

Grzegorz Kamiński, Tomasz Wygonowski  
Politechnika Warszawska

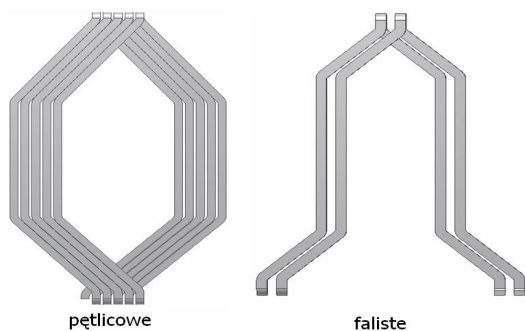
## UZWOJENIE SYNCHRONICZNEGO SILNIKA LINIOWEGO

### WINDING OF LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR

**Abstract:** Selection of windings for linear synchronous motor was described in this paper. The paper focused on two kind of winding: wave, loop. Technological information about these windings are also included in this paper. Parameters determining the dimension of end-winding were appointed. Technological feasibility analysis of the wave windings was carried out. A new manufacturing method of such of winding was suggested. Analysis of induced voltage for two kinds of windings mentioned above was performed by PC OPERA field calculation program.

#### 1. Wstęp

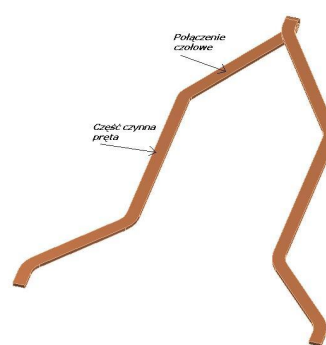
W kolejnym etapie prac nad silnikiem synchronicznym liniowym opracowywanym do zastosowania w napędzie pojazdu PRT skupiono się na opracowaniu i wyborze odpowiedniego uzwojenia. Na samym początku zdecydowano, że stojan będzie miał konstrukcję bezrdzeniową. Dla tego warunku rozpatrzono dwa rodzaje uzwojeń faliste i pętlicowe. W celu zwiększenia wypełnienia miedzią podziałki biegunowej zastosowano w obu przypadkach uzwojenie dwuwarstwowe. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe zezwoje uzwojenia pętlicowego oraz falistego.



Rys. 1. Przykładowe zezwoje uzwojeń: pętlicowego i falistego.

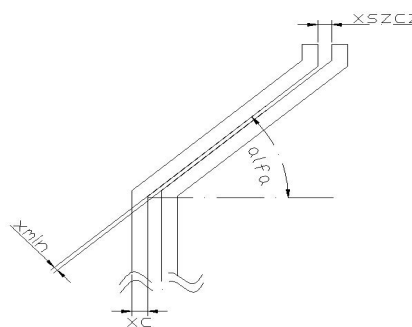
#### 2. Uzwojenie faliste

Jako pierwsze zostanie opisane uzwojenie faliste. Pręty uzwojenia falistego można podzielić na część czynną, która w znacznym stopniu odpowiada za wartość siły ciągu, oraz część połączeń czołowych (część bierną) odpowiadającą za straty mocy w uzwojeniu. Podział na części pręta uzwojenia przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Podział pręta na część czynną i bierną.

Należy dążyć do tego, aby połączenia czołowe były możliwie krótkie, przez co zmniejszą się straty mocy w uzwojeniu oraz ilość potrzebnego materiału do wykonania uzwojenia.



