

Rafał Stachowski, Marcin Bochiński, Łukasz Ziętek, Łukasz Bielak ¹⁾,
Przemysław Filipek ²⁾

WIELOFAZOWY SILNIK BEZSZCZOTKOWY DO POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH

Streszczenie: W artykule zawarto założenia i projekt konstrukcji wielofazowego bezszczotkowego silnika elektrycznego zintegrowanego z felgą – do pojazdów elektrycznych. Przedstawiono również sposób jego sterowania napięciem stałym oraz zamodelowano taki silnik w 3D wykorzystując program Solid Edge ST2.

Słowa kluczowe: bezszczotkowy silnik elektryczny, pojazd elektryczny.

WSTĘP

Współczesne tempo rozwoju urządzeń użytkowych i przemysłowych nie byłoby tak duże, gdyby nie zastosowanie silników elektrycznych w roli napędów elementów mechanicznych. Charakteryzują się one znacznie większą sprawnością w stosunku do konwencjonalnych układów spalinowych oraz napędzanych siłą ludzkich mięśni. Z tego powodu zyskały dużą popularność wśród producentów urządzeń wielkiej mocy. Jako przykład można podać kolej elektryczną, która znacząco przyczyniła się do wzrostu jakości transportu towarowego i osobowego. Kolejnym obszarem zastosowań silników elektrycznych stała się działalność przemysłowo-produkcyjna. Pozwoliły one na zwiększenie wydajności procesów produkcyjnych przy zmniejszeniu nakładu pracy ludzkiej.

W ciągu ostatnich dwóch dekad zmniejszenie rozmiarów i zużycia energii silników elektrycznych pozwoliło na wykorzystanie ich w urządzeniach powszechnego użytku. Silniki te są obecne w urządzeniach codziennego użytku, począwszy od sprzętu AGD, poprzez komputery i multimedia a skończywszy na większych konstrukcjach typu ruchome schody czy winda.

Znakomite rezultaty zastosowań tego typu napędów spowodowały również znaczny wzrost zainteresowania producentów branży motoryzacyjnej. W ciągu ostatnich trzech lat ilość pojazdów elektrycznych wzrosła 140-krotnie do liczby 75 tys. a prognozy na rok 2012 wskazują na jej podwojenie.

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Studenckie Koło Naukowe Zastosowań Mechatroniki „Elmech”.

² Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn.

POJAZDY ELEKTRYCZNE

Pojazdy elektryczne mogą w zupełności zastąpić pojazdy oparte na konwencjonalnych silnikach spalinowych. Posiadają one szereg unikatowych cech i zalet, wśród których możemy wyróżnić komfort i wygodę podróżowania. Spowodowana jest ona znacznie cichszą pracą silnika elektrycznego, większą płynnością jazdy oraz brakiem emisji spalin. Kolejną zaletą jest również brak skrzyżni biegów oraz wynikająca z tego faktu oszczędność na podzespołach, mniejsza awaryjność mechanizmów i uproszczona obsługa pojazdu, na którą wpływa również możliwość kierowania pojazdem za pomocą joysticka.

Na niższe koszty eksploatacji wpływa również sprawność pojazdów elektrycznych sięgająca 80%. W przeliczeniu, pojazd elektryczny zużywa nawet do 90% mniej energii. Ponadto czynności serwisowe ograniczają się do wymiany opon, akumulatorów oraz płynu do spryskiwaczy. Dużą wydajność zwiększa dodatkowo możliwość odzyskiwania energii podczas hamowania bądź jazdy z górki - wtedy silnik pracuje jako prądnica - ładując akumulatory, co pozwala na uzyskanie nawet dodatkowych 20% energii.

Upowszechnianie się pojazdów elektrycznych wpływa również na sytuację gospodarczą państwa, poprzez zmniejszenie jego zależności od cen i rynków ropy naftowej oraz wydarzeń międzynarodowych.

Pojazdy elektryczne charakteryzują się również nowoczesnymi rozwiązaniami technologicznymi. Do ładowania akumulatorów używane są ogniwa wodorowe a w razie wyczerpania wodoru - panele fotowoltaiczne lub energia z sieci elektrycznej.

