

dr hab. inż. Gabriel Kost, prof. nzw. w Pol. Śl.  
Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych  
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Śląska w Gliwicach

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej**  
**mgr inż. Adriana ZBILSKIEGO**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Adriana ZBILSKIEGO, pt. „Metoda analizy energochłonności technologicznych procesów transportu i manipulacji” opracowana na podstawie:

- uchwały Rady Wydziału Mechanicznego Technologicznego z dnia 15 stycznia 2014 roku,
- pisma Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego z dnia 16.01.2014 (RMT0-423/D/006/13/14).

**1. Zakres tematyczny rozprawy**

Poziom energochłonności procesów produkcyjnych staje się jednym z podstawowych kryteriów projektowania procesu technologicznego przygotowania produkcji w zakresie doboru i konstruowania urządzeń technologicznych, realizacji procesu technologicznego i procedur sterowania produkcją. Firmy produkcyjne poszukują metod i urządzeń pozwalających ograniczać zużycie energii w procesie technologicznym, często dokonując reorganizacji samego procesu technologicznego drogą wymiany urządzeń, czy systemów zasilania na bardziej energooszczędne, widząc w tym możliwość obniżenia kosztów produkcji, a przez to możliwość podniesienia poziomu swojej konkurencyjności na rynku. Jednak podstawą takich działań jest określenie poziomu potrzeb energetycznych realizowanego procesu technologicznego. Brak sprawdzonych, uznanych przemysłowych metod oceny energochłonności realizowanego procesu technologicznego, poza ogólnymi wytycznymi sprawia, że ocena ta oparta jest zazwyczaj na prostym, tworzonym intuicyjnie

bilansie energetycznym wynikającym z sumowania zapotrzebowania na energię przez urządzenia realizujące ten proces.

Doktorant, wpisując się w ramy tych zagadnień, podjął się zadania opracowania metodycznej techniki rozpoznawania nieefektywnych energetycznie stanów pracy maszyny, na przykładzie robota przemysłowego, jako maszyny transportowej i manipulacyjnej. Uwzględniając obecne światowe trendy rozwoju metod obniżania kosztów produkcji, poprzez redukcję ich energochłonności, można uznać zrealizowaną pracę Autora za aktualną. W szczególności zagadnienia ograniczania ilości zużywanej energii znajdują zastosowanie w technikach napędowych, co obejmuje także obszar robotyki. Opisane szeroko przez Doktoranta osiągnięcia przemysłowe oraz naukowe w tym zakresie wykazują istnienie możliwości przedsięwzięć, podejmowanych w celu redukcji energochłonności procesów transportowych i manipulacyjnych. Przytoczone w pracy znane techniczne środki redukcji poboru energii wyczerpują zakres tego typu podstawowych działań w obszarze eksploatacji maszyn. Prowadzi to do wniosku, że dalszy rozwój technik obniżania poboru energii w systemach transportowych i manipulacyjnych wymaga realizacji precyzyjnych badań stanów pracy wybranej maszyny. Z tego względu, zaproponowaną przez Doktoranta metodę, umożliwiającą realizację szczegółowej analizy dystrybucji energii wewnątrz systemu napędowego i identyfikowanie czynników, które wpływają najsilniej na pobór energii w wybranym procesie, można uznać za innowacyjną.

## **2. Treść rozprawy i jej kompozycja**

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 7-miu rozdziałów oraz dwóch dodatków (łącznie 175 stron). Wykaz pozycji literaturowych liczy 118 pozycji z zakresu robotyki i technik badawczych stosowanych w tym obszarze. Doktorant jest współautorem 5 pozycji. Wyniki badań, opracowane schematy podsystemów modeli numerycznych i różnego rodzaju charakterystyki, przedstawiono za pomocą 94 rysunków i 46 tabel zawartych w pracy jak i dodatkach.

