

Wojciech Radwański, Bartłomiej Będkowski, Andrzej Białas, Robert Rossa
BOBRME KOMEL, Katowice

KONCEPCJA NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO „E-KIT” DLA MIEJSKICH SAMOCHODÓW OSOBOWYCH

CONCEPT OF “E-KIT” ELECTRIC DRIVE FOR CITY PASSENGER CARS

Abstract: The paper deals with the modern variable-speed electric drive named E-Kit, dedicated to electrification of used small passenger cars with combustion engines. The main assumptions taken into account when designing E-Kit drive are described in the paper. Main electrical parameters and electromechanical characteristic curves of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor dedicated to E-Kit drive are presented. On the IPMSM motor's electromechanical curves two speed control zones are distinguished and described: constant torque zone and constant power zone. Mechanical construction of this motor is also described shortly. In the paragraph 5 the results of traction calculations and appropriate traction characteristic curves of E-Kit drive are presented.

1. Wstęp

Od lipca 2011 roku w Instytucie KOMEL realizowany jest projekt badawczy rozwojowy pt. „Bezemisyjny napęd elektryczny nowej generacji (E-Kit) do samochodów osobowych i dostawczych o masie całkowitej do 3.5 t.”. Celem projektu E-Kit jest zaprojektowanie i wdrożenie kompleksowego rozwiązania w pełni elektrycznego napędu samochodów osobowych lub dostawczych, będącego zamiennikiem dla fabrycznie montowanych napędów spalinywych. W miejsce silnika spalinowego ma być zastosowany wysokosprawny silnik elektryczny z magnesami trwałymi, zasilany za pośrednictwem przekształtnika energoelektronicznego. Zbiornik z paliwem płynnym zostanie zastąpiony nowoczesnym zespołem akumulatorowym, sterowanym i nadzorowanym przez inteligentny układ elektroniczny. Układ przeniesienia napędu z wału silnika elektrycznego na koła zostanie przeprojektowany tak, by w możliwie dużym stopniu wykorzystać elementy dostarczane oryginalnie z pojazdem. Układy pomocnicze pojazdu, takie jak wspomaganie układu kierowniczego, hamulcowego itp., zostaną dostosowane do specyfiki napędu elektrycznego. Docelowo napęd E-Kit ma być stosowany do elektryfikacji już posiadanych przez osoby prywatne lub firmy i instytucje samochodów z silnikami spalinowymi, m.in. w celu ograniczenia kosztów ich eksploatacji. W ramach projektu przewidziano zaprojektowanie i wykonanie konwersji dwóch małych (miejskich) samochodów, osobowego i dostawczego. W artykule omówiono założenia projektowe i przewidywane parametry trak-

cyjne dotyczące napędu E-Kit dla miejskiego pojazdu osobowego, którym jest Fiat Panda (rok modelowy 2012).

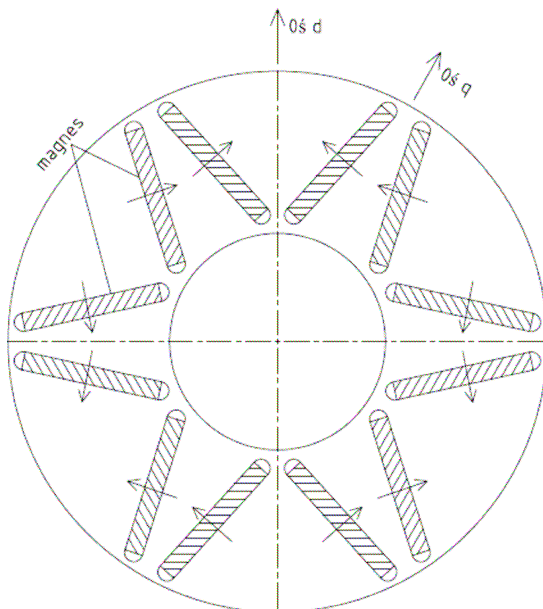
2. Główne założenia techniczne napędu elektrycznego E-Kit dla miejskiego pojazdu osobowego

Podstawowymi elementami nowoczesnego napędu pojazdu w pełni elektrycznego są: silnik elektryczny i falownik (przekształtnik energoelektroniczny) zasilający tenże silnik, z zaimplementowanym odpowiednim algorytmem sterowania momentem i prędkością. Dalej opisano założenia techniczne dotyczące doboru silnika i falownika na potrzeby napędu E-Kit.

