

ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE PŁASKIEGO IMPULSOWEGO NAPĘDU LINIOWEGO

ZDZISŁAW GOSIEWSKI*, PIOTR KŁOSKOWSKI**, MIROSŁAW KONDRATIUK**

Instytut Lotnictwa, Politechnika Białostocka***

Streszczenie

Praca przedstawia koncepcję konstrukcyjną, analizę numeryczną oraz wstępną weryfikację modelu rzeczywistego płaskiego impulsowego napędu liniowego. Wykonane analizy numeryczne odnoszą się zarówno do pola magnetycznego generowanego przez obwody magnetyczne jak i do przebiegów prądu i spadku napięcia na baterii kondensatorów w trakcie procesu przyspieszania pocisku. Przeprowadzone badania wstępne (niskonapięciowe) miały na celu sprawdzenie poprawności przyjętych założeń konstrukcyjnych oraz porównanie danych eksperymentalnych z założeniami teoretycznymi.

WPROWADZENIE

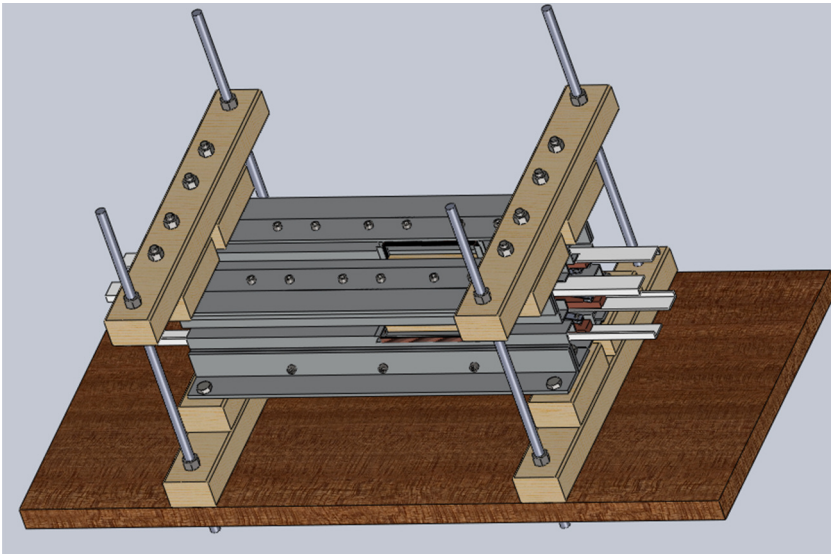
Elektryczne napędy bezpośrednie znajdują obecnie coraz szersze zastosowanie jako elementy wykonawcze różnego typu urządzeń przemysłowych. Niniejsza praca ma na celu przedstawienie koncepcji konstrukcyjnej wykorzystania charakterystycznych cech bezpośredniego napędu liniowego na potrzeby budowy modelu wyrzutni magnetycznej. Projektowana wyrzutnia łączy w sobie własności zarówno płaskiego silnika liniowego jak i klasycznej wyrzutni *rail gun*.

Głównym celem pracy była budowa stanowiska dla wyrzutni magnetycznej, która charakteryzować się będzie wysokimi wartościami siły napędowej przy niskich (w porównaniu do klasycznych wyrzutni szynowych) wartościach natężenia prądu zasilającego urządzenie. Źródłem inspiracji do przedstawionej koncepcji były główne problemy eksploatacyjne związane z klasycznymi wyrzutniami szynowymi. Magnetyczne wyrzutnie *rail gun* potrzebują bardzo wysokich impulsów prądowych, aby przyspieszyć pocisk o niewielkiej masie [Iwao i inni, 2007]. W pracy podjęta została praktyczna próba budowy urządzenia, które będzie umożliwiało wykorzystanie zewnętrznego pola magnetycznego do przyspieszania pocisków o masie około 0,5[kg] do prędkości rzędu kilkudziesięciu metrów na sekundę.

1. KONCEPCJA KONSTRUKCYJNA PŁASKIEGO IMPULSOWEGO NAPĘDU LINIOWEGO

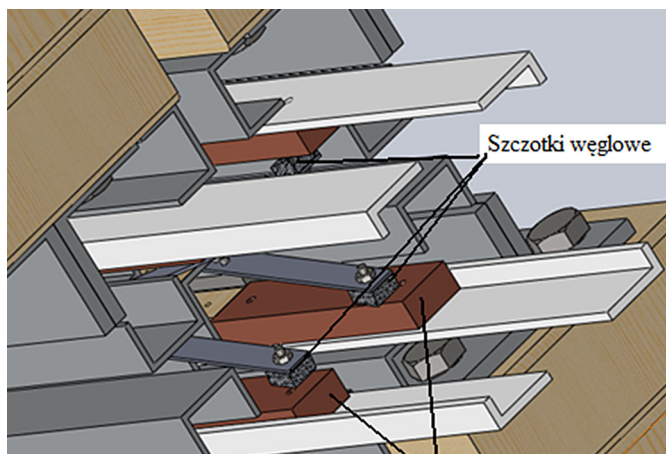
Podstawowymi elementami składowymi urządzenia są: stojan, pocisk oraz układ zasilania w postaci baterii kondensatorów. Główne założenia, na których oparta jest koncepcja budowy wyrzutni magnetycznej przedstawiają się następująco:

