

dr hab. inż. Andrzej Kapłon, prof. PŚk
Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki
Politechnika Świętokrzyska
25-314 Kielce, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
akaplon@tu.kielce.pl, tel. 41 3424205

Kielce, 27 czerwca 2019 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Tomasza Makowskiego
**"Hybrydowe wyrzutnie wielomodułowe – modelowanie, charakterystyki sterowania
i analiza porównawcza"**

opracowana dla Rady
Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej

1. Tematyka, cel i zakres pracy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. *Hybrydowe wyrzutnie wielomodułowe – modelowanie, charakterystyki sterowania i analiza porównawcza*.

Przedłożona praca ma 165 stron, w tym 149 strony tekstu głównego, wykaz oznaczeń oraz zestawienie bibliograficzne obejmujące 91 pozycji.

Tematyka rozprawy dotyczy konstrukcji i modelowania hybrydowych wyrzutni wielomodułowych zawierających moduły pneumatyczne, cewkowe i elektromagnetyczne. Lokuje się ona zatem w obszarze mechatroniki z wyraźnym udziałem elektrotechniki.

Wyrzutnie elektromagnetyczne (*ElectroMagnetic Launcher*), nazywane również działami elektromagnetycznymi, elektromagnetycznymi układami miotającymi, bądź akceleratorami są specyficznym rodzajem przetwornika elektromechanicznego, działającego w sposób impulsowy.

Konstrukтором pierwszej wyrzutni elektromagnetycznej był Kristian Birkeland, który w oparciu o patent z 1900 r. skonstruował wyrzutnię (*electromagnetic-coil-gun*) składającą się z kilku cewek. Zasada działania wyrzutni elektromagnetycznej typu cewkowego oparta jest na wykorzystaniu siły reluktancyjnej powstającej w wyniku oddziaływania pola magnetycznego na element ferromagnetyczny umieszczony w tym polu. Poza wspomnianą wyrzutnią cewkową, inną konstrukcją jest wyrzutnia elektromagnetyczna typu szynowego (*electromagnetic-rail-gun*). W wyrzutni elektromagnetycznej typu szynowego z kolei wykorzystywana jest siła elektrodynamiczna (siła Lorentza) powstająca w wyniku wzajemnego oddziaływania pól elektrycznego i magnetycznego.

W pierwszej połowie XX wieku obserwuje się duże zainteresowanie tego typu problemami, o czym świadczy przyznanych ponad 45 patentów dotyczących różnych rozwiązań konstrukcyjnych wyrzutni. Po II wojnie światowej badania nad wyrzutniami były kontynuowane przez wiele ośrodków badawczych m.in. przez zespół naukowy pod kierownictwem Richarda Marshalla. Wyrzutnie elektromagnetyczne konstruowane są obecnie głównie w Stanach Zjednoczonych i Chinach do wykorzystania w marynarce wojennej, ale także w obronie przeciwlotniczej. Istotną zaletą jest niski koszt wyrzutu w porównaniu z konwencjonalnymi metodami zapewniającymi te same parametry, jak też duża prędkość wyrzutu. W 2014 r. amerykańska marynarka wojenna zaprezentowała publicznie w bazie morskiej San Diego nowej generacji działo elektromagnetyczne kalibru 155 mm zbudowane przez koncern BAE Systems. Działo elektromagnetyczne (rail-gun) wyrzuca pocisk z prędkością nawet do 7 Mach (czyli do ponad 10 000 km/h.). Daje to zarówno większy zasięg (ponad 200 km), jak i siłę rażenia (poprzez większą energię kinetyczną pocisku). Zwiększenie szybkości rażenia celu powoduje, że działo elektromagnetyczne może być wykorzystane w zwalczaniu rakiet balistycznych oraz manewrujących, w walce z okrętami nawodnymi oraz do wsparcia własnych sił lądowych. Chiny zapowiadają, że do 2025 roku jako pierwsze będą mieć gotowe do walki działo elektromagnetyczne. Z kolei Japończycy pochwalili się projektem działła elektromagnetycznego o zasięgu ponad 150 km.

Przewiduje się wzrastające znaczenie wyrzutni elektromagnetycznych w zastosowaniach militarnych, zwłaszcza jako dział elektromagnetycznych. Zaletą ich jest również bezpieczeństwo magazynowania pocisków (nie zawierają materiałów wybuchowych), których można dodatkowo magazynować więcej niż rakiet. Kolejną płaszczyzną poszukiwanych zastosowań są badania przestrzeni kosmicznej. Wyrzutnie elektromagnetyczne pozwalają również na prowadzenie badań związanych ze zjawiskami fizycznymi wymagającymi wielkich energii. Spektakularnym przykładem wykorzystania wyrzutni może być ich zastosowanie w akceleratorach.

