



Prof. dr hab. inż. Zenon Hendzel  
Katedra Mechaniki Stosowanej i Robotyki  
Wydz. Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska

## Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgra inż. Andrzeja Nierychłoka  
pt. „Model sterownika wirtualnego napędu hybrydowego elektryczno-  
spalinowego pojazdu kołowego”**

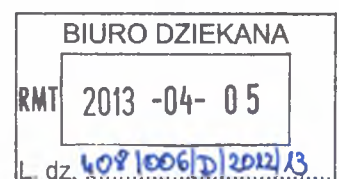
### 1. Dane ogólne

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Andrzeja Nierychłoka, mająca wymieniony wyżej tytuł. Recenzję opracowano na podstawie zlecenia Rady Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej.

Rozprawa zajmuje 155 stron i składa się z 7 rozdziałów, w tym tekst, listę ważniejszych oznaczeń, spis literatury, dodatek, 94 rysunki oraz 2 tabele, dokumentujących rozważania teoretyczne oraz badania symulacyjne wykonane przez Doktoranta.

### 2. Wybór tematu

Napęd hybrydowy elektryczno-spalinowy stosowany w pojazdach kołowych zyskuje więc coraz większą popularność na rynku samochodowym a firmy motoryzacyjne posiadają już w swojej ofercie napęd hybrydowy lub pracują na jego opracowaniu. Stosowane przez firmy motoryzacyjne różne sposoby połączeń jednostek napędowych, przeniesienia napędu, źródła energii elektrycznej, przyczyniają się do zwiększenia różnorodności rozwiązań konstrukcyjnych pojazdów kołowych o napędzie hybrydowym. Prowadzone przez firmy motoryzacyjne prace rozwojowe



przyczyniają się do unowocześniania układów napędowych elektryczno-spalinowych.

W ostatnich latach można zaobserwować intensyfikację tych badań, wynikającą z aktualnych warunków rynkowych, które wymuszają na producentach samochodowych konieczność stałego zwiększania konkurencyjności wyrobów, na którą składają się niskie koszty produkcji, szeroki asortyment i wysoka jakość produkowanych samochodów. Informacje zawarte w przeglądzie literaturowym przedstawiają najważniejsze aspekty napędów pojazdów kołowych konwencjonalnych (spalinowych) oraz elektrycznych, które na przełomie ostatnich lat znacząco rozwinęły się technologicznie. Omówione zagadnienia dobrze odzwierciedlają problemy współczesnych układów napędowych. Silniki spalinowe doskonale sprawują się jako maszyny napędzające pojazd kołowy przy stałej prędkości liniowej pojazdu, z kolei silniki elektryczne z powodzeniem zastępują napęd spalinowy, jednakże brak odpowiednio wydajnego źródła energii elektrycznej zmusza do poszukiwania rozwiązań alternatywnych w stosunku do stosowanych obecnie akumulatorów elektrochemicznych.

Autor w swojej pracy przedstawia sposób badania elektryczno-spalinowego układu napędowego i podejmuje się budowy wirtualnego sterownika mogącego w prosty sposób symulować pracę układu napędowego, w celu analizy zachowania się obu jednostek napędowych pracujących jak jeden wzajemnie uzupełniający się napęd pojazdu. Wirtualny sterownik może być używany do oceny układu napędowego na etapie jego projektowania (doboru jednostek napędowych), dzięki możliwości prowadzenia szybkiej analizy projektowanego napędu hybrydowego opartego na jego modelu matematycznym.

Zbudowany przez autora rozprawy wirtualny sterownik bazuje na dostępnych na rynku układach sterowania, które opierają się na komputerach klasy PC oraz komputerach czasu rzeczywistego. Podejście takie pozwala w bardzo elastyczny sposób modelować oraz symulować pracę elektryczno-spalinowego układu napędowego, bez konieczności budowy modelu fizycznego.

W pracy, analizowano jeden z najistotniejszych aspektów pracy napędu hybrydowego jakim jest przełączanie pomiędzy jednostkami napędowymi układu hybrydowego, napędzającymi pojazd kołowy. Analizę przeprowadzono dla czterech różnych układów napędowych, w których przyjęto dwa różne silniki elektryczne oraz dwa różne silnik spalinowe.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Nierychloka dobrze mieści się we współczesnym obszarze badawczym dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn a temat i zakres pracy, obejmujący zastosowania nowoczesnych technologii informatycznych w przemyśle motoryzacyjnym są aktualne i w pełni uzasadnione.