- Podstawowymi elementami stojana są trzy obwody magnetyczne ze szczelinami powietrznymi, wewnątrz których znajduje się przestrzeń przyspieszania dla pocisku.
- Źródłem pola magnetycznego dla każdego z obwodów magnetycznych jest osiem magnesów trwałych.
- Zwrot wektora indukcji magnetycznej dla każdego z dwóch sąsiednich obwodów magnetycznych jest przeciwny (rys 1, 3).
- Cechą charakterystyczną pocisku są cztery skrzydła, wewnątrz których nawinięte są specjalne, prostokątne cewki magnetyczne odpowiedzialne za generowanie siły Lorentza. Siła napędowa jest efektem przepływu ładunków elektrycznych przez uzwojenia pocisku znajdujące się w polu magnetycznym poszczególnych obwodów magnetycznych.
- Połączenie elektryczne pomiędzy magazynem energii elektrycznej a pociskiem jest realizowane za pomocą styku pomiędzy odpowiednimi elementami pocisku w postaci szczotek a szynami miedzianymi podłączonymi do baterii kondensatorów (rys. 2).
- Długość oraz ułożenie poszczególnych szyn miedzianych są tak dobrane, aby było możliwe mechaniczne rozłączenie oraz ponowne połączenie obwodu elektrycznego pomiędzy uzwojeniami pocisku a baterią kondensatorów w zależności od położenia pocisku względem stojana.
- Układ szyn jest tak dobrany, aby zapewnić odpowiednią polaryzację uzwojeń pocisku w celu utrzymania stałego zwrotu siły napędowej.
- Na każdym etapie przyspieszania pocisku siła Lorentza jest generowana w dwóch bokach każdej z prostokątnych cewek magnetycznych. Boki cewek znajdują się w tym czasie w szczelinach powietrznych dwóch sąsiednich obwodów magnetycznych.



Rys. 1. Model CAD 3D płaskiego impulsowego napędu liniowego – widok ogólny

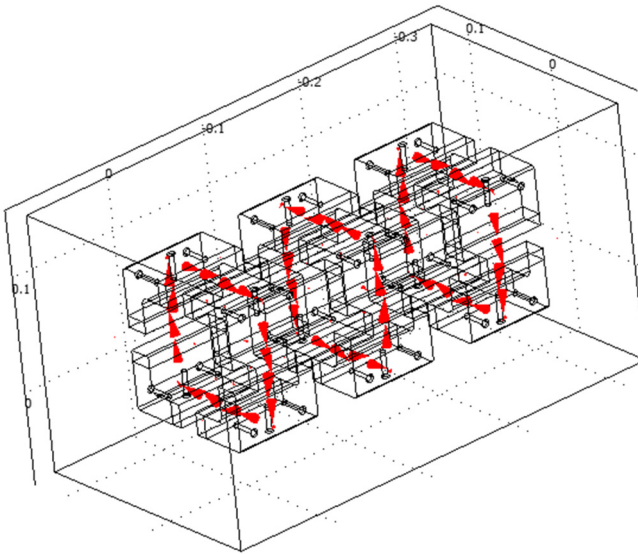
Dużą rolę w budowie modelu wyrzutni stanowią materiały nieferromagnetyczne (rys.1). Wszystkie elementy utwierdzające całość konstrukcji wykonane są z aluminium, mosiądzu i drewna dzięki czemu ograniczone zostało rozproszenie pola magnetycznego. Wyjątek stanowią niektóre elementy mocujące jak np. śruby czy nakrętki jednak ich wpływ na rozproszenie pola magnetycznego jest pomijalnie mały.



