

ANALIZA SYMULACYJNA WYBRANYCH KONSTRUKCJI OBWODÓW MAGNETYCZNYCH JAKO STOJANÓW PŁASKIEGO IMPULSOWEGO NAPĘDU LINIOWEGO

Zdzisław GOSIEWSKI*, Piotr KŁOSKOWSKI*, Mirosław KONDRATIUK*

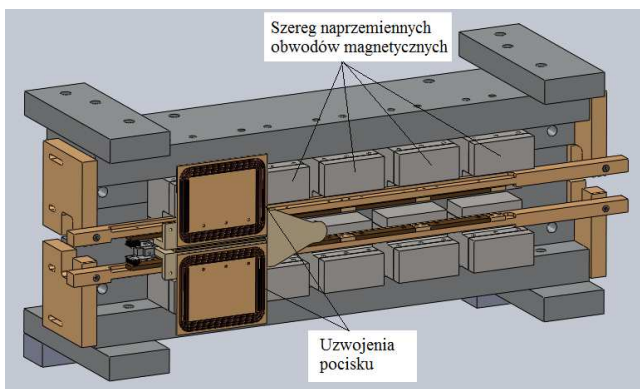
*Katedra Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

gosiewski@pb.edu.pl, kloskowski@o2.pl, m.kondratiuk@pb.edu.pl

Streszczenie: Praca przedstawia analizę różnych rozwiązań konstrukcyjnych obwodów magnetycznych jako stojanów płaskiego impulsowego napędu liniowego. Zaproponowane zostały trzy konfiguracje obwodów magnetycznych. Każdy z obwodów magnetycznych charakteryzuje się czterema szczelinami powietrznymi, wewnątrz których znajdują się będą uzwojenia odpowiedzialne za przyspieszanie elementu napędzanego. Analiza poszczególnych obwodów magnetycznych została przeprowadzona na podstawie wyników symulacyjnych uzyskanych przy użyciu oprogramowania COMSOL Multiphysics, dla każdej z zaproponowanych konstrukcji. Zakres badań dotyczył rozkładu indukcji magnetycznej w otoczeniu każdej ze szczelin powietrznych. Otrzymane dane posłużą do opracowania konstrukcji wyrzutni magnetycznej mającej charakter płaskiego napędu liniowego.

1. WPROWADZENIE

Wyrzutnie magnetyczne są obecnie obiektami licznych badań i doświadczeń naukowych. Wiele ośrodków zajmuje się badaniami zarówno szynowych jak i cewkowych wyrzutni magnetycznych. W przypadku wyrzutni szynowych istnieje szereg problemów stojących na przeszkodzie szerokiemu upowszechnieniu tej technologii. Jednym z głównych problemów jaki występuje przy tego typu wyrzutniach jest bardzo wysoki prąd (rzędu kilkudziesięciu kA) potrzebny do ich zasilania (Fair, 2007). Duże natężenie prądu, jaki musi przepłynąć przez styk łączący szyny z przewodzącą częścią pocisku, prowadzi do powstania wysokich temperatur i szybkiego zużycia poszczególnych podzespołów (Iwao i inni, 2005).



Rys. 1. Schemat impulsowej wyrzutni magnetycznej z magnetycznym napędem liniowym

Niniejszy artykuł dotyczy koncepcji budowy wyrzutni magnetycznej wykorzystującej cechę płaskiego napędu liniowego (Rys. 1). Rozwiązanie to polega na zastosowaniu zewnętrznego źródła pola magnetycznego oraz odpowied-

nie ukształtowanych uzwojeń umieszczonych wewnątrz szczeliny powietrznej obwodu magnetycznego. Stojan napędu liniowego składa się z szeregu umieszczonych po sobie obwodów magnetycznych. Uzwojenia będące integralną częścią elementu napędzanego zbudowane są w taki sposób, aby siła nadająca mu przyspieszenie pochodziła od dwóch sąsiednich obwodów magnetycznych (Rys. 1). Dzięki temu rozwiązaniu możliwe jest ograniczenie wartości prądu zasilającego wyrzutnię a przez to uzyskanie większej trwałości i powtarzalności urządzenia.

