

Prof. dr hab. inż. Jan Awrejcewicz

Katedra Automatyki, Biomechaniki I Mechatroniki

Politechnika Łódzka

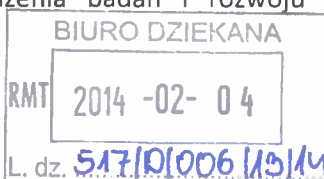
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

DZIEKAN  
Wydziału Mechanicznego Technologicznego  
prof. dr hab. inż. Arkadiusz Mezyk

**Ocena pracy doktorskiej mgr. inż. Adriana Zbilskiego  
pod tytułem „Metoda analizy energochłonności technologicznych procesów  
transportu i manipulacji”.**

Recenzowana rozprawa doktorska została zredagowana na 175 stronicach, z podziałem na siedem rozdziałów. W treści znajduje się 118 odniesień do pozycji literaturowych, w większości anglojęzycznych. Najstarsza pozycja pochodzi sprzed 24 lat, natomiast 74 pozycje pochodzą sprzed ostatnich 14 lat. Pięć pozycji jest współautorstwa Doktoranta. Praca została uzupełniona dwoma dodatkami, obejmującymi odpowiednio 16 i 8 stron. Zastosowane oraz wyprowadzone zależności matematyczne zostały opisane za pomocą 254 ponumerowanych równań. W tekście zamieszczono 94 rysunki oraz 46 tablic, w tym dziewięć rysunków i dwadzieścia tablic znajduje się w dodatku pierwszym, natomiast 14 rysunków zamieszczono w dodatku drugim.

Zasadniczą treść pracy poprzedza wykaz ważniejszych oznaczeń i wprowadzenie do zagadnienia energochłonności w środowisku przemysłowym. Pierwsza część pracy zawiera informacje na temat obecnie istniejących, technicznych środków redukcji poboru energii oraz technik jej analizy, dokonywanych podczas audytów energetycznych. Zawarte dane informują o potencjalnych możliwościach najważniejszych technik redukcji poboru energii, stosowanych obecnie w systemach napędowych. W dalszej części Doktorant opisał zbiór znanych Mu przykładów przeprowadzonych dotychczas modernizacji linii produkcyjnych kilku krajowych i zagranicznych zakładów przemysłowych, dokonanych w celu obniżenia energochłonności wybranych procesów technologicznych. Przedstawił On również akceptowalne i ekonomicznie uzasadnione zakresy uzyskanych efektów, które stanowią punkt odniesienia do wyników uzyskanych przez Doktoranta w opiniowanej pracy. Wstęp rozprawy doktorskiej Autor zakończył informacjami, dotyczącymi wyników dotychczas prowadzonych prac badawczych w zakresie energochłonności, a w szczególności wyników tego typu prac w obszarze robotyki. Wszystkie przytoczone przez Doktoranta informacje oraz przykłady formułują genezę problemu i wykazują zasadność podjęcia się przez Niego prowadzenia badań i rozwoju metod redukcji poboru energii w systemach transportowych



i manipulacyjnych oraz metod szczegółowej analizy jej dystrybucji, ze względu na niewykorzystywane w pełni możliwości racjonalizacji poboru energii elektrycznej. W związku z tym Doktorant, podsumowując wstęp do pracy, przedstawił własną koncepcję badań i rozwoju metod redukcji poboru energii, którym podporządkował opracowaną przez siebie metodę analizy energochłonności procesów technologicznych transportu i manipulacji.

Rozdział drugi rozprawy zawiera sformułowanie celu pracy, opis zastosowanej metodyki oraz zakresu badań, w postaci szczegółowego wykazu tych zadań oraz tezę pracy w następującej postaci:

*„Szczegółowa analiza dystrybucji energii elektrycznej zasilania i jej przetworzenia na energię użyteczną wewnątrz maszyny transportowej lub manipulacyjnej, może być podstawą zdefiniowania działań, prowadzących do redukcji poboru energii, bez konieczności modernizacji sprzętowej maszyny”.*

W rozdziale tym Doktorant dokonał wyboru obiektu badań, w postaci robota przemysłowego o sześciu stopniach swobody, z sześcioma obrotowymi parami kinematycznymi, reprezentującego system transportowy i manipulacyjny. Ostatni fragment pracy stanowi przegląd jej treści.

Zgodnie z opracowaną przez siebie metodą, w rozdziale trzecim Doktorant zamieścił wyniki analizy budowy przyjętego obiektu badań, przeprowadzonej w celu wyselekcjonowania wszystkich czynników, wpływających w stopniu istotnym na pobór energii elektrycznej. Większość rozdziału Autor poświęcił podsumowaniu prac nad modelem analitycznym maszyny, umożliwiającym prowadzenie badań energochłonności wybranych czynników. W ramach tego rozdziału Doktorant opisał przyjęte lokalne układy współrzędnych robota, zapis macierzy rotacji oraz macierzy transformacji. W kolejnej części rozdziału Autor wyprowadził zależności, określające parametry kinematyczne członów robota w przestrzeni trójwymiarowej, z zastosowaniem techniki rekurencji prostej, wchodzącej w skład metody Newtona-Eulera (NE). Na podstawie opracowanych zależności Doktorant rozwiązał odwrotne zadanie dynamiki robota. Wynikiem tej części pracy są zależności na momenty oporów dynamicznych, obciążających wały silników badanego robota. Rozdział został zakończony wyprowadzonymi przez Doktoranta zależnościami na momenty cząstkowe, rozwijane na wałach silników, które zostały zastosowane do szczegółowej analizy energochłonności.

