POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA w Gliwicach

Prof. dr hab. inż. Jerzy Świder
Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny
Instytut Automatyzacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, tel.: (032)237-24-60

Gliwice, 14.02.2013r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Andrzeja Nierychloka

pt.: „Model sterownika wirtualnego napędu hybrydowego elektryczno-spalinowego pojazdu kołowego"

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej, pismo nr RMT0-95/D/006/12/13 z dnia 15.11.2012r., wynikające z uchwały Rady Wydziału Mechanicznego Technologicznego z dnia 14.11.2012r.

1. Uwagi ogólne

Jeden z głównych kierunków rozwoju rynku samochodowego na świecie związany jest z poszukiwaniem nowych rozwiązań w zakresie napędów. Z jednej strony proponowane rozwiązania dotyczą zwiększania mocy rozwijanych przez silniki spalinowe, co pozwala na zmniejszanie ich pojemności skokowej, bądź - modyfikacji algorytmu sterowania silnikiem, prowadzących do jego okresowego wyłączania, wymuszanego losowym cyklem ruchu drogowego. Z drugiej strony podejmowane są działania, skupiające się na rozwijaniu systemu alternatywnych napędów. W tej grupie zadań dominującą tendencję stanowią elektryczno-spalinowe napędy hybrydowe oraz napędy elektryczne, przeznaczone szczególnie do tzw. pojazdów miejskich. Działania te podyktowane są wzrastającymi potrzebami społecznymi względem ochrony środowiska naturalnego, a głównie - koniecznością ograniczenia emisji spalin, co jest wymuszane odpowiednimi normami, i sprzyja poprawie czystości powietrza w dużych aglomeracjach. Ponadto, poszukiwanie alternatywnych rozwiązań w dziedzinie napędu pojazdów kołowych wynika również z ciągle wzrastających cen paliw.

Podjęty przez Autora temat pracy jest związany z wymienionymi trendami rozwojowymi i dotyczy napędów hybrydowych elektryczno-spalinowych, szczególnie w zakresie zadań, związanych z analizą i doborem jednostek napędowych, z przeznaczeniem do zastosowań w konkretnym typie pojazdu samochodowego. Zaproponowane przez Doktoranta w opiniowanej pracy rozwiązanie wirtualnego sterownika pozwala, już na etapie projektowania napędu, na jego skonfigurowanie drogą modelowania komputerowego, a także na weryfikację dobieranych jednostek napędowych oraz ich analizę, ze szczególnym uwzględnieniem procesu przełączania silników napędowych, bez konieczności budowania drogiego modelu fizycznego. Podejście takie może powodować skrócenie procesu projektowania nowoczesnego, prototypowego napędu, a także obniżyć koszty jego budowy, wynikające z prowadzenia koniecznych analiz i prób eksploatacyjnych.

Przeprowadzona na potrzeby pracy analiza literatury z zakresu napędów samochodowych, zarówno spalinowych, elektrycznych, jak i hybrydowych wykazała, że brak jest opracowań

z zakresu ich konfiguracji i modelowania, zarówno fizykalnego, jak matematycznego oraz numerycznego. Tym samym brak jest wskazówek, wg których należy takie napędy konfigurować, czy nimi sterować. Jedyne unormowanie w tym zakresie wynika z protokołu SAE J1939, związanego ze sterowaniem silnikami spalinowymi w oparciu o standard sieci CAN. Wynika to z faktu, że firmy samochodowe traktują własne rozwiązania w tym zakresie jako oryginalne i innowacyjne, i nie udostępniają wyników swoich badań, proponując jedynie gotowe rozwiązania w produkowanych i kierowanych na rynek pojazdach. W tym kontekście zadania, objęte tematem pracy, pozwalają na uzupełnienie wiedzy w obszarze doboru i sterowania złożonymi jednostki napędowymi, i można je uznać za aktualne i ważne zarówno teoretycznie, jak i praktycznie.

2. Ocena rozprawy

Autor zawarł swoją pracę na 147 stronicach i podzielił ją na 7 głównych rozdziałów i 49 podrozdziałów, uzupełnionych wykazem 51 pozycji literatury i czterostronicowym dodatkiem. Najstarsza cytowana publikacja była wydana w 1962 roku, najnowsze natomiast - w roku 2012, przy czym dwie pozycje to poradniki, a kolejne dwie to strony internetowe. Dziewiętnaście z nich jest angielskojęzycznych. Siedemnaście cytowanych pozycji, związanych z problematyką rozprawy, jest współautorstwa Doktoranta. Ponadto w pracy Autor zamieścił 94 rysunki oraz 169 ponumerowanych zależności matematycznych, o numerach przyporządkowanych poszczególnym rozdziałom rozprawy.