Znaczący postęp w budowie wyrzutni elektromagnetycznych, związany z przepływami prądów o dużych wartościach w uzwojeniach wyrzutni cewkowych lub w szynach wyrzutni szynowych, dokonał się w związku z dynamicznym rozwojem energoelektroniki i powstaniem zasilaczy impulsowych oraz łączników dużej mocy. Duże znaczenie miał też postęp w technologii budowy nowych generacji kondensatorów dużej mocy (m.in. superkondensatorów).

Na początku XXI wieku pojawiły się pierwsze doniesienia dotyczące wyrzutni hybrydowych (Rail-Coil Hybrid Electromagnetic Launcher) składających się z dwóch lub trzech modułów o różnych zasadach działania.

Wyrazem systematycznego wzrostu zainteresowania rozwojem wyrzutni elektromagnetycznych jest cyklicznie organizowana przez IEEE konferencja *Electromagnetic*

Launch Technology Symposium, dedykowana wyłącznie wyrzutniom elektromagnetycznym. W 2018 r. odbyła się 19-ta edycja tej konferencji w Saint-Louis, Francja.

Działo elektromagnetyczne to obecnie jedna z najbardziej zaawansowanych technologii.

Wyrzutnie elektromagnetyczne są złożonymi systemami, które wymagają dalszego rozwoju i doskonalenia w miarę postępu w szczególności w obszarach energoelektroniki, układów pomiarowych i sterowania. Niebagatelne znaczenie będzie miał także rozwój układów zasilania i magazynów energii. Dotyczy to także zagadnień konstrukcyjnych szyn napędowych, doboru odpowiednich materiałów, w tym elektrotechnicznych.

Tematyka podjęta przez Autora rozprawy wpisuje się w nurt powyższych badań. Analizowane przez Doktoranta konfiguracje wyrzutni wielomodułowej dotyczą prototypu zbudowanego w zespołach badawczych prof. K. Kluszczyńskiego na Politechnice Śląskiej i Politechnice Krakowskiej.

Mgr inż. Tomasz Makowski w podjętej rozprawie postawił do zrealizowania szereg celów:

- *opracowanie rekonfigurowalnego modelu matematycznego wielomodułowej wyrzutni hybrydowej, pozwalającej na realizację szerokiego programu badań symulacyjnych.*
- *zdefiniowanie zbioru charakterystyk statycznych i dynamicznych opisujących w sposób wyczerpujący pracę hybrydowych wyrzutni wielomodułowych i możliwości ich sterowania.*
- *zdefiniowanie trybów pracy hybrydowej wyrzutni wielomodułowej, pozwalających na ustalenie zakresu zmian wielkości sterujących, ujednoczenie opisu właściwości wyrzutni oraz umożliwienie porównywania różnych wariantów połączeń modułów (różnych konfiguracji wyrzutni).*
- *opracowanie podstaw matematycznych dla tak zwanych drzew sterowań i gałęzi sterowań hybrydowych wyrzutni wielomodułowych, pozwalających na uproszczony graficzny opis różnych trybów pracy wyrzutni.*
- *zbadanie i wyjaśnienie wpływu prędkości początkowej pocisku na pracę modułu cewkowego*
- *przeprowadzenie analizy porównawczej różnych wariantów połączeń modułów (konfiguracji wyrzutni) ze względu na możliwość uzyskania maksymalnej prędkości pocisku przy uwzględnieniu różnych zakresów wielkości sterujących (trybów pracy).*

Dla realizacji powyższych celów Autor postawił tezę: ***Jest możliwe zdefiniowanie dla różnych konfiguracji hybrydowej wyrzutni wielomodułowej trybów pracy oraz statycznych i dynamicznych charakterystyk pozwalających na analizę różnych wariantów połączeń modułów napędowych (czyli różnych konfiguracji wyrzutni).***

Rozprawa doktorska zawiera dwanaście rozdziałów, wykaz ważniejszych symboli i skrótów oraz bibliografię. Brak jest streszczeń w językach polskim i angielskim.

