

doi:10.15199/48.2024.02.10

Zagadnienie doboru proporcji geometrycznych cewek wzbudzenia w liniowym cylindrycznym silniku synchronicznym z magnesem trwałym jako biegnikiem

Streszczenie. Artykuł poświęcony jest doborowi optymalnych proporcji cewek wzbudzenia w liniowym cylindrycznym silniku synchronicznym z magnesem trwałym, przeznaczonym do napędu liniowej pompy tłokowej. Metoda doboru bazuje na obliczeniach połowych, przeprowadzonych w programie FEMM 4.2. W centrum uwagi znalazło się sformułowanie kryterium optymalizacyjnego, biorącego pod uwagę nie tylko maksymalną wartość rozwijanej siły elektromagnetycznej, ale również płynność ruchu biegnika.

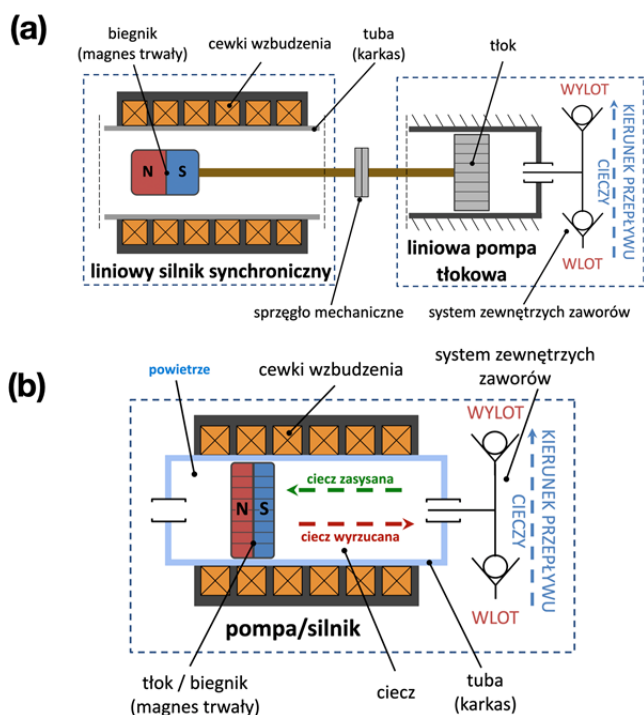
Abstract. This paper is dedicated to the choice of the optimum excitation coil ratio in a linear cylindrical PM synchronous motor for driving a linear piston pump. The selection method is based on field calculations carried out in FEMM 4.2. The focus is on the formulation of an optimization criterion, taking into account not only the maximum value of the electrodynamic force developed but also the smoothness of the runner motion. (The issue of selecting the geometric proportions of excitation coils in a linear cylindrical synchronous motor with a permanent magnet as a running gear)

Słowa kluczowe: liniowy silnik synchroniczny z magnesem trwałym, liniowa pompa tłokowa, obliczenia połowe siły elektromagnetycznej, optymalizacja proporcji cewek wzbudzenia.

Keywords: PM linear synchronous motor, linear piston pump, electrodynamic force field calculations, optimization of excitation coil ratio.

Wstęp

Artykuł podejmuje zagadnienie doboru optymalnych proporcji cewek wzbudzenia w liniowym synchronicznym silniku z magnesem trwałym, przeznaczonym do napędu liniowej pompy tłokowej. Taki silnik synchroniczny może być napędem zewnętrznym, autonomicznym w stosunku do pompy, tak jak to pokazano na rysunku 1a, ale może być również napędem konstrukcyjnie zintegrowanym z liniową pompą tłokową, którą to koncepcję ilustruje rysunek 1b. Szczegółowo zostało to omówione w [1] na tle innych istniejących rozwiązań pomp elektromagnetycznych [2][4].

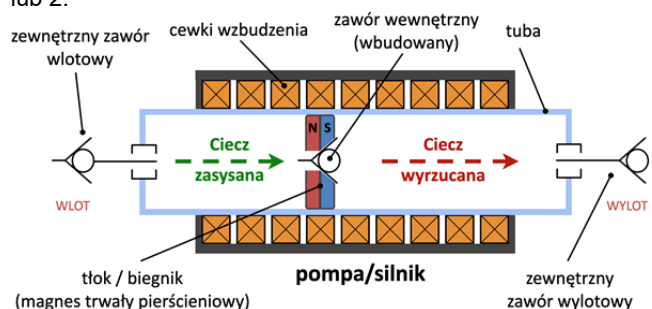


Rys.1. Możliwe rozwiązania konstrukcyjne dla liniowej pompy tłokowej napędzanej liniowym silnikiem synchronicznym z magnesem trwałym (a) liniowy silnik synchroniczny jako napęd zewnętrzny (b) liniowy silnik synchroniczny z magnesem trwałym pastylkowym zintegrowany z liniową pompą tłokową.

W przypadku zastosowania w miejsce pastylkowego magnesu trwałego magnesu trwałego pierścieniowego istnieje możliwość wydatnego zwiększenia wydajności pompy poprzez zastosowanie dodatkowego zaworu wbudowanego w środek pierścieniowego magnesu trwałego.

Takie rozwiązanie konstrukcyjne jest pokazane na rysunku 2: dzięki dodatkowemu zaworowi wewnętrznemu, ułożonemu w środku magnesu trwałego, jest możliwa równoczesna realizacja procesu zasysania i wyrzucania pompowanej cieczy.

W niniejszym artykule autorzy rozważają liniowy silnik synchroniczny, który może być wykorzystany w liniowej pompie tłokowej w sposób, przedstawiony na rysunkach 1b lub 2.



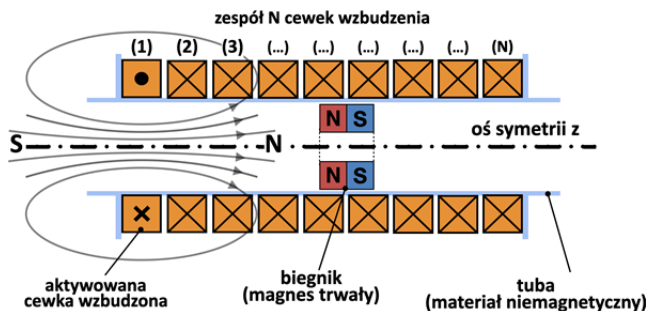
Rys.2. Liniowy silnik synchroniczny z magnesem trwałym pierścieniowym zintegrowany z liniową pompą tłokową z dodatkowym zaworem wewnętrznym.

Schemat ideowy silnika

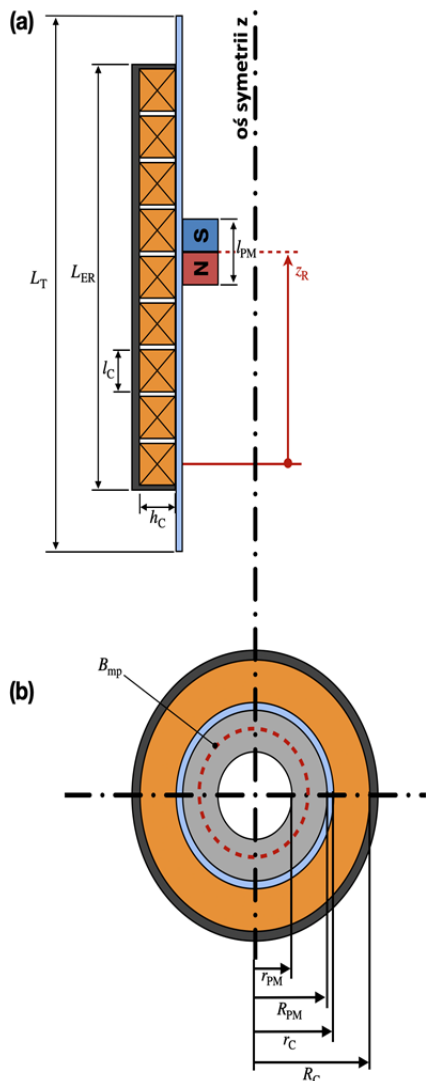
Schemat ideowy cylindrycznego silnika liniowego z biegnikiem aktywnym o N cewkach wzbudzeniach przedstawiono na rysunku 3.

Jego zasadnicze elementy to: tuba (wykonano z materiału niemagnetycznego), zespół N cewek wzbudzenia, rozmieszczonych równomiernie wzdłuż cylindra (na rysunku 1 przyjęto $N = 6$, zaś na rysunku 2 — $N = 9$) oraz biegnik, którym jest pierścieniowy neodymowy magnes trwały.

Na przekroju wzdłużnym przedstawionym na rysunku 4a ($N = 9$), zaznaczono wymiary geometryczne wzdłużne, zaś na przekroju poprzecznym na rysunku 4b naniesiono wymiary promieniowe.



Rys.3. Schemat ideowy cylindrycznego silnika liniowego z biegnikiem aktywnym o N cewkach wzbudzenia.



Rys.4. Wymiary geometryczne zintegrowanej pompy elektromagnetycznej (a) przekrój wzdłużny pompy (b) przekrój poprzeczny pompy z zaznaczoną linią środkową pierścienia magnesu trwałego (kolor czerwony).

Wymiary geometryczne wzdłużne (rysunek 4a) to: długość pojedynczej cewki wzbudzenia l_C , długość magnesu trwałego l_{PM} oraz długość tuby L_T i długość strefy aktywnej wzbudzenia (*ang. excitation region*) L_{ER} . Wymiary geometryczne promieniowe (rysunek 4b) to: promień wewnętrzny cewki wzbudzenia r_C , promień zewnętrzny cewki wzbudzenia R_C , promień wewnętrzny pierścienia magnesu trwałego r_{PM} oraz promień zewnętrzny pierścienia magnesu trwałego R_{PM} . Średnica zewnętrzna magnesu trwałego jest praktycznie równa

średnicy wewnętrznej tuby. Niewielka różnica w ich wymiarach jest niezbędna dla zapewnienia swobodnego ruchu biegnika wzdłuż cylindra oraz zapobiegnięcia jego zatarciu się w cylindrze (jest to tzw. połączenie suwliwe). Dla dalszych rozważań wygodnie jest wprowadzić oznaczenie wysokości cewki wzbudzenia h_C :

$$h_C = R_C - r_C.$$

(1)

Oznaczenie to uwidoczniło na rysunku 4a.

Dobór magnesu trwałego oraz powierzchni przekroju poprzecznego cewki wzbudzenia

Jak wspomniano wcześniej, przewidywane zastosowanie rozpatrywanego silnika liniowego to układ napędowy liniowej pompy tłokowej.

Punktem wyjścia przy projektowaniu pompy jest przyjęcie wyrotowej objętości komory pompy (ściśle związane z długością i średnicą wewnętrzną tuby), a z punktu widzenia elektrycznego — dobór liczby cewek wzbudzenia N oraz dobór odpowiedniego magnesu trwałego. Magnes trwały musi mieć proporcje właściwe dla tłoka pompy, rozwijać możliwie dużą siłę we współdziałaniu z cewkami wzbudzenia, a równocześnie charakteryzować się możliwie małą masą [3][4]. Dla projektowanego prototypu pompy przyjęto pierścieniowy neodymowy magnes trwały, oznaczony symbolem N38, charakteryzujący się następującymi danymi:

- gęstość energii magnetycznej $(BH)_{max} = (286 - 302) \text{ kJ/m}^3$,
- indukcja remanentu $B_r = (1,21 - 1,25)T$,
- koercja $H_c = 955 \text{ kA/m}$,
- indukcja magnetyczna wzdłuż linii środkowej pierścienia magnesu trwałego, zaznaczona na rysunku 4b kolorem czerwonym (*ang. midposition line*) $B_{mp} = 0,446T$,
- masa $m_{PM} = 65,71 \text{ g}$,
- objętość $V_{PM} = 1,13 \text{ cm}^3$
- promień wewnętrzny $r_{PM} = 22 \text{ mm}$,
- promień zewnętrzny $R_{PM} = 40 \text{ mm}$,
- długość $l_{PM} = 10 \text{ mm}$.

Przekrój poprzeczny pierścienia magnesu trwałego S_{PM} (będący prostokątem) wynosi:

$$(2) \quad S_{PM} = l_{PM} \cdot (R_{PM} - r_{PM}) = 80 \text{ mm}^2.$$

Kierując się wstępnymi obliczeniami magnetycznymi i wstępnymi badaniami laboratoryjnymi, jak też biorąc pod uwagę wytyczne związane z projektowaniem małych maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi przyjęto, że przekrój poprzeczny cewki wzbudzenia określony relacją S_C :

$$(3) \quad S_C = l_C \cdot (R_C - r_C) = l_C \cdot h_C,$$

będzie o 25% większy od przekroju poprzecznego pierścienia magnesu trwałego czyli będzie wynosił $S_C = 1,25 \cdot S_{PM} = 100 \text{ mm}^2$.

Wyznaczanie siły elektromagnetycznej metodą polową oraz założenia dla procesu doboru optymalnych proporcji cewek wzbudzenia

Obliczenia przestrzennego rozkładu pola magnetycznego oraz wartości siły elektromagnetycznej F działającej na biegnik w funkcji jego położenia dla układu przedstawionego na rysunku 4a przeprowadzono w programie FEMM 4.2. Jest to najnowsza wersja

oprogramowania FEMM (ang. *Finite Element Method Magnetics*) udostępniona w kwietnia 2019r., która jest szeroko wykorzystywanym open-source'owym oprogramowaniem, umożliwiającym wyznaczanie rozkładów przestrzennych pola elektromagnetycznego 2D oraz obliczanie sił elektromagnetycznych. Oprogramowanie to posiada solver obliczeniowy oparty o metodę elementów skończonych przeznaczony do rozwiązywania problemów z dziedziny elektromagnetyzmu oraz przepływu ciepła.

Odległość środka biegnika od środka cewki wzbudzenia określa współrzędna przestrzenna z_R , uwidoczniiona na rysunku 4a. Celem obliczeń polowych jest wyznaczenie rozkładu wartości siły elektromagnetycznej F działającej na biegnik silnika wzdłuż osi z_R : $F = f(z_R)$.

Przyjęto, że przesunięcie tłoka wzdłuż osi z_R będzie się dokonywało w sposób dyskretny z krokiem $\Delta z_R = 0,5mm$. Przy przyjętym zakresie przesunięcia biegnika 20mm i tak przyjętym kroku dyskretyzacji 0,5mm liczba punktów, dla których jest wyznaczana wartość siły elektromagnetycznej wynosi 40.

Maksymalna wartość prądu wzbudzenia cewki I_{max} jest podyktowana wymaganiami, związanymi z układem zasilania: $I_{max} = 0,7A$, co po przyjęciu gęstości prądowej $4A/mm^2$ determinuje przekrój poprzeczny czynny przewodu nawojowego cewki wzbudzenia. Dobry kołowy przewód nawojowy na podstawie znormalizowanego systemu AWG (ang. *American Wire Gauge*) to przewód AWG26: jego średnica wynosi $0,405mm$. Znajomość średnicy przewodu i współczynnika wypełnienia cewki wzbudzenia ($k = 74\%$) pozwala na określenie liczby zwojów n pojedynczej cewki: $n = 576$.

Przy tej liczbie zwojów i maksymalnej wartości prądu wzbudzenia $I_{max} = 0,7A$ wartość siły magnetomotorycznej pojedynczej cewki wzbudzenia (przepływu cewki) wynosi 403,2 amperozwojów.

Dobór optymalnych proporcji cewki wzbudzenia, a więc stosunku wysokości cewki do jej długości ($h_C:l_C$) jest realizowany przy kluczowym założeniu, że przekrój cewki S_C nie będzie ulegał zmianie (jest stały): $S_C = h_C \cdot l_C = const$, co przy założonej jednakowej gęstości prądowej i jednakowej wartości współczynnika wypełnienia cewki sprowadza się do założenia tej samej wartości siły magnetomotorycznej, wynoszącej 403,2 amperozwojów.

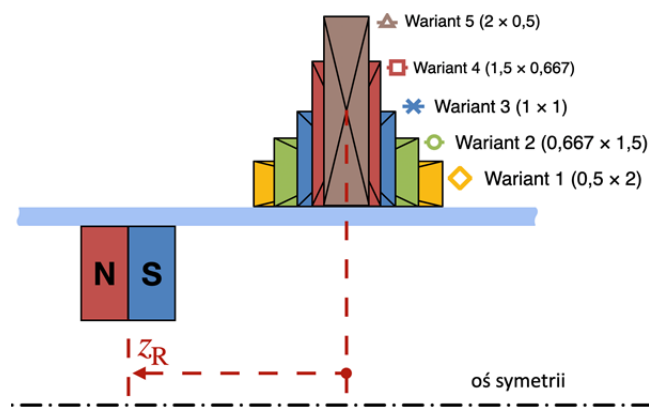
Rozważonych zostanie 5 wariantów cewek wzbudzenia, charakteryzujących się różnymi stosunkami wysokości cewek h_C do ich długości l_C .

Te analizowane warianty zestawiono w tabeli 1 oraz zilustrowano graficznie na rysunku 5. Tabelę 1 uzupełniono, podając dodatkowo dla poszczególnych wariantów objętość cewki wzbudzenia z izolacją V_C oraz masę miedzi użytej do nawinięcia cewki m_{Cu} . Stosunek masy miedzi m_{Cu} do masy magnezu trwałego m_{PM} mieści się w zakresie: $\frac{m_{Cu}}{m_{PM}} = (2,89 - 3,38)$.

Tabela 1. Zestawienie wymiarów geometrycznych dla rozpatrywanych wariantów cewek wzbudzenia ich objętości z izolacją oraz masy miedzi.

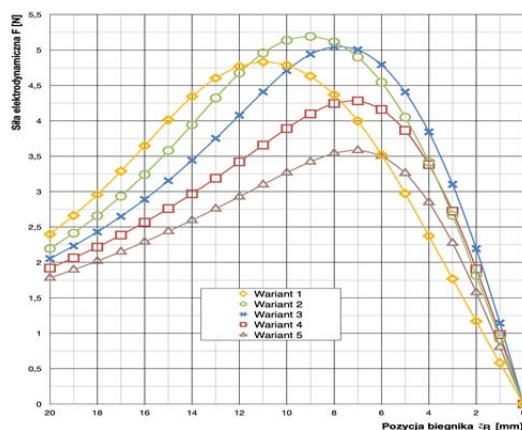
Nazwa	h_C [mm]	l_C [mm]	V_C [cm ³]	m_{Cu} [g]
Wariant 1 (0,5 × 2)	5	20	28,7	190
Wariant 2 (0,67 × 1,5)	6,7	15	29,2	194
Wariant 3 (1 × 1)	10	10	30,3	201
Wariant 4 (1,5 × 0,67)	15	6,7	31,9	211
Wariant 5 (2 × 0,5)	20	5	33,4	222

Dla wszystkich wariantów z tabeli 1 wyznaczono rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia przy maksymalnym dopuszczalnym prądzie wzbudzenia $I_{max} = 0,7A$.



Rys.5. 5 wariantów cewek wzbudzenia o różnym stosunku długości l_C do wysokości h_C przy zachowaniu tej samej powierzchni przekroju poprzecznego: $S_C = h_C \cdot l_C = const$.

Biegnik był przemieszczany z pozycji początkowej $z_R = 0$ do pozycji $z_R = 20mm$ (ta maksymalna rozpatrywana wartość współrzędnej $z_R = 20mm$ jest równa długości najdłuższej rozpatrywanej cewki wzbudzenia). Otrzymane na drodze obliczeń polowych funkcje rozkładu sił $F = f(z_R)$ zestawiono na wspólnym rysunku 6.



Rys.6. Rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia $F = f(z_R)$ dla 5 wariantów cewek wzbudzenia.

Kryteria doboru optymalnych proporcji cewek wzbudzenia i wskazanie wariantu optymalnego

Jak jest to widoczne na rysunku 6, maksymalne wartości rozwijanych sił są różne dla różnych wariantów cewek i różne są też wartości współrzędnych przestrzennych z_R , przy których te maksymalne wartości sił występują. Wartość współrzędnej przestrzennej, która odpowiada maksymalnej wartości siły, będzie dalej oznaczana przez z_{Rmax} .

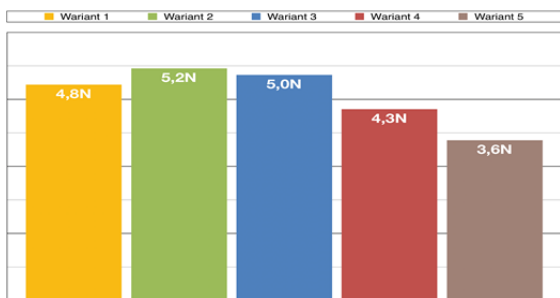
Wartości maksymalne sił działających na biegnik F_{max} oraz wartości współrzędnych z_{Rmax} , przy których te wartości występują, zestawiono razem w tabeli 2.

Jest oczywiste, że im większa maksymalna wartość rozwijanej siły, tym większe będą wartości maksymalne przyspieszeń biegnika. Wartości maksymalne sił dla 5-ciu

rozpatrywanych wariantów cewek wzbudzenia zestawiono również w postaci wykresu słupkowego na rysunku 7. Z tabeli 2 i rysunku 7 wynika, że z punktu widzenia siły maksymalnej działającej na biegnik, najkorzystniejszy byłby wariant 2.

Tabela 2. Zestawienie wartości maksymalnej siły elektromagnetycznej F_{max} dla 5 wariantów cewek wzbudzenia.

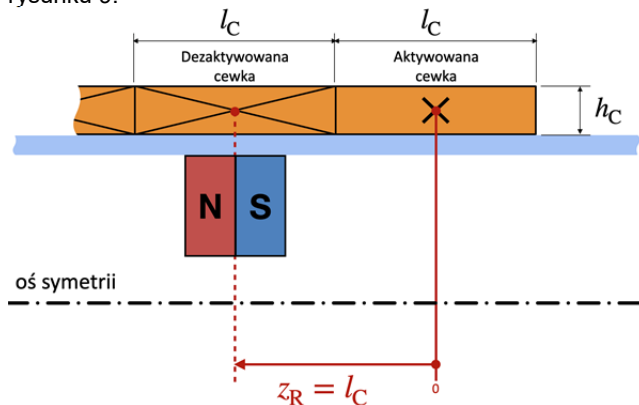
Nazwa	z_{Rmax} [mm]	F_{max} [N]
Wariant 1 (0,5 × 2)	11	4,79
Wariant 2 (0,67 × 1,5)	9	5,16
Wariant 3 (1 × 1)	8	5,03
Wariant 4 (1,5 × 0,67)	7	4,27
Wariant 5 (2 × 0,5)	7	3,57



Rys. 7. Wartość maksymalna siły elektromagnetycznej F_{max} dla 5 wariantów proporcji cewek.

Jednakże należy zwrócić uwagę, że dla zapewnienia płynnego ruchu tłoka biegnika kluczowe znaczenia będzie miała wartość siły działającej na biegnik w chwili, w której następuje przełączanie cewek. Wynika to z tego, że cewka wzbudzenia napędzająca biegnik musi być wyłączona (dezaktywowana) w chwili, w której biegnik znajdzie się w połowie jej długości. W tej samej chwili musi być aktywowana (załączona) kolejna sąsiadująca cewka, a ważne znaczenie dla płynności ruchu będzie miało to, jak duża będzie wartość siły działającej na biegnik, pochodząca od nowo aktywowanej cewki. Położenie biegnika w stosunku do cewki aktywowanej w chwili przełączania cewek wzbudzenia, ilustruje rysunek 8.

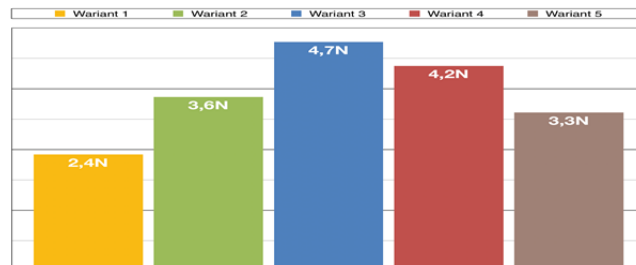
Zgodnie z tym co napisano, biegnik w chwili przełączania cewek znajduje się w pozycji $z_R = l_C$. Z punktu widzenia płynności ruchu biegnika wskazane jest, aby wartość siły działającej na biegnik w chwili przełączania (pochodząca od nowo aktywowanej cewki) była możliwie duża. Wartości tej siły, czyli: $F(z_R = l_C)$ dla wszystkich 5-ciu rozpatrywanych wariantów zestawiono w tabeli 3 oraz zilustrowano graficznie w postaci wykresu słupkowego na rysunku 9.



Rys. 8. Położenie biegnika w chwili przełączania cewek wzbudzenia: $z_R = l_C$ (aktywowana cewka wzbudzenia jest wyłączana w chwili, w której biegnik znajdzie się w połowie jej długości i w tej samej chwili włączana jest cewka kolejna)

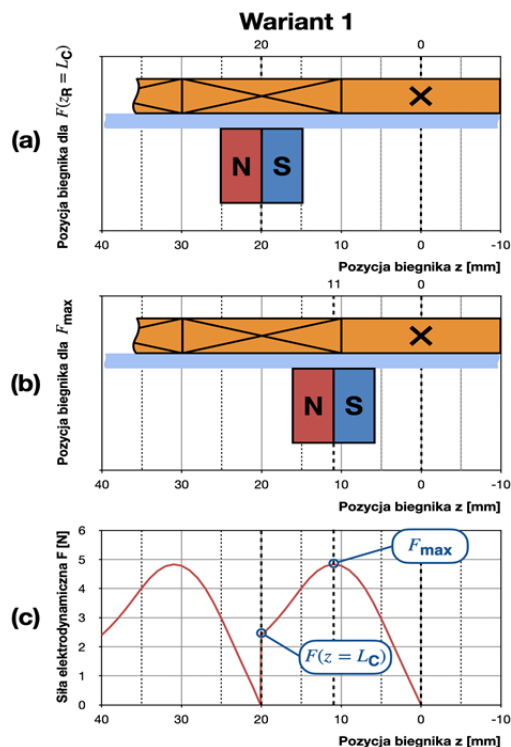
Tab. 3. Zestawienie wartości siły elektromagnetycznej w pozycji $F(z_R = l_C)$ dla 5 wariantów cewek wzbudzenia.

Nazwa	$F(z_R = l_C)$ [N]
Wariant 1 (0,5 × 2)	3,21
Wariant 2 (0,67 × 1,5)	4,27
Wariant 3 (1 × 1)	4,72
Wariant 4 (1,5 × 0,67)	3,61
Wariant 5 (2 × 0,5)	2,42

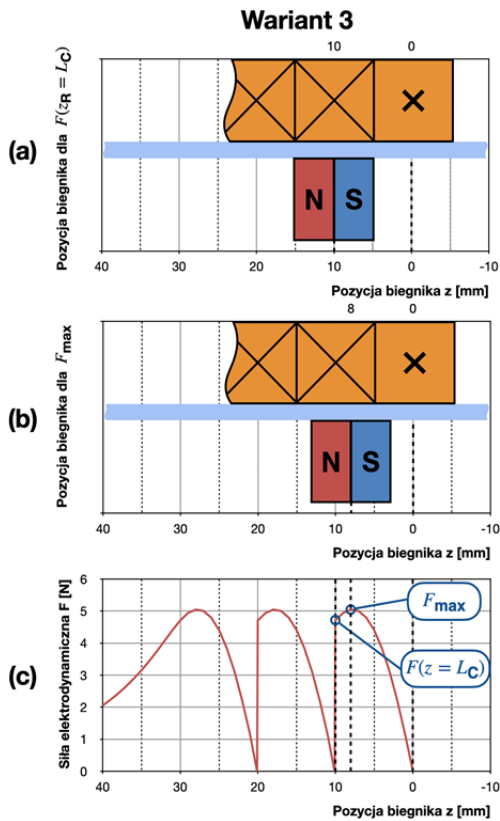


Rys. 9. Siła elektromagnetyczna w chwili przełączania $F(z_R = l_C)$ dla 5 wariantów proporcji cewek

Przedstawione powyżej rozważania pokazują, że dla dokonania doboru optymalnych proporcji cewki wzbudzenia należy wziąć pod uwagę dwie charakterystyczne wartości siły: wartość maksymalną siły F_{max} (występującą przy współrzędnej z_{Rmax}) oraz wartość siły w chwili przełączania cewek (występującą przy wartości współrzędnej $z_R = l_C$). Te dwie wyróżnione wartości siły: F_{max} oraz $F(z_R = l_C)$, występujące przy dwóch charakterystycznych położeniach biegnika: $z_R = z_{Rmax}$ i $z_R = l_C$, przedstawiono dla dwóch wariantów: wariantu 1 i wariantu 3 odpowiednio na rysunkach 10 i 11.



Rys. 10. Dwa wyróżnione charakterystyczne położenia biegnika dla wariantu cewki wzbudzenia 1: (a) pozycja $z_R = l_C$ (b) pozycja z_{Rmax} (c) rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia.

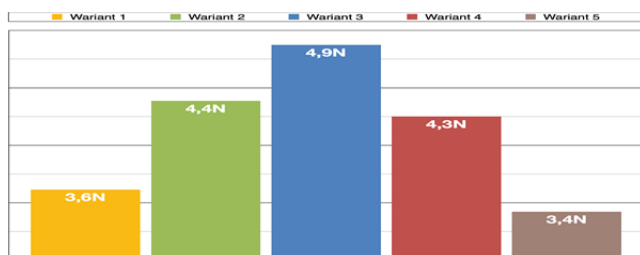


Rys.11. Dwa wyróżnione charakterystyczne położenia biegnika dla wariantu cewki wzbudzenia 3: (a) pozycja $z_R = l_C$ (b) pozycja z_{Rmax} (c) rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia.

Ze względu na to, że pożądana jest jak największa wartość siły F_{max} i jak największa wartość siły w momencie przełączenia cewek $F(z_R = l_C)$, zdecydowano się przyjąć dla doboru optymalnych wymiarów geometrycznych cewki funkcję celu (kryterium jakości) w postaci średniej arytmetycznej obu tych sił:

$$(4) \quad Q_A = f(F(z_R = l_C), F_{max}) = \frac{F(z_R=l_C) + F_{max}}{2} \rightarrow max$$

Wartość tej średniej dla 5-ciu rozpatrywanych wariantów cewek w postaci wykresu słupkowego przedstawiono na rysunku 12.



Rys.12. Funkcja celu Q_A (średnia arytmetyczna) dla 5 wariantów proporcji cewek.

Jak widać na rysunku 12, optymalny jest wariant 3, charakteryzujący się proporcją wymiarów geometrycznych $h_C : l_C$ równą 1 : 1.

To, że jest to właściwy wybór, również z punktu widzenia wykorzystania miedzi, dobitnie potwierdza rysunek 13, na którym zestawiono wartości współczynnika „siła przypadająca na jednostkę masy miedzi” (ang. force per

copper mass) $\frac{Q_A}{m_{Cu}}$ dla wszystkich rozważanych 5 wariantów.



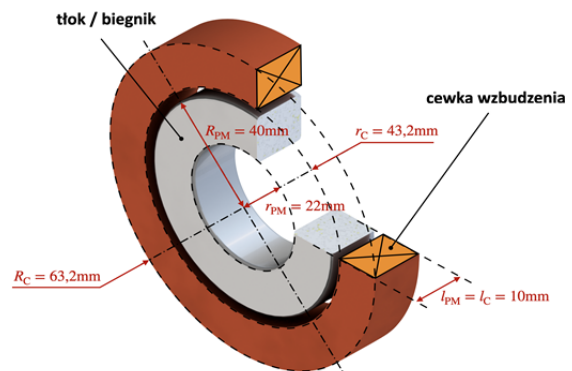
Rys.13. Współczynnik „siła przypadająca na jednostkę masy miedzi” (ang. force per copper mass) $\frac{Q_A}{m_{Cu}}$ dla wszystkich rozważanych 5 wariantów.

W tabeli 4 zestawiono dla wybranego wariantu wszystkie wymiary geometryczne, charakteryzujące jego budowę, a na rysunku 14 przedstawiono wizualizację przestrzenną wybranej cewki (biegnik w położeniu $z_R = 0$).

Tab.4. Zestawienie wymiarów geometrycznych dla wybranej cewki wzbudzenia (wariant 3) oraz przyjętego biegnika pompy (magnesu trwałego)

Symbol wymiaru	Wartość [mm]
r_{PM}	22,0
R_{PM}	40,0
r_C	43,2
R_C	63,2
l_{PM}	10,0
l_C	10,0

Dodatkowo, dla wybranego optymalnego wariantu wyznaczono rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia dla prądu wzbudzenia cewki $I_{max} = 0,7A$ w znacznie rozszerzonym zakresie współrzędnej przestrzennej: $z_R \in \langle -0; 80 \rangle mm$ i przedstawiono go na rysunku 14.

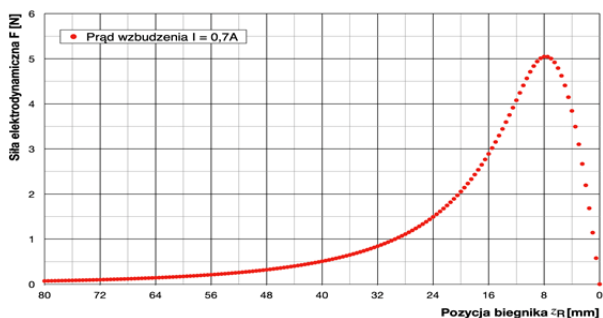


Rys.14. Wymiary geometryczne cewki i magnesu trwałego: r_{PM} — promień wewnętrzny tłoka/biegnika; R_{PM} — promień zewnętrzny.

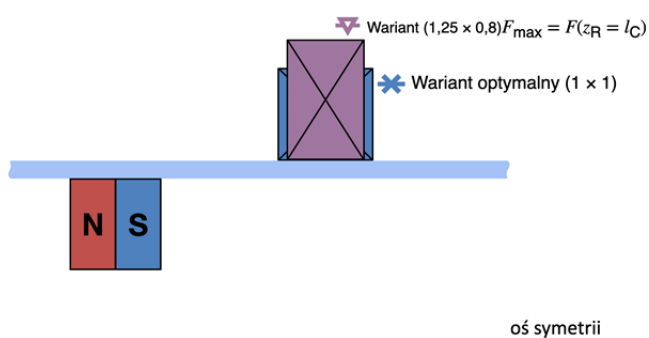
W kontekście rysunku 10c i 11c można postawić pytanie, czy jest możliwe takie ukształtowanie cewki wzbudzenia, aby siła działająca na biegnik w chwili przełączenia cewek była równa wartości siły maksymalnej: $F_{max} = F(z_R = l_C)$.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych stwierdzono, że przypadek taki występuje przy wymiarach cewki: $h_C = 12,5mm$ i $l_C = 8mm$ (proporcji 1,25 : 0,8).

Wariant cewki wzbudzenia $F_{max} = F(z_R = l_C)$ przedstawiono na rysunku 15.



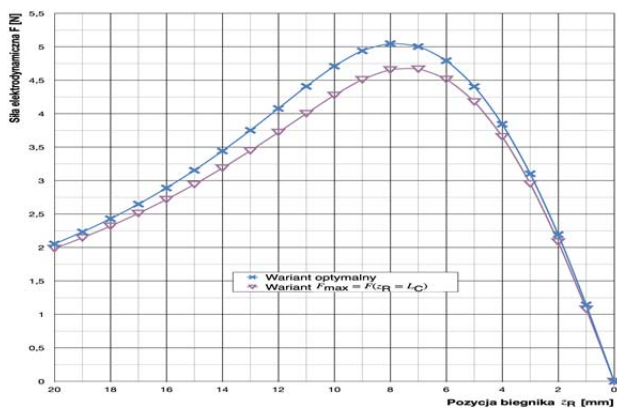
Rys.14. Rozkład siły elektromagnetycznej działająca na biegnik w funkcji jego położenia dla wybranego wariantu cewki wzbudzenia (wariant 3) przy prądzie wzbudzenia cewki $I_{max} = 0,7 A$ w rozszerzonym zakresie przemieszczenia biegnika $z_R \in (-80; 80) mm$



Rys.15. Zestawienie proporcji cewki wzbudzenia dla wariantu optymalnego i wariantu $F_{max} = F(z_R = l_C)$.

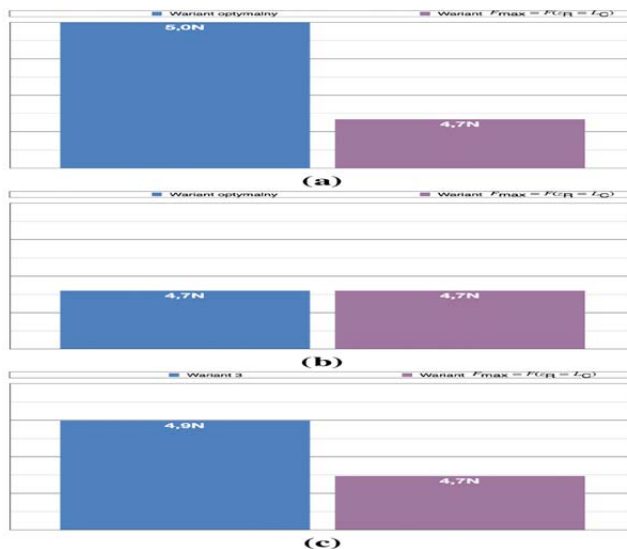
Zestawienie rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na biegnik dla wybranego wariantu optymalnego (wariant 3) oraz wariantu $F_{max} = F(z_R = l_C)$ prezentuje rysunek 16.

Porównanie obu wariantów, analogicznie do porównania z rysunków 7, 9 i 12, przedstawia rysunek 17.



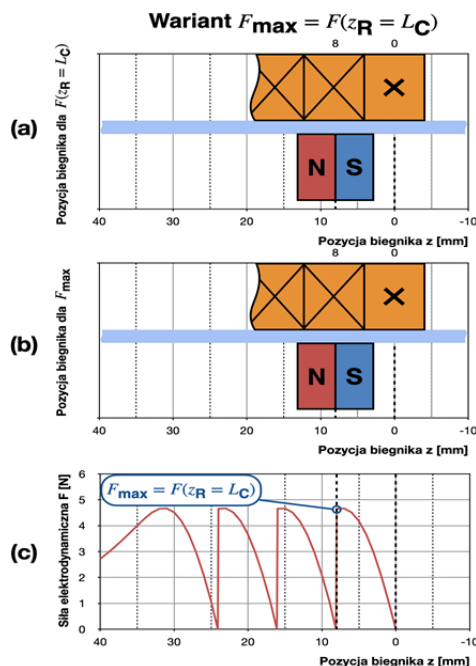
Rys.16. Rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia $F = f(z_R)$ dla wariantu optymalnego i wariantu $F_{max} = F(z_R = l_C)$.

Jak widać, w kontekście przyjętej funkcji celu (rysunek 17c) optymalnym wariantem pozostaje nadal wariant 3. Dla wariantu $F_{max} = F(z_R = l_C)$ opracowano dodatkowo rysunek 18, analogiczny do rysunków 10 i 11.

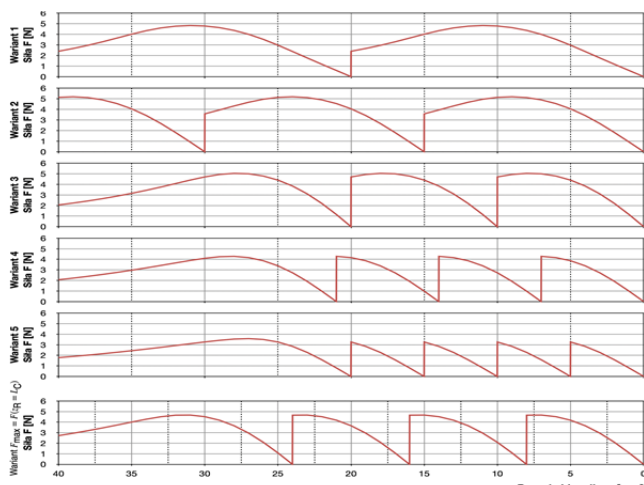


Rys.17. Porównanie wariantu optymalnego oraz wariantu $F_{max} = F(z_R = l_C)$: (a) maksymalne wartości siły elektromagnetycznej F_{max} (b) wartości sił elektromagnetycznych w chwili przełączenia cewek $F(z_R = l_C)$ (c) funkcja celu Q_A .

Na zakończenie postanowiono jeszcze zestawić na wspólnym rysunku rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia dla wszystkich 5-ciu wariantów cewek wzbudzenia rozpatrywanych w ramach procesu optymalizacji wymiarów geometrycznych cewek wzbudzenia (warianty: 1, 2, 3, 4, 5) oraz dla wariantu dodatkowego: $F_{max} = F(z_R = l_C)$ dla większej liczby przełączeń cewek. Liczba rozpatrywanych przełączeń wynika z liczby cewek, a ta jest różna dla poszczególnych wariantów, przy założeniu stałej długości cylindra (w wariantcie 1: 2 cewki wzbudzenia, w wariantcie 2: 3 cewki wzbudzenia, w wariantcie 4: 4 cewki wzbudzenia, w wariantcie 5: 5 cewek wzbudzenia i w wariantcie $F_{max} = F(z_R = l_C)$: 4 cewki wzbudzenia).



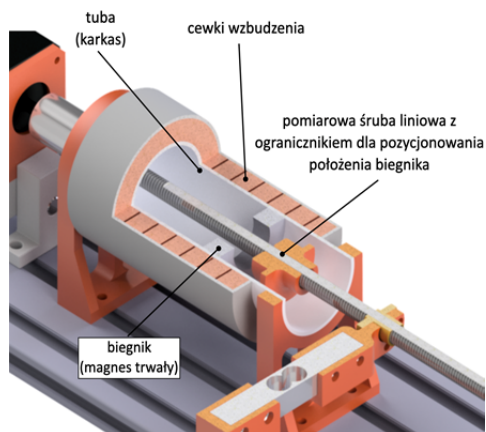
Rys.18. Dwa wyróżnione charakterystyczne położenia biegnika dla wariantu cewki wzbudzenia $F_{max} = F(z_R = l_C)$: (a) pozycja $z_R = l_C$ (b) pozycja z_{Rmax} (c) rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia — rysunek analogiczny do rysunków 10 i 11.



Rys.19. Zestawienie rozkładów siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia dla 6 rozpatrywanych wariantów cewek (warianty 1, 2, 3, 4, 5, $F_{max} = F(z_R = l_c)$)

Opis prototypu silnika liniowego z magnesem trwałym z optymalnymi proporcjami cewek wzbudzenia

Kierując się wytycznymi, sformułowanymi na podstawie przedstawionych badań symulacyjnych, zaprojektowano i zbudowano prototyp silnika liniowego cylindrycznego. Jego wizualizację w procesie projektowania przedstawiono na rysunku 20, zaś zdjęcie skonstruowanego silnika liniowego przedstawia rysunek 21.

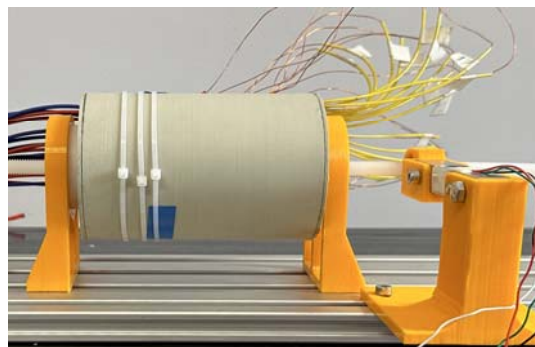


Rys.20. Wizualizacja przestrzenna projektowanego synchronicznego silnika liniowego wraz z układem pomiarowym do wyznaczania siły elektromagnetycznej metodą tensometryczną.

Posiada on 9 cewek wzbudzenia o proporcjach 1 : 1 i danych nawojowych, zgodnych z założeniami przyjętymi w rozdziale 2. Przy liczbie cewek wzbudzenia $N = 9$ maksymalna objętość komory pompy wynosi 402ml. Wstępne wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają wnioski, wynikające z przedstawionych rozważań teoretycznych i badań symulacyjnych.

Przy najprostszym algorytmie sterowania, bazującym na przełączaniach pojedynczych cewek wzbudzenia, silnik może pracować w sposób dyskretny jako liniowy silnik skokowy, a przy zapewnieniu odpowiedniej liczby przełączeń w jednostce czasu (czyli odpowiedniej częstotliwości przełączeń) — również w sposób ciągły

(płynny) jako liniowy silnik synchroniczny. Maksymalna wartość rozwijanej siły to 5,03 N, zaś wartość średnia wynosi 3,26 N.



Rys.21. Prototyp silnika liniowego synchronicznego z magnesami trwałymi wraz z układem pomiarowym do wyznaczania siły elektromagnetycznej metodą tensometryczną (na zdjęciu widoczne są wyprowadzenia zacisków wszystkich cewek wzbudzenia).

Wnioski

Przedstawiono kryterium doboru optymalnych proporcji cewek wzbudzenia w liniowych silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi ukierunkowane nie tylko na maksymalną wartość siły elektromagnetycznej działającej pomiędzy cewką wzbudzenia i biegnikiem, ale również na płynność ruchu biegnika. Kryterium to może znaleźć zastosowanie również przy optymalizacji budowy innych typów silników liniowych, w których następuje przełączanie cewek wzbudzenia np. przy projektowaniu silników skokowych, czy też silników SRM.

Słuszność wytycznej, dotyczącej zachowania proporcji stosunku wysokości cewki do jej długości (1:1), znalazła potwierdzenie w przeprowadzonych badaniach symulacyjnych, jak też we wstępnych badaniach laboratoryjnych na prototypie silnika liniowego zbudowanego zgodnie z powyższą wytyczną.

Autorzy: mgr inż. Sebastian Bartel, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Katedra Inżynierii Elektrycznej, Warszawska 24, 31-155 Kraków, E-mail: sebastian.bartel@doktorant.pk.edu.pl; prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Katedra Inżynierii Elektrycznej, Warszawska 24, 31-155 Kraków, E-mail: krzysztof.kluszczyński@pk.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Bartel S., Kluszczyński K., Pilch Z., Concept of electromagnetic periodical duty pump with programmable liquid flow, *WZEE 2019: 15th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics*, Zakopane, Polska, 8-10 Grudzień 2019
- [2] Khamitov A., Swanson J., Severson E. L., Van de Ven J., Linear Electric Machine Design for an Off-Highway Vehicle Hydraulic Charge Pump, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2019
- [3] Sarr Lo D., Lawali Ali H., Amara Y., Barakat G., Chabour F., 3d finite element analysis of eccentricity in a tubular linear permanent magnet machine, *XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, s. 1996–2001
- [4] Yang L., Yingmin J., Xu S., Zongxia J., Design, analysis and testing of a novel linear collaborative pump, *12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2017, s. 630–635