



ANALIZA STANU TECHNIKI W DZIEDZINIE ELEKTROMAGNETYCZNEGO MIOTANIA POCISKÓW

STATE OF THE ART IN THE FIELD OF THE ELECTROMAGNETIC RANGED WEAPONS

Jacek JANISZEWSKI, Ryszard WOŹNIAK

Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna
Faculty of Mechatronics and Aviation at the Military University of Technology

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki analizy stanu techniki światowej w dziedzinie elektromagnetycznego miotania pocisków, zwracając szczególną uwagę na problemy techniczne i technologiczne związane z praktyczną realizacją idei szynowego działka elektromagnetycznego. Ponadto, scharakteryzowano przesłanki skłaniające do podjęcia w Polsce prac w tej dziedzinie oraz zaprezentowano wstępną koncepcję realizacji projektu naukowo-badawczego, mającego na celu zbudowanie w Polsce prototypu urządzenia elektroenergetycznego miotającego obiekty z dużymi energiami, a także „podwójne” wykorzystanie innych rezultatów projektu.

Słowa kluczowe: broń, broń miotająca, broń elektromagnetyczna, układy miotające broni.

1. Wprowadzenie

Zmieniający się w ciągu ostatnich dekad charakter konfliktów zbrojnych oraz duża liczba misji pokojowych pod auspicjami ONZ lub/i Unii Europejskiej sprawiły, że zmieniły się wymagania i potrzeby w stosunku do broni i amunicji. Sprowadzają się one do następujących zagadnień: zwiększenia skuteczności i zasięgu, skrócenia czasu odpowiedzi na atak, wysokiej precyzji rażenia i zdolności do penetrowania zewnętrznej obrony, niskich skutków ubocznych i dużej odporności na atak, kompatybilności z sieciocentrycznym polem walki, adekwatności rażenia w zależności od rodzaju celu [1]. Obecnie eksploatowane systemy

Abstract: This paper presents results of analysis in the state of the art concerning an electromagnetic projection of weapons (projectiles) and some technical and technological problems of practical realization of an electromagnetic rail gun idea. Moreover the paper describes some reasons for undertaking the work on the subject in Poland and an initial concept of a scientific-research project for developing an electro-energetic device that could project the objects with high energies and also the exploitation of some double-purpose results of the project.

Keywords: weapon, ranged weapon, electromagnetic weapon, ranged weapons methods of operation.

1. Introduction

The requirements and needs concerning the weapon systems and ammunition have changed in recent years to follow the character of military conflicts and a great number of peace missions conducted under the auspices of the UN or/and EU. They include the following range of issues: increased effectiveness and range, shorter time of response to attack, high precision of strikes and capacities of penetrating the external defence, low collateral effects with high resistance against attack, compatibility with the net-centric combat field and the relevant hitting capacity de-

uzbrojenia oparte na broni palnej, wykorzystujące do miotania pocisków głównie proch, osiągnęły praktycznie swoje szczytowe parametry balistyczne. Zasięg obecnie stosowanej lufowej artylerii dalekiego zasięgu niewiele przekracza 40 km. Wprawdzie podejmuje się liczne wysiłki poprawy charakterystyk miotających broni prochowej poprzez, np. stosowanie nowych materiałów miotających [2], nowych rozwiązań konstrukcyjnych układów miotających (np. układ z tzw. wędrującym ładunkiem – *ang. Travelling Charge System* lub układ z wędrującą komorą prochową – *ang. Serial Chamber Gun System*), czy nowych sposobów zapłonu (np. układy miotające z zapłonikiem plazmowym typu ETC – *ang. ElectroThermal Chemical Gun System*) [3], to jednak trudno oczekiwać jakościowego postępu, przynoszącego istotnie wymierne korzyści. Dlatego od wielu już lat poszukuje się zupełnie nowych systemów broni. Do najbardziej perspektywicznych można zaliczyć broń elektromagnetyczną, której różne rozwiązania bazują na technologii laserowej, mikrofalowej, czy impulsowego pola elektromagnetycznego [4, 5].

Współczesne trendy rozwojowe systemów broni pokazują, że w niedalekiej przyszłości do użytku wejdą systemy miotające, umożliwiające napędzanie pocisków do prędkości wyższych niż 2000 m/s i rażenie celów oddalonych nawet o setki kilometrów [1, 4, 5]. W ogólnie dostępnej literaturze przedmiotu można znaleźć wiele przykładów rozwiązań konstrukcyjnych układów miotających umożliwiających napędzanie pocisków do tzw. prędkości hiperdźwiękowych. Układy te można podzielić na: wybuchowe [6, 7], plazmowe [6, 8], na paliwo ciekłe i gazowe [6-13] oraz elektromagnetyczne [4, 5, 13, 14]. Jednak największe perspektywy rozwoju mają układy elektromagnetyczne.

2. Elektromagnetyczne układy miotające

Elektromagnetyczne układy miotające (tzw. działa elektromagnetyczne – DELM) wykorzystują do napędzania pocisku energię silnego pola elektromagnetycznego. Wśród nich wyróżnia się: cewkowe układy miotające, nazywane także Gaussa (*ang. coilgun*), oraz szynowe układy miotające (*ang. railgun*) [13, 14]. W przypadku układu cewkowego

pending on the type of target [1].

Currently used weapon systems based on the firing arms which exploit in general the powder for projecting shells or bullets have reached practically the maximum of their ballistic characteristics. The maximal ranges of currently used barrel guns merely excide 40 km. In spite of some efforts aimed to increase the projecting characteristics of powder weapons by using new propellants [2], new design solutions of projecting systems (e.g. so called *Travelling Charge System* or *Serial Chamber Gun System*) or new ways of ignition like ETC (*ElectroThermal Chemical Gun System*) [3] it is difficult to expect that a qualitative progress in the form of essential and real benefits could happen. For this reason the search has been carried out for a completely new weapon system in recent years. One of the most perspective one seems to be the electromagnetic weapon offering different solutions basing on laser, microwave or electromagnetic field pulse technologies. [4, 5].

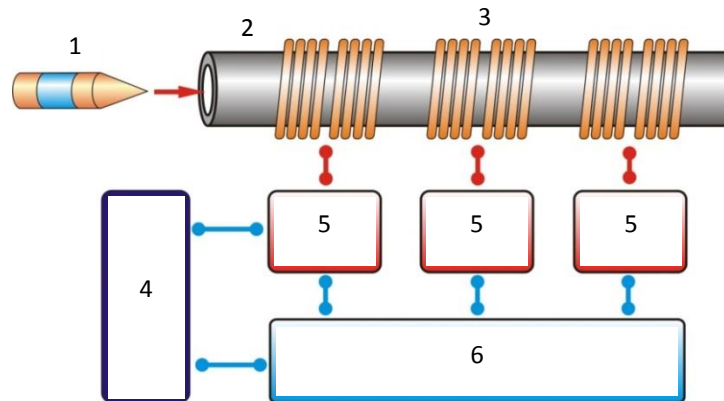
The current development trends on weapons indicate that in the near future the projecting systems can be used to provide muzzle velocities above 2000 m/s and striking the targets at ranges of a few hundred kilometres [1, 4, 5]. The generally accessible publications bring many examples of design solutions of throwing systems providing so called hypervelocities for projectiles. These systems may be divided on: explosive [6, 7], plasma [6, 8], liquid and gaseous propellants [6-13] and electromagnetic [4, 5, 13, 14]. The electromagnetic systems have the greatest perspectives of development.

2. Electromagnetic projecting systems

Electromagnetic projecting systems (so called electromagnetic guns – DELM) use the energy of strong electromagnetic field to throw projectiles. There are coil guns based on coil projecting systems (Gauss systems) and rail guns based on the rail projecting systems. [13, 14]. In case of coil systems the electromagnetic field is

pole elektromagnetyczne powstaje w wyniku rozładowania baterii kondensatorów przez zespół cewek lub elektromagnesów (rys. 1). W chwili strzału rozładowanie kondensatorów wywołuje powstanie silnego impulsu elektromagnetycznego, który początkowo wciąga pocisk umiejscowiony na jednym z końców cewki lub przed nią w odległości kilku centymetrów, a następnie gwałtownie go przyspiesza. Napędzanie pocisku odbywa się na odcinku odpowiadającym połowie długości cewki, po czym układ sterowania odłącza zasilanie z danej cewki, aby dalszy ruch pocisku nie był hamowany. Niemalże w tym samym momencie impuls prądowy jest podawany na drugą sąsiadującą cewkę, która zwiększa prędkość pocisku.

generated by the unloading of battery of capacitors through the system of coils or electromagnets (Figure 1). In the moment of firing the discharging of capacitors generates a strong electromagnetic pulse that initially pulls a projectile placed at the end of the coil or in front of it at the distance of a few centimetres and then rapidly accelerates the projectile. The acceleration of the projectile is carried out to the half length of the coil and in this moment the control unit interrupts the supply from this coil to prevent the braking of the movement. Almost in the same moment the current pulse is connected to the adjacent coil that increases the velocity of the projectile.



Rys. 1. Schemat cewkowego układu miotającego [15]:

1 - pocisk, 2 - lufa, 3 - cewka, 4 - źródło mocy, 5 - obwód rozładowania/ladowania, 6- układ sterowania zasilaniem cewek

Figure 1. Outlook of a coil throwing system [15]: 1- projectile, 2 - flywheel tube, 3 - electromagnetic coil, 4 - power supply, 5- charge/discharge circuit, 6 – coil switching control circuit

W zbudowanych dotychczas cewkowych układach miotających liczba cewek wynosiła nawet kilkadziesiąt, a prędkości wylotowe pocisków dzięki nim osiągnięte przekraczały 2000 m/s. Najważniejszą zaletą tego sposobu napędzania, oprócz możliwości osiągnięcia dużych prędkości, jest fakt, że nie występuje problem zużycia przewodu lufy wynikający z braku tarcia pomiędzy powierzchniami kontaktowymi pocisku i lufy. W przeciwieństwie do konwencjonalnej broni prochowej, powierzchnie prowadzące działa cewkowego nie mają fizycznego kontaktu z powierzchnią boczną pocisku, gdyż po pierwsze pocisk ma nieco mniejszą średnicę, a po drugie pole magnetyczne centruje pocisk w osi lufy. Do cennych zalet działa cewkowego ze względu na

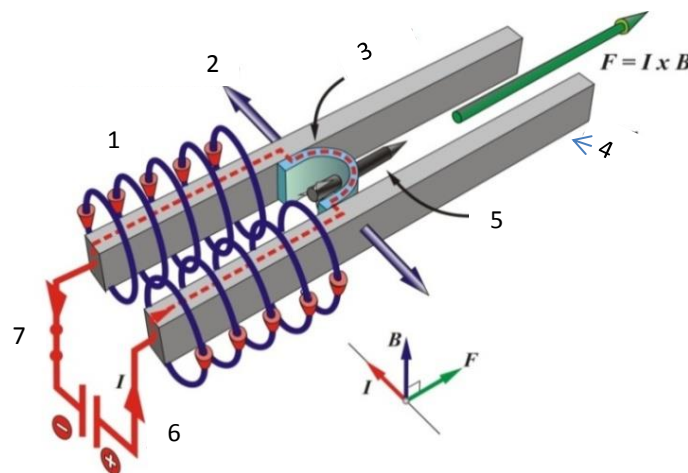
The coil projecting systems which were built up to now the number of coils exceeded a few dozens and the muzzle velocities of projectiles were above 2000 m/s. The biggest advantage of this type of driving apart of great velocities is the elimination of barrel wearing as there is no friction between the surfaces of barrel and projectile. Contrary to the conventional powder weapons the leading surfaces of coil gun have no direct contact with the projectile side surface as its diameter is a bit smaller and the magnetic field centres it in the barrel axis.

zastosowania militarne jest także to, że procesowi strzału nie towarzyszą zjawiska mogące zdradzić jego pozycję na polu walki, tj. huk wystrzału i rozbrzmienie.