We *Wstępie* (rozdział 1) omówiono zasadę działania oraz historię budowy wyrzutni elektromagnetycznych, przedstawiono przegląd możliwych zastosowań wyrzutni elektromagnetycznych oraz aktualne problemy badawcze. W rozdziale 2 przedstawiono tezę

i cele pracy. W rozdziale 3 opisano strukturę oraz elementy składowe 3-modułowej wyrzutni typu PCR (*Pneumatic/Coil/Rail*) jako reprezentatywnego przykładu hybrydowej wyrzutni wielomodułowej. Rozdział 4 poświęcono opracowaniu modeli symulacyjnych w środowisku LabVIEW dla poszczególnych modułów hybrydowej wyrzutni 3-modułowej typu PCR. Przedstawiono projektowe i wybrane parametryczne badania symulacyjne modułów. W rozdziale 5 przedstawiono kompleksowy rekonfigurowalny model matematyczny hybrydowej wyrzutni typu PCR umożliwiający analizę wybranej konfiguracji. Przedstawiono klasyfikację, opis działania, schemat blokowy i wizualizacja wyników możliwych wariantów połączeń modułów. Rozdział 6 poświęcono przebiegom prędkości pocisku dla pojedynczych modułów oraz drzewa sterowań dla hybrydowych wyrzutni typu PCR. Wprowadzono klasyfikację różnych wariantów drzew sterowań. W rozdziale 7 podano definicję pracy hybrydowej wyrzutni 3-modułowej typu PCR w trybach nominalnym oraz zredukowanym. W rozdziale 8 opisano metodologię analizy oraz przeprowadzono badanie współdziałania modułów napędowych o różnych zasadach działania na przykładzie hybrydowej wyrzutni 3-modułowej typu PCR. Rozdział 9 poświęcono analizie wpływu prędkości początkowej pocisku na pracę modułu cewkowego. W rozdziale 10 wprowadzono definicję pracy hybrydowej wyrzutni 3-modułowej typu PCR w trybie zrównoważonym. Analizę porównawczą różnych konfiguracji hybrydowych wyrzutni wielomodułowych w kontekście maksymalnej prędkości pocisku przeprowadzono w rozdziale 11. Rozdział 12 (*Podsumowanie*) stanowi komentarz do przeprowadzonych prac symulacyjnych. Zawiera podsumowanie osiągnięć Autora rozprawy a także nakreśla kierunki dalszych badań.

Sposób podejścia do przedstawionego problemu w zakresie wyboru metod i analizy należy uznać za poprawny. Przedstawiono jedynie badania symulacyjne, nie mniej jednak zbudowane modele poszczególnych modułów wyrzutni zostały zweryfikowane doświadczalnie. Tematykę rozprawy należy uznać za zagadnienie dalej aktualne.

2. Istotne osiągnięcia i wyniki oraz krytyczne uwagi merytoryczne i dyskusyjne.

Najistotniejszymi z punktu widzenia tematu pracy są rozdziały 4, 5 i 6, które Autor poświęcił opracowaniu i badaniom modeli symulacyjnych dla poszczególnych modułów hybrydowej wyrzutni.

Zaproponowaną przez mgra Tomasza Makowskiego implementację w graficznym środowisku programistycznym LabView tzw. drzewa sterowań odcinkowo liniowych charakterystyk modułów uważam za istotne osiągnięcie Autora.

Drzewo sterowań w sposób uproszczony i syntetyczny opisuje pracę różnych konfiguracji modułów przy różnych wartościach zmiennych sterujących i przy różnych wartościach prędkości

początkowych pocisku. Umożliwia łatwe i szybkie porównanie wielu różnych przypadków nastaw zmiennych sterujących wyrzutni hybrydowej, pozwala łatwo określić wkład poszczególnych modułów w rozpędzaniu się pocisku, jak też określić prędkość końcową (wylotową) pocisku dla różnych sterowań.

Autor posługuje się, zaczerpniętymi z literatury modelami matematycznymi poszczególnych modułów wyrzutni. Przedstawione w pracy modele matematyczne nie są pełne. I tak, dla modułu cewkowego (str. 47) w modelu (4.3) brak wyrażenia na siłę $F^C(x^C, i^C)$ wiążącego równanie stanu elektromagnetycznego z równaniem stanu mechanicznego (równanie ruchu) - **uwaga A**. Podobnie dla modułu cewkowego (str. 59) w modelu (4.4) brak wyrażenia na siłę $F^R(x^R, i^R)$ wiążącego równanie stanu elektromagnetycznego z równaniem stanu mechanicznego (równanie ruchu) - **uwaga B**. Zapewne w badaniach symulacyjnych Autor korzystał z pełnych modeli dla obu modułów.

Wartości współrzędnej globalnej w punktach x_c i x_d nie są prawidłowe (str. 75) – **uwaga C**. Częściowo powyższe dotyczy oznaczeń na Rys. 5.3. Poza tym grafika przemieszczenia pocisku nie odpowiada kolejności zaznaczonej na trajektorii pocisku powyżej.

