

Jan Anuszczyk, Adam Wawrzyniak
Politechnika Łódzka, Łódź

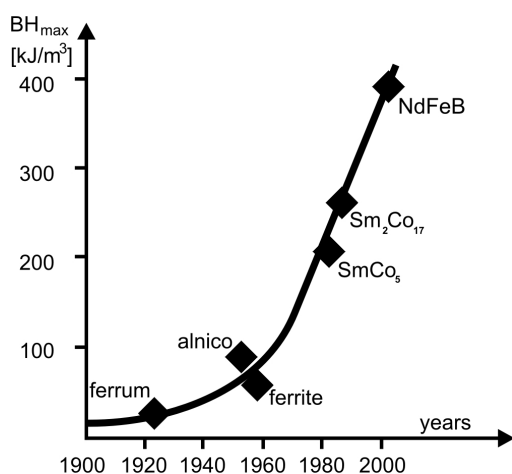
NAPĘDY TRAKCYJNE Z SILNIKAMI SYNCHRONICZNYMI O MAGNESACH TRWAŁYCH W TRANSPORCIE SZYNOWYM

TRACTION DRIVE WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS IN RAILWAY TRANSPORTATION

Abstract: Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM), due to the simple structure and property are becoming more widely used in the traction drives. The paper contains a review of existing solutions ranging from mine engines, by trams, to high-speed trains. The domestic and foreign solutions has been analyzed. Additionally, the paper presents the results of research of PMSM drive conducted in the laboratory of Division of Transport and Energy Conversion, Technical University of Lodz. Mechanical and efficiency characteristics are the results of the researches.

1. Wstęp

Obecnie coraz większą uwagę konstruktorów napędów trakcyjnych przyciągają nowe generacje silników synchronicznych. Dynamiczny rozwój inżynierii materiałowej, a przede wszystkim materiałów magnetycznych i półprzewodników wykorzystywanych do budowy przekształtników energoelektronicznych oraz rozwój algorytmów sterowania, pozwalają dziś spojrzeć na maszyny synchroniczne pod nieco innym kątem. Na coraz powszechniejsze stosowanie magnesów trwałych w aplikacjach przemysłowych wpłynął przede wszystkim spadek cen tych magnesów. Koszt materiałów magnetycznych z ziem rzadkich obniżył się pięciokrotnie w ciągu ostatnich dziesięciu lat, podczas, gdy moc uzyskiwanych z nich magnesów wzrosła trzykrotnie, [1].



Rys. 1. Rozwój materiałów magnetycznych według [2]

Od kilku lat w zastosowaniach trakcyjnych widoczne są próby wdrożenia na masową skalę silników synchronicznych z magnesami trwałymi (PMSM), co związane jest głównie z bardzo dobrymi parametrami tych maszyn. Poniżej przedstawiono porównanie właściwości trzech silników: szeregowego prądu stałego, klatkowego indukcyjnego oraz silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Do porównania wykorzystano wybrane maszyny trakcyjne różnych typów (Tablica 1), o zbliżonych mocach:

1. Lda-327
 $U_N = 250$ V, $P_N = 45$ kW,
 $n_N = 1080$ obr/min, $m = 645$ kg, [3]
2. STDa 200-L4
 $U_N = 380$ V, $P_N = 50$ kW,
 $n_N = 1917$ obr/min, $m = 280$ kg, [4]
3. PMPg-250L
 $U_N = 250$ V, $P_N = 60$ kW,
 $n_N = 1080$ obr/min, $m = 527$ kg, [3]

Tablica 1. Porównanie parametrów silników trakcyjnych zastosowanych w realnych napędach

parametr	1	2	3
	silnik szeregowy DC	silnik indukcyjny AC	PMSM AC
gęstość mocy [kW/kg]	0,07	0,18	0,11
przeciążalność momentem	-	2,0	2,95
cos φ	-	0,92	0,95
sprawność	87%	94%	95%

Jak wynika z powyższego zestawienia silnik synchroniczny z magnesami trwałymi charakteryzuje się relatywnie niewielką masą przy dużej przeciążalności, a także wysokim współczynnikiem $\cos \varphi$.