2. OBWODY MAGNETYCZNE ZE SZCZELINĄ POWIETRZNĄ

Siła napędowa nadająca przyspieszenie elementowi napędzanemu w przypadku wyrzutni magnetycznej z płaskim napędem liniowym jest siłą Lorentza (Bolkowski, 2007):

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B}), \quad (1)$$

gdzie: I – prąd przepływający przez przewodnik umieszczony w polu magnetycznym, \vec{L} – wektor kolinearny z prądem, \vec{B} – indukcja magnetyczna oddziałująca na przewodnik.

W przypadku klasycznej wyrzutni magnetycznej typu szynowego głównym parametrem odpowiedzialnym za generowanie wysokiej wartości siły napędowej jest natężenie prądu przepływającego przez obwód elektryczny.

Przeptyw prądu, zgodnie z prawem Ampera, powoduje powstanie silnego pola magnetycznego wokół szyn. W układzie dwóch szyn z prądem (klasyczna wyrzutnia rail gun) wartość indukcji magnetycznej osiąga maksimum w bezpośrednim sąsiedztwie szyn a minimum w centrum obszaru pomiędzy szynami (Gosiewski i Kłoskowski, 2009). Zewnętrzne źródło pola magnetycznego pozwala na

utrzymanie siły napędowej przy proporcjonalnym zmniejszeniu wartości prądu elektrycznego (Gosiewski i Kłoskowski, 2008). Kolejnym sposobem na zwiększenie wartości siły Lorentza jest zastosowanie wielokrotnego przepływu prądu przez daną przestrzeń, w której występuje pole magnetyczne (szczelinę powietrzną). Można to zrealizować za pomocą odpowiednio ukształtowanych uzwojeń znajdujących się w „skrzydłach” elementu napędzanego (Rys. 1). Aby zrealizować w/w założenia konieczna jest konstrukcja odpowiednich obwodów magnetycznych zapewniających dostateczną wartość wektora indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.

Mając dane parametry magnesu trwałego takie jak indukcja remanencji oraz wymiary geometryczne zarówno magnesów jak i magnetowodów wykonanych z materiałów ferromagnetycznych o znanej przenikalności magnetycznej możemy wyznaczyć wartość indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej obwodu. W tym celu można wykorzystać prawo Kirchoffa dla obwodów magnetycznych (Bolkowski, 2007).

$$H_{Fe} l_{Fe} + H_m l_m + H_p l_p = 0, \quad (2)$$

gdzie: H_{Fe} – natężenie pola magnetycznego w magnetowodzie, l_{Fe} – średnia długość linii pola magnetycznego przebiegających przez magnetowód, $H_p l_p$ – wartości odnoszące się do szczeliny powietrznej, $H_m l_m$ – wartości odnoszące się do magnesu trwałego.

W przypadku, obwodów magnetycznych, w których długość szczeliny powietrznej jest pięciokrotnie mniejsza od krótszego boku przekroju poprzecznego szczeliny, równanie (2) można rozwiązać wykorzystując zasadę ciągłości strumienia, co jest jednoznaczne z pominięciem strumienia rozproszenia (Bolkowski, 2007).

$$B_n S_n = const, \quad (3)$$

gdzie: B_n – indukcja magnetyczna danego elementu, S_n – pole przekroju poprzecznego danego elementu.

W przypadku, gdy wymagana jest zarówno analiza strumienia rozproszenia dla danego obwodu magnetycznego jak i dokładny rozkład indukcji magnetycznej w pewnym obszarze otaczającym badany obwód, obliczenia analityczne stają się znacznie bardziej skomplikowane. Aby rozwiązać dany problem można posłużyć się specjalistycznym oprogramowaniem bazującym na metodzie elementów skończonych (np.: COMSOL Multiphysics).