Rys. 2. Model CAD 3D płaskiego impulsowego napędu liniowego – widok strefy styku pomiędzy szczotkami węglowymi a szynami miedzianymi

Ważną rolę projektowanego urządzenia stanowi styk elektryczny umożliwiający połączenie elektryczne pomiędzy baterią kondensatorów a uzwojeniami pocisku (rys 2). Istnieje szereg prac naukowych opisujących problemy związane z przepływem prądu przez styk elektryczny w klasycznych wyrzutniach typu szynowego [Iwao i inni, 2007]. W celu uniknięcia możliwości zespawania stykających się części do budowy połączenia wykorzystano grafit i miedź na wzór komutatora w silnikach elektrycznych prądu stałego. Zasada działania urządzenia przedstawia się następująco:

- Początkowa pozycja pocisku względem stojana musi być taka, aby dwa boki każdej z prostokątnych cewek znajdowały się na początku szczelin powietrznych dwóch sąsiednich obwodów magnetycznych.
- W tak ustalonej pozycji początkowej szczotki węglowe pocisku napierają na szyny miedziane podłączone do magazynu energii elektrycznej (rys. 2).
- Zamknięcie obwodu elektrycznego poprzez przełączenie tyrystora wyzwalającego baterię kondensatorów w stan przewodzenia powoduje, że prąd przepływający przez uzwojenia cewek będzie generował siłę napędową, wskutek czego nastąpi ruch pocisku.
- W momencie, gdy uzwojenia pocisku znajdują się poza szczelinami powietrznymi pierwszej pary obwodów magnetycznych, następuje mechaniczne odłączenie uzwojeń pocisku od zasilania.
- W momencie, gdy poruszający się bezwładnie pocisk osiągnie taką pozycję, że jego uzwojenia będą znajdować się w szczelinach powietrznych drugiej pary obwodów magnetycznych, nastąpi ponowne, mechaniczne zamknięcie obwodu elektrycznego.
- Przedstawiony powyżej algorytm działania wyrzutni zapewnia utrzymanie stałego zwrotu siły napędowej, która działa na pocisk w sposób impulsowy.



Rys. 3. Przebieg linii pola magnetycznego dla poszczególnych obwodów magnetycznych

ANALIZA NUMERYCZNA OBIEKTU

Duży udział na etapie projektu urządzenia odgrywają wszelkiego rodzaju analizy numeryczne i symulacyjne. Zgodnie z równaniem opisującym siłę Lorentza jednym z podstawowych parametrów odpowiedzialnych za jej wartość jest indukcja magnetyczna [Rawa, 1996].

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

gdzie:

I – prąd przepływający przez przewodnik umieszczony w polu magnetycznym,

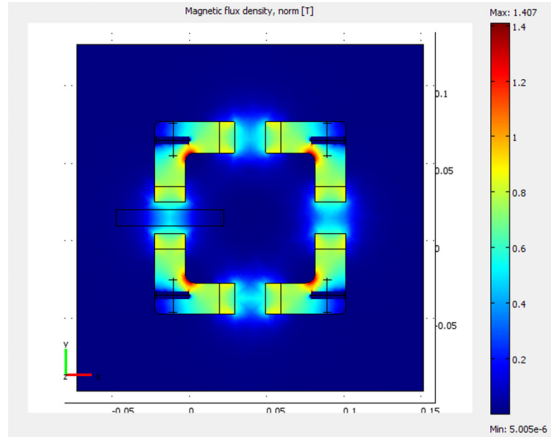
\vec{L} – długość przewodnika w polu magnetycznym,

\vec{B} – indukcja magnetyczna oddziaływująca na przewodnik.

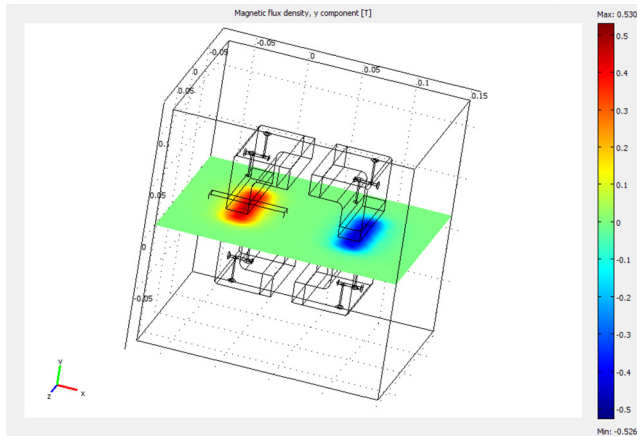
Na podstawie przeprowadzonych badań [Gosiewski i inni 2010] wybrany został kształt obwodu magnetycznego dla budowanego modelu. Przy pomocy oprogramowania COMSOL Multiphysics przeprowadzone zostały symulacje umożliwiające wyznaczenie rozkładu wektora indukcji magnetycznej w otoczeniu szczeliny powietrznej dla projektowanego urządzenia. Materiałem wyjściowym do wykonania magnetowodów była stal konstrukcyjna. Założona na potrzeby symulacji wartość względnego współczynnika przenikalności magnetycznej dla materiału magnetowodu wynosiła $\mu_r=1200$. Magnesy trwałe wykorzystane w obwodach magnetycznych charakteryzują się następującymi własnościami:

- indukcja remanencji $B_r=1,2[T]$,
- materiał – N38,
- wymiary – $80 \times 20 \times 10 \text{mm}$ – namagnesowanie wzdłuż wymiaru 10mm.

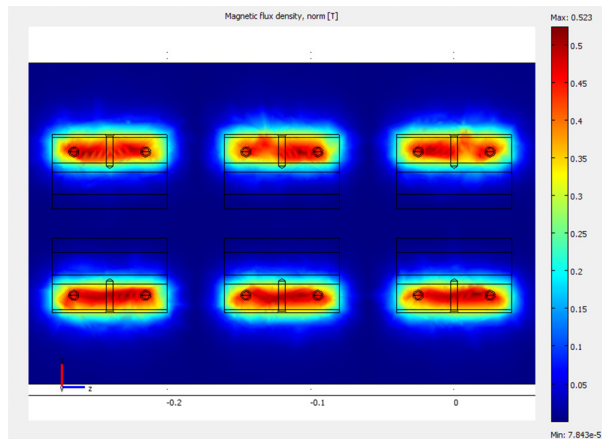
Poniżej (rys. 4, 5, 6) przedstawiony został rozkład wektora indukcji pola magnetycznego dla zbudowanego obwodu magnetycznego, gdzie wysokość szczeliny powietrznej wynosi 20mm. Odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi obwodami magnetycznymi (rys. 6) wynosi 40mm.



Rys. 4. Rozkład wektora indukcji magnetycznej w przekroju poprzecznym obwodu magnetycznego



Rys. 5. Rozkład składowej „y” wektora indukcji magnetycznej dla środka szczelin powietrznych



Rys. 6. Rozkład wektora indukcji magnetycznej dla środka szczelin powietrznych poszczególnych obwodów magnetycznych.

Kolejnym etapem analiz było wyznaczenie przebiegów spadku napięcia na baterii kondensatorów oraz prądu przepływającego przez uzwojenia elementu napędzanego w trakcie jego przyspieszania. Dane dotyczące parametrów uzwojeń wewnątrz pocisku oraz baterii kondensatorów przedstawiają się następująco:

- poszczególne uzwojenia pocisku są połączone równolegle,
- indukcyjność połączonych uzwojeń wynosi $0,223[\text{mH}]$,
- rezystancja połączonych uzwojeń wynosi $R=0,51[\Omega]$,
- pojemność baterii kondensatorów wynosi $20500 [\mu\text{F}]$,
- maksymalne napięcie pracy dla kondensatorów wykorzystanych do budowy magazynu energii elektrycznej wynosi $400[\text{V}]$.

Analityczne wyznaczenie przebiegu spadku napięcia na baterii kondensatorów jest możliwe poprzez rozwiązanie klasycznego obwodu RLC. Równanie różniczkowe opisujące obwód RLC przedstawia się następująco [Bolkowski, 2007]:

$$\frac{dU_C^2}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{LC} U_C = 0 \quad (2)$$

gdzie:

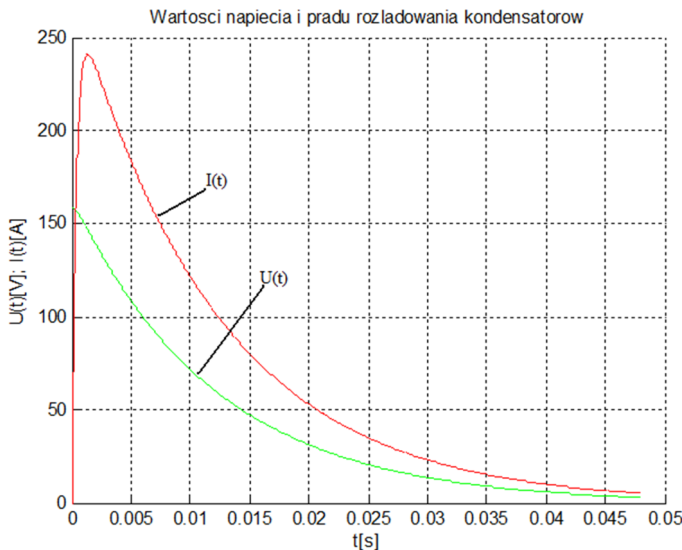
U_C - napięcie na baterii kondensatorów

R - rezystancja obwodu elektrycznego

L - indukcyjność obwodu elektrycznego

C - pojemność baterii kondensatorów

Rozwiązanie równania (2) dla przedstawionych wyżej parametrów obwodu RLC przedstawione jest na rys 7:



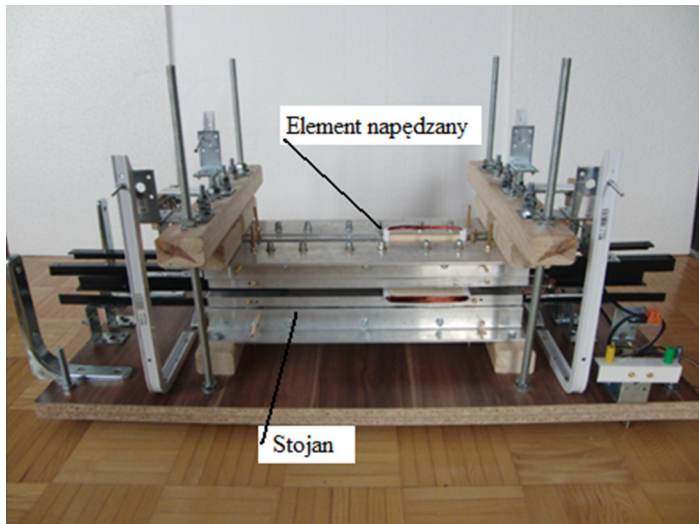
Rys. 7. Teoretyczny przebieg spadku napięcia na baterii kondensatorów (linia zielona) i prądu rozładowania (linia czerwona)

Przedstawione powyżej rozwiązanie przedstawia czysto teoretyczne wartości ponieważ nie uwzględnia rezystancji styku, którą trzeba oszacować eksperymentalnie.

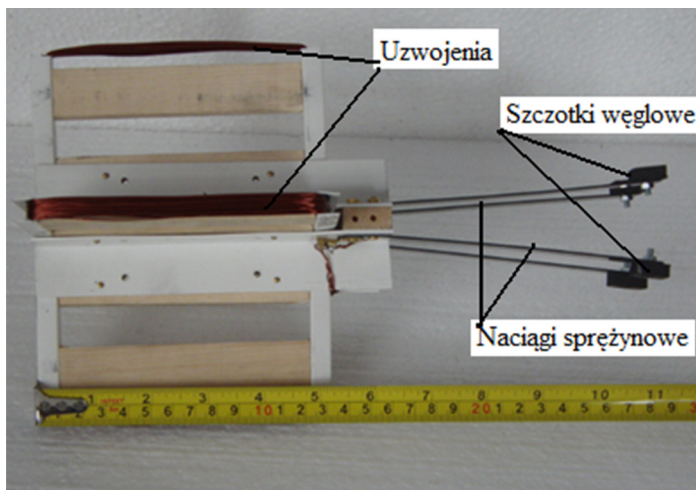
WERYFIKACJA ZAŁOŻEŃ KONSTRUKCYJNYCH

Przedstawione w poprzednich punktach założenia konstrukcyjne zostały zweryfikowane poprzez budowę stanowiska będącego modelem wyrzutni magnetycznej (rys. 8).

Na rys. 9 przedstawiony został zbudowany model pocisku. Elementami odpowiedzialnymi za utrzymanie połączenia elektrycznego są szczotki węglowe zamocowane na brzegach specjalnych pasków wykonanych z blachy sprężystej służących do dociskania szczotek do szyn miedzianych w trakcie ruchu pocisku. W każdym ze skrzydeł znajduje się cewka magnetyczna wykonana z drutu nawojowego o średnicy 0,5[mm]. Ilość zwojów dla każdej z cewek wynosi 50 zaś całkowita masa pocisku - 0,42[kg].

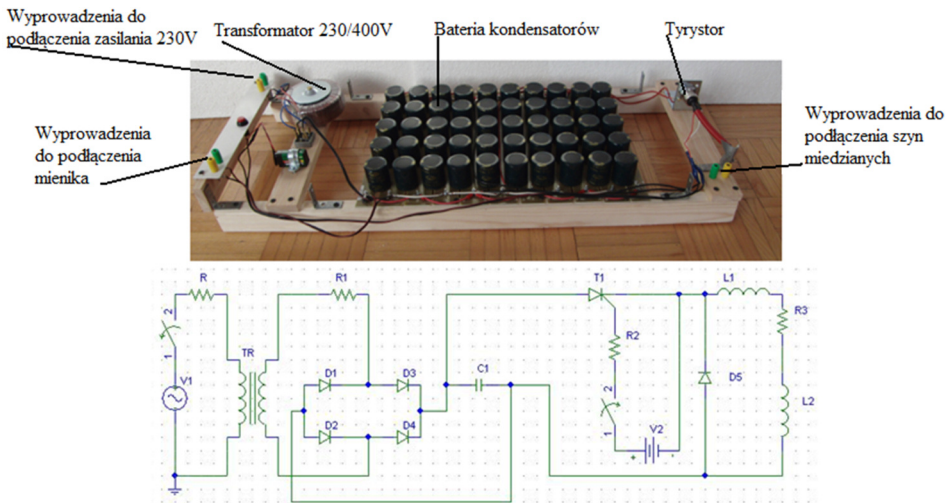


Rys. 8. Model płaskiego impulsowego napędu liniowego –
– widok ogólny stojana z elementem napędzanym



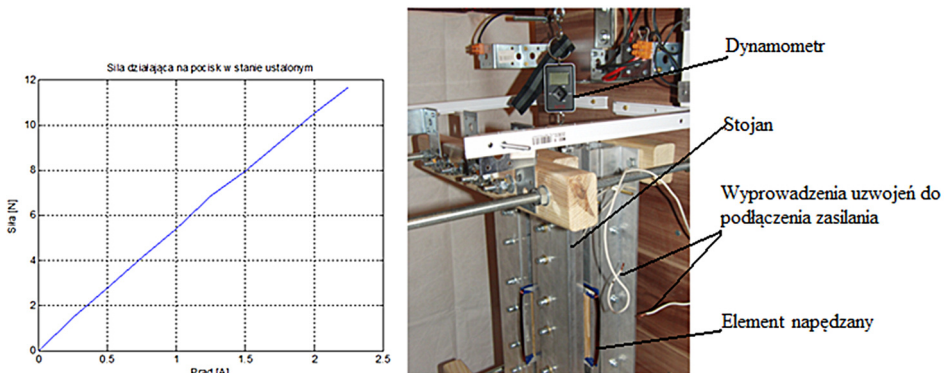
Rys. 9. Model elementu napędzanego

Magazyn energii elektrycznej (rys. 10) zbudowany został z 50 kondensatorów elektrolietycznych połączonych równolegle (oznaczenie C1). Zastosowany został układ ładowania kondensatorów poprzez m. in. transformator podnoszący napięcie z 230[V] na 400[V] (oznaczenie TR). Wyzwalanie impulsów prądowych realizowane jest za pomocą układu z tyrystorem T52-80-12 (oznaczenie T1). Rozwiązanie to pozwala na wyeliminowanie konieczności wstępnego przyspieszania pocisku w celu jego „wstrzelenia” i zwarcia obwodu elektrycznego. Elementy oznaczone jako L1, L2 R3 odnoszą się do uzwojeń elementu napędzanego.



Rys. 10. Model baterii kondensatorów z wyzwalaniem tyrystorowym – widok modelu rzeczywistego i ogólny schemat elektryczny

Zbudowany model stojana i pocisku został poddany sprawdzeniu poprzez wyznaczenie charakterystyki statycznej (rys. 11) określającej zależności siły napędowej od natężenia prądu przepływającego przez uzwojenia pocisku. W tym celu zbudowany został układ pomiarowy składający się z zasilacza laboratoryjnego oraz dynamometru. W celu wykonania pomiaru stojan ustawiony został w pozycji pionowej dzięki czemu na wartość siły napędowej nie miało wpływu tarcie pomiędzy elementami stojana a pociskiem. Wyprowadzenia uzwojeń elementu napędzanego podłączono do zasilacza stanowiącego źródło prądu (rys. 11).

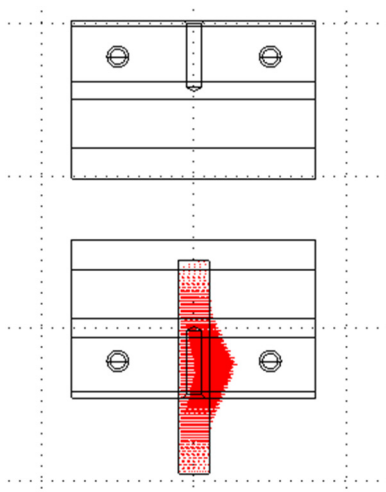


Rys. 11. Charakterystyka statyczna rzeczywistego modelu płaskiego impulsowego napędu liniowego

Charakterystyka statyczna urządzenia ma charakter liniowy (rys. 11) – wynika to również z równania (1). Pomiar siły działającej na element napędzany wykonano dla prądu uzwojeń w zakresie $0 \div 2,25$ [A]. W celu porównania modelu symulacyjnego z modelem rzeczywistym wykorzystano układ zbudowany przy użyciu oprogramowania COMSOL Multiphysics. Model symulacyjny zakładał wykorzystanie obwodu magnetycznego, dla którego rozkład indukcji magnetycznej przedstawiony został na rys. 4 i 6. Dla modelu symulacyjnego zbadano wartość siły Lorentza działającej tylko na jednej stronie jednego ze skrzydeł elementu napędzanego, a zatem, aby otrzymać wartość działania siły na cały element napędzany, należało otrzymaną wartość zwiększyć ośmiokrotnie. Model symulacyjny odwzorowywał 50 uzwojeń dla każdej z cewek elementu napędzanego. Wartość siły całkowitej działającej na element napędzany dla prądu uzwojeń $I=2,25$ [A] wynosi:

