

DOI: 10.5604/20830157.1201321

HYBRYDOWA WYRZUTNIA ELEKTROMAGNETYCZNA Z MODUŁEM CEWKOWYM JAKO OGRANICZNIK PRĄDU W MODULE SZYNOWYM

Tomasz Makowski

Politechnika Śląska, Katedra Mechatroniki

Streszczenie. Artykuł dotyczy udoskonalenia działu prototypu wyrzutni o oryginalnej konstrukcji, składającego się z modułu pneumatycznego, elektromagnetycznego modułu typu coilgun i elektromagnetycznego modułu typu railgun, nazwanej wyrzutnią hybrydową. Sprawdzono możliwość wykorzystania cewki z elektromagnetycznego modułu napędowego dla potrzeb ograniczenia impulsu prądowego, powstającego w elektromagnetycznym szynowym module napędowym hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym. Ze względu na to, że podczas „wystrzału” źródło zasilania jest rozładowywane w sposób impulsowy, w obwodzie rozładowywania wyrzutni szynowej występuje udar prądu (rzędu setek kiloamperów). Udar ten stwarza niebezpieczeństwo uszkodzenia termicznego oraz mechanicznego wyrzutni szynowej. Dlatego też pokazano możliwości zastosowania ogranicznika zewnętrznego, jak również ogranicznika wewnętrznego dla celów ograniczenia prądu rozruchowego.

Słowa kluczowe: Wyrzutnia szynowa; ogranicznik prądu; cewka; hybrydowa wyrzutnia elektromagnetyczna.

HYBRID ELECTROMAGNETIC LAUNCHER WITH COILGUN AS CURRENT LIMITER IN RAILGUN

Abstract. The article deals with a prototype of a hybrid launcher consisting of a pneumatic module, an electromagnetic coilgun module and railgun module. Possibility of using coil from electromagnetic coil module was tested for purpose of limitation of current impulse. This impulse occurs in of the railgun launcher in hybrid electromagnetic launcher with pneumatic assist. Electromagnetic launcher discharges power source in an impulsive manner. It is reason of high value of the current flowing through the rails. It causes risk of damaging the railgun by thermal and mechanical effects. Because of that possibilities of applying external or internal limiter for inrush current limitation were shown.

Keywords: Electromagnetic launching, Railgun, Coilgun, Current limiter

Wstęp

Pierwsze prace nad wyrzutnią elektromagnetyczną rozpoczęły się na początku XX wieku (pierwszy patent 1901 r. [3]). Obecnie w wielu ośrodkach na całym świecie są prowadzone badania nad tego typu urządzeniami ze względu na szerokie możliwości zastosowania w wielu różnych dziedzinach [4, 5].

Prototyp wyrzutni o oryginalnej konstrukcji, składającego się z trzech modułów napędowych: modułu pneumatycznego P, elektromagnetycznego modułu typu coilgun (moduł cewkowy C) i elektromagnetycznego modułu typu railgun (moduł szynowy S), został zaprojektowany i zbudowany w Katedrze Mechatroniki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Dla tego rozwiązania konstrukcyjnego (przedstawionego na Rys. 1) przyjęto nazwę wyrzutni hybrydowej.

Elektromagnetyczny szynowy moduł napędowy hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym składa się z dwóch równoległych szyn, podłączonych do baterii kondensatorów. W chwili wejścia pocisku pomiędzy szyny następuje gwałtowne rozładowanie baterii kondensatorów, w wyniku czego powstająca siła Lorentza wyrzuca element ruchomy, nadając mu odpowiednie przyspieszenie. Z powodu dużych wartości prądów w obwodzie rozładowania wyrzutni oraz znacznej gęstości prądu na powierzchni pocisku występuje w wyrzutni zjawisko elektroerozji szyn napędowych.

1. Analiza niepożądanych zjawisk w wyrzutni szynowej

W trakcie przeprowadzania intensywnych wielomiesięcznych badań zaobserwowano, że w zaprojektowanej i wykonanej w Katedrze Mechatroniki (na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej) hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym (Rys. 1) szyny ulegają stopniowemu niszczeniu. Jak wspomniano, z powodu występowania dużych wartości prądu sięgających nawet 110kA szyny ulegają nieodwracalnej degradacji na skutek zjawiska elektroerozji (Rys. 2).

