

Jerzy BUCHACZ
Zbigniew RACZYŃSKI

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI UKŁADÓW WYTWARZAJĄCYCH POLE MAGNETYCZNE W WYRZUTNI SZYNOWEJ

Streszczenie: W artykule przedstawiono spotykane w wyrzutniach układy szyn wytwarzających pole magnetyczne. Na podstawie obliczeń modelowych przeprowadzono analizę wpływu geometrii układu szyn na rozkład indukcji magnetycznej oraz porównano efektywność generowania pola. Omówiono też wpływ materiałów otaczających szyny na wielkość indukcji pola magnetycznego w wyrzutni. Obliczenia teoretyczne zostały zweryfikowane podczas badań modelu wyrzutni.

Słowa kluczowe: wyrzutnia szynowa, pole magnetyczne, pocisk aluminiowy.

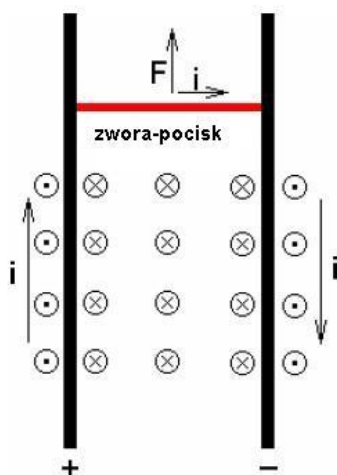
1. WPROWADZENIE

Zasada działania wyrzutni elektromagnetycznej polega na wykorzystaniu Oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik, przez który płynie prąd elektryczny.

Zgodnie ze wzorem Lorentza [1] na przewodnik o długości l , przez który płynie prąd (o natężeniu I), umieszczony w polu magnetycznym o indukcji B działa siła F_L

$$\vec{F}_L = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (1)$$

W przypadku wyrzutni szynowej, źródłem pola magnetycznego są równoległe szyny, przez które płynie prąd, a poruszającym się przewodnikiem jest pocisk, który pełni rolę zwory łączącej szyny (rys.1.).



Rys. 1. Idea działania elektromagnetycznej wyrzutni szynowej

Mimo pozornej prostoty układu wyrzutni, jej praktyczna realizacja wymaga rozwiązania wielu problemów, związanych z koniecznością uzyskania bardzo dużych wartości iloczynu natężenia prądu i indukcji, w celu wytworzenia dostatecznie dużej siły, zdolnej do nadania pociskowi odpowiedniej prędkości wylotowej.

Dla przykładu, pomijając tarcie, opór powietrza i inne straty energii, rozpędzenie pocisku o masie 10g, do prędkości 1000 m/s, w wyrzutni o długości 1m, wymaga wytworzenia siły $F_L=5000$ N. Przy założeniu odległości między szynami $l=10$ mm, iloczyn $I \cdot B$ powinien wynosić 500000 [A·T], a oddziaływanie pola magnetycznego z prądem płynącym przez pocisk powinno trwać 2 ms.

Zatem podstawowymi zadaniami przy konstrukcji wyrzutni są:

- a) budowa układu zasilania, zdolnego dostarczyć prąd o natężeniu setek tysięcy amperów w czasie rzędu milisekund,
- b) optymalizacja kształtu szyn, w celu wytworzenia pola magnetycznego o maksymalnej wartości indukcji, przy danej wartości natężenia prądu.

2. ANALIZA WPLYWU KSZTAŁTU SZYN NA ROZKŁAD INDUKCJI POLA MAGNETYCZNEGO

2.1 Założenia modelowe

Obliczenia rozkładu indukcji pola magnetycznego przeprowadzono przyjmując założenia na podstawie poprzednio prowadzonych prac nad wyrzutnią elektromagnetyczną [2].