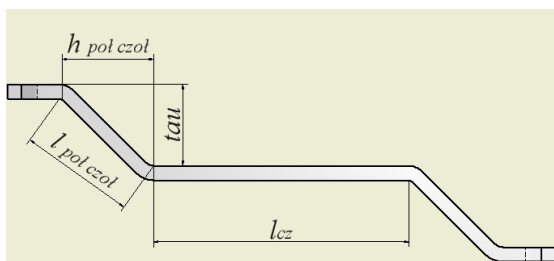
Rys. 3. Wybrane wymiary uzwojenia falistego

W związku z tym określono, od czego zależy długość połączenia czołowego dla uzwojenia falistego. Na rysunku 3 przedstawiono szkic dwóch sąsiadujących ze sobą prętów uzwojenia falistego oraz oznaczono poszczególne wymiary dla uzwojenia falistego. Na podstawie tego rysunku wyprowadzono wzór 1 na kąt  $\alpha$ , od którego zależy długość połączenia czołowego:

$$\alpha = a \sin\left(\frac{x_c + x_{\min}}{x_c + x_{szcz}}\right) \quad (1)$$

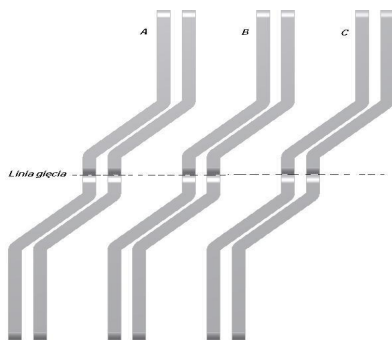
gdzie:  $x_c$  – szerokość pręta uzwojenia falistego,  $x_{\min}$  – minimalna odległość pomiędzy sąsiadującymi prętami w części połączeń czołowych,  $x_{szcz}$  – odległość pomiędzy sąsiadującymi prętami w części czynnej.

Wysokość całkowita uzwojenia falistego jest równa sumie długości części czynnej i dwukrotnej wysokości połączenia czołowego. Wysokość połączenia czołowego zależy od długości podziałki biegunowej  $\tau$  oraz kąta  $\alpha$ . Opisywane wymiary pręta pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Wymiary pręta.

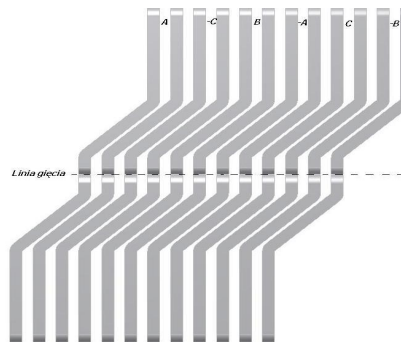
Nieodpowiednie dobranie wymiarów pręta oraz liczby prętów na biegun i fazę, przy zakładanej rozpiętości podziałki biegunowej, decyduje o wykonalności całego uzwojenia. W związku z tym dla podziałki biegunowej  $\tau=45$  mm zdecydowano się na wykonanie uzwojenia falistego dwuwarstwowego o liczbie prętów 2 na biegun i fazę. Przekrój poprzeczny pręta stanowi kwadrat o boku 4 mm. Dzięki temu otrzymano kąt  $\alpha=42^\circ$ .



Rys. 5. Fragment uzwojenia jednowarstwowego

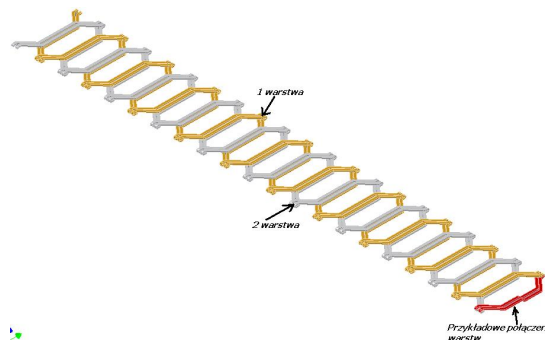
Minimalna odległość pomiędzy sąsiednimi prętami wyniosła 1 mm. Na rysunku 5 przedstawiono fragment uzwojenia falistego jednowarstwowego dla trzech faz. Widać na nim, że w przypadku jednej warstwy uzwojenia pozostaje dużo wolnej przestrzeni, którą można by uzupełnić o drugą warstwę uzwojenia. Na

rysunku 6 pokazano fragment uzwojenia falistego dwuwarstwowego.



