Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Świtoński
Katedra Mechaniki Stosowanej
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska w Gliwicach

Gliwice 14.02.2011r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA Biblioteka Główna w Gliwicach

Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgr. inż. Adama Stachury
pod tytułem
„Modelowanie dynamiki napędu hybrydowego"

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Intensywny rozwój technologiczny i zwiększającą się nieustannie liczba pojazdów, przy jednocześnie zmniejszających się światowych zasobach ropy naftowej, powodują konieczność poszukiwania nowych rozwiązań energooszczędnych układów napędowych pojazdów samochodowych. Jednym z możliwych sposobów jest stosowanie spalinowo-elektrycznych napędów hybrydowych, stanowiących złożone układy mechatroniczne. Istotnym problemem występującym w procesie projektowo-konstrukcyjnym tego typu układów staje się konieczność integracji systemów mechanicznych, elektronicznych i informatycznych w celu osiągnięcia efektu zmniejszenia zużycia paliwa przy jednoczesnej poprawie własności trakcyjnych pojazdu. Systemy mikroprocesorowe, wraz z odpowiednimi programami sterującymi, stają się integralną częścią układów uważanych dotychczas za mechaniczne. Złożoność wzajemnych oddziaływań pomiędzy różnymi podsystemami wymaga jednak nowego podejścia do zagadnień projektowania układów mechatronicznych. Integracja poszczególnych podsystemów złożonego układu mechatronicznego musi być realizowana od początku procesu projektowo-konstrukcyjnego. Wzajemne dostrojenie poszczególnych układów wymaga stosowania zaawansowanych metod modelowania matematycznego. Opracowanie nowoczesnych algorytmów i metodyki projektowania mechatronicznego, wykorzystujących dostępne oprogramowanie i metody symulacyjne, staje się zatem obecnie ważnym zadaniem badawczym.

Tematykę komputerowego wspomagania projektowania układów mechatronicznych podjął Doktorant, który zaprojektował w ujęciu mechatronicznym i wykonał demonstrator miejskiego pojazdu hybrydowego z wykorzystaniem podzespołów pojazdu Fiat Panda. Główną trudność w doborze cech konstrukcyjnych rozpatrywanego układu stanowi złożoność zjawisk fizycznych oraz właściwy dobór charakterystyk napędu spalinowego oraz elektrycznego, tak aby przy założonych cyklach jazdy uzyskać minimalizację zużycia paliwa. Jednocześnie badany układ i proces ruchu stwarzają znaczne trudności podczas identyfikacji modeli matematycznych.

Przedmiotem recenzowanej pracy jest proces mechatronicznego projektowania i prototypowania demonstratora pojazdu hybrydowego. Wybrany temat pracy doktorskiej

BIURO DZIEKANA
RMT 2011 -02- 15
L. dz 260/006/D/2010/11

uważam za aktualny zarówno pod względem naukowym, jak również utylitarnym, a tematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie mechanika w specjalności mechatronika.

2. Przegląd treści pracy

Treść rozprawy została podzielona na dziewięć rozdziałów, a ponadto zamieszczono bibliografię. W rozdziale pierwszym opisano historię rozwoju napędów hybrydowych oraz ich podstawowe typy i aplikacje. Opis ten wykorzystano w późniejszej analizie i wyborze rozwiązania technicznego do budowy demonstratora technologii. Przedstawiono także przegląd literaturowy publikacji związanych z budową, modelowaniem i optymalizacją elementów napędu hybrydowego.

Rozdział drugi rozprawy zawiera opis rozwiązań hybrydowych układów napędowych opracowanych i wdrożonych przez światowych producentów samochodowych. Szczególną uwagę poświęcono wynikom eksperymentalnych testów pojazdów dostawczych o napędzie hybrydowym. Wnioski płynące z analizy zostały uwzględnione przy tworzeniu wstępnych założeń do budowy prototypowego napędu. Omówiono również stanowisko laboratoryjne napędu hybrydowego, opracowane i wykonane w Katedrze Mechaniki Stosowanej Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej, służące do badań i optymalizacji hybrydowego napędu szeregowego oraz równoległego.

