

Emil Król, Robert Rossa

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

BADANIE NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO E-KIT W MAŁYM SAMOCHODZIE OSOBOWYM W ASPEKTCIE ZWIĘKSZENIA ZASIĘGU JAZDY

TESTS OF THE ELECTRICAL DRIVE E-KIT IN SMALL PASSENGER CAR IN TERMS OF INCREASING THE DRIVING RANGE

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań na hamowni samochodu osobowego z napędem elektrycznym E-Kit. Na wstępie opisano rozwiązania techniczne zastosowane w napędzie E-Kit, dotyczące silnika elektrycznego, falownika energoelektronicznego i baterii trakcyjnej. Następnie przedstawiono metody zwiększania zasięgu pojazdów z napędem elektrycznym. W kolejnym etapie omówiono wyniki badań eksploatacyjnych samochodu z napędem E-Kit przeprowadzonych na hamowni pojazdowej. Badania te miały na celu sprawdzenie możliwości zwiększenia zasięgu pojazdu poprzez wybór optymalnego przełożenia manualnej skrzyni biegów, w zależności od prędkości samochodu.

Abstract: The article presents the chosen results of chassis dynamometer tests carried out on a small passenger vehicle with electric drive E-Kit. At the beginning of article the technical solutions of electric motor, power electronic inverter, and traction battery used in the E-Kit drive are described shortly. Then the methods how to increase the driving range of electric vehicle are presented. In the next section article presents the results of performance tests of the car with E-Kit drive which were carried out on the chassis dynamometer. The goal of these tests was to check the possibility of increasing the driving range of vehicle by selecting the optimal gear of the manual gearbox depending on the speed of the vehicle.

Słowa kluczowe: pojazd elektryczny, napęd elektryczny, bateria trakcyjna, E-Kit.

Keywords: electric vehicle, electric drive, traction battery, E-Kit

1. Wstęp

W Instytucie KOMEL zrealizowano projekt badawczy rozwojowy pt. „Bezemisyjny napęd elektryczny nowej generacji (E-Kit) do samochodów osobowych i dostawczych o masie całkowitej do 3.5 t.”. W ramach projektu zaprojektowano i wdrożono kompleksowe rozwiązanie zestawów (tzw. E-Kitów) do konwersji samochodów z napędem spalinowym na pojazdy w pełni elektryczne. Silnik spalinowy elektryfikowanego pojazdu został zastąpiony wysokosprawnym silnikiem elektrycznym z magnesami trwałymi. Silnik ten jest zasilany z dedykowanego przekształtnika energoelektronicznego. Zamiast zbiornika na paliwo płynne montowana jest nowoczesna bateria trakcyjna wykonana na bazie ogniw litowo-jonowych, z wymaganymi elektronicznymi układami zabezpieczającymi i sterującymi ładowaniem i rozładowaniem. Układ przeniesienia napędu z wału silnika elektrycznego na koła zaprojektowano tak, by w możliwie dużym stopniu wykorzystać elementy przeniesienia napędu dostarczane oryginalnie z pojazdem. Układy pomocnicze pojazdu, jak wspomaganie układu

kierowniczego, hamulcowego, klimatyzacja oraz ogrzewanie, dostosowano do zasilania elektrycznego. Zestawy E-Kit mają być stosowane 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 badawczego opracowano dwa, nieznacznie różniące się technicznie zestawy E-Kit do elektryfikacji miejskich samochodów osobowych i dostawczych. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki testów na hamowni samochodowej miejskiego samochodu osobowego Panda, zelektryfikowanego zestawem E-Kit. Testy te miały na celu sprawdzenie wpływu użytego biegu manualnej skrzyni biegów na zasięg jazdy samochodem na jednym ładowaniu baterii trakcyjnej.

2. Rozwiązania techniczne zastosowane w badanym pojeździe z napędem E-Kit

Jednym z głównych założeń projektu było to, że konwersja pojazdu spalinowego na elektryczny powinna być dla klienta możliwie tania.

Z tego powodu w pojazdach poddawanych konwersji na bazie zestawów E-Kit pozostawiana jest fabryczna skrzynia biegów, wraz ze sprzęgłem i kołem zamachowym (rys. 1).

W zestawach do elektryfikacji E-Kit zastosowano zaprojektowany, wysokosprawny silnik synchroniczny z magnesami trwałymi. Zastosowano konstrukcję obwodu magnetycznego silnika z magnesami trwałymi mocowanymi wewnątrz rdzenia magnetycznego wirnika (ang. skrót Interior PMSM, IPMSM) [1]. Silnik elektryczny zaprojektowano tak, by mógł on poprawnie współpracować z fabryczną, mechaniczną skrzynią biegów samochodu osobowego, z wykorzystaniem fabrycznie montowanego sprzęgła i koła masowego, (jako pojazd demonstracyjny technologii E-Kit dla samochodów osobowych wybrano Fiata Pandę model 2012). Przyjęta maksymalna prędkość obrotowa wirnika w silniku elektrycznym to 6000 obr/min. Maksymalny chwilowy moment na wale dedykowanego do zestawów E-Kit silnika IPMSM to 180 N·m, jednak moment silnika elektrycznego może być ograniczany w oprogramowaniu zasilającego ten silnik falownika energoelektronicznego, stosownie do ograniczeń skrzyni biegów ze względu na dopuszczalną wartość przeniesionego momentu obrotowego. Poprzez odpowiednią konfigurację oprogramowania falownika można korygować kształt charakterystyk elektromechanicznych napędu E-Kit, tzn. charakterystyki graniczne momentu obrotowego i mocy silnika IPMSM w funkcji prędkości obrotowej wirnika [2 ÷ 6].



Rys. 1. Widok komory silnika samochodu Panda z napędem E-Kit. Z przodu widoczny jest falownik Sevcon Gen4Size8, za nim widoczne są silnik IPMSM i skrzynia biegów

Podstawowe dane silnika IPMSM w napędzie E-Kit dla samochodu osobowego:

- moc znamionowa 41 kW;
- moment znamionowy 119 N·m;
- prąd znamionowy 182 A;

- prędkość obrotowa bazowa [2] sterowania dwustrefowego, 3300 min⁻¹;
- moc max. przy prędkości bazowej 62 kW;
- moment maksymalny 180 N·m;
- prąd maksymalny 280 A;
- typ chłodzenia: płyn.

Silnik IPMSM jest zasilany w napędzie E-Kit z falownika energoelektronicznego. Zastosowano falownik Sevcon Gen4Size8, dedykowany do zastosowań motoryzacyjnych. Falownik i silnik wyposażone zostały we wspólny układ chłodzenia cieczą.

Baterię trakcyjną dla samochodu Panda z napędem E-Kit zaprojektowano na bazie modułów bateryjnych amerykańskiej firmy A123, z ogniwami baterijnymi litowo-jonowymi (Li-ion) nanofosfatowymi. Są to jedne z najnowocześniejszych obecnie modułów bateryjnych dedykowanych do zastosowań motoryzacyjnych. Główne ich zalety to:

- doskonała trwałość, producent gwarantuje 3000 cykli pełnego ładowania;
- wysoka wydolność energetyczna w szerokim zakresie stanu naładowania (ogniwo może dostarczyć 75 % mocy znamionowej przy stanie jego rozładowania 90 %);
- doskonała odporność na temperaturę otoczenia, szeroki zakres bezpiecznych temperatur pracy ogniw, od -30 do 55 °C, pozwala na wyeliminowanie z konstrukcji baterii trakcyjnej skomplikowanych i drogich układów regulacji temperatury ogniw;
- zastosowane moduły bateryjne przeszły pomyślnie testy organizacji EUCAR (The European Council for Automotive Research and Development) opracowane dla systemów magazynowania energii elektrycznej w pojazdach elektrycznych i hybrydowych.



