

Emil Król

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

KSZTAŁTOWANIE CHARAKTERYSTYK MECHANICZNYCH WYSOKOSPRAWNYCH NAPĘDÓW TRAKCYJNYCH

SHAPING OF MECHANICAL CHARACTERISTICS HIGH PERFORMANCE TRACTION DRIVES

Streszczenie: W artykule zaprezentowano najważniejsze zalety silników elektrycznych stosowanych w różnego typu pojazdach z napędem elektrycznym. Na wstępie opisano typy silników elektrycznych ich podstawowe wady i zalety. W kolejnej części skupiono się głównie na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi oraz na metodach kształtowania ich charakterystyki mechanicznej tak, aby była jak najbardziej zbliżona do charakterystyki optymalnej. Charakterystyka optymalna napędu gwarantuje wysoką dynamikę oraz szeroki zakres prędkości obrotowych, przy których może pracować. Pokazano proces kształtowania charakterystyki mechanicznej w napędzie elektrycznym, który został zaprojektowany do samochodu osobowego. Zoptymalizowane układy napędowe pojazdów mogą przyczynić się do znacznego upowszechnienia samochodów z napędem elektrycznym, co przyczyni się do zmniejszenia emisji spalin w miastach oraz poprawę komfortu życia jego mieszkańców. Odpowiednia konstrukcja pojazdu elektrycznego i inteligentne jego sterowanie pozwoli wykorzystać energię hamowania do ładowania akumulatorów trakcyjnych.

Abstract: The article presents the most important advantages of electric motors used in various types of electric vehicles. At the beginning, describe basic advantages and disadvantages of electric motors. The next part focuses mainly on permanent magnets synchronous motors and methods of shaping mechanical characteristics so that it is as close to as possible to the optimal characteristic. The optimum drive characteristic provides high dynamics and a wide range of rotational speeds. Shown is the process of shaping the mechanical characteristics in an electric drive that has been designed for a passenger car. Optimized drive systems of vehicle may help to propagate the use of electric drive. This will contribute to reduction of exhaust gas emission in cities and improved life comfort of the population. Appropriate design of electric vehicle and intelligent control will make it possible to use braking energy for charging traction batteries.

Słowa kluczowe: pojazd elektryczny, napęd elektryczny, charakterystyka mechaniczna.

Keywords: electric vehicle, electric drive, mechanical characteristic.

1. Wstęp

Samochody z napędem elektrycznym są pojazdami idealnymi do wykorzystania w warunkach miejskich i podmiejskich [8]. Ich głównymi zaletami jest wysoka sprawność przetwarzania energii w elektrycznych układach napędowych oraz zmniejszone zużycie energii w stosunku do pojazdu z napędem spalinowym. Dodatkowymi zaletami pojazdów z napędem elektrycznym jest niska emisja hałasu, brak emisji szkodliwych toksyn, które są zawarte w spalinach pojazdów z napędem spalinowym oraz niższe koszty eksploatacji [2]. Aby pojazd z napędem elektrycznym spełniał wszystkie wymagania powinien być wyposażony w odpowiednio dobrany silnik elektryczny oraz inne elementy układu napędowego, takie jak wydajny akumulator trakcyjny, falownik energoelektroniczny czy odpowiedni most mechaniczny z mechanizmem różnicowym. Do budowy pojazdów

z napędem elektrycznym stosuje się zarówno silniki prądu stałego, silniki asynchroniczne jak i silniki synchroniczne z magnesami trwałymi prądu przemiennego [1]. W poniższym artykule skupiono się na silnikach prądu przemiennego, gdyż tylko takie silniki są wykorzystywane w nowoczesnych napędach pojazdów. Najczęściej wykorzystuje się następujące silniki prądu przemiennego:

- asynchroniczne klatkowe;
- silniki z magnesami trwałymi z trapezoidalnym kształtem siły elektromotorycznej BLDC;
- silniki synchroniczne z magnesami trwałymi z sinusoidalnym kształtem siły elektromotorycznej PMSM.

