

DZIAŁO ELEKTROMAGNETYCZNE BRONIĄ PRZYSZŁOŚCI

Streszczenie: W artykule opisano zasadę działania klasycznej szynowej wyrzutni elektromagnetycznej. Określono teoretyczną prędkość pocisku, w zależności od jego masy, wymiarów i długości lufy wyrzutni. Omówiono wpływ kształtu szyn na wartość uzyskiwanej indukcji w polu ruchu pocisku, a zatem na wartość siły działającej na pocisk. Przedstawiono dwa sposoby zasilania wyrzutni z ich zaletami i wadami. Przedstawiono kierunki prac nad rozwojem impulsowych źródeł mocy do zasilania wyrzutni elektromagnetycznych. Przedstawiono wyniki badań własnych modelu prostej szynowej wyrzutni elektromagnetycznej.

ELECTROMAGNETIC GUN AS A FUTURE WEAPON

Abstract: The article describes the operation of a typical rail electromagnetic launcher. It presents:

- the theoretical maximal missile speed it may gain depending on its mass, dimensions and the length of the launcher barrel;
- the impact of the rails shape on the induction value in the missile motion field, i.e. the force affecting the missile;
- two kinds of launcher supply with their advantages and disadvantages;
- the course of researches on the development of pulse power sources for supplying electromagnetic launchers.

The presented results of tests on a simple rail launcher are based on individual tests on electromagnetic launchers.

1. Wstęp

Możliwość wykorzystania energii pola elektromagnetycznego do wyrzucania pocisków z dużą prędkością już od lat budziły zainteresowanie wielu armii. Należy się spodziewać, że w niedalekiej przyszłości, elektromagnetyczne armaty szynowe będą stanowiły podstawowe uzbrojenie, w opracowywanych dla potrzeb armii pojazdach hybrydowych.

Ponieważ zbudowanie armaty elektromagnetycznej wymaga rozwiązania wielu problemów z zakresu mechaniki i elektromagnetyzmu oraz zjawisk, związanych z wytwarzaniem siły elektrodynamicznej, wiele placówek naukowych prowadziło i nadal prowadzi badania nad rozwiązaniem związanych z tym problemów [1].

Najbardziej zaawansowane w rozwoju broni elektromagnetycznej są amerykańskie instytuty naukowe. W USA już od kilkunastu lat prowadzone są zaawansowane prace nad wyrzutniami elektromagnetycznymi, które docelowo mają być zdolne do strzelania pociskami, z prędkością wylotową rzędu 3000 ÷ 5000 m/s.

2. Klasyczna wyrzutnia szynowa

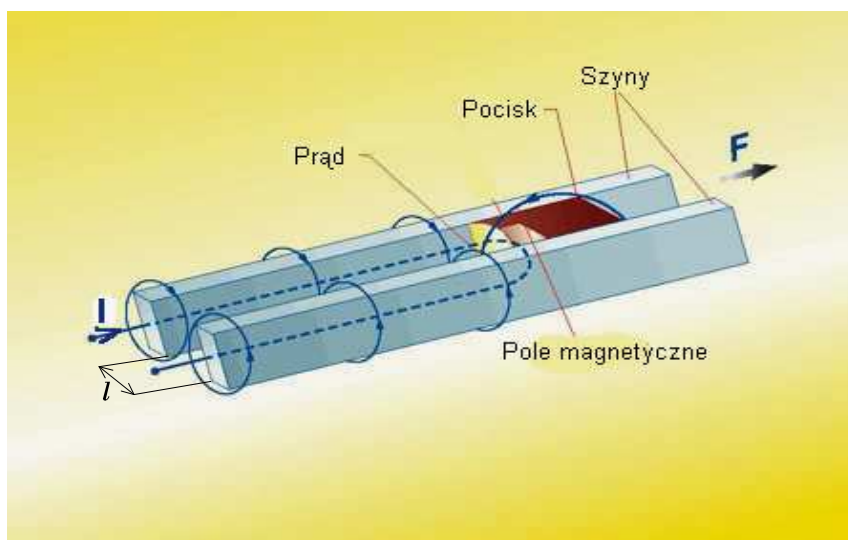
Zasada działania wyrzutni elektromagnetycznej polega na wykorzystaniu oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik, przez który płynie prąd elektryczny.