Rozpoznając potrzeby w zakresie doboru i sterowania układami wielonapędowymi, a w szczególności napędami hybrydowymi, Doktorant przyjął, że celem Jego pracy jest utworzenie wirtualnego sterownika napędu hybrydowego pojazdu kołowego, opartego na modelach matematycznych, opisujących dynamikę pojazdu, jednostek napędowych, stanowiących jego napęd hybrydowy, i podzespołów układu przeniesienia napędu, które pozwalałyby na badanie procesu sterowania współdziałaniem jednostek składowych napędu hybrydowego, ze względu na ich optymalną synchronizację, z uwzględnieniem typowych warunków ruchu pojazdu i przyjętych kryteriów optymalizacji. Przystępując do realizacji tak określonego celu pracy, w pierwszym etapie Doktorant zdefiniował na str. 43 pojęcie wirtualnego stertownika, stanowiącego podstawę procesu sterowania napędem hybrydowym, w następujący sposób: *„Sterownik wirtualny to urządzenie zbudowane na bazie stanowiska kierowcy pojazdu kołowego, modelu matematycznego układu napędowego i modelu matematycznego pojazdu kołowego, w tym również środowiska zewnętrznego, służące badaniu zachowania się takiego układu w laboratorium, bez konieczności budowy modelu fizykalnego, co bezpośrednio przekłada się na mniejsze koszty oraz szybszą i bardziej elastyczną analizę układów napędowych elektryczno-spalinowych, w których kryterium poprawnej pracy jest dobór odpowiedniego sterowania, np. przełączaniem jednostek napędowych."* (Tekst w cudzysłowie nie jest dokładnym cytatem z pracy, ponieważ oryginał posiada, niestety, błędy gramatyczne i składniowe).

W rzeczywistym pojeździe, parametry sterujące pojazdem, wynikające z potrzeb określonych warunkami drogowymi, są generowane na stanowisku kierowcy, za pomocą dźwigni przyspieszenia i hamulca oraz drążka zmiany biegów. Z tego względu opracowany sterownik Doktorant wyposażył w fizykalny model stanowiska kierowcy, składający się z kierownicy, dźwigni przyspieszenia i hamulca oraz drążka zmiany biegów. Za pomocą tak skonfigurowanego układu istnieje możliwość bezpośredniego sterowania napędem, poprzez ustalanie wartości pożądanych parametrów ruchu pojazdu (prędkość, przyspieszenie), które po ich przetworzeniu przez algorytm sterujący, zaimplementowany w wirtualnym sterowniku napędu, umożliwia ustalenie jego funkcjonalnych parametrów, w odniesieniu do symulowanych warunków ruchu drogowego.

Przystępując do realizacji zadań, wynikających z postawionego w pracy celu, Doktorant przyjął pewne założenia, dotyczące opracowywanego wirtualnego sterownika, w odniesieniu do modelu matematycznego dynamiki pojazdu kołowego, poruszającego się w aglomeracjach miejskich, modeli matematycznych jednostek napędowych (silniki spalinowe o zapłonie iskrowym, silniki elektryczne prądu stałego i przemiennego), mogących stanowić napęd hybrydowy oraz współpracującego z nimi układu przeniesienia napędu, modelu układu przeniesienia napędu, a także algorytmu sterowania, uwzględniającego model dynamiczny pojazdu i jednostek napędowych.

Doktorant, w oparciu o analizę literatury z zakresu dynamiki pojazdów kołowych, napędów samochodowych, zarówno spalinowych z zapłonem samoczynnym i iskrowym, jak i napędów hybrydowych, zdefiniował najważniejsze ograniczenia, związane ze strukturą analizowanego napędu hybrydowego przyjmując, że: napęd hybrydowy, wobec którego opracowany zostanie wirtualny sterownik, będzie napędem o strukturze równoległej, bez rekuperacji energii pozyskiwanej w czasie hamowania pojazdu, z jednostką spalinową w postaci silnika z zapłonem iskrowym, oraz jednostką elektryczną w postaci silników prądu stałego, szeregowy typu DC i BLDC oraz prądu przemiennego.