Przyjęto:

- natężenie prądu płynącego przez szyny - 100 kA,
- stały odstęp szyn $l=8$ mm,
- długość szyn – 0,3 m.
- materiał szyn – miedź, o przewodności 58 MS/m i względnej przenikalności magnetycznej $\mu=1$,
- otoczenie szyn – materiał o względnej przenikalności magnetycznej $\mu=1$.

Obliczenia zostały przeprowadzone metodą elementów skończonych przy użyciu programu FEMM [3], wykorzystanego do modelowania wyrzutni elektromagnetycznej w Naval Research Laboratory, USA [4].

Program FEMM rozwiązuje numerycznie zadane równanie, znajdując wartości indukcji B , przy zadanej wartości i kierunku przepływu prądu I , wymiarach przewodników, w których płynie prąd, częstotliwości prądu, wartości przenikalności magnetycznej μ materiałów analizowanego przypadku, a także przy określonych warunkach brzegowych.

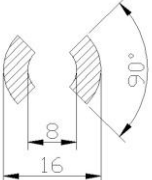
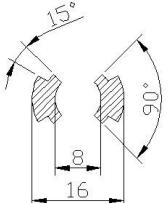
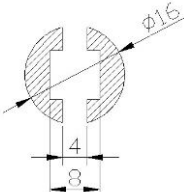
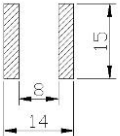
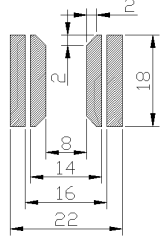
2.2 Obliczenia indukcji pola magnetycznego

Celem obliczeń [5] było porównanie wartości indukcji magnetycznej B , wytwarzanej przez układy szyn o różnym kształcie, w tym spotykane w zagranicznych rozwiązaniach prototypowych wyrzutni elektromagnetycznych [6] – Tablica 1, pozycje 1÷3. Opisywane wyrzutnie elektromagnetyczne mają bardzo różne konstrukcje, zarówno szyn prowadzących, jak i płaszcza otaczającego szyny. Różne są też kalibry wyrzutni, wymiary, wartości prądów płynących w szynach, jak i źródła zasilania. Dla porównania wpływu rozmieszczenia i kształtu szyn na wartość indukcji pola przyjęto jednakowe warunki dla wszystkich badanych konfiguracji. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia dla dwóch układów szyn płaskich – Tablica 1, poz.4 ÷ 5. Ponieważ czas przepływu prądu przez szyny jest bardzo krótki (rzędu milisekund), praktycznie należy rozważać impuls prądowy lub przyjąć, że przez szyny płynie prąd przemienny o dużej częstotliwości [7], dlatego obliczenia przeprowadzono dla:

- prądu stałego,
- prądu przemiennego o częstotliwości 1000 Hz.

W wyniku obliczeń określono wartość średnią składowej normalnej indukcji magnetycznej w szczelinie między szynami. Geometrię szyn oraz wyniki obliczeń przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Kształt szyn i wartości indukcji magnetycznej wytwarzanej w szczelinie między szynami, podczas przepływu prądu o natężeniu 100 kA (wymiary szyn w [mm]).

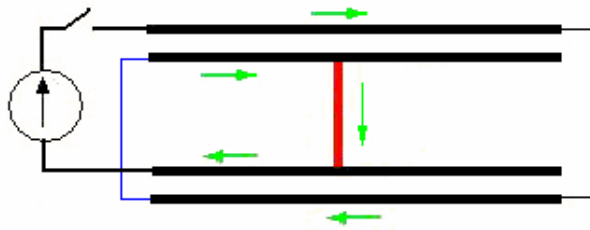
Poz.	Kształt szyn	B_{sr} [T], prąd stały	B [T], 1000 Hz (*)
1		6,82	6,63
2		7,33	7,24
3		5,44	4,54
4		5,85	5,49
5		9,29	8,51

(*) - dla prądu przemiennego, w tabelicy podano wartość modułu wektora indukcji $|B|$.