Najbardziej zalecanymi aktualnie silnikami elektrycznymi do zastosowania w pojazdach w pełni elektrycznych są tzw. silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (ang. skrót PMSM). Wynika to z głównych zalet tych silników: najwyższej sprawności spośród wszystkich typów silników elektrycznych, utrzymaniem wysokiej sprawności w szerokim zakresie prędkości obrotowych, najwyższych obecnie wartości momentu znamionowego i momentu maksymalnego osiągalnych z jednostki masy lub objętości silnika, wysokiej chwilowej przeciążalności momentem, niskiego poziomu tętnień momentu na wale, wysokiej dynamiki i precyzji regulacji parametrów napędu. W pojazdach przeznaczonych do ruchu drogowego stosowane są zwykle silniki PMSM o promieniowym rozplywie strumienia magnetycznego, z uzwojeniem stojana wykonanym

klasycznie z użyciem pasm fazowych rozłożonych sinusoidalnie.

Dla potrzeb projektu E-Kit zaprojektowano i wykonano kilka odmian silnika PMSM z magnesami mocowanymi wewnątrz rdzenia magnetycznego wirnika (ang. skrót Interior PMSM, IPMSM) [1]. Wirniki zastosowanych silników IPMSM mają dwie osie symetrii magnetycznej, oś podłużną d i poprzeczną q , jak pokazano na rys. 1 [2]. Dzięki różnicy wartości permeancji w obu osiach magnetycznych wirników, użyteczny moment synchroniczny silników IPMSM ma dwie składowe: składową od magnesów trwałych i składową reluktancyjną [2], co m.in. skutkuje wysokimi osiąganymi wartościami momentu znamionowego i maksymalnego przy narzuconej z góry objętości i masie silnika.



Rys. 1. Poglądowy przekrój poprzeczny wirnika w jednym z wariantów silnika IPMSM dla napędu E-Kit. Magnesy trwałe każdego bieguna tworzą literę "V". Wyróżnić można dwie osie magnetyczne, d i q

Jednym z założeń projektu jest to, że konwersja pojazdu spalinowego na elektryczny powinna być dla klienta możliwie tania. Przyjęto zatem, że w pojazdach poddawanych konwersji będzie pozostawiona standardowa skrzynia biegów wraz ze sprzęgłem i kołem zamachowym. To założenie skutkuje narzuconiem z góry maksymalnej prędkości obrotowej silnika elektrycznego, która powinna być, ze względów mechanicznych, w przybliżeniu podobna jak dla silnika spalinowego i dostosowana do zainstalowanej w pojeździe skrzyni biegów.

Na etapie projektowania napędu elektrycznego E-Kit przyjęto także, że maksymalna wartość tzw. siły uciągu pojazdu z napędem E-Kit powinna być zbliżona do wartości tej siły, jaką charakteryzuje się pojazd z napędem spalinowym. Przy niezmięnionej skrzyni biegów (te same współczynniki przełożenia) skutkuje to koniecznością zapewnienia przez silnik elektryczny zbliżonej wartości momentu maksymalnego, jak w przypadku silnika spalinowego. Przyjęto, że dla miejskiego samochodu osobowego maksymalna siła uciągu powinna być zapewniona przez czas 2 minut.

Dla potrzeb napędu E-Kit przyjęto także, że podobnie jak w większości nowoczesnych, trakcyjnych napędów elektrycznych o szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej, prędkość silników elektrycznych IPMSM będzie regulowana dwustrefowo. Strefy regulacji prędkości uwidocznione są na rys. 2, na którym pokazano charakterystyki momentu elektromagnetycznego w funkcji prędkości obrotowej wirnika obliczone dla jednego z wariantów silnika IPMSM dedykowanego do zastosowania w małym samochodzie osobowym. Na charakterystykach tych wyróżnić można dwie strefy regulacji prędkości: tzw. strefę stałego momentu i tzw. strefę stałej mocy. W pierwszej strefie regulacji prędkości obrotowej, od zera aż do tzw. prędkości bazowej n_b , silnik IPMSM pracuje przy zachowaniu optimum ilorazu osiąganego momentu elektromagnetycznego do wartości prądu fazowego silnika T/I_1 i moment T jest w przybliżeniu liniowo zależny od prądu I_1 [3 ÷ 6]. W tej strefie regulacji stałej wartości prądu zasilania I_1 odpowiada więc stała wartość momentu elektromagnetycznego, niezależnie od prędkości obrotowej, stąd nazwa tej strefy regulacji prędkości.