Rozdział czwarty Doktorant poświęcił zagadnieniu identyfikacji wartości parametrów dynamicznych badanego obiektu. We wstępie do rozdziału dokonał On analizy literatury oraz dostępnych Mu wyników badań, przeprowadzonych w tym obszarze w wielu ośrodkach badawczych na świecie. Z uwagi na duży stopień złożoności procesów identyfikacji parametrów dynamicznych robotów Doktorant uzasadnił podjęte decyzje, dotyczące przyjętej strategii realizacji tego typu zadania w rozprawie. W związku z przyjętymi założeniami opisał On zastosowaną w rozprawie metodykę szacunkowej identyfikacji poszukiwanych wartości wymaganych parametrów,

na podstawie średnich statystycznych wartości zidentyfikowanych w podobnych maszynach. Do identyfikacji wszystkich parametrów dynamicznych zastosował identyczną technikę, którą za każdym razem odpowiednio adaptował do swoich potrzeb. Można zauważyć, że główna idea Doktoranta opiera się tu na określeniu wspólnych punktów odniesienia w modelowanej oraz analizowanej maszynie, a następnie wyznaczeniu średnich statystycznych relacji, zachodzących między punktami odniesienia oraz zidentyfikowanymi parametrami. Średnie statystyczne relacje Doktorant zastosował w procesie szacunkowej identyfikacji, za pomocą której wyznaczył masy członów, położenia ich środków ciężkości oraz masowe momenty bezwładności. W następnej części rozdziału Doktorant opisał przeprowadzony przez siebie proces rekonstrukcji statycznych charakterystyk tarcia wiskotycznego w przegubach robota. W ostatniej części Doktorant przedstawił technikę szacunkowej rekonstrukcji map strat mocy systemów energoelektronicznych oraz silników robota. Całość zakończył przytoczeniem danych uzupełniających.

Piąty rozdział rozprawy Doktorant poświęcił opisowi opracowanego systemu sterowania modelem numerycznym badanego robota. Uzasadniając celowość wykonania kolejnych części układu sterowania, Doktorant opisał wszystkie jego podsystemy, do których zaliczył system generowania profili prędkości i położenia, interpolator ruchu liniowego, interpolator ruchu ogólnego, system generowania sygnału zadanego rotacji, system obliczający odwrotne zadanie kinematyki według autorskiej metody oraz układ regulacji położenia, prędkości i momentu napędowego. Opracowany systemy Doktorant poddał wielu cyklom badań, pod kątem skuteczności i poprawności działania, a także w celu doboru odpowiednich wartości nastaw zastosowanych członów układu regulacji. Rozdział zakończył opisem wyników badania, weryfikującego stabilność opracowanego systemu sterowania.

Szósty rozdział rozprawy zawiera opis ostatnich działań Doktoranta, realizowanych w ramach opracowanej metody analizy energochłonności technologicznych procesów transportu i manipulacji. Zamieszczony na początku schemat podsumowuje wszystkie działania proponowane w opracowanej metodzie, natomiast dalsza część rozdziału obejmuje wyniki pracy nad realizacją przykładu analizy energochłonności wybranego procesu. Zgodnie ze schematem analizy energochłonności w rozdziale tym Doktorant opisał model analityczny do analizy energochłonności, elementarne reguły jej redukcji, odpowiadające badanej maszynie oraz model numeryczny, umożliwiający badanie energochłonności procesów w sposób zautomatyzowany. W dalszej części rozdziału Doktorant zredagował wyniki analizy energochłonności wybranego procesu technologicznego, na podstawie których wyspecyfikował trajektorię energooszczędną. W celu weryfikacji uzyskanych wyników Autor przeprowadził numeryczne badania energochłonności wybranego procesu technologicznego, w ramach których zidentyfikował jednoznacznie trajektorię energooszczędną oraz opracował wydajnościowe charakterystyki energochłonności trajektorii i kosztów pobranej energii.

W celu weryfikacji opracowanego przez siebie modelu numerycznego i modelu analitycznego, oraz procesu szacunkowej identyfikacji parametrów badanej maszyny i wyników przeprowadzonych badań numerycznych, Doktorant przeprowadził badania doświadczalne. Uzyskane wyniki zestawiał w celu ich wzajemnego porównania, a następnie opisał analizę uzyskanych rezultatów.