Konstrukcja oraz działanie szynowych układów miotających, w porównaniu z układami cewkowymi jest prostsze, gdyż nie wymagają układu sterującego załączaniem i odłączaniem zasilania cewek. Pocisk w przewodzie działa szynowego jest pozycjonowany za pomocą sabotu – tzw. zwornika (*ang. armature*), który swoimi powierzchniami bocznymi styka się z dwiema odizolowanymi i równoległymi szynami biegnącymi wzdłuż przewodu działa (rys. 2).

The other important benefits of coil guns are the lack of report and flash which could betray their position in the battlefield.

The design and operation of rail throwing systems is simpler comparing to coil ones as they do not need any switching control circuits for coils. The projectile is positioned in the tube of the rail gun by a sabot (short circuiter - armature) that has its sides sliding on two parallel isolated rails along the gun tube (Figure 2).



Rys. 2. Schemat elektromagnetycznego szynowego układu miotającego:

1- pole magnetyczne, 2 – siła odpychająca, 3 – zwornik, 4- szyna, 5 – pocisk, 6- źródło zasilania, 7 – załącznik prądowy

Figure. 2. Outline of an electromagnetic rail projecting system:

1- magnetic field, 2 – real repulsion force, 3- armature, 4 – rail, 5 – projectile, 6 – power supply, 7 current switch

Szyny, zwornik i źródło zasilania wraz załącznikiem prądowym stanowią jeden obwód elektryczny. Gdy w tym obwodzie popłynie prąd impulsowy, wokół szyn i zwornika powstanie układ pól elektromagnetycznych, które indukują siły elektrodynamiczne chcące rozsunąć szyny i przemieścić zwornik zgodnie z kierunkiem wektorów przedstawionych na rys. 2. Ponieważ szyny są sztywno zamocowane, a jedynym ruchomym elementem w tym układzie jest zwornik, dlatego siły elektromagnetyczne wykonują pracę tylko na napędzenie zwornika i zamocowanego w nim pocisku. Za pomocą dotychczas zbudowanych laboratoryjnych dział szynowych pociski o masie 3 g osiągnęły prędkość około 6,5 km/s, ale uważa się, że możliwe jest uzyskanie prędkości nawet 15 km/s [6].

The rails, armature and source of supply together with the current switch create one electric circuit.

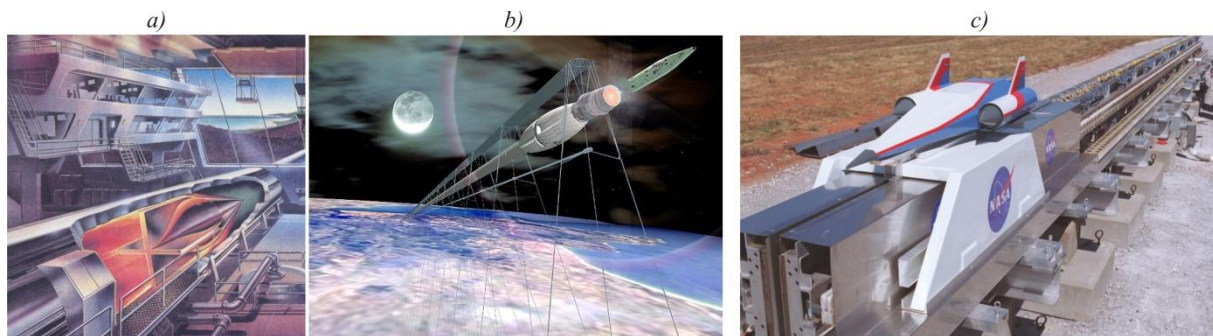
The flow of current pulse in the circuit creates around the rails and armature a configuration of electromagnetic fields that induces the electro-dynamic forces which push out the rails and the armature along the directions of vectors in figure 2. As the rails are fixed rigidly and the armature is the only one moving part then the electromagnetic forces drive it and attached projectile. The laboratory installations of rail guns provide now the velocities ca. 6.5 km/s for projectiles of 3 g mass and there is an opinion that velocities of 15 km/s are possible [6].

3. Obszary zastosowania elektromagnetycznych układów miotających i perspektywy ich rozwoju

Na podstawie wyników analizy literatury przedmiotu można zauważyć, że w ciągu ostatnich 20 lat, bardzo wzrosło zainteresowanie elektromagnetycznym sposobem napędzania oraz dokonano dużego postępu w dziedzinie konstrukcji i technologii elektromagnetycznych układów miotających. Obecnie są wykorzystywane głównie w badaniach naukowych, których celem jest poznanie zjawisk towarzyszących ruchowi ciał i ich zderzeniom z dużymi prędkościami. Jednak w przyszłości przewiduje się, że znajdą zastosowanie zarówno niemilitarne, jak i militarne.

3. Areas and perspectives of application for electromagnetic projecting systems

Basing on the studies of relevant literature it may be noticed that within the last 20 years the interest in electromagnetic way of projection has greatly increased and a great progress in designs and technologies of electromagnetic projecting systems has been made. They are currently used at scientific researches focused on effects accompanying the movement of objects and their collisions at high velocities. Nevertheless it is expected that they can be used in the future both in military and civilian applications.



Rys. 3. Wizja transportu orbitalnego za pomocą układu RAM Accelerator (a) lub szynowej wyrzutni elektromagnetycznej (b) oraz wyrzutnia szynowa do przyspieszania modeli przyszłościowych statków orbitalnych (c) [18]

Figure 3. A concept of space transport by RAM Accelerator (a) or a rail electromagnetic launcher (b) and a rail launcher for accelerating space craft models of the future (c) [18]

W aspekcie niemilitarnym planuje się je wykorzystać w przyszłości do transportu towarów, a nawet ludzi na orbitę okołoziemską [16, 17]. Rozważa się użycie do tego celu głównie dwóch sposobów napędzania, tj. układu typu RAM Accelerator (rys. 3a) [12] lub/i elektromagnetycznego: szynowego lub cewkowego (rys. 3b i 3c). W tym przypadku napędzanie kapsuły następowałoby na stosunkowo długiej drodze, rzędu kilku lub kilkunastu kilometrów.

W przypadku zastosowań wojskowych, obecne prace rozwojowe są prowadzone w dwóch podstawowych kierunkach. Pierwszy z nich dotyczy wykorzystania idei liniowego silnika indukcyjnego do wspomaganie startu bezzałogowych statków powietrznych (BSP) [21] lub samolotów bojowych [22], drugi zaś

In the civilian applications it is planned to use them in the future for transport the goods and even people into the space [16, 17]. Two ways of propelling are mainly considered i.e. the RAM Accelerator system (figure 3a) [12] or/and electromagnetic one: rail or coil systems (figures 3b and 3c). In this case a capsule would have been propelled at relatively long distance of a few or a dozen of kilometres.

In the case of military applications the current development work is carried out in two different directions. The first of them exploits the idea of a linear inductive motor to bust the takeoff of unmanned aerial vehicles (UAV) [21] or combat planes [22] and the second one

jest ściśle związany z systemami broni artyleryjskiej [23]. Przykładem osiągnięć w zakresie elektromagnetycznych systemów katapultowych może być program prowadzony przez marynarkę wojenną USA, w ramach, którego opracowano katapultę elektromagnetyczną, umożliwiającą start samolotów bojowych z pokładu lotniskowca. Dotychczas przeprowadzono liczne starty z wieloma typami samolotów pokładowych, m.in. w 2010 r. dokonano pierwszego startu samolotu F-18 Super Hornet (fot. 1a), a w 2011 r. katapultowano samolot F-35C Lightning II. W planach marynarki USA przewidziano, że pierwszym lotniskowcem z elektromagnetycznymi katapultami będzie Gerald R. Ford (CVN 78) (fot. 1b) [22].

refers to artillery guns [23]. An example of achievements in electromagnetic catapult systems may be the USA Navy program where an electromagnetic catapult has been developed for takeoff combat planes from aircraft carrier board. Up to now many take offs have been carried out with different types of onboard planes and above all in 2010 the first takeoff of F-18 Super Hornet (photograph 1a) took place and in 2011 F-35C Lightning II was catapulted. According to the US Navy plans the first aircraft carrier with electromagnetic catapult systems will be Gerald R. Ford (CVN 78) (photograph 1b) [22].



Fot. 1. Pierwszy start samolotu F-18 Super Hornet za pomocą naziemnej katapultы elektromagnetycznej – grudzień 2010 r. (a); wizja przyszłościowa startu samolotu F-35C Lightning II z pokładu lotniskowca Gerald R. Ford (CVN 78) wyposażonego w katapultы elektromagnetyczne(b) [22]

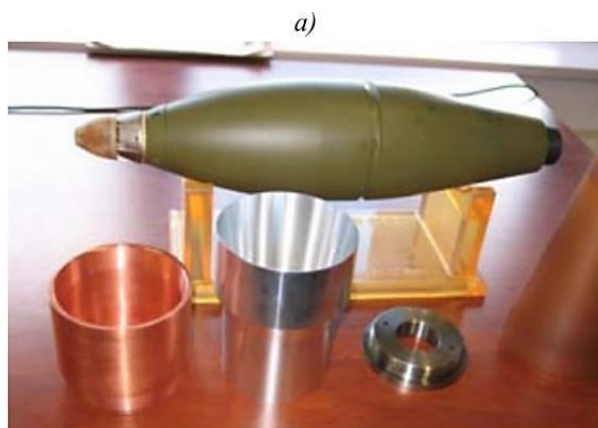
Photograph 1. The first takeoff of F-18 Super Hornet plane by the ground electromagnetic catapult – December 2010 (a); a vision of future takeoff of F-35C Lightning II plane from the aircraft carrier Gerald R. Ford (CVN 78) equipped with electromagnetic catapults (b) [22]

Dostrzegając korzyści z zastosowania DELM, na początku XXI wieku, w kilku krajach (m.in.: w USA, Chinach, Wielkiej Brytanii, Japonii, Niemczech, Francji) uruchomiono duże projekty badawcze, które zaowocowały oryginalnymi modelami dział elektromagnetycznych, zdolnymi do miotania pocisków z bardzo dużymi energiami kinetycznymi. Na przykład, w ramach programu realizowanego przez instytut francusko-niemiecki zbudowano układ badawczy o nazwie PEGASUS [24], który umożliwia napędzanie pocisków do energii 4,8 MJ [25]. W Chinach opracowano system pancerza reaktywnego dla wozów opancerzonych, bazujący na idei działa cewkowego, który wystrzeliwuje antypocisk w kształcie płyty

Taking the advantages of using DELM in the beginning of XXI century many countries (like: USA, China, UK, Japan, Germany, France) launched great research projects which provided some original models of electromagnetic guns for projecting shells with high kinetic energies. For example in the frame of a program conducted by a French-German venture an experimental system PEGASUS [24] has been built to propel the projectiles to energy of 4.8 MJ [25]. A system of reactive armour for armour clad vehicles that is based on the idea of the coil gun to shot antimissile in the form of a plate in the direction of up-

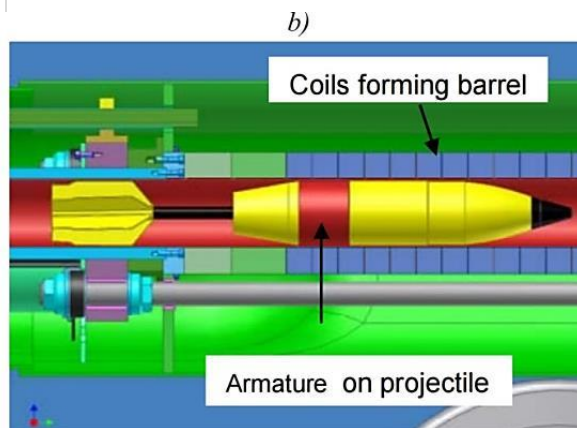
w kierunku zbliżającego się zagrożenia (pocisku) [26].

Największy postęp w przedmiotowej dziedzinie osiągnięto w USA, gdzie po 2005 r. zapoczątkowano m.in. dwa projekty badawcze, z których pierwszy ma na celu opracowanie 120 mm moździerzka z cewkowym układem miotającym, a drugi – działa okrętowego dalekiego zasięgu z szynowym układem miotającym.



coming threat (missile) has been developed in China [26].

But the greatest progress in the domain was made in the US where two research projects were launched after 2005 and the first one is aimed to develop 120 mm mortar with coil propelling system and the second one a long range ship gun with the rail propelling system.



