

doi:10.15199/48.2022.12.73

## Wykorzystanie zestawu wirujących magnesów stałych w układzie cylindra Halbacha do eliminacji tarcia w transporcie przemysłowym.

**Abstract.** Artykuł przedstawia ideę budowy platformy transportowej z zawieszeniem magnetycznym wykorzystującym prądy wirowe generowane poprzez poruszające się w ruchu obrotowym magnesy stałe. Oddziaływanie tego typu pozwala przy małych prędkościach przesuwania na ruch platformy nośnej bez uwzględnienia tarcia. Jednocześnie właściwości samohamowne urządzenia umożliwiają natychmiastowe zatrzymanie całości poprzez zatrzymanie ruchu obrotowego magnesów, a tym samym zatrzymanie procesu generowania prądów wirowych.

**Streszczenie** The article presents the idea of building a transport platform with magnetic suspension using eddy currents generated by rotating permanent magnets. An effect of this type allows the carrier platform to move at low sliding speeds without taking friction into account. At the same time, the self-braking properties of the device make it possible to stop the whole thing immediately by stopping the rotation of the magnets, and thus stopping the process of generating eddy currents. (The idea of building a transport platform with magnetic suspension using eddy currents generated by rotating permanent magnets)

**Keywords:** transport, levitation permanent magnet, Halbach's ring.

**Słowa kluczowe:** transport, lewitacja, magnes stały, pierścień Halbacha

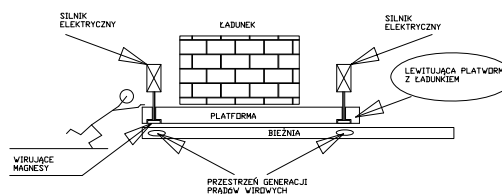
### Wprowadzenie

Wiele linii produkcyjnych wymaga przemieszczania elementów na kolejne stanowiska montażowe zarówno przy produkcji masowej jak i w przypadku produktów zamawianych indywidualnie [4]. Taśmy produkcyjne składają się z urządzeń pozwalających na mało uciążliwe przemieszczanie dużych ciężarów. Ideą niniejszej pracy jest konstrukcja urządzenia transportowego pracującego bez tarcia co pozwala na użycie siły ludzkiej do łatwego przemieszczania znacznych ciężarów. W tej sytuacji problemem staje się jedynie masa przesuwanego lub obracanego obiektu czyli moment lub siła bezwładności. Zjawisko tarcia istnieje praktycznie zawsze, w końcu elementy trą się nawet o powietrze. Przy małych prędkościach, jakie występują na linii produkcyjnej tarcie takie można pominąć. Jeżeli do zjawiska braku tarcia o powietrze dołączy się zawieszenie magnetyczne przemieszczanego ciężaru, można otrzymać bardzo sprawne urządzenia transportowe. Urządzenie pracujące bez tarcia powinno być jednak wyposażone w niezależny i pewny system hamowania który w przypadku konieczności zatrzymania obiektu jest w stanie zatrzymać się bez użycia dodatkowej energii. Działają niezawodnie bez zasilania. W projektowanym urządzeniu opisano proste rozwiązanie wykorzystujące powyższą zasadę.

### Macierz Halbacha jako metoda koncentracji pola magnetycznego magnesów stałych

W artykule przedstawiono ideę konstrukcji palety transportowej do użytku w warunkach przemysłowych. Do konstrukcji urządzenia zastosowano zestawy magnesów stałych pozwalające na koncentrację indukcji magnetycznej po wyróżnionej stronie zestawu magnesów stałych. Ideę urządzenia przedstawiono na rys.1., a specyficzne zestawienie magnesów znane jest powszechnie jako cylinder Halbacha. Układ taki pozwala na nierównomierny rozkład pola magnetycznego, zagęszczając indukcję B po określonej stronie zestawu magnesów. Właściwe ukierunkowanie polaryzacji magnesów stałych pozwala na zagęszczenie pola w miejscu gdzie można z niego najbardziej skorzystać. Jednocześnie układ taki zmniejsza strumień rozproszenia zestawu magnesów i zwiększa gęstość energii na określonej powierzchni urządzenia,

pozwalając na wytworzenie w tej przestrzeni większej wartości siły lub momentu obrotowego w konstruowanym urządzeniu elektromagnetycznym. Celem niniejszej pracy jest sprawdzenie skuteczności i opłacalności konstrukcji takiego zestawienia magnesów.



Rys. 1. Idea urządzenia transportowego

Rysunek przedstawia platformę urządzenia poruszającą się ponad bieżnią transportową. Bieżnia wykonana jest z materiału przewodzącego takim jak np. blacha miedziana, mosiężna. Na platformie zamontowane są cztery punkty podparcia magnetycznego z silnikami, wykorzystującymi cylindry Halbacha jako źródła pola magnetycznego dla generatorów prądów wirowych wytwarzanych w bieżni. Silniki kręcąc się powodują ruch magnesów stałych, na skutek czego pojawiają się prądy wirowe. Zastosowanie silników elektrycznych jest konieczne ze względu na konieczność pokonania momentu hamującego wywołanego powstawaniem prądów wirowych. Przepływ prądów wirowych wytwarza pole magnetyczne, które zgodnie z regułą przekory, wytwarza siłę odpychającą pole magnetyczne magnesów. Zjawisko to powoduje efekt lewitacji. Unoszona siłą odpychania platforma może być swobodnie przesuwana. Biorąc pod uwagę małą prędkość przesuwania, można pominąć siły tarcia powietrza. Przestrzeń generacji prądów wirowych wytwarzającą siłę nośną urządzenia zaznaczono dodatkowo na rysunku. Konstrukcja generatorów prądów wirowych przedstawiona została na rys. 2. Zastosowane silniki są dowolnego typu, niestety ze względu na konieczność ich zasilania, wymagają one połączenia z otoczeniem przy pomocy kabli elektrycznych. Dodatnią stroną tego rodzaju konstrukcji jest samohamowność takiego urządzenia. Wystarczy jedynie odłączyć energię elektryczną doprowadzoną do silników

elektrycznych, a silniki ulegną zatrzymaniu ze względu na oddziaływanie zanikających prądów wirowych, ich pole magnetyczne zaniknie, platforma przestanie być odpychana, a tarcie o bieżnię zatrzyma nawet silnie rozpędzoną paletę [5].

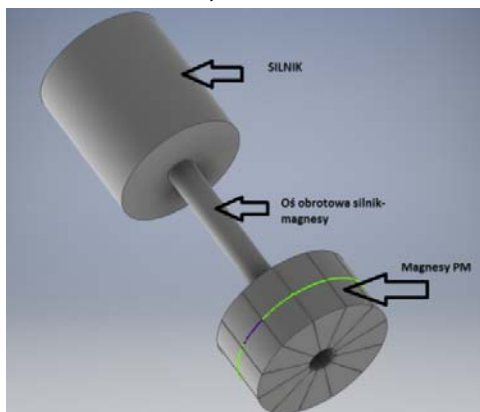
### Metodyka obliczeń

Systematyka obliczeń opiera się na Metodzie Elementów Skończonych. Analizowany obszar podzielono na  $5 \times 10^5$  elementów trójściennych i czworościennych w przestrzeni 3D. Ze względu na rozkład pól magnesów stałych składających się na pierścień Halbacha, dodatkowo poruszanych ruchem obrotowym, nie ma innej możliwości niż analiza 3D powyższego problemu. Do obliczeń wykorzystano program narzędziowy przy uwzględnieniu zerowych warunków brzegowych. Do obliczeń użyto programu ANSYS MAXWELL [1,2,3]. Szczególną uwagę zwrócono na obszary wrażliwe wokół szczeliny powietrznej badanego urządzenia, na ostrych i przewężonych elementach obwodu magnetycznego.

Symulację komputerową przeprowadzono w oparciu o Metodę Tensorów dla równania Maxwella [6]. Składowa normalna tej siły działając na promieniu  $r$  wytwarza moment elektromagnetyczny.

$$(1) \quad \vec{F} = \int_C \left[ \frac{1}{\mu_0} B(B \cdot \vec{n}) - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \cdot \vec{n} \right] dC$$

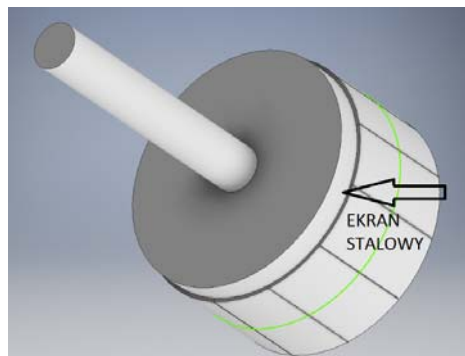
$$(2) \quad T = r * F_t$$



Rys. 2. Zespół magnesów cylindra Halbacha wraz z obracającym je silnikiem napędowym

Wielkości i wartości występujące we wzorach (1) i (2) oznaczają:  $B$  - chwilowe wartości obwodowego rozkładu indukcji w szczeliny  $B$  [ T ],  $n$  - jednostkowy wektor składowej normalnej prostopadłej do powierzchni wirnika,  $\mu_0$  - przenikalność magnetyczna próżni  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m]

Wielkość momentu wyliczana jest ze wzoru (5) przy uwzględnieniu promienia badanego wirnika, siły zaś przy użyciu wzoru (4). Zespół magnesów cylindra Halbacha przedstawiono na rys. 2. W celu polepszenia właściwości obwodu magnetycznego magnesów stałych, przestrzeń magnesów stałych zakończona jest pokrywą stalową. Przeprowadzono symulację komputerową zachowania tak pozwala na wyliczenie zachowania się badanego układu w czasie poruszania się wybranych elementów. Parametry ruchu dobrane przy planowaniu symulacji pozwalają na wyliczenia sił oraz momentów w warunkach zastosowania rzeczywistych silników elektrycznych zastosowanych przy budowie urządzenia. W symulacji eksperymentu przeprowadzono dwa rodzaje obliczeń: Magnetostatic, pozwalające na wyliczenie sił i rozkładów pól w urządzeniu w warunkach statycznych, bez ruchu, oraz

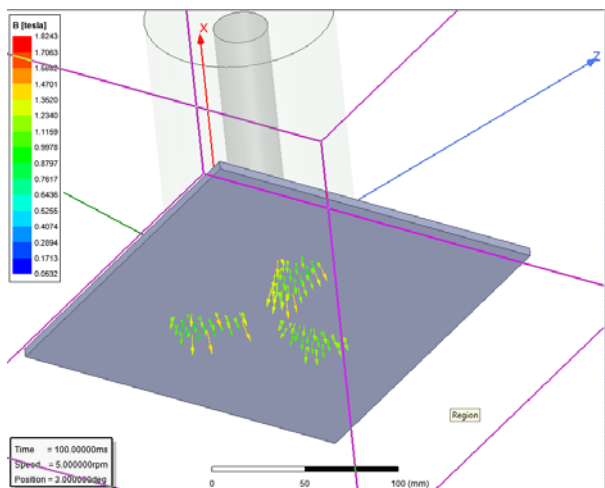


Rys.3. Dodatkowy ekran zmniejszający strumień rozproszenia magnesów stałych

Transient, gdzie przy założonych parametrach ruchu można policzyć efekt oddziaływania prądów wirowych na wielkości energii wywołanych w czasie ruchu, strat pojawiających się przy założonych prędkościach w urządzeniu oraz sił antygravitacyjnych dających informację o możliwościach transportowych projektowanego urządzenia. W symulacji porównano działania skuteczności zastosowania magnesów stałych w różnych konfiguracjach. Porównanie sił przy zastosowaniu specyficznego ułożenia polaryzacji magnesów tak jak w cylindrze Halbacha z innymi polaryzacjami magnesów, zachowaniem się układu przy różnych prędkościach obrotowych, zastosowaniem dodatkowego ekranu ferromagnetycznego we wszystkich przypadkach planowanego eksperymentu pozwoli na ocenę zachowania się badanego układu w czasie poruszania się wybranych elementów. Obliczenia Transient, pozwolą na ocenę sprawności magnesów przy różnych konfiguracjach ich zestawienia, sprawdzenia układów które dają najlepsze efekty zastosowania, metoda Transient pozwoli na ocenę zachowania się układu w ruchu. Przy założonych parametrach ruchu można policzyć efekt oddziaływania prądów wirowych ( Eddy current) wielkości energii wywołanych w czasie ruchu, strat pojawiających się przy założonych prędkościach w urządzeniu oraz sił antygravitacyjnych dających informację o możliwościach transportowych urządzenia. Dodatkowo zostanie sprawdzone oddziaływanie ekranów ferromagnetycznych zmniejszających negatywne oddziaływanie rozproszenia na efekty pracy magnesów stałych.

### Obliczenia Magnetostatic

Ukierunkowanie pól magnetostatycznych w magnesach stałych pierścienia Halbacha wymaga szczególnej staranności ze względu na duży wpływ niewłaściwej polaryzacji pola stałego na właściwości pierścienia Halbacha. W pierwszym rzędzie sprawdzono właściwą polaryzację magnesów stałych w pierścieniu. Program Ansys Maxwell umożliwiła ustawienie żądanej polaryzacji z uwzględnieniem ukierunkowania względem przestrzeni 3D (polaryzacja wektora względem trzech płaszczyzn). Po obliczeniu rozkładu pola w tak zestawionych i spolaryzowanych magnesach, otrzymano rozkład wektorów pola  $B$  wg wcześniej ustalonych założeń. Wybrano widok który w najbardziej jasny i zrozumiały sposób przedstawia polaryzację wektorów w badanym pierścieniu. Rozkład wektorów przenikających bieżnię przedstawiono na rys. 4. Zgodnie z przyjętymi założeniami wektory przenikają bieżnię w trzech wyróżnionych obszarach. Jest to zgodne z założeniami. Przyjęto asemblację pierścienia Halbacha złożoną z 12 magnesów. Ilość magnesów niezbędna do złożenia jednej części pierścienia to 4 odpowiednio spolaryzowane magnesy. Komplet 12 magnesów daje możliwość złożenia 3 częściowego pierścienia Halbacha.

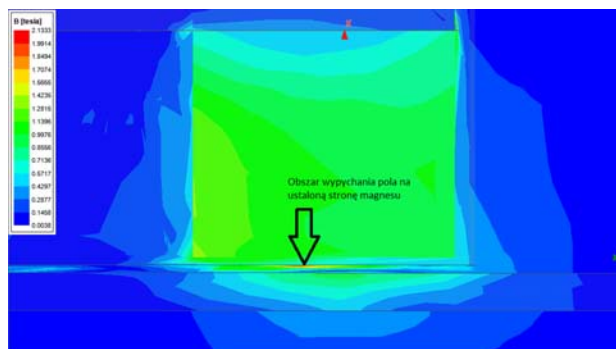


Rys.4. Widok wektorów pola B indukcji od strony -X (spodnia strona bieźni)

Na powierzchni spodniej bieźni można zaobserwować trzy wyróżniające się obszary. Wektory skierowane są prostopadle do powierzchni bieźni. Biorąc pod uwagę konieczność przenikania pola poprzez szczelinę powietrzną urządzenia począwszy od magnesów stałych poprzez pełną grubość bieźni, ze względu na mechanizm generowania prądów wirowych, można wysnuć wniosek, że jedynie nieco ponad 2/3 powierzchni bieźni w stosunku do powierzchni użytych magnesów bierze udział w generowaniu prądów wirowych. Pozostałe powierzchnie praktycznie nie biorą udziału w generowaniu sił odpychających powstałych w wyniku przepływu prądów wirowych w bieźni.

Dodatkowym problemem który pomniejsza oddziaływanie prądów wirowych na pole magnesów stałych, zmniejszając siłę odpychającą (unosząc platformę), jest zamykanie się pola magnesu stałego poprzez szczelinę powietrzną urządzenia. Pierścień Halbacha skonfigurowany w sposób właściwy wypycha z jednej strony magnesu przesuwając ją na drugą, wyróżnioną stronę. Pole koncentruje się w szczelinie i nie przechodzi przez materiał przewodzący. Nie generuje prądów wirujących a tym samym pomniejsza siłę odpychającą platformy. Na rys. 5 miejsce koncentracji pola w szczelinie zaznaczone jest strzałką. Natężenie pola zgodnie z opisem kolorów i indukcji B wskazuje zwiększone powyżej 1,9T natężenie pola. Jest to część energii, która w szczelinie ulega rozproszeniu. Strumień przepływa jedynie przez powietrze w szczelinie. Energia ta nie jest więc używana do generacji głównego zjawiska na którym nam zależy, czyli generacji prądów wirowych. Jedynie ta część pola która zostaje zmuszona do przejścia przez szczelinę jest w stanie wytworzyć prądy wirowe w bieźni, a tym samym wytworzyć siły odpychające, unoszące platformę. Na rys. 4 pokazana jest ta część strumienia którego droga na pewno przechodzi przez bieźnię. Zjawisko rozproszenia występuje praktycznie w każdej szczelinie maszyn elektrycznych pracujących ze szczeliną powietrzną.

Po przeciwnej stronie magnesu, miejscu wskazanym strzałką, występuje znaczne obniżenie natężenia pola. Udowadnia to tezę właściwego zestawienia magnesów stałych oraz ich prawidłowej polaryzacji przestrzennej przemieszczając strumień w założonym w projekcie kierunku. Zagęszczanie ma na celu koncentrację pola w wybranym miejscu w celu intensyfikacji wytwarzania prądów wirowych zwiększających siły nośne całej konstrukcji.

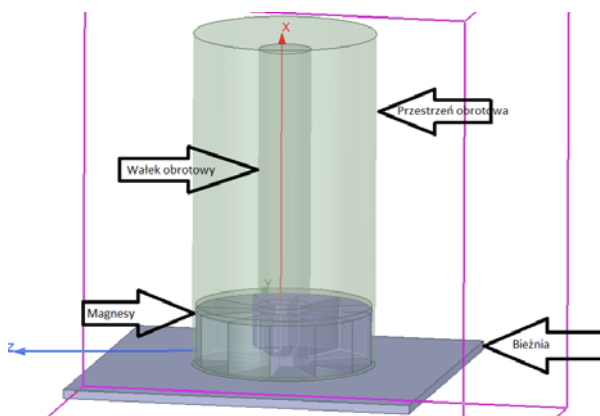


Rys. 5. Obszar wypychania pola na ustaloną stronę magnesu stałego

Zestawienie pól magnesów stałych należy więc uznać za właściwe. Nie ma praktycznej możliwości badania układu pierścienia Halbacha w przestrzeni 2D pozostawiając układ symulacji w bezruchu. Konieczność wprowadzenia atrybutu ruchu spowoduje wygenerowanie prądów wirowych, a analiza przestrzenna elementów skończonych, oraz sił oddziaływania pomiędzy poszczególnymi elementami pozwoli na analizę skuteczności działania założonego projektu.

### Obliczenia Transient.

Uruchomienie programu w trybie Transient wymaga wyznaczenia obszaru ruchu. W przypadku konstrukcji i symulacji rozpatrywanego projektu, obszar obracający się wyznacza przestrzeń wewnątrz której znajduje się oś obrotu, magnesy, oraz dekiel kształtujący obwód magnetyczny magnesów stałych. Obszar ten przedstawiono na rys. 6. Na rysunku zaznaczono przestrzeń obrotową, wałek obrotowy z przymocowanymi do niego magnesami stałymi oraz dekiel który kształtuje obwód magnetyczny magnesów stałych. Wszystkie te elementy w ruchu, są elementami obrotowymi. Bieźnia, zaznaczona na rys. 6 jest elementem nieruchomym w przestrzeni. Wykonana z materiału dobrze przewodzącego, wobec ruchu magnesów stałych jest obszarem w którym generowane są prądy wirowe. Program Ansys Maxwell pozwala na nadanie elementowi obrotowemu atrybutu prędkości obrotowej.



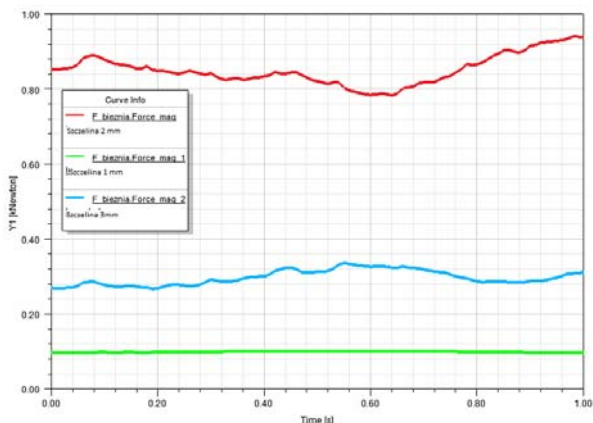
Rys. 6. Obszar Transient przygotowany do symulacji działania urządzenia w ruchu obrotowym.

Symulacja i obliczenia dla tak skonstruowanego obiektu może być dowolna ale musi nastąpić osobno dla każdej prędkości obrotowej którą chcemy symulować. Tak skonstruowany obiekt symulacji musi być liczony krok po kroku w przestrzeni symulacji. W przestrzeni 3 D wymagane jest wielokrotne obliczenie przebiegu przy

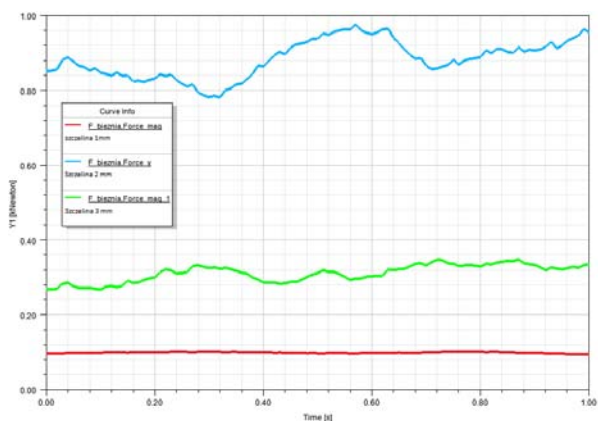
zmieniającej się prędkości obrotowej oraz wzajemnego fizycznego położenia elementów składowych urządzenia. W obliczeniach należy wziąć pod uwagę wielkość szczeliny, wielkość grubości bieźni, ruch obrotowy jednocześnie. Ilość obliczeń w tej sytuacji znacząco wzrasta.

### Wyniki symulacji

Symulacji dokonano dla zróżnicowanych prędkości obrotowych, oraz szczelin powietrznych. Zależność siły nośnej od czasu przy prędkości obrotowej 10rpm przedstawiono na rys. 7. Widać ewidentnie silne zróżnicowanie przebiegów i siły od wielkości szczeliny powietrznej. Zwraca uwagę fakt, że maksymalna siła nośna występuje przy szczelinie 2 mm. Przy szczelinie powiększonej do 3mm siły nośne stanowią 1/3 wielkości uzyskanej maksymalnie. Zjawisko wynika z maksymalnej ilości energii pola przenikającej przez bieźnię, co powoduje wytworzenie mniejszych prądów wirowych generujących siłę nośną konstruowanej platformy.



Rys. 7. Przebieg zależności siły nośnej od czasu dla prędkości obrotowej 10rpm, szczelina 1, 2 oraz 3mm



Rys. 9. Przebieg zależności siły nośnej od czasu dla prędkości obrotowej 20rpm, szczelina 1,2 oraz 3 mm

Zwiększona szczelina powoduje większy przepływ strumienia rozproszenia, co pociąga za sobą generowanie znacznie mniejszych sił nośnych platformy. Na rys. 9 przedstawiono przebiegi siły nośnej urządzenia w zależności od czasu przy prędkości obrotowej równej 20rpm. Główne zależności przebiegają analogicznie. Oznacza to że oddziaływanie szczeliny jest decydujące, i wielkość nośności nie ulega zasadniczo zmianie. Z przebiegów można zauważyć zwiększającą się nierównomierność siły nośnej. Powiązane jest to ze skokową zmianą kierunku pola magnetycznego ze względu na specyficzne zestawienie magnesów przy asemblacji pierścienia Halbacha.