Należy uznać, że takie rozwiązanie struktury napędu i jego jednostek napędowych jest zgodne z wieloma rzeczywistymi rozwiązaniami napędów, występujących w samochodach osobowych, oferowanych na rynku. Wziąwszy pod uwagę dużą różnorodność istniejących rozwiązań silników spalinowych z zapłonem iskrowym, silników elektrycznych, oraz wielką różnorodność w zakresie stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych podzespołów układu przeniesienia napędu Autor dysertacji przyjął, że modele matematyczne tych elementów, stanowiące podstawę algorytmu sterującego wirtualnego sterownika, zostaną oparte na modelach, zaczerpniętych z literatury przedmiotu. Autor wykorzystał proste, ogólne modele wszystkich stosowanych w pojazdach samochodowych niezbędnych podzespołów układu przeniesienia napędu, istotnych z punktu widzenia napędu hybrydowego, takich jak przekładnia różnicowo-sumująca, skrzynka biegów, czy sprzęgło hydrokinetyczne. Modele te Doktorant połączył w jeden spójny model algorytmu sterującego napędem hybrydowym, uwzględniający jego budowę mechaniczną i strukturę połączeń jednostek napędowych (połączenie równoległe). Podstawowym zadaniem opracowanego przez Doktoranta algorytmu sterującego jest dopasowanie prędkości obrotowych obydwu silników, a następnie ich przełączenie. Do stabilizacji pracy jednostek napędowych algorytm zbudowany w pracy wykorzystuje regulatory typu PI. Doktorant omówił proces doboru nastaw tych regulatorów, a także opracował moduł oceny stabilności napędu, wykorzystujący metodę Lapunowa. Wyniki prowadzonych analiz Doktorant przedstawił na płaszczyźnie fazowej, w sposób umożliwiający ich analizowanie w czasie rzeczywistym, w trakcie symulowania ruchu pojazdu.

Warto zauważyć, że zbudowany przez Doktoranta wirtualny sterownik hybrydowego układu napędowego, wspomaga rozwiązanie problemu doboru jednostek napędowych oraz analizy układu napędowego na drodze symulacji i analizy komputerowej, co może pozwolić na modyfikację układu napędowego pojazdu bez konieczności budowy jego fizykalnego prototypu. Opracowane przez Doktoranta modele zostały przez Niego zaimplementowane w programie NI LabVIEW, w którym zbudował On szczegółowy algorytm wirtualnego sterownika. Algorytm ten Autor wyposażył w odpowiedni interfejs, przeznaczony do komunikacji z operatorem układu. Na uwagę zasługują omówione w pracy modele silników elektrycznych i spalinowych, które obecnie stosuje się w hybrydowych układach napędowych. Wyniki uzyskiwane z prowadzonych symulacji Autor zapisuje do zewnętrznego pliku danych, umożliwiając w ten sposób ich dalszą analizę. Także zaprezentowany w pracy proces wspomagania silnika elektrycznego silnikiem

spalinowym jest rozwiązaniem ciekawym, które może być rozwijane w trakcie dalszej rozbudowy koncepcji wirtualnego sterownika napędu hybrydowego. Opracowany przez Doktoranta w ramach prezentowanej rozprawy wirtualny sterownik napędu hybrydowego wykorzystuje typowe rozwiązania programowe, oparte na komputerach klasy PC, a w algorytmie sterownika został zaimplementowany interfejs, pozwalający na wykorzystanie w procesie sterowania komputera czasu rzeczywistego (CompactRIO, National Instruments), co z kolei pozwoliło Doktorantowi symulować pracę spalinowo – elektrycznego napędu hybrydowego w warunkach czasu rzeczywistego.

Należy podkreślić, że przedstawiony w dysertacji przez Doktoranta problem sterowania był przez Niego prezentowany na konferencjach krajowych i międzynarodowych i publikowany w czasopismach o zasięgu krajowym i międzynarodowym (m.in. w Solid State Phenomena, Journal of Vibroenginnering, Communications in Control Science and Engineering - USA).

3. Uwagi krytyczne

Przedstawiona mi do opinii praca została zredagowana niezbyt starannie. W tekście pracy znalazły się pomyłki i niezręczne sformułowania, których można było i należało uniknąć. Wszystkie one zostały przekazane bezpośrednio Autorowi rozprawy.