Do realizacji napędu pojazdu elektrycznego można wykorzystać każdy z wymienionych silników.

Warunkiem koniecznym jest odpowiedni dobór

momentu maksymalnego, mocy oraz maksymalnej prędkości obrotowej silnika. Dobór silnika i falownika będzie decydował o osiągnięciach pojazdu. Silniki z magnesami trwałymi mają największą sprawność spośród silników stosowanych w napędach trakcyjnych.

Do największych zalet silników PMSM należą [3,4]:

- wysoka sprawność w całym zakresie prędkości obrotowej;
- szeroki zakres prędkości obrotowej;
- duża przeciążalność momentem;
- mniejsze wymiary gabarytowe w porównaniu do silników indukcyjnych lub silników prądu stałego;
- efektywna regulacja prędkości obrotowej;
- duża niezawodność ruchowa w porównaniu do silników prądu stałego, brak węzła szczotkowego.

Do wad omawianych silników możemy zaliczyć [1,2]:

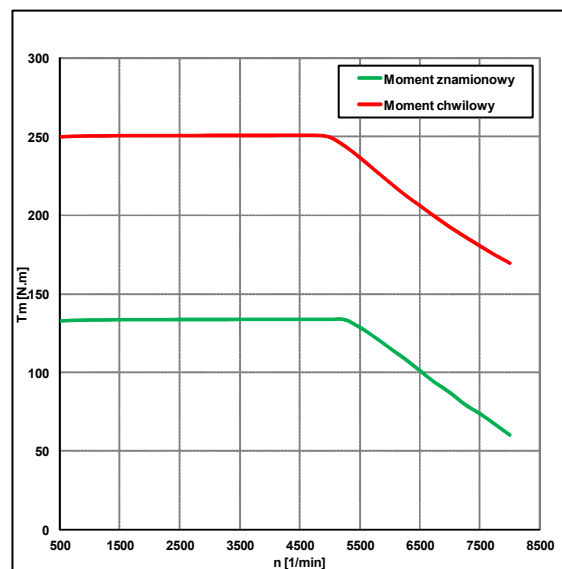
- konieczność zastosowania falownika;
- wyższą cenę w porównaniu do silników indukcyjnych;
- konieczność zastosowania enkodera lub innych czujników prędkości obrotowej.

2. Charakterystyki trakcyjne silników synchronicznych z magnesami trwałymi

Silniki elektryczne z magnesami trwałymi dzielą się na kilka grup w zależności od sposobu oraz miejsca umieszczenia magnesów trwałych w maszynie [1,2]. Kolejny podział narzuca sposób sterowania maszyny. Silniki z magnesami umieszczonymi na wirniku (SPM) [5] ze względu na sposób sterowania można podzielić na silniki bezszczotkowe prądu stałego (BLDC) oraz silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM). Silniki z magnesami trwałymi umieszczonymi w wirniku są w większości sterowane jako silniki synchroniczne tzw. PMSM IPM. W dalszej części artykułu zostaną omówione tylko silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, gdyż tylko ten typ silnika pozwala na efektywną pracę w drugiej strefie sterowania (Rys.1.) ze stałą mocą. W pierwszej strefie regulacji prędkości obrotowej od zera aż do tzw. prędkości bazowej, limitowanej napięciem stałym zasilania falownika, silniki PMSM są sterowane przez falownik algorytmem, który wymusza, by pracowały przy optimum ilorazu momentu elektromagnetycznego do prądu zasilania [2,3]. W drugiej strefie regulacji prędkości powyżej prędkości bazowej silnik

pracuje w strefie stałej mocy. Zwiększanie prędkości obrotowej silnika jest realizowane przez osłabianie strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej silnika, co wiąże się również z obniżeniem momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik. W drugiej strefie regulacji falownik zmniejsza moment proporcjonalnie do przyrostu prędkości w efekcie moc silnika utrzymuje się na stałym poziomie. Dla silników asynchronicznych stosuje się również trzecią strefę regulacji tzw. strefę obniżenia mocy, jednak ze względu na wysokie napięcie od magnesów (BACK EMF) jest ona rzadko stosowana w silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi.

