

Emil Król, Tomasz Wolnik

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

SILNIKI PMSM DO ZASTOSOWAŃ TRAKCYJNYCH – WŁAŚCIWOŚCI UKŁADU ZASILANIA OGRANICZAJĄCE PARAMETRY SILNIKA

PMSM MOTORS FOR TRACTION APPLICATIONS – LIMITATIONS OF THE POWER supply SYSTEM

Streszczenie: W artykule zwrócono główną uwagę na ograniczenia parametrów silnika trakcyjnego PMSM, jakie wprowadzają w układzie napędowym elementy układu zasilania. W szczególności dotyczy to wartości momentu i prędkości maksymalnej. Istnieją sytuacje, w których projektowany silnik trakcyjny mógłby osiągać lepsze parametry, jednakże w rzeczywistym układzie istnieją ograniczenia np. prądowe i napięciowe po stronie zasilającej silnik, które je limitują. Dostępność rynkowa układów energoelektronicznych oraz baterii trakcyjnych jest ograniczona i nie można ich dobierać w sposób elastyczny. W efekcie, albo silnik trakcyjny musi być przewymiarowany gabarytowo (w stosunku do obciążeń termicznych) albo przewymiarowane są elementy układu zasilania. W publikacji skupiono się głównie na silnikach synchronicznych (PMSM) z magnesami trwałymi oraz na wpływie ograniczeń falownika i akumulatora na charakterystyki mechaniczne napędu. Pokazano proces prawidłowego doboru parametrów falownika i akumulatora pojazdu oraz ich wpływ na kształtowanie charakterystyki mechanicznej napędu elektrycznego.

Abstract: In this paper the main attention has been focused on the limitations of the PMSM traction motor parameters introduced in the power system by the power system elements. In particular, this concerns the values of torque and maximum speed. There are situations in which the designed traction motor could have better parameters, but in the real system there are limitations, e.g. current and voltage on the motor supply side, which limit them. The market availability of power electronics and traction batteries is limited and cannot be selected flexibly. As a result, either the traction motor must be oversized (in relation to the thermal loads) or the power system components are oversized. The publication focuses mainly on permanent magnet synchronous motors (PMSM) and the effect of inverter and battery limitations on the mechanical characteristics of the drive. The process of proper selection of inverter and vehicle battery parameters and their influence on shaping the mechanical characteristics of the electric drive is shown.

Słowa kluczowe: napęd elektryczny, silniki PMSM, zasilanie falownikowe

Keywords: electric drive, PMSM motors, power supply inverters

1. Wstęp

Niniejszy artykuł jest kolejnym, w którym przedstawiono istotne aspekty związane z elektrycznym napędem trakcyjnym, wykorzystującym silniki PMSM. W publikacji omówiono zagadnienie ograniczeń parametrów eksploatacyjnych silnika, w tym momentu i prędkości maksymalnej, jakie wprowadzają w układzie napędowym elementy układu zasilania. Ograniczenia te skutkują koniecznością przewymiarowania gabarytowego silnika lub elementów układu zasilania.

Samochody z napędem elektrycznym są pojazdami, które bardzo dobrze nadają się do wykorzystania w warunkach miejskich i podmiejskich. Ich głównymi zaletami jest wysoka sprawność przetwarzania energii w energię me-

chaniczną, niska emisja hałasu oraz brak emisji szkodliwych toksyn, które są zawarte w spalinach pojazdów z napędem spalinowym [1]. Aby pojazd z napędem elektrycznym np. autobus miejski spełniał wszystkie wymagania eksploatacyjne, powinien być wyposażony w odpowiednio dobrany silnik elektryczny oraz elementy układu napędowego, takie jak wydajny akumulator trakcyjny, falownik energoelektroniczny czy odpowiedni most mechaniczny z mechanizmem różnicowym. W trakcyjnych napędach elektrycznych stosuje się zarówno silniki prądu stałego, silniki asynchroniczne, jak i silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, cechujące się najwyższymi parametrami eksploatacyjnymi [1]. Do realizacji napędu pojazdu elektrycznego można wykorzystać każdy

z wymienionych silników, lecz w niniejszym artykule skupimy się na silnikach synchronicznych PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor PMSM). Warunkiem koniecznym dla napędu trakcyjnego jest spełnienie wymagań w zakresie momentu maksymalnego, mocy znamionowej oraz maksymalnej prędkości obrotowej silnika. Dobór parametrów układu silnik - falownik będzie tu decydował o ostatecznych osiągnięciach pojazdu.

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.

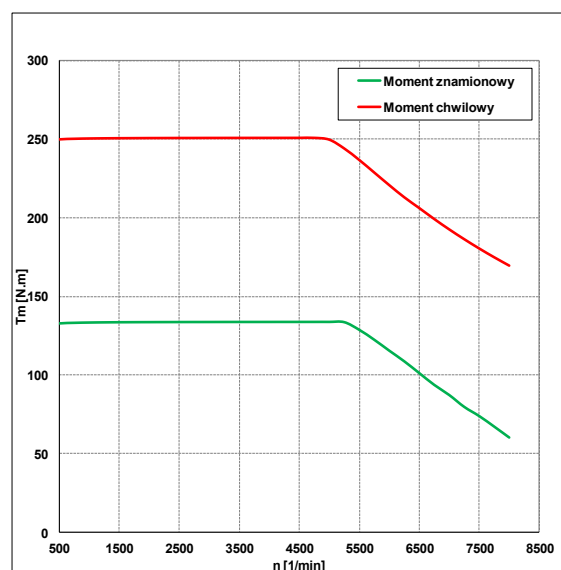
Do wad omawianych silników możemy zaliczyć [1,2]:

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

2. Charakterystyki trakcyjne silników PMSM 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. Idealną charakterystyką eksploatacyjną silnika PMSM byłaby taka, która pozwala na pracę ze stałą wartością momentu znamionowego/maksymalnego, aż do wartości prędkości maksymalnej. Wówczas maksymalna dynamika pojazdu utrzymywana byłaby w pełnym zakresie regulacji, niezależnie od jego prędkości. W czasie projektowania silnika elektrycznego bardzo łatwo jest uzyskać wysokie wartości momentu rozruchowego/maksymalnego [1], jak również wysoką prędkość maksymalną, jednak spełnianie obu warunków równocześnie jest już bardzo trudne i niestety wymaga kompromisu obu tych parametrów. Kompromis ten polega na odpowiednim kształtowaniu charakterystyki silnika z podziałem na strefę stałego momentu i strefę stałej

mocy. W przeciwnym przypadku, bez wprowadzenia odpowiedniego kształtowania charakterystyki eksploatacyjnej, spełnienie tych warunków wymagałoby znacznego przewymiarowania silnika. Z punktu widzenia charakterystyk oporów ruchu oraz charakterystyk trakcyjnych pojazdu, duże wartości momentów są zwykle potrzebne przy małych prędkościach pojazdu, natomiast aby pojazd mógł poruszać się z dużą prędkością maksymalną, odpowiednio duża musi być również prędkość maksymalna silnika. Z tego względu typowa charakterystyka trakcyjna silnika elektrycznego kształtuje się jak pokazano na rysunku 1.



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

3. Wpływ parametrów zasilania na kształtowanie charakterystyki trakcyjnej napędu

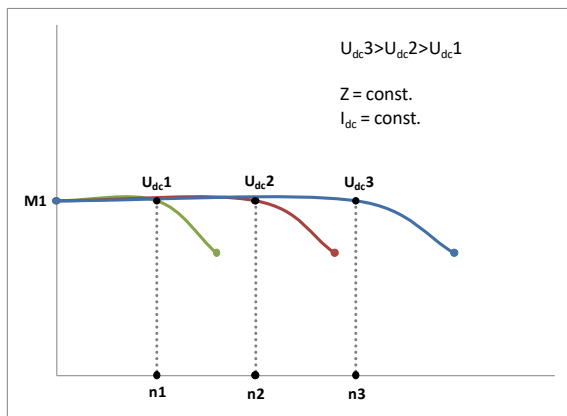
Zalety trakcyjnych silników elektrycznych pozwalają projektować nowoczesne układy napędowe składające się wyłącznie silnika i przekładni głównej (mechanizm różnicowy) [1]. W tego typu napędach rezygnuje się ze skrzyni biegów co upraszcza układ napędowy, ale wymaga od silnika bardzo wysokich momentów maksymalnych i pracy przy wysokich prędkościach obrotowych.

Pierwsza strefa regulacji prędkości obrotowej od zera aż do tzw. prędkości bazowej (przebieg charakterystyki), limitowana jest napięciem DC zasilania falownika, które jest równocześnie napięciem akumulatora trakcyjnego (rys.1). W tej strefie silniki PMSM są sterowane przez falownik algorytmem, który wymu-

sza, by pracowały przy maksimum 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 (odwzbudzenie) w szczeliny powietrznej poprzez odpowiednie sterowanie falownikiem silnika, co wiąże się również z obniżeniem momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik. Moment ten zmniejsza się proporcjonalnie do przyrostu prędkości obrotowej, w efekcie czego moc silnika utrzymuje się na stałym poziomie. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę, że pomimo zmniejszania momentu, silnik zasilany jest cały czas stałą wartością RMS prądu fazowego z większym udziałem składowej prądu I_d . Poziom napięcia zasilania jest więc pierwszym ograniczeniem w torze zasilania, który wymusza odpowiedni kształt charakterystyki silnika (rys. 2).

Korzystając z możliwości odwzbudzenia 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 np. stan awaryjny.

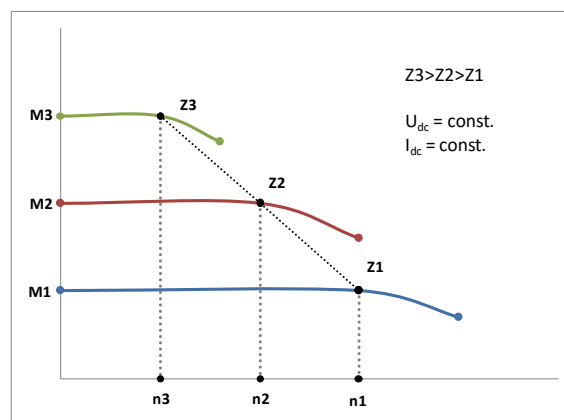


Rys.2. Wpływ zmiany napięcia zasilania DC na kształt charakterystyki eksploatacyjnej silnika; Z – liczba zwojów, M – moment, n – prędkość obrotowa

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 niezmięnionej wydajności prądowej falownika ogranicza niestety moment maksymalny silnika [1].

W silnikach trakcyjnych, wymagane wartości chwilowych momentów obciążenia są kilkakrotnie większe od momentu znamionowego. Wartość momentu maksymalnego silnika jest determinowana głównie wydajnością prądową falownika jak i odpowiednio dobraną liczbą zwojów, przy czym zwiększanie liczby zwojów powoduje wzrost maksymalnego momentu. Z drugiej strony dobór liczby zwojów jest związany również z maksymalnym zakresem prędkości obrotowej, z tym że ze skutkiem odwrotnym tzn. zwiększanie liczby zwojów przy niezmięnionej wartości napięcia zasilania DC powoduje zmniejszanie prędkości maksymalnej (rys.3). W efekcie końcowym, po znalezieniu kompromisu w doborze ilości zwojów można przyjąć, że wydajność prądowa falownika determinuje moment maksymalny napędu.

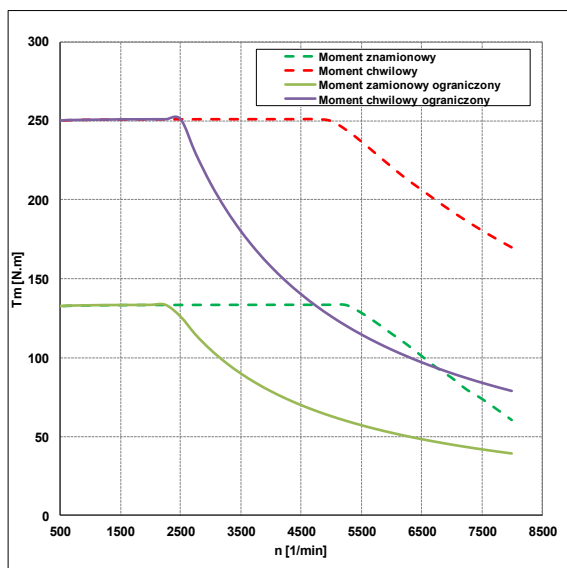


Rys.3. Wpływ zmiany liczby zwojów silnika Z na kształt charakterystyki eksploatacyjnej silnika; M – moment, n – prędkość obrotowa

Dla rzeczywistych układów energoelektronicznych zwykle przeciążalność prądowa falownika wynosi około 2. Przeciążalność ta decyduje o krotności momentu elektromagnetycznego, 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.

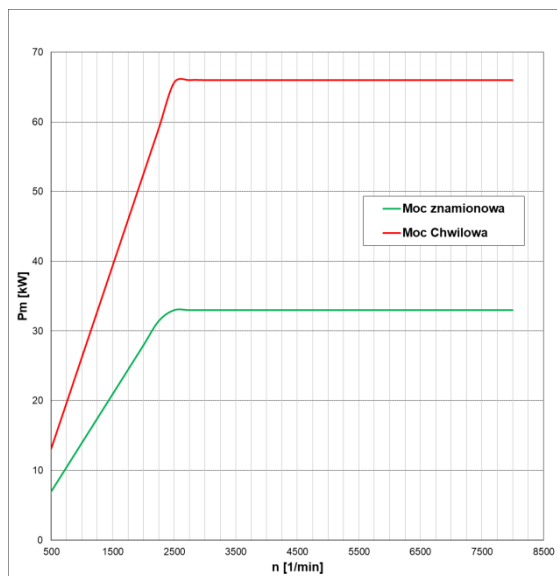
Aby zapewnić porównywalną dynamikę pojazdu z napędem elektrycznym, silnik elektryczny

powinien mieć zbliżony kształt charakterystyki mechanicznej do wypadkowej charakterystyki użycia wszystkich biegów w samochodzie z silnikiem spalinowym. Optymalna charakterystyka silnika 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.



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

Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na kształt charakterystyki eksploatacyjnej silnika i jednocześnie ograniczającym jego parametry jest akumulator lub bateria trakcyjna o ograniczonej pojemności i wydajności prądowej. W związku z tym, mamy ograniczenie wartości pobieranego prądu oraz ograniczenie wartości napięcia zasilania. Ograniczenie napięcia przekłada się na ograniczenie prędkości maksymalnej silnika (rys.2). Natomiast ograniczenie prądu akumulatora przekłada się na ograniczenie momentu a zarazem i mocy silnika (Rys.5.). Analizując wykresy przedstawione na rys.5 widać wyraźne ograniczenie parametrów napędu z uwagi na możliwy ciągły i maksymalny pobór mocy z akumulatora trakcyjnego. Ograniczenie poboru mocy winnika z ograniczonej pojemności akumulatorów trakcyjnych oraz typu zastosowanych ogniw.



Rys.5. Charakterystyki mocy silnika PMSM z uwzględnieniem wydajności akumulatora trakcyjnego

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono aspekt ograniczeń charakterystyk eksploatacyjnych silnika poprzez właściwości układu i toru zasilającego. Ograniczenia te w stosunku do wymagań stawianych napędowi trakcyjnemu, wymuszają często przewymiarowanie gabarytowe silnika lub/i przewymiarowanie prądowe/napięciowe falownika i nie jest one w tym przypadku determinowane aspektami termicznymi. Przewymiarowanie silnika oraz przewymiarowanie prądowe falownika z równoczesnym ograniczeniem prędkości bazowej są jednymi z najczęściej stosowanych metod kształtowania charakterystyki trakcyjnej silników PMSM z magnesami trwałymi.

Inną metodą stosowaną przez producentów elektrycznych napędów trakcyjnych jest stosowanie specjalnego falownika, który umożliwia przełączanie liczby zwojów silnika w trakcie jego pracy. Silnik musi mieć wówczas wykonane specjalne uzwojenie. W tym przypadku nie ma konieczności przewymiarowania silnika mocowo, a napęd zachowuje się tak 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 przez np. 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.

Samochody z napędem elektrycznym mają zasięg ok. czterokrotnie mniejszy od swoich odpowiedników z napędem spalinowym. 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.

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 PMBLDC”, *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.

4. Autorzy

mgr inż. Emil Król

dr inż. Tomasz Wolnik

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188