Szczegółowe uwagi krytyczne, poza usterkami językowymi i edycyjnymi, to:
- zbyt dużo miejsca, bo aż około 30% rozprawy, Autor poświęcił wprowadzeniu i przeglądowi literatury (praktycznie cztery pierwsze rozdziały pracy),
- tytuł rozprawy nie pozwala zrozumieć, czy wirtualny jest sterownik, czy też napęd hybrydowy (czy może obydwa układy),
- zależność 4.1 powinna zawierać prędkość średnią, a nie chwilową,
- wyjaśnianie metody Willysa wyznaczania przełożeń przekładni planetarnych w pracy doktorskiej jest zbędne (podrozdział 4.3, zależność 4.24),
- Autor wprowadził na stronicy 60. nowe, nieznane mi i niezrozumiałe pojęcie *„wielkość dostarczanego do silnika spalinowego paliwa”*, wyrażane w [kJ],
- wiele miejsca w pracy Doktorant poświęca przekazywaniu wiedzy o charakterze raczej „popularno – naukowo – technicznym”,
- na rysunku 5.7, str. 67 znalazły się pomyłki w opisie,
- układ równań 5.26 został błędnie zapisany w postaci macierzowej 5.29,
- zależność w postaci 5.58 jest błędna,
- treść podrozdziałów 5.4.2 do 5.4.6 to podstawy fizyki, które nie powinny zajmować miejsce w pracy doktorskiej,
- stwierdzenie, opisujące na str. 107/108 prędkość kątową, jako pochodną przyśpieszenia kątowego, jest krytyczną pomyłką Doktoranta,
- na stronicach 116 i 117 znajduje się po siedem wierszy powtórzonego, skopiowanego tekstu,
- z zależności 6.21 wynika, że ruch wywołują jedynie siły oporu,
- nazwanie błędnie zapisanej zależności 6.27 (powtórzonej na tej samej, 124. stronicy pracy, jako zależność 6.36) „zależnością Lagrange'a” jest kolejną, krytyczną pomyłka Doktoranta,
- nie doszukałem się w pracy opisu badań doświadczalnych, o których Autor pisze na stronicy 147,
- brak jest w pracy streszczenia w języku polskim i angielskim.

Zobowiązuję Autora Dysertacji do załączenia do niej erraty, z poprawkami, dotyczącymi pomyłek o charakterze krytycznym, które niepotrzebnie znalazły się w ostatecznej, poddanej opiniowaniu, wersji pracy.

4. Wniosek końcowy

Podjęty przez Doktoranta problem badania i rozwoju nowoczesnych, energooszczędnych napędów elektryczno-spalinowych wpisuje się we współczesne tendencje, promujące na rynku innowacyjne rozwiązania napędów hybrydowych.

W pracy został przytoczony sposób modelowania oraz analizy hybrydowego układu napędowego, z użyciem narzędzi programistycznych NI LabVIEW. Zbudowany przez Doktoranta wirtualny sterownik (wirtualny układ sterowania elektryczno-spalinowego układu napędowego pojazdu kołowego) pozwala na jego wykorzystanie w procesach projektowania nowoczesnych napędów, poprzez prowadzenie analizy i oceny przydatności jednostek napędowych w napędach hybrydowych. Na rynku brak jest tego typu rozwiązań, które wspomagają budowę nowych, innowacyjnych układów napędowych, wymuszanych przez szybko zmieniający się rynek motoryzacyjny.

Pomimo wielu przedstawionych zastrzeżeń stwierdzam, że mgr inż. Andrzej Nierychlok udowodnił, że potrafi sformułować cel badań, zaplanować i przeprowadzić konieczne badania, z zastosowaniem metod numerycznych i doświadczalnych.

Biorąc pod uwagę uzyskane efekty recenzowanej pracy doktorskiej mgr. inż. Andrzeja Nierychloka pt.: „Modelowanie sterownika wirtualnego napędu hybrydowego elektryczno-spalinowego pojazdu kołowego" stwierdzam, że mieszczą się one w obszarze zainteresowań dyscypliny naukowej Budowa i Eksploatacja Maszyn i opiniowana praca może być podstawą nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych, zgodnie z ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r., Dz.U. Nr 65, poz. 595 i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA w Gliwicach