METODYKA PROJEKTOWANIA WYRZUTNI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

ELECTROMAGNETICAL LAUNCHER PROJECT METHODOLOGY

Roman Kroczek, *Politechnika Śląska*
Jarosław Domin, *Politechnika Śląska*

Abstract

In this paper complex electromagnetically launcher Project methodology is show in case of project realized on Mechatronic Department of Electrical faculty at Silesian University of Technology in Gliwice. This insight into the problem means that in project we are not focused only on design process and computer simulation strictly. It starts earlier when the idea is created, and finished later when the practical realization of designed device is completed.

Streszczenie

Bieżący artykuł przedstawia kompleksowe podejście do zagadnienia projektowania wyrzutni elektromagnetycznej na przykładzie praktycznym projektu zrealizowanego w Katedrze Mechatroniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej. Metodyczne podejście do zagadnienia oznacza, że w projekcie nie ograniczamy się tylko do samego procesu projektowania i symulacji komputerowych, ale temat zaczyna się znacznie wcześniej – na etapie tworzenia się koncepcji zagadnienia, a kończy się znacznie dalej na etapie aplikacji praktycznej zaprojektowanego i wykonanego urządzenia.

1. Źródło idei

Źródłem idei czyli określenie zagadnienia które zostanie poddane badaniom może wynikać z wielu pobudek:

1. Finansowej
2. Kontynuacji badań
3. Zainteresowań
4. Przypadku

Pierwszy przypadek wynika z zapotrzebowania odbiorcy bądź grupy odbiorców na konkretny produkt w celach zarobkowych. Produktem może być technologia, modernizacja urządzenia, nowy produkt itp. W tej sytuacji jest konkretna potrzeba określona przed zleceniodawcę a wynik badań zostaje wykorzystany i wdrożony do produkcji. Jest to najczęstsza sytuacja i najlepsze pole do szybkiego wykorzystania wyników badań gdyż jest jasno określona potrzeba i w większości przypadków krótki czas wykonania zlecenia jest pożądany. Współpraca nauki z przemysłem w tej formie to głównie projekty celowe. Ścieżka projektu to: przemysł(problem)→nauka(badania) →przemysł (aplikacja)

Przypadek drugi ma miejsce gdy naukowiec sugeruje się, bądź otrzymuje wytyczne dotyczące zakresu badań jakie powinien przeprowadzić W tej sytuacji kierunek badań wynika z chęci kontynuowania nie dokończonych z jakichś powodów badań innej osoby, bądź częściej chęcią rozwinięcia danego zagadnienia. Często to rozwiązanie jest stosowane na etapie doktoryzowania się naukowców, gdy osoba bardziej doświadczona (promotor) w zakresie jakiegoś zagadnienia sugeruje doktorantom jaki aspekt badań należało by rozwinąć, bądź co w danym temacie nie zostało jeszcze dokładnie przeanalizowane.

Zainteresowania to zaczynając od hobby, poprzez wyrastanie w określonym środowisku, wybór kierunku kształcenia kolejne źródło inspiracji, które na pewnym etapie pozwala ewaluację pomysłów w określone problemy badawcze wynikające z konkretnego zapotrzebowania. Przykładem są ścieżki wielu sławnych naukowców którzy „od dziecka" interesowali się danym zagadnieniem

Ostatnia sytuacja – przypadek – to również źródło idei badań wynikające z faktu że odpowiednia osoba w odpowiednim miejscu zdefiniowała problem bądź po prostu zaciekawiło ją jakieś zagadnienie. Przykładem jest „jabłko Newtona".

Poza powyższymi przykładami istnieje wiele innych nie opisanych w artykule ze względu na ich sporadyczne występowanie, aczkolwiek również są one nie do pominięcia w procesie powstawania idei.

Przechodząc do tematu artykułu pomysł badania układu wyrzutni elektromagnetycznej został zaproponowany przez promotora, którego zainspirował artykuł popularnonaukowy dotyczącym broni nowej generacji.