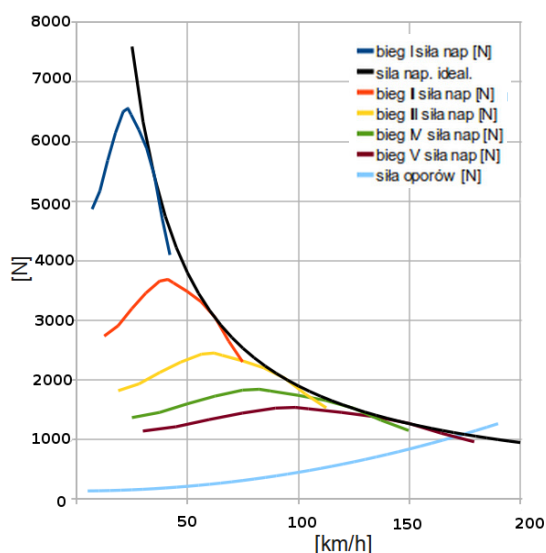
W silnikach z magnesami trwałymi chwilowy moment obciążenia może być kilkakrotnie większy od momentu znamionowego (wartość momentu maksymalnego determinuje wydajność prądowa falownika). Dla rzeczywistych układów zwykle przeciążalność prądowa falownika wynosi około 2. Przeciążalność momentem decyduje o krotności momentu rozruchowego, jak również o dynamice działania napędu i całego pojazdu. Dynamika pojazdu jest jednym z kryteriów aktywnego bezpieczeństwa na drodze, gdyż dzięki dużej dynamice można znacząco skrócić niebezpieczne manewry drogowe, takie jak wyprzedzanie.



Rys. 1. Charakterystyki silnika PMSM z dwustrefową regulacją prędkości obrotowej.

3. Kształtowanie charakterystyki trakcyjnej silników synchronicznych z magnesami trwałymi

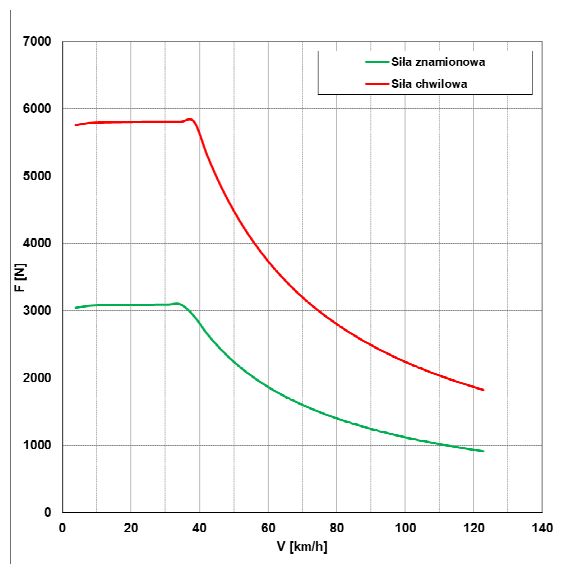
Trakcyjne silniki elektryczne dysponują wysokim momentem oraz szerokim zakresem regulacji prędkości obrotowych. Przy odpowiednio zaprojektowanym układzie chłodzenia silnik synchroniczny z magnesami trwałymi może długotrwale utrzymywać moment znamionowy od prędkości równej zero do prędkości bazowej oraz krótkotrwale wytwarzać moment maksymalny w podobnym zakresie prędkości [6]. Dodatkowo silniki z magnesami mają jednakowe charakterystyki przy pracy silnikowej, jak i generatorowej. Powyższe zalety silników pozwalają projektować nowoczesne układy napędowe składające się wyłącznie z silnika i przekładni głównej (mechanizm różnicowy) [1]. W tego typu napędach rezygnuje się ze skrzyni biegów co upraszcza układ napędowy, ale wymaga od silnika bardzo wysokich momentów rozruchowych i pracy przy wysokich prędkościach obrotowych. Przy projektowaniu silnika elektrycznego bardzo łatwo jest uzyskać wysokie momenty rozruchowe [1], jak również wysoką prędkość obrotową jednak spełnianie obu warunków równocześnie jest już trudne i wymaga kompromisu obu tych parametrów.