Celem naukowym niniejszej rozprawy doktorskiej było, cytując:

*„[...] wykazanie możliwości redukcji poboru energii elektrycznej w zautomatyzowanych systemach transportowych i manipulacyjnych bez konieczności wdrażania modernizacji sprzętowej.”*

Obiektem badań Doktoranta był robot przemysłowy Fanuc AM100iB, o sześciu stopniach swobody oraz sferycznej przestrzeni roboczej. W ramach pracy badawczej, Doktorant opracował kompleksowy model numeryczno-analityczny badanego obiektu,

który opisał w rozdziale trzecim dysertacji. Strukturę modelu zorientował On na możliwość realizacji komputerowych symulacji stanów pracującej maszyny, za pomocą których oblicza wartości parametrów kinematycznych jej członów, momentów napędowych na wałach silników, rozwijanych mocy mechanicznych, oraz wydatkowanej energii mechanicznych. W celu opracowania modelu dynamicznego robota, Autor zastosował metodę Newtona-Eulera oraz notację Denavita-Hartenberga. Opracowany model umożliwia obliczanie strat mocy i ilości energii emitowanej w postaci ciepła przez silniki robota i jego systemy energoelektroniczne. W tym elemencie budowy modelu, Doktorant zaproponował własny sposób obliczania ilości strat mocy, emitowanej przez systemy napędowe, pracujące podczas rozwijania momentu trzymającego oraz podczas typowej pracy silnikowej. Zaproponowane rozwiązanie jest spójne z zapisem bilansu energetycznego oraz uwzględnia znaczenie sprawności elektrotechnicznej w pełnym zakresie momentu i prędkości kątowej badanych napędów. W rozdziale czwartym Autor poparł przeprowadzone w tym zakresie rozważania odpowiednim zapisem analitycznym. Opisał również własną technikę identyfikacji wartości parametrów dynamicznych badanego robota, którą oparł na wynikach prac innych zespołów badawczych. Zestawione wyniki Doktorant poddał unifikacji i przetworzył do postaci umożliwiającej wykonanie szacunkowej identyfikacji poszukiwanych parametrów badanego obiektu oraz jego charakterystyk. W ramach przygotowań do badań numerycznych Doktorant poświęcił dużą część rozprawy na zrekonstruowanie charakterystyk tarcia wiskotycznego w przegubach badanego robota. Swoje badania oparł na wiedzy z zakresu trybologii napędów stosowanych w robotyce, którą wykorzystał podczas opracowania własnych modeli numerycznych do obliczania wartości momentów sił tarcia w przegubach robota. W celu przygotowania modelu numerycznego maszyny do dalszych badań oraz szczegółowej identyfikacji jej parametrów, Doktorant opracował i zaimplementował dynamiczny model tarcia w przegubach maszyny i przedstawił sposób jego zastosowania.

Doktorant przeprowadził badania numeryczne w sposób w pełni zautomatyzowany, dzięki zastosowaniu komputerowych technik wspomaganie obliczeń inżynierskich - CAE. Podejście to jest konsekwencją przyjętych w pracy założeń, dotyczących metodycznej formy prowadzenia analiz energochłonności procesów transportowych i manipulacyjnych. Aby sposób realizacji badań był spójny z przyjętymi założeniami, Autor rozprawy opracował model numeryczny systemu sterowania modelem robota. W tym celu opracował kaskadową strukturę układu regulacji położenia kątowego, prędkości kątowej oraz momentu napędowego, sterującego położeniem członów modelu maszyny, co zostało opisane w rozdziale piątym. W systemie sterowania Autor zastosował pętlę

sprzężenia w przód (*Feed Forward - FF*), opracowaną na podstawie modelu dynamicznego, którą wprowadził w celu poprawy wydajności obliczeniowej. Wartości sygnałów zadanych położenia wałów silników Doktorant oblicza za pomocą autorskiego zespołu współpracujących podsystemów, do których należą system generowania profili prędkości, system generowania sygnału zadanego rotacji, interpolator liniowy i interpolator ruchu ogólnego oraz system do obliczania odwrotnego zadania kinematyki robota. Opracowane przez Doktoranta systemy sterowania, zapewniające stabilną pracę modelu, zostały oparte na modyfikacji tego typu układów, znajdujących zastosowanie w technikach napędowych. Wybrana w ten sposób struktura układu sterowania została następnie odpowiednio zmodyfikowana na podstawie wieloetapowej weryfikacji stabilności wszystkich podsystemów napędowych, badanych odrębnie za pomocą dużej ilości testów.