Po zapoznaniu się z tematyką i potencjalnym obszarem badań został złożony wniosek o przyznanie grantu badawczego, który umożliwił finansowanie projektu a także upewnił zespół o celowości projektu. Realizowany projekt jest bezpośrednio związany z dwoma pracami doktorskimi członków zespołu badawczego.

1.1 Wprowadzenie

Celem pełnego zrozumienia tematu przedstawiono krótkie wprowadzenie do zagadnienia.

Badana konstrukcja, zwana układem „wyrzutni elektromagnetycznej", jest typem liniowego przetwornika elektromagnetycznego o działaniu impulsowym. Energia elektryczna pobrana ze źródła jest wykorzystywana do nadania prędkości liniowej elementu wykonawczego. W odróżnieniu od klasycznych maszyn elektrycznych, element ruchomy jest równocześnie narzędziem i nie jest w żaden sposób związany z urządzeniem. Wyróżniamy dwa rodzaje wyrzutni elektromagnetycznych: o napędzie cewkowym (typu coilgun) oraz o napędzie szynowym (typu railgun), ponadto w zależności od konstrukcji układu jej działanie opiera się na zjawiskach związanych ze zmienną reluktancją, działaniem prądów wirowych, siły ferrodynamicznej, oraz siły elektrodynamicznej.

2. Tematyka badań

W celu zapoznania się z tematyką zagadnienia dokonano analizy literaturowej w zakresie zagadnienia poprzez przegląd publikacji i literatury. Na przykładzie tylko jednej bazy według słów kluczowych:

-słowo kluczowe „coilgun" – 45 artykułów
-słowo kluczowe „railgun" – 45 artykułów
-słowo kluczowe „compulsator" – 45 artykułów
-słowo kluczowe „emc guns" – 15 artykułów
-słowo kluczowe „electric gun" – 45 artykułów

można wnioskować o obszerności zagadnienia.

Rys.1. Mapa zagadnienia według słów kluczowych.
Fig.1. Problem map in key word aspect.

Z tego względu wykonano mapę przestrzenną widoczną na powyższym rysunku zagadnienia w celu sprecyzowania zakresu badań. Takie podejście nakreśliło największy obszar badań w zakresie problemów przełączania, osłon i magnetyzmu.

Dodatkowo dokonano przeglądu baz patentowych, na przykładzie bazy Aureka wytypowano 414 aktywnych patentów z czego 207 ściśle związanych z tematyką zagadnienia.

Basic Report: Documents By Top Assignees
source document list: **Total** Print-Friendly

Assignee	Doc Count	Percentage
UNIV TEXAS	20	8.2%
UNKNOWN	14	5.7%
LOCKHEED CORP	10	4.1%
MINNESOTA MINING & MFG	10	4.1%
US ARMY	8	3.3%
US ENERGY	7	2.9%
WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP	6	2.5%
DEUTSCH FRANZ FORSCH INST	5	2.1%
XEROX CORP	5	2.1%
BOEING CO	4	1.6%
Number of assignments in Top 10 assignees	89	

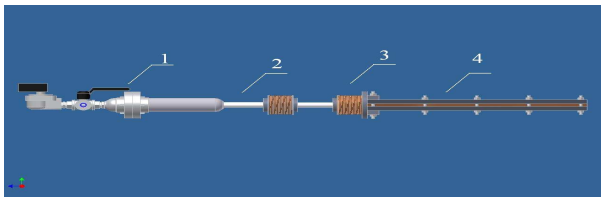
Rys.2. Liczba patentów z podziałem na jednostki.
Fig.2. Patents quantity by top assigness.

To rozwiązanie pozwoliło określić główne ośrodki naukowe badające dane zagadnienie.

2.1 Koncepcja, wstępny projekt i założenia konstrukcyjne wyrzutni elektromagnetycznej.

Badana konstrukcja działa na zasadzie wykorzystania obu stosowanych dotychczas metod przyspieszania pocisku (stąd nazwa hybrydowa), dodatkowo wspomagana pneumatycznie w początkowym stadium napędzania pocisku w celu ograniczenia strat energii wynikających z tarcia statycznego pomiędzy pociskiem a jego łożem w okresie startowym. Tak zaproponowane rozwiązanie nie zostało jak dotąd przedstawione w literaturze co jest autorskim rozwiązaniem i może się przyczynić do uzyskania lepszych parametrów układu niż rozpatrywane konstrukcje oddzielnie.

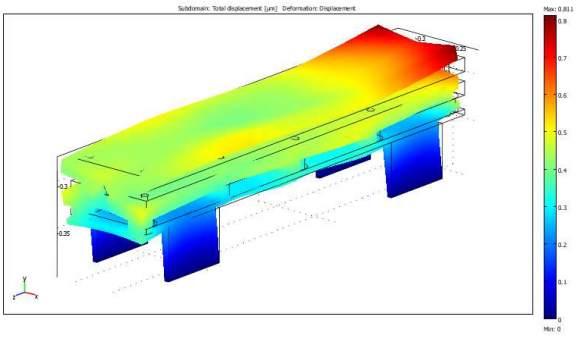
Proponowane rozwiązanie zostało przedstawione na rysunku poniżej:



Rys.3. Koncepcja konstrukcji hybrydowej.
Fig.3. Designed hybrid construction.

2.2 Modele polowe poszczególnych modułów napędowych i wyznaczenie ich parametrów elektromagnetycznych oraz elektromechanicznych.

Model komputerowy, dwu- oraz trójwymiarowy, obwodu magnetycznego został wykonany z wykorzystaniem programu COMSOL Multiphysic wersja 3.3.

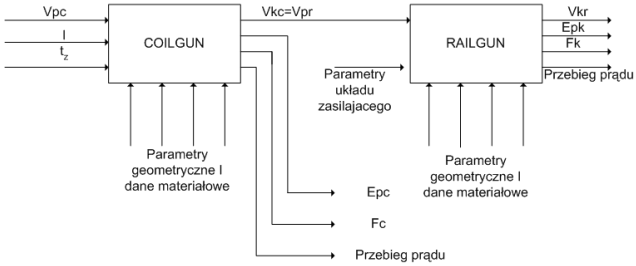


Rys.4. Odkształcenie modułu szynowego.
Fig.4. Rail stage mechanical deformation.

Na powyższym rysunku widać przykładowe odkształcenia mechaniczne wynikające z działających w układzie sił. Rysunek 4 jest wizualizacją modelu polowego układu szynowego. Wyniki poszczególnych symulacji modeli komputerowych zostały zweryfikowane na stanowiskach badawczych [1]. W celu zbadania wpływu wybranego środowiska symulacyjnego na wyniki i czas trwania symulacji dokonano porównania powyższych środowisk [2].

2.3 Opracowanie modelu polowo – obwodowego wyrzutni elektromagnetycznej o napędzie hybrydowym.

Kolejnym etapem było opracowanie modeli polowo-obwodowych według następującego schematu (pakiet Matlab):



Rys.5. Schemat blokowy modelu polowo-obwodowego.
Fig.5. Field-circuit block scheme.

gdzie:
V_{pc} – prędkość wlotowa pocisku, moduły cewkowego
V_{kc} – prędkość wylotowa pocisku, modułu cewkowego
V_{pr} – prędkość wlotowa pocisku, moduły szynowego
V_{kr} – prędkość wylotowa wyrzutni
E_{pc} – przebieg energii pocisku, modułu cewkowego
E_{pk} – przebieg energii pocisku, modułu szynowego
F_c – przebieg siły działającej na pocisk, modułu cewkowego
F_k – przebieg siły działającej na pocisk, modułu szynowego
I – prąd zasilający moduł cewkowy
t_z – czas załączenia modułu cewkowego

Równanie napięciowe obwodu elektrycznego (RLC) modułu cewkowego

$$u_c + u_r + u_l = 0 \qquad (1)$$

gdzie:
u_c – napięcie baterii kondensatorów
u_r – spadek napięcia na rezystancji uzwojenia modułu szynowego
u_l – spadek napięcia na indukcyjności uzwojenia modułu szynowego

Ostatecznie wejściowe równanie napięciowe, modułu cewkowego, wynikające z II prawa Kirchhoffa przyjmuje postać:

$$\frac{1}{C}\int_0^t i\,dt + Ri + L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{\partial L}{\partial x}v = 0 \qquad (2)$$

Z modelu MES

gdzie:
C – pojemność baterii kondensatorów
R – rezystancja uzwojenia
L(x) – indukcyjność obwodu w funkcji położenia pocisku
v – prędkość pocisku

Równanie podukładu mechanicznego, modułu cewkowego:

$$F = F(x) - Dv \qquad (3)$$

Z modelu MES

gdzie:
F – przebieg siły działającej na pocisk, modułu cewkowego
F(x) – wartość siły działającej na pocisk w funkcji położenia pocisku (z modelu MES)
D – tłumienie
v – prędkość pocisku

Dla modułu szynowego równania przyjmują analogiczną postać (obwód RLC).

Wyniki symulacji są podstawą do przejścia do części konstrukcyjnej projektu opisanego w następnym rozdziale.

2.4 Projekty konstrukcyjne urządzenia.

Bieżący podrozdział przedstawia techniczną specyfikację poszczególnych stopni napędowych zaprojektowanego urządzenia.

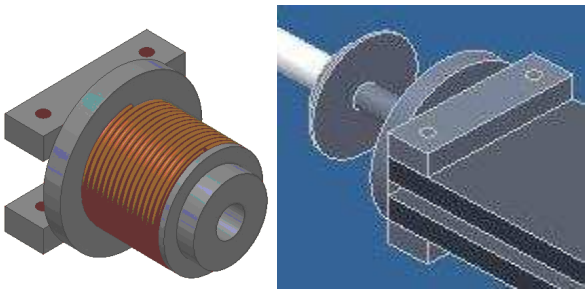
2.4.1 Projekt modułu napędowego podajnika pneumatycznego

W celu ograniczenia strat energii wynikających z tarcia statycznego pomiędzy pociskiem a jego łożem w okresie startowym [3] zastosowano podajnik pneumatyczny do nadania prędkości początkowej pocisku.

Rys.6. Podajnik pneumatyczny pocisku.
Fig.6. First pneumatic step of launcher.

2.4.2 Projekt części cewkowej urządzenia

Pocisk posiadający określoną prędkość nadaną przez podajnik pneumatyczny przechodzi do następnego, cewkowego stopnia napędowego. Stopień ten składa się z pojedynczej cewki nawiniętej na karkasie który jest równocześnie integralną częścią kolejnego szynowego stopnia napędowego. Takie rozwiązanie ze względu na wprowadzoną niesymetrię do układu reluktancyjnego zwiększa efektywność przekazywania energii z układu zasilania do pocisku w stosunku do analogicznych układów rozłącznie.



Rys.7. Stopień reluktancyjny.
Fig.7. Reluctance stage.

2.4.3 Projekt części szynowej urządzenia

Szynowy stopień napędowy został zaprojektowany jako układ dwóch równoległych szyn ze stopu miedzi odpornego na erozję elektryczną. Szczelina pomiędzy nimi jest dopasowana do wymiarów geometrycznych pocisku w celu ograniczenia zjawiska łuku elektrycznego, którego pojawienie się jest nieodłącznie związane z przekazywaniem tak dużych ilości energii w tak krótkiej jednostce czasu. Dodatkowo w celu ograniczenia erozji elektrycznej pocisku na jego krawędziach [4] zastosowano pocisk o symetrii osiowej (wymaga tego także stopień reluktancyjny), oraz zastosowano oplot miedziany który jest materiałem stykowym pomiędzy szynami, a także częścią pocisku która jako najbardziej narażona na działanie łuku elektrycznego jest niezbędna tylko na etapie napędzania pocisku, a po opuszczeniu urządzenia pozostaje tylko stalowy rdzeń pocisku. Rdzeń stalowy jest niezbędny ze względu na poprzedni reluktancyjny stopień napędowy. Na rysunku numer 8 przedstawiono zdjęcie pocisku a na następnych 9 i 10 projekt i wykonany moduł szynowy.

Rys.8. Pocisk.
Fig.8. Bullet.

Rys.9.Projekt układu szynowego.
Fig.9. Rail stage project.

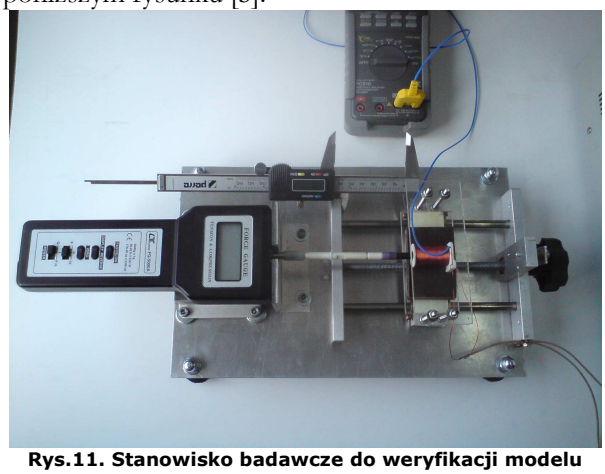
Rys.10.Realizacja praktyczna modułu szynowego.
Fig.10. Rail stage - implementation.

Materiałem konstrukcyjnym widocznym na zdjęciu w kolorze białym jest kompozyt silikon-szkło. To rozwiązanie zostało podyktowane wysoką odpornością termiczną materiału, który bezpośrednio styka się z łukiem elektrycznym pomiędzy szynami i pociskiem.

2.5 Projekt stanowiska badawczego.

Kolejnym etapem badań było zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego w celu weryfikacji praktycznej badanych modeli komputerowych.

Model komputerowy modułu cewkowego był weryfikowany już na etapie projektowania na stanowisku badawczym przedstawionym na poniższym rysunku [5].



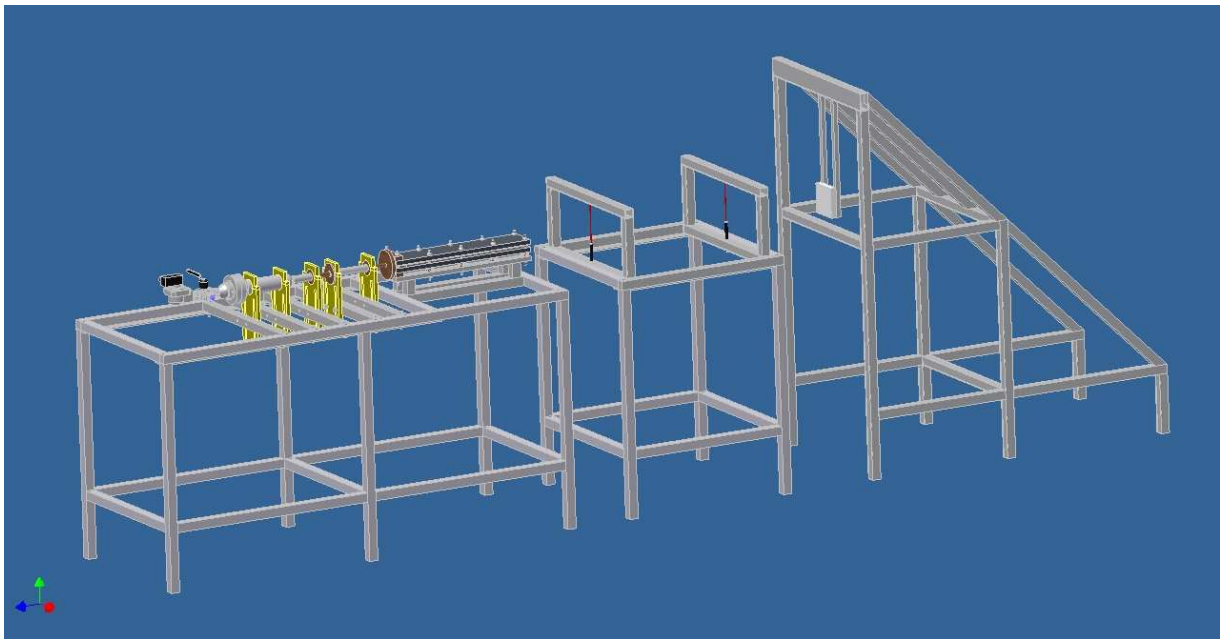
Rys.11. Stanowisko badawcze do weryfikacji modelu polowego cewki.

Fig.11. Field model verification laboratory stand.

Stanowisko do pomiaru prędkości składa się z układu barier optycznych wyzwalanych przelatującym pociskiem, dane te po uprzednim przeliczeniu są prezentowane w postaci prędkości pocisku. Dodatkowo otrzymany wynik pomiaru prędkości jest weryfikowany poprzez równoległy pomiar z wykorzystaniem bramki fotooptycznej wykorzystywanej do pomiarów balistycznych przedstawionej na rysunku 13.

Rys.13.Komercyjna bariera optyczna.

Fig.13. Market use optical barrier.



Rys.12. Projekt kompletnego stanowiska badawczego hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej.

Fig.12.Project of complete laboratory stand of hybrid electromagnetic launcher.

Przedstawiony na rysunku 12 projekt stanowiska składa się z trzech niezależnych części:

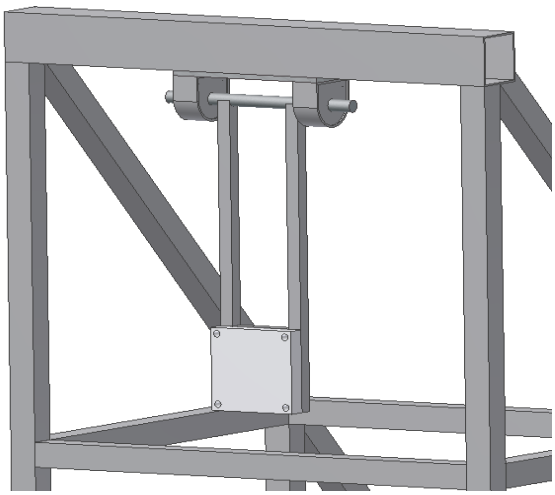
-stanowiska wyrzutni hybrydowej

-stanowiska pomiaru prędkości pocisku

-stanowiska chwytaka z pomiarem energii pocisku

Stanowisko wyrzutni składa się z modułów opisanych w poprzednich podrozdziałach wraz z ich kompletnymi układami zasilania i sterowania.

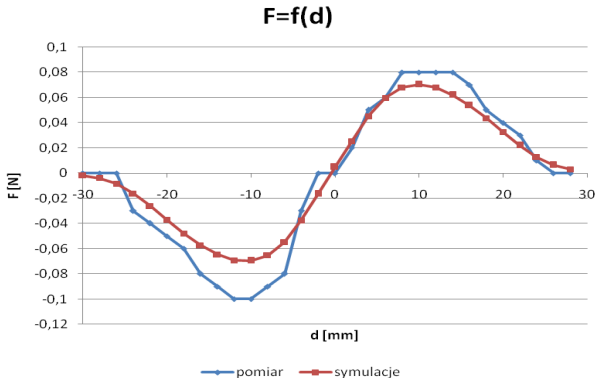
Wytracanie energii kinetycznej pocisku połączone z jednoczesnym jej pomiarem zostało zrealizowane poprzez wykorzystanie idei wahadła balistycznego. Poprzez odpowiedni dobór parametrów wahadła w stosunku do pocisku mamy możliwość wyskalowania urządzenia tak, że wychylenie wahadła po przeliczeniu odpowiada energii kinetycznej pocisku o znanych parametrach materiałowych. Konstrukcja wahadła została przedstawiona na rysunku 14.



Rys.14.Konstrukcja wahadła balistycznego.
Fig.14. Ballistic pendulum construction.

2.6 Badania i opracowanie wyników.

Zaprojektowane i wykonane stanowisko badawcze umożliwia przeprowadzenie cyklu pomiarowego w celu weryfikacji otrzymanych wyników uzyskanych na etapie symulacji modeli komputerowych zaprojektowanego urządzenia. Poniższy przykładowy rysunek nr 15 wykazuje zbieżność wyników symulacji w zestawieniu z wynikami pomiarowymi co jest weryfikacją modelu komputerowego.



Rys.15.Porównanie wyników symulacji i pomiaru.
Fig.15. Comparision of measure and simulation results.

2.7 Podsumowanie i wnioski dotyczące projektowania konstrukcji wyrzutni elektromagnetycznych.

Powyższy rozdział przedstawia konwencjonalne podejście projektowe, od pomysłu, poprzez charakteryzację problemu naukowego, badania i symulacje do przedstawienia wyników badań w celu ich dalszego wykorzystania. Na przykładzie hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej głównym wnioskiem jest stwierdzenie, że istnieje możliwość konstrukcji układu hybrydowego o efektywności przekazania energii do pocisku większej niż w przypadku rozłącznego traktowania elementów napędowych, jednak dzieje się to kosztem komplikacji urządzenia i zmniejszenia maksymalnej energii pocisku w stosunku do układów konwencjonalnych.

3. Aplikacja praktyczna

Urządzenie jest wykorzystywane do badań materiałowych [6], oraz w szerokim zakresie w aspekcie militarnym czego przykładem jest Cykliczna konferencja International Electromagnetic Launcher Symposium organizowana pod patronatem IEEE Nuclear and Plasma Science Society a także strategia rozwoju Agencji Zaawansowanych Obronnych Projektów Badawczych Departamentu Obrony Stanów Zjednoczonych DARPA.

Badania są finansowane z grantu badawczego N N510 390635

4. Literatura i dane autorów

1. Kroczek R., Domin J.: *Weryfikacja komputerowych modeli jednostopniowej wyrzutni elektromagnetycznej na stanowisku badawczym* . Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 63. 2009
2. Domin J, Kroczek R.: *Porównanie wyników modelowania wyrzutni elektromagnetycznej uzyskanych za pomocą wybranych środowisk symulacyjnych* Międzynarodowe Warsztaty Doktoranckie OWD'2009, Wisła 17-20 października 2009 r.
3. Kroczek R.: *Wielostopniowa wyrzutnia elektromagnetyczna typu Coilgun* Praca magisterska
4. Qing-Ao Lv ; 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 on, Victoria
5. Kroczek R.: *Weryfikacja komputerowego modelu jednostopniowej wyrzutni elektromagnetycznej na stanowisku badawczym*, Materiały konferencyjne - Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki 2009, WZEE 2009, Poznań 21-23 września 2009r
6. Malinowski J. ; Kowalewski Z. ; Kruszka L.: *Doświadczalna metoda oraz badania plastycznego płynięcia metali w zakresie bardzo wysokich prędkości odkształcenia* ,Prace Instytutu Podstawowych Problemów PAN, ISBN 978-83-89687-29-6 2007

Adres służbowy Autora:

Mgr inż. Roman Kroczek
Mgr inż. Jarosław Domin
Silesian University of Technology
ul. Akademicka 10a
44-100 Gliwice
tel. (032) 237 26 85
fax (032) 237 27 01
email: roman.kroczek@polsl.pl
jaroslaw.domin@polsl.pl