W układzie szyn pojedynczych, największa indukcja w szczelinie występuje dla szyn będących fragmentami pierścienia (tab. 1, poz.1÷2). Wykonanie takich szyn jest jednak trudne technicznie, z uwagi na siły działające na szyny podczas przepływu dużego prądu.

Do badań modelowych bardziej odpowiednie są szyny płaskie (tab. 1, poz. 4), łatwe do zamocowania w obudowie, wykazujące przy tym jedynie ok. 15% mniejszą indukcję, niż szyny wykonane z fragmentów pierścienia (tab. 1, poz.1).

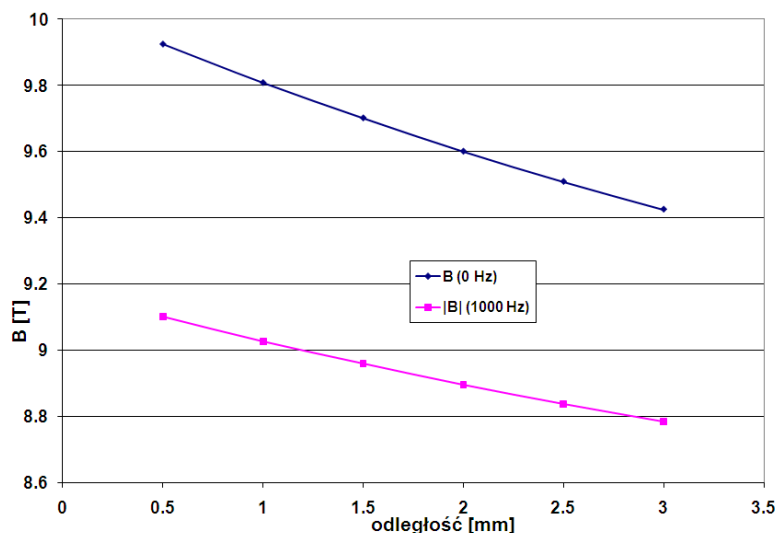
Bardzo obiecujące jest wykonanie wyrzutni w postaci szyn podwójnych [7, 8], które są połączone szeregowo (rys. 2).



Rys. 2. Schemat połączenia elektrycznego szyn podwójnych

Płaskie szyny podwójne (tab. 1, poz. 5) wytwarzają ok. 1,6 razy większą indukcję niż płaskie szyny pojedyncze i 1,35 razy większą niż szyny wykonane z fragmentów pierścienia (tab. 1, poz. 1), przy takiej samej wartości natężenia prądu.

Na wartość indukcji w szczelinie układu szyn podwójnych ma wpływ odległość między szynami „jednokierunkowymi”, tj. szynami sąsiadującymi ze sobą, w których prąd płynie w tym samym kierunku. Przy zwiększaniu tej odległości, indukcja pola działającego na pocisk-zworę maleje – co przedstawiono na rys. 3. [5].



Rys. 3. Zależność wartości indukcji (dla układu z tablicy 1, poz. 5) od odległości szyn „jednokierunkowych”

2.3 Siły oddziaływujące na szyny z prądem

Jeżeli w szynach, płyną jednakowe co do wartości prądy, lecz w przeciwnych kierunkach, to odpychają się one z siłą F_s [1]:

$$F_s = \mu_0 \frac{I^2 l}{2\pi d} \quad (2)$$

gdzie:

I - prąd płynący przez szynę,

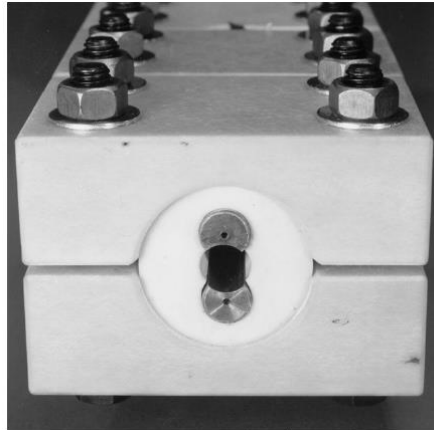
l - długość szyny,

d - odległość szyn.