2. Przegląd wykorzystywanych konstrukcji PMSM

Obecnie w Polsce tylko dwa przedsiębiorstwa zdecydowały się na zastosowanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi w pojazdach szynowych. Pierwsze z nich to ALSTOM KONSTAL S.A., które zastosowało te silniki w tramwaju X04. Pojazd ten jest konstrukcją prototypową. Pod koniec 2008 roku jeden egzemplarz został sprowadzony z francuskiej fabryki koncernu ALSTOM do Katowic, gdzie odbyły się jazdy próbne na odcinku Chorzów – Katowice, rysunek 2. Jak zapewniają przedstawiciele firmy ALSTOM KONSTAL S.A., wkrótce w chorzowskich zakładach rozpocznie się seryjna produkcja tego tramwaju [5].



Rys. 2. Prototyp tramwaju X04 podczas jazd testowych na ulicach Katowic, [6]

Drugim przedsiębiorstwem wdrażającym w pojazdach szynowych silniki z magnesami trwałymi jest Branżowy Ośrodek Badawczo - Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL w Katowicach. Firma ta ma za sobą zaprojektowanie, zbudowanie prototypu napędu PMSM i wdrożenie go do normalnej eksploatacji w elektrycznych lokomotywach górniczych typu Ld-31 EM. Są one wykorzystywane do prac przewozowych w podziemnych wyrobiskach kopalń węgla, rud i soli niezagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego, rys. 3.



Rys. 3. Lokomotywa górnicza Ld-31 EM z silnikiem PMSM produkcji Komel, [3]

W lutym 2008 roku koncern ALSTOM zaprezentował po raz pierwszy prototyp pociągu AGV (Automotrice à Grande Vitesse) – rysunek 4. Skład ten jest elektrycznym zespołem trakcyjnym wysokich prędkości, w którym podstawowym elementem układu napędowego są silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (te same które w 2007 r. przyczyniły się do pobicia aktualnego kolejowego rekordu prędkości – 574,8 km/h), [7].



Rys. 4. Zespół trakcyjny AGV produkcji koncernu ALSTOM, [7]

Prace nad tym pociągiem trwają od 1998 roku. W listopadzie 2005 roku producent zaprezentował pierwszą wizualizację pociągu, a w niecały rok później ruszyła produkcja pierwszych podzespołów. Przejazd testowy w dniu 3 kwietnia 2007 roku (pobicie rekordu prędkości) dotyczył pociągu TGV, jednak duża część podzespołów w tym układ napędowy i układ sterowania pochodziły z projektu AGV. Po oficjalnej prezentacji w fabryce La Rochelle (luty 2008) skład pociągu został przewieziony na tor próbny w Velim w Czechach. Od tamtej pory koncern ALSTOM nie publikuje kolejnych informacji na temat stanu projektu. Najciekawszym z dotąd wdrożonych projektów jest zastosowanie silnika PMSM w pojeździe

tramwajowym T15 ForCity wyprodukowanym przez zakłady Škoda.



Rys. 5. Tramwaj T15 ForCity, [8]

Jest to jeden z najszerzej prezentowanych typów pojazdów z silnikami PMSM. Wagony typu T15 ForCity pracują na sieciach tramwajowych w Pradze i Rydze. Na każdym dwuosioowym wózku tego pojazdu zainstalowane są cztery silniki synchroniczne, po jednym dla każdego koła. Zastosowano nieciągłe osie zestawów kołowych, co skutkuje możliwością zabudowania całkowicie niskiej podłogi (wolne miejsce między kołami, poniżej osi obrotu kół), a także możliwością niezależnego napędzania każdego z kół.



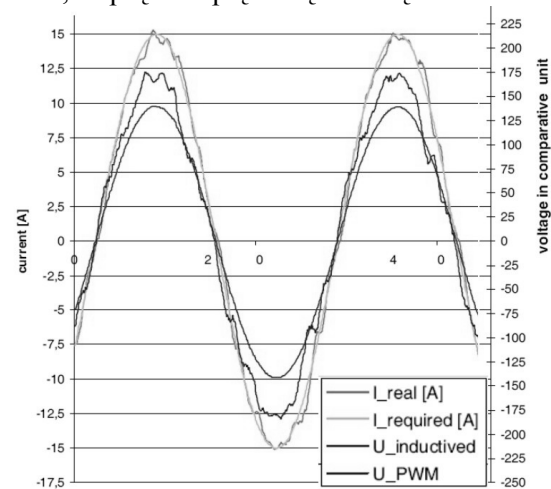
Rys. 6. Silnik trakcyjny wagonu tramwajowego T15 ForCity, [8]

Zastosowany silnik PMSM jest prototypem skonstruowanym pod kątem zastosowania w niskopodłogowych wagonach tramwajowych. Został on skonstruowany przez Instytut Maszyn Elektrycznych w Brnie (Výzkumného Ústavu Elektrických Strojů Brno). Maszyna posiada wewnętrzny tulejowy wirnik, a stojan jest chłodzony wodą. Stanowisko badawcze zostało wykonane przez Instytut Pojazdów Szynowych w Pradze (Výzkumný Ústav Kolejových Vozi-

del Praha). Algorytm sterowania maszyny opracowano na Wydziale Transportu Uniwersytetu Pardubického. Poniżej przedstawiono najważniejsze parametry zastosowanej maszyny wg [9],[10]:

Moc znamionowa	58 kW
Znam. moment obrotowy	852 Nm
Prędkość znamionowa	650 obr/min
Prąd znamionowy	122 A
Maks. moment obrotowy	2000 Nm
Prędkość maks.	1000 obr/min
Prąd maksymalny	368 A
Liczba biegunów	44
Masa	252 kg

Silnik ten charakteryzuje się bardzo wysokim współczynnikiem mocy do masy, wynoszącym 0,23 kW/kg. Zastosowana strategia sterowania tego napędu realizuje kryterium zachowania stałego współczynnika mocy $\cos\phi = 1$, [11]. Spełnianie tego kryterium ilustruje wykres zamieszczony na rysunku 7, na którym wyraźnie widać, że prąd i napięcie są ze sobą w fazie.



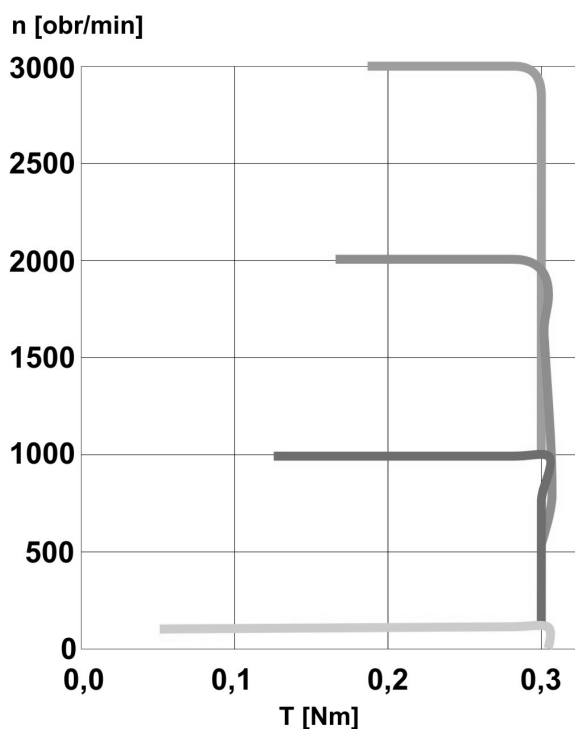
Rys. 7. Oscylogram parametrów zasilania silnika, wg [9]

3. Badania własne napędu z PMSM

W badaniach wykorzystano silnik PMSM firmy SIEMENS typu 1FT6021-6AK71-1TH0 o parametrach:

- znamionowy moment obrotowy $M_N = 0,3 \text{ Nm}$,
- znamionowa prędkość obrotowa $n_N = 3000 \text{ obr/min}$,
- znamionowy prąd twornika $I_N = 1,1 \text{ A}$,
- napięcie międzyprzewodowe $U_{IN} = 123 \text{ V}$.