Opracowany model numeryczny umożliwił realizację zbioru symulacji stanów pracy badanej maszyny w sposób zautomatyzowany. Metodykę badań oraz ich wyniki Doktorant opisał w rozdziale szóstym. Wstęp rozdziału stanowi podsumowanie działań, proponowanych przez Doktoranta w ramach realizacji szczegółowej analizy energochłonności procesu transportu i manipulacji. Wszystkie etapy, zabiegi oraz sposób badania dystrybucji energii, Autor zestawiał w postaci schematu, któremu podporządkowana jest cała rozprawa, będąca przykładem zastosowania opracowanej metody. W dalszej części rozdziału, Autor zamieścił wyrażenia analityczne, zaimplementowane w opracowanym modelu numerycznym do obliczania mocy mechanicznych na wałach silników, wydatkowanej energii mechanicznej, pobieranej ilości energii elektrycznej oraz wartości strat mocy i ilości energii emitowanej w postaci ciepła a także koszty pobranej energii elektrycznej. Opracowany model, Doktorant zintegrował z modelem numerycznym robota oraz programami napisanymi w języku proceduralnym. Do oceny energochłonności badanych czynników, wpływających na pobór energii w badanym robocie Autor, zgodnie z przyjętą metodą, opracował zbiór odpowiednich wskaźników. W celu określenia działań na rzecz redukcji poboru energii w sposób metodyczny, Doktorant opracował zbiór elementarnych reguł, określających sposób modyfikacji parametrów kinematycznych członów maszyny. W rozdziale szóstym został również zaproponowany sposób dalszego rozwoju metody, w kierunku algorytmizacji i komputeryzacji procesu decyzyjnego, dotyczącego właściwego wyboru oraz stopnia modyfikacji parametrów kinematycznych maszyny, za pomocą odpowiednich elementarnych reguł.

Przeprowadzone badania energochłonności wybranego procesu technologicznego transportu i manipulacji, polegały na wykonaniu zbioru symulacji, badających przestrzeń

roboczą wokół liniowej trajektorii odniesienia, oraz określeniu zależności między wydajnością pracy maszyny i jej energochłonnością. W ramach tego etapu, Doktorant opisał przykład sposobu zastosowania wyników analizy dystrybucji energii, do zidentyfikowania energooszczędnej trajektorii przejazdu robota. Ponadto, uzyskane wyniki, Autor zastosował do zidentyfikowania energooszczędnej wydajności pracy robota, podczas przejazdu wzdłuż trajektorii odniesienia. Uzyskane rezultaty, Doktorant zweryfikował za pomocą badań numerycznych oraz badań praktycznych.

Stałe fragmenty pracy obejmują wprowadzenie do najistotniejszych zagadnień z obszaru badań poboru energii oraz dostępnych obecnie technicznych środków jej redukcji, genezę dostrzeżonego problemu oraz wykazanie zasadności realizacji podjętych badań i wykaz ważniejszych oznaczeń zastosowanych w rozprawie. Kolejne rozdziały zawierają sformułowanie tezy pracy, wybór obiektu oraz opis metodyki przeprowadzonych badań i przegląd treści pracy. Ostatni, siódmy rozdział rozprawy, zawiera jej podsumowanie oraz wnioski, dotyczące możliwości dalszego rozwoju. Znajdujący się na końcu pracy pierwszy dodatek zawiera zbiór tabel z wartościami parametrów wielu robotów przemysłowych oraz badawczych, zidentyfikowanymi przez zespoły badawczo-rozwojowe z całego Świata. Ponadto w dodatku zamieszczono szacunkowo zidentyfikowane wartości parametrów badanego robota oraz zrekonstruowane charakterystyki jego podzespołów. Dodatek drugi, zawiera wyniki cząstkowych badań podsystemów opracowanego modelu numerycznego robota.