Fot. 2. Pocisk moździerzowy M-934 z zestawem modernizacyjnym (a); fragment 45. stopniowego działa cewkowego z granatem (b) [27]

Photograph 2. Mortar shell M-934 with the upgrading kit (a); a part of 45-section coil gun with the shell (b) [27]

W pracy [27] przedstawiono założenia do pierwszego projektu, według których prędkość wylotowa zmodernizowanego pocisku moździerzowego M-934 o masie 18 kg (fot. 2a) będzie wynosić 420 m/s, co stanowi wzrost w donośności w stosunku do obecnie eksploatowanego o około 30% (tj. z 7 do 9 km). Miotanie pocisku będzie odbywało się z 45. stopniowego działa cewkowego o długości lufy 2,1 m (fot. 2b), nadając pociskowi energię wylotową na poziomie 1,6 MJ. Dotychczas w oficjalnych źródłach literaturowych nie pojawiły się informacje o stanie zaawansowania tego projektu.

Dużo ogólnych informacji można znaleźć na temat drugiego projektu. Po 2010 r. firmy BAE System i General Atomics przeprowadziły próby strzelaniem modeli dział szynowych (fot. 3 i 4), osiągając energie wylotowe pocisków na poziomie 33 MJ przy prędkościach wylotowych rzędu 7 Mach (dla porównania energia klasycznego, 140 mm pocisku odłamkowo-burzącego wynosi około 10 MJ) [23]. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w

The work [27] presents the assumptions of the first project and according to them the muzzle velocity of upgraded mortar projectile M-934 with the weight of 18 kg (photograph 2a) is 420 m/s what increases the range of currently used one by ca. 30% (i.e. from 7 to 9 km). The projection of the shell will be made by a coil gun with 45 sections in 2.1 m long barrel (photograph 2b) to provide the muzzle energy of the shell on 1.6 MJ level. Up to now there is no information published in literature about the results of this project.

Some pieces of general information on the second project may be found anyway. After 2010 the companies BAE System and General Atomics have carried out the firing trials on rail gun models (photographs 3 and 4) and reached the muzzle velocities of shells on 33 MJ level at muzzle velocities of 7 Mach (for comparison the energy of conventional 140 mm HE shell is ca. 10 MJ) [23]. It has to be

przeszło 150. letniej historii badań nad szynowymi układami elektromagnetycznymi, testowane działa mogą być, jako pierwsze, wdrożone do wojsk.

stressed that the tested guns may be fielded as the first ones in 150 years long history of research work on rail electromagnetic systems.



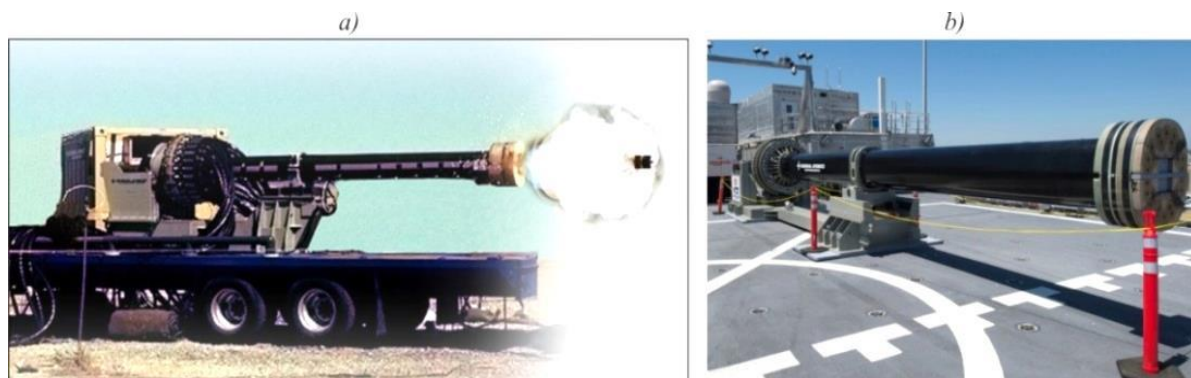
Fot. 3. Model okrętowego dział szynowego koncernu BAE System (a); widok szynowego dział elektromagnetycznego na pokładzie okrętu transportowego USNS "Millinocket" typu JHSV-3 (b) [29]
Photograph 3. Model a ship rail gun of BAE System (a); the view of the electromagnetic rail gun on board of the transport ship USNS "Millinocket" type JHSV-3 (b) [29]

Z powodu licznych ograniczeń technicznych, o których będzie mowa w następnym rozdziale, obecne prace rozwojowe koncentrują się przede wszystkim na stacjonarnym dziale szynowym, montowanym na stałej platformie naziemnej lub na pokładzie okrętu wojennego.

W pierwszym przypadku głównym przeznaczeniem dział będzie obrona przeciwlotnicza i przeciwrakietowa, natomiast w drugim – do niszczenia celów morskich poza linią horyzontu lub obiektów lądowych położonych w głębi terytorium przeciwnika. Według oficjalnych planów marynarki Stanów Zjednoczonych, testy prototypów dział na poligonach morskich rozpoczną się już w 2016 r., a pierwsze działa na docelowych okrętach wojennych pojawią się w 2018 r. Ponadto, zakłada się, że nowy system broni wejdzie do użytkowania w latach 2020-2025, a jego rozwój technologiczny osiągnie taki poziom, że będzie możliwe strzelanie, z zachowaniem żywotności lufy na poziomie 100 strzałów, z energiami rzędu 60 MJ, co umożliwi rażenie celów odległych o ponad 400 km [23]. Plany wprowadzenia dział szynowych na uzbrojenie okrętów wojennych ma również marynarka brytyjska [28].

As there is still a great number of technical limitations which are presented in the next chapter the current development work is focused most of all on a stationary rail gun integrated on a ground or ship platform.

In the first case the main designation of the gun is the anti-aircraft and anti-missile defence whereas in the second case it is the destroying of sea over horizon targets or land objects situated deep in the territory of enemy. According to official plans of the US Navy the first tests of gun prototypes will start on sea ranges in 2016 and the first guns on the objective warships will be integrated in 2018. It is assumed that the new system of weapons will be implemented to service in 2020-2025 providing technological capacities for the wearing of the barrel on the level of 100 shots at energy level ca. 60 MJ what enables the hitting of targets beyond 400 km [23]. The UK Navy is also planning to implement the rail guns into its warships [28].



Fot. 4. Prototypy lądowej – Blitzer (a) i morskiej (b) wersji elektromagnetycznego działka szynowego firmy General Atomics [22]

Photograph 4. Prototypes of land – Blitzer (a) and sea (b) versions of electromagnetic rail gun of General Atomics [22]

4. Techniczne i technologiczne aspekty budowy szynowego działka elektromagnetycznego

Zasada działania elektromagnetycznego układu szynowego jest na tyle prosta, że nawet w warunkach domowych można skonstruować taki napęd. Stąd od dawna ten sposób przyspieszania ciał wzbudzał duże zainteresowanie zwłaszcza, że – z teoretycznego punktu widzenia – gwarantował osiąganie bardzo dużych prędkości napędzania. Pierwsze wzmianki o możliwości zastosowania układu elektromagnetycznego do miotania pocisków pojawiły się już w 1845 r., a więc zaledwie 10 lat po pionierskich pracach Faradaya nad elektrycznością [30]. Idea militarnego użycia działka elektromagnetycznego pojawiła się w czasie I wojny światowej [31] i z tego okresu pochodzi wstępny projekt działka szynowego (fot. 5a) autorstwa francuskiego konstruktora Fauchon-Villaplee. Jednak z powodu wielu problemów technicznych oraz zakończenia wojny projekt ten nie doczekał się realizacji praktycznej.

Podczas II wojny światowej szynowym układem elektromagnetycznym ponownie zainteresowali się Niemcy, chcący opracować skuteczną broń przeciwlotniczą oraz dalekonośną do ostrzeliwania Londynu [30, 31]. Wprawdzie opracowali układ miotający, umożliwiający osiągnięcie prędkości wylotowej 1,08 km/s dla pocisku o masie 10 g, ale - po pierwsze - ten wynik był daleki od oczekiwanych, a po drugie - podczas napędzania pocisk ulegał częściowemu stopieniu.

Po wojnie prace rozwojowe prowadzono

4. Technical and technological aspects of designs of electromagnetic guns

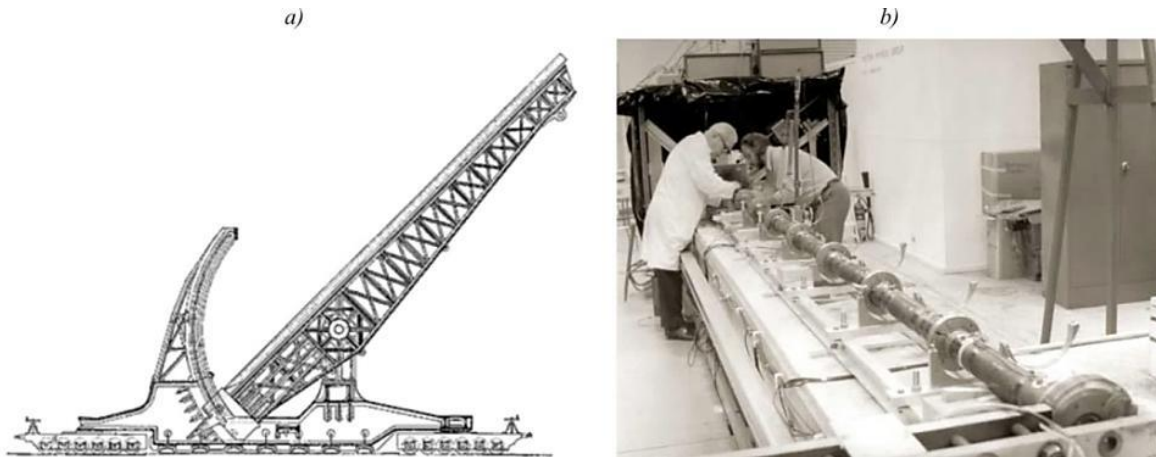
The concept of electromagnetic rail gun is so simple that it seems to be easily designed. For this reason this way of acceleration of objects has raised a great interest since the past especially as it promised from the theoretical point of view the possibilities in achieving great propelling velocities. The first pieces of information about application of electromagnetic systems for projecting shells appeared in 1845 i.e. just 10 years after Faraday's discoveries on electricity [30]. An idea for military use of electromagnetic gun appeared at the First World War [31] when an initial design of the rail gun was developed (photograph 5a) by French designer Fauchon-Villaplee. Because of many technical problems and termination of the War the design was not completed.

During the WW II the Germans again take an interest in the electromagnetic rail system and tried to develop an effective weapon for anti-aircraft defence and shelling London [30, 31]. They even developed a projecting system providing the muzzle velocities of 1.08 km/s for 10 g bullet but firstly the result was far away from the expectations and secondly at the propelling phase the bullet melted partially.

After the War the development work has

w Wielkiej Brytanii i USA, przy czym Brytyjczycy koncentrowali się na poprawie konstrukcji niemieckiego dział szynowego, zaś Amerykanie rozwijali układy cewkowe (w czasie wojny cewkowy sposób napędzany był badany również przez Japończyków) [30]. Próby te zakończyły się także niepowodzeniem, gdyż uzyskane wyniki nie były lepsze od tych osiągniętych przez konstruktorów niemieckich i japońskich. Prace przerwano i dopiero w latach 70. XX wieku dokonano znaczącego postępu w technologii układów elektromagnetycznych. W 1977 r. naukowcy z Australijskiego Uniwersytetu Narodowego ustanowili spektakularny rekord, napędzając pocisk z poliwęglanu o masie 3 g do prędkości 5,9 km/s (fot. 5b). Wynik ten nie został poprawiony przez następne 30 lat.

been conducted in the UK and US and the Brits have focused on the improvement of the German solution whereas the Americans have developed coil systems (during the War the coil way of propelling was also tested by Japans) [30]. These trials also ended as fiasco as the results were not better than those obtained by the German and Japan designers. The work was halted and only in the seventies of XX-th century an essential progress was made in the technology of electromagnetic systems. In 1977 the scientists from the Australian National University set a spectacular result by propelling a bullet of 3g made from the polycarbonate to the velocity of 5.9 km/s (photograph 5b). This result has not been improved for the next 30 years.