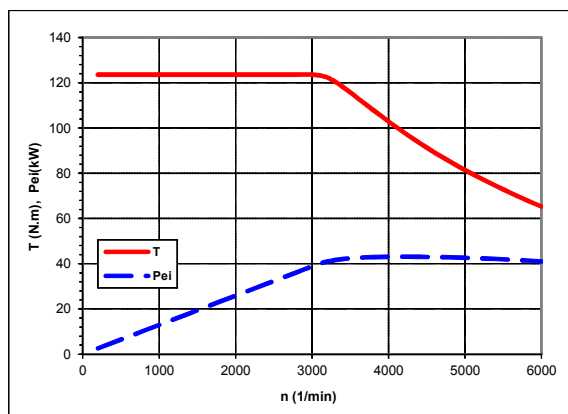
Powyżej prędkości bazowej n_b silnik IPMSM pracuje w drugiej strefie regulacji prędkości, w której dalsze zwiększanie prędkości obrotowej wirnika osiągnięte jest dzięki zastosowaniu techniki tzw. osłabiania strumienia magnetycznego głównego Φ w szczeliny powietrznej silnika [3 ÷ 6]. W drugiej strefie regulacji moment elektromagnetyczny T silnika nie jest już liniowo zależny od wartości prądu I_1 . Przy utrzymaniu stałej wartości prądu I_1 oraz przy odpowiednim zaprojektowaniu obwodów elektrycznego i magnetycznego silnika IPMSM, moment T jest w tej strefie w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalny do prędkości wirnika ($T \sim 1/n$). Moc mechaniczna na wale silnika P_m

jest więc w drugiej strefie regulacji w przybliżeniu stała.

Z uwzględnieniem wspomnianych wyżej kilku założeń dotyczących działania i osiągnięć napędu elektrycznego E-Kit dla miejskiego samochodu osobowego, zaprojektowano kilka wariantów dedykowanego silnika IPMSM. Do pierwszych testów w pojeździe wykonano silnik o następujących parametrach:

- wznios osi wału $H = 132$ mm;
- liczba biegunów magnetycznych $2p = 6$;
- układ magnesów w wirniku: w kształcie litery V dla każdego bieguna;
- magnesy typu NdFeB;
- chłodzenie wodne;
- zakładane napięcie znamionowe baterii $144 V_{DC}$;
- zakładane maksymalne napięcie międzyfazowe na zaciskach silnika $86 V_{RMS}$.

Charakterystyki elektromechaniczne momentu $T = f(n)$ i mocy szczelinowej $P_{ei} = f(n)$ obliczone dla dedykowanego silnika IPMSM pokazano na rys. 2. Charakterystyki te odpowiadają prądowi zasilania I_1 o wartości maksymalnej dopuszczalnej chwilowo (2 min.) przez planowany do zastosowania w napędzie falownik. Prędkość obrotowa wirnika bazowa n_b pomiędzy dwiema strefami regulacji prędkości przy napięciu baterii w pojeździe $144 V_{DC}$ wynosi przy obciążeniu prądem maksymalnym chwilowym ok. 3100 min^{-1} .



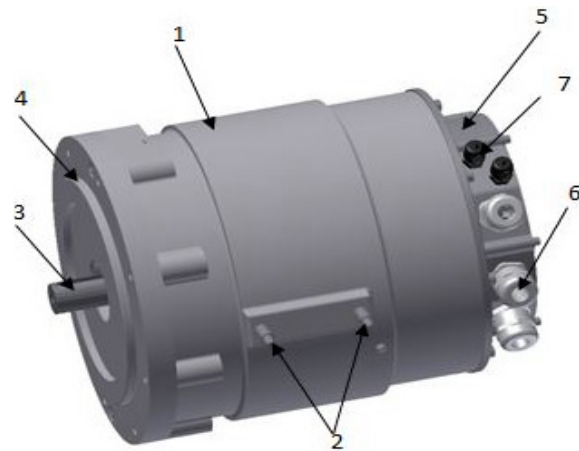
Rys. 2. Charakterystyki elektromechaniczne momentu $T = f(n)$ i mocy szczelinowej $P_{ei} = f(n)$ jednego z wariantów silnika IPMSM do napędu E-Kit dla miejskiego samochodu osobowego

3. Konstrukcja mechaniczna silnika

W ramach projektu został zaprojektowany oraz wykonany model silnika elektrycznego typu SMKwsg132-6. Głównymi warunkami jakie musiała spełnić konstrukcja silnika były: jak

najniższa masa, wymiary gabarytowe umożliwiające jego zamontowanie w samochodzie Fiat Panda, zapewnienie odpowiedniego układu chłodzenia silnika oraz bezpośrednie zesprzęglenie silnika z istniejącą skrzynią biegów.

