

Krzysztof Kluszczyński, Roman Kroczek, Jarosław Domin
 Politechnika Śląska
 Wydział Elektryczny
 Katedra Mechatroniki

WYZNACZENIE OPTIMALNYCH WYMIARÓW GEOMETRYCZNYCH CEWKI NAPĘDOWEJ WYRZUTNI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

DETERMINATION OF OPTIMAL COIL DRIVE GEOMETRIC DIMENSIONS OF ELECTROMAGNETIC LAUNCHER

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania optymalnych wymiarów geometrycznych cewki napędowej elektromagnetycznej wyrzutni cewkowej. Zaprezentowano matematyczny model polowy wyrzutni cewkowej oraz jego wykorzystanie w procesie projektowania modułu napędowego o zadanych prędkościach końcowych.

Abstract: The paper presents the methodology enabling us to determine optimal geometric dimensions of the coil in an electromagnetic coil launcher. The paper presents a mathematical field model of the electromagnetic coil launcher and its use in the designing the drive unit of with given final velocities.

Słowa kluczowe: wyrzutnia elektromagnetyczna, cewkowy moduł napędowy, metody polowe
Keywords: electromagnetical launcher, coilgun, FEM

1. Wstęp

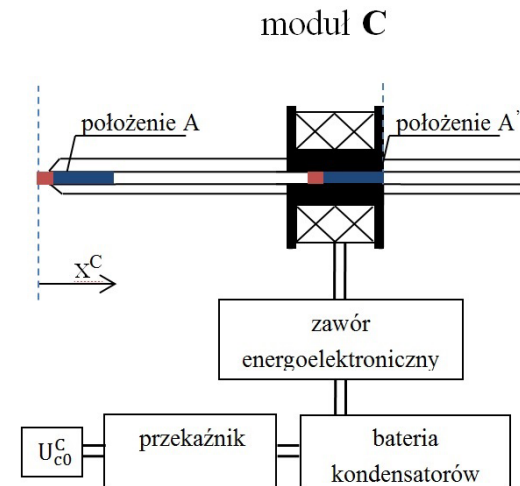
1.1 Rozwój problematyki wyrzutni elektromagnetycznych

Badana konstrukcja, zwana dalej układem „wyrzutni elektromagnetycznej”, jest specyficznym typem przetwornika elektromechanicznego. Energia elektryczna, pobrana ze źródła, jest wykorzystywana do nadania prędkości liniowej elementowi ruchomemu [1,3,8] głównie do zastosowań militarnych [9], w technice kosmicznej [10] oraz fizycznych badań podstawowych [11]. W odróżnieniu od klasycznych maszyn elektrycznych element ruchomy nie jest konstrukcyjnie (na stałe) związany z urządzeniem. Element ruchomy (po rozpędzeniu) opuszcza wyrzutnię, a wartość jego prędkości liniowej dochodzi do poziomu kilkunastu km/s [12] (wymaga to magazynowania w układzie ogromnej ilości energii, która jest oddawana impulsowo).

1.1 Schemat ideowy budowy oraz zasada działania modułu napędowego C

Działanie elektromagnetyczne wyrzutni cewkowej, zwanej dalej modułem C, opiera się na jednym z fundamentalnych zjawisk fizycznych, jakim jest oddziaływanie pola magnetycznego na znajdujące się w jego zasięgu materiały o właściwościach ferromagnetycznych

[2]. Pole magnetyczne jest wytwarzane przez prąd płynący w cewce, który oddziałuje na ferromagnetyczną część elementu ruchomego. Element ruchomy jest rozpędzany, począwszy od położenia A (Rys.1.) do położenia, w którym środek części ferromagnetycznej elementu ruchomego pokrywa się ze środkiem cewki (położenie A' na Rys.1.), co wynika z charakterystyki momentu reluktancyjnego [3].



