

Emil Król, Tomasz Wolnik

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

NOWATORSKI NAPĘD ELEKTRYCZNY AUTOBUSU MIEJSKIGO

INNOVATIVE ELECTRIC DRIVE OF THE CITY BUS

Streszczenie: W artykule zaprezentowano najważniejsze zalety silników elektrycznych stosowanych w autobusach z napędem elektrycznym. Opisano podstawowe wady i zalety silników synchronicznych z magnesami trwałymi. W dalszej części artykułu opisano nowatorskie rozwiązania, jakie zastosowano w konstrukcji silnika typu SMwsK280M20 oraz jego podstawowe dane konstrukcyjne. Przedstawiono parametry elektromechaniczne silnika oraz metodę doboru i kształtowania optymalnej charakterystyki napędu. Zoptymalizowane układy napędowe autobusów i innych pojazdów mogą przyczynić się do znacznego upowszechnienia autobusów z napędem elektrycznym, co przyczyni się do zmniejszenia emisji spalin w miastach oraz poprawę komfortu życia jego mieszkańców. Odpowiednia konstrukcja pojazdu elektrycznego i jego inteligentne sterowanie pozwoli wykorzystać energię hamowania do ładowania akumulatorów trakcyjnych.

Abstract: The article presents the most important advantages of electric motors used in electric buses. The main advantages and disadvantages of synchronous motors with permanent magnets are described. The following part of the article describes innovative solutions used in the construction of SMwsK280M20 motor and its basic construction data. Electromechanical parameters of the motor as well as the method of selecting and shaping the optimal drive characteristics are presented. Optimized drive systems of bus may help to propagate the use of electric buses. This will contribute to reduction of exhaust gas emission in cities and improved life comfort of the population. Appropriate design of electric vehicle and intelligent control will make it possible to use braking energy for charging traction batteries.

Słowa kluczowe: *autobus elektryczny, napęd elektryczny, silnik z magnesami trwałymi.*

Keywords: *electric bus, electric drives, permanent magnet motors.*

1. Wstęp

Autobusy z napędem elektrycznym są pojazdami idealnymi do wykorzystania w warunkach miejskich i podmiejskich. Ich głównymi zaletami jest wysoka sprawność przetwarzania energii w elektrycznych układach napędowych tym samym zmniejszone zużycie energii w stosunku do pojazdu z napędem spalinowym. Dodatkowymi zaletami pojazdów z napędem elektrycznym jest niska emisja hałasu, brak emisji szkodliwych toksyn, które są zawarte w spalinach pojazdów z napędem spalinowym oraz niższe koszty eksploatacji [2]. Aby autobus z napędem elektrycznym spełniał wszystkie wymagania powinien być wyposażony w odpowiednio dobrany silnik elektryczny oraz inne elementy układu napędowego, takie jak: wydajny akumulator trakcyjny, falownik energoelektryczny czy odpowiedni most mechaniczny z mechanizmem różnicowym. Do budowy autobusów z napędem elektrycznym stosuje się zarówno silniki asynchroniczne, jak i silniki synchroniczne z magnesami trwałymi prądu przemiennego [1]. Dobór silnika i falownika będzie decydował o osiągnięciach autobusu.

Silniki z magnesami trwałymi mają największą sprawność spośród silników stosowanych w napędach trakcyjnych.

Do największych zalet silników PMSM należą [3,4]:

- wysoka sprawność energetyczna w całym zakresie prędkości obrotowej;
- szeroki zakres efektywnej prędkości obrotowej;
- duża przeciążalność momentem;

- mniejsze wymiary gabarytowe w porównaniu do silników indukcyjnych;

- efektywna regulacja prędkości obrotowej;

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.