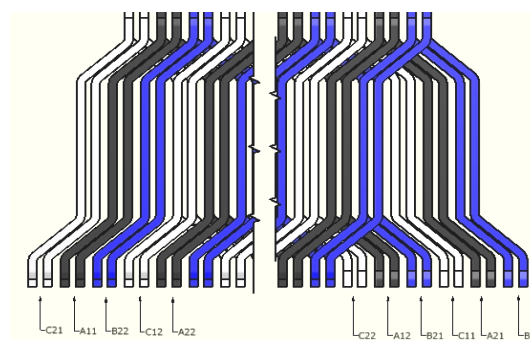
Rys. 6. Fragment uzwojenia dwuwarstwowego.

Na rysunku 5 i 6 przedstawiono sposób wykonania uzwojenia poprzez odpowiednie uformowanie prętów, a następnie przegięcie ich w miejscu linii gładkiej. W wyniku tego działania otrzymamy zwoje uzwojenia falistego.



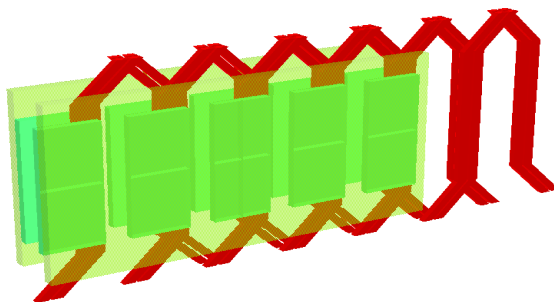
Rys. 7. 1 – faza uzwojenia falistego dwuwarstwowego.

Na rysunku 7 przedstawiono pojedynczą fazę uzwojenia dwuwarstwowego falistego. Przedstawiono tam również przykładowe połączenie dwóch warstw uzwojenia. Na rysunku 8 przedstawiono oznaczenia początków i końców poszczególnych faz i warstw uzwojenia dwuwarstwowego trójfazowego.



Rys. 8. Początki i końce warstw faz uzwojenia falistego

Dla tak zaprojektowanego uzwojenia wykonano model obliczeniowy w programie do obliczeń polowych. Na rysunku 9 przedstawiono model do obliczeń polowych. Celem tych obliczeń było wyznaczenie wartości napięć indukowanych w poszczególnych fazach modułu uzwojenia.



Rys. 9. Model do obliczeń polowych.

Prawidłowo napięcie indukowane w pręcie należy obliczyć zgodnie ze wzorem 2:

$$u_i = B \cdot v \cdot l \quad (2)$$

gdzie:  $u_i$  – napięcie indukowane w pręcie [V],  $B$  – indukcja magnetyczna w pręcie [T],  $v$  – prędkość synchroniczna [m/s],  $l$  – długość pręta [m].

W badanym przypadku takie obliczenia nastęrczały pewnych niedogodności, które niepotrzebnie wydłużały czas obliczeń. Mając dogodniejszy dostęp do wartości siły elektrodynamicznej działającej na pręt oraz do wartości prądu płynącego w pręcie zdecydowano się na przekształcenie wzoru 2, za pomocą wzoru na siłę elektrodynamiczną działającą na przewodnik z prądem znajdujący się w polu magnetycznym, do postaci wzoru 3:

$$u_i = \frac{F \cdot v}{I} \quad (3)$$

gdzie:  $u_i$  – napięcie indukowane w pręcie [V],  $F$  – siła elektrodynamiczna działająca na pręt [N],  $v$  – prędkość synchroniczna [m/s],  $I$  – prąd w pręcie [A].