Rys. 1. Szkic ideowy modułu C

2. Konstrukcja modułu C

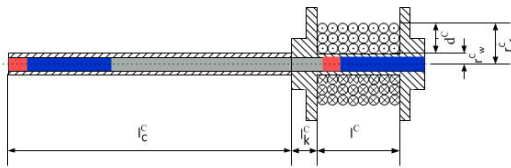
2.1 Zmienne konstrukcyjne cewki napędowej

Główne zmienne konstrukcyjne zostały zawarte w Tab.I.

Tabela I. Główne zmienne konstrukcyjne modułu napędowego C.

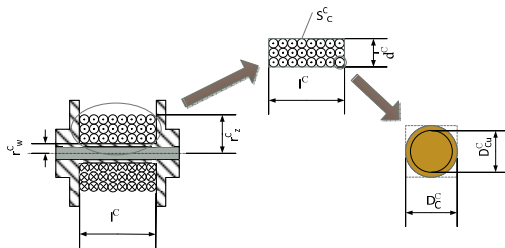
oznaczenie zmiennej:	nazwa zmiennej:
l^c	długość uzwojenia cewki napędowej,
d^c	grubość uzwojenia cewki napędowej (rozumiana jako różnica pomiędzy: promieniem zewnętrznym cewki r_{z^c} i jej promieniem wewnętrznym r_{w^c}).

Zmienne pomocnicze to: długość części montażowej karkasu oznaczona przez l_k^c oraz długość cylindra modułu C oznaczona przez: l_c^c , zmienne dodatkowe to: średnica przewodu bez izolacji D_{pr^c} oraz średnica przewodu w izolacji D_{iz^c} .



Rys. 2. Zmienne konstrukcyjne cewki napędowej

Uzwojenie cewki napędowej zostało nawinięte na karkasie o przekroju prostokątnym. Sposób nawinięcia uzwojenia prezentuje Rys.3.



Rys. 3. Sposób nawinięcia uzwojenia cewki

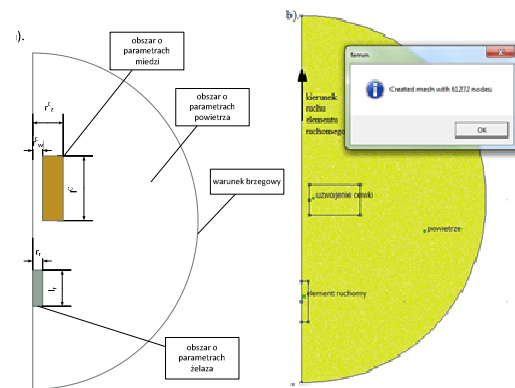
3. Matematyczny model polowy modułu napędowego C ukierunkowany na dobór zmiennych konstrukcyjnych cewki napędowej

3.1 Model polowy wyrzutni ukierunkowany na dobór głównych zmiennych konstrukcyjnych d^c i l^c cewki napędowej

Model polowy umożliwia wyznaczenie:

- rozkładu pola magnetycznego w module C przy różnych położeniach elementu ruchomego,
- siły, działającej na element ruchomy przy różnych położeniach elementu ruchomego (obliczenia statyczne),
- wyznaczenie przyrostu energii kinetycznej elementu ruchomego.

Model polowy cewki napędowej został utworzony z wykorzystaniem programu FEMM [4,5,6,7,8]. Siatka dyskretyzacyjna (Rys.4.) została dobrana na podstawie prób i eksperymentów numerycznych w taki sposób, aby spełnić wymagania dotyczące dokładności i czasu obliczeń (przyjęto wartość 1mm jako maksymalny rozmiar elementu siatki dla obszaru o parametrach powietrza oraz wartość 0,1mm dla obszaru cewki napędowej i elementu ruchomego).