Fot. 5. Projekt francuskiego dział szynowego z 1918 r. [33] (a); szynowy układ elektromagnetyczny, z którego naukowcy australijscy w 1977 r. ustanowili rekord prędkości napędzania 3g pocisku [30]
Photograph 5. The design of a French rail gun from 1918 [33] (a); the rail electromagnetic system used by the Australian scientists to set the velocity record of 3g bullet in 1977 [30]

Duże sukcesy w dziedzinie napędzania elektromagnetycznego osiągnęli również naukowcy z byłej Jugosławii. W latach 80. XX wieku opracowali, bowiem dwa laboratoryjne działa szynowe, umożliwiające miotanie pocisku o masie 1 kg z prędkością 2400 m/s. Rozpad Jugosławii, a następnie wojna bałkańska przerwała dalsze prace w tej dziedzinie. W tym samym okresie w Stanach Zjednoczonych uruchomiono kilka projektów, których celem było opracowanie dział elektromagnetycznego w ramach dużego programu zbrojeniowego, okrzykniętego przez prasę mianem „Programu Gwiazdnych Wojen”, a kierowa-

Some essential results in the domain of electromagnetic propelling have been also achieved by the scientists of former Yugoslavia. In the eighties of XX-th century they managed to develop two laboratory rail guns which projected 1 kg shell with the velocity of 2400 m/s. The decomposition of Yugoslavia and ensuing Balkan War have interrupted the work in this domain. In the same time in the US a few projects were launched to develop an electromagnetic gun in the frame of the great armament program called by the media as the „Star War Program” governed by the State

nego przez agencję rządową DARPA (*ang. Defense Advanced Research Projects Agency*) [34]. Duży udział w realizacji powyższych projektów mieli naukowcy z Uniwersytetu Texas w Austin. Zapoczątkowane w tym okresie prace przyniosły wymierne efekty w postaci działań firm BAE System i General Atomics (fot. 3 i 4).

Przedstawienie krótkiej historii badań nad opracowaniem szynowego działka elektromagnetycznego miało głównie na celu wskazanie skali problemów, które mogą być rozwiązane dopiero po ponad 150 letniej kumulacji wiedzy naukowej i technicznej. Pomimo prostoty działania, praktyczna realizacja idei działka szynowego, przewidzianego do zastosowań wojskowych, nadal stanowi duże wyzwanie i wymaga jeszcze rozwiązania wielu złożonych problemów technicznych i technologicznych. Są one konsekwencją m.in.: zapotrzebowania na ogromną ilość energii elektrycznej, impulsowym rozładowaniem zgromadzonej energii oraz ograniczonej trwałości układu, będącej następstwem przepływu prądu o bardzo dużym natężeniu przez zasadnicze podzespoły działka szynowego (układ mocy, szyny i zwornik) i ślizgowego kontaktu zwornika z szynami.

4.1. Źródła zasilania

Problem dostarczenia odpowiednio dużej ilości energii elektrycznej do działka szynowego jest kluczowym zagadnieniem i stanowił on przez dziesięciolecia barierę nie do przezwyciężenia. Jak pokazują wyniki analiz i prób doświadczanych, oddanie jednego strzału z energią wylotową pocisku wyższą niż z klasycznego, prochowego działka artyleryjskiego wymaga dostarczenia energii elektrycznej rzędu kilkudziesięciu, a nawet kilkuset megadżuli. Np. w pracy [28] rozpatrzono przypadek strzelania pociskiem o masie 5 kg na odległość 200 mil morskich, zakładając, że prędkość pocisku w chwili trafienia w cel będzie wynosiła od 1000 do 1500 m/s. Przyjęto także, że pocisk będzie napędzany za pomocą zwornika i pozycjonowany sabotem o łącznej masie 3 kg. Na podstawie obliczeń oszacowano, że aby spełnić powyższe założenia, energia pocisku wraz z oprzyrządowaniem (zwornik + sabot) powinna wynosić 25 MJ, co od-

Agency DARPA (*Defence Advanced Research Projects Agency*) [34]. A great contribution in the performance of the above mentioned projects falls for the scientists of the University of Texas in Austin. The work that started in that time brought real effects in the guns of BAE System and General Atomics (photographs 3 and 4).

Presentation of a short overview of efforts on the development of the rail electromagnetic gun was aimed to show the scope of problems which could be dealt with merely after 150 years of aggregation of scientific and technical knowledge. In spite of the simplicity of operation the practical solution of the rail gun concept designated for military applications is still a challenge and many technical and technological problems have to find proper solutions. They are the result of a huge demand on electric energy, pulsed discharging of accumulated energy and the limited durability of the system caused by the flow of current with extremely high intensity through the main subunits of the rail gun (power supply unit, rails and armature) and the sliding contacts between armature and rails.

4.1. Sources of power supply

The problem of delivering a huge amount of energy to the rail gun is a key issue and was a barrier that has not been overcome for decades. According to theoretical studies and experimental results the delivering of one shot with the muzzle energy greater than conventional powder artillery gun requires the supplying of electric energy on the level of a few dozens or even hundreds of MJs. There is an example in [28] where the firing of 5 kg shell on the range of 200 sea miles is considered at the assumption that the shell hitting velocity is between 1000 to 1500 m/s. It was also assumed that the projectile is propelled by the armature and positioned by a sabot with total weight of 3 kg. Basing on calculations it was estimated that the meeting of the above mentioned assumptions requires the energy of 25 MJ to be provided to the shell with accesso-

powiada prędkości wylotowej 2500 m/s. Bazując następnie na założeniach dotyczących charakterystyk obwodu elektrycznego działła (m.in. gradient indukcyjności – 0,5 $\mu\text{H/m}$, zmiana rezystancji w zakresie od 0,5 $\text{m}\Omega$ do 1 $\text{m}\Omega$, sprawność całkowita układu – 33% oraz długość drogi napędzania - przyjęto wartość 6,4 m), obliczono, że źródło zasilania powinno zmagazynować energię o wartości 75 MJ. Z kolei, zakładając, że sprawność ładowania baterii kondensatorów impulsowych jest na poziomie 80%, aby oddać jeden strzał – moc układu ładowania powinna wynosić 1,6 MW. W przypadku prowadzenia ognia z szybkostrzelnością 6-ciu pocisków na minutę układ ładowania powinien mieć moc 9,6 MW.

Z powyższych wyliczeń wynika, że istnieje zapotrzebowanie na wysoką moc układu zasilania i aby ją zapewnić konieczne jest zastosowanie wydajnych źródeł energii. Dotychczas najczęściej stosowanym rozwiązaniem było użycie baterii wysokonapięciowych kondensatorów impulsowych lub tzw. superkondensatorów, za pomocą których gromadzi się energię wytworzoną przez generator prądowy. Z punktu widzenia zastosowań militarnych to rozwiązanie ma dużo ograniczeń wynikających z bardzo dużych gabarytów i masy baterii kondensatorów (nawet kilkadziesiąt ton), a także z długiego czasu ich ładowania, co negatywnie wpływa na szybkostrzelność układu. Stąd kondensatory impulsowe są stosowane jedynie w układach laboratoryjnych i zasilają stacjonarne działła szynowe (fot. 6a). Dlatego poszukuje się innych źródeł, będących w stanie wyprodukować wymaganą ilość energii elektrycznej oraz ją magazynować i oddawać impulsowo, zachowując jednocześnie małe wymiary i niewielką masę. Takie możliwości stwarzają kompulsatory impulsowe, które łączą w sobie funkcje magazynowania energii bezwładnościowej, wytwarzania napięcia oraz przetwarzania mocy [35-37]. Pierwszy kompulsator z rdzeniem żelaznym został opracowany na Uniwersytecie Texas w latach 80. XX wieku, a kolejne generacje kompulsatorów z rdzeniem powietrznym zbudowano w latach 90. XX wieku i po roku 2000. Na fot. 6b przedstawiono kompulsator z rdzeniem powietrznym, zbudowany na przełomie lat 80. i 90. na Uniwersytecie Texas, o masie 2045 kg

ries (armature + sabot) what corresponds the muzzle velocity of 2500 m/s. Next basing on assumptions concerning gun electric circuit characteristics (e.g. gradient inductivity – 0.5 $\mu\text{H/m}$, change of resistance from 0.5 $\text{m}\Omega$ to 1 $\text{m}\Omega$, total effectiveness of the system – 33% and the length of propelling path 6.4 m) it was calculated that the power supply source had to accumulate the energy of 75 MJ. Assuming on the other hand that the effectiveness of battery of pulse capacitors is ca. 80% then the delivery of one shot needs the power of 1.6 MW. In case if the rate of fire is 6 shells per second then the loading circuit has to have the power of 9.6 MW.

The above calculations show that there is a demand for a high level of power supply circuit and to meet it is necessary to use the efficient sources of energy. Up to now the most typically used solution exploited the battery of high voltage pulse capacitors or so called super-capacitors which accumulate the energy provided by a generator of the current. From the military point of view this solution has a lot of limitations as there are the great volumes and weights of capacitor battery (to a few dozens of tons) and a long time of its loading what has a negative impact on rate of fire. For this reason the pulse capacitors are used only in laboratory systems and provide power for stationary rail guns (photograph 6a). This is a reason why other sources of low volumes and weights are searched to generate the required amount of electric energy and to store and supply it in a pulse way. Such capacities are provided by compulsators which combine the functions of storing the inertial energy and the generation of electric voltage and transformation of power [35-37]. The first compulsator with the iron core was developed in Texas University on eighties of XX-th century and the next generations of compulsators with the air core were built in the nineties and after 2000. A compulsator with the air core built between eighties and nineties in Texas University is presented in photograph 6b and it weighs

oraz maksymalnej energii zgromadzonej 40 MJ, wystarczającej do oddania 5 strzałów bez potrzeby doładowywania energii przy prądzie w impulsie 850 kA i napięciu 4 kV [38].

2045 kg and provides the maximal stored energy of 40 MJ for 5 shots without the need of reloading and at the current pulse level 850 kA and voltage 4 kV [38].



Fot. 6. Bateria kondensatorów zastosowanych do testów dział szynowego firmy General Atomics (a); kompulsator impulsowy z rdzeniem powietrznym zbudowany na Uniwersytecie Texas (b)[37]

Photograph 6. The battery of capacitors used for testing the rail gun of General Atomics (a); the compulsator with the air core built in Texas University (b)[37]

4.2. Układ rozładowania impulsowego

Praca DELM zależy również od przebiegu rozładowania zgromadzonej energii. Parametry elektryczne obwodu elektrycznego dział szynowego, tj. rezystancja, indukcyjność i pojemność (obwód RLC), powinny być tak dobrane, aby impuls prądowy posiadał możliwie jak najwyższą amplitudę, a czas jego trwania odpowiadał czasowi napędzania pocisku na całej długości lufy (szyny), tj. początek i narastanie impulsu prądowego powinno następować w chwili wprowadzenia pocisku między szyny, natomiast w chwili opuszczania lufy przez pocisk wartość prądu powinna być bliska zeru.