Na przedstawionym modelu 3D (rys. 3) zostały zaznaczone główne części silnika, takie jak: kadłub silnika (1), wałek wirnika z magnesami trwałymi (3), tarcza napędowa (4), tarcza przeciwnapędowa (5) oraz charakterystyczne rozwiązania konstrukcyjne silnika, takie jak: doprowadzenia czynnika chłodzącego (2) i dławnice kablowe (6) i (7).



Rys. 3. Model 3D silnika typu SMKwsg132-6

W celu zmniejszenia masy silnika tarcze łożyskowe od strony napędowej i przeciwnapędowej oraz kadłub zostały wykonane ze stopu aluminium o odpowiednich właściwościach wytrzymałościowych oraz odpornych na korozję. Kadłub silnika jest wyposażony w spiralny obieg cieczy chłodzącej wymuszonej przez zewnętrzny układ napędowy w postaci pompy elektrycznej oraz rurek doprowadzających chłodziwo do złączek (2). Tarcza napędowa oraz czop końcowy wirnika zostały zaprojektowane tak, aby było możliwe połączenia osiowe silnika z istniejącą skrzynią biegów. W tarczy przeciwnapędowej dławnice (6) przeznaczone są do wyprowadzenia przewodów z uzwojenia stojana, natomiast dławnice (7) służą do wyprowadzenia przewodów enkodera oraz czujników temperatury.

Na rys. 4 przedstawiony został sposób montażu (zesprzęglenia) silnika typu SMKwsg132-6 wykonanego w Instytucie KOMEL z montowaną fabrycznie skrzynią biegów samochodu osobowego Fiat Panda model 2012. Głównym problemem do rozwiązania było współosiowo zamontowanie silnika i skrzyni biegów.



Rys.4. Silnik IPMSM typ SMKwsg132-6 podczas próbnego montażu do skrzyni biegów samochodu osobowego (Fiat Panda 2012)

4. Dane techniczne Fiata Pandy 2012 niezbędne do obliczeń trakcyjnych

Właściwości ruchowe samochodu można najlepiej scharakteryzować przedstawiając graficznie na wykresach trakcyjnych:

- zdolności samochodu do pokonywania oporów drogi i rozwijania określonych prędkości jazdy w ruchu ustalonym na poszczególnych biegach;
- osiągane przyspieszenia na poszczególnych biegach w funkcji prędkości jazdy.

Poniżej przedstawiono niezbędne dane techniczne pojazdu, przyjęte w obliczeniach trakcyjnych. W tabeli 1 umieszczono wybrane wartości mocy i momentu odczytane z charakterystyki silnika elektrycznego

Masa całkowita (z kierowcą): $m = 1050$ kg
 Ogumienie R14 175/65: $r_d = 0.285$ m
 Powierzchnia czołowa: $A = 2.039$ m²
 Współczynnik oporu powietrza: $C_x = 0.32$
 Sprawność układu napędowego: $\eta_m = 0.9$
 Moc max.: $P_{\max} = 43$ kW dla 4000 min⁻¹
 Moment max.: $T_{\max} = 123$ N·m dla 0÷3100 min⁻¹
 Przełożenie całkowite: $i_g = 3,87$
 gdzie:

r_d – promień dynamiczny koła ogumionego.

Tabela 1

n (obr/min)	200	400	600	800
<i>P</i> (kW)	2,6	5,2	7,8	10,4
<i>T</i> (N·m)	123,6	123,6	123,6	123,6
n (obr/min)	1000	1200	1400	1600
<i>P</i> (kW)	12,9	15,5	18,1	20,7
<i>T</i> (N·m)	123,6	123,5	123,6	123,6
n (obr/min)	1800	2000	2200	2400
<i>P</i> (kW)	23,3	25,9	28,5	31,1
<i>T</i> (N·m)	123,6	123,6	123,6	123,6
n (obr/min)	2600	2800	3000	3200
<i>P</i> (kW)	33,7	36,2	38,8	41
<i>T</i> (N·m)	123,6	123,6	123,6	122,3
n (obr/min)	3400	3600	3800	4000
<i>P</i> (kW)	42,1	42,6	42,9	43,1
<i>T</i> (N·m)	118,2	113,1	107,9	102,8
n (obr/min)	4200	4400	4600	4800
<i>P</i> (kW)	43,1	43,1	43	42,9
<i>T</i> (N·m)	98,0	93,5	89,2	85,2
n (obr/min)	5000	5200	5400	5600
<i>P</i> (kW)	42,6	42,4	42,1	41,8
<i>T</i> (N·m)	81,4	77,8	74,5	71,2