Klasyczna wyrzutnia szynowa (Rys. 1) jest najprostszym urządzeniem, służącym do przyspieszania ruchu pocisków. Składa się z dwóch równoległych szyn, umieszczonych w odległości l i podłączonych do źródła napięcia.

Zgodnie ze wzorem Lorentza na przewodnik o długości l , przez który płynie prąd o natężeniu I , umieszczony w polu magnetycznym o indukcji B , działa siła F

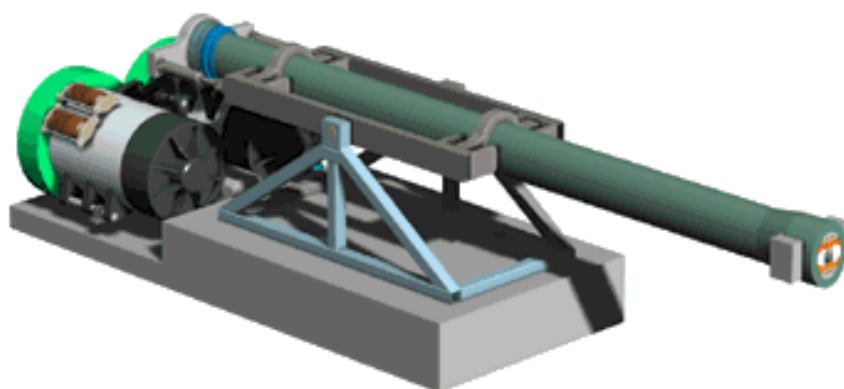
$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B} , \quad (1)$$

Źródłem pola magnetycznego są równoległe szyny, przez które płynie prąd, a poruszającym się przewodnikiem jest pocisk, który pełni rolę zwory łączącej szyny.



Rys. 1. Idea działania elektromagnetycznej wyrzutni szynowej

Przykładowy model szynowej armaty elektromagnetycznej [1] przedstawiony jest na rys. 2.



Rys. 2. Model szynowej armaty elektromagnetycznej

W pocisku poruszającym się pod wpływem działania siły elektrodynamicznej w polu strumienia magnetycznego, indukuje się siłę elektromotoryczną (SEM), o znaku przeciwnym do płynącego prądu. W wyniku działania napięcia indukowanego w obwodzie elektrycznym pocisku, następuje obniżenie się natężenia prądu zasilającego szyny.

Teoretyczna graniczna prędkość wylotowa, jaką może osiągnąć pocisk, wynika z faktu zrównania się indukowanej SEM z napięciem zasilania szyn U , w wyniku czego znika wtedy działanie siły F powodującej przyspieszanie pocisku.

Graniczna prędkość pocisku v_{\max} wynosi:

$$v_{\max} = U / (B \cdot l), \quad (2)$$

W praktyce, uzyskiwana prędkość pocisku jest uwarunkowana wartością drogi jego rozpędzania, a więc czasem trwania impulsu prądowego, bądź długością szyn.

Przyjmując, że pod wpływem działania siły F pocisk o masie m uzyskuje w lufie o długości L stałe przyspieszenie (pomijamy opory mechaniczne i inne czynniki), teoretyczną prędkość wylotową pocisku v_{wyl} można obliczyć z następującego wzoru:

$$v_{\text{wyl}} = \sqrt{2 \cdot L \cdot F / m} = \sqrt{2 \cdot L \cdot I \cdot l \cdot B / m}, \quad (3)$$

Przedstawione zależności nie uwzględniają tarcia, oporu powietrza, zmiany wartości prądu i indukcji magnetycznej w czasie oraz zjawisk elektrycznych występujących podczas przepływu bardzo dużych prądów przez szczotki doprowadzające prąd do pocisku, które mają istotny wpływ na wartość wypadkowej siły działającej na pocisk, a w konsekwencji na jego prędkość.

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 $F=5000$ 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.