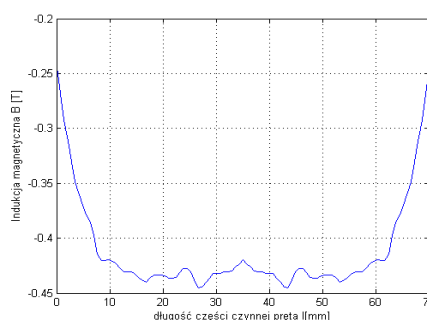
W celu potwierdzenia słuszności otrzymanych wyników obliczonych za pomocą wzoru 3 przeprowadzono porównanie ich z wynikami otrzymanymi przy obliczeniu zgodnym ze wzorem 2. Okazało się, że wyniki są zbliżone. W dalszym etapie badań obliczono wpływ napięć indukowanych w obszarze połączeń czołowych na napięcia indukowane

w poszczególnych fazach uzwojeń. Okazało się, że dla badanego przypadku przy wzięciu pod uwagę napięć indukowanych w połączeniach czołowych wartość napięć indukowanych w całej fazie wzrosła o około 9%. Następnie zbadano wpływ długości części czynnej prętów na napięcia indukowane w uzwojeniu. Wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań długości części czynnej pręta na wartość napięcia indukowanego w fazie ( $dm$  – długość magnesu).

Długość części czynnej pręta $l$ [mm]	Napięcie indukowane w fazie $u_i$ [V]
40 = 0.57 $dm$	0.0384
45 = 0.64 $dm$	0.0473
50 = 0.72 $dm$	0.0488
55 = 0.78 $dm$	0.0628
60 = 0.86 $dm$	0.0764
65 = 0.92 $dm$	0.0857
70 = 1 $dm$	0.0959
75 = 1.07 $dm$	0.09867
80 = 1.15 $dm$	0.111141
85 = 1.2 $dm$	0.129973

Z otrzymanych wyników można wywnioskować, że wprowadzenie w obszar większego pola magnetycznego połączeń czołowych poprzez zmniejszenie wysokości części czynnej pręta skutkuje zmniejszeniem wartości napięcia indukowanego. Innym ważnym wnioskiem jest fakt, iż zwiększenie długości części czynnej pręta ponad długość magnesu (wartości >70 mm) powoduje dalszy wzrost wartości napięcia indukowanego w fazie. Jest to związane z rozkładem indukcji w części czynnej pręta.



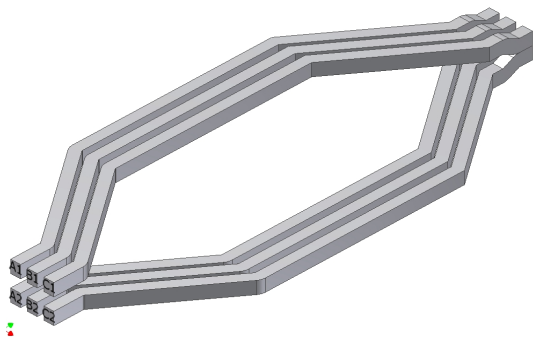
Rys. 10. Rozkład indukcji magnetycznej w części czynnej pręta.

Dla przykładowego pręta o długości równej długości magnesu rozkład indukcji magnetycznej przedstawiono na rysunku 10. Z wykresu widać, iż na odcinku około 80% długości tej części pręta wartość indukcji

wynosi od 80 - 100 % wartości maksymalnej. W związku, z czym istnieje możliwość zmniejszenia wielkości magnesów nie zmniejszając przy tym wartości średniej indukcji magnetycznej w przecie a co za tym idzie również siły działającej na pręt.