Dla przykładu: szyny o długości $l = 0,3$ m, odległe od siebie o $d = 8$ mm przez które płynie prąd o natężeniu $I = 100$ kA, odpychają się z siłą $F_s = 75$ kN.

2.4 Wpływ otoczenia szyn na rozkład indukcji pola magnetycznego

Obudowa szyn wyrzutni musi wytrzymać duże naprężenia, wynikające z działania siły odpychającej szyny, a jednocześnie nie może zakłócać (osłabiać) pola magnetycznego działającego na pocisk. Aby spełnić te wymagania, łożo szyn wykonuje się z laminatów wzmacnianych włóknami szklanymi, kompozytów z włóknami węglowymi, ceramiki i stali [6]. Materiały te są niemagnetyczne, jednak elementy łoża muszą być ze sobą połączone, zwykle za pomocą metalowych śrub ściskających części obudowy (rys. 4).



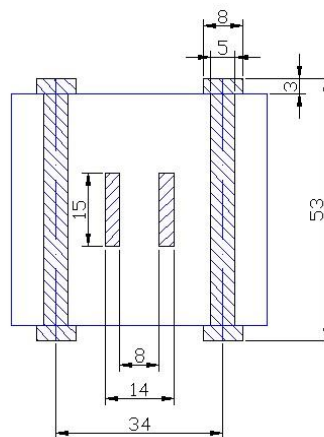
Rys. 4. Obudowa szyn okrągłych, skręcona śrubami (wg [6])

W celu sprawdzenia wpływu śrub wykonanych ze stali węglowej i stali nierdzewnej na pole magnetyczne układu szyn, wykonano obliczenia modelowe, dla szyn prostych (Tablica 1 poz. 4). Własności materiału śrub podano w tablicy 2.

Tablica 2. Własności materiału śrub skręcających obudowę szyn wyrzutni.

Rodzaj stali	Przenikalność magnetyczna względna	Przewodność właściwa [MS/m]	Norma stali
Stal węglowa	902,6	5,848	DIN 1.1121
Stal nierdzewna	1	1,334	DIN 1.4401

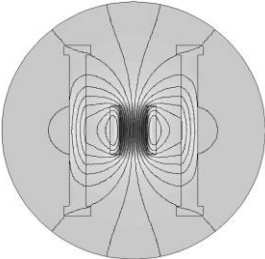
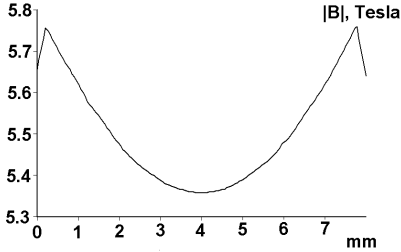
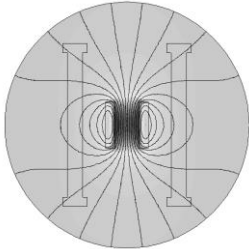
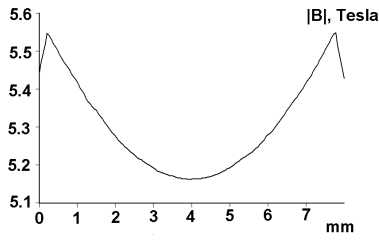
Rozmieszczenie śrub względem szyn, w przekroju, przedstawia rys. 5.