Silnik współpracuje ze sterownikiem SIEMENS MASTERDRIVES MC typu 6SE7011-5EP50 będący połączeniem sterownika PLC z przekształtnikiem AC/AC. Charakterystyczną cechą tego napędu jest to, że jego zasadniczą część silnopiętowa falownika – układ kluczujący – znajduje się w samym silniku, do którego doprowadzone są trzy przewody fazowe. Silnik jest zasilany prostokątnym napięciem o wartości fazowej 320 V i częstotliwości 5kHz. Rozwiązanie to ma na celu poprawienie kompatybilności elektromagnetycznej napędu.



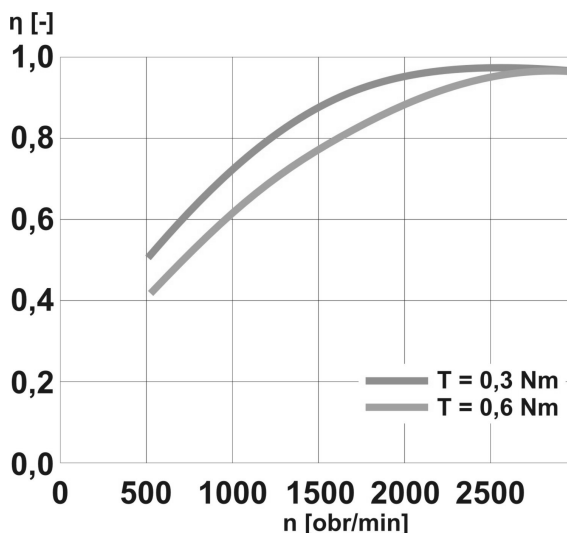
Rys. 8. Charakterystyki mechaniczne badanego silnika IFT6021

Zastosowany sterownik wykorzystuje wektorową strategię pracy przy utrzymaniu stałego kąta mocy $\delta = \pi/2$, a więc takiej regulacji składowych prądu I_q i I_d , dla której kąt między wektorem strumienia magnetycznego wirnika, a wypadkowym wektorem prądu stojana jest zawsze kątem prostym, [10]. Dla tej strategii sterowania moment elektromagnetyczny silnika jest wprost proporcjonalny do składowej I_q prądu stojana.

Podczas badań przeprowadzono szereg prób mających na celu m.in. wyznaczenie charakterystyk mechanicznych, oraz sprawności układu.

Charakterystyki mechaniczne wyznaczono dla czterech prędkości ustalonych $n=100, 1000,$

2000, 3000 obr/min. Pomiar przeprowadzono doprowadzając silnik na biegu jałowym do wybranej prędkości i stopniowo obciążając jego wał coraz większym momentem. Uzyskane przebiegi prezentuje rysunek 8.



Rys. 9. Charakterystyki sprawnościowe badanego napędu z silnikiem IFT6021

Na podstawie szeregu prób polegających na rejestracji rozruchu, pracy ustalonej i zatrzymania, dla różnych obciążeń maksymalnych równych 0,3 i 0,6 Nm wyznaczono charakterystyki sprawnościowe zilustrowane na rysunku 9.

Z przebiegu charakterystyk wynika, że układ napędowy utrzymuje zadaną prędkość obrotową w całym zakresie przewidzianych wartości momentu obciążenia. Sprawność silnika osiąga najwyższe wartości w pobliżu prędkości znamionowej. Wartości sprawności maleją po przekroczeniu znamionowego momentu maszyny 0,3 Nm (próby także dla 0,6 Nm).

Uzyskana charakterystyka mechaniczna doskonale wpisuje się w zasadnicze założenia napędów trakcyjnych i stanowi o pełnej przydatności badanego napędu do zastosowań trakcyjnych. Napęd sztywno utrzymuje zadaną prędkość obrotową, aż do zaplanowanego obciążenia krytycznego.

Przy próbach ze zwiększonym obciążeniem (próby także do 0,6 Nm, 200% momentu znamionowego) zachodziło zjawisko nadmiernego wzrostu temperatury uzwojeń stojana. Zjawisko to można zniwelować stosując wymuszone chłodzenie wodne uzwojeń stojana, co prowadzi do jeszcze większej przeciążalności zastosowanego napędu (przy odpowiednio za-

projektowanych pod względem wytrzymałościowym: wale, łożyskach i korpusie maszyny). Należy jednak pamiętać, że wraz ze wzrostem obciążenia maleje sprawność silnika, w związku z czym możliwą rezerwę momentu należy traktować jako nadwyżkę wykorzystywaną przy rzadziej występujących przeciążeniach, a nie przy pracy ciągłej.

4. Podsumowanie

Moment obrotowy silnika z punktu widzenia wymiarów i masy napędu jest największą zaletą maszyn synchronicznych o magnesach trwałych. Cecha ta umożliwia realizację napędu bezpośredniego (bez użycia przekładni), co nie jest możliwe w przypadku innych silników (np. asynchronicznych) ze względu na ich duże wymiary. Zastosowanie napędu bezpośredniego umożliwia realizację maksymalnie niskiej podłogi w pojeździe.

Dla przypadku bezpośredniego montażu silnika na wale napędowego zestawu kołowego, niewielka masa silnika synchronicznego, zbliżona do masy przekładni osiowej w klasycznym mocowaniu za nos, nie powoduje znacznego zwiększenia niekorzystnej masy nieodsprężywanej. Jednocześnie zrezygnowanie z przekładni osiowej wpływa na zwiększenie sprawności układu oraz wyeliminowanie kosztów obsługi części mechanicznej napędu. Wyżej wymienione cechy decydowały o podjęciu prac projektowych przy prototypie napędu trakcyjnego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi mocowanym bezpośrednio na wale napędowego zestawu kołowego.

Omawiany napęd posłużył jako model badawczy i odniesienie przedstawionych wyników badań laboratoryjnych do dużych silników trakcyjnych o mocy kilkaset do kilku tysięcy razy większej może nie uwzględniać pełnego obrazu zjawisk zachodzących w napędach dużej mocy.

5. Literatura

- [1]. <http://controlengpolska.com>, (23.02.09)
- [2]. <http://magneto.pl/magnesy.html>, (23.02.09)
- [3]. www.komel.katowice.pl, (9.03.09)
- [4]. Trójfazowe silniki klatkowe do napędu pojazdów trakcyjnych, Katalog EMIT Żychlin, 2008.
- [5]. <http://www.transport.alstom.com>, (1.03.09)
- [6]. <http://www.skyscrapercity.com>, (8.03.09)
- [7]. <http://www.transport.alstom.com>, (1.03.09)
- [8]. folder reklamowy tramwaju T15 ForCity, Wydawnictwo Škoda, 2009.

[9]. O. Černý, J. Šimánek, R. Doleček, J. Novák, Testing of Robust Control Characteristics for Traction PMSM, Progress I, Electromagnetics Research Symposium, 2007.

[10]. R. Doleček, J. Novák, O. Černý, Traction Permanent Magnet Synchronous Motor Torque Control with Flux Weakening, Radioengineering, Vol.18, No.4, December 2009.

[11]. K. Zawirski, Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2005.

Autorzy

dr hab. inż. Jan Anuszczyk, prof. PŁ:
Kierownik Zakładu Transportu i Przetwarzania
Energii w Instytucie Elektroenergetyki
Politechniki Łódzkiej
mgr inż. Adam Wawrzyniak:
Doktorant w Zakładzie Transportu
i Przetwarzania Energii w Instytucie Elektro-
energetyki Politechniki Łódzkiej