### **3. Oryginalne osiągnięcia**

Wziąwszy pod uwagę złożoność problemu badawczego, sposób jego rozwiązania, uważam, że przedstawiona do oceny rozprawa ma duże walory poznawcze i zasługuje na wysoką ocenę. U podstawy wszystkich oryginalnych osiągnięć Autora pracy leży opracowany numeryczny model robota przemysłowego i jego systemu sterowania. Jako oryginalne elementy pracy uważam:

- wskazanie obszaru nie podejmowanych dotychczas badań w zakresie optymalizacji zużycia energii w systemach transportowych i manipulacyjnych. Przeprowadzone badania, wykazały poprawność przejętej tezy,
- opracowanie numerycznego modelu robota, umożliwiającego badanie energochłonności jego pracy, za pomocą pełnego zestawu wymaganych danych, wraz z szacunkową identyfikacją jego parametrów oraz charakterystyk, co pozwala na prowadzenie badań:

- nad wpływem wszystkich istotnych czynników na energochłonność procesów transportowych i manipulacyjnych wybranej maszyny,
- nad rozwojem metod redukcji poboru energii, m.in. dzięki pokazaniu sposobu dystrybucji energii w układzie napędowym robota,
- prowadzenie dowolnych eksperymentów numerycznych, przygotowanych w postaci programów komputerowych, napisanych w języku proceduralnym.

Opracowany model z uwagi na kompleksową formę generowanych informacji, umożliwił także na:

- opracowanie procedur badania energochłonności maszyn transportowych i manipulacyjnych, umożliwiających uzyskanie analitycznego zapisu wskaźników sterujących elementarnymi regułami redukcji poboru energii, które umożliwiają dalszy rozwój metody w kierunku komputeryzacji procesów decyzyjnych,
- projektowanie i prowadzenie badań numerycznych oraz praktycznych, mających na celu wykazanie słuszności przyjętej tezy rozprawy oraz wykazanie zakresu redukcji poboru energii, możliwego do uzyskania za pomocą jej racjonalnego wydatkowania.

Autor rozprawy duży nacisk położył także na uzasadnienie słuszności podejmowanych przez siebie badań, poprzez wykazanie ekonomicznie akceptowalnych zakresów redukcji poboru energii, uzyskiwanych w środowisku przemysłowym i porównanie ich z uzyskanym podczas badań wynikami.

Dodatkowo należy zwrócić uwagę na:

- staranne zredagowanie pracy oraz sposobu przedstawiania uzyskanych wyników,
- dużą wiedzę Autora z zakresu zastosowania technik komputerowo-wspomaganych obliczeń inżynierskich – CAE i programowania,
- dużą wiedzę Autora z zakresu modelowania dynamiki oraz kinematyki robotów i manipulatorów oraz umiejętność samodzielnego rozwiązywania zagadnień związanych z podejmowaną dziedziną nauki.

W ogólnym ujęciu przedstawiona do oceny praca przedstawia wysoki poziom merytoryczny. Omawiane w niej zagadnienia przedstawione zostały w sposób całościowy i logicznie spójny. Forma prezentowania materiału, też nie budzi zastrzeżeń.

#### **4. Uwagi szczegółowe**

W pracy można wskazać kilka niedociągnięć. Nie obniżają one mojej wysokiej oceny uzyskanego rozwiązania, gdyż często wynikają z niemożności pozyskania odpowiednio precyzyjnych informacji dotyczących danych, jak i stosowanych rozwiązań w zakresie układu napędowego maszyn manipulacyjnych. I tak można wskazać na:

