

Zbigniew RACZYŃSKI

## MODEL WYRZUTNI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono zasadę działania wyrzutni cewkowej i szynowej. Przedstawiono wyniki badań modelu wyrzutni cewkowo-szynowej, zasilanej z baterii kondensatorów, z wstępnym rozpędzaniem pocisku za pomocą cewki indukcyjnej.

### 1. WPROWADZENIE

Z fizyki wiadomo, że oddziaływanie pola elektromagnetycznego może wywołać siłę, zdolną rozpędzić ciało do znacznej prędkości.

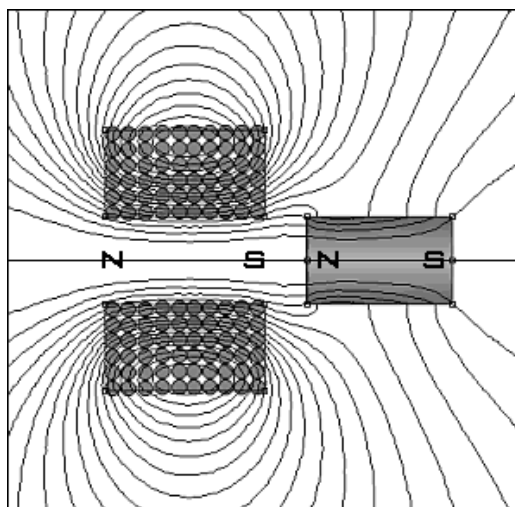
Istnieją dwa sposoby wykorzystania pola elektromagnetycznego do wytworzenia tej siły:

- jeżeli cewkę z rdzeniem ferromagnetycznym umieszczonym na jej obrzeżu zasilimy prądem stałym, to na rdzeń będzie oddziaływać siła. W wyniku jej działania, rdzeń dąży do znalezienia się w środku cewki, a gdy w tym momencie przerwiemy dopływ prądu do cewki, uzyskana przez rdzeń energia kinetyczna wyrzuci go na zewnątrz;
- jeśli przewodnik z prądem umieścimy w polu magnetycznym, wówczas działa na niego siła, powodująca jego ruch. Wartość tej siły można określić według prawa Biote'a-Savarta.

#### 1.1. Cewkowa wyrzutnia pocisków [1]

Wyrzutnia składa się z dwóch oddziałujących na siebie części: cewka i rdzeń magnetyczny (pocisk).

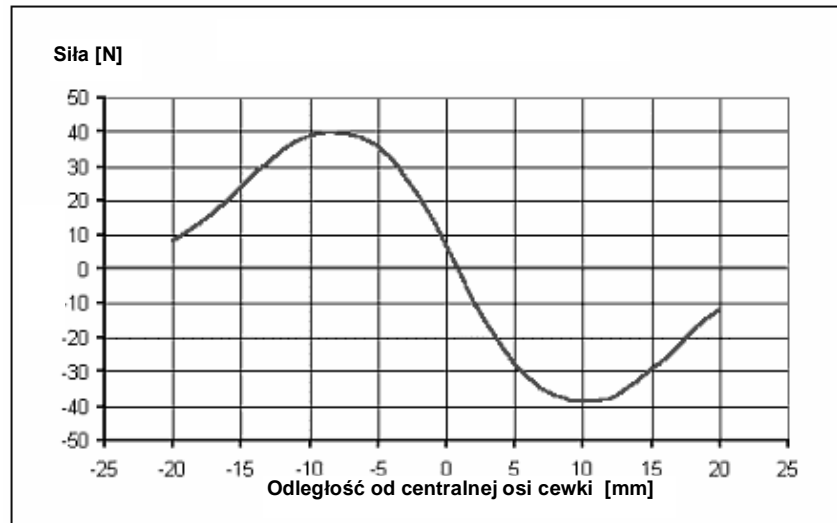
Założmy, że pocisk jest stalowym krótkim prętem znajdującym się w pobliżu cewki z prądem. Linie sił pola magnetycznego wytworzone przez cewkę, obejmując stalowy pocisk załamują się. W konsekwencji pocisk staje się magnesem o biegunowości jak na rys. 1.



Rys. 1. Linie sił pola magnetycznego cewki z rdzeniem magnetycznym

Współdziałanie pola magnetycznego cewki z wyidukowanym polem magnetycznym pocisku powoduje przyciąganie pocisku do wewnątrz cewki. Ze względu na niejednorodność pola magnetycznego wokół pocisku, obliczenie siły działającej na pocisk jest złożone i możliwe jest uzyskanie rozwiązania jedynie metodami numerycznymi.

Przykładowy rozkład siły działającej na pocisk o wymiarach  $\phi 10\text{mm} \times 20\text{mm}$  w zależności od odległości od centralnej osi cewki przedstawiony jest na rys. 2 [4].



**Rys. 2. Zależność siły działającej na pocisk w odległości od centralnej osi cewki**

Na rys. 2 widać, że siła działająca na pocisk jest funkcją odległości od osi symetrii cewki. Zwrot wektora siły działającej jest zawsze do środka cewki, niezależnie od kierunku płynącego przez nią prądu. Aby taka cewka mogła nadać pociskowi określoną prędkość, prąd może płynąć przez nią jedynie w ściśle określonym czasie, do momentu osiągnięcia przez pocisk środka cewki.