### **3. Cel i zakres rozprawy**

Autor na podstawie wstępnych rozważań sformułował cel rozprawy, który dotyczy opracowania sterownika wirtualnego napędu hybrydowego pojazdu kołowego, który pozwoli na analizę napędu, w tym na analizę pracy jednostek napędowych w momencie ich przełączenia przy ich dowolnym doborze.

Moim zdaniem cel jest poprawnie sformułowany. Z tak określonego celu wynika zakres zadań, które zostały zrealizowane podczas badań teoretycznych i laboratoryjnych.

### **4. Ocena merytoryczna rozprawy**

Autor rozprawy koncentruje swoje rozważania na najistotniejszych aspektach pracy napędu hybrydowego, do których należy przełączanie pomiędzy jednostkami napędowymi układu hybrydowego napędzającymi pojazd kołowy. Do realizacji swoich rozwiązań zbudował wirtualny sterownik mogący w prosty sposób symulować pracę układu napędowego w celu analizy zachowania się obu jednostek napędowych pracujących jak jeden wzajemnie uzupełniający się napęd pojazdu.

W rozprawie można wyróżnić dwie zasadnicze części poprzedzone wprowadzeniem szerokim przeglądem literaturowym a zakończone podsumowaniem propozycją dalszych badań oraz wykazem literatury i dodatkiem .

Podstawowe części pracy to: 1). Modelowanie napędów elektrycznych, spalinowych i hybrydowych oraz analiza teoretyczna sterowania układów napędowych 2) Implementacja numeryczna i badania symulacyjne analizowanych zagadnień z zastosowaniem wirtualnego sterownika pojazdu kołowego.

Do pierwszej części rozprawy można zaliczyć rozważania teoretyczne zawarte w rozdziale 4 dotyczące elementarnych charakterystyk związanych z napę-

dami elektrycznymi, spalinowymi oraz hybrydowymi. Rozdział ten można potraktować jako wprowadzenie do obszernego rozdziału 5. W rozdziale tym Autor omawia zadania sterowania układu napędowego typu hybrydowego. Przytacza modele matematyczne silnika indukcyjnego, silnika synchronicznego, silnika prądu stałego. Dla wprowadzonego modelu matematycznego silnika prądu stałego zbudowano schemat obliczeniowy w pakiecie LabVIEW. Oprogramowanie to wykorzystano również do syntezy regulatora typu PI sterowania tym silnikiem. Podobne rozważania przeprowadzono również dla silnika bezszczotkowego. Jako alternatywny sposób sterowania silnikiem prądu stałego Autor wprowadza regulator liniowo - kwadratowy i przeprowadza badania symulacyjne tej tematyki. Kolejna tematyka rozważana w tym rozdziale to sterowanie silnikiem spalinowym. Omówiono tu sposób modelowania silnika czterosurowego o zapłonie iskrowym. W kolejnym etapie pracy Autor skupił swoją uwagę na modelu matematycznym pojazdu samochodowego. Analizuje równanie ruchu koła samochodowego, opory toczenia, tarcie w łożyskach, opór bezwładności, opór aerodynamiczny, moc układu sił, sprawność układu napędowego oraz podaje model matematyczny przekładni hydrokinetycznej.

Oceniając tą część pracy należy podkreślić, że analiza skomplikowanych układów napędowych, do których zaliczyć można hybrydowe układy napędowe, jest złożona i pracochłonna, wymaga pracy i wysiłku grona specjalistów z zakresu motoryzacji.

Przedstawiona tematyka w rozdziałach 4 i 5 posłużyła Autorowi do budowy modelu sterownika wirtualnego rzeczywistego pojazdu kołowego. Tematyka ta została rozwinięta w drugiej części pracy i została zawarta w rozdziale 6.

W rozdziale 6 Autor rozprawy realizuje główny cel pracy tzn. buduje model numeryczny sterownika napędu hybrydowego w środowisku LabVIEW oraz przeprowadza liczne symulacje. W skład struktury sterownika wchodzi układ sterowania nadrzędnego z sygnałami wejściowymi pochodzącymi od pedału hamulca i pedału przyspieszenia i sygnałem wyjściowym w postaci przyrostu prędkości, która jest wartością zadaną dla lokalnych układów sterowania silnikiem elektrycznym lub spalinowym.