Rys. 2. Charakterystyki trakcyjne samochodu z silnikiem spalinowym wyposażonym w skrzynię biegów. (źródło: <https://autokult.pl/>) [7]

Na Rys.2. przedstawiono charakterystykę mechaniczną samochodu z silnikiem spalinowym o mocy 160 KM pracującego z pięciobiegową skrzynią biegów [7]. Na Rys.3. przedstawiono charakterystykę trakcyjną silnika PMSM o mo-

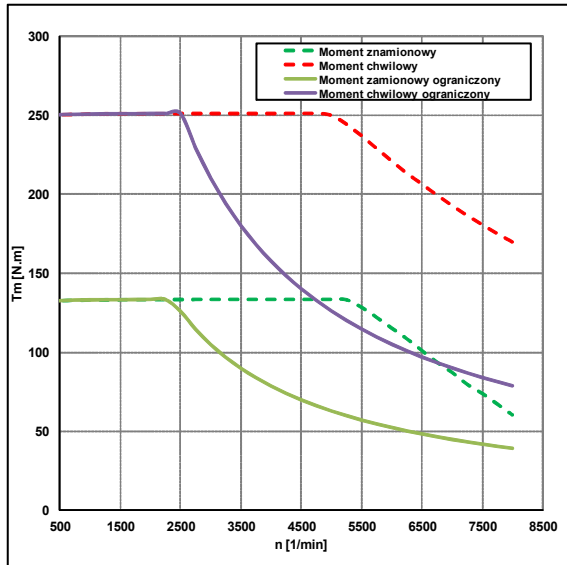
cy maksymalnej 66 kW połączonego z przekładnią z mechanizmem różnicowym o przełożeniu 7, przeliczoną na siłę uciągu pojazdu. Pomimo znacznie mniejszej mocy silnika elektrycznego pojazd wyposażony w ten napęd, dysponuje lepszą dynamiką w stosunku do pojazdu wyposażonego w napęd spalinowy (Rys.2).



Rys. 3. Charakterystyki trakcyjne napędu silnika PMSM z programowym kształtowaniem charakterystyki przeliczone na siłę na kołach w funkcji prędkości pojazdu

Aby zapewnić porównywaną dynamikę pojazdu z napędem elektrycznym, silnik elektryczny powinien mieć zbliżony kształt charakterystyki mechanicznej do wypadkowej charakterystyki użycia wszystkich biegów w samochodzie z silnikiem spalinowym. Optymalna charakterystyka silnika (Rys.2.) dla pojazdu powinna mieć bardzo wysoki moment maksymalny, który silnik musi utrzymać do 20% wartości prędkości maksymalnej pojazdu. Dla pojazdów miejskich można założyć że wystarczająca jest prędkość maksymalna na poziomie 150 km/h, w związku z tym prędkość bazowa powinna wynosić około 30% wartości maksymalnej to jest 50 km/h. Aby uzyskać wymagany kształt charakterystyki należy sztucznie (programowo) ograniczyć parametry silnika w falowniku (Rys.4.). Ze względu na zasilanie silnika elektrycznego poprzez falownik z akumulatora trakcyjnego o ograniczonej pojemności i wydajności prądowej, mamy ograniczenie wartości pobieranego prądu oraz ograniczenie wartości napięcia zasilania. Ograniczenie napięcia przekłada się na ograniczenie prędkości maksymalnej silnika. Natomiast ograniczenie prądu

akumulatora przekłada się na ograniczenie momentu a zarazem i mocy silnika (Rys.4.).



Rys. 4. Charakterystyki trakcyjne silnika PMSM z programowym kształtowaniem charakterystyki

Korzystając z możliwości odzobudzenia silnika PMSM możemy podnieść prędkość maksymalną silnika, w tym przypadku ograniczeniem staje się wytrzymałość napięciowa falownika przy zaniku osłabiania strumienia głównego w silniku przy maksymalnej prędkości obrotowej. Zanik osłabiania strumienia głównego w silniku powoduje gwałtowny wzrost napięcia od magnesów trwałych mogący w niesprzyjających warunkach uszkodzić napięciowo falownik. Ograniczenie to powoduje, że dla typowych falowników (nieprzewymiarowanych napięciowo), prędkość bazowa silnika nie może być mniejsza, niż 50% prędkości maksymalnej. Chcąc ograniczyć napięcie od magnesów (BACK EMF), należy zredukować liczbę zwojów na fazę w silniku. Zmniejszenie liczby zwojów, przy niezmienionej wydajności prądowej falownika, ograniczy moment maksymalny silnika [1].

Aby w dalszym ciągu móc utrzymać wysoki moment obrotowy wału silnika, a za razem wymaganą dynamikę pojazdu, należy przewymiarować napęd elektryczny (silnik w stosunku do osiągniętej mocy, a zastosować falownik na wyższe prądy). Taki zabieg pozwoli elektronicznie kształtować wymaganą charakterystykę trakcyjną napędu (Rys.4.) oraz spełni wszystkie wymagane przyspieszenia i prędkości.

4. Podsumowanie

Przewymiarowanie mocowe silnika oraz przewymiarowanie prądowe falownika, z równoczesnym ograniczeniem prędkości bazowej, są jednymi z najczęściej stosowanych metod kształtowania charakterystyki trakcyjnej silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Często stosowaną metodą kształtowania charakterystyki trakcyjnej silników z magnesami trwałymi jest zwielokrotnienie licznych faz silnika do sześciu lub dziewięciu. Dzięki zwielokrotnieniu liczby faz mamy możliwość zastosowania większej liczby falowników, co skutkuje znaczącym podniesieniem ich sumarycznej wydajności prądowej. Metoda ta stosowana jest w silnikach dużej mocy gdzie bardzo trudno uzyskać pojedyncze falowniki o odpowiedniej wydajności prądowej. Każdy z falowników w takim układzie pracuje na oddzielnym uzwojeniu odizolowanym galwanicznie od innych falowników zasilających jeden silnik. Metoda ta wymaga specjalnej konstrukcji silnika oraz falowników 3- faz ze specjalnym oprogramowaniem.

Inną metodą stosowaną przez producentów elektrycznych napędów trakcyjnych jest stosowanie specjalnego falownika, który umożliwi przełączanie liczby zwojów silnika w trakcie jego pracy. W takim układzie silnik musi mieć wykonane specjalne uzwojenie. W tym przypadku nie ma konieczności przewymiarowania silnika mocowo, a napęd zachowuje się jakby miał zintegrowaną przekładnię mechaniczną, czyli realizuje pełne pokrycie wymaganej charakterystyki trakcyjnej. Metoda ta jest rzadko stosowana ze względu na wysokie koszty specjalnego falowania i skomplikowanego silnika. Kolejną metodą szeroko stosowaną np. przez Toyotę, jest budowa specjalnego układu podnoszącego napięcie DC zasilające falownik w drugiej strefie regulacji prędkości obrotowej. Dodatkowe urządzenie podnoszące napięcie DC stanowi dodatkowy koszt napędu. W wielu przypadkach koszt urządzenia podnoszącego napięcie DC jest porównywalny do kosztu falownika, który ze względu na wyższą wartość stosowanych napięć musi być również przewymiarowany napięciowo. Dodatkowa przetwornica DC/DC obniża sprawność całego napędu oraz znacząco podnosi jego masę.

Obecnie dostępne samochody z napędem elektrycznym mają zasięg ok. czterokrotnie mniejszy od swoich odpowiedników z napędem spa-

linowym [8,9]. Różnica jest jeszcze bardziej widoczna w okresie jesienno-zimowym, w którym kierowcy zaczynają używać elektrycznego ogrzewania wnętrza pojazdu. Zwiększenie zasięgu pojazdu z napędem elektrycznym do poziomu porównywalnego z samochodami z napędem spalinowym wiąże się ze znaczącym zwiększeniem pojemności akumulatorów, a co za tym idzie masy pojazdu. Opracowanie akumulatorów, o wyższej gęstości energii pozwoliłoby pojazdom z napędem elektrycznym dorównać pod względem zasięgu obecnym pojazdom z napędem spalinowym. Dodatkowo zwiększenie pojemności akumulatorów trakcyjnych pozytywnie wpłynie na ich obciążalność prądową, a co za tym idzie na łatwość kształtowania charakterystyki trakcyjnej napędów elektrycznych. Cechą charakterystyczną napędu elektrycznego połączonego z mostem mechanicznym ze zintegrowanym mechanizmem różnicowym jest to, że pojazdem z tym napędem można poruszać się jak pojazdem z automatyczną skrzynią biegów, a ponieważ nie ma możliwości odłączania mechanizmu przenoszącego moment od silnika elektrycznego, można wykorzystywać silnika w całym zakresie pracy silnikowej i prądnicowej. Taki stan pracy bardzo łatwo wykorzystać przy hamowaniu regeneracyjnym, które nie tylko pozwala kierowcy odzyskać część energii, ale również pozwala zmniejszyć zapylenie wynikające ze zużywających się klocków układu hamulcowego.

Przewymiarowanie mocowe silnika napędowego oraz falowników pojazdu niekorzystnie wpływa na jego masę i zajmowaną objętość. Objętość i masa silnika jest kolejnym elementem ograniczeń jakie narzuca budowa nowoczesnego samochodu osobowego.

Zoptymalizowane układy napędowe samochodów i innych pojazdów mogą przyczynić się do znacznego upowszechnienia tych pojazdów z napędem elektrycznym, co przyczyni się do zmniejszenia emisji spalin w miastach oraz wpłynie na poprawę komfortu życia jego mieszkańców.

Literatura

[1]. Bernatt J.: „Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi”, Wydawnictwo BOBRME Komel Katowice 2011.

[2]. Rossa R., Król E., „Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „e-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych

i dostawczych”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 4/2012 (97), str. 75-80.

[3]. Morimoto S., Hatanaka K., Tong Y., Takeda Y., Hirasa T., “Servo Drive System and Control Characteristics of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motor”, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 29, No. 2, pp. 338-343, Mar./Apr. 1993.

[4]. Morimoto S., Sanada M., Takeda Y., “Taniguchi K., Optimum Machine Parameters and Design of Inverter-Driven Synchronous Motors for Wide Constant Power Operation”, Ind. Appl. Society Annual Meeting, 1994, Conference Record of the 1994 IEEE, pp. 177-182.

[5]. Fręchowicz A., Dukalski P., Białas A., „Projekt napędu samochodu elektrycznego z dwustrefowym układem sterowania współpracującym z silnikiem PMLDLC”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 3/2012 (96), str. 115-121.

[6]. Król E., Rossa R., „Badanie układu napędowego pojazdu z napędem e-Kit pod kątem zwiększenia zasięgu”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 2/2015, str. 257-261.

[7]. <https://autokult.pl/15892.przekladnie-bezstopniowe-cvt>.

[8]. Gawron S., Bernatt J.: "Doświadczenia z eksploatacji samochodów elektrycznych w działalności gospodarczej", Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 2/2017 (114), str. 231-238.

[9]. Gawron S.: "Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania", Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 1/2016 (109), str. 1-10.

Autor

mgr inż. Emil Król

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL

40-203 Katowice,

al. Roździeńskiego 188