

Charakterystyki mechaniczne napędów trakcyjnych – metody kształtowania

Emil Król

1. Wstęp

Pojazdy z napędem elektrycznym idealnie nadają się do wykorzystania w warunkach miejskich i podmiejskich. Ich głównymi zaletami są wysoka sprawność przetwarzania energii w elektrycznych układach napędowych oraz zmniejszone zużycie energii w stosunku do pojazdów z napędami spalinowymi. Dodatkowymi zaletami pojazdów z napędem elektrycznym są 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. Najczęściej do budowy pojazdów z napędem elektrycznym stosuje się silniki synchroniczne z magnesami trwałymi prądu przemiennego [1], jednak czasem spotykamy również silniki prądu stałego i silniki asynchroniczne. W poniższym artykule skupimy się na silnikach prądu przemiennego, gdyż tylko takie silniki są wykorzystywane w nowoczesnych napędach pojazdów.

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 i dynamice 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 czujników prędkości obrotowej.

Streszczenie: W artykule zaprezentowano najważniejsze zalety silników 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 napędu elektrycznego, który został zaprojektowany do samochodu osobowego. Zoptymalizowane układy napędowe pojazdów mogą przyczynić się do znacznego upowszechnienia samochodów z napędem elektrycznym, co doprowadzi do zmniejszenia emisji spalin w miastach oraz poprawy komfortu życia ich mieszkańców. Odpowiednia konstrukcja pojazdu elektrycznego i inteligentne jego sterowanie pozwoli wykorzystać energię hamowania do ładowania akumulatorów trakcyjnych.

Słowa kluczowe: pojazd elektryczny, napęd elektryczny, charakterystyka mechaniczna

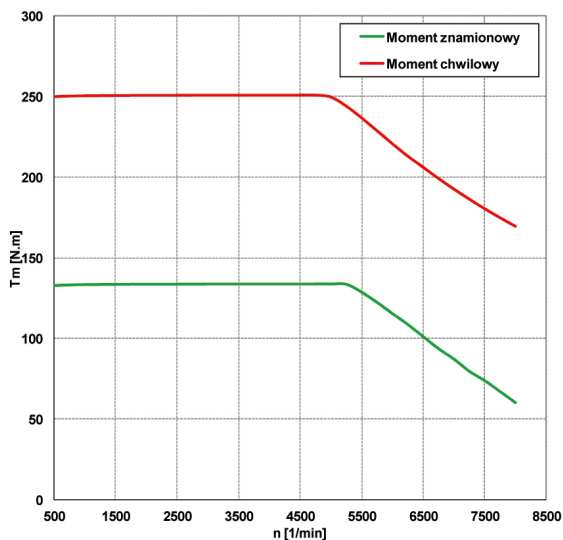
MECHANICAL CHARACTERISTICS TRACTION DRIVES – METHODS OF SHAPING

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.

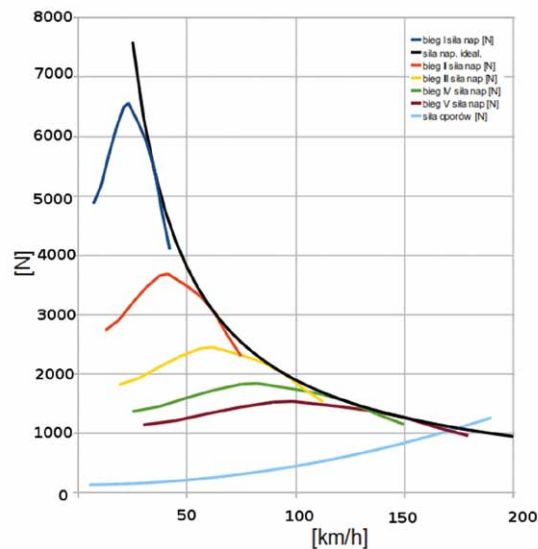
Keywords: electric vehicle, electric drive, mechanical characteristic

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



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



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

magnesów trwałych w maszynie [1, 2]. Kolejny podział narzuca sposób sterowania maszyny. Silniki z magnesami umieszczonymi na powierzchni wirnika (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 wewnątrz wirnika 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 prawidłowo dobranych 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 znacząco skraca się czas potrzebny na niebezpieczne manewry drogowe, takie jak wyprzedzanie.

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 zarówno 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.

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę mechaniczną samochodu z silnikiem spalinowym o mocy 160 KM, pracującego z pięciobiegową skrzynią biegów. Na rys. 3 przedstawiono charakterystykę trakcyjną silnika PMSM o mocy maksymalnej 66 kW, połączonego z przekładnią z mechanizmem różnicowym o przełożeniu 7, przeliczoną na siłę uciążu 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).

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).

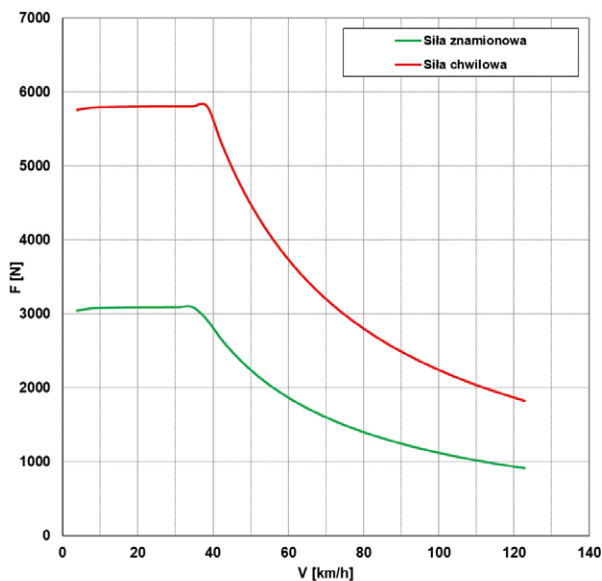
Korzystając z możliwości odzwbudzenia silnika PMSM, możemy zwiększyć prędkość maksymalną silnika. W tym przypadku ograniczeniem jest wytrzymałość napięciowa falownika przy zaniku osłabiania strumienia głównego w silniku, przy maksymalnej prędkości obrotowej. Zanik osłabiania strumienia głównego w silniku 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 niezminionej wydajności prądowej falownika ograniczy moment maksymalnego silnika [1].

Aby w dalszym ciągu móc utrzymać wysoki moment silnika, a zarazem wymaganą dynamikę pojazdu, należy przewymiarować silnik mocowo, a falowniki prądowo. Taki zabieg pozwoli elektronicznie kształtować wymaganą charakterystykę trakcyjną napędu (rys. 4) oraz spełniać wszystkie wymagane przyspieszenia i prędkości.

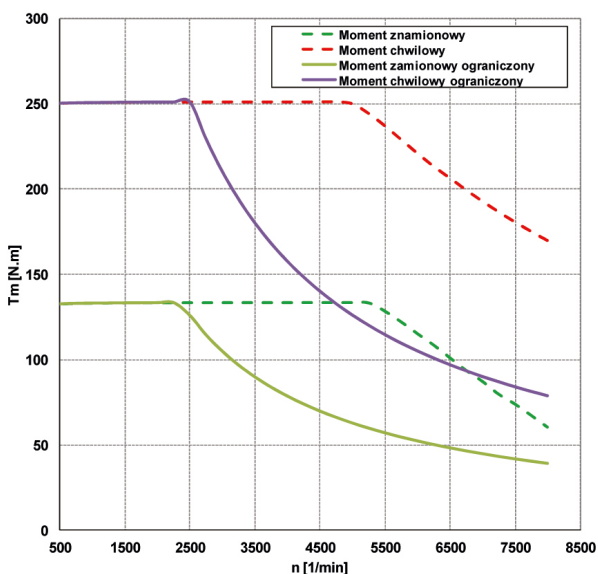
5. Podsumowanie

Przewymiarowanie mocowe silnika oraz przewymiarowanie prądowe falownika z równoczesnym ograniczeniem prędkości bazowej należą do najczęściej stosowanych metod kształtowania charakterystyki trakcyjnej silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Często stosowaną metodą kształtowania charakterystyki trakcyjnej silników z magnesami trwałymi jest zwielokrotnienie liczby faz silnika do sześciu lub dziewięciu. Dzięki zwielokrotnieniu liczby mamy możliwość zastosowania większej liczby falowników, co skutkuje znaczącym podniesieniem ich sumarycznej 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-fazowych ze specjalnym oprogramowaniem.

reklama



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



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

Inną metodą stosowaną przez producentów elektrycznych napędów trakcyjnych jest użycie specjalnego falownika, który umożliwia przełączanie liczby zwojów silnika w trakcie jego pracy. Silnik musi mieć wykonane specjalne uzwojenie. 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. Dodatkowo urządzenie podnoszące napięcie DC zwiększa koszt napędu. W wielu przypadkach koszt urządzenia podnoszącego napięcie DC jest

porównywalny z kosztem falownika, który ze względu na wyższe wartości stosowanych napięć musi być również przewymiarowany napięciowo. Dodatkowa przetwornica DC/DC obniża sprawność całego napędu oraz znacząco zwiększa jego masę.

Kolejnym kluczowym parametrem pojazdu elektrycznego jest zasięg. Zwiększenie zasięgu pojazdów 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 i łatwość kształtowania charakterystyki trakcyjnej. Przewymiarowanie mocowe silnika napędowego oraz falowników pojazdu niekorzystnie wpływa na jego masę i objętość. Objętość i masa silnika są kolejnym elementem ograniczeń, jakie narzuca budowa nowoczesnego samochodu osobowego.

Zoptymalizowane układy napędowe samochodów i innych pojazdów mogą przyczynić się do znacznego upowszechnienia pojazdów z napędem elektrycznym, co spowoduje zmniejszenie emisji spalin w miastach oraz wpłynie na poprawę komfortu życia ich 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” 4(97)/2012.
- [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, 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.
- [5] FRĘCHOWICZ A., DUKALSKI P., BIAŁAS A.: *Projekt napędu samochodu elektrycznego z dwustrefowym układem sterowania współpracującym z silnikiem PMSM*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 3(96)/2012.
- [6] KRÓL E., ROSSA R.: *Badanie układu napędowego pojazdu z napędem e-Kit pod kątem zwiększenia zasięgu*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”.

mgr inż. Emil Król – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

artykuł recenzowany