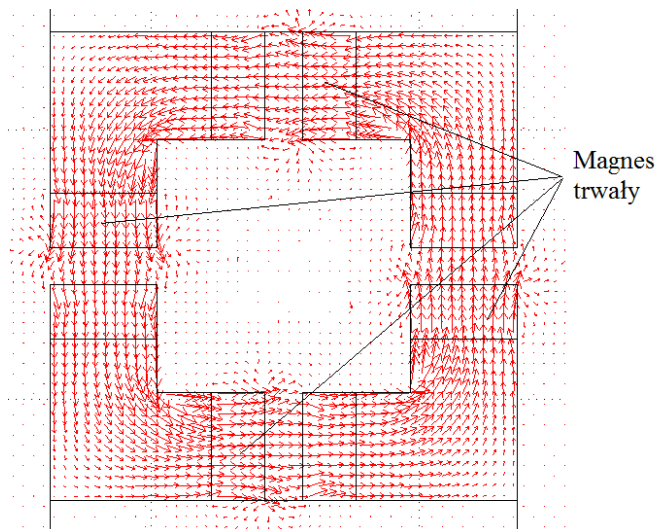
3. ANALIZA SYMULACYJNA

Badania symulacyjne przeprowadzono dla trzech rozwiązań konstrukcyjnych obwodów magnetycznych z uwzględnieniem ograniczeń wymagających montażu całości konstrukcji oraz jej zamocowania.

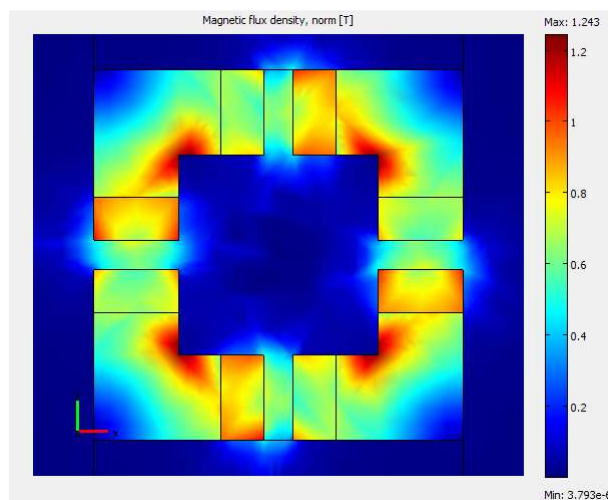
Analizie porównawczej poddano wartości indukcji magnetycznej w określonych punktach szczeliny powietrznej. Do analiz wykorzystano następujące obwody magnetyczne:

- pojedynczy obwód magnetyczny – magnesy i magnetowody tworzą w przekroju zarys kwadratu, wzdłuż którego przebiega strumień magnetyczny (Rys. 2÷3);

- podwójny obwód magnetyczny – obwód rozgałęziony, gdzie strumień magnetyczny przechodzący przez pierwszy magnes ulega rozgałęzieniu w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach, a następnie skupieniu przed drugim magnesem (Rys. 4÷5);
- poczwórny obwód magnetyczny – cztery oddzielne obwody magnetyczne, każdy z niezależnym magnesem trwałym (Rys. 6÷7).



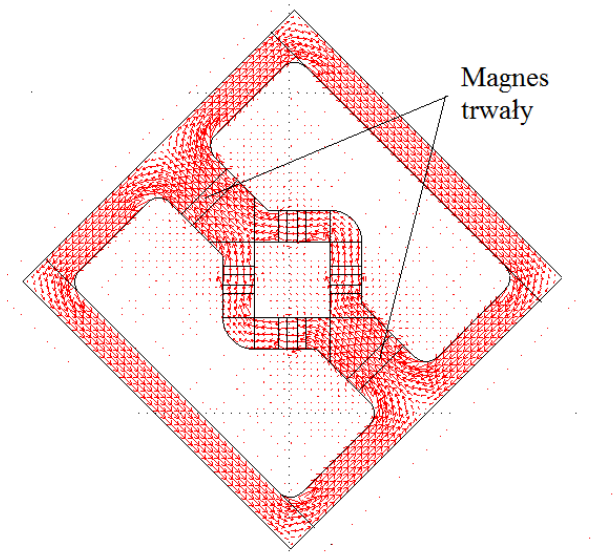
Rys. 2. Przebieg linii pola magnetycznego pojedynczego obwodu magnetycznego