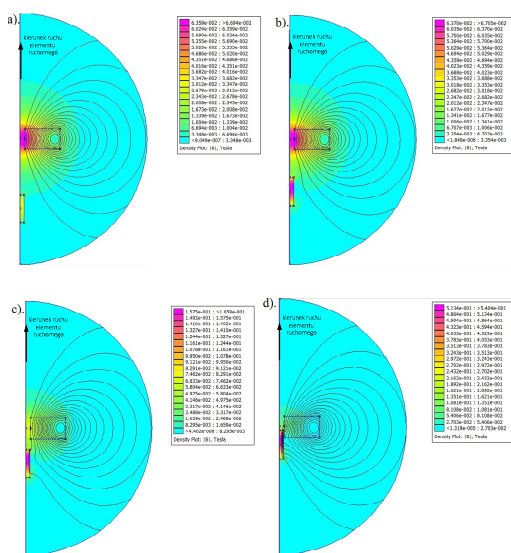
Rys.4. Dwuwymiarowy model polowy cewki napędowej: a) struktura geometryczna, b) wygenerowana siatka elementów skończonych.

Wyniki symulacji komputerowej oraz przykładowe obliczenia sprawdzające odnoszące się do rozkładu pola magnetycznego, przyrostu energii kinetycznej ΔE^c elementu ruchomego i jego prędkości końcowej v_k^c .

Przykładowe obliczenia symulacyjne dla modułu C przeprowadzono dla następującej wartości gęstości prądu w obwodzie cewki:

- $J^C = 2,34 \text{ MA/m}^2$ (czyli $2,34 \text{ A/mm}^2$), oraz dla zakresu zmian wartości współrzędnej przemieszczenia x^C w przedziale:
 - $x^C \in < -10 \cdot 10^{-2} \text{ m}, 0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
 - (z krokiem $\Delta x^C = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$).
- Wartości przykładowych podstawowych zmiennych konstrukcyjnych (dla obliczeń sprawdzających) przedstawiono poniżej:
- $l^C = 30 \cdot 10^{-3} \text{ m}$,
 - $d^C = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$,
 - $S_c^C = 1500 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Na Rys.5 przedstawiono rozkład indukcji pola magnetycznego dla czterech wybranych wartości x^C .



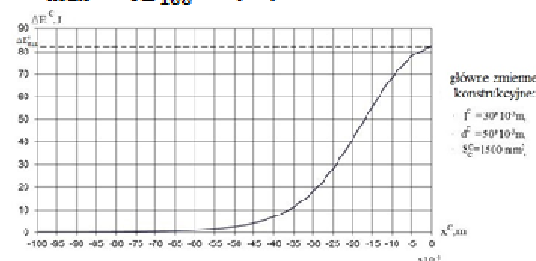
Rys. 5. Rozkłady indukcji pola magnetycznego dla czterech wybranych wartości zmiennej przemieszczenia x^C : a). $x^C = -10 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, b). $x^C = -7,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ c). $x^C = -5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ d). $x^C = -2,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$.

Znajomość rozkładu przestrzennego indukcji pola magnetycznego dla różnych położeń elementu ruchomego pozwala wyznaczyć wartość siły reluktancyjnej działającej na element ruchomy dla różnych jego położeń. Przyrost energii kinetycznej elementu ruchomego ΔE^C (energii, zgromadzonej w trakcie rozpędzania elementu ruchomego od położenia odpowiadającego współrzędnej $x^C = -100 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ do położenia bieżącego x^C) można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta E^C(x^C) = \int_{-100}^{x^C} F^C(x^C) dx^C$$

Zależność ta umożliwia sporządzenie charakterystyki statycznej „przyrost energii kinetycznej elementu ruchomego w funkcji jego położenia $\Delta E^C = f(x^C)$ ”. Charakterystykę tę przedstawiono na Rys.6. Maksymalna wartość przyrostu energii kinetycznej wynosi:

$$\Delta E_{max}^C = \int_{-100}^{x^C} F^C(x^C) dx^C = 82 \text{ J}$$



Rys. 6. Charakterystyka statyczna: „przyrost energii kinetycznej elementu ruchomego w funkcji położenia elementu ruchomego” $\Delta E^C = f(x^C)$