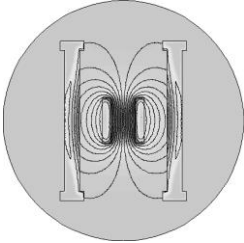
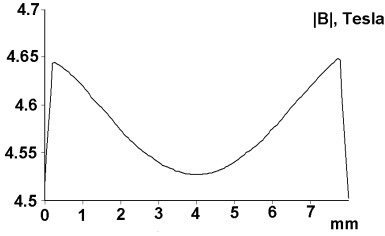
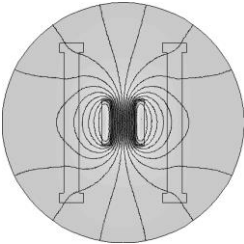
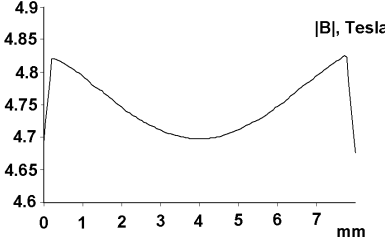


Rys. 5. Położenie śrub względem szyn (przekrój poprzeczny wyrzutni)

Śruby ze stali węglowej zniekształcają linie pola magnetycznego, (przy obliczeniach dla prądu stałego), zwiększając nieco wartość indukcji w szczelinie (5,51 T) w stosunku do indukcji w wyrzutni skręconej śrubami niemagnetycznymi (5,31 T). Podobnie jest dla prądu przemiennego (1000 Hz) (Tablica 3).

Tablica 3. Linie sił pola magnetycznego i profil indukcji w szczelinie między szynami wyrzutni, przy zastosowaniu śrub z materiału magnetycznego i niemagnetycznego.

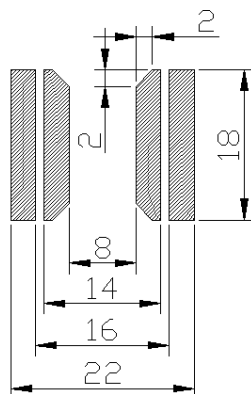
Material śrub	Kształt linii pola	Profil indukcji w szczelinie	Średnia wartość indukcji *
Prąd stały o natężeniu 100 kA			
Stal węglowa			5,51 T
Stal nierdzewna			5,31 T

Prąd przemienny o natężeniu 100 kA (1000 Hz)			
Stal węglowa			4,58 T
Stal nierdzewna			4,75 T

(*) - dla prądu przemiennego, w tablicy podano wartość modułu wektora indukcji $|B|$.

3. MODEL WYRZUTNI DWUSZYNOWEJ

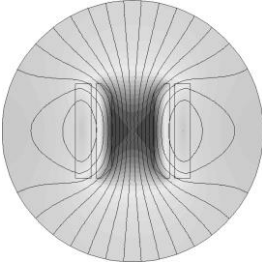
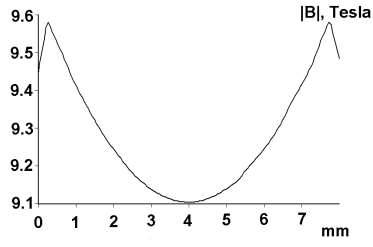
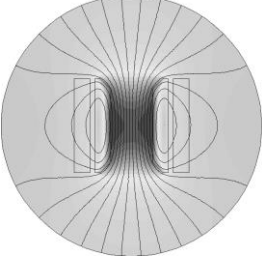
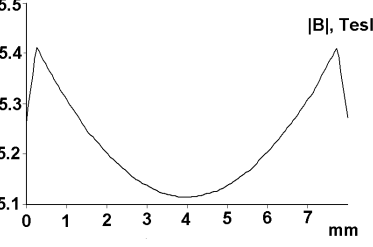
W celu praktycznej oceny układu wyrzutni szynowej jak na rys. 2, wykonano model wyrzutni, z układem szyn podwójnych, o kształcie zapewniającym optymalną wartość indukcji magnetycznej (rys.6).