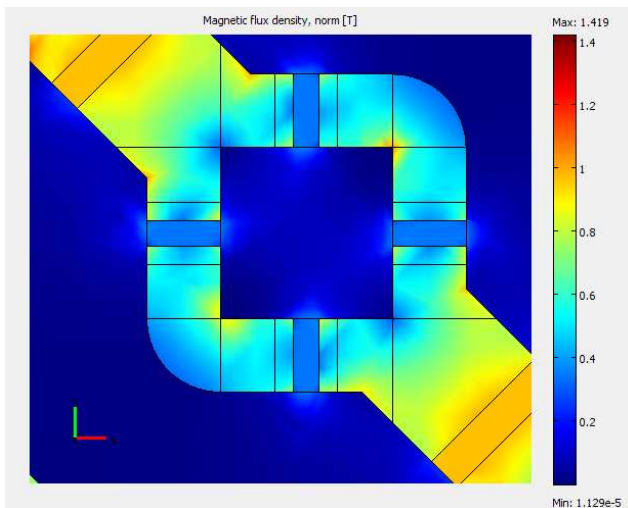
Rys. 3. Rozkład indukcji magnetycznej wokół pojedynczego obwodu magnetycznego

Aby warunki analizy były porównywalne wymiary i rozkład szczelin powietrznych jest jednakowy dla każdej konstrukcji. Zastosowano również porównywalne źródła strumienia magnetycznego jakimi są neodymowe magnesy płytkowe wykonane z materiału N38 o indukcji remanencji $B_r=1,2$ [T] oraz następujących wymiarach:

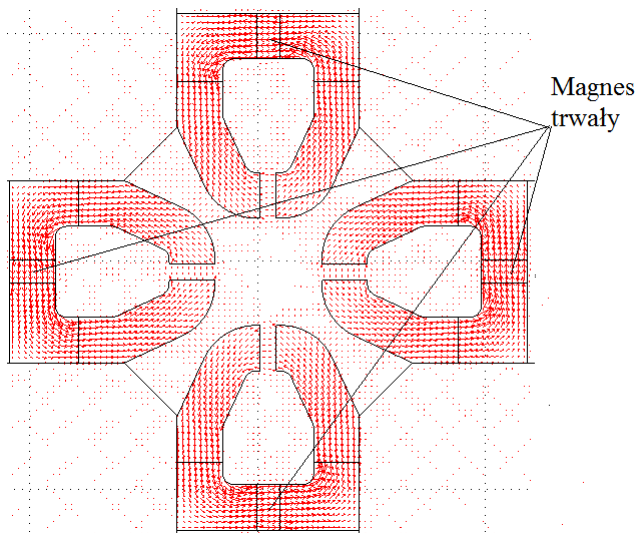
- pojedynczy obwód magnetyczny – 4 magnesy 80x20x10mm;
- podwójny obwód magnetyczny – 2 magnesy 80x40x10mm;
- poczwórny obwód magnetyczny – 4 magnesy 80x20x10mm.