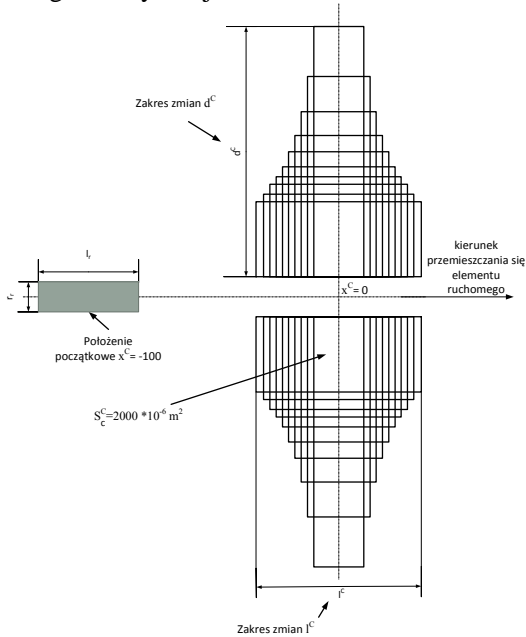
Reasumując, przeprowadzone przykładowe obliczenia potwierdzają, że jest możliwe powiązanie **głównych zmiennych konstrukcyjnych**: długości modułu l^C i wysokości cewki d^C (przy założeniu stałej gęstości prądu w cewce J^C) z maksymalnym przyrostem energii kinetycznej elementu ruchomego w punkcie $x^C = 0$.

3.2 Analiza wpływu długości l^C i grubości d^C cewki na przyrost energii kinetycznej ΔE^C elementu ruchomego przy założeniu stałego przekroju geometrycznego S_c^C cewki oraz stałej gęstości prądu J^C w cewce.

Zakładając gęstość prądu w cewce równą: $J^C = 2,34 \text{ MA/m}^2$ oraz stałą wartość przekroju cewki $S_c^C = 2250 \text{ cm}^2$, rozważono wpływ proporcji cewki (stosunku grubości cewki do jej długości) na wartość siły reluktancyjnej oraz na przyrost energii kinetycznej elementu ruchomego.

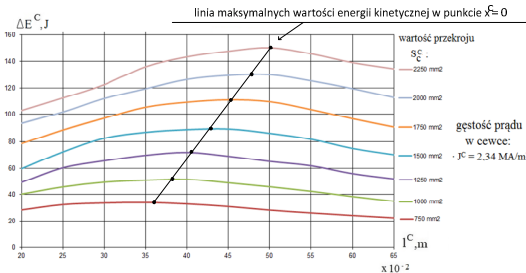
W sposób graficzny scharakteryzowano rozważone przypadki na Rys.7. Na Rys.8. przedstawiono rodzinę charakterystyk statycznych: „energia kinetyczna zgromadzona w elemencie ruchomym w punkcie $x^C = 0$ w funkcji długość cewki” $\Delta E^C = f(l^C)$ dla różnych wartości przekroju geometrycznego cewki (Rys.8.), (przy zachowaniu stałej gęstości prądu - oznacza to coraz większy prąd wzbudzenia). Jak widać, poszczególne krzywe charakteryzują się posiadaniem maksimum w rozważanym zakresie zmian długości cewki: $l^C \in 35 \cdot 10^{-3} \text{ m}, 49 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Maksima te tworzą uwidocznioną

się na Rys.8. linię maksymalnych wartości energii kinetycznej.



Rys. 7. Graficzna interpretacja zależności zmiennych l^C i d^C przy stałej wartości przekroju $S_c^C = 2250 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

Na Rys.8., zaprezentowano w sposób graficzny rozwiązanie problemu optymalnego doboru głównych wymiarów geometrycznych cewki: długości cewki l^C i grubości cewki d^C - ze względu na maksymalny przyrost energii kinetycznej elementu ruchomego w module napędowym (w punkcie $x^C=0$).

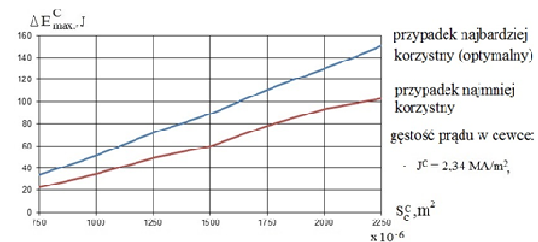


Rys. 8. Rodzina charakterystyki statycznej: „energia kinetyczna zgromadzona w elemencie ruchomym w punkcie $x^C=0$ w funkcji długości cewki” $\Delta E^C=f(l^C)$ dla różnych wartości przekroju geometrycznego cewki $S_c^C \in \{750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250\} \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ z wykreśloną krzywą maksymalnych wartości energii kinetycznej elementu ruchomego

Aby przedstawić, jak duży wpływ na maksymalną energię kinetyczną zgromadzoną w elemencie ruchomym ma odpowiedni dobór głównych wymiarów konstrukcyjnych: l^C , d^C

(przy danej wartości S_c^C) przedstawiono na Rys.9. charakterystykę statyczną: „maksymalna energia kinetyczna zgromadzona w elemencie ruchomym w funkcji pola powierzchni przekroju cewki napędowej” $\Delta E_{\max}^C=f(S_c^C)$ dla dwóch przypadków: najbardziej i najmniej

korzystnego stosunku wartości $\frac{l^C}{d^C}$. Na tej podstawie można wyciągnąć wniosek, że nie właściwy dobór stosunku wartości $\frac{l^C}{d^C}$ może niemal o połowę zmniejszyć maksymalną wartość energii kinetycznej, zgromadzonej w elemencie ruchomym w stosunku do energii możliwej do uzyskania w przypadku najbardziej korzystnym.



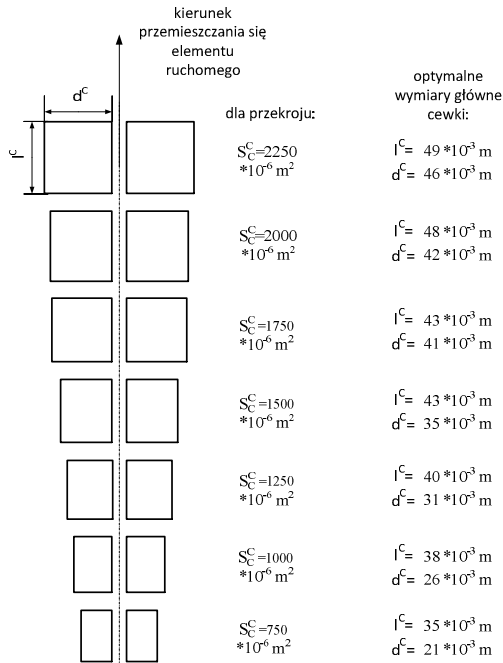
Rys.9. Charakterystyka statyczna: „maksymalna energia kinetyczna elementu ruchomego w funkcji pola powierzchni przekroju cewki napędowej” $\Delta E_{\max}^C=f(S_c^C)$ dla najbardziej i najmniej korzystnego przypadku doboru wartości stosunku $\frac{l^C}{d^C}$

4. Podsumowanie

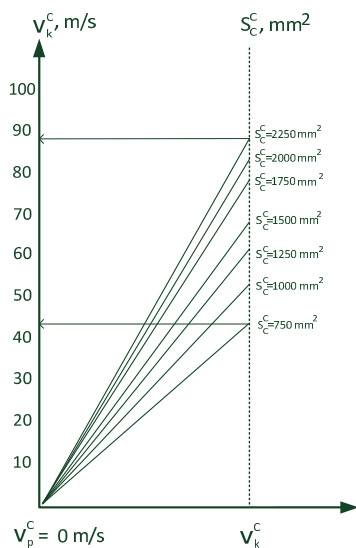
Zestawienie optymalnych wymiarów głównych cewki przy założonej stałej wartości pola powierzchni przekroju cewki S_c^C , przedstawione na Rys.10, jest najważniejszą wytyczną konstrukcyjną przy projektowaniu elektromagnetycznego modułu cewkowego.