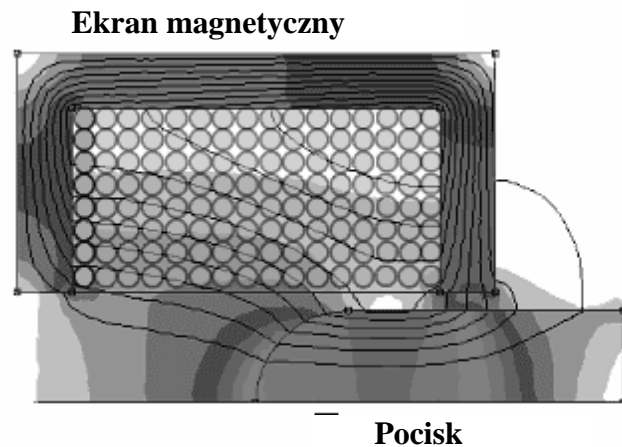
*Należy przy tym podkreślić, że asymetria siły działającej na pocisk w funkcji odległości od osi symetrii cewki wynika z faktu, że do symulacji przyjęto pocisk z zaokrągloną główką.*

Zakładając, że cewka jest solenoidem, siłę działającą na pocisk można obliczyć z następującego wzoru:

$$F = \frac{z \cdot I}{2} \cdot \frac{d\phi}{dx}, \quad (1)$$

gdzie:  $z$  – liczba zwojów cewki,  
 $I$  – natężenie prądu płynącego przez cewkę,  
 $d\phi/dx$  – pochodna zmiany strumienia magnetycznego sprzężonego z pociskiem.

W praktyce obliczenie siły działającej na pocisk w ruchu jest trudne, ponieważ sprzężenie strumienia magnetycznego z pociskiem zależy od wielu czynników. Jak wynika z zależności (1), siła działająca na pocisk jest wprost proporcjonalna do natężenia prądu  $I$  oraz do pochodnej  $d\phi/dx$ . Jednym ze sposobów zwiększenia sprzężenia magnetycznego cewki z pociskiem jest zastosowanie ekranu magnetycznego obejmującego cewkę (rys. 3).

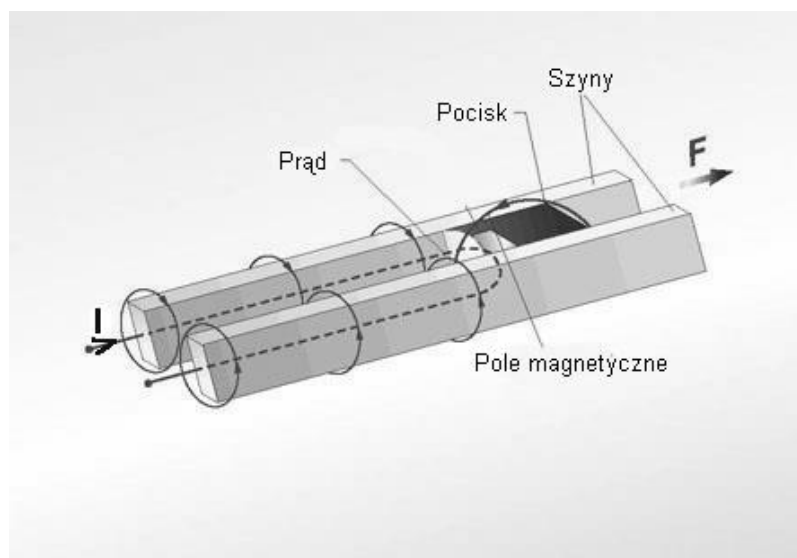


**Rys. 3. Ilustracja przebiegu sił pola magnetycznego cewki z ekranem magnetycznym**

Jednakże trzeba się wtedy liczyć ze wzrostem indukcyjności cewki, a więc i stałej czasowej obwodu elektrycznego cewki.

## 1.2. Szynowa wyrzutnia pocisków [2]

Klasyczna elektromagnetyczna wyrzutnia szynowa (rys. 4), jest najprostszym rozwiązaniem, służącym do przyspieszania ruchu pocisków [3]. Składa się z dwóch równoległych szyn, umieszczonych w odległości  $D$  i podłączonych do źródła napięcia stałego. Przewodzący pocisk zwiiera obwód elektryczny pomiędzy szynami, zamykając go dla przepływu prądu o natężeniu  $I$ .



**Rys. 4. Model wyrzutni szynowej**

Wokół szyn przewodzących prąd  $I$  powstaje pole magnetyczne o kierunku określonym regułą prawej dłoni, którego wartość w dowolnym miejscu możemy obliczyć, korzystając z prawa Biote'a-Savarta.

Jeśli przez przewodnik (pocisk), przepływa prąd o natężeniu  $I$  w obecności pola magnetycznego o średniej wartości indukcji  $B$ , działa na niego siła Lorentza  $F$  o wartości:

$$F = I \cdot D \cdot B, \quad (2)$$

gdzie:  $D$  - odległość między szynami [m].