Często stosuje się hybrydowe (spalinowo-elektryczne) rozwiązania napędu w pojazdach takich jak np. Toyota Prius, Fiat Multipla Hybryd Power, Nissan Tino Hybryd, Mira, Honda Insight, Lexus RX400h, czy autobusy hybrydowe [3].

Budowa silnika elektrycznego pozwala na zaimplementowanie systemu ABS bez konieczności stosowania oddzielnych modułów, poprzez mikroprocesorowe systemy sterowania.

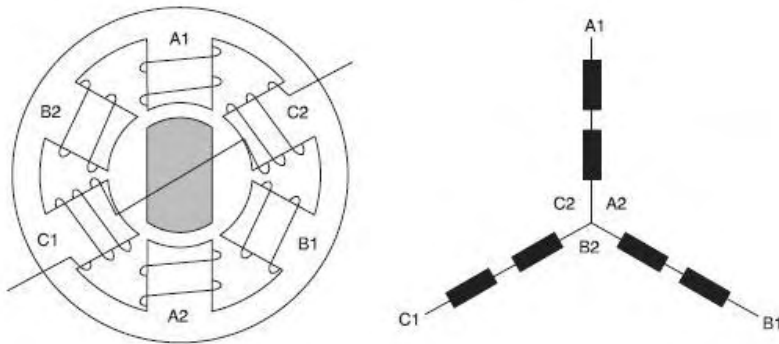
Konstrukcje oparte o silnik elektryczny nie są jednak pozbawione wad. Największą z nich jest ograniczony zasięg, zależny od pojemności zbiornika wodoru oraz czasu ładowania akumulatora. Kolejna, to zakłócenia elektromagnetyczne spowodowane dużą wartością prądu występującego w obwodach zasilania silników. Wpływa to na pracę między innymi: telefonów komórkowych, rozruszników serca itd.

BUDOWA I STEROWANIE SILNIKÓW BEZSZCZOTKOWYCH

Silniki stosowane w pojazdach elektrycznych to najczęściej wielofazowe silniki bezszczotkowe (BLDC: Brushless Direct Current). W porównaniu do klasycznych silników prądu stałego, charakteryzują się one trwałością ograni-

czoną jedynie wytrzymałością łożysk oraz możliwością precyzyjnej regulacji za pomocą zaawansowanych sterowników i czujników pola magnetycznego w postaci sprzężenia zwrotnego.

Budowa silnika BLDC znacząco różni się od rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w innych maszynach elektrycznych. Wśród jego podstawowych elementów składowych można wyróżnić wirnik oraz stojan. Moment napędowy powstaje w wyniku współdziałania pola magnetycznego wirnika i stojana. W odróżnieniu od tradycyjnych silników wirnik wytwarza stałe w czasie pole magnetyczne pochodzące od magnesów stałych. Pole magnetyczne stojana indukowane jest w uzwojeniach skojarzonych w odpowiednie grupy. Największą zaletą silnika BLDC jest brak konieczności stosowania komutatora, dzięki czemu nie występuje zjawisko komutacji oraz straty energii w wyniku przepływu prądu przez szczotki o stosunkowo dużej rezystancji. Wirnik oraz uzwojenia stojana i sposób ich połączenia przedstawione zostały na rysunku 1.



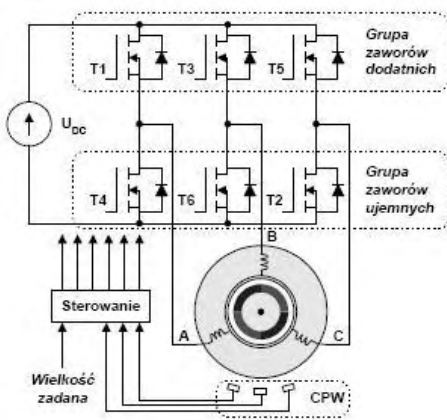
Rys. 1. Budowa i układ połączeń uzwojeń silnika bezszczotkowego [2]

Fig. 2. Construction and connection configuration windings of engine without brushes [2]