3. Wpływ kształtu szyn na indukcję pola magnetycznego w obszarze działania na pocisk

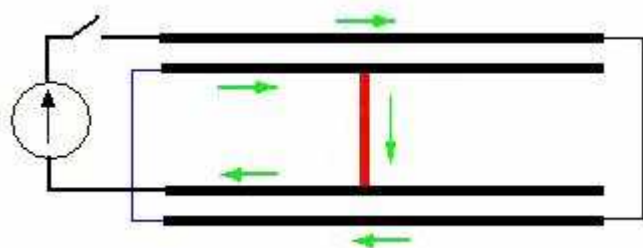
Zagraniczne rozwiązania prototypowych wyrzutni elektromagnetycznych [2] mają bardzo różne konstrukcje, zarówno szyn prowadzących, jak i płaszcza otaczającego szyny. Różne są też kalibry wyrzutni, wymiary, wartości prądów płynących w szynach, jak i źródła zasilania. Dla porównania wpływu rozmieszczenia i kształtu szyn na rozkład indukcji pola przyjęto jednakowe warunki dla wszystkich badanych konfiguracji. 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, dlatego obliczenia przeprowadzono dla:

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

W wyniku obliczeń [3], określono wartość średnią składowej normalnej indukcji magnetycznej w szczeliny między szynami. Geometrię szyn oraz wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

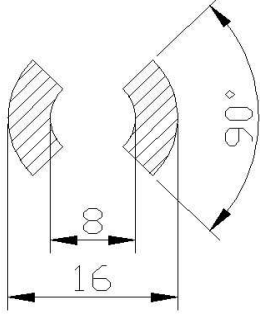
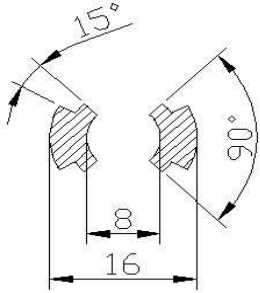
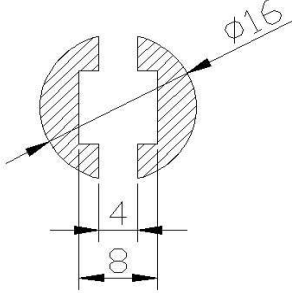
W układzie szyn pojedynczych, największa indukcja w szczelinie występuje dla szyn będących fragmentami pierścienia (tab. 1, poz.1÷2). Wykonanie takich szyn jest jednak trudne technicznie, z uwagi na siły działające na szyny podczas przepływu prądu.

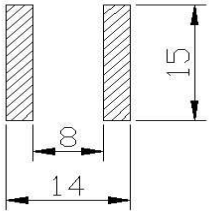
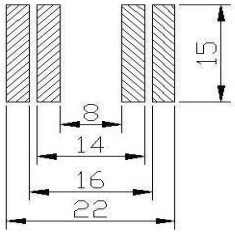
Bardzo obiecujące jest wykonanie wyrzutni w postaci szyn podwójnych [4], które są połączone szeregowo (rys. 3). Płaskie szyny podwójne (tab. 1, poz. 5) wytwarzają ok. 1,7 razy większą indukcję niż płaskie szyny pojedyncze i 1,3 razy większą, niż szyny stopniowane (tab. 1, poz. 2), przy takiej samej wartości natężenia prądu.