### Podsumowanie

Po przeprowadzonych symulacjach projektowanego urządzenia platformy transportowej, w której siły nośne generowane przy pomocy pierścienia Halbacha koncentrują pole magnetyczne w wybranym przez konstruktorów miejscu, dającym nadzieję uzyskania powiększenia należy stwierdzić co następuje :

- Zastosowanie pierścienia Halbacha nie daje dodatkowych efektów związanych ze zwiększeniem gęstości pola w wybranym przez konstruktorów kierunkach. Konstrukcja pierścienia powoduje powiększenie strumienia rozproszenia. W rozpatrywanym przypadku rozproszenie strumienia polega głównie na zamykaniu drogi strumienia w szczelinie powietrznej bez jego przepływu przez materiał (miedź) w którym potencjalnie mogą powstać prądy wirowe generujące siłę nośną urządzenia. Należałoby zintensyfikować przepływ strumienia w kierunku bieźni. Przy zastosowaniu pierścienia Halbacha jako elementu koncentracji energii jest to mało efektywne.

- Brak obwodu magnetycznego wokół składających się na pierścień Halbacha powoduje dodatkowe straty powiązane z rozproszeniem strumienia. Droga strumienia zamyka się przez materiał magnetyczny z którego konstruowane są magnesy (neodym). Skuteczność takich magnesów ulega obniżeniu. - Materiały z których budowane są magnesy (neodym) mają bardzo dobrą przewodność, co może być przyczynkiem do powiększania strat przy tego rodzaju przetwarzaniu energii.

Podsumowując Autorzy uważają że zastosowanie pierścienia Halbacha do koncentracji strumienia może być mało efektywne. Znane są inne układy konstrukcji magnesów stałych z użyciem dodatkowego obwodu magnetycznego formującego drogę strumienia i zwiększające intensywność użytkowania strumienia magnetycznego (koncentrator magnetyczny, zestawienie magnesów stałych z obwodem ferromagnetycznym typu 'sandwich'). Ukierunkowanie strumienia i skierowanie go w obszar gdzie może być użyty ze znacznie większym skutkiem, ( zwiększenie siły, momentu) jest ogólnie znane, i szeroko prezentowane w literaturze. W następnych pracach Autorzy zamierzają zaproponować inne rozwiązania.

### Podziękowanie :

Autorzy wyrażają głęboką wdzięczność Politechnice Częstochowskiej a w szczególności MSK CzestMAN za przyznanie dostępu do infrastruktury obliczeniowej zbudowanej w ramach projektów PLATON nr. POIG.02.03.00-00-028/08 - usługa obliczeń kampusowych U3 oraz MAN-HA nr. POIG.02.03.00-00-110/13 - "Realizacja w MAN-ach usług krytycznych o wysokim poziomie niezawodności".

Obliczenia do niniejszego artykułu wykonano dzięki dostępie do niniejszej struktury

### Authors :

dr inż. Krzysztof Szewczyk, Independent. 42-271 Częstochowa, ul. Zdrowa 47, szewczyk500@gmail.com  
 dr inż. Tomasz Walasek, Politechnika Częstochowska, WIMil, al. A.Krajowej 21, 42-200 Częstochowa, tomasz.walasek@gmail.com  
 dr hab. inż. Marek Lis Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, marek.lis@pcz.pl.

### LITERATURA

- [1] Maxwell 15.0 application User's Guide
- [2] Ansys 14.0 application User's Guide
- [3] WorkBench 14 application User's Guide
- [4] T.Machula Praca doktorska : Opracowanie metody ciągłej analizy stanu technicznego taśm przenośnikowych z linkami stalowymi, AGH Kraków 2011r
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=pCON4zfMzJU&t=3s>