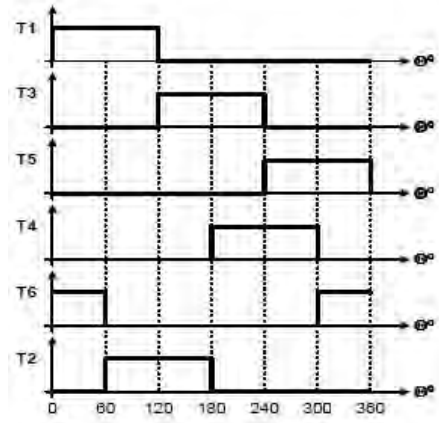
Ruch wirnika możliwy jest dzięki wirującemu polu magnetycznemu stojana. Obroty wirnika są ściśle zależne od częstotliwości zmian pola stojana. W praktyce do sterowania wykorzystuje się układ elektronicznego komutatora a obrót wirnika podzielony jest na sześć faz, w których zasilanie kolejnych uzwojeń przełączane jest w taki sposób aby pole w obwodzie magnetycznym stojana zmieniało swoje położenie o pewien stały kąt wynikający z ilości biegunów. Charakterystyki załączania kolejnych faz przedstawione zostały na rysunku 3.

Układ sterowania realizowany jest zazwyczaj w postaci końcówki mocy opartej na tranzystorach przełączających (rys. 2.), których ilość uzależniona jest od liczby uzwojeń stojana. Realizuje on podstawowe funkcje takie jak zmiana prędkości obrotowej, regulacja przyspieszenia, oraz analizowanie informacji o położeniu wirnika pochodzące ze sprzężenia zwrotnego. W roli sprzężenia występują najczęściej czujniki pola magnetycznego (hallotrony). Możliwa jest też

analiza napięć indukowanych w uzwojeniach i w zależności od nich ustalany odpowiedni dobór parametrów sterowania.



Rys. 2. Schemat układu sterowania silnikiem BLDC [1]
Fig. 2. Steering scheme of BLDC engine [2]



Rys. 3. Charakterystyka sterowania zaworów komutatora elektronicznego [1]
Fig. 3. Steering characteristic of electronic commutator valves [1]

Wraz ze wzrostem mocy silnika, do sterowania wykorzystywane są wyspecjalizowane końcówki mocy oparte na technologii MOSFET lub IGBT oraz sterowniki wykorzystujące układy mikroprocesorowe.

PROJEKT SILNIKA BEZSZCZOTKOWEGO UMIESZCZONEGO W KOLE SAMOCHODU

Zalety i wady

Możliwość stosowania silników elektrycznych bezpośrednio w kole samochodu jest związana głównie z ilością wolnego miejsca, jaka występuje pomiędzy hamulcem a felgą koła. Samochód jako pojazd przeznaczony do użytku publicznego, powinien zapewniać bezpieczeństwo podczas poruszania się po drodze - dlatego musi posiadać mechaniczny hamulec, który zajmuje niekiedy dużo miejsca. Jednakże, odpowiednio zaprojektowany silnik bezszczotkowy daje możliwość umieszczenia go bezpośrednio między hamulcem a felgą.

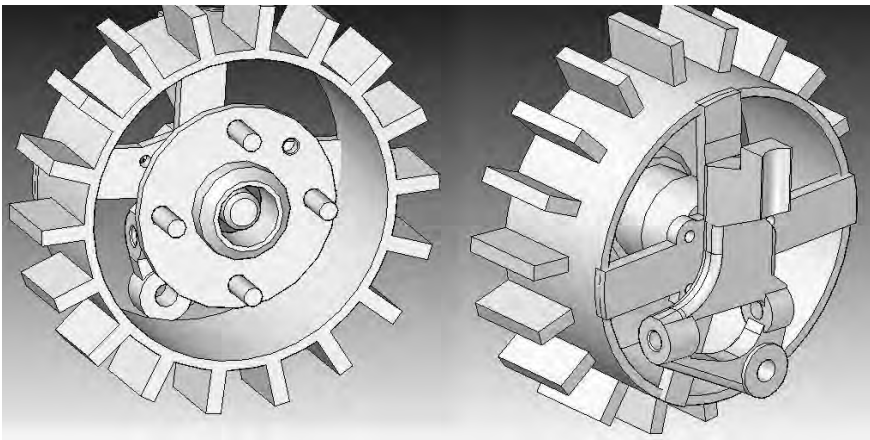
Zaletami takiego rozwiązania mogą być - brak przekładni i wałów napędowych, przez co cały napęd staje się cichszy. Brak przekładni sprawi, że cały moment obrotowy silnika będzie bezpośrednio przekazywany na koło. Silnik taki może być użyty także jako hamulec lub prądnica w momencie hamowania. Zawieszenie takiego samochodu staje się prostsze, szczególnie w osi skrętnej,

gdzie nie potrzebne są skomplikowane przeguby przenoszenia napędu z wnętrza pojazdu na koła.