Rys. 3. Schemat połączenia elektrycznego szyn podwójnych wyrzutni

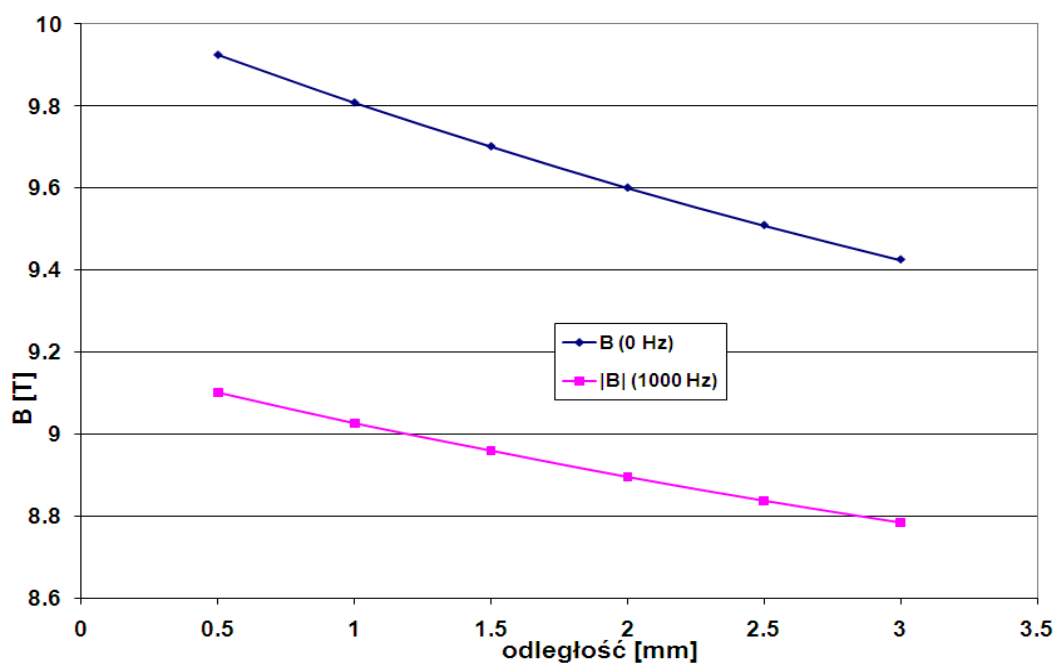
Tabela 1. Kształt szyn i wartości indukcji magnetycznej wytwarzanej w szczelinie między szynami, podczas przepływu prądu o natężeniu 100 kA (wymiary szyn w [mm]).

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

cd. Tabela 1			
4		5,85	5,49
5		9,81	9,03

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

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. 4 [3].



Rys. 4. Zależność wartości indukcji (dla układu z tabeli 1, poz. 5), od odległości szyn „jednokierunkowych”

Dwa przykładowe modele wyrzutni elektromagnetycznej przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Modele elektromagnetycznej wyrzutni szynowej

4. Źródła energii do zasilania wyrzutni elektromagnetycznej

4.1 Kondensatory impulsowe

Do zasilania wyrzutni elektromagnetycznej potrzebne jest źródło o bardzo dużej energii. Pierwsze próby laboratoryjne były wykonywane ze źródłem energii, zgromadzonej w baterii kondensatorów (Rys. 6) [5].

Energię E , zgromadzoną w baterii kondensatorów o pojemności C i napięciu U , można wyrazić następującym wzorem:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2, \quad (4)$$

Przykładowo, w impulsowym kondensatorze elektrolitycznym firmy Philips o pojemności 6300 μF o napięciu znamionowym 450 V, można zgromadzić energię 640 J. Wymiary gabarytowe tego kondensatora wynoszą: $\phi 76 \times 220$ mm, a jego masa - około 1 kg, co daje gęstość gromadzonej energii ok. 640 kJ/m^3 (ok. 0,7 kJ/kg).

Ponieważ do wystrzelenia większego pocisku potrzebna jest energia rzędu kilku MJ, a ponadto kondensatory gromadzące energię muszą mieć odpowiednie własności, aby nie nastąpiło ich rozsądzenie podczas impulsowego poboru mocy, nie są one dobrymi akumulatorami energii elektrycznej. Ponadto, aby zmagazynować dużą energię, kondensatory muszą mieć duże gabaryty i masę oraz być ładowane dłuższy czas z innego źródła zasilania. Stąd poszukiwania innych źródeł energii, będących w stanie wytworzyć niezbędną energię oraz ją magazynować, zachowując jednocześnie małe wymiary gabarytowe oraz masę.