Zwrot działającej siły zależy od kierunku prądu płynącego przez pocisk oraz pola magnetycznego i można go wyznaczyć znaną z fizyki regułą prawej dłoni.

Rozważając układ wyrzutni, składający się z dwóch cienkich i długich szyn oraz pocisku umieszczonego między nimi (rys. 5), można napisać:

$$\phi_{poc} = 2 \cdot \int_s^{s+d} B_{poc} \cdot dS = 2 \cdot \int_s^{s+d} \frac{\mu_0 \cdot I \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot x} dx \quad (3)$$

gdzie:

$\phi_{poc}$  - strumień indukcji przenikający pocisk, powstający w wyniku oddziaływania prądu  $I$  płynącego przez szyny w obwodzie zamkniętym pociskiem,

$B_{poc}$  - indukcja magnetyczna obejmująca pocisk,

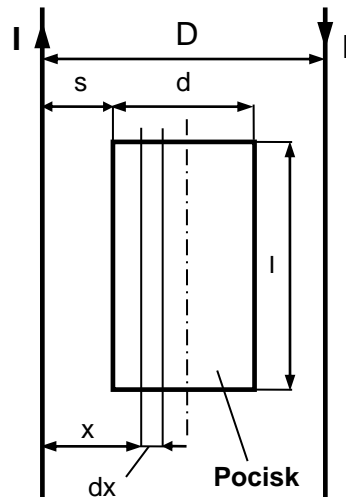
$l$  - długość pocisku,

$s$  - odległość pomiędzy środkiem szyny a krawędzią pocisku,

$d$  - szerokość pocisku.

Po rozwiązaniu i po przekształceniach równania (2) otrzymamy:

$$B_{poc} = \frac{\mu_0 \cdot I}{\pi \cdot d} \cdot \ln\left(\frac{s+d}{s}\right) \quad (4)$$



**Rys. 5. Rysunek poglądowy wyrzutni szynowej**

Zgodnie z II prawem dynamiki Newtona, pod wpływem działania siły  $F_{poc}$ , przyspieszenie pocisku wynosi:

$$a = \frac{F_{poc}}{m}, \quad (5)$$

gdzie:  $m$  - masa pocisku.

Zakładając, że w czasie trwania impulsu prądu o czasie  $t_r$  (o kształcie zbliżonym do połówki sinusoidy):

$$i(t) = I_m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_r}\right) \cdot t, \quad (6)$$

na pocisk oddziałuje siła, korzystając ze wzoru (2) i (5) można napisać:

$$v_{poc} = \int_0^{t_r} a \cdot dt = \frac{\mu_0 \cdot D \cdot I_m^2 \cdot \ln \frac{s+d}{s}}{\pi \cdot m \cdot d} \int_0^{t_r} \sin^2\left(\frac{\pi}{t_r} \cdot t\right) \cdot dt, \quad (7)$$

gdzie:  $v_{poc}$  - prędkość wylotowa pocisku,  
 $I_m$  - wartość szczytowa prądu.

Rozwiązaniem równania całkowego (7) jest wyrażenie:

$$v_{poc} = \frac{\mu_0 \cdot D \cdot I_m^2 \cdot \ln \frac{s+d}{s}}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot d} \cdot t_r, \quad (8)$$

Przedstawiona zależność (8) nie uwzględnia tarcia, oporu powietrza, strat energii w obwodzie zasilania szyn i pocisku, zmiany wartości prądu i indukcji magnetycznej w czasie oraz zjawisk elektrycznych występujących podczas przepływu bardzo dużych prądów przez doprowadzenia prądu do pocisku, które mają istotny wpływ na wartość wypadkowej siły działającej na pocisk, a w konsekwencji na jego prędkość. Dlatego w praktyce należy się liczyć z tym, że tylko niewielki procent dostarczonej energii zostanie przekazany pociskowi, a co za tym idzie, uzyska się znacznie mniejszą wartość prędkości pocisku, od obliczonej z zależności (8).