Wadą tego pomysłu jest wzrost masy nieresorowanej układu koło-zawieszenie. Silnik bezpośrednio umieszczony w kole może być narażony także na warunki atmosferyczne - przede wszystkim na deszcz i śnieg. Stwarza to pewne problemy dotyczące izolacji uzwojeń stojana. Układ ten może być również podatny na uszkodzenia pochodzące od zanieczyszczeń na drodze - takich jak piach, żwir czy drobne kamienie. Te uszkodzenia można jednak ograniczyć stosując odpowiednią konstrukcję silnika z zabezpieczeniami i osłonami.

Konstrukcja silnika

Konstrukcja silnika wielofazowego, bezszczotkowego, umieszczonego w kole pojazdu składa się ze statora, rotora, mechanicznego hamulca oraz felgi z ogumieniem. Nieruchomy stator zbudowany jest ze stalowej obryczy, na której zewnętrznej stronie równomiernie rozłożono 18 cewek elektromagnesów (łączonych po 6 dla 3 faz). Widok obu stron statora przedstawia rysunek 4. W środku statora na łożysku umocowana jest swobodnie obracająca się piasta koła.



Rys. 4. Widok statora silnika z cewkami: od strony czoła piasty (po lewej), ze sposobem jego mocowania (po prawej)

Fig. 4. View engine stator with coil: from front of hub (on the left), with his fix method (on the right)

Rotorem jest również stalowa obrycz o większej średnicy, wewnątrz której umieszczono odpowiednio dobrane magnesy stałe (rys. 5). Magnesy są ułożone naprzemiennie biegunami w formacie N-S-N-S. Wewnątrz obryczy statora znajduje się mechaniczny hamulec z osłoną – przedstawiony na rysunku 6. Działa on pomiędzy wewnętrzną częścią obryczy statora a piastą koła. Kompletny silnik umieszczony w kole pojazdu pokazuje rysunek 7.



Rys. 5. Stator i rotor silnika
Fig. 5. Engine stator and rotor



Rys. 6. Silnik na piaście z widocznym hamulcem i osłoną hamulca
Fig. 6. Engine on the hub with visible brake and brake protection



Rys. 7. Silnik umieszczony w kole
Fig. 7. Engine inside the wheel

WNIOSKI

Zastosowanie silnika elektrycznego w kole samochodu upraszcza konstrukcję zawieszenia (brak przekładni i wałów napędowych), jest cichsze i oszczędza miejsce (brak jednego dużego silnika pod maską).

Bezpośrednie sterowanie każdym kołem z osobna umożliwia precyzyjniejszą jazdę, łatwe sterowanie ABS lub ESP oraz efektywne odzyskiwanie mocy podczas hamowania.

Umieszczenie silnika elektrycznego bezpośrednio w kole stwarza możliwość dobrej diagnostyki prędkości obrotowej koła (np. czujniki hallotronowe), prędkości całego pojazdu, siły hamowania a nawet kąta nachylenia pojazdu – może to wzbogacić system elektronicznego sterowania.

PIŚMIENNICTWO

1. Domaracki A., Krykowski K.: Silniki BLDC – klasyczne metody sterowania. Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne nr 72/2005, Politechnika Śląska, Gliwice 2005.
2. Przepiórkowski J.: Silniki elektryczne w praktyce elektronika, część 2. Elektronika Praktyczna 1/2004. Warszawa 2004, s. 95-101.
3. Jastrzębska G.: Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne. WNT, Warszawa 2007, s. 155-215.

MULTIPHASE ENGINE WITHOUT BRUSHES FOR ELECTRIC VEHICLES

Summary

The article includes assumptions and construction project of multiphase electric engine without brushes integrated with rim - to electric vehicle. We also present how to steer constant voltage and we made that engine in 3D using Solid Edge ST2 program.

Keywords: Electric engine without brushes, electric vehicle.