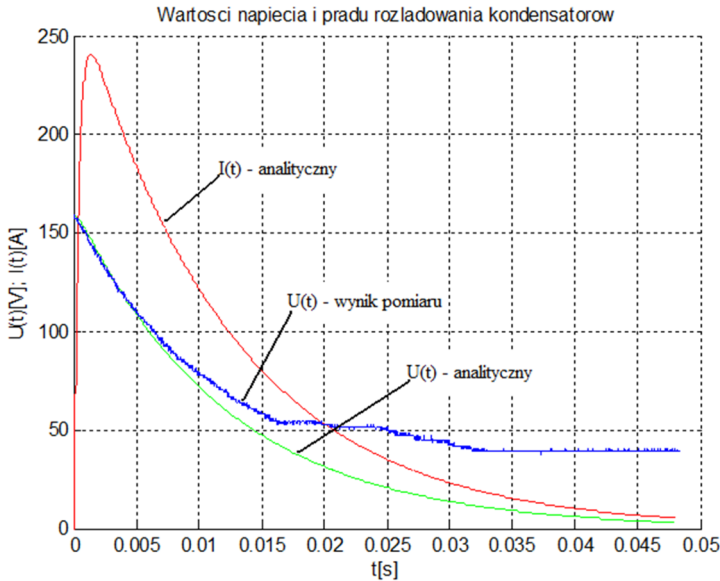
- 11,64 [N] dla modelu rzeczywistego,
- 10,82 [N] dla modelu symulacyjnego.

Poniżej (rys. 12) przedstawiony został rozkład składowych wartości siły magnetycznej działającej na jeden bok cewki magnetycznej stanowiącej jedno z uzwojeń elementu napędzanego. Symulacja bezpośrednio odnosi się do wartości wektora indukcji magnetycznej, która osiąga maksimum w środku szczeliny powietrznej.



Rys. 12. Rozmieszczenie składowych wartości siły Lorentza działającej na uzwojenia z prądem umieszczone w szczelinie powietrznej obwodu magnetycznego

Sprawdzenie poprawności działania urządzenia dokonano poprzez testy niskonapięciowe, w trakcie których baterię kondensatorów ładowano do różnych wartości napięć z zakresu $30 \div 160$ [V], po czym dokonywano próbných strzałów. W trakcie prób rejestrowany był przebieg spadku napięcia na baterii kondensatorów przy użyciu przystawki oscyloskopowej DSO-2150. Zebrane dane posłużyły do określenia wpływu styku pomiędzy szczotkami pocisku a szynami doprowadzającymi prąd do uzwojeń pocisku na wartość rezystancji obwodu elektrycznego, oszacowania wartości impulsu prądowego przepływającego przez uzwojenia pocisku oraz pomiaru prędkości przemieszczającego się elementu napędzanego.



Rys. 13 Porównanie danych eksperymentalnych z teoretycznymi: zarejestrowany spadek napięcia na baterii kondensatorów (linia niebieska), teoretyczne rozwiązanie obwody RLC – spadek napięcia na kondensatorach (linia zielona) prąd rozładowania kondensatorów (linia czerwona)

Przedstawiony powyżej wykres odnosi się do testu działania urządzenia dla napięcia wstępnego kondensatorów na poziomie 160[V]. Dopasowanie teoretycznego przebiegu obwodu RLC do przebiegu zarejestrowanego dokonano doświadczalnie poprzez zmianę wartości rezystancji (pozostałe dane tj. pojemność kondensatorów, indukcyjność obwodu wyznaczone zostały na podstawie pomiarów przy użyciu mostka RLC). Wartość rezystancji całego układu elektrycznego (z uwzględnieniem styku) po dopasowaniu przebiegów (rys. 13) wynosiła 0,61[Ω]. Dopasowanie przebiegów było możliwe tylko w początkowej fazie przebiegu tzn dla $t < 0,005$ [s] (rys. 13). Rozbieżności pomiędzy przebiegami napięć (teoretycznym i zarejestrowanym) spowodowane są m.in. siłą elektromotoryczną indukowaną w trakcie ruchu elementu napędzanego, a także charakterem pracy urządzenia, w którym układ elektryczny jest mechanicznie rozłączany (płaska część przebiegu zarejestrowanego) oraz ponownie zwierany.