Rys. 2. Moduł baterijny firmy A123 z ogniwami pryzmatycznymi Li-ion nanofosfatowymi, zamontowany w komorze silnika nad silnikiem IPMSM i skrzynią biegów

Bateria trakcyjna samochodu osobowego z napędem E-Kit złożona jest z trzech identycznych modułów bateryjnych, rozlokowanych w różnych miejscach samochodu (w komorze silnika, zamiast zbiornika paliwa płynnego przed tylną osią i w tylnej przestrzeni bagażowej). Każdy z modułów bateryjnych ma pojemność 5 kWh. Całkowita pojemność baterii trakcyjnej w samochodzie osobowym z napędem E-Kit wynosi 15 kWh. Bateria ta jest ładowana przez pokładowy układ ładowarek, zasilany z sieci energetycznej jednofazowej 230 V lub trójfazowej 400 V. Moce ładowania, zależnie od dostępnej sieci, wynoszą 3 kW lub 6 kW.

3. Metody zwiększenia zasięgu samochodów z napędem elektrycznym

Zwiększanie zasięgu samochodów z napędem elektrycznym można realizować wieloetapowo. Podstawową metodą zwiększania zasięgu samochodów z napędem elektrycznym jest zwiększenie pojemności baterii trakcyjnej, jednak ta metoda wiąże się z następującymi niedogodnościami:

- zwiększeniem kosztów elektryfikacji;
- zwiększeniem masy samochodu;
- zmniejszeniem dynamiki (poprzez zwiększenie masy pojazdu).

Drugą metodą zwiększenia zasięgu samochodów z napędem elektrycznym jest wykorzystywanie hamowania regeneracyjnego. Ta metoda jest tania w implementacji, przynosi odczuwalne efekty zwiększenia zasięgu oraz pozwala zmniejszyć zużycie mechanicznego układu hamulcowego.

W artykule omówiono kolejną, trzecią metodę zwiększania zasięgu, którą jest optymalny wybór przełożenia manualnej skrzyni biegów w zależności od prędkości pojazdu. Metoda ta dotyczy aut wyposażonych w taką skrzynię biegów i została przeanalizowana w oparciu o samochód Panda z napędem E-Kit.

4. Wyniki badań na hamowni

Poniżej zamieszczono wyniki badań na hamowni samochodu osobowego Panda, zelektryfikowanego z wykorzystaniem zestawu E-Kit. Celem tych badań było sprawdzenie rzeczywistego poboru mocy z baterii trakcyjnej, przy jeździe samochodem ze stałą prędkością, w zależności od użytego biegu manualnej skrzyni biegów. Badania przeprowadzono na hamowni, na której wykonuje się standardowe testy samochodów osobowych z napędem spalinowym.

W trakcie badań, parametry elektryczne napędu E-Kit: prąd baterii trakcyjnej I_{DC} oraz napięcie tej baterii U_{DC} , odczytywano komputerowo z danych dostarczanych przez falownik napędu E-Kit. Parametry te odczytywano po 15 s symulowanej jazdy z ustaloną prędkością, przy domyślnych ustawieniach sterownika ECU napędu. Na podstawie zmierzonych wartości prądu i napięcia baterii trakcyjnej wyliczono moc P_{DC} potrzebną do poruszania się pojazdu z określoną prędkością oraz energię E zużywaną na pokonanie przy danej prędkości odcinka trasy o długości 100 km.

W pierwszej kolejności wykonano badania symulujące poruszanie się pojazdu z prędkością 50 km/h, na drugim biegu skrzyni biegów, przy gęstym oleju w skrzyni biegów (nierozgrzana przekładnia mechaniczna), pobór mocy z baterii trakcyjnej wynosił 5.2 kW, co odpowiada zużyciu 10.4 kWh energii na 100 km. Następnie wykonano badania dla tej samej prędkości poruszania się pojazdu na trzecim biegu oraz na czwartym biegu, ponownie mierząc wartość prądu I_{DC} i napięcia U_{DC} baterii trakcyjnej. Dane z tych badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań na hamowni, symulacje jazdy z prędkością 50 km/h na różnych biegach

50 km/h, włączona funkcja hamowania z odzyskiem, "nierozgrzana" skrzynia biegów					
nr biegu	obr. sil. [min ⁻¹]	U_{DC} [V]	I_{DC} [A]	P_{DC} [kW]	$E / 100$ km
2	3453	260	20	5.20	10.40
3	2369	259	19	4.92	9.84
4	1792	258	18	4.64	9.29
5	---	---	---	---	---

W kolejnym etapie badań pomiary wykonano w taki sam sposób, ponownie na drugim, trzecim i czwartym biegu skrzyni biegów, ale dla prędkości jazdy zwiększonej do 70 km/h. Dane z pomiarów zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badań na hamowni, symulacje jazdy z prędkością 70 km/h na różnych biegach

70 km/h, włączona funkcja hamowania z odzyskiem					
nr biegu	obr. sil. [min ⁻¹]	U_{DC} [V]	I_{DC} [A]	P_{DC} [kW]	$E / 100$ km
2	4834	256	37	9.47	13.53
3	3316	256	35	8.96	12.80
4	2508	256	33	8.45	12.07
5	---	---	---	---	---

Dla prędkości pojazdu 90 km/h oraz 110 km/h badania nie były wykonywane na biegu drugim, z uwagi na niemożliwość osiągnięcia zakładanej prędkości pojazdu przy maksymalnej prędkości obrotowej elektrycznego silnika napędowego. Dla tych prędkości badania wykonano na biegu trzecim, czwartym i piątym. Dane z badań zamieszczono w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Wyniki badań na hamowni, symulacje jazdy z prędkością 90 km/h na różnych biegach

90 km/h, włączona funkcja hamowania z odzyskiem					
nr biegu	obr. sil. [min ⁻¹]	U _{dc} [V]	I _{dc} [A]	P _{dc} [kW]	E / 100 km
2	---	---	---	---	---
3	4264	254	58	14.73	16.37
4	3225	254	58	14.73	16.37
5	2580	253	54	13.66	15.18

Tabela 4. Wyniki badań na hamowni, symulacje jazdy z prędkością 110 km/h na różnych biegach

110 km/h, włączona funkcja hamowania z odzyskiem					
nr biegu	obr. sil. [min ⁻¹]	U _{dc} [V]	I _{dc} [A]	P _{dc} [kW]	E / 100 km
2	---	---	---	---	---
3	5211	248	100	24.80	22.55
4	3942	250	95	23.75	21.59
5	3153	250	96	24.00	21.82

W ostatniej kolejności zostały wykonane ponownie pomiary dla prędkości 50 km/h. Powtórzenie tych pomiarów na końcu badań miało na celu określenie wpływu stopnia rozgrzania przekładni mechanicznych i oleju w skrzyni biegów na moc pobieraną przez napęd E-Kit. Pierwszy etap badań (tabela 1), przy prędkości 50 km/h był realizowany ze skrzynią biegów nierozgrzaną (zimną).

Tabela 5. Wyniki badań na hamowni, symulacje jazdy z prędkością 50 km/h na różnych biegach, skrzynia biegów po „rozgrzaniu”

50 km/h, włączona funkcja hamowania z odzyskiem, „rozgrzana” skrzynia biegów					
nr biegu	obr. sil. [min ⁻¹]	U _{dc} [V]	I _{dc} [A]	P _{dc} [kW]	E / 100 km
2	3453	256	19	4.86	9.73
3	2369	257	17	4.37	8.74
4	1792	257	16	4.11	8.22
5	---	---	---	---	---

Dla skrzyni zimnej, zużycie energii na 100 km przy prędkości 50 km/h wyniosło 10.4 kWh, natomiast dla skrzyni rozgrzanej 9.73 kWh. Różnica zapotrzebowania napędu na energię przy rozgrzanej i zimnej skrzyni biegów wyniosła zatem 0.67 kWh, co pozwala średnio na przejechanie dodatkowych 6 kilometrów przy rozgrzanej skrzyni.

5. Podsumowanie

Samochody z napędem elektrycznym mają zasięg ok. czterokrotnie mniejszy od swoich odpowiedników z napędem spalinowym. Wada ta wynika m.in. z małej gęstości energii obecnych baterii trakcyjnych w porównaniu do paliw płynnych oraz z wysokiej ceny nowoczesnych baterii trakcyjnych, np. z ogniwami litowo-jonowymi. Możliwe jest zwiększenie zasięgu jazdy pojazdem z napędem elektrycznym do poziomu porównywalnego z samochodami o napędzie spalinowym, jednak to wymagałoby zmiany konstrukcji samochodów oraz użycia większej ilości modułów baterii trakcyjnych, co drastycznie zwiększyłoby masę samochodu oraz jego cenę.

Zwiększenie zasięgu jazdy samochodów z napędem elektrycznym metodami optymalizacyjnymi nie powoduje zwiększenia masy pojazdu ani kosztów jego produkcji. Z opisanych w artykule badań przeprowadzonych na hamowni samochodowej wynika, że w przypadku samochodu osobowego Panda z napędem elektrycznym E-Kit, optymalnym biegiem do poruszania się w warunkach ruchu miejskiego (prędkość około 50 km/h) jest bieg czwarty. Przy użyciu tego biegu, na pokonanie w warunkach miejskich trasy 100 km zużyjemy średnio ok. 8.22 kWh energii. W stosunku do jazdy po tej samej trasie z wykorzystaniem biegu nr 2, zapotrzebowanie na energię jest aż o 1.51 kWh mniejsze, w wyniku czego zasięg jazdy zwiększa się na biegu nr 4 o ponad 18 km.

W przypadku poruszania się samochodu osobowego Panda z napędem E-Kit ze średnią prędkością około 70 km, biegiem optymalnym również jest bieg czwarty. W tym przypadku różnica w zużyciu energii koniecznej do pokonania trasy 100 km z wykorzystaniem biegów drugiego i czwartego wynosi 1.46 kWh, co pozwala na przejechanie dodatkowych 12 km przy prędkości 70 km/h.

Dla prędkości samochodu wynoszącej 90 km/h optymalnym biegiem okazał się bieg piąty skrzyni biegów. Różnica w zapotrzebowaniu na

energię konieczną do pokonania z tą prędkością trasy 100 km z wykorzystaniem biegu trzeciego i piątego wynosi 1.19 kWh, co pozwala na przejechanie dodatkowych 8 km przy prędkości 90 km/h.

Z przeprowadzonych badań na hamowni wynika, że w celu zwiększenia zasięgu jazdy przy jednym ładowaniu baterii trakcyjnej, samochodem osobowym Panda z napędem E-Kit powinno się podróżować z wykorzystaniem możliwie najwyższego możliwego przy danej prędkości biegu manualnej skrzyni biegów.

Cechą charakterystyczną napędu elektrycznego E-Kit jest to, iż pomimo zastosowania mechanicznej skrzyni biegów, pojazdem z tym napędem można w warunkach miejskich poruszać się jak pojazdem z automatyczną skrzynią biegów. Zarówno na biegu drugim jak i trzecim, momenty na kołach pojazdu, jak i osiągnięte prędkości pojazdu są wystarczające do komfortowej jazdy po mieście. Ponieważ nie ma konieczności odłączania skrzyni biegów od silnika elektrycznego przy dojeżdżaniu do skrzyżowań lub przy zatrzymywaniu pojazdu (przy zesprężlonym napędzie silnik elektryczny zatrzymuje się wraz z zatrzymaniem kół pojazdu), zatem kierowca w warunkach miejskich nie musi wykorzystywać pedału sprzęgła i drążka zmiany biegów. W tych warunkach, tzn. bez konieczności stosowania przy napędzie elektrycznym E-Kit sprzęgła i zmiany biegów, można by pokusić się o jazdę wyłącznie na biegu czwartym lub piątym, w celu zwiększenia zasięgu jazdy. Jednak z uwagi na zbyt niską wartość momentu na kołach pojazdu przy tych biegach, dynamika jazdy (czas przyspieszania do wybranej prędkości) byłaby niewystarczająca do bezpiecznego wyprzedzania i utrzymania dobrej płynności ruchu.

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., 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]. 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]. Fręchowicz A., Dukalski P., Białas A.: *Projekt napędu samochodu elektrycznego z dwustrefowym układem sterowania współpracującym z silnikiem PMLDC*, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3/2012 (96), str. 115-121.

Autorzy

mgr inż. Emil Król

dr inż. Robert Rossa

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL

40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188