4.2 Kompulsatory impulsowe [6]

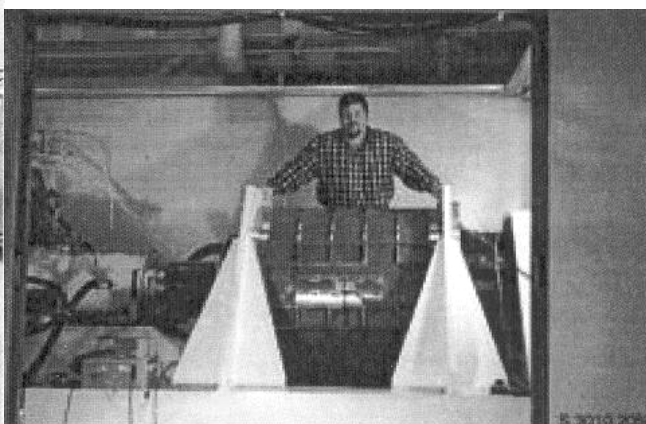
Badania nad impulsowymi źródłami zasilania zaczęto już na początku lat siedemdziesiątych. Naukowcy amerykańscy z Lawrence Livermore National Laboratories (LLNL) z Uniwersytetu Texas w Austin, prowadzili prace nad kompulsatorem impulsowym, nowym typem maszyny wirującej o bardzo małej impedancji i bardzo dużej energii w impulsie, służącej do zasilania laserów dużej mocy. Ta koncepcja kompulsatora impulsowego została później z powodzeniem zastosowana przez armię amerykańską oraz NASA do zasilania radarów i elektromagnetycznych wyrzutni pocisków.

W połowie 1980 roku pierwszy kompulsator impulsowy zwany „Iron-Core Compulsator” (ICC), został zademonstrowany z sukcesem armii amerykańskiej.

Urządzenie to było 6 - biegunową maszyną wirującą, która przy prędkości obrotowej 4800 min^{-1} mogła zmagazynować energię kinetyczną rzędu 40 MJ i dostarczyć dziesięć impulsów o energii 1MJ każdy, o czasie trwania impulsu wynoszącym 2 ms. Napięcie wyjściowe tego generatora wynosiło 2 kV, co przy prądzie 1 MA dawało impuls o mocy 2GW.



Rys. 6. Bateria kondensatorów o pojemn. 1236 μF , o energii 300 kJ



Rys. 7. Kompulsator bezrdzeniowy 40MJ

Po pozytywnych wynikach prób z armatą szynową, kontynuowano prace, rozszerzając ich zakres uwzględniający problemy przełączania bardzo dużych prądów dla armat zdolnych oddać kilka strzałów w krótkim czasie.

Zbyt duże gabaryty oraz masa kompulsatora impulsowego ICC, skłoniły naukowców do poszukiwania innych rozwiązań tego typu maszyn. W 1988 roku zbudowano dwa jednofazowe samowzbudne kompulsatory z rdzeniem powietrznym, w których do budowy wirnika zastosowano kompozyty bardzo lekkie i o dużej wytrzymałości. Pierwsza z tych bardzo lekkich i wydajnych maszyn była wykorzystana w Programie „The Small Caliber Rapid-Fire RailGun Program”. Zbudowany kompulsator impulsowy był 2-biegunową wysokoobrotową maszyną wirującą, o masie stanowiącej zaledwie 8 % wcześniej skonstruowanej maszyny, przez co gęstość mocy tego kompulsatora była sześciokrotnie większa.

Na zamówienie armii USA, UT-CEM rozpoczął prace nad generatorem impulsowym 9MJ, zdolnym do zasilania armaty elektromagnetycznej wyrzucającej pociski o masie 2÷4 kg z prędkością do 4 km/s. Zbudowany kompulsator impulsowy zdolny zmagazynować 230 MJ energii, pozwalał dać 9 powtarzalnych impulsów zasilających armatę (prąd w impulsie 3 MA przy napięciu 6 kV).

Na początku lat 90. zainteresowanie armii USA zostało ukierunkowane na nową generację armaty elektromagnetycznej, do zasilania której zastosowano drugą generację jednofazowych maszyn impulsowych z rdzeniem powietrznym o uzyskiwanej gęstości mocy w impulsie do 1500 kW/kg. Taki kompulsator impulsowy generuje impulsy mocy, zdolne przyspieszyć pocisk o masie 185 g do prędkości wylotowej, znacznie przewyższającej prędkość wylotową pocisków broni konwencjonalnej o porównywalnym kalibrze. Kompulsator magazynuje energię 40 MJ, wystarczającą do oddania 5 strzałów przy prądzie w impulsie 850 kA i napięciu 4 kV, bez potrzeby doładowywania energii.