- brak szczegółowej identyfikacji parametrów dynamicznych badanej maszyny. Zastosowana technika identyfikacji pozwala obliczać jedynie wartości, średnie statystyczne,
- duża złożoność zaproponowanego rozwiązania, wymagająca specjalistycznej wiedzy, ograniczającej możliwość zastosowania techniki przez typowe kadry inżynierów utrzymania ruchu w zautomatyzowanych zakładach produkcyjnych,
- szczegółowe projekty energooszczędnych trajektorii bądź parametrów kinematycznych napędów ich poszukiwanie i wybór trajektorii optymalnej, wymagają wiedzy o wartościach parametrów dynamicznych maszyn, których cyklogramy pracy byłyby modernizowane. Pozyskanie tych wartości, wymaga przeprowadzenia odpowiednich badań, prowadzących do kosztownych przestoju linii produkcyjnych, kompensujących zyski z uzyskanych redukcji poboru energii. Dodatkowo należy stwierdzić, że możliwości swobodnego modelowania trajektorii ze względu na ich energooszczędność w praktyce przemysłowej są znacznie ograniczone, czy wręcz niemożliwe, gdyż wynikają z warunków procesu technologicznego i kolizyjności otoczenia robota. Dlatego też ciekawym problemem badawczym, byłoby powiązanie możliwości opracowanego przez Autora sposobu poszukiwania trajektorii optymalnych energetycznie z procesem poszukiwania trajektorii bezkolizyjnych robota. Oczywiście problem ten wykracza poza zakres recenzowanej pracy, natomiast wskazuje na pewne ograniczenia w zaproponowanej przez Autora metodzie.
- brak przykładu ekonomicznego uzasadnienia wdrożenia zidentyfikowanej trajektorii energooszczędnej,
- zbadano energochłonność procesu technologicznego, realizowanego wzdłuż trajektorii testowych bez wpływu wydajności pracy w każdym przypadku na ilość pobranej energii. Wpływ wydajności badano odrębnie, jedynie podczas realizacji procesu transportu wzdłuż trajektorii odniesienia,
- nie przeprowadzono badań wpływu orientacji elementu roboczego robota na energochłonność procesu transportu i manipulacji,
- stosowaną przez Autora „metodę syntezy intuicyjnej”, w odniesieniu do której nie podano warunków jej stosowania (np. str. 117).

Pozostałe uwagi szczegółowe, dotyczące np. powtórek pozycji literaturowych w jej wykazie (poz. 29-30, 49-51), nie wpływają na jakość prezentowanego materiału, zostały zaznaczone w tekście i przekazane Autorowi.

Uważam, że praca może być podstawą szerszego opracowania naukowego (może monografii) prezentującego osiągnięcia Autora w zakresie metod optymalizacji zużycia energii w systemach produkcyjnych, a w szczególności transportowo-manipulacyjnych.

## 5. Wniosek końcowy

Moja ogólna ocena pracy jest bardzo wysoka. Autor zawarł w niej wszystkie istotne dla rozwiązywanego problemu zagadnienia, przez co zaprezentowany w pracy materiał jest przejrzysty, uporządkowany oraz spójny logicznie i w sposób konsekwentny przedstawia analizowane treści. Całość zaprezentowanego do oceny materiału pokazuje duży potencjał naukowy opracowanej metody. To z kolei pozwala stwierdzić, że Autor bardzo dobrze radzi sobie z postawionymi przed Nim zadaniami.

Tym samym uważam, że Pan mgr inż. Adrian ZBILSKI wykazał się niezbędnym zasobem wiedzy z zakresu modelowania i sterowania złożonymi, wielonapędowymi systemami mechanicznymi, a opiniowana praca mieści się w obszarze dziedziny naukowej „Budowa i eksploatacja maszyn”, w szczególności dotyczy eksploatacji systemów transportowo-manipulacyjnych i spełnia warunki stawiane przez ustawę o stopniach i tytule naukowym (Dz.U. nr 65, z dnia 14 marca 2003) w odniesieniu do rozpraw doktorskich i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę wielką wartość naukową i poznaczą rozprawy mgr inż. Adriana ZBILSKIEGO oraz sposób i formę przedstawienia i rozwiązania omawianego problemu stawiam wniosek o jej wyróżnienie.



A handwritten signature in black ink, which appears to read "Zbilski".