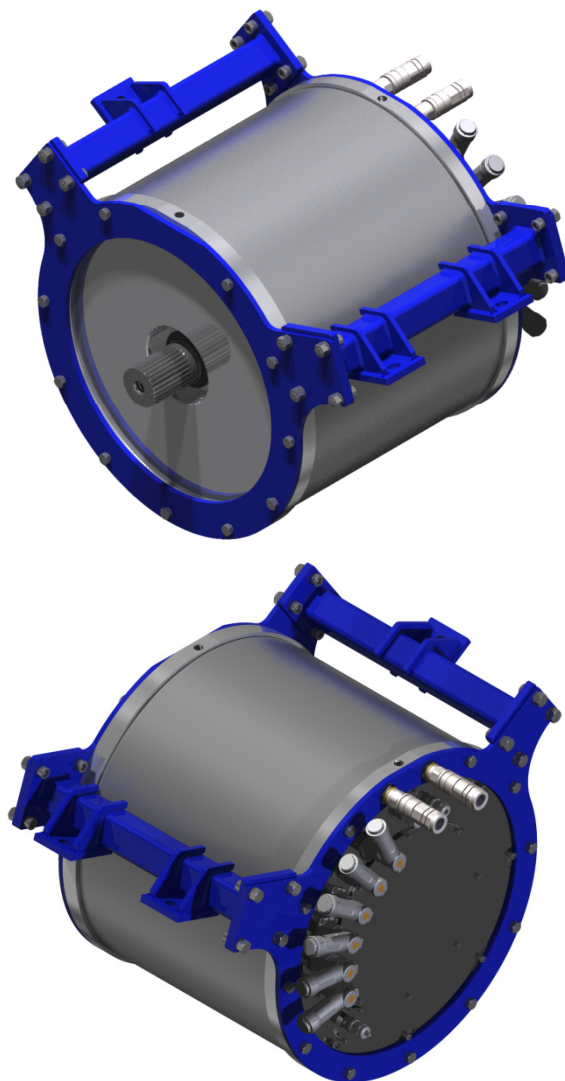
W poniższym artykule skupimy się na silniku synchronicznym z magnesami trwałymi o sinusoidalnym kształcie siły elektromotorycznej (PMSM), który został zaprojektowany specjal-

nie do napędu autobusu miejskiego. Można go wykorzystać również w innych napędach, gdzie wymagany jest wysoki moment i praca w szerokim zakresie prędkości obrotowych. Silnik typu SMwsK280M20 jest przystosowany do pracy z osią napędową o jednym przełożeniu i wyposażoną w mechanizm różnicowy. Warunkiem koniecznym projektu silnika jest wymagany odpowiedni moment maksymalny oraz maksymalna prędkość obrotowa silnika.

2. Rozwiązania zastosowane w konstrukcji i zasilaniu silnika SMwsK280M20

Ze względu na wymogi nowoczesnych napędów rezygnuje się z klasycznej skrzyni biegów, pozostaje wyłącznie silnik i przekładnia główna z mechanizmem różnicowym. Taki zabieg upraszcza układ napędowy, ale wymaga od silnika bardzo wysokich momentów rozruchowych i pracy przy wysokich prędkościach obrotowych. Przy projektowaniu silnika elektrycznego bardzo łatwo jest uzyskać wysokie momenty rozruchowe [1, 4], jak również wysoką prędkość obrotową, jednak spełnienie obu warunków równocześnie jest już trudne i wymaga kompromisu obu tych parametrów. Dodatkowo od napędów trakcyjnych wymaga się, aby ich masa i gabaryty były jak najmniejsze, co wymusza minimalizację strat mocy oraz zastosowanie wydajnego układu chłodzenia w silniku i falownikach. W silniku SMwsK280M20 w celu minimalizacji strat mocy zastosowano specjalne niskostratne blachy elektrotechniczne, zaprojektowano układ chłodzenia, który efektywnie odprowadza ciepło z pakietu stojana, pakietu wirnika oraz uzwojeń znajdujących się w żłobkach oraz czoł uzwojeń. W silniku zaprojektowano specjalne uzwojenia, które mogą pracować jako trójfazowe i jako sześciofazowe a równocześnie minimalizować indukcyjność wzajemną obu uzwojeń. Silnik jest wyposażony w dwa uzwojenia połączone w gwiazdę i wyprowadzane sześć kociówek uzwojeń. Uzwojenia silnika można połączyć równoległe, co pozwala wykorzystać jego pełną moc i prędkość maksymalną przy zasilaniu z jednego falownika trójfazowego o odpowiedniej wydajności prądowej. W przypadku wykorzystania obu uzwojeń równocześnie możemy zasilić silnik z dwóch niezależnych falowników trójfazowych lub jednego falownika sześciofazowego. W przypadkach awaryjnych możemy zasilać tylko jedno uzwojenie silnika jednym falownikiem, jednak w tym przypadku musimy liczyć

się z ograniczeniem do 50% momentu maksymalnego, a także ograniczeniem prędkości maksymalnej, gdyż napęd wykorzystuje możliwość pracy w dwóch strefach regulacji. Praca w drugiej strefie wymaga odpowiedniej wydajności prądowej falownika. Jeden falownik dobrany do pracy w parze nie zapewnia odpowiedniego osłabienia strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej od magnesów trwałych. W przypadku pracy na jednym falowniku możemy uzyskać około 66% prędkości maksymalnej silnika. Docelowo silnik będzie pracował zasilany z dwóch falowników trójfazowych Sevcon Gen4 Size 10 o parametrach pokazanych w tabeli 1. Możliwa jest również praca z innymi falownikami trójfazowymi lub sześciofazowymi o porównywalnych parametrach.



Rys. 1. Widok silnika SMwsK280M20 umieszczonego w ramie montażowej

Tabela. 1.

Sevcon	Typ: Gen 4 Size 10	
	Chłodzenie płynem	
Moc ciągła: 150 kW	Moc chwilowa: 300 kW	
Prąd ciągły: 200 A (RMS)	Prąd maksymalny: 450 A (RMS)	
Napięcie zasilania: od 50 do 800 V _{DC}	Masa:	10.9 kg
Warunki pracy: od -40 do +85°C	IP	67

3. Dane i parametry silnika napędowego SMwsK280M20

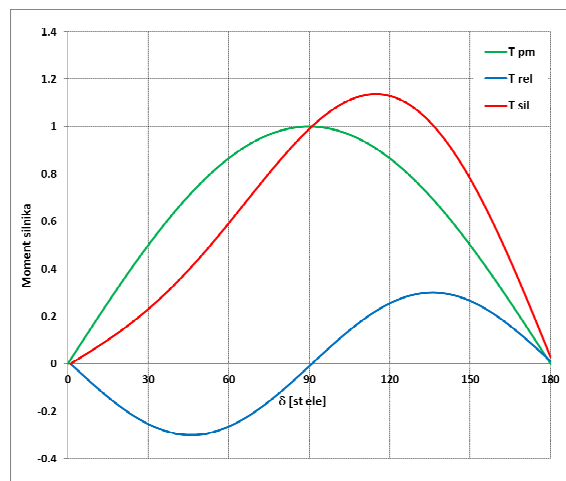
Silnik SMwsK280M20 został zaprojektowany, jako silnik synchroniczny z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika. Silnik jest maszyną 20-biegunową. Taka ilość biegunów oraz asymetryczna reluktancyjnie konstrukcja wirnika pozwoliła uzyskać wysoki moment elektromagnetyczny od magnesów trwałych, a równocześnie różnice w reaktancjach w osi d i q powodują, że wirnik charakteryzuje się momentem reluktancyjnym. Wzór na moment elektromagnetyczny w maszynie z asymetrycznym reluktancyjnie wirnikiem przyjmuje postać:

$$T_e = \frac{3 \cdot p}{2} [I_q \psi_{mag} + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (1)$$

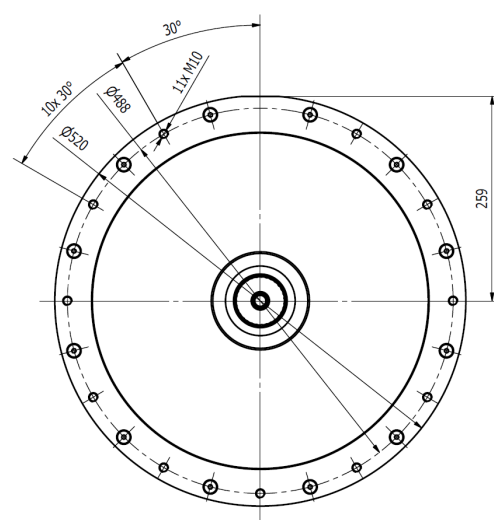
gdzie:

ψ_{mag} – strumień wzbudzenia od magnesów trwałych skojarzony z uzwojeniem stojana;
 L_d, L_q – indukcyjności odpowiednio w osi d i q ;
 p – liczba par biegunów;
 I_d, I_q – składowe prądów uzwojenia stojana w osi d i q .