Postać tego kompulsatora bezrdzeniowego przedstawiono na rys. 7. Urządzenie waży 2045 kg i magazynuje energię 40 MJ, przy prędkości obrotowej wirnika 12000 min^{-1} .

Pozwala to oddać trzy pięciostrzzałowe salwy o energii 1,2 MJ, z częstotliwością ok. 5 Hz [7]. Prąd w impulsie tego kompulsatora może dochodzić do 0,4 MA, przy czasie trwania ok. 2 ms.

4.2.1 Przyszłościowy Program Technologiczny

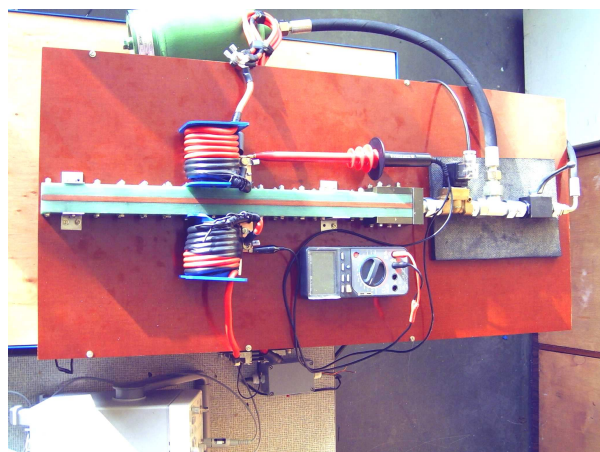
Obecnie armia USA finansuje „Centralny Program Technologiczny”, którego zadaniem jest stworzenie do 2015 roku przyszłościowego czołgu bojowego (the Future Main Battle Tank FMBT) [6]. Koncepcja nowych impulsowych źródeł mocy fundamentalnie odbiega od dotychczasowych kompulsatorów impulsowych, ewoluując do topologii pól wirujących i trybów operacji wielofazowych. Te zmiany, w połączeniu z lekkimi kompozytami używanymi do budowy wirnika, pozwolą ostatecznie zintegrować system zasilania w obudowie czołgu. Kompulsator impulsowy będzie jedną z części elektrycznych czołgu, łączących napęd elektryczny pojazdu, zawieszenie oraz elektryczne uzbrojenie. W tej koncepcji, energia koła zamachowego może być użyta zarówno jako akumulator energii, służącej do przyspieszania pojazdu oraz gromadzenia energii hamowania, jak również do produkcji mocy elektrycznej dla uzbrojenia elektromagnetycznego.

Ponieważ gabaryty źródła zasilania są mniej istotne w przypadku uzbrojenia okrętów wojennych, równolegle prowadzone są prace nad przyszłościowym wyposażeniem tych okrętów w armaty elektromagnetyczne, w których możliwe jest znaczne zwiększenie długości lufy, a więc również czasu działania pola elektromagnetycznego na rozpędzany pocisk. Pozwoli to zwiększyć zasięg rażenia, w porównaniu z konwencjonalnymi armatami okrętowymi.

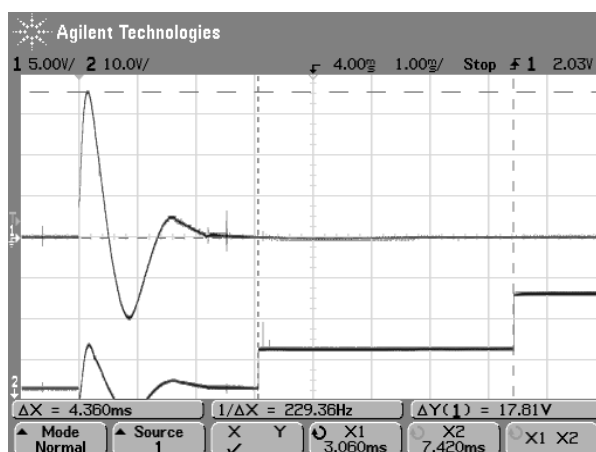
5. Próby modelu zbudowanej wyrzutni

W OBRUM sp. z o.o. prowadzone były prace nad zagadnieniem wyrzucania pocisków metodą elektromagnetyczną [3, 8].

Efektom tych prac jest jeden z modeli wyrzutni elektromagnetycznej, przedstawiony na rys. 8.