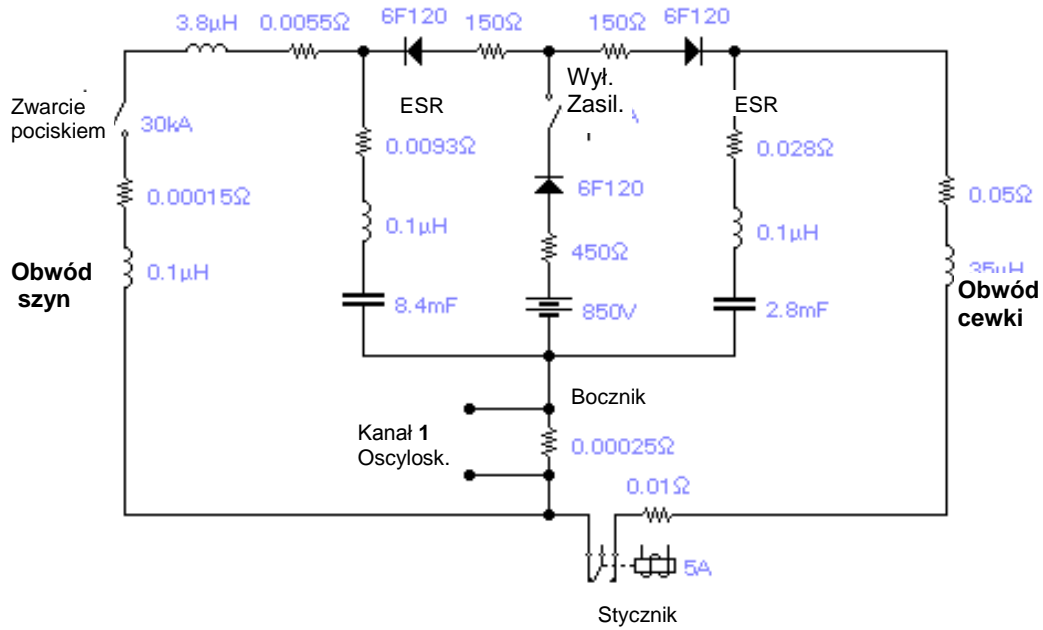
Praktyczna weryfikacja uzyskanych danych na drodze doświadczalnej zostanie przedstawiona w dalszej części artykułu.

## 2. UKŁAD WYRZUTNI ELEKTROMAGNETYCZNEJ [4]

Ponieważ do poprawnego działania wyrzutni szynowej potrzebne jest wstępne nadanie pociskowi odpowiedniego przyspieszenia, zastosowano układ rozbiegowy w postaci wyrzutni cewkowej. Do zasilania cewki prądem o dużej energii wykorzystano część posiadanej baterii kondensatorów, kosztem zmniejszenia pojemności kondensatorów do zasilania wyrzutni szynowej.

Wysoka cena kondensatorów (ok. 330zł/szt.) oraz długi czas dostawy z firmy zagranicznej spowodowały rezygnację z zakupu dodatkowych kondensatorów.

Schemat układu elektrycznego zasilania wyrzutni cewkowo-szynowej przedstawiono na rys. 6.



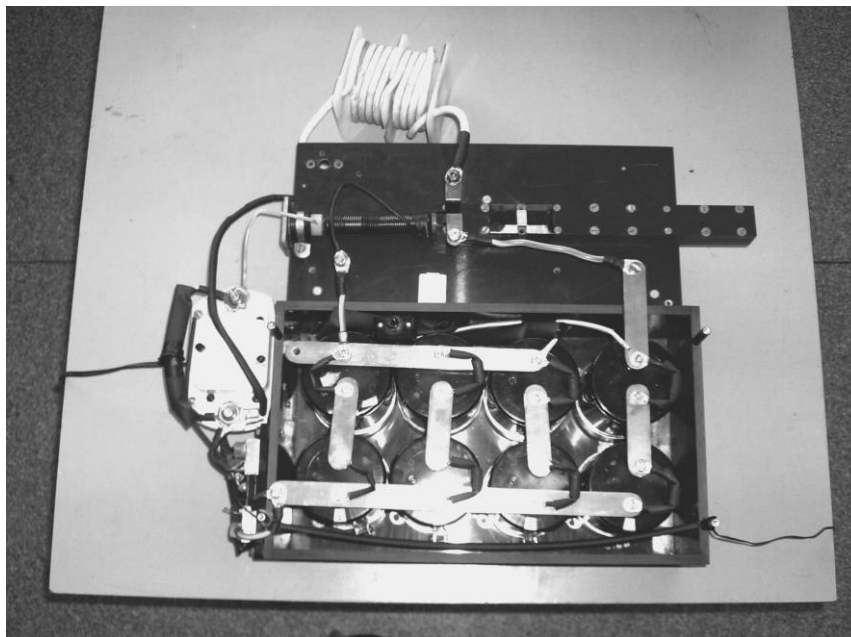
**Rys. 6. Schemat układu elektrycznego zasilania wyrzutni cewkowo-szynowej**

Spodziewano się, że czas rozładowania kondensatorów w obwodzie z niewielką rezystancją będzie bardzo krótki (rzędu  $100 \div 150\mu\text{s}$ ), więc aby go wydłużyć, wpięto w obwód prądowy szyn dodatkową cewkę o indukcyjności:  $L_c = 3,8\mu\text{H}$ .

Dla zapewnienia działania pola magnetycznego na cały pocisk, wchodzący dopiero w strefę przewodzenia prądu, początkowy odcinek szyn został wyfrezowany na długości ok. 60mm. W wyfrezowane wgłębienie (0,2mm) wklejono taśmę teflonową (rys. 7).



**Rys. 7. Widok szyny miedzianej z zaizolowanym rozbiegiem**



**Rys. 8. Widok kompletnej wyrzutni cewkowo-szynowej**

### **3. WYNIKI BADAŃ**

Układ kompletnej wyrzutni cewkowo-szynowej przedstawiono na rys. 8. Badania wyrzutni przeprowadzone były w dwóch opcjach wykorzystania posiadanej baterii kondensatorów. Szczegóły zasilania wyrzutni cewkowej i szynowej zostały podane na odnośnych wykresach czasowych wyników badań.