Po zdemontowaniu szynowego modułu napędowego możliwa była ocena stopnia zniszczeń (Rys. 2 – lewa strona). Uszkodzenia były na tyle znaczące, że powodowały nawet zakleszczanie się pocisku w szynach. Dla celów porównawczych zamieszczono zdjęcie (Rys. 2 – prawa strona) nowego szynowego modułu napędowego.



Rys. 1. Widok ogólny hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym (prototyp), na którym poszczególne elementy oznaczono następująco: P – moduł pneumatyczny, C – elektromagnetyczny moduł z cewką, S – elektromagnetyczny moduł z szynami



Rys. 2. Z lewej strony widok szyn modułu napędowego typu rail-gun: widoczne uszkodzenia na skutek zjawiska elektroerozji; po prawej widok nowego szynowego modułu napędowego hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej

2. Badanie symulacyjne

Na podstawie modelu matematycznego, opisanego w sposób szczegółowy w [1], przeprowadzono badania symulacyjne i analityczne dla trzech następujących przypadków:

- dla elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – **bez ogranicznika prądu** (rozdział 2.1),
- dla układu elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – **z ogranicznikiem prądu w postaci dodatkowej cewki powietrznej** (rozdział 2.2),
- dla układu elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – **z ogranicznikiem prądu w postaci cewki napędowej z elektromagnetycznego cewkowego modułu napędowego** (cewka ta jest przełączana do obwodu rozładowania szynowego modułu napędowego po zakończeniu procesu rozpędzania pocisku w elektromagnetycznym cewkowym module napędowym (rozdział 2.3)).

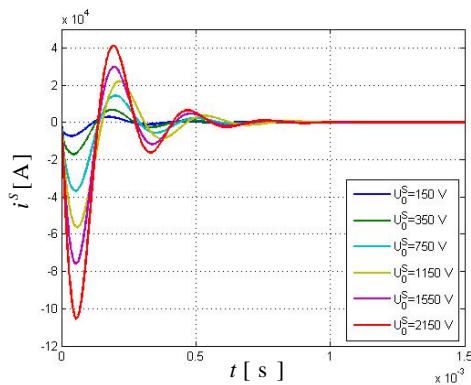
W trakcie prowadzonych badań symulacyjnych wstępnie założono, że elektromagnetyczny cewkowy moduł napędowy nie będzie wykorzystywany do rozpędzania pocisku, a wykorzystana zostanie wyłącznie jego cewka jako ogranicznik prądu.

Wszystkie badania symulacyjne przeprowadzono dla napięcia początkowego (na baterii kondensatorów zasilających elektromagnetyczny szynowy moduł napędowy) o wartości $U_0^S = (150 + n) \text{ V}$ (gdzie n to kolejne wartości większe o 200, aż do napięcia krytycznego 2150 V) oraz dla prędkości (nadanej przez pneumatyczny moduł napędowy) początkowej pocisku $v_0^S = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

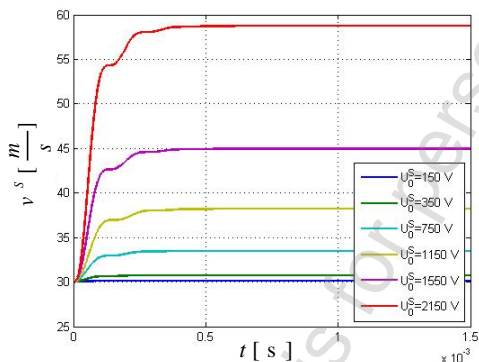
2.1. Badania symulacyjne dla elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – bez ogranicznika prądu

Próby symulacyjne przeprowadzono dla uprzednio opracowanego modelu elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego [1]. W wyniku badań symulacyjnych uzyskano następujące przebiegi:

- przebieg czasowy prądu $i^S = f(t)$ (Rys. 3),
- przebieg czasowy prędkości elementu ruchomego $v^S = f(t)$ (Rys. 4).