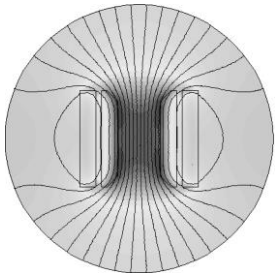
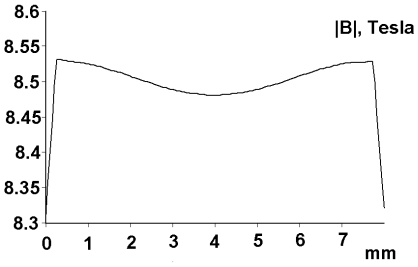
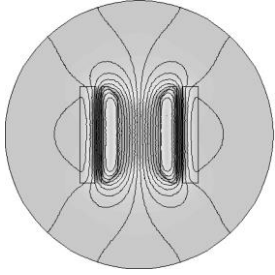
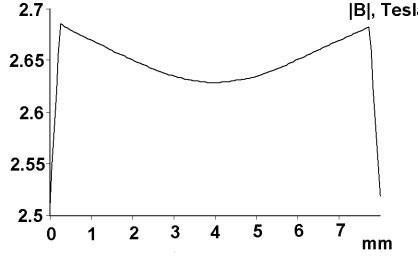


Rys. 6. Układ szyn w wykonanym modelu wyrzutni.

Sąsiadujące szyny zostały oddzielone przekładką z laminatu szkło-epoksydowego o grubości 1mm. Konstrukcja wyprowadzeń szyn pozwalała na podłączenie zasilania zarówno w układzie szyn podwójnych (jak na rys. 2), jak i wykorzystania tylko szyn wewnętrznych. Wyniki obliczeń indukcji pola magnetycznego przy dwóch sposobach zasilania szyn, zamieszczono w tablicy 4.

Tablica 4. Wyniki obliczeń modelowych przy różnych konfiguracjach zasilania układu szyn.

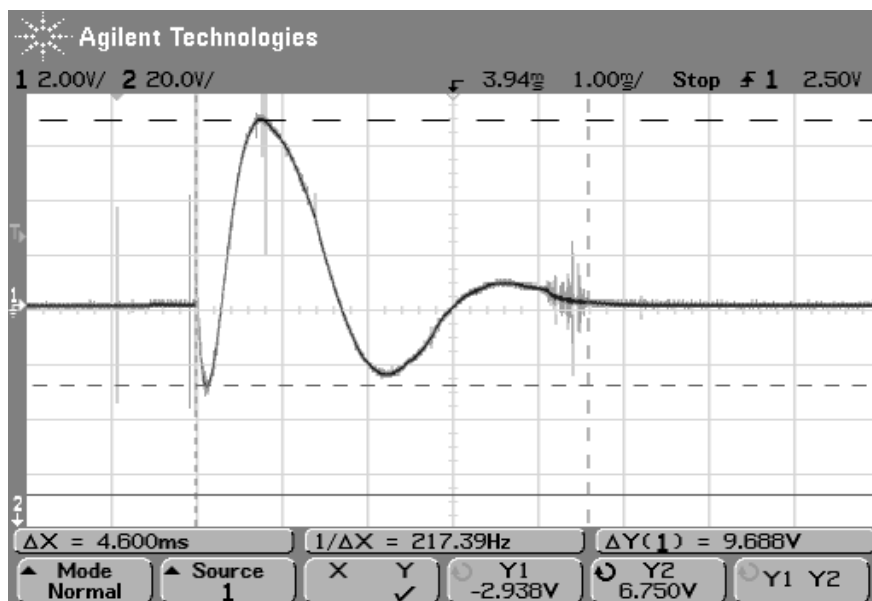
Zasilanie szyn	Kształt linii pola	Profil indukcji w szczelinie	Średnia wartość indukcji *
Prąd stały o natężeniu 100 kA			
Szyny wewn.+ zewn.			9,29 T
Szyny wewnętrzne			5,23 T

Prąd przemienny o natężeniu 100 kA (1000 Hz)			
Szyny wewn.+ zewn.			8,51 T
Szyny wewnętrzne			2,65 T

(*) - dla prądu przemiennego, w tablicy podano moduł wektora indukcji $|B|$.

