

Artur Kopczyński, M.Sc. M.B.A.

Ph.D. Thesis

Power distribution in multi-motor power trains in electric road vehicles

Abstract

In this doctoral dissertation, various aspects related to multi-motor power trains with independent wheel drive (IWD) and with independent axle drive (IAD) are considered. The research began with purely theoretical considerations, and subsequently computational models and simulations were developed to verify the properties of vehicles with different power train configurations. Various strategies for controlling multi-motor drives were proposed. Moreover, factors influencing the efficiency of energy recuperation were determined. The culmination of the work was the development and commissioning of a prototype multi-motor power train vehicle with an original control algorithm.

In terms of theoretical considerations, the main factors influencing the kinematics of the vehicle were verified. The first is the significant influence of the tire deformability on the vehicle's trajectory. In addition, depending on the manoeuvre performed, the vertical loads on particular wheels change, which determines the ability of a given wheel to transmit driving or braking torque. The classic low-friction differential mechanism is characterized by significant limitations in the form of not transferring the drive torque to the ground when one of the driving wheels loses traction. The improvement of the vehicle's traction properties can be achieved through the IWD, which allows for free control of the torque of the particular drive wheels.

In terms of vehicle dynamics analysis, a four-wheeled vehicle model with eight degrees of freedom (8DOF) was proposed. This model takes into account the tilt of the body and the related change in vertical loads on particular wheels as well as models of driveline components such as a permanent magnet synchronous machine (PMSM) with control system. The computational models developed in the Matlab Simulink environment allowed for a simulation analysis of the influence of various parameters on the movement trajectory of vehicles with IWD: only front wheel drive (FWD), only rear wheel drive (RWD) and all-wheel drive (AWD). The influence of the following factors was verified: the location of the centre of gravity (COG) between the axles, the height of the COG, failure of one of the traction motors, regenerative braking during

cornering and the power train control strategy. It was proven that a vehicle with active speed differentiation has greater movement stability compared to a vehicle without active control.

The correctness of operation of the speed differentiation algorithm in the IWD was verified. The algorithm takes into account vehicle kinematic dependencies. On the modernized laboratory stand, simulation tests were performed in real time using the dSpace environment. The measured values of the motor speeds during the tests of the cornering manoeuvre corresponded satisfactorily to the set values.

It was demonstrated that it is possible to improve the traction properties of a multi-motor power train vehicle by using alternative methods of distributing driving torques between wheel axles. This results in a reduction of slips occurring on the wheels of the vehicle, i.e. better use of their traction. The best results in this respect were shown by the active torque distribution method based on the instantaneous value of longitudinal acceleration.

The factors influencing the effectiveness of energy recuperation were identified and grouped, the most important of which are the braking profile, the total efficiency of the driveline components, as well as numerous limitations in the application of regenerative braking systems (RBS). It was indicated that AWD vehicles have the greatest potential for energy recovery from the braking process. On the other hand, the AWD requires controlling the braking torque distribution to avoid loss of stability.

The last aspect presented in the dissertation is the development and commissioning of a prototype multi-motor power train vehicle. The proposed topology of the control system allowed achieving full functionality of the drive. Good speed of response of the traction motors to the inputs set by the driver was obtained. This means that the computational time of the program with the control algorithm is short. Such a fact should enable to test the stability control algorithms or torque vectoring in the future.

Keywords: Multi-motor drive, independent wheel drive, independent axle drive, vehicle dynamics, vehicle handling, movement stability, regenerative braking, wheel speed differentiation.

mgr inż. Artur Kopczyński

Rozprawa doktorska

Rozdział mocy w wielosilnikowych napędach elektrycznych pojazdów drogowych

Streszczenie

W pracy rozpatrzono różne aspekty związane z napędami wielosilnikowymi o niezależnym napędzie kół (IWD) oraz o niezależnym napędzie osi (IAD). Badania rozpoczęto od rozważań czysto teoretycznych, następnie przechodząc do budowy modeli obliczeniowych oraz symulacji komputerowych zweryfikowano właściwości pojazdów o różnych konfiguracjach napędu. Zaproponowano różne strategie sterowania napędem wielosilnikowym. Określono czynniki mające wpływ na efektywność rekuperacji energii. Zwieńczeniem prac było opracowanie i uruchomienie prototypowego pojazdu o napędzie wielosilnikowym wraz z autorskim algorytmem sterowania.