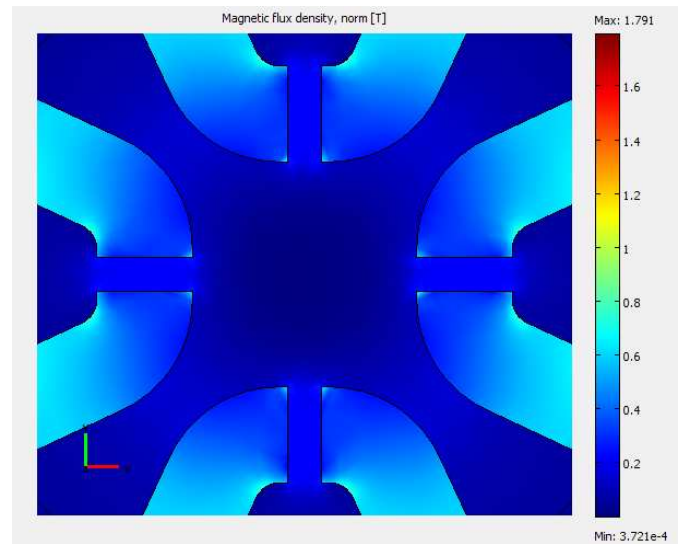
Rys. 4. Przebieg linii pola magnetycznego podwójnego obwodu magnetycznego



Rys. 5. Rozkład indukcji magnetycznej wokół szczelin powietrznych podwójnego obwodu magnetycznego

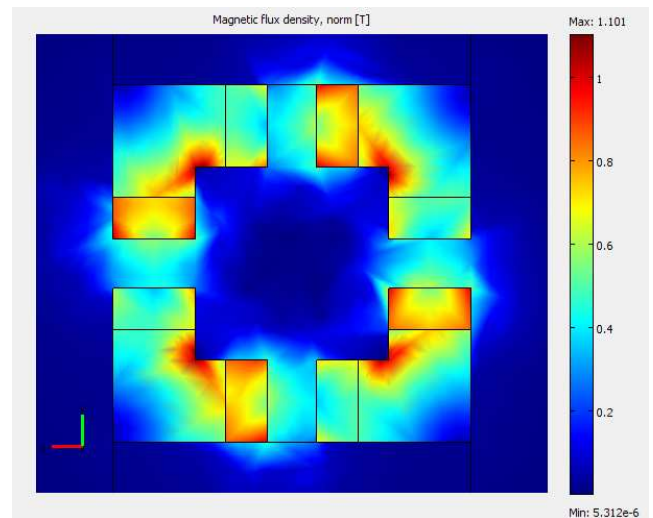


Rys. 6. Przebieg linii pola magnetycznego początkowego obwodu magnetycznego



Rys. 7. Rozkład indukcji magnetycznej wokół szczelin powietrznych początkowego obwodu magnetycznego

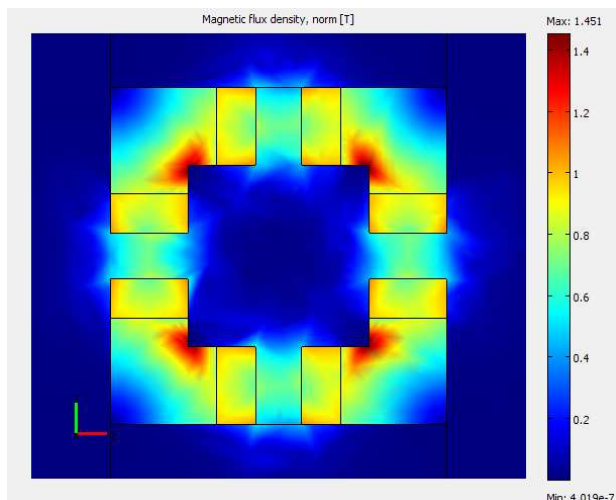
Każda z czterech szczelin powietrznych miała wysokość 7mm oraz przekrój 80x20mm. Pozostała część obwodu magnetycznego stanowi czyste żelazo techniczne o założonej stałej względnej przenikalności magnetycznej $\mu_r=4000$. Szerokość i długość magnetowodu odpowiada wymiarom geometrycznym magnesu trwałego.



Rys. 8. Rozkład indukcji magnetycznej wokół pojedynczego obwodu magnetycznego dla szczeliny powietrznej o długości 15mm i czterech magnesów trwałych

Na podstawie przedstawionych powyżej analiz można stwierdzić, że pojedynczy obwód magnetyczny charakteryzuje się najwyższą wartością pola magnetycznego wewnątrz szczelin powietrznych (Tab. 1). Kolejną zaletą pojedynczego obwodu magnetycznego jest stosunkowo łatwy sposób na dodatkowe zwiększenie pola magnetycznego w szczelinie powietrznej poprzez zastosowanie kolejnych czterech magnesów. Następnym etapem analiz pojedynczego obwodu magnetycznego było sprawdzenie, w jakim stopniu możliwe jest zwiększenie długości szczeliny powietrznej przy zastosowaniu dodatkowych magnesów trwałych. Zwiększona wysokość szczeliny powietrznej pozwala

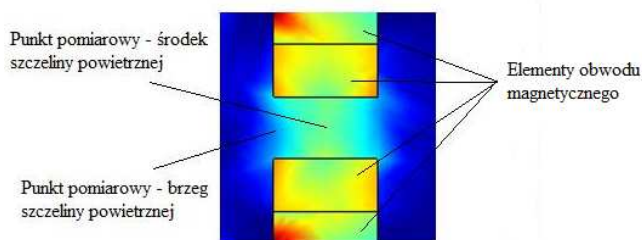
na umieszczeniu wewnątrz niej elementu nieferromagnetycznego (np. ceownika aluminiowego) służącego do dodatkowego przytwierdzenia magnesów do magnetowodu oraz jednoznacznego określenia przestrzeni, w której może poruszać się pocisk. Symulację tej konfiguracji obwodu przedstawiają Rys. 8÷9.



Rys. 9. Rozkład indukcji magnetycznej wokół pojedynczego obwodu magnetycznego dla szczeliny powietrznej o długości 15mm oraz ośmiu magnesów trwałych

4. INTERPRETACJA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Na podstawie przeprowadzonych analiz poszczególnych obwodów magnetycznych wyznaczone zostały wartości indukcji magnetycznej w założonych punktach pomiarowych. Dodatkowo wyznaczona została składowa indukcji magnetycznej o kierunku prostopadłym do kierunku prądu płynącego przez uzwojenia pocisku. Odczyt poszczególnych wartości dokonano w środku szczeliny tzn. połowie jej wysokości dla środka i brzegu przekroju szczeliny (Rys. 10).



Rys. 10. Miejsca wyznaczenia wartości indukcji magnetycznej

Na podstawie wyników przedstawionych w Tab. 1 można wywnioskować, że zastosowanie pojedynczego obwodu magnetycznego pozwala na uzyskanie znacznie wyższych wartości indukcji magnetycznej w poszczególnych punktach pomiarowych w porównaniu do pozostałych konfiguracji (Tab. 1).

Wprowadzenie dodatkowych magnesów, w przypadku obwodów ze zwiększoną szczeliną powietrzną, znacząco zwiększyło indukcję w środkowym punkcie pomiarowym,

natomiast indukcja na brzegu szczeliny pozostała na porównywalnym poziomie (Tab. 2). Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż konfiguracja pojedynczego obwodu magnetycznego ze szczeliną 7 mm i czterema magnesami trwałymi charakteryzuje się podobnymi własnościami jak obwód ze zwiększoną szczeliną powietrzną oraz ośmioma magnesami.

Tab. 1. Wyniki analiz indukcji magnetycznej zaproponowanych konstrukcji obwodów magnetycznych

Rodzaj obwodu magnetycznego	Pojedynczy obwód magnetyczny	Podwójny obwód magnetyczny	Poczwórny obwód magnetyczny
Badana wielkość oraz miejsce odczytu			
Indukcja magnetyczna w środku szczeliny [T]	0,64	0,341	0,21
Indukcja magnetyczna na brzegu szczeliny [T]	0,41	0,340	0,17
Składowa indukcji magnetycznej prostopadła do przepływu prądu w środku szczeliny [T]	0,64	0,341	0,21
Składowa indukcji magnetycznej prostopadła do przepływu prądu na brzegu szczeliny [T]	0,37	0,340	0,17

Tab. 2. Wyniki analiz indukcji magnetycznej pojedynczego obwodu magnetycznego ze zwiększoną szczeliną i dodatkowymi magnesami

Rodzaj obwodu magnetycznego	Pojedynczy obwód magnetyczny ze zwiększoną szczeliną	Pojedynczy obwód magnetyczny ze zwiększoną szczeliną oraz dodatkowymi magnesami
Badana wielkość oraz miejsce odczytu		
Indukcja magnetyczna w środku szczeliny [T]	0,46	0,70
Indukcja magnetyczna na brzegu szczeliny [T]	0,39	0,39
Składowa indukcji magnetycznej prostopadła do przepływu prądu w środku szczeliny [T]	0,46	0,69
Składowa indukcji magnetycznej prostopadła do przepływu prądu na brzegu szczeliny [T]	0,36	0,37

5. PODSUMOWANIE

Biorąc pod uwagę uzyskane rezultaty można stwierdzić, że konstrukcja oparta na pojedynczym obwodzie magnetycznym w najlepszym stopniu spełnia wymagania stawiane stojanowi impulsowego napędu liniowego. Wartość indukcji magnetycznej w obranych punktach pomiarowych jest w tym przypadku największa spośród rozpatrywanych konfiguracji, co przy porównywalnych wartościach źródeł strumienia magnetycznego świadczy o najmniejszej skłonności do rozpraszania strumienia. Wynika to z najkrótszej drogi jaką przebiegają linie pola magnetycznego oraz braku rozgałęzień, w których dochodzi do największego rozproszenia strumienia magnetycznego. Konstrukcja pojedynczego obwodu magnetycznego wymaga stosowania oddzielnych pętli uzwojeń dla każdej szczeliny powietrznej. Powyższy układ przedstawia Rys. 1. Dalsze prace prowadzone będą w kierunku wyznaczenia dokładnych wymiarów geometrycznych pojedynczego obwodu magnetycznego poprzez analizę wytrzymałościową poszczególnych elementów tworzących obwód magnetyczny oraz obiekt wyrzucany.

LITERATURA

1. **Bolkowski S.** (2007), Teoria obwodów elektrycznych, *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*, Warszawa.
2. **Fair H. D.** (2007), Progress in Electromagnetic Launch Science and Technology, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol/ 43, No. 1.
3. **Gosiewski Z, Kłoskowski P.** (2008) – Wspomaganie Działania Wyrzutni Magnetycznej Magnesami Trwałymi, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, Vol. LVII 3 (651).
4. **Gosiewski Z, Kłoskowski P.** (2009), Static Model of a Rail Launcher, *Solid State Phenomena*, Vol. 147÷149.
5. **Iwao T., Nemoto A, Yumoto M., Inaba T.** (2005), Plasma Image Processing of High Speed Arc Movement in a Rail-Gun, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 33, No. 2.
6. **COMSOL**, Multiphysics User's Guide, (2008), Ver. 3.5a.

SIMULATION ANALYSIS OF SELECTED CONSTRUCTIONS OF MAGNETIC CIRCUITS AS STATORS OF A FLAT LINEAR IMPULSE MOTOR

Abstract: This paper presents the analysis of different constructional solutions of the magnetic circuit which can be used as a stator of a flat linear impulse drive. The three configurations of magnetic circuits were considered. Each of magnetic circuits has four air gaps inside which the acceleration of windings of a driven element is possible. The analysis of each constructions of magnetic circuits were made by comparison of simulation results which were obtained by using the COMSOL Multiphysics software. The scope of works included the analysis of the magnetic flux density in the neighbourhood of each air gaps. The obtained data will be used to get the design concept of the magnetic launcher having the character of a flat linear motor.