Rys. 8. Stanowisko badawcze modelu wyrzutni



Rys. 9. Przykładowy przebieg (górny), prądu szyn

Parametry tej wyrzutni były następujące:

długość szyn – 30cm, przekrój szyn – 48 mm^2 , przekrój lufy – $8 \times 8 \text{ mm}$, zasilanie z baterii kondensatorów 9,8 mF, napięciem do 2 kV. Wstępny rozbieg pocisku następował za pomocą powietrza, o ciśnieniu roboczym do 4 MPa (układ z zaworem pneumatycznym).

Badania wyrzutni przeprowadzono z użyciem pocisków aluminiowych i miedziano-grafitowych o masie do 10 g. Wybrane wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

Próby z pociskiem aluminiowym i grafitowym pokazały, jak istotny jest dobór materiału przewodzącego prąd przez powłokę pocisku (impedancja przewodzenia powłoki pocisku przy dużym prądzie impulsowym, praca w obecności łuku i straty energii na tarcie). Oczywiście, szyny też powinny być docelowo wykonywane z materiału, odpornego na oddziaływanie łuku elektrycznego, aby zapewnić możliwość oddania co najmniej kilkunastu strzałów do wymiany lufy.

Tabela 2.

Lp.	Amplituda prądu szyn [kA]	Prędkość pocisku [m/s]	Masa pocisku [g]	Rodzaj pocisku	Uwagi
1	109,9	39,5	10,1	Aluminiowy	Napięcie baterii kondensatorów 2 kV
2	110,4	42,4			
3	129,3	143,1	7,8	Miedziano-grafitowy	
4	130,2	168,5			

6. Podsumowanie

Współczesne źródła zasilania dział elektromagnetycznych wykorzystują kompulsatory bezrdzeniowe. Duże gabaryty tych maszyn, pozwalają na praktyczne wykorzystanie w artylerii okrętowej.

Postęp technologii, zapewni w najbliższych latach także zmniejszenie gabarytów kompulsatorów, że umożliwi ich zastosowanie jako źródło energii uzbrojenia elektromagnetycznego w lądowych pojazdach pancernych.

Podsumowując przedstawione rozważania, trzeba zdawać sobie sprawę przed jakimi problemami staje konstruktor, podejmujący się pracować nad rozwiązaniem, które w przyszłości zapewni ich praktyczne zastosowanie. Wachlarz zagadnień niezbędnych do rozwiązania dotyczy wielu dziedzin, począwszy od mechaniki, poprzez szeroko rozumianą elektrykę, materiałoznawstwo, a na zagadnieniach technologicznych kończąc.

Przeprowadzone badania wstępne i osiągnięte rezultaty wskazują, że kontynuacja tematu w zespołach interdyscyplinarnych w warunkach polskich powinna być kontynuowana.

Literatura

- [1] D. Lenord: „An Exploration of the Physics Behind Rail Guns”, University of Alaska, 2003, http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_fall2003.web.dir/Daniel_Lenord.
- [2] 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, January 2005.
- [3] Sprawozdanie z realizacji tematu “Badania modelu wyrzutni elektromagnetycznej” 51/D/2007 (opracowanie OBRUM – nie publikowane).
- [4] J. Gallant, P. Lehmann "Experiments With Brush Projectiles in a Parallel Augmented Railgun", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 1, Jan. 2005.
- [5] Jae-Won Jung, Seong-Ho Kim, Kyung-Seung Jang: “Overview of ETC Research in Korea”, IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, Vol. 39, No. 1, January 2003.
- [6] J. Pappas: “Railgun Pulsed Power Program – Army Electric Gun Program”, The University of Texas at Austin,

<http://www.utexas.edu/research/cem/Railgun%20Pulsed%Power%20Program.html>.

- [7] M. D. Driga, S. B. Pratap, A. W. Walls, J. R. Kitzmiller: "The Self Excitation Process in Electrical Rotating Machines Operating in Pulsed Power Regime", IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 37, No. 1, January 2001.
- [8] Sprawozdanie nr 12/2006 z realizacji tematu "Koncepcja wyrzutni elektromagnetycznej" (opracowanie OBRUM – nie publikowane).