W przypadku rozładowywania bardzo dużych energii pojawia się problem bezstratnego załączenia obwodu elektrycznego. Wynika to głównie z tego, że operacji załączania i rozłączania obwodu dużej mocy towarzyszą wyładowania elektryczne, obniżające sprawność układu, a ponadto dochodzi do niszczenia elementów konstrukcyjnych przełącznika prądowego. Jednym ze sposobów zamykania obwodu elektrycznych dużych mocy jest stosowanie wybuchowych przełączników prądowych, które zwiernają i rozłączają obwód roz-

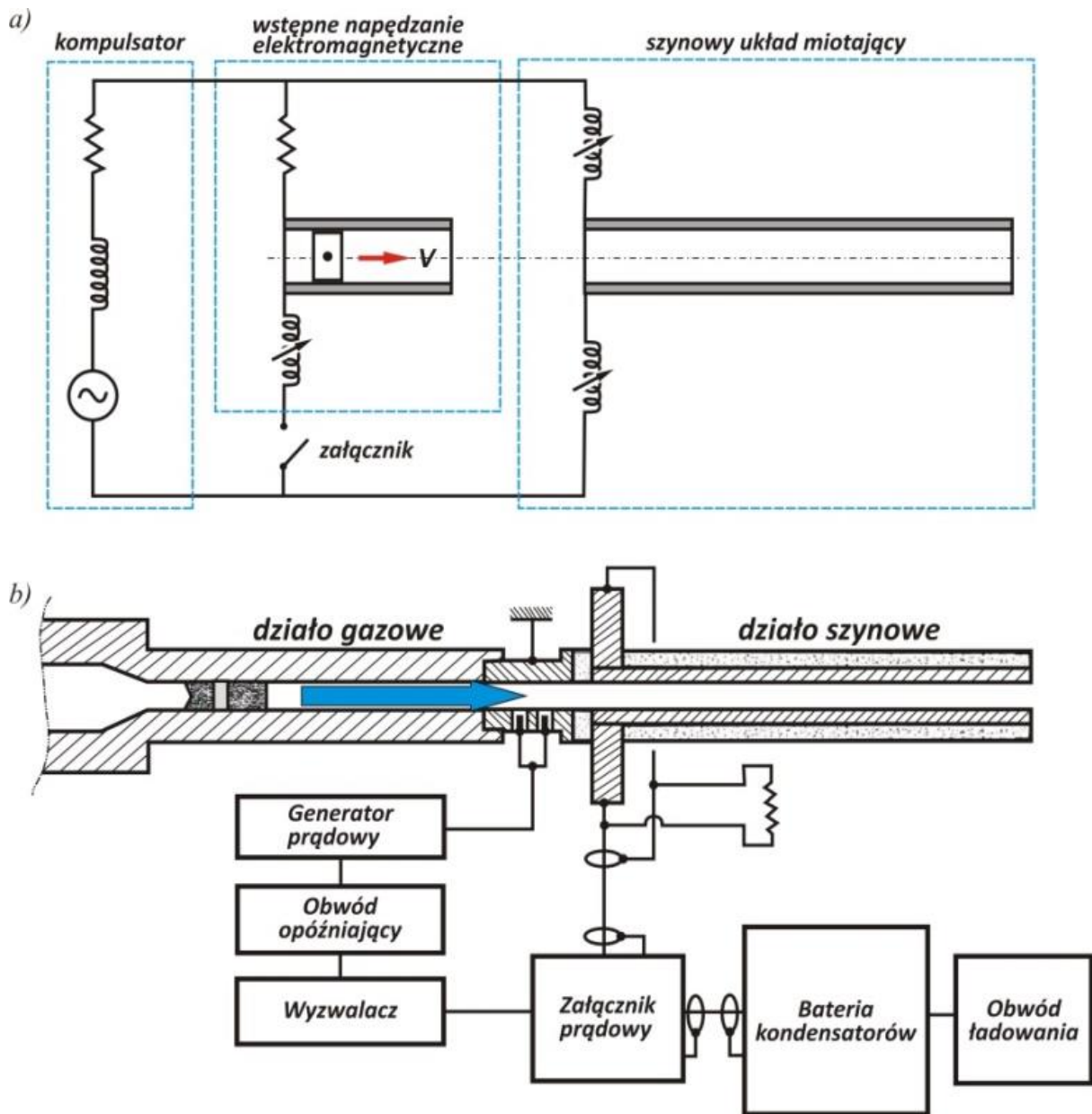
4.2. Pulse unloading circuit

The operation of DELM also depends on the process of discharging the accumulated energy. The electric characteristics of the rail gun circuit i.e. resistance, induction and capacity (components RLC) have to be matched in such a way that the current pulse has possibly the highest level and its time of duration corresponds to the propelling time of the projectile on the whole length of the barrel (rail) what means that the start and increase of the current pulse has take place in the moment of pushing the projectile between rails and in the moment when the projectile leaves the barrel the value of the current has to be close to nought.

In the case of unloading very high energies the problem of lossless switching on the electric circuit appears. It results mainly from the fact that at switching on and off the high power circuits the electric discharges usually occur what reduces the efficiency of the system and moreover the components of the current switch are damaged. One of the ways for short circuiting high power electric circuits is the use of explosive switches of current which close and open the discharg-

ładowania. Przykładem wybuchowego sposobu załączania jest stosowanie miniaturowych ładunków kumulacyjnych [39].

ing circuit. An example of using explosive way of switching is the use of miniaturised shaped charged [39].



Rys. 4. Schemat układu ze wstępną wyrzutnią elektromagnetyczną (a) [41] oraz układu działa szynowego z gazowym układem napędzającym (b) [42]

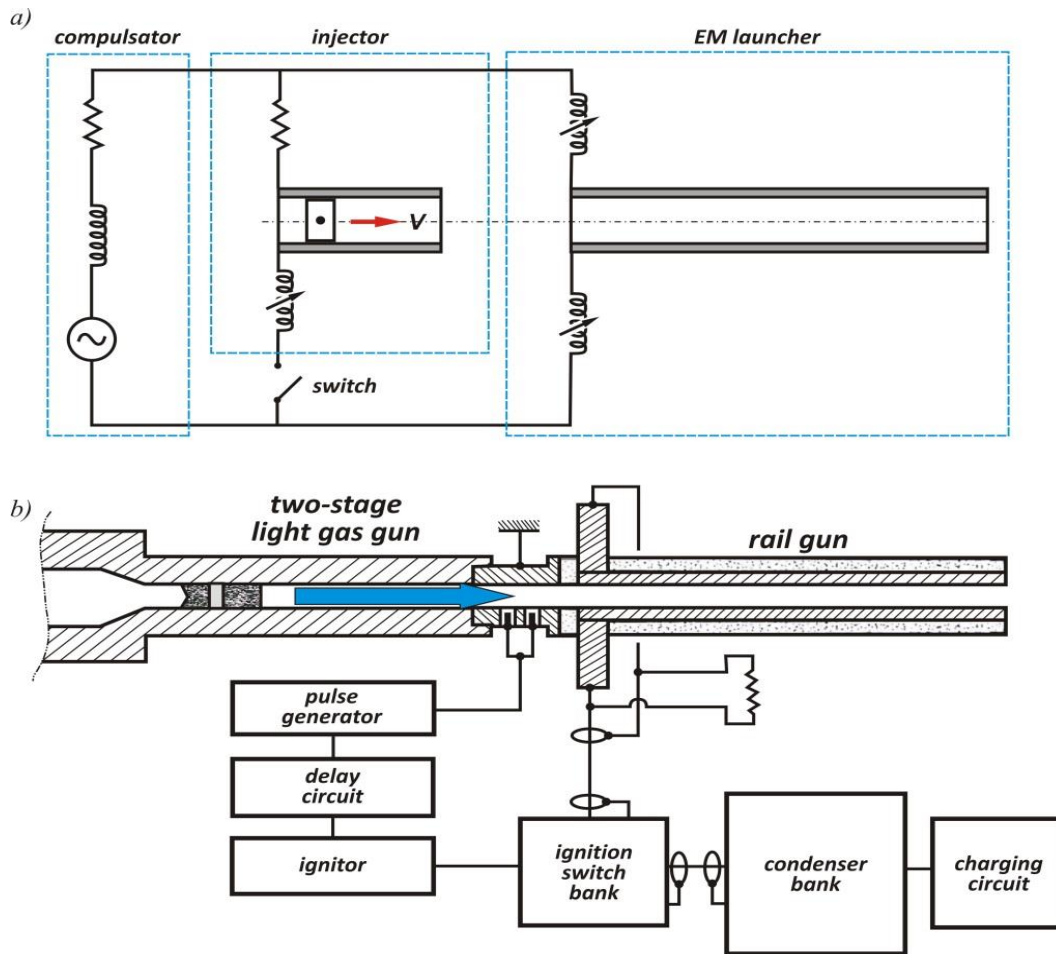


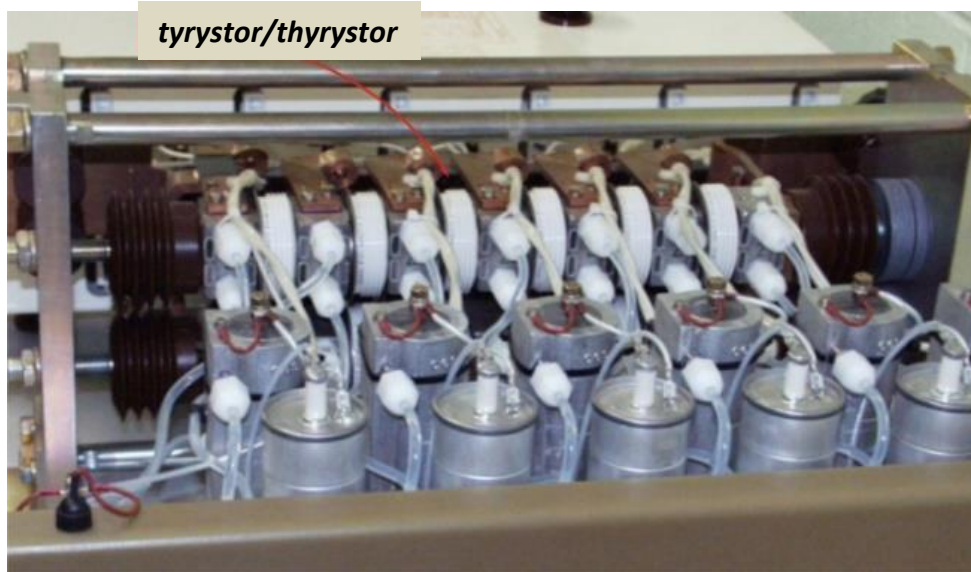
Figure 4. Scheme of the system with initial electromagnetic injector (a) [41] and the rail gun system with the gas propelling unit (b) [42]

Innym sposobem zamknięcia obwodu elektrycznego jest dynamiczne wprowadzenie pocisku ze zwornikiem w przestrzeń pomiędzy szyny. Jest to prosty sposób pozwalający jednocześnie zamknąć obwód elektryczny działa oraz uniknąć problemów związanych z początkową fazą napędzania. W przypadku, gdy zwornik pozostawałby w spoczynku w chwili podania impulsu prądowego na szyny, wtedy powierzchnie kontaktowe zwornika i szyn uległyby w początkowej fazie zgrzaniu zanim wystąpiłyby maksymalne siły napędzania, co w konsekwencji skutkowałoby obniżeniem sprawności napędzania. W celu uniknięcia tego zjawiska stosuje się różnego rodzaju wyrzutnie (elektromagnetyczne – rys. 4a, gazowe – rys. 4b, plazmowe lub pirotechniczne) umożliwiające nadanie wstępnej prędkości zespołowi zwornik-pocisk [41-42]. Wydaje się, że dobrym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest hybryda działa szynowego z cewkowym układem miotającym.

Another way of short circuiting is a dynamic putting the projectile with the armature in the space between the rails. It is a simple way enabling at the same time the closing of electric circuit and avoiding problems connected with the initial phase of driving. In the case when the armature remains in rest in the moment of applying the current pulse to the rails the contact surfaces of armature and rails are welded in the first phase before the maximal driving forces appears what reduces the efficiency of propelling system. In order to prevent this phenomenon different types of launchers (electromagnetic – figure 4a, gaseous – figure 4b, plasma or pyrotechnic) are used to provide the initial velocity to the unit armature-projectile [41-42]. It seems that there is a good solution in the form of a hybrid combination of the rail gun with the coil throwing system.

Najbardziej perspektywiczną metodą zamykania obwodu elektrycznego dużej mocy wydaje się zastosowanie półprzewodnikowych załączników przełączających. Przykładem mogą być wysokonapięciowe łączniki tyrystorowe (fot. 7), które są intensywnie rozwijane i obecnie mogą pracować w skrajnie trudnych warunkach obciążenia prądowego [43, 44]. Zbudowane są one z dwóch lub więcej gałęzi szeregowo połączonych tyrystorów i analogicznej gałęzi diodowej. Każdy tyrystor jest wyposażony we własny układ elektroniczny wytwarzający impuls bramkowy oraz kontrolujący stan tyrystora i parametry impulsu bramkowego. W przypadku wykrycia uszkodzenia tyrystora lub jego sterowania łącznik jest blokowany, co zabezpiecza go przed uszkodzeniem pozostałych tyrystorów. Ze względu na wysokie napięcia często stosuje się wymuszone chłodzenie tyrystorów i diod.