5. Wyniki obliczeń zebrane w tabelach

Wykres trakcyjny z rys. 5 przedstawia zmianę siły napędowej na kołach pojazdu w funkcji prędkości jazdy. Siła napędowa działająca na koła pojazdu zależy od wielkości momentu obrotowego silnika, wartości współczynnika przełożenia w układzie napędowym pojazdu oraz od sprawności mechanicznej układu napędowego. Siła napędowa ulega zmianie, gdyż zmienia się moment obrotowy silnika, co wynika z jego charakterystyki $T = f(n)$.

Wyniki obliczeń niezbędnych do sporządzenia wykresu trakcyjnego zawiera Tabela 2, 3.

Tabela 2

n (obr/min)	200	400	600	800	
<i>T</i> (N·m)	123,6	123,6	123,6	123,6	
Bieg	F_{n1} (N)	6194,1	6193,1	6193,1	6193,1
I	V_1 (km/h)	1,2	2,5	3,7	5
n (obr/min)	1000	1200	1400	1600	
<i>T</i> (N·m)	123,6	123,5	123,6	123,	
Bieg	F_{n2} (N)	3259,7	3259,4	3260	3259,7
II	V_2 (km/h)	12	14,4	16,8	19,2

Tabela 2 c.d.

n (obr/min)	1800	2000	2200	2400
T (N·m)	123,6	123,6	123,6	123,6
Bieg III	F_{n3} (N)	2032	2032	2032
	V_3 (km/h)	35,3	39,2	43,1
n (obr/min)	2600	2800	3000	3200
T (N·m)	123,6	123,6	123,6	122,3
Bieg IV	F_{n4} (N)	1471,5	1471,5	1471,5
	V_4 (km/h)	71,5	77	82,5
n (obr/min)	5000	5200	5400	5600
T (N·m)	81,4	77,8	74,51	71,2
Bieg V	F_{n5} (N)	825,2	788,9	754,9
	V_5 (km/h)	164,1	170,7	177,2

F_n (N) – siła napędowa

V (km/h) – prędkość pojazdu

Tabela 3 przedstawia sumę oporów ruchu (opór toczenia + opór powietrza). Suma oporów ruchu rośnie wraz z prędkością, z kolei siła napędowa (siła uciągu) maleje ze wzrostem prędkości i w konsekwencji otrzymujemy maksymalne prędkości osiągalne na poszczególnych przełożeniach.

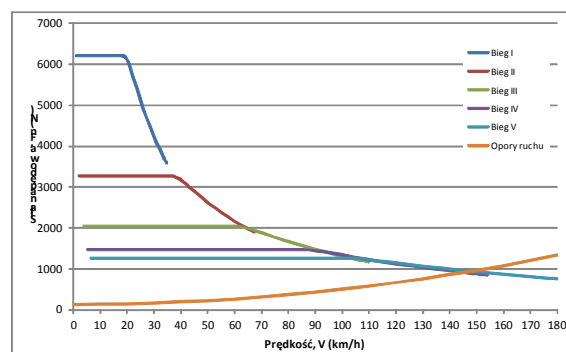
Tabela 3

V (km/h)	F_t (N)	F_p (N)	F_{op} (N)
0	123,6	0	123,6
10	124,2	3,1	127,3
20	126,1	12,3	138,4
30	129,2	27,6	156,8
40	133,5	49,1	182,6
50	139,1	76,7	215,8
60	145,9	110,4	256,3
70	153,9	150,3	304,2
80	163,2	196,3	359,5
90	173,7	248,4	422,1
100	185,4	306,7	492,1
110	198,4	371,1	569,5
120	212,6	441,6	654,2
130	228,1	518,3	746,4
140	244,7	601,1	845,8
150	262,7	690	952,7
160	281,8	785,1	1066,9
170	302,2	886,3	1188,5
180	323,8	993,6	1317,4
190	346,7	1107,1	1453,8
200	370,8	1226,7	1597,5