Cel i zakres pracy jak również tezę rozprawy sformułowano w rozdziale trzecim. Omówiona została koncepcja budowy demonstratora technologii, na potrzeby której opracowano projekt napędu typu e4WD. Wyróżniono także podstawowe parametry eksploatacyjne pojazdu co miało decydujący wpływ na dobór podzespołów do budowy napędu demonstratora.

W rozdziale czwartym przedstawiono obliczenia w zakresie dynamiki pojazdu. Obliczenia zostały przeprowadzone dla pojazdu w wersji konwencjonalnej i hybrydowej. Wyniki obliczeń zostały wykorzystane do doboru mocy silnika elektrycznego. Przyjęty algorytm uwzględnia wyliczenia oporów ruchu, bilans przyspieszeń oraz analizę podstawowych parametrów użytkowych pojazdu. Schemat obliczeń został również wykorzystany przy opracowaniu programu komputerowego wspomagającego proces projektowania napędu hybrydowego. Przedstawiono ponadto analizę wyboru dwóch spośród najważniejszych elementów napędu elektrycznego czyli silnika elektrycznego oraz baterii akumulatorów. Przedstawiony w tym rozdziale model dynamiki zawieszenia pojazdu został wykorzystany do określenia wpływu zmian konstrukcyjnych pojazdu bazowego na jego parametry trakcyjne.

Rozdział piąty zawiera opis programu komputerowego wykonanego w środowisku Matlab/Simulink. Przedstawiono algorytm wyznaczania zużycia paliwa, oporów ruchu oraz opracowany schemat działania programu. Przeprowadzono także badania porównawcze z wynikami obliczeń oprogramowania PowerTrain używanego w procesie projektowo-konstrukcyjnym firmy FIAT. W kolejnych podrozdziałach omówiono standardowe cykle jazdy oraz wyniki symulacji dla eksperymentalnych cykli wyznaczonych na potrzeby projektu. Otrzymane wyniki pozwoliły oszacować przybliżone oszczędności paliwa dla pojazdu z napędem hybrydowym. W kolejnym podrozdziale przedstawiono algorytm sterujący napędem hybrydowym, który został zaimplementowany w programie

Matlab/Simulink przy wykorzystaniu narzędzi StateFlow. Opisane zostały trzy stany pracy napędu: elektryczny, spalinowy i hybrydowy oraz parametry decydujące o przepływie mocy w układzie. Omówiono również zasadę działania układu na podstawie komputerowych wizualizacji napędu.

W rozdziale szóstym zaprezentowano budowę demonstratora technologii. Przedstawiono kolejne fazy realizacji projektu co zostało poparte dokumentacją zdjęciową oraz wizualizacjami komputerowymi. Opisano także charakterystyki komponentów wykorzystanych przy budowie prototypowego napędu e4WD.

Program badań eksperymentalnych został przedstawiony w rozdziale siódmym. Badania przeprowadzono na testowym odcinku drogi oraz na hamowni podwoziowej. Wyniki badań porównano z wynikami przeprowadzonych symulacji komputerowych.

Rozdział ósmy zawiera analizę kosztów budowy napędu hybrydowego dla małego pojazdu miejskiego. Zestawiono koszty budowy pojazdu oraz przedstawiono analizę możliwych oszczędności przy eksploatacji pojazdu podczas jego użytkowania.

W ostatnim rozdziale podsumowano wyniki przeprowadzonych prac stwierdzając jednocześnie realizację celu i zakrsu rozprawy. Spis literatury wykorzystywanej w pracy zawiera 92 pozycje literaturowe. Uwzględniono większość istotnych prac z zakresu omawianej tematyki badawczej, w tym wiele prac o podstawowym znaczeniu dla rozważanego problemu.

3. Wyniki pracy i ich ocena

Pod względem merytorycznym praca doktorska jest opracowana prawidłowo, zakres merytoryczny jest obszerny i wielodyscyplinarny. Autor przedstawia nowe osiągnięcia w zakresie projektowania napędów hybrydowych oraz doboru układów i algorytmów sterowania tego typu urządzeń w ujęciu mechatronicznym. Do głównych zalet opiniowanej pracy, a jednocześnie osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- opracowanie programu komputerowego do analizy zużycia paliwa w spalinowo-elektrycznym napędzie hybrydowym,
- opracowanie koncepcji i wykonanie projektu pojazdu hybrydowego w układzie e4WD w ujęciu mechatronicznym,
- opracowanie, wykonanie i uruchomienie układu sterownia zaprojektowanego pojazdu, wraz z algorytmami sterowania, umożliwiającego minimalizację zużycia paliwa,
- zaprojektowanie i wykonanie prototypu urządzenia, umożliwiającego praktyczną weryfikację przyjętych założeń konstrukcyjnych i algorytmów obliczeń,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych układu napędowego na specjalnym stanowisku badawczym,
- możliwość wdrożenia opracowanego rozwiązania i wykorzystania osiągniętych wyników w praktyce.

Część doświadczalna pracy polegała w głównej mierze na przeprowadzeniu badań na hamowni oraz jazdy w zadanym cyklu jazdy, w wyniku których Doktorant otrzymał niezbędne dane do weryfikacji przyjętych założeń konstrukcyjnych oraz algorytmów obliczeń numerycznych. Opracowane algorytmy stanowią Jego autorskie osiągnięcie i pozwalają na automatyzację procesu doboru elementów układu napędowego oraz algorytmów sterowania.

Doktorant wykazał się obszerną wiedzą z zakresu mechaniki, budowy maszyn, automatyki i programowania, a także umiejętnościami inżynierskimi, co zaowocowało pozytywnymi wynikami badań.

Oprócz wskazania drobnych błędów redakcyjnych, stylistycznych i interpunkcyjnych, zauważonych w trakcie lektury pracy, nasuwają się jeszcze następujące szczegółowe komentarze i uwagi:

- W pracy zabrakło szczegółowego schematu postępowania i harmonogramu procesu projektowo-konstrukcyjnego, który uwidaczniałby mechatroniczne podejście do projektowania napędu hybrydowego.
- Brakuje krytycznego przeglądu literatury, nawiązującego do bardzo obszernej tematyki pracy, w tym szczególnie metod modelowania dynamiki oraz optymalizacji układu. Rozdział taki z pewnością wpłynąłby na uporządkowanie treści i uwypukliłby osiągnięcia własne Autora.
- W pracy zabrakło dyskusji na temat uproszczeń w procesie modelowania, co utrudnia analizę poprawności procesu modelowania i otrzymanych wyników obliczeń.
- Cennym efektem pracy byłby algorytm optymalizacji cech konstrukcyjnych wykorzystujący opracowane modele dynamiki pojazdu.

Wymienione powyżej uwagi zostaną zapewne skomentowane przez Autora rozprawy w trakcie publicznej obrony i nie umniejszają wysokiej pozytywnej oceny pracy.

4. Ocena końcowa

Recenzowana praca jest obszerna pod względem zakresu merytorycznego, zawiera interesujące algorytmy, oraz wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych przeprowadzonych z wykorzystaniem opracowanego rozwiązania konstrukcyjnego pojazdu hybrydowego. Stanowi to niewątpliwie odpowiedni wkład Autora w zakresie rozwoju metodyki projektowania mechatronicznego spalinowo-elektrycznych układów napędowych. Opracowane rozwiązania konstrukcyjne układu napędowego oraz układu sterowania, modeli dynamicznych i algorytmów sterowania, metodyki pomiarów i sposób realizacji badań świadczą o bardzo dobrym przygotowaniu doktoranta do prowadzenia badań naukowych. Na podkreślenie zasługuje utylitarna strona dysertacji. Otrzymane wyniki i opracowane wnioski mogą być bezpośrednio zastosowane w procesie projektowania nowoczesnych układów hybrydowych.

Uważam, że opiniowana praca Pana mgr. inż. Adama Stachury spełnia wymogi przewodu doktorskiego, określone w **Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki**. Wnioskuję zatem o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.