Rys. 3. Przebieg czasowy $i^S = f(t)$ uzyskany podczas badań symulacyjnych dla elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – bez ogranicznika prądu (przy wartości początkowej prędkości $v_0^S = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)



Rys. 4. Przebieg czasowy prędkości $v^S = f(t)$ uzyskany na drodze symulacyjnej dla elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – bez ogranicznika prądu (przy wartości początkowej prędkości $v_0^S = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

Badania symulacyjne wykazały (Rys. 3), iż impuls prądowy osiąga wartość 105 kA, przy napięciu początkowym na baterii kondensatorów zasilających elektromagnetyczny szynowy moduł napędowy równym $U_0^S = 2150 \text{ V}$ oraz przy wartości początkowej pocisku równej $v_0^S = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Jak już wcześniej wspomniano, tak duże wartości prądu muszą prowadzić do uszkodzenia szynowego modułu napędowego. Prędkość pocisku dla układu bez ogranicznika prądowego wyniosła w rozpatrywanym przypadku krytycznym $59 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

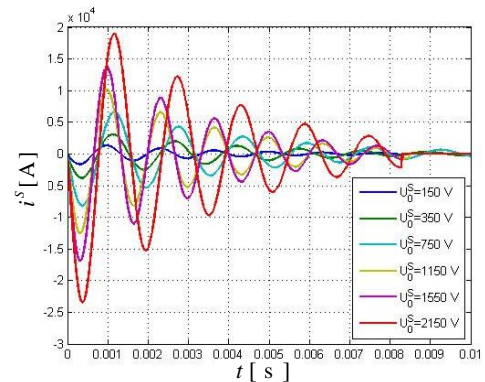
W kolejnym etapie postanowiono kontynuować badania symulacyjne po wprowadzeniu dodatkowego ogranicznika prądu. Przyjęto założenie, że wprowadzenie ogranicznika nie może ingerować w istniejącą konstrukcję hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym. Stąd też pojawiły się dwie koncepcje rozwiązania problemu. Pierwsze z nich to dodatkowa cewka zewnętrzna, specjalnie zaprojektowana i włączona do obwodu rozładowywania elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego. Druga z nich zakłada wykorzystanie, jako ogranicznika prądu istniejącej już cewki z elektromagnetycznego cewkowego modułu napędowego. Cewka ta najpierw używana jest do napędzania pocisku, a następnie odpowiednio szybko przelączana w obwód rozładowania modułu szynowego. W przypadku pierwszej koncepcji będziemy mówić o ograniczniku zewnętrznym a w przypadku drugiej koncepcji o ograniczniku wewnętrznym.

2.2. Badania symulacyjne dla układu elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – z ogranicznikiem prądu w postaci dodatkowej cewki powietrznej (ogranicznik zewnętrzny)

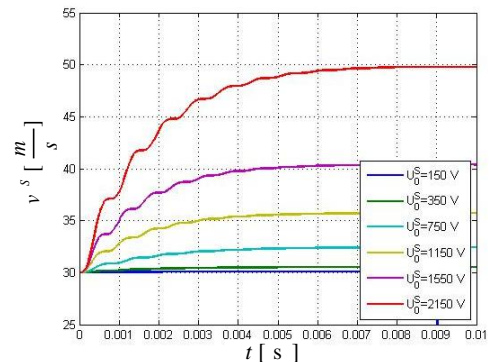
Jedną z możliwości ograniczenia impulsu prądowego jest włączenie szeregowo dodatkowej cewki w układ elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego.

Dla zmodyfikowanego w ten sposób układu o dodatkową, specjalnie zaprojektowaną cewkę powietrzną (opisaną szczegółowo [2]), przeprowadzono badania symulacyjne i uzyskano następujące przebiegi:

- przebieg czasowy prądu $i^S = f(t)$ (Rys. 5),
- przebieg czasowy prędkości elementu ruchomego $v^S = f(t)$ (Rys. 6).



Rys. 5. Przebieg czasowy $i^S = f(t)$ uzyskany podczas badań symulacyjnych dla elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – z zewnętrznym ogranicznikiem prądu (przy wartości początkowej prędkości $v_0^S = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)



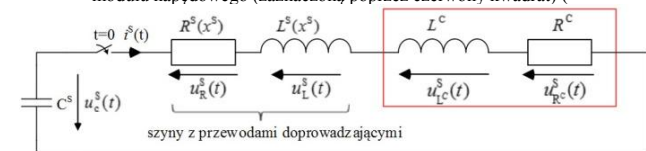
Rys. 6. Przebieg czasowy prędkości $v^S = f(t)$ uzyskany na drodze symulacyjnej dla elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – z zewnętrznym ogranicznikiem prądu (przy wartości początkowej prędkości $v_0^S = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

Jak widać, wartość prądu rozruchowego została znacząco zredukowana z 105 kA do 23 kA, czyli do wartości 22%, jednakże prędkość końcowa pocisku również zmalała z $59 \frac{m}{s}$ do $49 \frac{m}{s}$ czyli $\frac{m}{s}$ do wartości 83%.

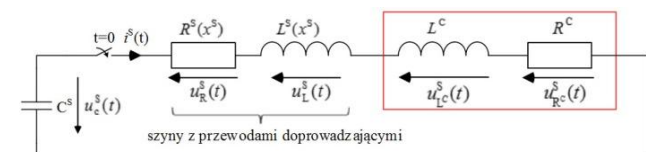
2.3. Badania symulacyjne dla układu elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – z ogranicznikiem prądu w postaci cewki napędowej z elektromagnetycznego cewkowego modułu napędowego

W hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym znajduje się elektromagnetyczny cewkowy moduł napędowy. Postanowiono sprawdzić, czy istnieje możliwość użycia cewki tego modułu, jako ogranicznika wewnętrznego oraz w jakim stopniu wpłynie to na parametry pacy elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego.

Dla potrzeb takich badań symulacyjnych wykorzystano uproszczony model uproszczony model elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego wraz z cewką elektromagnetycznego cewkowego modułu napędowego (zaznaczoną poprzez czerwony kwadrat) (



Rys. 7).
bateria kondensatorów



bateria kondensatorów

Rys. 7. Układ elektryczny o zmiennych parametrach – $R(t)$, $L(t)$, C – dla elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego wraz z wewnętrznym ogranicznikiem prądowym

Równania równowagi elektromechanicznej dla uproszczonego modelu symulacyjnego z ogranicznikiem wewnątrz:

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

Równania, które należy rozwiązać z następującymi warunkami początkowymi, mają postać:

- dla napięcia na baterii kondensatorów:
 $u_c^S(t = 0) = u_c^S(t = +0) = U_{c0}^S$
- dla prędkości elementu ruchomego:
 $v^S(t = 0) = v^S(t = +0) = v_0^S$

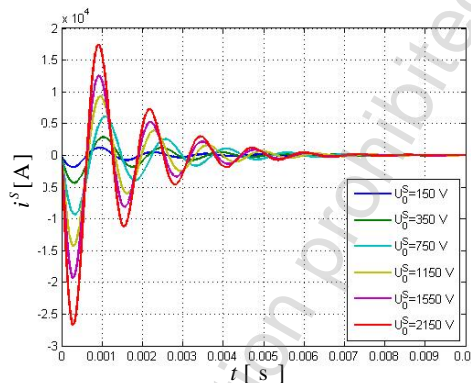
Przybliżone parametry fizycznej cewki elektromagnetycznego cewkowego modułu napędowego:

- rezystancja cewki 10 mΩ,
- indukcyjność cewki 12,5 μH.

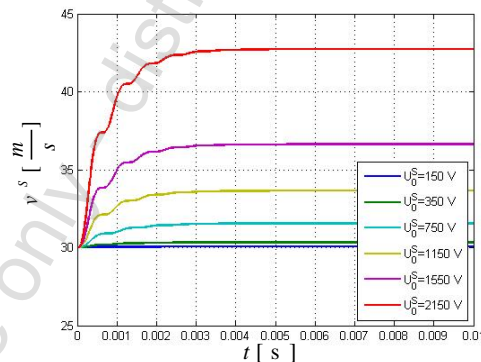
Dla zmodyfikowanego układu przeprowadzono badania symulacyjne i uzyskano następujące przebiegi:

- przebieg czasowy prądu $i^S = f(t)$ (Rys. 8),
- przebieg czasowy prędkości elementu ruchomego $v^S = f(t)$ (Rys. 9).

Wyniki badań symulacyjnych wykazały, iż dla wybranego przypadku ($U_{c0}^S = 2150 V$) wartość prądu rozruchowego została znacząco zredukowana z 105 kA do 26 kA, czyli do wartości 25%, natomiast prędkość końcowa pocisku niekorzystnie zmalała z $59 \frac{m}{s}$ do $43 \frac{m}{s}$ czyli do wartości 73%.



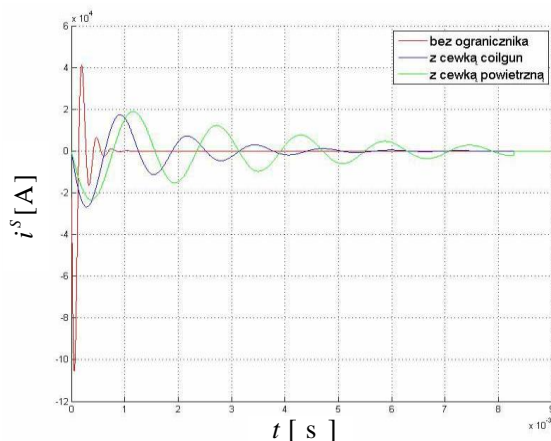
Rys. 8. Przebieg czasowy $i^S = f(t)$ uzyskany podczas badań symulacyjnych dla elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – z wewnętrznym ogranicznikiem prądu (przy wartości początkowej prędkości $v_0^S = 30 \frac{m}{s}$)



Rys. 9. Przebieg czasowy prędkości $v^S = f(t)$ uzyskany na drodze symulacyjnej dla elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego – z wewnętrznym ogranicznikiem prądu (przy wartości początkowej prędkości $v_0^S = 30 \frac{m}{s}$)

2.4. Podsumowanie badań symulacyjnych

Dla lepszego porównania wyników badań symulacyjnych postanowiono zamieścić przebiegi czasowe z poprzednich podrozdziałów dla napięcia początkowego na baterii kondensatorów zasilających elektromagnetyczny szynowy moduł napędowy o wartości $U_0^S = 2150 V$. Zbiorcze zestawienie przebiegów czasowych prądu $i^S = f(t)$ zamieszczono na Rys. 10.



Rys. 10. Przebieg czasowy $i^S = f(t)$ uzyskany na drodze symulacyjnej dla wartości początkowej napięcia na baterii kondensatorów $U_0^S = 2150 V$ (przy wartości początkowej prędkości $v_0^S = 30 \frac{m}{s}$)

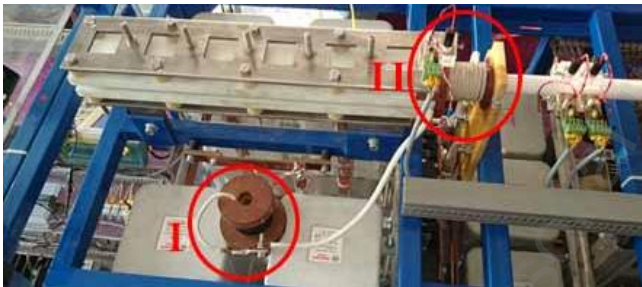
Jak wynika z przedstawionych rezultatów badań symulacyjnych, prąd rozruchowy bez ogranicznika prądu osiąga znaczne wartości sięgające 105 kA. Takie wartości prądu są przyczyną występowania zjawiska elektroerozji, co skutkuje nieodwracalnym uszkodzeniem szyn, a również pocisku (elementu ruchomego). Po zastosowaniu dodatkowej cewki powietrznej zdołano ograniczyć maksymalną wartość prądu do 22%, jednakże prędkość końcowa pocisku zmalała do 83%. Przy użyciu cewki elektromagnetycznej cewkowego modułu napędowego, nastąpiło ograniczenie maksymalnej wartości prądu do 25%, natomiast prędkość pocisku zredukowano do 73%.

Jest możliwe dwukrotnie wykorzystanie elementu już istniejącego: cewkę elektromagnetycznego cewkowego modułu napędowego można wykorzystać do nadania dodatkowej prędkości pocisku w module cewkowym ale również dodatkowo do ograniczenia prądu w elektromagnetycznym szynowym module.

3. Badanie laboratoryjne na obiekcie rzeczywistym

Kierując się pozytywnym wynikiem badań symulacyjnych dokonano odpowiedniej modyfikacji obwodu rozładowania dla elektromagnetycznego szynowego modułu napędowego hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym. Udoskonalając w ten sposób elektromagnetyczną wyrzutnię stworzono możliwość ograniczenia wartości prądu rozruchowego przez dodatkową cewkę powietrzną (ogranicznik zewnętrzny) lub cewkę elektromagnetycznego cewkowego modułu napędowego (ogranicznik wewnętrzny). Na zdjęciu (Rys. 11) kolorem czerwonym oznaczono dodatkowe elementy ograniczające prąd rozruchowy:

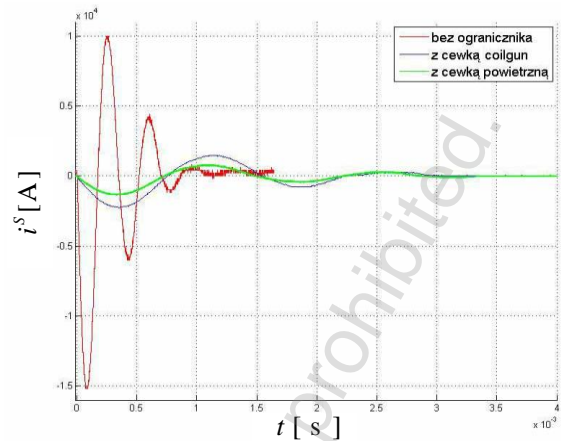
- I – dodatkową cewkę powietrzną,
- II – cewkę elektromagnetycznego cewkowego modułu napędowego.



Rys. 11. Widok fragmentu hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym, na którym elementy oznaczono następująco: I – dodatkowa cewka powietrzna, II – cewka elektromagnetycznego cewkowego modułu napędowego

Za pośrednictwem cewki Rogowskiego wyznaczono pomiarowo przebiegi czasowe prądów (Rys. 12). Badania pomiarowe zostały wykonane przy obniżonym napięciu początkowym na baterii kondensatorów $U_0^S = 300\text{ V}$ w celu uniknięcia uszkodzenia szyn napędowych.

Jak wydać na Rys. 10 i Rys. 12, zgodność wyników pomiarowych z symulacyjnymi jest zadowalająca. Dla układu z ogranicznikiem wewnętrznym różnica wynosi 28%, natomiast dla układu z ogranicznikiem zewnętrznym – 22%.



Rys. 12. Przebieg czasowy $i^s = f(t)$ uzyskany pomiarowo dla wartości początkowej napięcia na baterii kondensatorów $U_0^S = 300\text{ V}$ (przy wartości początkowej prędkości $v_0^S = 30\frac{\text{m}}{\text{s}}$)

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości ograniczania impulsu prądowego w elektromagnetycznym szynowym module napędowym hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym za pomocą cewki elektromagnetycznego cewkowego modułu lub dodatkowej cewki powietrznej. Poprzez zastosowanie cewki uzyskano zadowalające ograniczenie maksymalnej wartości prądu (zmniejszając niebezpieczeństwo uszkodzenia szyn napędowych w wyniku występowania zjawiska elektroerozji) przy zachowaniu stosunkowo dużej prędkości końcowej pocisku.

Słuszne wydaje się również opracowanie w przyszłości układu ogranicznika prądu o regulowanej wartości indukcyjności. Rozwiązanie takie pozwoli na ograniczenie maksymalnej wartości prądu rozruchowego oraz stworzy możliwość określenia czasu rozpędzania elementu ruchomego.

Literatura

- [1] Domin J.: Wyrzutnia elektromagnetyczna o napędzie cewkowym oraz o napędzie szynowym – modelowanie i badania symulacyjne. Mechatronika – analiza projektowanie i badania wybranych elementów i systemów. Wydawnictwo PAK, Warszawa 2013.
- [2] Domin J., Kroczyk R.: Ogranicznik prądu rozruchowego elektromagnetycznego modułu napędowego z szynami. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, 107/2015.
- [3] Egeland A.: Birkeland's electromagnetic gun: a historical review. IEEE TransPlasm., 17(2)/1989.
- [4] Fomicher V.P., Pravdin S.S.: Investigation of Discharge in a Railgun by means of Rogowski Coils. IEEE Trans. on Magnetics., 33(1)/1997.
- [5] Raczyński Z.: Model wyrzutni elektromagnetycznej. Szybkie Pojazdy Gąsienicowe, 1/2007.

Mgr inż. Tomasz Makowski
e-mail: Tomasz.Makowski@polsl.pl

Autor urodził się w 1990 roku. Wykształcenie wyższe techniczne zdobył na Politechnice Śląskiej na specjalności zastosowanie mechatroniki w inżynierii elektrycznej. Dyplom magistra uzyskał w 2014 roku. W tym samym roku rozpoczął studia III stopnia w katedrze mechatroniki Politechniki Śląskiej zarazem pracując w Ośrodku Badawczo – Rozwojowym Urzędzeń Mechanicznych „OBRUM” sp. z o. o. jako konstruktor elektronik.



otrzymano/received: 10.10.2015

przyjęto do druku/accepted: 31.03.2016