Przybliżenie modułu szynowego w postaci funkcji liniowej wydaje się problematyczne – rysunki 6.3c i 6.2c – **uwaga D**. Czy nie należałoby poszukać innej, bardziej adekwatnej zależności, np. wykładniczej.

Wyniki badań symulacyjnych wykazują zalety prowadzonej tak analizy w kontekście optymalizacji wyrzutni hybrydowej.

Interesującą analizę przedstawił Doktorant w rozdziale 9-tym, poświęconą wpływowi prędkości początkowej na pracę zarówno modułu cewkowego jak i modułu szynowego, chociaż w tytule rozdziału wskazany jest tylko moduł cewkowy. Obie analizy przeprowadzono w oparciu o badania symulacyjne. Szkoda, że Autor nie podjął próby ujęcia tych zagadnień w formie analitycznej, nawet uproszczonej, co zapewne byłoby przydatne z punktu widzenia konstrukcyjnego - **uwaga E**.

Odczuwa się także pewien niedosyt zebranych wniosków z przedstawionych w tym rozdziale rozważań w kontekście optymalizacji konfiguracji wyrzutni hybrydowej - **uwaga F**. Częściowo te zagadnienia zostały omówione w dwóch następnych rozdziałach.

Za oryginalny dorobek mgr inż. Tomasza Makowskiego należy niewątpliwie uznać:

- opracowanie rekonfigurowalnego modelu matematycznego wielomodułowej wyrzutni hybrydowej, pozwalającego na realizację szerokiego programu badań symulacyjnych,
- opracowanie podstaw matematycznych drzew sterowań i gałęzi sterowań hybrydowych wyrzutni wielomodułowych, pozwalających na uproszczony graficzny opis różnych trybów pracy wyrzutni,

- zdefiniowanie trybów pracy hybrydowej wyrzutni wielomodułowej, pozwalających na ustalenie zakresu zmian wielkości sterujących.

W bibliografii znalazłem trzy publikacje współautorstwa Autora. Autor nie odnosi wyników rozprawy do swoich wcześniejszych opublikowanych prac. Takie porównanie stworzyłoby możliwość pełniejszej oceny osiągniętych przez Autora wyników rozprawy na tle wyników innych prac, w tym własnych - uwaga G.

3. Uwagi dodatkowe

Poniżej uwagi związane bezpośrednio z wydrukowaną rozprawą lub te, które nie znalazły się w części 2 Recenzji (*Istotne osiągnięcia i wyniki oraz krytyczne uwagi merytoryczne i dyskusyjne*) związanej z dyskusją.

Uwaga generalna: w literaturze *przebiegi* dotyczą zmienności funkcji w czasie. Niewłaściwe jest więc używanie *charakterystyki czasowe, przebiegi czasowe*.

Uwagi redakcyjne

1. W rozdz. 7 Autor używa pojęć *nominalna* i *dopuszczalna*, jako równoważne. Wydaje się to wielce dyskusyjne, a jednocześnie oba terminy są mało precyzyjne technicznie.

Praca napisana jest poprawnie i zredagowana starannie. Przedstawione wyżej uwagi dyskusyjne i dodatkowe mają w głównej mierze charakter porządkujący oraz dyskusyjny i nie umniejszają głównych wyników rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Mgr inż. Tomasz Makowski w przedłożonej pracy pt. *Hybrydowe wyrzutnie wielomodułowe – modelowanie, charakterystyki sterowania i analiza porównawcza* wykazał, że umie postawić i samodzielnie rozwiązać oryginalny problem badawczy.

Rezultaty pracy, będące wynikiem obszernego i kompleksowego programu badań symulacyjnych mogą zostać wykorzystane dla celów projektowych. Osiągnięcie tych rezultatów wymagało pogłębionej wiedzy Doktoranta z zakresu elektrotechniki. Tym samym potwierdził, że posiada kwalifikacje do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Cele rozprawy, które Autor sobie postawił zostały osiągnięte. Uwagi krytyczne związane z Rozprawą doktorską nie zmniejszają jej wartości, a tym samym nie wpływają na końcową

pozytywną moją ocenę w kontekście art. 13, pkt. 3 Ustawy.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona praca spełnia w pełni wymagania stawiane rozprawom doktorskim w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r., a w szczególności art. 13, pkt. 3 oraz w artykule 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz.U. 2018 poz. 1668), i przedstawiam Wysokiej Radzie Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej wniosek o dopuszczenie mgra inż. Tomasza Makowskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej.