Ponieważ wstępne próby wyrzutni szynowej z pociskiem stalowym wykazały jego nienajlepszą pracę w obecności łuku (powstającego między miedzianymi szynami a pociskiem), zdecydowano się zastosować do wyrzutni szynowej pocisk grafitowy. Wymaga to równoczesnego ładowania wyrzutni dwoma pociskami.

Zaizolowany powierzchniowo taśmą teflonową walec stalowy, w polu magnetycznym wyrzutni cewkowej daje wstępny napęd pociskowi grafitowemu, który jest następnie przyspieszany w polu elektromagnetycznym wyrzutni szynowej.

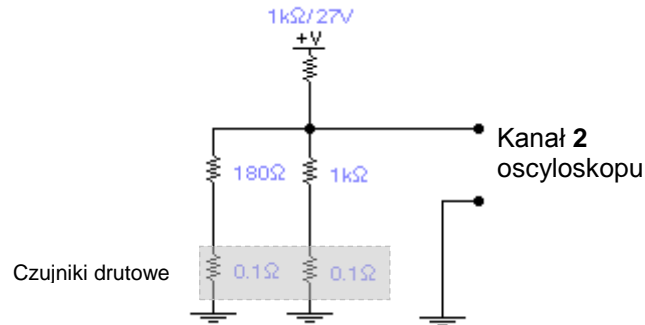
Do pomiaru prędkości wylotowej pocisku wykonano przyrząd, przedstawiony na rys. 9.



**Rys. 9. Widok przyrządu do pomiaru prędkości wylotowej pocisku**

Przyrząd składa się z dwóch ramek tekstolitowych z wyciętymi oknami, umieszczonych w odstępnie 0,5m, w których rozwinięty jest cienki drut miedziany w rastrze ok. 4mm. Przez tak powstałe dwie siatki druciane w niezależnych obwodach elektrycznych przepuszczany jest niewielki prąd.

Sygnaly z obwodów siatek sumowane są na matrycy rezystorowej (rys. 10) i rejestrowane na ekranie oscyloskopu.



Rys. 10. Schemat układu pomiarowego prędkości wylotowej pocisku

### 3.1. Wyrzutnia cewkowa

Aby można było ocenić efektywność działania wyrzutni szynowej, najpierw wykonano badania wyrzutni cewkowej.

Do badań wykorzystano walec stalowy o średnicy 7,6 i długości 35mm (masa ok. 11 gram) zaizolowany powierzchniowo teflonem, a także dodatkowo pocisk grafitowy  $\phi 7,6 \times 30$ mm (2 gramy). Takie same pociski użyto także podczas badania wyrzutni cewkowo-szynowej. Napięcie zasilania kondensatorów wynosiło  $U_c = 850$ V.

Prędkość pocisku rozpędzonego w wyrzutni szynowej obliczono ze wzoru:

$$v_c = 0,5/\Delta t, \quad (9)$$

gdzie: 0,5 - jest odległością (w metrach), pomiędzy czujnikami drutowymi przyrządu do pomiaru prędkości wylotowej pocisku.

Wyniki przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Wyniki badań wyrzutni cewkowej.

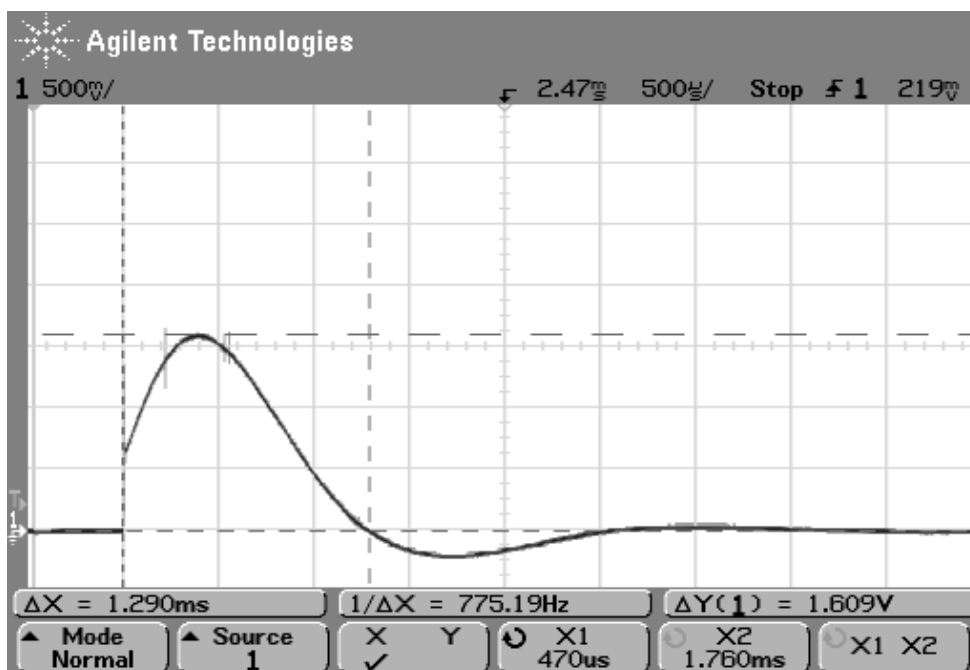
Lp	Pojemność $C_c$ [ $\mu$ F]	Czas przelotu $\Delta t$ [ms]	Prędkość pocisku $v_c$ [m/s]	Uwagi
1	2800	19,4	25,7	<b><math>U_c = 850</math>V</b>
2	5600	13,0	38,5	
3	8400	10,8	46,3	
4	11200	9,04	55,3	



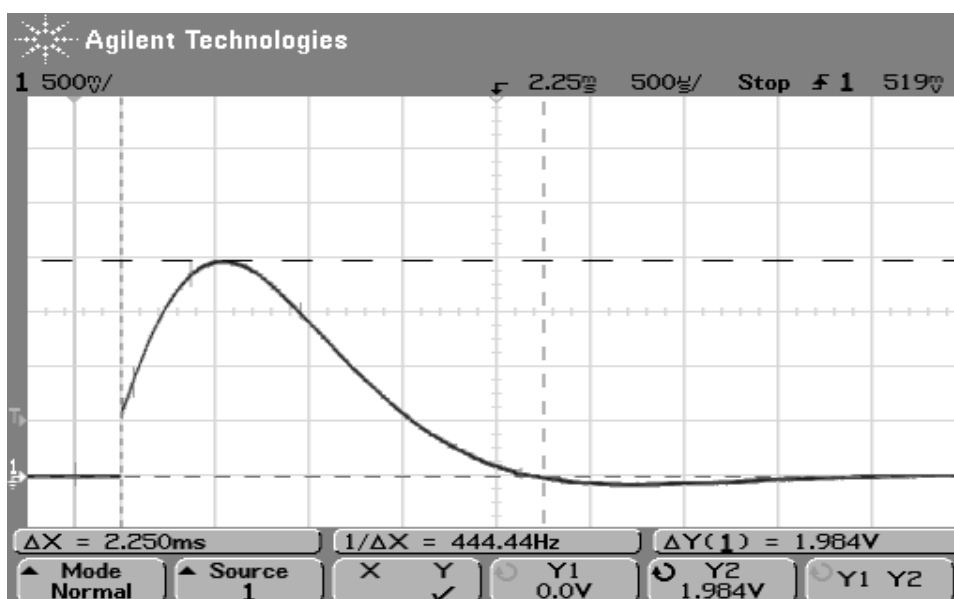
Przykładowe przebiegi prądu rozładowania kondensatorów przez cewkę wyrzutni o danych:  $z = 50\text{zw.}$ , drut  $\phi = 1,85\text{mm}$ ,  $R_c = 50\text{m}\Omega$ , przedstawiono na rys. 11 i 12. Spadek napięcia był mierzony na boczniku o stałej:  $1\text{V} \equiv 4\text{kA}$ .

### 3.2. Wyrzutnia cewkowo-szynowa

W tej części badań, wstępnie rozpędzony pocisk grafitowy (przez metalowy zaizolowany wałek w wyrzutni cewkowej), po znalezieniu się między nieizolowanymi szynami, powodował zwarcie obwodu dla przepływu prądu. Energia rozładowywanej baterii kondensatorów  $C_{sz}$  naładowanej do napięcia  $U_{sz} = 850\text{V}$ , powodowała dodatkowe przyspieszenie pocisku grafitowego.



Rys. 11. Przebieg prądu w cewce przy  $U_c = 850\text{V}$ ,  $C_c = 5600\mu\text{F}$



Rys. 12. Przebieg prądu w cewce przy  $U_c = 850\text{V}$ ,  $C_c = 11200\mu\text{F}$

W tablicy 2 przedstawiono wyniki badań, wraz z obliczonymi prędkościami wylotowymi pocisku grafitowego.

Przyrost prędkości pocisku grafitowego w wyrzutni szynowej obliczono, odejmując od prędkości obliczonej dla wyrzutni cewkowo-szynowej ( $v_c + v_{sz}$ ) =  $0,5/\Delta t$ , wcześniej obliczoną średnią wartość prędkości ( $v_c$ ), uzyskanej z wyrzutni cewkowej (patrz tablica 1).

Tablica 2. Wyniki badań wyrzutni szynowej.

Lp	Pojemn. $C_c$ [ $\mu\text{F}$ ]	Pojemn. $C_{sz}$ [ $\mu\text{F}$ ]	Prąd szyn $I_m$ [kA]	Czas $\Delta t$ [ms]	Prędkość $v_c + v_{sz}$ [m/s]	Prędkość $v_{sz}$ [m/s]	Uwagi
1	2800	8400	28,0	14,5	34,5	8,8	Załącznik 1
2	2800	8400	29,0	15,7	31,8	6,1	Załącznik 2
3	8400	2800	21,7	8,04	62,1	15,8	Załącznik 3
4	8400	2800	21,4	8,8	56,8	10,5	Załącznik 4

Zastosowane oznaczenia:

$C_c$  – pojemność baterii kondensatorów zasilania cewki,

$C_{sz}$  – pojemność baterii kondensatorów zasilania szyn,

$v_c + v_{sz}$  – zmierzona prędkość wylotowa pocisku,

$v_{sz}$  – przyrost prędkości pocisku uzyskany w wyrzutni szynowej.

