansowania projektu ECO MOBILNOŚĆ.

### Autorzy

Prof. Dr hab. inż. Grzegorz Kamiński, Zakład Maszyn Elektrycznych Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20A 00-661 Warszawa, (4822) 234-73-35, [g.kamiński@ime.pw.edu.pl](mailto:g.kamiński@ime.pw.edu.pl)

Mgr inż. Tomasz Wygonowski, Zakład Maszyn Elektrycznych Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20A 00-661 Warszawa, (4822) 234-73-59, [wygi@op.pl](mailto:wygi@op.pl)

### Recenzent

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka