

Jarosław Domin, Roman Kroczek
 Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Mechatroniki

OGRANICZNIK PRĄDU ROZRUCHOWEGO DLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO MODUŁU NAPĘDOWEGO Z SZYNAMI

STARTING CURRENT LIMITER FOR ELECTROMAGNETIC LAUNCHER WITH RAILS

Streszczenie: Wyrzutnia elektromagnetyczna to specyficzny rodzaj przetwornika elektromechanicznego. Energia elektryczna źródła zasilania (bateria kondensatorów) rozładowana w sposób impulsowy jest wykorzystywana do rozpędzania elementu ruchomego (pocisku). Impulsowe rozładowanie baterii kondensatorów w czasie kilku milisekund związane jest z bardzo dużymi maksymalnymi wartościami prądu rozruchowego o wartościach kilkuset kA. W artykule przedstawiono sposób ograniczenia maksymalnej wartości prądu rozruchowego dla elektromagnetycznego modułu napędowego z szynami dla hybrydowej wyrzutni pneumatyczno-elektromagnetycznej.

Abstract: The electromagnetic launcher is a specific type of electromechanical converter. Electrical energy from the power supply, discharging in the pulse way, is used for acceleration a moveable element (bullet). Pulse discharged of a capacitor batteries is related with a high maximum value of the starting current. The paper presents way of reducing maximum value of the starting current for the railgun module of the hybrid electromagnetic launcher.

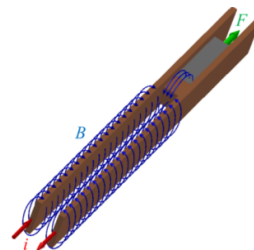
Słowa kluczowe: ograniczenie prądu rozruchowego, hybrydowa wyrzutnia elektromagnetyczna,
Keywords: starting current limiter, hybrid electromagnetic launcher, railgun, coilgun

1. Wstęp

Pojęcie przyśpieszenia elektromagnetycznego jest pojęciem które zostało wprowadzone na początku XX wieku. Pierwsza konstrukcja wykorzystująca przyśpieszenie elektromagnetyczne została opracowana w roku 1920 przez francuskiego konstruktora-inżyniera i została nazwana „the electric cannon”. Obecnie w wielu ośrodkach na całym świecie trwają badania nad tego typu urządzeniami ze względu na ich szerokie zastosowanie: militarne, w technice kosmicznej, w procesie inicjalizacji reakcji fuzji atomowej, w procesie fizycznych badań podstawowych własności materiałów, w badaniu skutków zderzeń mikrometeoroidów z powierzchnią ziemską i wielu innych [1,2,3,4,5,6].

Moduł szynowy hybrydowej wyrzutni pneumatyczno-elektromagnetycznej składa się z dwóch równoległych szyn podłączonych do źródła prądu stałego (Rys.1.). Począwszy od chwili w której czoło elementu ruchomego przekroczy początek szyn napędowych, następuje impulsowe rozładowanie baterii kondensatorów oraz na element ruchomy zaczyna

działać siła Lorentza, wyrzucająca go z pomiędzy szyn napędowych.

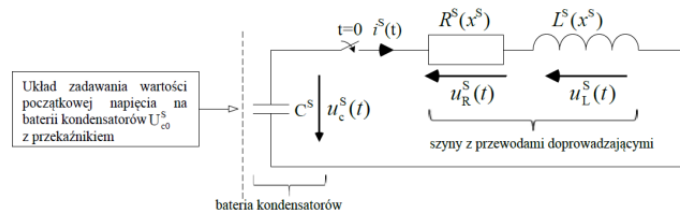


Rys.1. Elektromagnetyczny moduł napędowy z szynami – rysunek poglądowy

2. Struktura modułu napędowego z szynami bez ogranicznika prądu

Elektromagnetyczny moduł napędowy z szynami (moduł S) można podzielić na dwa podukłady:

– podukład ładowania baterii kondensatorów, w skład którego wchodzi: moduł zadawania wartości początkowej napięcia na baterii kondensatorów U_{c0}^S (gdzie U_c oznacza napięcie na baterii kondensatorów, indeks 0 – jej wartość początkową, zaś indeks S – szyny), przełącznik i bateria kondensatorów,



Rys.2. Układ elektryczny o zmiennych parametrach układ – $R(t)$ $L(t)$ C – dla elektromagnetycznego modułu z szynami (moduł S), gdzie: U_{c0}^S – wartość początkowa napięcia na baterii kondensatorów zasilających moduł S , $u_c^S(t)$ – wartość chwilowa napięcia na baterii kondensatorów zasilających moduł S , C^S – pojemność baterii kondensatorów, zasilających moduł S , $L^S(x^S)$ – indukcyjność własna obwodu modułu S w funkcji położenia elementu ruchomego x^S , $u_L^S(t)$ – spadek napięcia na indukcyjności obwodu $L^S(x^S)$, $R^S(x^S)$ – rezystancja obwodu modułu S w funkcji położenia pocisku x^S , $u_R^S(t)$ – spadek napięcia na rezystancji $R^S(x^S)$, $i^S(t)$ – wartość chwilowa prądu rozruchowego

– podukład rozładowania baterii kondensatorów, w skład którego wchodzi: bateria kondensatorów oraz szyny napędowe z elementem ruchomym.

Po naładowaniu baterii kondensatorów do zadanej wartości napięcia U_{c0}^S , układ ładowania baterii kondensatorów zostaje odłączony, a wówczas dalsze zachowanie układu (począwszy od chwili, w której czoło elementu ruchomego przekroczy początek szyn napędowych) można opisać, poprzez układ równań równowagi elektromechanicznej:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_c^S}{dt^2} = -\frac{1}{L^S(x^S) \cdot C^S} \left(u_c^S(t) + \left(R^S(x^S) + \frac{dL^S(x^S)}{dx^S} v^S \right) C^S \frac{du_c^S}{dt} \right) \\ \frac{d^2 x^S}{dt^2} = \frac{1}{m_r} (F^S(x^S, i^S) - F_r^S) \end{cases} \quad (1)$$

który należy rozwiązać z warunkiem początkowym dla napięcia na baterii kondensatorów:

$$u_c^S(t = -0) = u_c^S(t = +0) = U_{c0}^S,$$

oraz z warunkiem początkowym dla prędkości elementu ruchomego:

$$v^S(t = -0) = v^S(t = +0) = v_0^S.$$

2.1 Wyniki badań symulacyjnych dla układu bez ogranicznika

Badania symulacyjne przeprowadzono dla:

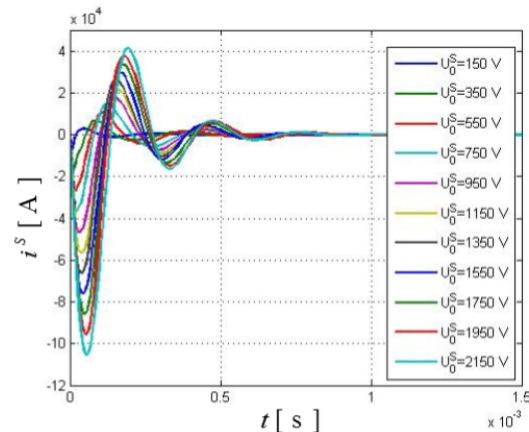
- $U_0^S \in \langle 150, 2150 \rangle$ (V)

oraz dla:

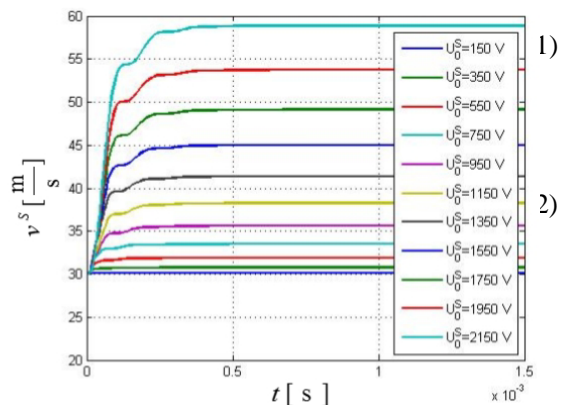
- $v_0^S = 30 \frac{m}{s}$.

Jako cel badań symulacyjnych przyjęto wyznaczenie przebiegów czasowych prądu roz-

ruchowego $i^S(t)$ (Rys.3.) oraz prędkości elementu ruchomego v^S (m/s) (Rys.4.).



Rys.3. Przebieg prądu rozruchowego $i^S(t)$ dla układu bez ogranicznika prądu

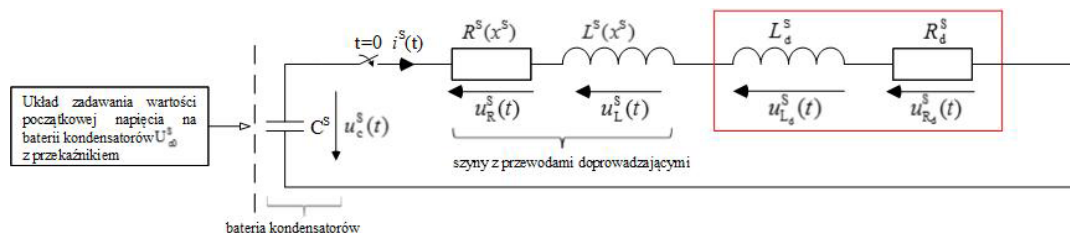


Rys.4. Przebieg prędkości elementu ruchomego $v^S(t)$ dla układu bez ogranicznika prądu

Jak wynika z przedstawionych rezultatów badań symulacyjnych prąd rozruchowy osiąga znaczne wartości, przykładowo dla wartości

napięcia początkowego na baterii kondensatorów $U_{c0}^S = 2150 \text{ V}$, maksymalna wartość chwilowa prądu rozruchowego przyjmuje wartość rzędu 110 kA . Stwarza to niebezpieczeństwo trwałego uszkodzenia szyn napędowych oraz elementu ruchomego w wyniku występowania zjawiska elektroerozji. Celowe jest więc poszukiwanie metod ograniczania maksymalnej wartości prądu rozruchowego przy jednoczesnym niedużym (rzędu 10-20%) spadku wartości prędkości elementu ruchomego. Ograniczenie to może zostać zrealizowane poprzez szeregowe włączenie, w podukład rozładownia baterii kondensatorów, cewki powietrznej o indukcyjności L_d^S oraz rezystancji R_d^S .

3. Struktura modułu napędowego z szynami z ogranicznikiem prądu



Rys.5. Układ elektryczny o zmiennych parametrach układ – $R(t) L(t) C$ – dla elektromagnetycznego modułu z szynami (moduł S) z ogranicznikiem prądu

Dla modułu napędowego z szynami wyposażonego w dodatkowy ogranicznik zmianie ulega struktura podukładu rozładownia baterii kondensatorów (Rys.5).

W układzie zmodyfikowanym podukład rozładownia obejmuje: baterię kondensatorów, szyny napędowe, element ruchomy oraz cewkę powietrzną (ogranicznik prądu).

Układ równowagi elektromechanicznej dla modułu napędowego z szynami z ogranicznikiem prądu rozruchowego:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_c^S}{dt^2} = -\frac{1}{[L^S(x^S) + L_d^S] \cdot C^S} \left(u_c^S(t) + \left(R^S(x^S) + R_d^S + \left(\frac{d[L^S(x^S) + L_d^S]}{dx^S} \right) v^S \right) \right) C^S \frac{du_c^S}{dt} \\ \frac{d^2 x^S}{dt^2} = \frac{1}{m_r} (F^S(x^S, i^S) - F_r^S) \end{cases} \quad (2)$$

należy rozwiązać z występującymi warunkami początkowymi:

- dla napięcia na baterii kondensatorów:

$$u_c^S(t = -0) = u_c^S(t = +0) = U_{c0}^S, \quad (1)$$

- prędkości elementu ruchomego:

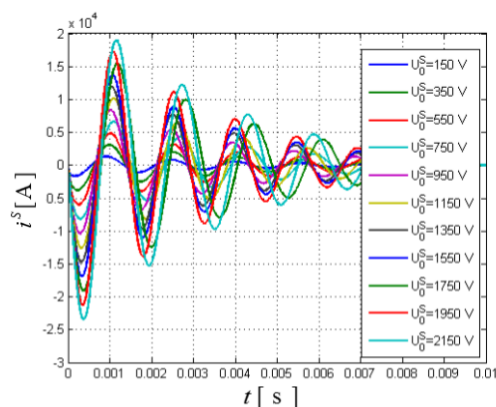
$$v^S(t = -0) = v^S(t = +0) = v_0^S.$$

3.1 Wyniki badań symulacyjnych dla układu z ogranicznikiem prądu

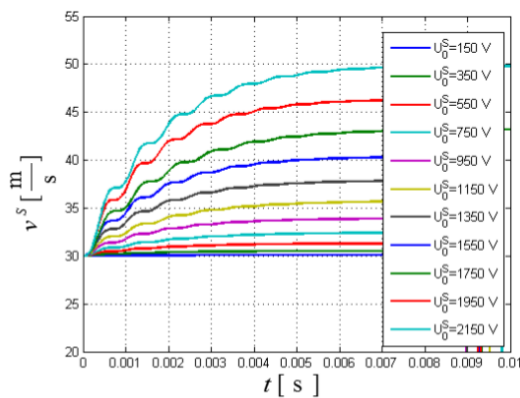
Badania symulacyjne dla układu z ogranicznikiem prądu przeprowadzono dla takich samych warunków początkowych jak dla układu bez ogranicznika prądu tzn. dla:

- $U_0^S \in < 150, 2150 > \text{ V}$,
- $v_0^S = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Jako cel badań symulacyjnych przyjęto, analogicznie jak dla układu bez ogranicznika prądu, wyznaczenie przebiegów czasowych prądu rozruchowego $i^S(t)$ (Rys.6.) oraz prędkości elementu ruchomego $v^S(\text{m/s})$ (Rys.7.).



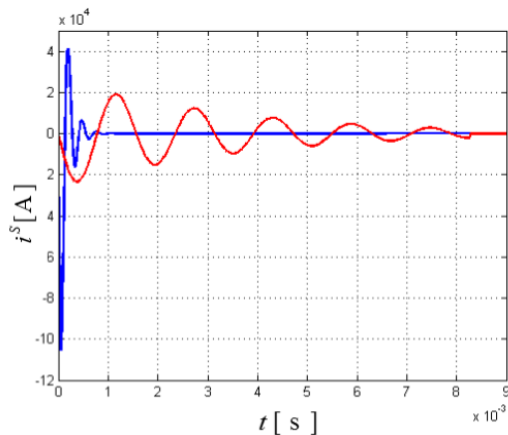
Rys.6. Przebieg czasowy prądu rozruchowego $i^S(t)$ dla układu bez ogranicznika prądu



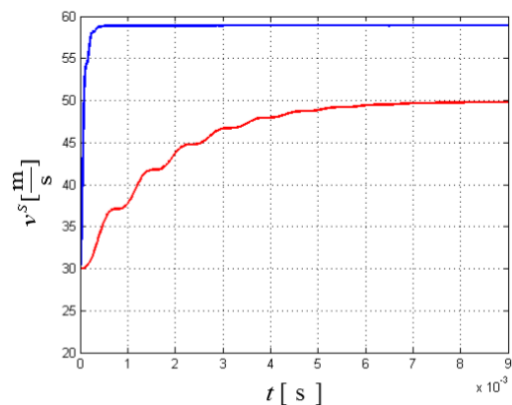
Rys.7. Przebieg czasowy prędkości elementu ruchomego $v^s(t)$ dla układu bez ogranicznika prądu

4. Porównanie wyników badań symulacyjnych dla obu analizowanych układów

Dla jednego wybranego przypadku ($U_{co}^S = 2150 \text{ V}$, $v_0^S = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) wyniki badań symulacyjnych otrzymanych dla układu z ogranicznikiem prądu porównano z wynikami otrzymanymi dla układu bez ogranicznika prądu i zestawiono razem na rysunku 8 (przebiegi czasowe prądu rozruchowego) oraz rysunku 9 (przebiegi czasowe prędkości elementu ruchomego).



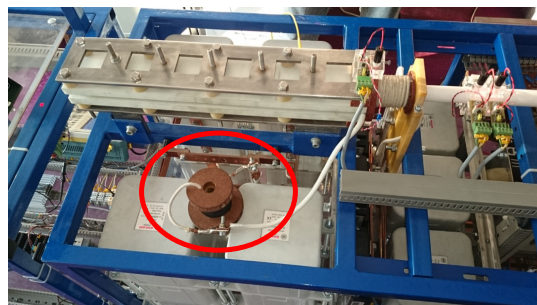
Rys.8. Przebieg czasowy prądu rozruchowego $i^s(t)$ dla układu bez ogranicznika prądu (kolor niebieski) oraz dla układu z ogranicznikiem prądu (kolor czerwony)



Rys.9. Przebieg czasowy prędkości elementu ruchomego $v^s(t)$ dla układu bez ogranicznika prądu (kolor niebieski) oraz dla układu z ogranicznikiem prądu (kolor czerwony)

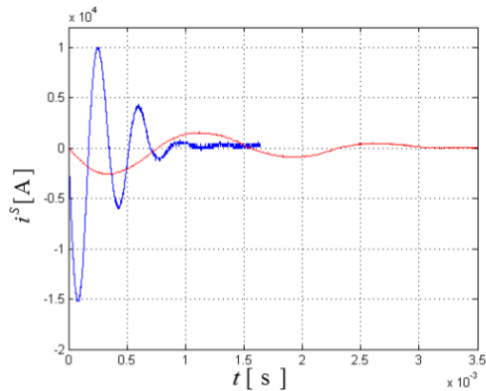
W przypadku układu zmodyfikowanego o ogranicznik prądu, maksymalna chwilowa wartość prądu rozruchowego uległa pomniejszeniu o ok 76% (z ok. 105 kA do ok. 23 kA). Wynikiem zastosowania ogranicznika prądu jest jednak spadek prędkości elementu ruchomego o ok. 15% (z ok. $59 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ do ok. $50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$).

Zgodność wyników badań symulacyjnych z wynikami uzyskanymi na stanowisku badawczym (Rys.10.) potwierdzają przebiegi czasowe przedstawione na rysunku 11.



Rys.10. Widok rzeczywisty modułu szynowego hybrydowej wyrzutni pneumatyczno-elektromagnetycznej z ogranicznikiem prądu (zakreślony czerwonym okręgiem)[8]

Przebiegi czasowe prądu rozruchowego dla układu bez ogranicznika prądu (kolor niebieski) oraz dla układu z ogranicznikiem prądu (kolor czerwony) dla $U_{co}^S = 300 \text{ V}$, wyznaczone pomiarowo na stanowisku badawczym, zestawiono razem na Rys.11. [8]



Rys.11. Przebiegi czasowe prądu rozruchowego $i^s(t)$ dla układu bez ogranicznika prądu (kolor niebieski) oraz dla układu z ogranicznikiem prądu (kolor czerwony) wyznaczone pomiarowo

Dla przedstawionych na rysunku 9, przebiegów czasowych prędkości wyznaczono zastępczą stałą czasową, zgodnie z zależnością : [7]

$$T_z = \frac{1}{v^s(t = \infty) - v^s(t = 0)} \int_0^{\infty} (v^s(t) - v^s(t = 0)) dt \quad (3)$$

Powyższa zależność została zaadoptowana dla skończonego przedziału czasu $\langle 0, 9 \rangle$ ms. Otrzymane wyniki, dla układu bez oraz z ogranicznikiem prądu, zestawiono razem w tabela 1.

Tabela 1

	Układ bez ogranicznika prądu	Układ z ogranicznikiem prądu
T_z	0,171 ms	1,76 ms

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono sposób ograniczania wartości prądu rozruchowego dla modułu szynowego hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej za pomocą cewki powietrznej (ogranicznika prądu). Zastosowanie opracowanego ogranicznika prądu rozruchowego pozwala na ograniczenie maksymalnej wartości chwilowej prądu rozruchowego o 76 %, przy spadku prędkości rozpędzanego elementu ruchomego ok 15%. Ograniczenie maksymalnej wartości chwilowej prądu rozruchowego pozwala ograniczyć niebezpieczeństwo trwałego uszkodzenia szyn napędowych oraz elementu

ruchomego w wyniku występowania zjawiska elektroerozji. Słuszne wydaje się również opracowanie w przyszłości układu ogranicznika prądu o regulowanej wartości indukcyjności. Rozwiązanie takie pozwoli na ograniczenie maksymalnej wartości prądu rozruchowego oraz na regulację chwili czasu w której następuje rozpędzanie elementu ruchomego.

Bibliografia

- [1] J. Domin "Wyrzutnia elektromagnetyczna o napędzie cewkowym oraz o napędzie szynowym – modelowanie i badania symulacyjne", *Mechatronika-analiza projektowanie i badania wybranych elementów i systemów*, Praca zbiorowa pod redakcją Krzysztofa Kluszczyńskiego, str. 56 -74, Wydawnictwo PAK 2013,
- [2] Z. Bengui, "Magnetic –Structural Coupling Analysis of Armature in Induction Coilgun", *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 39, no. 1, January 2011,
- [3] K.M Chakravarthy., T.J Watt., D.L., Bourell "The Use of High-Speed Video as an In-Bore Diagnostic for Electromagnetic Launchers", *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol. 39, No. 2, February 2011,
- [4] Z.Gosiewski, P.Kłóskowski, „Wspomaganie wyrzutni elektromagnetycznej magnesami trwałymi”, *Biuletyn WAT*, 2008, vol.57, nr 3, s.87-95,
- [5] J.L.Upshaw, „Micrometeoroid impact simulations using railgun electromagnetic accelerator”, *IEEE Trans. on Magnetics.*, January. 1997, vol 27, No1,
- [6] Hawke R.S., Susoeff A.R., "Hypervelocity railgun development for high-pressure research", *IEE Trans. on Magnetics.*, January 1989, vol.25, No.1,
- [7] Paszek W., "Wzmacniacze elektromaszynowe i transduktorowe w przemyśle ciężkim", Wydawnictwo Śląsk,
- [8] Karcz M., "Projekt oraz wykonanie cewki powietrznej dla modułu szynowego hybrydowej wyrzutni pneumatyczno-elektromagnetycznej", Projekt inżynierski, Gliwice 2014, Promotor: dr inż. Jarosław Domin.

Autorzy

Dr inż. Jarosław Domin
e-mail jaroslaw.domin@polsl.pl,
Dr inż. Roman Kroczek
e-mail kroczek.roman@gmail.com
Politechnika Śląska,
Wydział Elektryczny,
Katedra Mechatroniki
ul. Akademicka 10A
44-100

Gliwice