Na Rys.11. przedstawiono w sposób graficzny możliwe do osiągnięcia prędkości końcowe elementu ruchomego v_k^C przy różnych wartościach przekroju poprzecznego cewki S_c^C (przy założeniu, że cewka posiada proporcje zapewniające uzyskanie maksymalnego przyrostu energii kinetycznej elementu ruchomego zgodnie z Rys.10).

Przykładowo, przy wymiarach cewki, którym odpowiada przekrój $S_c^C=2250\text{mm}^2$, jest możliwe osiągnięcie prędkości końcowej elementu ruchomego o wartości $v_k^C=90\text{m/s}$.



Rys. 10. Graficzna interpretacja optymalnej długości l^c cewki ze względu na maksymalny przyrost energii kinetycznej elementu ruchomego ΔE_{max}^c dla wybranych stałych wartości pola powierzchni przekroju cewki $S_C^c \in \{750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250\} \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$



Rys. 11. Możliwe do osiągnięcia prędkości końcowe elementu ruchomego v_k^c przy różnych wartościach przekroju poprzecznego cewki S_C^c , dla przypadku, gdy prędkość początkowa (włotowa) elementu ruchomego jest równa 0 ($v_f^c=0$)

7. Literatura

[1]. R. Kroczek rozprawa doktorska: “Metodologia projektowania, zagadnienia konstrukcyjne, modelowanie oraz badania wyrzutni elektromagnetycznej o napędzie hybrydowym”, Politechnika Śląska 2014

[2]. D. Halliday, R. Resnick: “FHYICS part II”, John Wiley & Sons Inc., New York 1960

[3] Z Gosiewski, M Kondratiuk: “Selection of Coil Parameters In Magnetic Launchers”, *Solid State Phenomena*, Vols. 147-149, str.438-443 2009

[4]. D Meecker, “Finite Elements Method Magnetics version’s 4.0”, user’s manual, 13.02.2003,

[5] Ierusalimschy, R., Figueiredo, L. H., Celes, W. Reference Manual of the Programming Language Lua 4.0, <http://www.lua.org/manual/4.0/>

[6] E. M. Freeman and D. A. Lowther, An open boundary technique for axisymmetric and three dimensional magnetic and electric field problems, *IEEE Transactions on Magnetics*, 25(5):4135-4137, September 1989.

[7] Slade G.W., Notes on a fast FEM solver for linear mass accelerator *IEEE Trans.Mag.*

[8] Seog-Wham Kim, Hyun-Kyo Jung, Song-Yop Hahn, Optimal Design of Multistage Coilgun, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.32, No.2, March 1996,

[9] Zhi-Yuan Li, Bin Lei, Qiu-Xue Yang, Ke-Yi Zhao, Hong-Jun Xiang: Review on the Technology Characteristics and the Military Application of Railgun, *Electromagnetic Launch Technology*, 2008 14th Symposium

[10] Schroeder J.M.: Electromagnetic launchers for space applications, *IEEE TransMagn.*, jan. 1989, vol.25, No1

[11] Tompkins M.W.: Study of a transaugmented two-stage small circular-bore railgun for injection of hypervelocity hydrogen pellets as a fusion reactor refueling mechanism, *IEEE TransMagn.*, jan 1997, vol.33, No.I,

[12] Putman P.: EM Launch Competitors’ guide, Lifeboat Foundation, march 2006

Autorzy

Krzysztof Kluszczyński,
 krzysztof.kluszczyński@polsl.pl
 Roman Kroczek, kroczek.roman@gmail.com
 Jarosław Domin, jaroslaw.domin@polsl.pl
 Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Mechatroniki, ul. Akademicka 10A, 44-100 Gliwice