It seems that the most perspective method for electric high power short circuiting is the use of semiconductor switches. The systems of high voltage thyristor switches (photograph 7) is an example of solutions which have been intensively developed and now can work under extremely high loads of current [43, 44]. They are built from two or more lines of thyristors arranged in series and the similar line of diodes. Each thyristor has an electronic subunit generating a gate pulse and controlling the status of the thyristor and characteristics of the gate pulse. In the case of defects happening in a thyristor or its control unit the switch is blocked what prevents other thyristors against the damage. Because of the high voltage there is often used the enforced cooling of thyristors or diodes.



Fot. 7. Wysokoprądowy łącznik tyrystorowy [45]
Photograph 7. High voltage thyristor switch [45]

4.3. Trwałość układu miotającego

Rozładowanie zgromadzonej energii w obwodzie elektrycznym działa szynowego wywołuje przepływ prądu rzędu nawet kilku megaamperów. W przykładzie przywołanym wcześniej na podstawie pracy [31] oszacowano, że prąd w obwodzie rozładowania będzie osiągał wartość 3,95 MA. Temu przepływowi towarzyszy wiele różnych zjawisk fizycznych,

4.3. Durability of projecting system

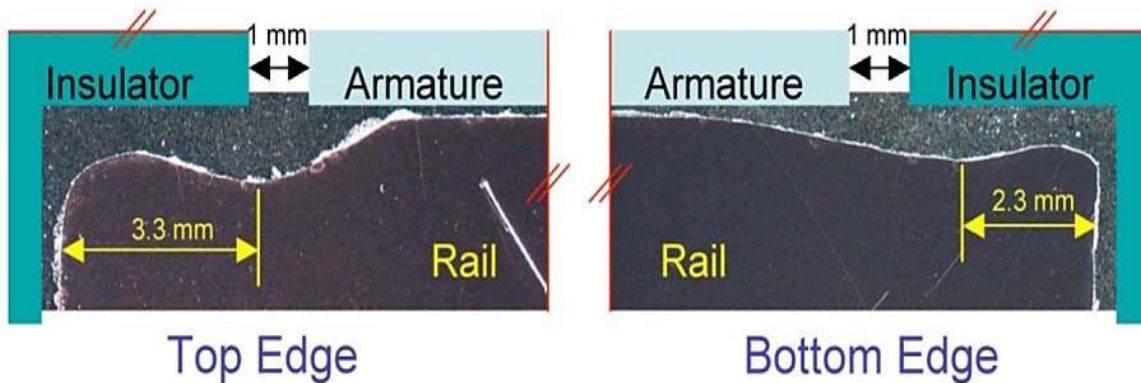
Discharging of accumulated energy through the electric circuit of the rail gun generates the flow of the current on levels of a few mega amperes. In the example presented earlier and referring to [31] it was estimated that the amperage in the discharging circuit will reach the value of 3.95 MA. This flow is accompanied by

które silnie obciążają i niszczą podzespoły wchodzące w skład dział szynowego. Po pierwsze, elementy składowe działu poddawane są obciążeniu mechanicznemu, wynikającemu z powstania dużych sił elektromagnetycznych, które indukują się podczas impulsowego przepływu prądu. Siły te oddziałują zarówno na elementy konstrukcyjne źródła energii (np. kondensatory), jak i na przewody doprowadzające i przełączniki załączające, ale przede wszystkim na szyny. Układ sił elektromagnetycznych, tak jak pokazano to na rys. 2, dąży do odsunięcia szyn od siebie, które ze względu na sprawność napędzania powinny pozostawać nieruchome. Aby szyny nie ulegały deformacji pod wpływem sił elektromagnetycznych powinny być wykonane z materiału o dobrych właściwościach mechanicznych, a jednocześnie izolowane materiałem, który także powinien wykazywać wysoką wytrzymałość. W wielu rozwiązaniach dział laboratoryjnych szyny są wykonane z miedzi i izolowane oraz utwierdzane kompozytami na bazie zbrojonych żywic epoksydowych (np. laminatu epoksydowo-szklanego G10). Można znaleźć również przykłady użycia szyn z brązu lub molibdenu, a także materiałów ceramicznych, jako izolatorów [46].

Drugą formą obciążenia układu miotającego działu szynowego jest oddziaływanie cieplne, wynikające z rezystancji zastosowanych materiałów oraz wyładowań elektrycznych pojawiających się na powierzchniach kontaktowych. Stąd materiał szyn powinien być dobrym przewodnikiem, a kontakt pomiędzy szynami a zwornikiem możliwie duży (co do powierzchni), i ścisły (co do wzajemnego przylegania). Spełnienie tych wymagań jest stosunkowo trudne zwłaszcza, że siły elektromagnetyczne dążą do pogorszenia przylegania powierzchni kontaktowych, a ekstremalnie intensywne efekty cieplne, erozyjne i ablacyjne, wynikające z powstawania plazmy w strefie kontaktu podczas ruchu zwornika, niszczą powierzchnię szyn. Aby zilustrować intensywność niszczenia szyn na fot. 8 przedstawiono powierzchnię szyn, których stan jest wynikiem przeprowadzenia 20 testów napędzania duraluminiowego zwornika (przy prądzie rozładowania 1,6 MA) do prędkości wylotowej 1500 m/s.

many physical phenomena which are a great burden or even can destroy the subunits of the rail gun. First of all the components of the gun are subjected to mechanical loads caused by great electromagnetic forces induced at the pulsed flow of the current. These forces act both against design components of the source of energy (e.g. capacitors) and the cabling system and switches and most of all on the rails. The arrangement of electromagnetic forces as it is presented in figure 2 tends to push the rails away whereas they have to remain in rest to provide the efficiency of the propelling. In order to prevent deformation of the rails under the electromagnetic forces they have to be made from material possessing good mechanical characteristics and isolated by the material that also has high strength. In many designs of laboratory guns the rails are made from the copper and isolated and fixed by composites from reinforced epoxy resins (e.g. epoxy-glass laminate G10). There are also examples of using the bronze or molybdenum rails and the ceramic isolators [46].

The second type of the load for the projecting system of the rail gun is a thermal interaction caused by the resistance of used material and electric discharges appearing on contacting surfaces. For this reason the material of the rail has to be a good conductor and the contact between the rails and short circuiter has to have possibly great area and sticking force. The meeting of these requirements is a relatively difficult question as the electromagnetic forces tend to worsen the sticking of contact surfaces and extremely intensive effects of thermal, erosive and ablating character caused by the generation of plasma in the area of the contact at the movement of the armature destroy the surface of rails. In order to illustrate the intensity of the rail destroying process the surface of the rails after 20 tests of projecting a duralumin armature (at discharging current 1.6 MA) to the muzzle velocity of 1500 m/s is presented in photograph 8.



Fot. 8. Przekrój poprzeczny szyny miedzianej z ubytkami na jej powierzchni po 20 testach z prędkościami zwornika około 1500 m/s, przy impulsie prądowym 1,6 MA [47]

Photograph 8. Cross section of the copper rail showing the losses of material after 20 tests at the velocities of armature ca. 1500 m/s and pulse amperage 1.6 MA [47]

Aby ograniczyć zużycie szyn stosuje się różne zabiegi. Pierwszy polega na zastosowaniu nowych materiałów na szyny, o właściwościach elektrycznych, mechanicznych oraz cieplnych znacznie przewyższających dotychczas stosowane. Ze szczerkowych informacji można wnioskować, że materiały te są prawdopodobnie wynikiem ostatnich osiągnięć z dziedziny nanotechnologii.

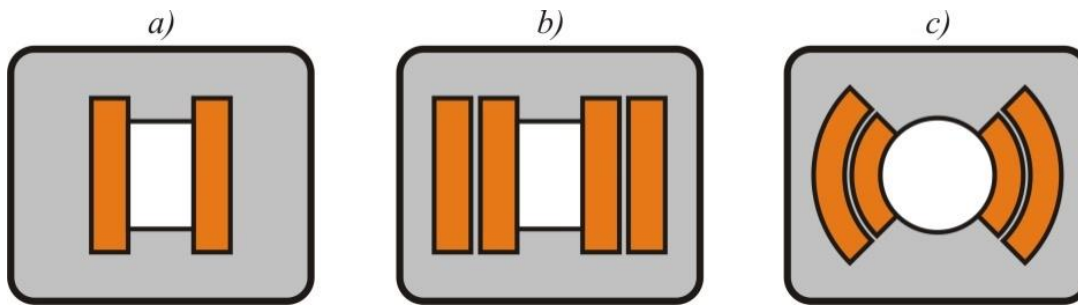
Zmniejszenie zużycia można osiągnąć również poprzez odpowiednie ukształtowanie szyn, co jest m.in. konsekwencją tego, że można ograniczyć prąd płynący w szynach, zachowując jednocześnie indukcję pola magnetycznego na tym samym poziomie. Można spotkać wiele różnych rozwiązań geometrii przekroju poprzecznego szyn, jak i płaszcza otaczającego szyny. Najprostszy w wykonaniu jest układ pojedynczych szyn o przekroju prostokątnym (rys. 5a). Znacznie wyższą indukcję pola uzyskuje się przy tym samym prądzie rozładowania, gdy zastosuje się układ szyn podwójnych (rys. 5b) [48], a jeszcze lepszy efekt, gdy zastosuje się podwójny układ szyn o kształcie przedstawionym na rys. 5c.

W literaturze można znaleźć informacje o możliwości wzmocnienia indukcji pola dzięki zastosowaniu magnesów stałych rozmieszczonych wzdłuż szyn [49].

Different precautions are taken to limit the wearing of rails. The first of them is to use new types of material for rails which essentially exceed electric, mechanical and thermal characteristics of those currently used. It may be judged from incomplete pieces of information that these types of material may be a result of developments in nanotechnology.

The wearing may be also reduced by a suitable shaping of the rails as a consequence of the fact that the amperage of the current may be decreased at the same time when the induction of the magnetic field is preserved on the same level. There are many different solutions of rail cross section geometries as well as the covering surrounding the rails. The simplest in performance is a system of singular rails with a rectangular cross section (figure 5a). There is essentially greater level of field induction at the same amperage of discharging current when a system of twin rails is used (figure 5b) [48] and even the better results may be achieved when a twin system of rails shaped like it is presented in figure 5c is used.

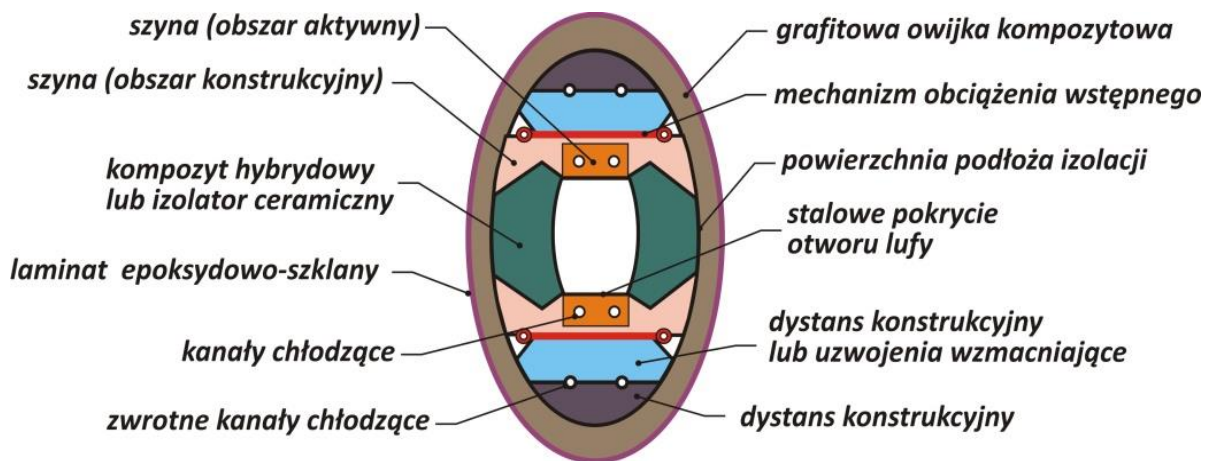
There are pieces of information in literature about possibilities for increasing the field induction by using permanent magnets placed along the rails [49].



Rys. 5. Układy i geometrie szyn prowadzących
 Figure 5. Systems and geometries of launching rails

Stąd lufa dział elektromagnetycznego może mieć bardzo złożoną konstrukcję zwłaszcza, gdy zastosuje się dodatkowe rozwiązania obniżające jej zużycie, np. poprzez chłodzenie układu (rys. 6) [50].

For this reason the barrels of electromagnetic guns may have very complicated designs especially when additional solutions reducing their wearing are applied like e.g. the cooling system (figure 6) [50].



Rys. 6. Przekrój lufy działu szynowego opracowanego na Uniwersytecie Texas [50]

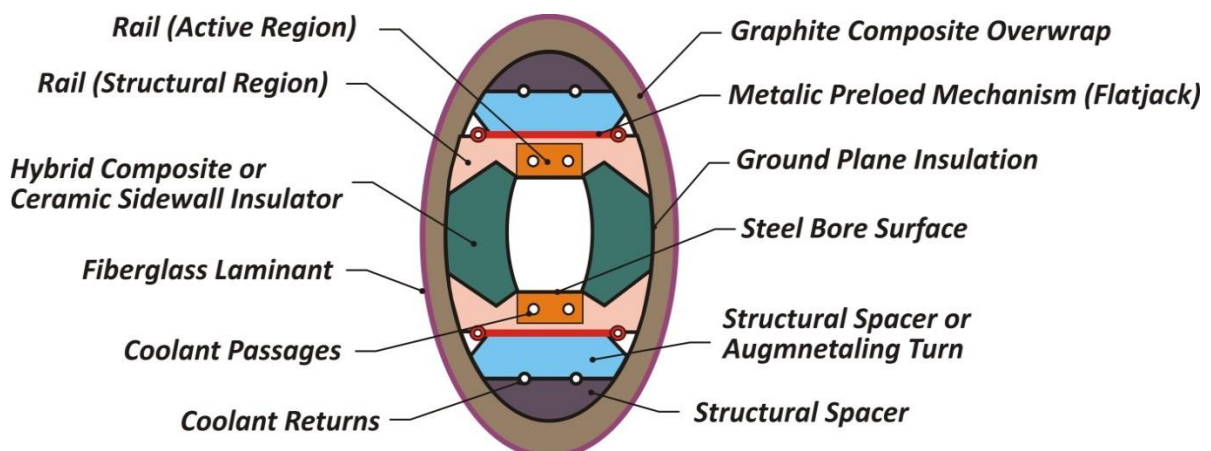


Figure 6. The cross section of the rail gun barrel developed in Texas University [50]

Innym sposobem na ograniczenie zużycia szyn jest odpowiednie rozwiązanie konstrukcyjne zwornika, gwarantujące bezstratny kontakt elektryczny z szynami przewodzącymi. Dominują dwa rozwiązania, tj. tzw. zworniki stałe (*ang. solid armature*) w kształcie litery U (fot. 9a) oraz zworniki szczotkowe (fot. 9b). Ponadto wyróżnia się jeszcze zworniki: plazmowe, cieczowe i hybrydowe [51].

Interesującą koncepcją zwornika, gwarantującego minimalizację efektów tarciovych i ablacyjnych, jest zwornik cieczowy. Przed strzałem materiał zwornika jest nagrzewany do temperatury topnienia, aby doprowadzić go do stanu ciekłego. Następnie do działa ładuje się pocisk zabezpieczony materiałem izolacyjnym i załącza się zasilanie. Zamknięcie obwodu elektrycznego następuje z chwilą, gdy ciekły metal zwornika zostanie wtrysnięty we wnęki znajdujące się w dolnej części pocisku i wypełni on przestrzeń łączące elektrycznie obydwie szyny. W pracy [51] przypuszcza się, że zworniki cieczowe (w porównaniu do stałych) zapewnią przede wszystkim dobry kontakt elektryczny oraz znacząco zredukują tarcie, co w konsekwencji ogranicza zużycie szyn i podwyższa sprawność napędzania elektromagnetycznego.

5. Koncepcja realizacji projektu, dotyczącego opracowania w Polsce działa elektromagnetycznego

Pomysł zbudowania w Polsce działa elektromagnetycznego nie jest nowy, bowiem na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat niektóre ośrodki akademickie i naukowo-badawcze podejmowały mniej lub bardziej obszerne prace w tej dziedzinie. Pozwoliły one zdobyć wiedzę i rozwiązać wiele ważkich problemów, jednak nie zakończyły się opracowaniem broni, która znalazłoby zastosowanie praktyczne.

Do idei zbudowania polskiego działa elektromagnetycznego powrócił w 2014 r. Zespół Inicjatywny, złożony z pracowników: Akademii Górniczo-Hutniczej, MAGNETO Sp. z o.o., Politechniki Wrocławskiej, Uniwersytetu Jagiellońskiego, Wojskowej Akademii

Another way to limit the wearing of rails is a proper design of the short circuiter (armature) that warrants the lossless electric contact with launching rails. There are two general solutions i.e. a solid armature having the shape of letter U (photograph 9a) and the brush armature (photograph 9b). Moreover the examples of plasma, liquid and hybrid short circuiters may be found [51].

An interesting concept of the armature that warrants the minimum of friction and ablation effects is the liquid short circuiter. Before the shot the material of the armature is heated to the melting temperature transforming it into the liquid stage. Next the projectile protected by insulating material is loaded to the gun and the power is connected. The electric circuit is switched on in the moment when the liquid metal is injected into the caves placed at the base part of the projectile filling the space and providing the electric connection between two rails. There is an assumption in [51] that the liquid short circuiters (in opposite to solid ones) could provide most of all good electric contact and reduce the friction essentially to limit the wearing of the rails and increase the efficiency of electromagnetic propelling system.

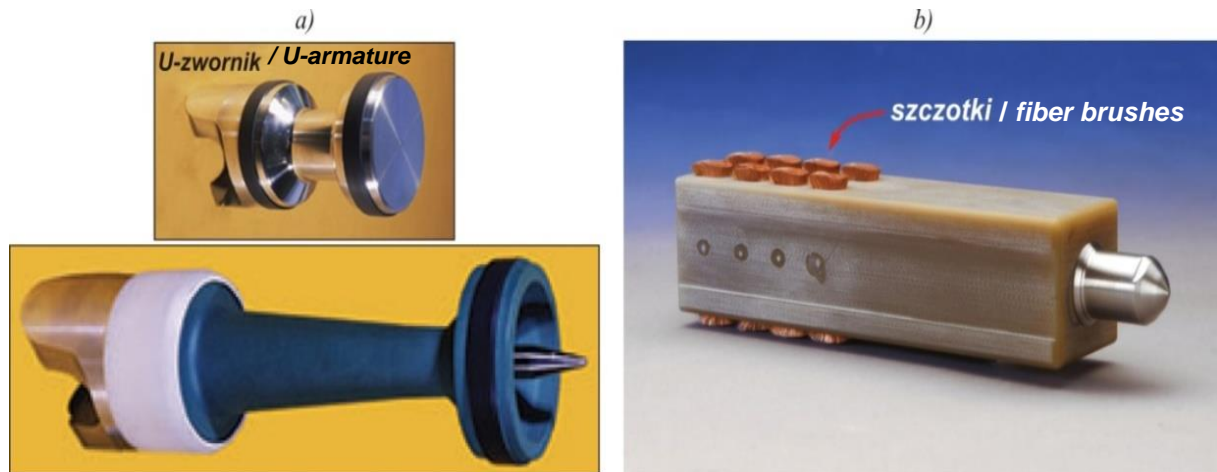
5. A concept of project on developing an electromagnetic gun in Poland

The idea of building an electromagnetic gun in Poland is not new as some university and research-development centres have been undertaking more or less successful efforts on this domain for recent decades. These trials allowed the accumulation of knowledge and solution of many important problems but were not completed in any development of a weapon that could find practical implementation.

The Initiating Team consisted of workers of the Mining & Metallurgy College, MAGNETO Sp. z o.o., Wrocław University of Technology, Jagielloński University, Military University of Technology

Technicznej i Zakładów Mechanicznych TARNÓW S.A., który zaproponował uruchomienie w kraju narodowego projektu naukowo-badawczego pt. „Systemy magazynowania i przetwarzania wysokich energii pod kątem praktycznego wykorzystania w gospodarce narodowej oraz obszarze obronności i bezpieczeństwa państwa – DELM”.

and Mechanical Plant TARNÓW S.A. returned to this idea in 2014 and proposed to launch in Poland the national research & development project titled „Systems of storing and transforming high energies for practical implementation in national industry and defence and security sector – DELM”.



Fot. 9. Przykłady zworników stałych: a) w kształcie litery U; b) szczotkowe [24, 50]
Photograph 9. Examples of solid short circuiters: a) in shape of U; b) brush ones [24, 50]

Celem głównym projektu będzie prototyp urządzenia elektro-energetycznego miotającego obiekty z wysokimi prędkościami i energiami.

Aby zrealizować cel główny projektu, należy osiągnąć cele cząstkowe o uniwersalnym wykorzystaniu (które zostaną zdefiniowane w etapowych projektach tematycznych), które będą dotyczyły m.in.:

- modelowania matematycznego, symulacji komputerowych, analiz systemowych zjawisk i procesów związanych z magazynowaniem i przetwarzaniem energii oraz ruchem obiektów w przestrzeni,
- opracowania konstrukcji torów i obiektów latających,
- opracowania wysokosprawnych systemów przetwarzania i magazynowania energii o wysokim poziomie bezpieczeństwa użytkowania,
- integracji złożonych systemów i podzespołów,
- testów systemów w skali półtechnicznej,
- opracowania materiałów elektrodowych oraz technologii ich wytwarzania.

The main aim of the project is a prototype of an electro-energetic system for projecting objects with high velocities and energies.

In order to fulfil the main goal of the project the partial aims of universal applications (which will be defined in objective stage projects) have to be achieved like:

- Mathematical modelling, computer simulation, system analyses on phenomena and processes linked with the storing and processing the energy and the movement of objects in the space
- Development of designs of rails and flying objects
- Development of highly efficient systems for processing and storing the energy at high level of safe use
- Integration of complicated systems and subunits
- Testing systems in quasi-technical scale
- Development of electrode material

Przewiduje się m.in. następujące, możliwe obszary „podwójnego” zastosowania wyników projektu:

- energetyka – przetwornice oraz systemy magazynowania energii w układach rozproszonych, w tym uzyskiwanej ze źródeł odnawialnych oraz inteligentnych sieci typu „smart grids”,
- transport – źródła zasilania w samochodach elektrycznych oraz układy napędowe do pociągów wysokich prędkości,
- sport – technologie poprawiające dynamikę ruchu obiektów na torach,
- obronność – miotanie pocisków z wysokimi prędkościami oraz zasilanie systemów elektroniki przenośnej, pokładowej i obiektowej o dużym znaczeniu dla bezpieczeństwa kraju,
- bezpieczeństwo, w tym kosmiczne - ochrona przed obiektami poruszającymi się z wysokimi energiami.

W wyniku zrealizowanego projektu mogą zostać opracowane nowoczesne (przełomowe) technologie, w tym m.in.:

- wdrożenie do produkcji warstwy dylatacyjnej „DiLaTech” – ochronnej dla rdzeni magnetycznych,
- wdrożenie do produkcji nanokrystalicznych rdzeni pakietowanych,
- wdrożenie do produkcji nanokrystalicznych rdzeni blokowych,
- wdrożenie do produkcji nanokrystalicznych rdzeni zwijanych do przekładników prądowych,
- wdrożenie do produkcji przewodzących warstw węglowych na nośnikach proszkowych,
- wdrożenie do produkcji nanometrycznego materiału LiFePO_4 o kontrolowanej morfologii ziaren i właściwościach elektrochemicznych,
- magnetyczne koncentratory pola.

6. Podsumowanie

- 1) Obecnie przyszłościowa broń miotająca wykorzystująca energię pola elektromagnetycznego jest rozwijana w wielu kra-

and technology of its manufacture.

There are following possible areas of “double” application of project results:

- Energetic – converters and energy storing systems in scattered subsystems including energy obtained from recoverable sources and smart grids
- Transport – power supply sources in electric cars and driving systems for high speed trains
- Sport – technologies improving the dynamics of movement of objects on the rails
- Defence – projection of shells with high velocities and powering the systems of portable electronics, onboard and object electronics significant for the national defence
- Security including the space – protection against objects moving with high energies.

In the result of performed project some new (breaking) technologies may be developed, including:

- Implementation into the manufacture a dilatation layer „DiLaTech” – protecting the magnetic cores
- Implementation into the manufacture nano-crystal cassette cores
- Implementation into the manufacture nano-crystal block cores
- Implementation into the manufacture nano-crystal reeled cores to current converters
- Implementation into the manufacture conducting carbon layers on powder carrier
- Implementation into the manufacture the nano-metric material LiFePO_4 with controlled morphology of grains and electrochemical characteristics
- Magnetic field suppressors.

6. Conclusions

- 1) The perspective projecting weapons have been developed recently in many countries. The greatest progress has

jach. Największy postęp w tej dziedzinie osiągnęły Stany Zjednoczone, które w ramach projektu finansowanego przez amerykańską marynarkę wojenną zbudowały pierwszy prototyp szynowego działka elektromagnetycznego (wystrzelującego pociski o masie 1,5 kg z prędkością wylotową około 2 500 m/s) przeznaczonego do instalacji na okręcie typu niszczyciel. Według zapowiedzi przedstawicieli USU w latach 2020-2025 zostanie wprowadzony do wojsk tego typu system miotający umożliwiający niszczenie celów odległych nawet o 450 km. Również w Europie trwają intensywne prace nad działkami elektromagnetycznymi. W ramach programu badawczego realizowanego przez instytut francusko-niemiecki zbudowano układ badawczy o nazwie PEGASUS, który umożliwia napędzanie pocisków o masie 300 g do prędkości powyżej 2500 m/s.

- 2) Światowe osiągnięcia w dziedzinie broni elektromagnetycznej sprawiły, że również w Polsce pojawiły się przedmiotowe opracowania (np. [5, 52]) oraz dostrzeżono potrzebę prowadzenia prac w tym obszarze, co zostało zasygnalizowane w [53]. Nic w tym dziwnego, gdyż z zastosowania elektromagnetycznego napędu pocisków przewiduje się m.in. następujące korzyści: wzrost parametrów balistycznych broni, zwłaszcza prędkości początkowej pocisku i donośności, umożliwiających zwalczanie celów szybko poruszających się z większym niż dotychczas prawdopodobieństwem i skutecznością; możliwość płynnej regulacji donośności pocisków; zmniejszenie masy naboju poprzez wyeliminowanie łusek i ładunku miotającego; zwiększenie szybkostrzelności dział; obniżenie kosztów wytwarzania amunicji, głównie dzięki zastąpieniu prochowych ładunków miotających łatwo dostępnymi paliwami do generatora prądu; zmniejszenie efektów powylotowych, a zwłaszcza błysku i huku wystrzału oraz wyeliminowanie odrzutu broni.
- 3) Nowa koncepcja zbudowania polskiego działka elektromagnetycznego zaproponowana przez Zespół Inicjatywny, złożony z pracowników: Akademii Górniczo-Hut-

been achieved in the US where in the frame of a project financed by the Navy a prototype of the first electromagnetic rail gun (firing the projectiles of 1.5 kg weight at muzzle velocity ca. 2 500 m/s) was built with the designation to be integrated on the destroyer class ship. According to information of the US representatives the projecting system of this type will be fielded in years 2020-2025 with capacities of engaging targets at ranges of 450 km. There are also intensive works in Europe carried out on electromagnetic guns. In the frame of R&D program conducted by French-German institute the experimental system PEGASUS was built to propel the projectiles of 300 g weight to the velocities above 2 500 m/s.

- 2) The world wide achievements on electromagnetic weapon have caused that also in Poland some works on the subject were carried out (e.g. [5, 52]) and the need for such work was noticed what was signalled in [53]. There is nothing strange in it as the application of electromagnetic propelling systems for projectiles can provide following advantages: increase of ballistic capacities of weapons especially the muzzle velocity and the range of the projectile what can enable the engagement of high speed targets with greater probability and efficiency; possibility for controlling the range of projectiles; decreasing the weight of ammunition by elimination of cases and propelling charge; increasing the rate of fire for guns; reducing the costs of manufacture for ammunition mainly through replacing powder propelling charges by easy accessible fuels for current generators; reducing the muzzle effects and especially the flash and report and also the elimination of the weapon recoil.
- 3) A new concept of building the Polish electromagnetic gun proposed by the Initiating Team of workers of the Mining & Metallurgy College,

niczej, MAGNETO Sp. z o.o., Politechniki Wrocławskiej, Uniwersytetu Jagiellońskiego, Wojskowej Akademii Technicznej i Zakładów Mechanicznych TARNÓW S.A., wydaje się być bardzo ciekawa, gdyż przewiduje obszary „podwójnego” zastosowania wyników projektu.

MAGNETO Sp. z o.o., Wrocław University of Technology, Jagielloński University, Military University of Technology and Mechanical Plant TARNÓW S.A. seems to be very interesting as it foresees some areas of “double” application of project results.

Literatura / Literature

- [1] B. Janzon, J. Backofen, Jr., R.E. Brown, R. Cayzac, A. Diederer, M. Giraud, M. Held, A.W. Horst, K. Thoma, *The Future of Warheads, Armour and Ballistics*, 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain 16-20 April 2007.
- [2] D.M. Badgular, M.B. Talawar, S.N. Asthana, P.P. Mahulikar, *Advances in science and technology of modern energetic materials: An overview*, Journal of Hazardous Materials, 2008, 151, 289-305.
- [3] Z.K. Leciejewski, S. Cudziło, *Kierunki rozwojowe miotających materiałów wybuchowych w aspekcie wymagań przyszłościowej broni palnej*, Materiały Wysokoenergetyczne, 2011, T.3, 64-71.
- [4] A.M. Diederer, *Munitions Effects: A Schematic Overview of Munitions and Warheads, Trends for the Future*, 24th International Symposium on Ballistics, 2008.
- [5] Z. Mierczyk, J. Wojtanowski, *Nowoczesne technologie systemów uzbrojenia. Broń laserowa*, Wydawnictwo WAT, Warszawa, 2008, str. 446-460
- [6] J. A. Zukas, *High velocity impact dynamics*, Wiley, New York, 1990.
- [7] W.P. Walters, J.A. Zukas, *Fundamentals of shaped charges*, John Wiley and Sons, New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore 1989.
- [8] J. Mandzy, *Weapon System Implications or RLPG Technology*, Army Research Laboratory Raport, 2000.
- [9] R. Woźniak, K. Fedyna, *Badania balistyczne układu miotającego na paliwo ciekłe*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 1995.
- [10] A. Ciepliński, S. Torecki, R. Woźniak, *Przyszłość broni miotającej*, Przegląd Techniczny, nr 32-33, 1993.
- [11] M.A. Mayer; *Dynamic Behavior of materials*, John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [12] A.P. Bruckner, *The Ram Accelerators: Overview and state of the art*, Proceedings of Third International Workshop on Ram Accelerators, Sendai, Japan, 1997.
- [13] H.A. Sharoni, L.D. Bacon, *The Future Combat System (FCS): Technology Evolution and Feasibility Assessment*, Armor, September-October 1997, str. 29-34.
- [14] I. Dobiech, R. Woźniak, *Armaty na prąd*, Żołnierz Polski, nr 32-33, 1993.
- [15] Su-Jeong Lee, Ji-Hun Kim, Bong Sob Song, and Jin Ho Kim, *Coil Gun Electromagnetic Launcher (EML) System with Multi-stage Electromagnetic Coils*, Journal of Magnetism 18(4), 2013, 481-486.
- [16] J.M. Schroeder, J.H. Gully, M.D. Driga, *Electromagnetic Launchers for Space Applications*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 25, no. 1, January 1989, 504-507.
- [17] I.R. McNab, *Launch to Space with an Electromagnetic Railgun*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 1, January 2003.
- [18] <http://www.nasa.gov/topics/technology/features/horizontallaunch.html>, marzec 2015.
- [19] B.R. Zahn, *The Future Combat System: Minimizing Risk While Maximizing Capability*, 2000 http://web.mit.edu/ssp/publications/working_papers/wp-00-2.pdf , marzec 2015.

- [20] M. Adams E.J. Barth, *Dynamic Modelling and Design of a Bulk-Loaded Liquid Mono-propellant Powered Rifle*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 130, November 2008.
- [21] G. Bellamy, M. Thomson, *EMKIT – Commissioning and performance testing of a technical demonstrator for the electromagnetic catapult launch of UAV's*, IMarEST Engine as a Weapon, London, Dec. 2006.
- [22] <http://www.ga.com/emals>, marzec 2015.
- [23] M. Ziv, J.M. Jahns, *Electromagnetic Rail Gun: Providing Greater Flexibility for the 21st Century*, www.navalengineers.org, marzec 2015.
- [24] P. Lehmann, H. Peter, J. Wey, *First experimental results with the ISL 10 MJ DES rail-gun PEGASUS*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.37, No.1, Jan. 2001.
- [25] S. Hundertmark, M. Schneider, D. Simicic, G. Vincent, *Experiments to increase the used Energy with the PEGASUS Railgun*, IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference, 2013.
- [26] Li Xiaopeng, Meng Tao, Zhao Chun, Li Liyi, *Multiprojectile Active Electromagnetic Armor*, IEEE Transactions on Magnetics vol. 43, No. 1, January 2007.
- [27] B.N. Turman, R.J. Kaye, M. Crawford, P. Magnotti, D. Nguyen, E. van Reuth, S.A. Johnson, R. Poppe, *EM Mortar Technology Development for Indirect Fire*, Sandia National Laboratories: Albuquerque, NM, USA, 2008. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA481646>, marzec 2015.
- [28] S. Hundertmark, D. Lancelle, *A Scenario for a Future European Shipboard Railgun*, 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology (EML), 2014.
- [29] <http://www.baesystems.com>, marzec 2015.
- [30] IEEE Spectrum, *For Love of a Gun*, <http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/gadgets/for-love-of-a-gun/time>, marzec 2015.
- [31] T. Rapp, *Experimente mit Electric Guns: Geschichte, Grundlagen und Selbstbau elektrischer Kanonen*, Franzis Verlag 2006.
- [32] A. Egeland, *Birkeland's Electromagnetic Gun: A Historical Review*, IEEE Transactions of Plasma Science, vol. 17, No. 2, April 1989.
- [33] *Electromagnetic Propulsion*, <http://what-when-how.com/space-science-and-technology/electro-magnetic-propulsion>, marzec 2015.
- [34] B.R. Zahn, *The Future Combat System: Minimizing Risk While Maximizing Capability*, http://web.mit.edu/ssp/publications/working_papers/wp-00-2.pdf, marzec 2015.
- [35] M.L. Spann, S.B. Pratap, M.D. Werst, A.W. Walls, W.G. Fulcher, *Compulsator Research at The University of Texas at Austin - An Overview*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 25, No. 1, January 1989.
- [36] M.L. Spann, S.B. Pratap, W. Brinkman, D.E. Perkins, R.F. Thelen, *A Rapid Fire, Compulsator-Driven Railgun System*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-22, No. 6, pp 1753-1756, November 1986.
- [37] F.C. Beach I.R. McNab, *Present and Future Naval Applications for Pulsed Power*, IEEE Pulsed Power Conference, 2005.
- [38] M.D. Werst, C.E. Penney, T.J. Hotz, J.R. Kitzmiller, *Continued Testing of Cannon Caliber Electromagnetic Gun System*, IEEE Transactions On Magnetics, vol 35, No 1, January 1999.