W pierwszej kolejności Autor zaprogramował wirtualne stanowisko kierowcy z emulacją pedału hamowania i przyspieszenia. Następnie wprowadzono graficznie model przekładni hydrokinetycznej, skrzyni biegów. Punkt 6.4 dotyczy badań symulacyjnych wirtualnego sterownika. Porównanie symulacyjne jednostek napędowych

Autor przeprowadza w punkcie 6.5. Rozprawę kończy podsumowanie oraz wnioski końcowe. Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły Doktorantowi dostrzec elementy, które należałoby zmienić lub usprawnić oraz sformułować wnioski wskazujące kierunki dalszych prac nad udoskonaleniem zaproponowanego rozwiązania.

Należy podkreślić, że problematyka zawarta w pracy jest bardzo złożona. Nie wnikając w sposób przebiegu pracy doktorskiej (jest to indywidualne podejście doktoranta i promotora) pragnę poczynić kilka uwag merytorycznych, które moim zdaniem mogłyby wzmocnić jakość rozprawy.

1. Wkład pracy doktoranta jest bardzo duży ale zagmatwany, nieczytelny. Brak tezy pracy. Nie ma środka ciężkości położonego na cel pracy „dokładna analiza pracy jednostek napędowych w momencie ich przełączenia.....”.
2. *Rozdział 4.* Tytuł rozdziału 4 nie odzwierciedla treści. Raczej powinno być: Opis.....
3. Mianowicie na rys. 4.2 ( podpis pod rysunkiem błędny) przedstawiono schemat przekładni obiegowej, który nie umożliwia wyznaczenie dynamicznych równań ruchu. Dynamiczne równania ruchu wynikają z odpowiednio przyjętych formalizmów matematycznych jak np. równania Lagrange’a, czy inne.
4. Problem liniowo kwadratowy ma rozwiązanie przy symetrycznej i dodatnio określonej macierzy  $K$  wynikającej z rozwiązania równania Riccatiego.
5. Przyjęte modele do obliczeń powinny być poddane weryfikacji w badaniach doświadczalnych.
6. Należy wyraźnie podkreślić, że prowadząc syntezę sterowania należy wykazać stabilność projektowanego układu sterowania co jest warunkiem implementacji rozwiązania w układach rzeczywistych.
7. *Rozdział 5.* Jest tutaj bardzo dużo błędnych sformułowań, np. prędkość samochodu i wiele innych. We wstępie napisano o badaniach analitycznych układu hybrydowego. Nie ma takich badań.
8. Opis układu sterowania, rys. 5.3 i pod nim jest niejasny. Należałoby opisać sygnały w układzie. Silnik ZS, ZI, brak opisu.
9. Wzór (5.7), (5.8) brak opisu. Opis silnika DC, str.66,67 błędne odwołanie do wzorów (5.10-5.11).
10. Zależności (5.24), (5.25) podano w postaci transformat a zrealizowano w przestrzeni rzeczywistej, jakie jest tego uzasadnienie.
11. Rys. 5.7, błędny opis sygnałów.
12. Rys. 5.9, 5.10 są nieczytelne. Brak opisu w postaci transmitancji regulatora PI, na który się powołano.
13. Powołanie się na zależności 5.12-5.15 jest błędne.
14. Str. 71, mówi się o zależnościach ciągłych a na rys.5.9 jest element dyskretny.
15. Str.74 opis silnika bezszczotkowego (5.37), brak opisu  $T_L$ ,  $J$ ,  $B$ . Badania tego silnika są enigmatyczne, rys. 5.19 wymaga komentarza.
16. Str.76, pierwsze 3 wskaźniki nie stosuje się w sterowaniu typu LQR. Z czego wynika zapis (5.39-5.41). Jak do tego zapisu mają się zależności (5.44-5.45).
17. Równanie Riccatiego 5.43 jest błędne. Zagadnienie LQR dotyczy problemu regulatora. Jak rozwiązano problem z zadaną wartością regulowaną co po-

- kazano na rys.5.23. Co miała dowieść ta symulacja sterowania optymalnego. Rys.5.25 jest raczej poglądowy, nie merytoryczny.
18. Str.82, odwołanie się do rys. 5.20 w tym kontekście jest błędne.
  19. Równanie 5.58 jest błędne.
  20. Str. 89, górny akapit- należałoby dla przejrzystości rozważań podać zależności, które stanowią model matematyczny silnika spalinowego.
  21. W punkcie 5.4 należało opisać ruch całego samochodu w celu określenia parametrów ruchu a następnie zająć się kołami ograniczając się do podania dynamicznych równań ruchu obrotowego tych kół.
  22. Rys. 5.32 brak układu współrzędnych, niejasny rozkład sił, sformułowania, „ $F_x$  siła ciągniona lub pchana „.
  23. Na str. 90 i 91 podany opór aerodynamiczny powietrza jest opisany różnymi zależnościami.
  24. Wzór 5.82 ,5.83, to powinny być równanie wektorowe, wzór 5.84 to wektor momentu sił bezwładności.
  25. W rozdziale 6 jest realizowany główny cel pracy tzn. budowa modelu numerycznego sterownika napędu hybrydowego w środowisku LabVIEW oraz badania symulacyjne. Na rys .6.1 podano strukturę sterownika. Brakuje mi tutaj postawienia problemu sterowania samochodem tzn. założenia toru ruchu wybranego punktu samochodu, założenia parametrów ruchu np. prędkości jazdy w tym rozruch , jazda ze stałą prędkością, okres hamowania. Zakładając te wielkości, rozwiązując zadanie odwrotne kinematyki uzyskuje się zadane wielkości dla układu sterowania.
  26. Podano opisy częściowe elementów, brak jest struktury dynamicznych równań ruchu przekładni a w związku z tym model numeryczny przekładni hydrokinetycznej oraz skrzyni biegów pokazany narys 6.10 jest nieczytelny.
  27. W dalszej kolejności zamieszczono na rys.6.11 model numeryczny pojazdu kołowego powołując się na opis analityczny pojazdu kołowego podany w rozdziale 5. Rozdział 5 jest obszerny i należało tutaj odwołać się do konkretnych równań realizowanych przez model numeryczny.
  28. W punkcie 6.3.2 przytacza się z literatury model matematyczny silnika prądu przemiennego oraz jego uproszczenie, nie podając opisu oznaczeń występujących w modelu.
  29. Podjęto próbę oceny stabilności przyjętego napędu elektrycznego. Należy wykazać stabilność układu zamkniętego. Proszę zwrócić uwagę na problem sterowania typu stabilizacja lub nadążanie. W przypadku nadążania mamy do czynienia z problemem niestacjonarnym. (merytoryczne ujęcie, interpretacja, sformułowania) .
  30. W punkcie 6.3.2.1 podjęto próbę sformułowania zadania sterowania silnikiem elektrycznym oraz oceny stabilności układu sterowania. Ten punkt jest niejasny.
  31. W punkcie 6.3.2.2 podano opis matematyczny spalinowego oraz hybrydowego modułu napędowego jak również podjęto próbę wyznaczenia stabilności tych układów. Występują tu błędne interpretacje.
  32. Punkty 6.4 i 6.5 dotyczą badań symulacyjnych wirtualnego sterownika. W tym zakresie proponuję:
    - a) do oceny rozwiązań przyjąć wskaźniki

- b) uzyskane rozwiązania (zadany i zrealizowany tor ruchu, parametry kinematyczne pojazdu, sygnały sterowań, itd., powinny być na oddzielnych rysunkach przy zadanych konkretnych wartościach stałych dla których była przeprowadzona symulacja.
- c) Opis panelu sterowania można zamieścić w dodatku jako instrukcja obsługi.
- d) Mowa jest o weryfikacji rozwiązania, nigdzie takiej weryfikacji nie ma.

Pragnę zaznaczyć, że przytoczone uwagi nie wyływają z chęci krytyki rozprawy, lecz życzliwości i chęci pomocy doktorantowi w dalszej jego pracy naukowej a ze względu na interdyscyplinarną tematykę i nakład pracy pozytywnie oceniam dotychczasowe jego dokonania. Przedstawiona rozprawa ma znaczenie praktyczne. Należy również zasygnalizować znaczenie dydaktyczne rozprawy, której wyniki będą wykorzystane w ramach laboratoriów, prac przejściowych i dyplomowych.

Podsumowując, uważam, że rozprawa świadczy o odpowiedniej wiedzy doktoranta z zakresu napędów hybrydowych i nowoczesnych technologii informatycznych a także o wiedzy praktycznej i jego odpowiednim przygotowaniu do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

## 5. Wnioski końcowe

W zakończeniu stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska „Model sterownika wirtualnego napędu hybrydowego elektryczno-spalinowego pojazdu kołowego”, odpowiada warunkom sprecyzowanym w obowiązującej Ustawie. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie jej Autora mgr inż. Andrzeja Nierychłoka do publicznej obrony.