Rozdział siódmy pracy stanowi podsumowanie prowadzonych działań, w ramach którego Doktorant wskazuje kierunki dalszego rozwoju opracowanej metody oraz uzasadnia słuszność prowadzenia badań i rozwoju metod redukcji poboru energii w systemach transportowych i manipulacyjnych.

Praca jest zakończona streszczeniami w języku polskim oraz angielskim.

W pracy można dopatrzeć się następującego oryginalnego wkładu Autora, choć często dyskusyjnego (patrz uwagi krytyczne):

- (i) wskazanie na możliwości redukcji poboru energii w systemach transportowych i manipulacyjnych, poprzez odpowiedni dobór wartości parametrów kinematycznych ich pracy;
- (ii) opracowanie modelu analityczno-numerycznego robota przemysłowego, umożliwiającego prowadzenie badań energochłonności jego pracy w sposób w pełni zautomatyzowany;
- (iii) opracowanie techniki szacunkowej identyfikacji parametrów dynamicznych badanej maszyny z zastosowaniem jedynie danych katalogowych oraz statystycznych relacji między nimi;
- (iv) wskazanie na metody rozwiązywania odwrotnego zadania kinematyki robota przemysłowego;
- (v) sformułowanie własnych technik obliczania ilości strat mocy w postaci ciepła z zastosowaniem danych katalogowych, dotyczących sprawności elektrotechnicznej silników elektrycznych oraz zasilających je systemów energoelektronicznych.
- (vi) opracowanie techniki działania interpolatora ruchu ogólnego z zastosowaniem systemu generowania profili prędkości i położenia punktu TCP robota,
- (vii) opracowanie i weryfikacja układu sterowania pracą modelu numerycznego;
- (viii) opracowanie zbioru mniejszych podsystemów oraz programów komputerowych, służących do sterowania pracą numerycznego modelu robota oraz do realizacji numerycznych eksperymentów.

Pomimo zalet pracy opisanych wcześniej, podczas czytania tekstu nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne merytoryczne (uwagi dotyczące stylu pracy, jej poprawności gramatycznej zostały pominięte, bowiem są one nieliczne):

- (i) Wykaz ważniejszych oznaczeń (str. 6) budzi wątpliwości, bo nie są zachowane jednostki SI (długości podane są w mm), a ponadto niektóre nowo wprowadzone pojęcia

występujące w pracy nie są ujęte w wykazie ważniejszych oznaczeń. Wektory  $\omega_i$  powinny być wyrażone w rad/s a nie w rad;

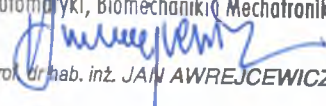
- (ii) Autor nie trzyma się konsekwentnie zapisu wektorowego poprzez użycie pogrubionych liter, co prowadzi do nieporozumień;
- (iii) Wprowadzenie relacji geometrycznych jako wektorów wierszowych prowadzi do wątpliwości związanych z dalszymi przekształceniami wektorowymi;
- (iv) Równania wektorowe w rozdziale 3 pojawiają się nagle i nie zostały logicznie wprowadzone;
- (v) Wyjaśnienia wymaga pierwsze zdanie na str. 35;
- (vi) Autor używa pojęć „tarcie wiskotyczne”, „tarcie suche”, „tarcie hydrodynamiczne” ze wskazaniem „specyficznego przegięcia charakterystyki ku dołowi” (str. 54/55), co odbiega od powszechnie stosowanej klasyfikacji tarcia w podręcznikach krajowych dotyczących mechaniki;
- (vii) Wygląda na to, że Autor korzysta z pracy doktorskiej [112] i przytacza niektóre z pojawiających się tam równań (str. 59), ale bez krytycznego ich opisu i chyba bez pełnego zrozumienia (np. czym różnią się równania (4.36) i (4.37), co oznaczają użyte tam symbole i jaki wpływ na dynamikę układu mają części odpadające charakterystyk przedstawionych na rys. 4.13?);
- (viii) Nie wiadomo skąd pojawiły się równania (5.10)-(5.14) i w jaki sposób można je sprawdzić przy niewystarczającym opisie pojawiających się tam macierzy i błędnego stosowania liter pogrubionych i cienkich;
- (ix) Zdanie na str. 84 <sup>7-8</sup> wymaga wyjaśnienia;
- (x) Trudno mi sprawdzić poprawność równań (6.1) do (6.37) ze względu na pojawiający się tam niejasny zapis (np. (6.3), (6.22), (6.31)).

### Opinia końcowa

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska może być dopuszczona do obrony publicznej w dyscyplinie „Budowa i Eksploatacja Maszyn” zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. Nr 65 poz. 595 z 2003 z późniejszymi zmianami).

Uwagi krytyczne zawarte w treści mej opinii dotyczą w większości umiejętności posługiwania się rachunkiem wektorowym i mogą być wyjaśnione podczas publicznej obrony przed Komisją przewodu doktorskiego, bowiem dotyczą podstaw mechaniki klasycznej.



KIEROWNIK KATEDRY  
Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki  
  
prof. dr hab. inż. JAWA AWREJCEWICZ