Przy wykorzystaniu odpowiednio skonfigurowanego falownika możemy wykorzystać moment pochodzący od magnesów trwałych oraz moment reluktancyjny. Przykładowe charakterystyki pokazano na rysunku 2. Wypadkowa wartość momentu elektromagnetycznego silnika asymetrycznego reluktancyjnie zależy od różnicy reaktancji w ośiach d i q silnika. Różnicę tę można maksymalizować poprzez odpowiednią konstrukcję mechaniczną wirnika, co pozwala zaprojektować silnik o wyższym momencie na wale bez zwiększania jego gabarytów i masy.



Rys. 2. Charakterystyka momentu synchronicznego silnika w funkcji kąta mocy



Rys. 3. Wymiary gabarytowe silnika SMwsK280M20

W tabeli 2 przedstawiono podstawowe parametry elektromechaniczne silnika autobusowego zasilanego z dwóch nienależnych falowników trójfazowych.

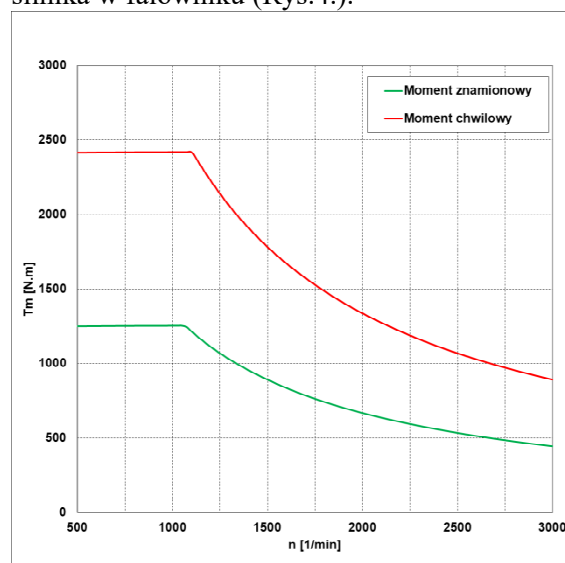
Tabela.2.

Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi	Typ: SMwsK280M20
	Chłodzenie płynem
Napięcie zasilnia falownika: 660 V _{DC}	
Moc znamionowa: 140 kW	Moc chwilowa: 280 kW
Praca: S2-120 min	Prąd maksymalny: 2x420 A
Napięcie: 2x220 V _{AC}	Prędkość maks: 3000 obr/min
Prąd znamionowy: 2x195 A	Moment maksymalny: 2400 Nm
Częstotliwość znam.: 183,3 Hz	Klasa izolacji: H
Prędkość Obr znam: 1100obr/min	Masa: 275 kg
Sprawność: 96.0 %	IP: 55

4. Charakterystyki trakcyjne napędu autobusowego SMwsK280M20

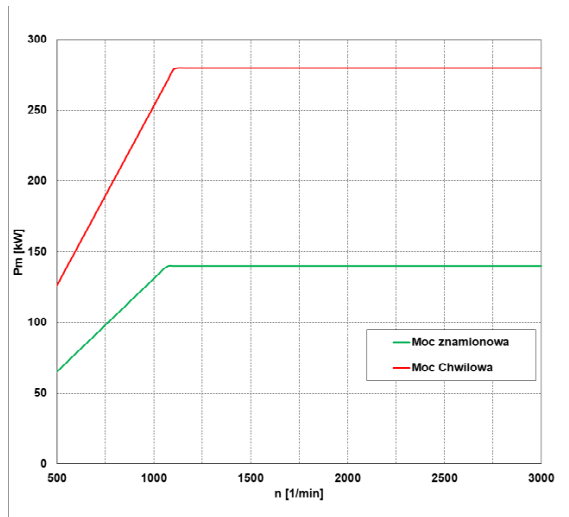
Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika są w większości sterowane jako silniki synchroniczne tzw. PMSM IPM. Ten typ silnika pozwala na efektywną pracę w drugiej strefie sterowania ze stałą mocą. W pierwszej strefie regulacji prędkości obrotowej od zera aż do tzw. prędkości bazowej, limitowanej napięciem stałym zasilania falownika. Silniki PMSM są sterowane przez falownik algorytmem, który wymusza, aby pracowały przy optimum 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 w szczeliny powietrznej silnika, co wiąże się również z obniżeniem momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik [5, 6]. W silnikach z magnesami trwałymi chwilowy moment obciążenia może być kilkakrotnie większy od momentu znamionowego. W napędach moment maksymalny determinuje maksymalna wydajność prądowa falownika lub falowników. Dla rzeczywistych układów zwykle przeciążalność prądowa falownika wynosi od 2 do 3 razy.

Przeciążalność silnika decyduje o krotności momentu rozruchowego, jak również o dynamice działania napędu i całego autobusu. Napędy wyposażone w silniki z magnesami mają jednakowe charakterystyki przy pracy silnikowej jak i generatorowej. Kształt i moment przy pracy generatorowej (hamowanie odzyskowe) jest oddzielnie konfigurowalny w falowniku. Aby zapewnić porównywaną dynamikę autobusu z napędem elektrycznym, do autobusu z napędem spalinowym, silnik elektryczny powinien mieć zbliżony kształt charakterystyki mechanicznej do wypadkowej charakterystyki użycia wszystkich biegów w autobusie z silnikiem spalinowym. Idealna charakterystyka silnika elektrycznego dla autobusu powinna mieć bardzo wysoki moment maksymalny, który silnik musi utrzymać do 30% wartości maksymalnej prędkości obrotowej. Aby uzyskać wymagany kształt charakterystyki należy sztucznie (programowo) ograniczyć parametry silnika w falowniku (Rys.4.).



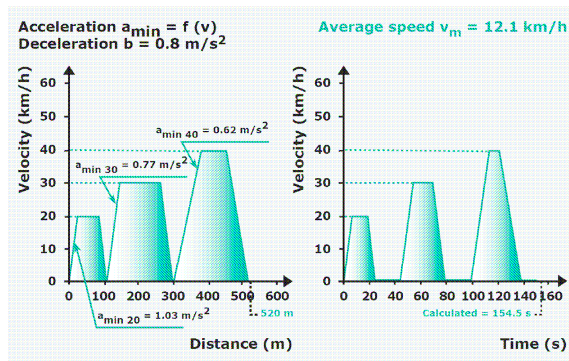
Rys. 4. Charakterystyki trakcyjne silnika autobusowego z programowym ograniczeniem mocy

Ze względu na zasilanie silnika elektrycznego poprzez falownik z akumulatora trakcyjnego o ograniczonej pojemności i wydajności prądowej, mamy ograniczenie wartości pobieranego prądu oraz ograniczenie wartości napięcia zasilania. Ograniczenie napięcia przekłada się na ograniczenie prędkości maksymalnej silnika. Natomiast ograniczenie prądu akumulatora przekłada się na ograniczenie momentu, a zarazem i mocy silnika (Rys.5.).



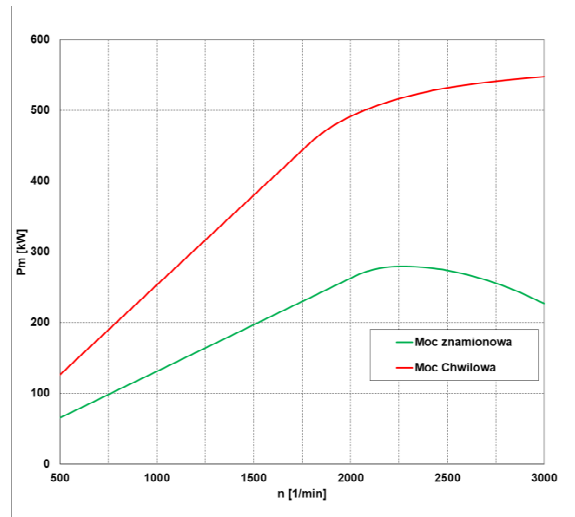
Rys. 5. Charakterystyki mocy na wale silnika autobusowego z programowym kształtowaniem charakterystyki

Aby w dalszym ciągu móc utrzymać wysoki moment silnika, a jednocześnie wymaganą dynamikę pojazdu określoną przepisami SORT 1 (Rys. 6), SORT 2 i SORT 3 należy przewymiarować silnik mocowo, a falowniki prądowo. Taki zabieg pozwoli elektronicznie kształtować wymaganą charakterystykę trakcyjną napędu (Rys.3.) oraz spełniać wszystkie wymagane przyspieszenia i prędkości.

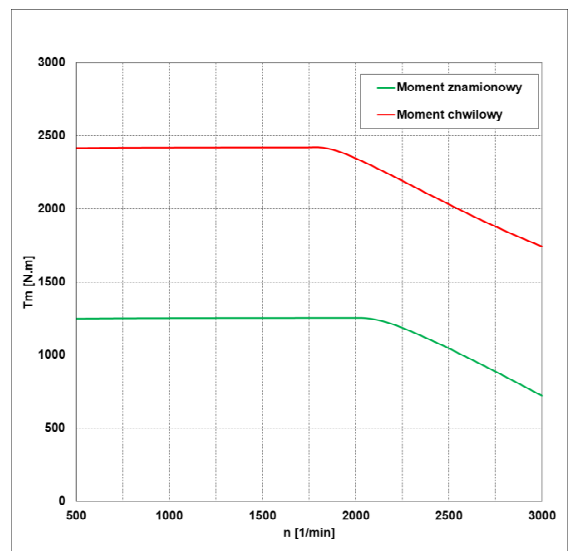


Rys. 6. Cykle bazowe SORT 1 – Trudne warunki miejskie. (źródło: UITP Project 'SORT' Standardised On-Road Tests cycles)

Przewymiarowanie mocowe silnika napędowego autobusu niekorzystnie wpływa na jego masę i objętość. Objętość i masa silnika jest kolejnym elementem ograniczeń, jakie narzuca budowa nowoczesnego autobusu miejskiego. Autobus miejski powinien mieć płaską podłogę w celu maksymalnego wykorzystania miejsca dla pasażerów. Takie założenia wymuszają zastosowanie mostu portalowego oraz rozmieszczenia akumulatorów w podłodze lub na dachu autobusu.



Rys. 7. Charakterystyki mocy napędu z silnikiem SMwsK280M20 bez ograniczenia mocy



Rys. 8. Charakterystyki momentu na wale silnika bez ograniczenia mocy

Rzeczywiste charakterystyki napędu składającego się z silnika SMwsK280M20 oraz dwóch falowników Sevcon Gen 4 Size 10 pokazano na rysunku 7 oraz rysunku 8. Stosując akumulatory o wyższej obciążalności prądowej możemy równocześnie bardziej efektywnie wykorzystać napęd i dwukrotnie podnieść jego moc, co świadczy o dużej uniwersalności napędu i możliwości zastosowania go w różnej wielkości autobusów.

5. Podsumowanie

Przewymiarowanie mocowe silnika ze względu na wymagany moment na wale, prędkość maksymalną oraz przewymiarowanie prądowe falownika z równoczesnym ograniczeniem prędkości bazowej są jednymi z najczęściej stosowanymi

wanych metod kształtowania charakterystyki trakcyjnej silników synchronicznych z magnesami trwałymi. „Ubočnym” skutkiem zastosowania tej metody kształtowania charakterystyki trakcyjnej jest wysoka sprawność napędu. Często stosowaną metodą kształtowania charakterystyki trakcyjnej silników z magnesami trwałymi jest zwielokrotnienie liczby faz silnika do sześciu lub dziewięciu. Dzięki zwielokrotnieniu mamy możliwość zastosowania większej liczby falowników, co skutkuje znaczącym podniesieniem ich sumarycznej wydajności prądowej. Metoda ta stosowana jest w silnikach dużej mocy, gdzie bardzo trudno wykonać pojedyncze falowniki o odpowiedniej wydajności prądowej. Każdy z falowników w takim układzie pracuje na oddzielnym uzwojeniu odizolowanym galwanicznie od innych falowników zasilających jeden silnik. Metoda ta wymaga specjalnej konstrukcji silnika oraz falowników 3-fazowych ze specjalnym oprogramowaniem. Cechą charakterystyczną napędu elektrycznego połączonego z mostem mechanicznym ze zintegrowanym mechanizmem różnicowym jest to, że autobusem z tym napędem może poruszać się jak autobusem z automatyczną skrzynią biegów, a ponieważ nie ma możliwości odłączania mechanizmu przenoszącego moment od silnika elektrycznego można wykorzystywać silnik 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 i tarcz układu hamulcowego.

6. 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 Con-

stant 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 PMLDLC”, *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.

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

[8]. 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.

[9]. Gawron S.: „Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 1/2016 (109), str. 1-10.

Autorzy

mgr inż. Emil Król

mgr inż. Tomasz Wolnik

Institut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL

40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188