Przy zasilaniu szyn pojedynczych, indukcja jest mniejsza, niż w przypadku zasilania szyn podwójnych, odpowiednio: 1,1 razy (prąd stały) i 1,97 razy (prąd o częstotliwości 1000 Hz). Obliczenia dla prądu o częstotliwości 1000 Hz uwzględniają efekt naskórkowego przepływu prądu przez szynę zewnętrzną i pokazują, że obecność równoległego przewodnika osłabia wypadkowe pole magnetyczne.

Zarówno obliczenia dla prądu stałego jak i przemiennego, stanowią jedynie przybliżenie, w rzeczywistym przypadku [9] przez szyny płynie prąd w postaci impulsu o kształcie pokazanym na rys. 7.



Rys. 7. Kształt impulsu prądu przepływającego przez szyny

3.1. Wyniki badań modelu

Dla sprawdzenia praktycznego efektu działania szyn podwójnych, przeprowadzono próby działania modelu wyrzutni [9], zasilanej z baterii kondensatorów.

Badania zostały wykonane, przy zasilaniu szyn podwójnych i pojedynczych (wewnętrznych) napięciem 1500 V. Do prób zostały wykorzystane pociski wykonane z aluminium i z mosiądzu.

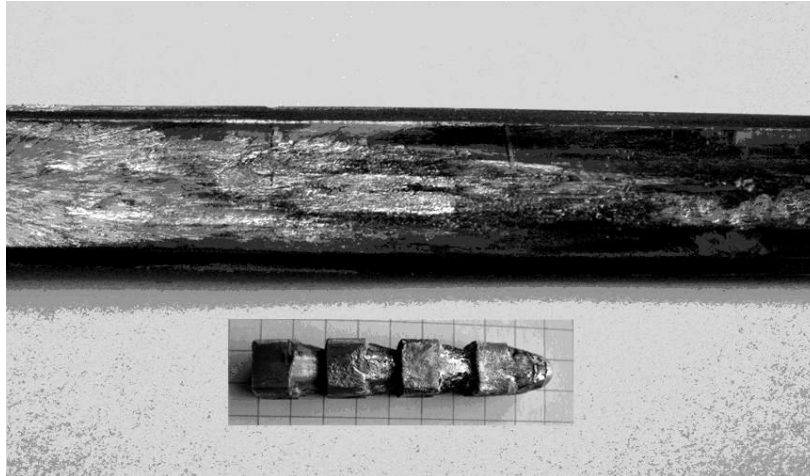
Wybrane wyniki badań zestawiono w tablicy 5.

Tablica 5. Wyniki prób modelu wyrzutni.

Materiał pocisku	Masa [g]	Szyny	Napięcie [kV]	Ampl. prądu [A]	Prędkość v [m/s]	Stosunek prądów*	Stosunek prędkości*
aluminium	10,0	w+z	1,5	53333	81,2	0,98	1,1
aluminium	10,0	wewn.	1,5	54200	73,5	-	-
mosiądz	10,2	w+z	1,5	47087	108,7	1,03	1,26
mosiądz	10,2	wewn.	1,5	45833	86,5	-	-

(*) – obliczono stosunek wartości prądów i prędkości przy zasilaniu szyn w+z (wewnętrzne i zewnętrzne) do wartości otrzymanych przy zasilaniu tylko szyn wewnętrznych.

Podczas prób często występowały zwarcia między parą szyn sąsiadujących, spowodowane wyładowaniem między krawędziami szyn, po zanieczyszczeniu kanału wyrzutni produktami nadtopienia pocisków podczas ich ruchu (rys. 8), co wymagało wymiany przekładek izolacyjnych i starannego ich montażu między szynami.