### 3. Uzwojenie pętlicowe

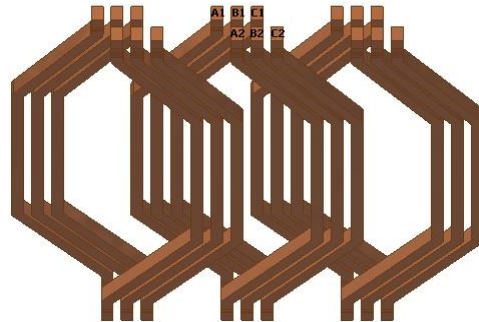
W celu odniesienia uzyskanych wyników dla uzwojenia falistego zdecydowano się na wykonanie podobnych badań dla uzwojenia pętlicowego. Istotną różnicą pomiędzy tymi uzwojeniami jest kształt połączeń czołowych. Wynika ona z faktu, iż uzwojenie pętlicowe złożone jest z szeregowo połączonych ze sobą grup zezwojów. Dzięki temu można uzyskać więcej prętów na fazę i biegun niż w przypadku uzwojenia falistego. Dzieje się to jednak kosztem długości połączeń czołowych a co za tym idzie wysokości całego uzwojenia i wzrostem strat cieplnych. Ważnym problemem w przypadku wykonywania uzwojenia pętlicowego metodą wyginania pojedynczych prętów i następnym ich łączeniu w grupy zezwojów okazuje się wykonanie części połączeń czołowych. Istotna w tym przypadku jest kwestia wykonania połączeń pomiędzy kolejnymi zwojami jednej cewki. Na rysunku 11 przedstawiono przykładową cewkę uzwojenia pętlicowego z oznaczeniem poszczególnych zwojów.



Rys. 11. Oznaczenia zwojów przykładowej cewki uzwojenia pętlicowego.

Na podstawie rysunku 11 połączeń zwojów należałoby dokonać łącząc koniec A2 z początkiem zwoju B1 oraz koniec B2 z początkiem C1. A1 i C2 byłyby początkiem i końcem cewki. Innym rozwiązaniem problemu połączeń zwojów w uzwojeniu pętlicowym jest zmiana kąta nachylenia połączeń czołowych względem osi kierunku ruchu w taki sposób, aby na podziałce

biegunowej zmieściło się o jedno więcej dla każdej fazy połączenie czołowe, niż wynika to z liczby prętów na fazę i biegun. Takie rozwiązanie zaprezentowano na rysunku 12. W przypadku uzwojenia pętlicowego należy również zwrócić uwagę na połączenia pomiędzy cewkami tej samej fazy. W proponowanym rozwiązaniu technologicznym zaprojektowanie i wykonanie takich połączeń jest dodatkowym utrudnieniem.



Rys. 12. Rozwiązanie problemu połączeń czołowych dla uzwojenia pętlicowego.

Do porównania dwóch opisywanych uzwojeń zdecydowano się na użycie uzwojenia falistego z dwoma prętami na fazę i biegun o przekroju 4x4 mm, oraz uzwojenia pętlicowego z trzema prętami na fazę i biegun o przekroju każdego pręta 3x4 mm. Poszczególne parametry obliczone dla każdego z uzwojeń przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wybrane parametry uzwojeń falistego i pętlicowego

	$n_p * S_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$h_{uzw}$ [mm]	$\alpha$ [°]	$V_p$ [mm <sup>3</sup> ]	$P_{cup}$ [W]
Faliste	2*16	150	42	2528	2
Pętlicowe	3*12	170	54	2016	1,6

gdzie:  $n_p$  – liczba prętów na fazę i biegun,  $S_p$  – powierzchnia przekroju pojedynczego pręta,  $h_{uzw}$  – wysokość uzwojenia,  $\alpha$  – kąt nachylenia połączeń czołowych,  $V_p$  – objętość pojedynczego pręta  $P_{cup}$  – straty mocy w pojedynczym przecie przy gęstości prądu  $j = 7$  A/mm<sup>2</sup>.