W zakresie rozważań teoretycznych zweryfikowano główne czynniki mające wpływ na kinematykę pojazdu. Pierwszym jest znaczący wpływ odkształcalności opony na trajektorię ruchu samochodu. Ponadto, w zależności od wykonywanego manewru, zmianie ulegają naciski pionowe na poszczególnych kołach, co determinuje zdolność danego koła do przenoszenia momentu napędowego albo hamującego. Klasyczny mechanizm różnicowy o małym tarciu wewnętrznym charakteryzuje się znaczącymi ograniczeniami w postaci nieprzenoszenia momentu napędowego do podłoża w sytuacji utraty przyczepności przez jedno z kół napędowych. Poprawę właściwości trakcyjnych pojazdu można osiągnąć poprzez napęd IWD, który w sposób dowolny pozwala na sterowanie momentem poszczególnych kół napędowych.

W zakresie analizy dynamiki samochodu zaproponowano model pojazdu czterokołowego o ośmiu stopniach swobody, który uwzględnia przechył nadwozia i związaną z nim zmianę nacisków pionowych na poszczególnych kołach. Model został uzupełniony o modele komponentów układu napędowego, takie jak np. silnik synchroniczny z magnesami trwałymi wraz z układami regulacji. Opracowane modele obliczeniowe w środowisku Matlab Simulink pozwoliły na analizę symulacyjną wpływu różnych parametrów na trajektorię ruchu pojazdów o niezależnym napędzie kół: wyłącznie przedniej osi (FWD), wyłącznie tylnej osi (RWD) oraz napędu na wszystkie koła (AWD). Weryfikacji poddano wpływ: położenia środka masy

między osiami kół, wysokość środka masy, awarię jednego z silników napędowych, hamowanie odzyskowe na łuku drogi oraz strategię sterowania napędem. Wykazano, że pojazd z aktywnym różnicowaniem prędkości ma większą stateczność ruchu w porównaniu do pojazdu bez aktywnego sterowania.

Zweryfikowano poprawność działania algorytmu różnicowania prędkości w niezależnym napędzie kół opartego na odzwierciedleniu zależności kinematycznych pojazdu. Na zmodernizowanym stanowisku laboratoryjnym wykonano badania symulacyjne w czasie rzeczywistym przy wykorzystaniu środowiska dSpace. Zmierzone wartości prędkości silników podczas symulowania manewru skrętu odpowiadały w zadowalającym stopniu wartościom zadanym.

Wykazano, że możliwe jest poprawienie właściwości trakcyjnych pojazdu o napędzie wielosilnikowym poprzez zastosowanie alternatywnych metod rozdziału momentów napędowych pomiędzy osiami kół. Skutkuje to zmniejszeniem poślizgów występujących na kołach pojazdu, czyli lepszym wykorzystaniem ich przyczepności. Najlepsze rezultaty w tym zakresie wykazała metoda aktywnego rozdziału w oparciu o chwilową wartość przyspieszenia wzdłużnego.

Zidentyfikowano i pogrupowano czynniki mające wpływ na efektywność rekuperacji energii, z których najważniejsze to profil hamowania, oraz sumaryczna sprawność komponentów układu napędowego, ale również liczne ograniczenia w zastosowaniu układów hamowania odzyskowego. Wskazano, że samochody z napędem na wszystkie koła mają największy potencjał do odzysku energii z procesu hamowania, ale wymagają kontrolowania dystrybucji momentu hamującego aby uniknąć utraty stateczności.

Ostatnim aspektem przedstawionym w pracy jest opracowanie i uruchomienie prototypowego pojazdu o napędzie wielosilnikowym. Zaproponowana topologia układu sterowania pozwoliła na osiągnięcie pełnej funkcjonalności napędu. Uzyskano dobre szybkości odpowiedzi silników trakcyjnych na zadane przez kierowcę wymuszenia. Oznacza to, że czas obliczeniowy programu z algorytmem sterowania jest krótki. Ta właściwość powinna w przyszłości pozwolić na badania algorytmów stabilizacji toru jazdy.

Słowa kluczowe: Napęd wielosilnikowy, niezależny napęd kół, niezależny napęd osi, dynamika ruchu samochodu, stateczność ruchu, hamowanie odzyskowe, różnicowanie prędkości kół.