PODSUMOWANIE

Przedstawiona praca jest efektem przeprowadzenia wielu doświadczeń i eksperymentów oraz analiz numerycznych. Przeanalizowane zostały różne konfiguracje, zarówno obwodów magnetycznych, jak i elementów napędzanych. Na podstawie zarejestrowanego przebiegu widać, że dopasowanie przebiegu teoretycznego do zarejestrowanego możliwe jest wyłącznie dla małych prędkości elementu napędzanego (rys. 13). Wartość siły elektromotorycznej indukowanej w trakcie ruchu pocisku jest jednym z priorytetów dla kolejnych serii badań. Ważnym elementem projektu wyrzutni magnetycznej jest dostosowanie indukcyjności (w szczególności liczby zwojów) cewek w celu uzyskania założonej prędkości wylotowej pocisku. Zbyt duża liczba zwojów będzie co prawda zwiększać wielokrotność przepływu prądu przez szczelinę powietrzną jednak ujemnym skutkiem jest wyższa wartość indukowanej siły elektromotorycznej, która ogranicza prąd rozładowania kondensatorów. Kolejną wadą zbyt dużej induk-

cyjności cewek jest ich zmniejszona dynamika, co przy pewnych prędkościach elementu napędzanego może powodować, że dla kolejnych przełączeń obwodu elektrycznego impuls prądowy nie zdąży osiągnąć wartości maksymalnej.

Badany układ charakteryzuje się dużą wysokością szczeliny powietrznej (20mm), jednak zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne pozwala na uzyskanie indukcji magnetycznej w jej wnętrzu maksymalnie $\sim 0,52$ [T]. Ze względu na istniejące rozproszenie strumienia magnetycznego konieczna jest odpowiednia konstrukcja cewek w celu uniknięcia sił Lorentza działających w kierunku poprzecznym do ruchu pocisku. Zgodnie z otrzymanymi wynikami analiz (rys. 5, 6, 12) można stwierdzić, że rozproszenie pola magnetycznego wychodzi swoim zakresem około 15[mm] poza zewnętrzne krawędzie zastosowanych magnesów trwałych. Pole magnetyczne poza wskazanym zakresem ma pomijalnie mały wpływ na generowanie sił magnetycznych.

Zebrane podczas badania charakterystyki statycznej dane eksperymentalne są zbliżone do wyników przeprowadzonych symulacji - różnice pomiędzy uzyskanymi wynikami nie przekraczają 8%.

Cechą charakterystyczną badanego modelu jest duży współczynnik tarcia kinetycznego (ze względu na masę pocisku) oraz zastosowanie naciągów ze stali sprężynowej w celu lepszego przylegania szczotek węglowych do miedzianych szyn. Taki układ powoduje, że przy niskonapięciowych próbach przyspieszania pocisku niemożliwe jest osiągnięcie dużych prędkości – w czasie testów prędkość pocisku przy wyjściu z wyrzutni wynosiła od kilku do kilkunastu metrów na sekundę. W dalszej pracy należy skupić się na możliwości zmniejszenia współczynnika tarcia oraz zwiększenia wartości prądu przepływającego przez uzwojenia.

Przedstawione w pracy praktyczne próby urządzenia miały wyłącznie charakter informacyjny tzn. głównym celem było sprawdzenie poprawności przyjętych założeń konstrukcyjnych. Kolejnym etapem badań będzie wykonanie prób przy wyższych wartościach napięcia zasilającego oraz innych konfiguracjach uzwojeń w elemencie napędzanym w celu osiągnięcia wyższych prędkości wylotowych pocisku. Zaprezentowane rozwiązanie może znaleźć zastosowanie np. jako element wykonawczy do wstępnego przyspieszania niewielkich bezzałogowych aparatów latających.

Praca naukowa współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego, środków Budżetu Państwa oraz ze Środków Budżetu Województwa Podlaskiego w ramach projektu „Podlaska Strategia Innowacji – budowa systemu wdrażania”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bolkowski S. (2007), Teoria obwodów elektrycznych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [2] COMSOL, Multiphysics User's Guide, (2008), Ver. 3.5a.
- [3] Gosiewski Z., Kłoskowski P., Kondratiuk M. (2010), Analiza symulacyjna wybranych konstrukcji obwodów magnetycznych jako stojanów płaskiego impulsowego napędu liniowego, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 4, No. 2, 2010, str. 49-53.
- [4] 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.
- [5] Rawa H. (1996), Podstawy magnetyzmu, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

ZDZISŁAW GOSIEWSKI, PIOTR KŁOSKOWSKI, MIROSŁAW KONDRATIUK

DESIGN INTENT OF THE FLAT LINEAR PULSE MOTOR

Summary

The design intend, theoretical analysis and preliminary verification of the new magnetic launcher is presented in the paper. The numerical analysis of magnetic flux density, Lorentz force and electrical parameters of the device was made. The preliminary verification (with low voltage) of the real model was made to check the correctness of the construction and to compare analytical results with experimental data.