F_{op} – opory ruchu

F_t – opór toczenia

F_p – opór powietrza

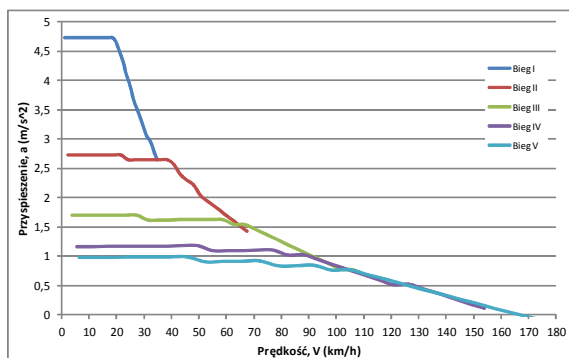


Rys. 5. Wykres traktujący prędkość jazdy w funkcji prędkości

Wykres przyspieszeń pokazany na rys. 6 przedstawia przebieg przyspieszania pojazdu na poszczególnych biegach (I, II, III, IV, V) w funkcji prędkości jazdy, przy wykorzystaniu maksymalnego momentu i mocy silnika. Obliczenia przyspieszeń na poszczególnych biegach wykonano wg Tabeli 4.

Tabela 4

n (obr/min)	200	400	600	800
T (N·m)	123,6	123,6	123,6	123,6
Bieg I	V_1 (km/h)	1,2	2,5	3,7
	a_1 (m/s ²)	4,728	4,728	4,728
n (obr/min)	1000	1200	1400	1600
T (N·m)	123,6	123,5	123,6	123,6
Bieg II	V_2 (km/h)	12	14,4	16,8
	a_2 (m/s ²)	2,728	2,728	2,728
n (obr/min)	1800	2000	2200	2400
T (N·m)	123,6	123,6	123,6	123,6
Bieg III	V_3 (km/h)	35,3	39,2	43,1
	a_3 (m/s ²)	1,621	1,621	1,63
n (obr/min)	2600	2800	3000	3200
T (N·m)	123,6	123,6	123,6	122,3
Bieg IV	V_4 (km/h)	71,5	77	82,5
	a_4 (m/s ²)	1,108	1,108	1,022
n (obr/min)	5000	5200	5400	5600
T (N·m)	81,4	77,8	74,5	71,2
Bieg V	V_5 (km/h)	164,1	170,7	177,2
	a_5 (m/s ²)	0,038	-0,038	-0,115



Rys.6. Wykres przyśpieszeń Fiata Pandy 2012 dla jednego z wariantów napędu E-Kit

6. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych obliczeń na podstawie danych technicznych samochodu Fiat Panda 2012 oraz charakterystyki silnika elektrycznego z magnesami trwałymi otrzymano wykresy pokazane na rys. 5 i 6. Analizując wyniki przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że wykresy oraz wyniki zestawione w tabelach 1 ÷ 4 odpowiadają założeniom trakcyjnym w fazie projektowania silnika elektrycznego. Obliczona prędkość maksymalna pojazdu na piątym biegu wynosi około 150 km/h. Obliczone przyśpieszenie pojazdu do prędkości 100 km/h wynosi ok 14 s.

Przedstawione w artykule charakterystyki przyśpieszenia oraz prędkości wskazują, że napęd powinien dobrze spełniać warunki poruszania się samochodu osobowego w warunkach miejskich.

Literatura

- [1]. Jahns T.M., Kliman G.B., Neumann T.W., *Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives*, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 22, No. 4, pp. 738-747, July/Aug. 1986.
- [2]. Rossa R., *Obliczanie charakterystyk elektromechanicznych silnika reluktancyjnego dowzbudzanego magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 75/2006, str. 59-69, BOBRME KOMEL.
- [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]. Morimoto S., Sanada M., Takeda Y., *Wide-Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-Performance Current Regulator*, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 30, No. 4, pp. 920-926, July/Aug. 1994.

[6]. Schiferl R.F., Lipo T.A., *Power Capability of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motors in Variable Speed Drive Applications*, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 26, No. 1, pp. 115-123, Jan./Feb. 1990.

[7]. Lanzerdoerfer J., Szczepaniak C., *Teoria ruchu samochodu*, Warszawa, WKŁ 1983.

[8]. Mitschke M., *Dynamika samochodu*, T. 1. Napęd i hamowanie, Warszawa, WKŁ 1987.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2011 ÷ 20013 jako projekt badawczy rozwojowy nr NR01-0084-10.

Autorzy

mgr inż. Wojciech Radwański

mgr inż. Bartłomiej Będkowski

mgr inż. Andrzej Białas

dr inż. Robert Rossa

Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy

Maszyn Elektrycznych „KOMEL”

40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188.