Rys. 8. Pocisk aluminiowy ze śladami nadtopienia i fragment szyny wewnętrznej z osadzonymi śladami stopionego aluminium

4. PODSUMOWANIE

Wykonane obliczenia porównawcze i badania modelu wyrzutni wykazały, że przy wyborze kształtu i układu szyn należy kierować się, oprócz teoretycznie wyliczonych wartości indukcji pola magnetycznego, również przesłankami natury mechanicznej, tj. łatwością mocowania i wymiany szyn oraz doбором materiału izolacyjnego.

Zastosowany układ podwójnych szyn, oprócz zdolności do wytworzenia pola magnetycznego o indukcji większej niż szyny pojedyncze o bardziej skomplikowanych kształtach, cechuje się prostotą wykonania i mocowania w obudowie wyrzutni.

Uzyskane podczas badań modelu, niższe wskaźniki zwiększenia prędkości pocisku w stosunku do wyrzutni o szynach pojedynczych, niżby to wynikało ze stosunku teoretycznie obliczonych wartości indukcji, spowodowane są niską odpornością materiałów szyn (miedź) i pocisków (aluminium, mosiądz) na wysokie temperatury wytwarzane na powierzchniach styku i nadtopienie, zarówno szyn jak i pocisków. Erozja szyn wewnętrznych i spowodowana nią konieczność ich wymiany również przemawia za układem szyn podwójnych, ponieważ szyny zewnętrzne pozostają nienaruszone. Zagadnieniami, które wymagają dopracowania, w wyrzutni z układem szyn podwójnych są m.in.:

- uzyskanie odpowiedniej izolacji między sąsiadującymi szynami,
- dobór materiałów szyn i pocisku, które byłyby odporne na łuk elektryczny występujący w miejscu ich styku i spowodowaną nim wysoką temperaturę.

5. LITERATURA

- [1] D. Halliday, R. Resnick "Fizyka dla studentów nauk przyrodniczych i technicznych" t.2 PWN Warszawa 1972.
- [2] Z. Raczyński „Model wyrzutni elektromagnetycznej” SPG (22) nr 1, 2007.
- [3] David Meeker "Finite Element Method Magnetism - Version 4.0 User's Manual", Jan.2006.
- [4] R.A. Meger, J. Neri, R.J. Allen i inni "Research on High Power Railguns at the Naval Research Laboratory" at 13th Electromagnetic Launch Technology Symposium, 22-25 May 2006, Potsdam, Germany.
- [5] Sprawozdanie z realizacji tematu "Projekt modelu wyrzutni elektromagnetycznej" 29/D/2007 (opracowanie OBRUM – nie publikowane).
- [6] P. Lehmann, M. Duc Vo, W. Wenning "Comparative Study of Railgun Housings Made of Modern Fiber Wound Materials, Ceramic, or Insulated Steel Plates", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 1, Jan. 2005.
- [7] J. Gallant, P. Lehmann "Experiments With Brush Projectiles in a Parallel Augmented Railgun", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 1, Jan. 2005.
- [8] J.A. Leuer "Electromagnetic Modeling of Complex Railgun Geometries", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-22, No. 6, Nov. 1986.
- [9] Sprawozdanie z realizacji tematu "Badania modelu wyrzutni elektromagnetycznej" 51/D/2007 (Prace własne OBRUM sp. z o.o. – nie publikowane).

EFFICIENCY ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD GENERATION SYSTEMS IN RAILGUN

Abstract: Paper describes rail systems for magnetic field generation, used in railguns. On the base of model calculations, the analysis of rail geometry influence on magnetic induction distribution and comparison of field generation efficiency are performed. There is also discussed the effect of materials surrounding rails on magnetic induction value. Theoretical calculation was verified during railgun model tests.

Key words: railgun, magnetic field, aluminium projectile.

Recenzent: Dr inż. Zygmunt Szymański