W załącznikach 1 i 2, przedstawiono przykładowe „okna” z ekranu oscyloskopu prądu cewki i prądu szyn (kanał 1) oraz sygnału z matrycy rezystorowej układu pomiarowego prędkości (kanał 2). Stała prądowa bocznika wynosi:  $1\text{V} \equiv 4\text{kA}$ .

Odstęp czasowy „schodka” w kanale 2 oscyloskopu, odpowiada mierzonemu czasowi  $\Delta t$  przelotu pocisku pomiędzy okienkami przyrządu pomiarowego prędkości na drodze 0,5m.

### 3.2.1. Weryfikacja obliczeń teoretycznej prędkości wylotowej pocisku.

Korzystając z wykresów czasowych prądu armaty szynowej (Zał. 1 i 2), co następuje:

**Zał. 1** -  $I_{m1} = 7,0\text{V} \times 4\text{kA/V} = 28,0\text{kA}$ ,  $t_{r1} = 300\mu\text{s}$ ,  $I_{m2} = 1,5\text{V} \times 4\text{kA/V} = 6,0\text{kA}$ ,  $t_{r2} = 330\mu\text{s}$ ;

**Zał. 2** -  $I_{m1} = 5,44\text{V} \times 4\text{kA/V} = 21,75\text{kA}$ ,  $t_{r1} = 320\mu\text{s}$ ,  $I_{m2} = 1,75\text{V} \times 4\text{kA/V} = 7,0\text{kA}$ ,  $t_{r2} = 400\mu\text{s}$ ;

dla danych:  $D = 0,008\text{m}$ ,  $d = 0,0076\text{m}$ ,  $s = 0,0017\text{m}$ , korzystając z równania (10),

$$v_{poc} = \frac{\mu_0 \cdot D \cdot \ln \frac{d+s}{s}}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot d} \cdot (I_{m1}^2 \cdot t_{r1} + I_{m2}^2 \cdot t_{r2}) \quad (10)$$

obliczono teoretyczną prędkość wylotową pocisku z wyrzutni szynowej, która wynosiła odpowiednio:

dla danych prądowo-czasowych impulsu z zał. 1 -  $v_{poc} = 44,2\text{m/s}$ ,

dla danych prądowo-czasowych impulsu z zał. 2 -  $v_{poc} = 30,6\text{m/s}$ .

Teoretycznie obliczona prędkość wylotowa pocisku armaty szynowej zasilanej z baterii kondensatorów 3 x 2800 $\mu$ F wynosiła 44,2m/s i jest przeszło pięciokrotnie większa, niż rzeczywisty przyrost prędkości pocisku uzyskany z pomiarów (8,8 ÷ 6,1m/s).

Podobnie, teoretycznie obliczona prędkość wylotowa pocisku armaty szynowej zasilanej z baterii kondensatorów 1 x 2800 $\mu$ F (30,6m/s), jest przeszło dwukrotnie większa, niż rzeczywisty przyrost prędkości pocisku, uzyskany z pomiarów (15,8 ÷ 10,5m/s).

Różnice w wartościach prędkości obliczonych teoretycznie i uzyskanych z pomiarów wynikają z faktu, że równanie (16) nie uwzględnia strat energii na tarcie, opór powietrza, występowanie łuku między pociskiem a szynami i nagrzewania się pocisku.

Otrzymane wyniki pomiarowe sugerują, że sprawność przetwarzania energii wyrzutni szynowej jest większa, gdy pocisk przy wlocie do wyrzutni ma większą prędkość początkową.

## 4. PODSUMOWANIE

Do prawidłowego działania wyrzutni szynowej, niezbędne jest nadanie pociskowi wstępnego przyspieszenia dla uzyskania dużej prędkości.

W warunkach laboratoryjnych, najlepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie wstępnego napędu pocisku sprężonym azotem. Ruch pocisku w atmosferze azotu ograniczałby występowanie łuku, a więc erozji szyn.

Stwierdzono, że im większa prędkość początkowa pocisku, tym efektywniejsze jest wykorzystanie energii dostarczonej wyrzutni szynowej.

Zasilając wyrzutnię szynową z baterii kondensatorów o pojemności 2800 $\mu$ F uzyskano większy przyrost prędkości, niż przy zasilaniu szyn z baterii o pojemności 8400 $\mu$ F, lecz przy mniejszej prędkości początkowej pocisku.

Można to wytłumaczyć mniejszym wpływem oddziaływania na pocisk powstającego łuku.

Na sprawność przetwarzania energii układu wyrzutni szynowej ma istotny wpływ rezystancja obwodu zasilania szyn oraz rezystancja wewnętrzna źródła zasilającego (dla kondensatorów, rezystancja ESR-**E**quivalent **S**erial **R**esistance).

Ponieważ prędkość wylotowa pocisku jest wprost proporcjonalna do kwadratu prądu płynącego przez szyny i pocisk, należy dążyć do wzrostu amplitudy prądu. Można to osiągnąć, zwiększając napięcie baterii kondensatorów. Jednak ograniczeniem będzie napięcie przebicia izolacji wyrzutni szynowej.

Próby przeprowadzone z pociskiem metalowym i grafitowym pokazały, jak ważny jest dobór materiału na pocisk (ważna jest mała rezystancja przewodzenia pocisku przy dużym natężeniu prądu i własności materiału pracującego w obecności łuku).

Kondensatorowe źródła zasilania nadają się tylko jako zasilacze wyrzutni szynowych o ograniczonej mocy, ze względu na znaczną rezystancję wewnętrzną i brak możliwości zasilania dużym prądem w dłuższym czasie (czas rozładowywania się kondensatora zależy od stałej czasowej obwodu).

## 5. LITERATURA

[1] „Coilgun Systems” <http://www.coilgun.eclipse.co.uk/index.html>.

[2] Zb. Raczyński, A. Szafraniec: “Armata elektromagnetyczna jako broń przyszłego pola walki”, SPG (21) nr 1, 2005.

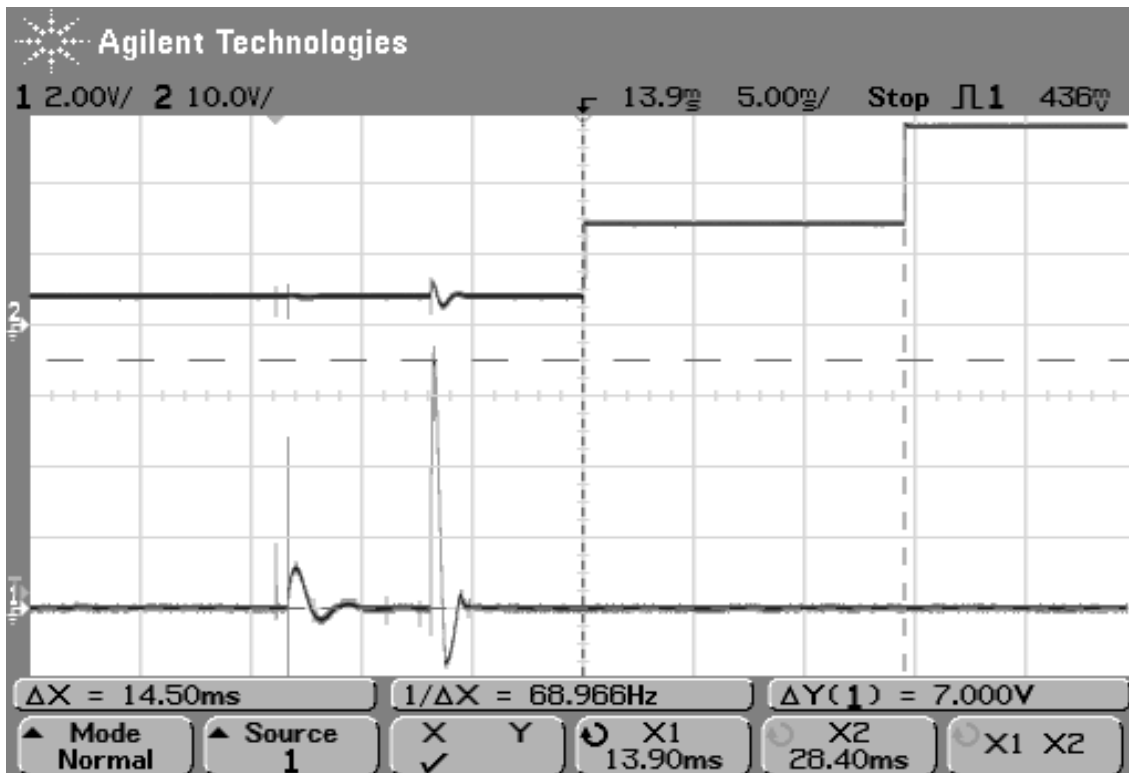
- [3] Powerlabs Rail Gun 2.0 Research, <http://www.powerlabs.org/railgun2.htm>.
- [4] Sprawozdanie nr 07/2005 z realizacji tematu: “Wyrzutnia elektromagnetyczna” (opracowanie w OBRUM - nie publikowane).

## MODEL OF ELECTROMAGNETIC LAUNCHER

**Abstract:** The article presents the rule of action of the coil and rail launcher. The results of the tests of the coil-rail launcher model, powered by a capacitor battery, in conjunction with a preliminary accelerate of the projectile with the help of the inductive coil, are presented.

Recenzent: dr inż. Jacek SPAŁEK

Test calej armaty:  $U=850V$ ,  $C_c=2800\mu F$ ,  $C_{sz}=3 \times 2800=8400\mu F$ .  
 Pocisk  $\phi 7,6 \times 35mm$  (stal) +  $\phi 7,6 \times 30mm$  (grafit).



Test calej armaty:  $U=850V$ ,  $C_c=2800\mu F$ ,  $C_{sz}=3 \times 2800=8400\mu F$ .  
 Pocisk  $\phi 7,6 \times 35mm$  (stal) +  $\phi 7,6 \times 30mm$  (grafit).