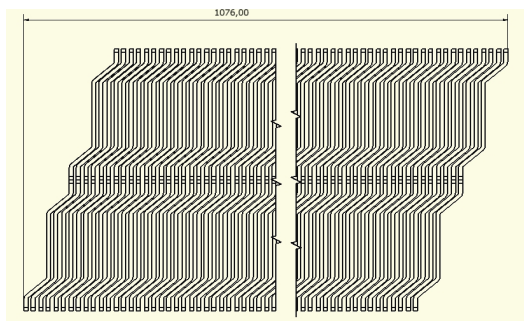
Porównano również wartości napięć indukowanych w poszczególnych fazach dla wspomnianych uzwojeń. Okazało się, że napięcie indukowane w fazach uzwojenia pętlicowego jest o około 1,5-1,8 razy większe niż napięcie indukowane w odpowiednich fazach uzwojenia falistego. Ponieważ kształtowanie pojedynczych prętów i późniejsze ich lutowanie jest czasochłonne, dlatego zdecydowano się na opracowanie nowatorskiej



technologii wykonania uzwojeń zarówno falistego jak i pętlicowego.

#### 4. Wycinanie uzwojenia

Również trudności z dostępem do materiału o odpowiednich wymiarach do wykonania zaproponowanych prętów zarówno dla uzwojenia falistego (4x4 mm) jak i pętlicowego (3x4 mm) skłoniły do rozważań nad wykonaniem uzwojenia z blachy o grubości 4 mm z wykorzystaniem technologii cięcia wodą. Rozważana również była technologia cięcia laserem, ale w przypadku miedzi cięcie laserem jest niemożliwe. Przyczyną podaną z konsultowanymi firmami, pełniącymi usługi z zakresu cięcia laserem, było odbijanie światła lasera przez materiał miedziany. W przypadku cięcia wodą takie przeszkody nie zachodzą. Dodatkową zaletą cięcia wodą jest brak występowania na spodnich powierzchniach ciętych elementów gradów. Inną cechą mogącą negatywnie wpłynąć, na jakość uzwojenia w przypadku cięcia laserem jest utwardzenie pod wpływem działania wysokiej temperatury krawędzi ciętych elementów. W przypadku cięcia wodą taki efekt nie występuje. Z przeprowadzonych rozmów z firmami oferującymi cięcie metali wodą otrzymano informację, że średnica strumienia wody wynosi około 0,8 mm. Wartość ta jest mniejsza od zakładanej na początku minimalnej odległości pomiędzy prętami uzwojenia (1 mm). Pierwszy przygotowany projekt uzwojenia falistego wykonanego metodą wycinania zakładał, iż pręty na całej swojej długości będą miały równą szerokość tak jak we wcześniej opisywanej metodzie kształtowania pojedynczych prętów.



Rys. 13. Uzwojenie faliste z prętami o równej szerokości

Na rysunku 13 przedstawiono projekt wykonania uzwojenia falistego z prętami o równej szerokości. Jednakże dla takiego rozwiązania strumień wody musi dwukrotnie przechodzić wzdłuż jednej linii, co niepotrzebnie zwiększa czas i koszty produkcji takiego uzwojenia. W związku, z czym zdecydowano, że pręty uzwojenia będą miały większą szerokość w części czynnej niż w części połączeń czołowych. Takim sposobem sąsiednie pręty będą wycinane wzdłuż wspólnej linii cięcia. Następnym etapem po wycięciu odpowiedniego szablonu prętów jest przecięcie wzdłuż tego szablonu tak, aby po złożeniu i zlutowaniu końców prętów otrzymać gotowy moduł uzwojenia.

#### 5. Literatura

- [1] Kamiński G., Przyborowski Wł., *Uzwojenia i parametry maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa 2005
- [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

Artykuł współfinansowany z pracy ECO-Mobilność WND-POIG.01.03.01-14-154/09.



Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

#### Autorzy

Prof. dr hab. inż., Grzegorz Kamiński, Politechnika Warszawska, 00-661 Warszawa, ul. Nowowiejska 20 A, (4822) 234-73-35, G.Kaminski@ime.pw.edu.pl

Mgr inż., Tomasz Wygonowski, Politechnika Warszawska, 00-661 Warszawa, ul. Nowowiejska 20 A, (4822) 234-73-35, wygi@op.pl.

#### Recenzent

Prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn