

Silniki PMSM do zastosowań trakcyjnych. Czy moc znamionowa silnika decyduje o jego gabarycie i masie?

Tomasz Wolnik, Emil Król

1. Wstęp

Tematyka szeroko pojętej elektromobilności skupia coraz to większą uwagę i zyskuje na znaczeniu. Ze względu na to, że wielu zainteresowanych użytkowników pojazdów elektrycznych kieruje do naszego Instytutu różnego rodzaju zapytania i wątpliwości, postanowiliśmy rozpocząć serię „artykułów dydaktycznych”, w których chcielibyśmy poruszyć najważniejsze, a często nieświadomie nieuwzględniane – naszym zdaniem – aspekty, związane z napędami trakcyjnymi. W pierwszym artykule z serii, której tytuł dla wielu może wydawać się trywialny, chcielibyśmy zwrócić uwagę na znaczenie posługiwania się mocą znamionową napędów trakcyjnych oraz jej odniesienia do masy i gabarytu silników.

Moc znamionowa jest chyba jednym z najczęściej używanych parametrów, opisujących własności różnego rodzaju silników. Często zauważa się, że zazwyczaj w rozmowach na temat urządzeń czy maszyn, na początku pada pytanie: „a jakiej mocy?”. Również producenci silników, chwając się swoimi osiągnięciami, zwykle w pierwszej kolejności podają wartość mocy, jaką uzyskuje dana maszyna. Wydaje się więc naturalne i oczywiste, że w przypadku napędów trakcyjnych użytkownicy na początku pytają czy zwracają uwagę właśnie na ten parametr. Jednak sama informacja o mocy znamionowej silnika trakcyjnego nie daje miarodajnego obrazu możliwości jego zastosowania, a tym bardziej podstawy do porównywania go z innego rodzaju konstrukcją silnika o rzekomo podobnej mocy znamionowej.

W artykule tym chcielibyśmy zwrócić uwagę użytkowników na inne kluczowe parametry silników trakcyjnych, które

Streszczenie: Na rynku pojawia się coraz więcej różnego rodzaju silników trakcyjnych z magnesami trwałymi, w tym silników do szeroko rozumianej elektromobilności. W zależności od docelowego przeznaczenia różnią się one wieloma parametrami eksploatacyjnymi oraz naturalnie wymiarami gabarytowymi i masą. Wielu potencjalnych użytkowników, porównując masę i gabaryty silników pomiędzy sobą, czyni to najczęściej w odniesieniu do ich mocy znamionowej, przyjmując ją jako podstawowe kryterium porównawcze. W niniejszej publikacji rozważaniom poddano słuszność takiego podejścia. Zwrócono uwagę na inne kluczowe parametry eksploatacyjne silników PMSM, które – zdaniem autorów – determinują wymiary i masę maszyny na etapie projektowania jej obwodu elektromagnetycznego.

wej, przyjmując ją jako podstawowe kryterium porównawcze. W niniejszej publikacji rozważaniom poddano słuszność takiego podejścia. Zwrócono uwagę na inne kluczowe parametry eksploatacyjne silników PMSM, które – zdaniem autorów – determinują wymiary i masę maszyny na etapie projektowania jej obwodu elektromagnetycznego.

Słowa kluczowe: silniki PMSM, napędy trakcyjne, elektromobilność

PMSM MOTORS FOR TRACTION APPLICATIONS – DOES THE MOTOR'S NOMINAL POWER DECIDED ON ITS DIMENSIONS AND MASS?

Abstract: Nowadays, there are more and more different types of traction motors with permanent magnets present on the market, including motors dedicated for electromobility in a broad sense. In dependence of purpose, they differs in matter of many of exploitation parameters, dimensions and weight. Many of the potential users, mostly compares motors weight and dimensions to their rated power, taking it as a basic

comparison criterion. This paper considers correctness of such mindset. The attention have been put on the other key exploitation parameters of PMSM motors, which in authors opinion, determines their dimensions and weight on the stage of electromagnetic-circuit design.

Keywords: PMSM motors, traction drives, electromobility

powinny być przedmiotem porównania w odniesieniu do masy i gabarytu.

2. O co chodzi z tą mocą znamionową?

W napędach trakcyjnych zasilanych z baterii akumulatorów istotną cechą silników jest ich masa oraz gabaryt [1, 2, 3]. Producenci dążą do ich minimalizacji, co zwykle jest uzasadnione merytorycznie, oraz posługują się często współczynnikiem mocy do masy silnika w jednostkach W/kg. Dla sporej części

użytkowników wartość tego współczynnika stanowi następnie główny punkt odniesienia przy porównywaniu danego rozwiązania z innym o podobnej mocy znamionowej. Należy mieć jednak świadomość, że tzw. współczynnik gęstości mocy jest w głównej mierze parametrem „marketingowym”. Chociaż napęd trakcyjny wykorzystujący silniki PMSM, konstrukcyjnie nie jest skomplikowany, to nie wolno dokonywać porównania masy czy gabarytu silnika wyłącznie w odniesieniu do jego mocy znamionowej.

Należałoby w tym miejscu przytoczyć definicję wartości znamionowej wg norm oraz jej znaczenie w kontekście mocy silnika trakcyjnego.

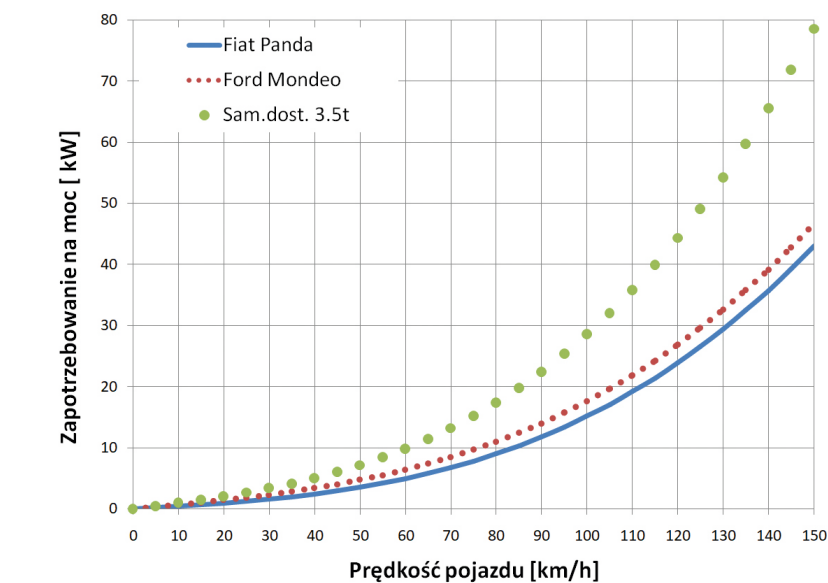
Otóż wartość znamionowa wg PN-EN 60034-1 oraz PN-EN 60349-4 to wartość pewnej wielkości, ustalana zwykle przez wytwórcę, charakteryzująca stan pracy maszyny w określonych warunkach. Powstaje więc pytanie, dla jakich warunków moc znamionowa silników trakcyjnych określana jest przez producentów. Ma tu się na myśli zarówno uwzględniany rodzaj pracy silnika – praca ciągła, dorywcza itp. – jak również wartości prędkości i momentu, dla których owa moc znamionowa zostaje określona. Otóż nie ma tu jednomyślności i różni producenci stosują różne praktyki, czasem niestety naciągane względami marketingowymi.

Nie chcielibyśmy dyskutować w tym miejscu nad słusznością takiego czy innego podejścia. W dalszej części artykułu przedstawimy słuszny w naszym przekonaniu z technicznego punktu widzenia tok rozumowania, na podstawie którego w sposób prawidłowy winno się określać moc znamionową silnika oraz względem którego użytkownik powinien dobierać silnik do danego rozwiązania pojazdu trakcyjnego.

Z punktu widzenia producenta z pewnością prawidłowe podejście byłoby takie, aby moc znamionowa silnika odzwierciedlała jego prawidłowe wykorzystanie ciepłe z tym, że należy tu zaznaczyć, że w przypadku silników trakcyjnych powinno to być określone dla prawidłowej wartości prędkości obrotowej silnika, co wyjaśnione zostanie w dalszej części artykułu.

3. Charakterystyka trakcyjna pojazdu – punkt wyjścia do wstępnego określenia mocy znamionowej

Silnik trakcyjny PMSM, w odróżnieniu od silników pracujących w innych aplikacjach, pracuje w szerokim zakresie prędkości obrotowych i w szerokim zakresie momentów obciążenia, a przy tym z niemożliwym do jednoznacznego określenia cyklem pracy [4, 5, 6]. W związku z powyższym trudno wybrać jeden słuszny punkt odniesienia do porównania poszczególnych rozwiązań



Rys. 1. Teoretyczne charakterystyki trakcyjne wybranych pojazdów w funkcji prędkości pojazdu

konstrukcyjnych silników trakcyjnych PMSM. Niemniej jednak można dokonać pewnego rodzaju analizy, wykorzystując logiczny sposób rozumowania oraz charakterystykę trakcyjną danego pojazdu. Naszym zdaniem to ona właśnie powinna stanowić punkt wyjścia w określaniu mocy znamionowej silnika potrzebnej do danego rozwiązania. Przykładowo wyznaczone na podstawie wzorów analitycznych charakterystyki trakcyjne dla 3 wybranych pojazdów przedstawiono na rysunku 1.

Przedstawione na rysunku 1 charakterystyki opracowano z uwzględnieniem:

- poruszania się ze stałą prędkością;
- nachylenia powierzchni 0%;
- średnicy koła pojazdu;
- masy pojazdu;
- powierzchni czołowej pojazdu;
- współczynników oporu powietrza;
- współczynników oporu toczenia;
- gęstości powietrza.

Można z całą pewnością założyć, że jeżeli silnik umożliwia jazdę z daną prędkością maksymalną, to użytkownik może chcieć poruszać się z tą prędkością w stosunkowo długim okresie czasu. Z kolei dla przedstawionych charakterystyk trakcyjnych wyraźnie widać, że największą moc pojazd potrzebuje właśnie dla prędkości maksymalnej. Poruszanie się ze stałą dowolną prędkością jest w zasadzie jedynym stanem pracy napędu trakcyjnego, który można

określić jako długotrwały. Wszystkie pozostałe, np. przyspieszanie, są stanami chwilowymi, krótkotrwałymi. Uwzględniając te założenia, należałoby przyjąć, że to właśnie moc dla prędkości maksymalnej powinna stanowić wstępnie dobrany znamionowy punkt pracy silnika, tzn. punkt, dla którego powinno się określać możliwość pracy ciągłej. Należy podkreślić, że jest to wstępnie dobrany punkt znamionowy, ponieważ może się okazać, że ze względu na inne uwarunkowania silnik będzie musiał mieć większe gabaryty, a tym samym – biorąc pod uwagę względy termiczne – jego moc znamionowa będzie mogła być odpowiednio większa. Nie zmienia to jednak faktu, że rzeczywista moc ciągła, wymagana dla silnika trakcyjnego, determinowana jest poprzez maksymalną prędkość pojazdu i jego charakterystykę trakcyjną.

Oczywiście w celu określenia prawidłowej wartości pozostaje kwestia przyjętych współczynników oraz założeń, w tym uwzględnionego nachylenia powierzchni, dla którego wyznaczone są charakterystyki trakcyjne. Jednakże przyjmowanie nachylenia innego niż 0% z jednoczesnym założeniem poruszania się pojazdu z prędkością maksymalną np. 150 km/h przez okres np. ok. 30 min nie ma rzeczywistego odzwierciedlenia. Oczywiście należy bezwzględnie sprawdzić zapotrzebowanie danego pojazdu na moc przy pokonywaniu różnego rodzaju wzniesień,

niemniej jednak, tak jak wspomniano wcześniej, będą to stany chwilowe/przejsiowe, trwające w zależności od przyjętych warunków ok. 1–5 min.

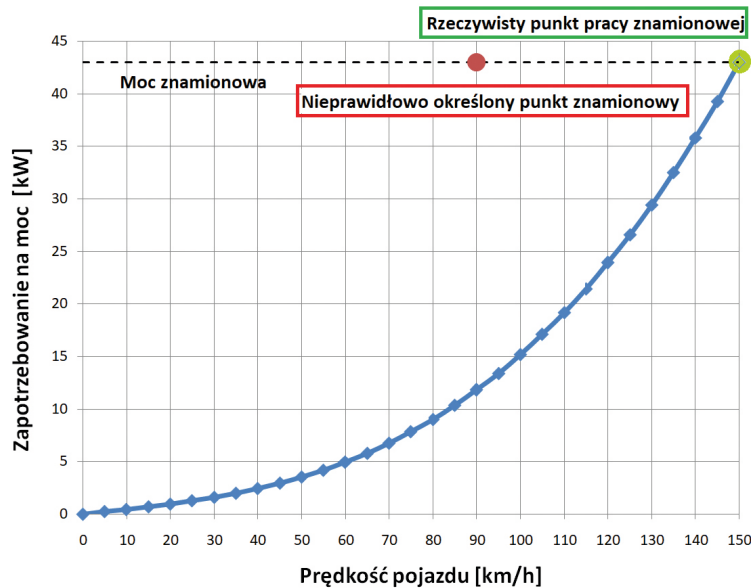
Na rysunku 2 zobrazowano przypadek, w którym moc znamionowa silnika na poziomie 43 kW osiągana jest dla różnych prędkości. W jednym przypadku pokrywa się ona z charakterystyką trakcyjną pojazdu (rzeczywisty punkt pracy znamionowej), w drugim jest poza charakterystyką, dla prędkości mniejszej niż prędkość maksymalna. Jeżeli moc znamionowa silnika określona jest dla prędkości mniejszej niż prędkość maksymalna, należy zweryfikować, czy silnik/napęd dla prędkości maksymalnej jest również w stanie pracować w sposób ciągły.

Jeżeli z dodatkowych uwarunkowań stawianych napędowi trakcyjnemu wynika, że gabaryty silnika muszą być większe, wówczas moc znamionowa silnika podawana przez producenta może mieć inną, wyższą wartość, niż wynika to z warunku charakterystyki trakcyjnej. Niemniej jednak, w naszym przekonaniu w każdym przypadku, moc znamionowa silnika trakcyjnego powinna być podana dla jego maksymalnej prędkości.

4. Warunki pracy silnika – moment maksymalny oraz prędkość maksymalna

Aby na etapie doboru/projektowania określić podstawowe parametry silnika trakcyjnego, którymi powinien dysponować, należy przeanalizować kilka charakterystycznych stanów pracy pojazdu. Na potrzeby niniejszego artykułu wybraliśmy 4 takie stany, które naszym zdaniem w dużym stopniu obrazują wymagania stawiane w stosunku do parametrów napędu trakcyjnego. Ich zestawienie przedstawiono w tabeli nr 1. W celu uproszczenia obliczeń i bardziej obrazowego przedstawienia przyjęto założenie, że silnik bezpośrednio napędza koła pojazdu, a więc nie występuje żadna dodatkowa przekładnia.

Stan 1 odpowiada poruszaniu się pojazdu z prędkością maksymalną po płaskiej powierzchni (nachylenie 0%). Założono, że maksymalna prędkość rozwijana przez pojazd powinna wynosić 150 km/h.



Rys. 2. Przykładowa charakterystyka trakcyjna pojazdu z określeniem znamionowego punktu pracy

Tabela 1. Charakterystyczne stany pracy pojazdu

			Fiat Panda	Ford Mondeo	Sam. dost. 3,5 t
Stan 1 Prędkość maksymalna 150 km/h, nachylenie 0%	P	kW	43	47	80
	M	Nm	300	330	650
	n	obr./min	1370	1370	1170
Stan 2 Prędkość pojazdu 50 km/h – wzniesienie 20% na odcinku 1 km	P	kW	47	73	102
	M	Nm	990	1550	2500
	n	obr./min	450	450	390
Stan 3 Prędkość pojazdu 70 km/h – wzniesienie 15% na odcinku 5 km	P	kW	52	79	113
	M	Nm	790	1200	1960
	n	obr./min	630	630	550
Stan 4 Przyspieszenie pojazdu 0–100 km/h w czasie 15 s	P	kW	98	145	208
	M	Nm	1040	1540	2550
	n	obr./min	900	900	780

Stan 2 to założenie podjazdu na odcinku 1 km pod wzniesienie o nachyleniu 20% ze stałą prędkością 50 km/h. Można łatwo obliczyć, że takie wzniesienie byłoby pokonane przy powyższych założeniach w czasie nieco powyżej 1 minuty. Jest to więc stan chwilowy, krótkotrwały.

Stan 3 to założenie podjazdu na odcinku 5 km pod wzniesienie o nachyleniu 15% ze stałą prędkością 70 km/h. Podobnie jak w poprzednim przypadku jest to stan chwilowy, a odcinek zostałby pokonany w czasie ok. 4,5 minuty.

Stan 4 związany jest z dynamiką napędu. Obliczono wymagane parametry silnika, aby pojazd mógł osiągnąć

prędkość 100 km/h w czasie 15 s. Wartość podanej w tym punkcie mocy dotyczy prędkości silnika odpowiadającej prędkości pojazdu 100 km/h.

Z powyższych założeń otrzymano wyniki, dla których można określić następujące prawidłowości:

1. Jedynie „Stan 1”, tzn. jazdę ze stałą prędkością, można uznać za stan pracy ciągłej. Prędkość maksymalna dla charakterystyki trakcyjnej pojazdu determinuje prawidłowo określoną moc znamionową.
2. Moment maksymalny pojazdu determinowany jest dynamiką pojazdu. Im krótszy będzie założony czas do osiągnięcia określonej prędkości,

tym większym momentem maksymalnym musi dysponować napęd. Dla niektórych przypadków moment maksymalny może być determinowany dodatkowo np. wjazdem na krawężnik.

3. Oprócz wartości momentu maksymalnego należy zwrócić uwagę na wartość prędkości obrotowej, dla której moment maksymalny powinien być dostępny (wynika ze stanu 4). Jeżeli prędkość ta będzie mniejsza, to wówczas czas założony do osiągnięcia danej prędkości przez pojazd wydłuży się ze względu na konieczność zmniejszenia momentu (strefa pracy ze stałą mocą).

4. Prędkość maksymalna silnika determinowana jest zakładaną maksymalną prędkością poruszania się pojazdu.

Z przedstawionych powyżej rozważań wynikają kluczowe parametry eksploatacyjne silnika trakcyjnego. Są to:

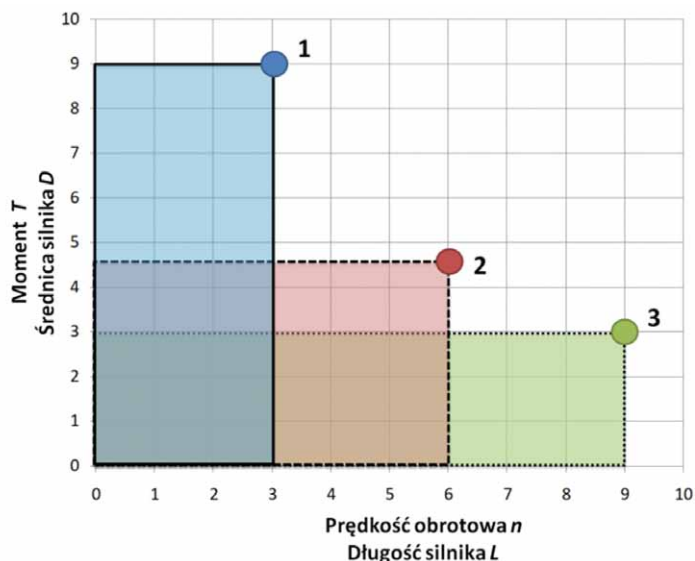
- moment maksymalny;
- prędkość bazowa dla momentu maksymalnego;
- prędkość maksymalna;
- moc znamionowa określona dla prędkości maksymalnej.

Aby prawidłowo dobrać/zaprojektować silnik trakcyjny PMSM, powyższe parametry muszą być wcześniej określone.

Wróćmy do głównego meritum niniejszego artykułu, tzn. pytania czy moc znamionowa decyduje o gabarycie i masie silnika trakcyjnego PMSM. Otóż z własnych doświadczeń z całą stanowczością możemy stwierdzić, że nie. Kluczowymi parametrami decydującymi o powyższych właściwościach są moment maksymalny oraz maksymalna prędkość, jaką pojazd powinien rozwijać. Oczywiście zadaniem konstruktora jest odpowiednie zaprojektowanie silnika tak, aby nie był znacząco przewymiarowany, natomiast użytkownik powinien mieć świadomość, że gabaryt/masę silnika można określić prawidłowo, jedynie znając wymagania w stosunku do tych dwóch parametrów.

Postaramy się udowodnić powyższą tezę w sposób obrazowy/intuicyjny, posługując się rysunkiem 3. Charakterystyka eksploatacyjna silnika przedstawiana jest zwykle jako $T = f(n)$, gdzie: T – moment na wale [Nm]; n – prędkość obrotowa [obr./min]

Rys. 3. Obrazowe przedstawienie gabarytów silników o różnych wartościach momentu i prędkości maksymalnej oraz równoważnym im średnicy D i długości L silnika



Przyjmując, że na osi rzędnych momentowi na wale odpowiada średnica zewnętrzna silnika D , natomiast na osi odciętych prędkości obrotowej odpowiada długość L silnika, możemy zobrazić potencjalne gabaryty silnika dla przyjętych różnych wartości momentu i prędkości maksymalnej. Należy założyć, że zarówno moment T , jak i prędkość n reprezentują wartości maksymalne. Na osiach x i y specjalnie zaznaczono wartości liczbowe (bez jednostek), aby można było dodatkowo w prosty sposób porównać poszczególne przypadki na konkretnych wartościach liczbowych.

W celu prawidłowego porównania założono, że silnik PMSM nie pracuje w strefie osłabiania strumienia od magnesów (to daje możliwość ograniczenia gabarytów maszyny).

- Na rys. 3 zobrazowano 3 przypadki:
1. Silnik o największym momencie maksymalnym i najmniejszej prędkości maksymalnej.
 2. Silnik mający połowę mniejszy moment maksymalny w stosunku do „1” oraz dwukrotnie większą prędkość obrotową.
 3. Silnik o najmniejszym momencie maksymalnym i największej maksymalnej prędkości.

Charakterystyczną cechą przedstawionych przypadków jest to, że iloczyn momentu T oraz prędkości n jest dla wszystkich jednakowy. Innymi słowy, wartość mocy maksymalnej dla każdego silnika jest taka sama, a korzystając z przedstawionych wartości liczbowych bez jednostek można w celu

zobrazowania powiedzieć, że wynosi 27 (9×3 lub $4,5 \times 6$ lub 3×9).

Przyjmując założenie, że momentowi T odpowiada średnica D silnika, natomiast prędkości – długość L , patrząc na rysunek 3, od razu widzimy proporcje gabarytowe silników dla poszczególnych przypadków. Silniki wysokoobrotowe to silniki o małych średnicach, natomiast silniki wymagające dużych wartości momentów cechują się znacznie większymi średnicami. W odniesieniu do napędów trakcyjnych problem jest taki, że zazwyczaj wymagany jest zarówno stosunkowo wysoki moment maksymalny (ze względu na dynamikę pojazdu), jak i stosunkowo wysoka prędkość maksymalna (ze względu na możliwość rozwijania dużej prędkości pojazdu) – obrazowo przypadek 2 z rysunku nr 3. Podczas projektowania silnika, ze względu na minimalizację gabarytów, należy więc poszukiwać kompromisu pomiędzy tymi dwoma parametrami.

Powstaje w tym miejscu pytanie, jak przedstawione proporcje wpływają na objętość i masę silnika. Otóż najlepiej przedstawić to, posługując się wartościami liczbowymi.

Objętość bryły walca dla wszystkich 3 przypadków można wyznaczyć, korzystając ze wzoru:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \quad (1)$$

Z uwagi na to, że iloczyn $D \cdot L$ jest jednakowy dla wszystkich 3 przypadków, wyrażenie (1) można przekształcić:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D \cdot L \cdot D \quad (2)$$

Z równania (2) widać, że porównując 2 maszyny o jednakowej wartości iloczynu $D \cdot L = const$, objętość maszyny, a przyjmując jednakową dla wszystkich gęstość również masa jest proporcjonalnie większa o wartość średnicy D (oczywiście przy założeniu pełnego walca, co nie zawsze jest założeniem zgodnym z rzeczywistością). Przechodząc teraz na wartości liczbowe, otrzymujemy dla przypadku:

$$1) \quad V = \frac{\pi \cdot 9^2}{4} \cdot 3 = 190,86$$

$$2) \quad V = \frac{\pi \cdot 4,5^2}{4} \cdot 6 = 95,43$$

$$3) \quad V = \frac{\pi \cdot 3^2}{4} \cdot 9 = 63,32$$

W związku z powyższym widzimy, że objętość/masa silnika „1” jest 3-krotnie większa w stosunku do objętości/masy silnika „3”. Innymi słowy, dla silników o wymaganych wysokich wartościach momentów masa silnika jest większa niż w przypadku silników o tej samej mocy maksymalnej, lecz wyższej prędkości obrotowej.

Należy zaznaczyć, że w tych teoretycznych rozważaniach należy jeszcze uwzględnić racjonalne i rzeczywiste możliwości techniczne wykonywania różnego rodzaju podzespołów, jak również parametry osprzętu współpracującego z silnikiem. Oczywiście dążenie do opracowywania silników wysokoobrotowych w celu ograniczenia masy i gabarytu jest w pełni uzasadnione, natomiast patrząc przez pryzmat wymagań stawianych przed silnikami trakcyjnym PMSM, należy podchodzić do tego z rozsądkiem.

5. Współczynnik sprawności vs gabaryty i masa

Pisząc o masie i gabarytach silnika, nie sposób nie wspomnieć o dodatkowym parametrze silnika, jakim jest współczynnik sprawności. W obecnych czasach producenci, nie tylko silników trakcyjnych, dążą oczywiście do uzyskiwania jak najwyższych jego wartości. Niestety trzeba w tym miejscu również powiedzieć, że część producentów silników podaje w katalogach zawyżone w stosunku do rzeczywistych współczynniki sprawności. Takie przypadki zostały

przez nas zidentyfikowane w trakcie badań przeprowadzanych na owych silnikach w naszym laboratorium. Różnice pomiędzy danymi deklarowanymi przez producenta a wynikami uzyskanymi z badań wynosiły nawet powyżej 5 punktów procentowych! Jest to być może informacja podana w sposób oględny, ale chcielibyśmy, aby użytkownicy mieli tego świadomość.

Otóż problem polega na tym, że sprawność silnika, zakładając, że jest on prawidłowo zaprojektowany, można zwiększyć poprzez:

- zastosowanie lepszych materiałów;
- znaczną poprawę wydajności układu chłodzenia;
- zwiększenie objętości/masy materiałów czynnych obwodu elektromagnetycznego.

Możliwość stosowania lepszych materiałów jest względnie ograniczona, chociażby z uwagi na ich koszt, natomiast znaczna poprawa wydajności układu chłodzenia nie jest kwestią prostą technicznie [7]. Najszybszym i najprostszym sposobem zwiększenia sprawności jest ograniczenie strat mocy poprzez zwiększenie objętości materiałów czynnych obwodu elektromagnetycznego. Patrząc na to zagadnienie z drugiej strony, bardzo trudno jest zaprojektować silnik o „wysokich” parametrach eksploatacyjnych, wysokim współczynniku sprawności, a przy tym o małej masie. Ponieważ masa, w odróżnieniu do współczynnika sprawności, jest rzeczą mierzalną dla przeciętnego Kowalskiego, czasami producenci „podciągają” współczynnik sprawności ze względów marketingowych.

Sprawdzenie zgodności tego parametru z danymi producenta wymaga zbudowania odpowiedniego stanowiska badawczego oraz wykorzystania specjalistycznej aparatury, co nie jest możliwe dla każdego.

6. Podsumowanie


W artykule omówiono zagadnienie czynników decydujących o masie i gabarytach silników trakcyjnych PMSM. Przedstawiono szereg różnego rodzaju wniosków, z których najważniejszy jest taki, że o masie i gabarytach silnika trakcyjnego PMSM na etapie jego projektowania decyduje wymagana

wartość momentu maksymalnego oraz maksymalnej prędkości obrotowej, nie zaś moc znamionowa silnika. Przedstawiono słusznym zdaniem autorów sposób określania mocy znamionowej silników trakcyjnych PMSM oraz kryteria, jakie należy uwzględniać, porównując poszczególne silniki trakcyjne między sobą.

Literatura

- [1] GIERAS J., WING M.: *Permanent magnet motor technology. Design and Applications*. Marcel Dekker, Inc, New York, Basel, 2002.
- [2] ROSSA R., KRÓL E.: *Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym e-Kit dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problematyczne”, 4(97)/2012.
- [3] 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.
- [4] KRÓL E., ROSSA R.: *Badanie układu napędowego pojazdu z napędem e-Kit pod kątem zwiększenia zasięgu*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problematyczne”, 2/2015.
- [5] FIC B.: *Pojazdy elektryczne*. Wydawnictwo KaBe, Krosno 2012.
- [6] BERNATT J., GAWRON S., KRÓL E.: *Nowoczesne silniki z magnesami trwałymi do zastosowań trakcyjnych*. „Technika Transportu Samochodowego”, 1–2/2010.
- [7] BĘDKOWSKI B., MADEJ J.: *Analiza wydajności różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu chłodzenia silnika elektrycznego zabudowanego w kole*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problematyczne”, 1/2018.

Publikacja ukazała się na łamach Zeszytów Komelowskich 2019 r.

 Tomasz Wolnik, Emil Król
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL

artykuł recenzowany