

Tadeusz Glinka\*, Marcin Fice\*\*, Rafał Setlak\*\*

\*BOBRME Komel, Katowice, \*\*Politechnika Śląska, Gliwice

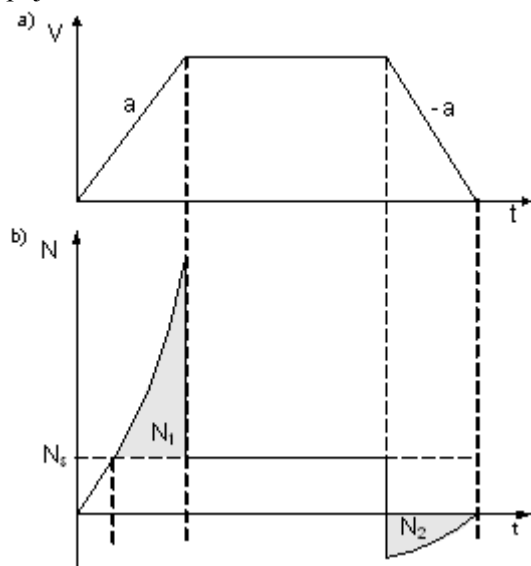
## HYBRYDOWY NAPĘD POJAZDU MIEJSKIEGO

### THE ELECTRIC HYBRID DRIVE FOR A CITY VEHICLE

**Abstract:** This paper presents an alternative solution of the electric hybrid drives for a city vehicle. The drive include an internal combustion engine and an electric machine with permanent magnets which works as motor or generator, in dependence on demands. Use of a dual energy storage including batteries and supercapacitors is the innovative approach to the problem. A reversible dc-dc power electronic converter transfer the energy from energy storage to electric machine during the vehicle starts and accelerate, and transfer the energy from electric machine to energy storage when the vehicle slow-down. The power transmission system is control by the microprocessor unit system.

#### 1. Wstęp

Jazda w mieście pojazdu mechanicznego nie odbywa się przy stałej prędkości, a wymaga częstego zwalniania i zatrzymywania się oraz ruszania i przyspieszania. Przy ruszaniu z miejsca i przy przyspieszaniu pojazdu zapotrzebowanie na moc silnika napędowego jest większe niż przy jeździe ustalonej podczas jazdy ze stałą prędkością, gdyż moc ta potrzebna jest na pokonanie zarówno oporów ruchu jak i zwiększenie energii kinetycznej pojazdu.



Rys.1. Przykładowy cykl jazdy pojazdu: a) przebieg prędkości, b) zapotrzebowanie na moc.  $N_s$  – moc średnia potrzebna do utrzymania stałej prędkości,  $N_1$  – moc potrzebna do przyspieszenia pojazdu do zadanej prędkości,  $N_2$  – moc tracona w postaci ciepła podczas hamowania

Sytuację taką pokazano na rysunku 1b, gdzie przedstawiono przykładowy przebieg mocy wymaganej do realizacji cyklu jazdy (rys.1a) z zadaniem przyspieszenia, jazdy z prędkością ustaloną oraz hamowania. Podczas hamowania i zatrzymywania energia kinetyczna pojazdu jest wytracana w hamulcach mechanicznych, co powoduje ich nagrzewanie i zużywanie się. Głównym celem zastosowania napędu hybrydowego jest odzysk energii hamowania pojazdu. Po zmagazynowaniu tej energii można ją ponownie wykorzystać przy ruszaniu i przyspieszaniu pojazdu. Wówczas hamowanie odbywa się bez użycia hamulców mechanicznych, które pełnią jedynie funkcję hamulców pomocniczych i bezpieczeństwa.

Pojazdami typowo miejskimi są autobusy jeżdżące w miejskiej sieci komunikacyjnej. Ruch autobusów miejskich można podzielić na cztery fazy:

- ruszanie (rozumiane jako przyspieszanie od prędkości zerowej do 5% prędkości max),
- przyspieszanie,
- jazdę ze stałą prędkością,
- hamowanie.

Przykładowy cykl jazdy zawierający wyżej wymienione fazy, pokazano na rysunku 1a.

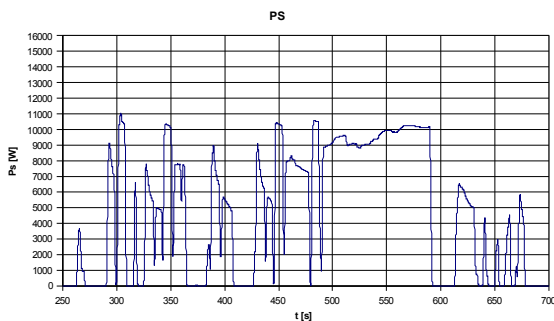
Gęsta sieć miejskich przystanków autobusowych, skrzyżowania i sygnalizacja świetlna oraz warunki ruchu powodują, że autobusy poruszają się ze stałą prędkością jedynie na krótkich odcinkach trasy. Najczęściej realizowane są fazy ruszania, przyspieszania i hamowania.

## 2. Badania eksperymentalne

Pomiary eksperymentalne mocy wydawanej przez silnik napędowy pojazdu w funkcji czasu wymagają wyposażenia silnika w głowicę pomiaru momentu  $T$  oraz przyrząd do pomiaru prędkości obrotowej  $n$ . Moc silnika napędowego (także spalinowego) można obliczyć:

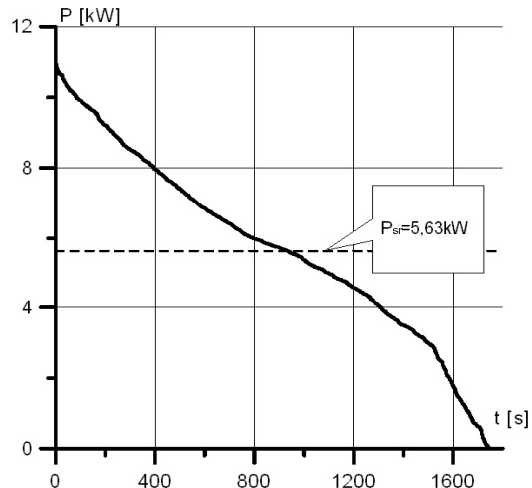
$$N(t) = T(t) \frac{\pi n(t)}{30}$$

Pomiary takie w standardowych autobusach nie są możliwe do wykonania, dlatego autorzy odpowiednie badania wykonali na samochodzie elektrycznym, zbudowanym na bazie Wartburga, który jeździł po Gliwicach według rozkładu jazdy jednego z autobusów. Samochód elektryczny napędzany jest silnikiem szeregowym produkcji VUES Brno typu MTH 100L/KB o parametrach:  $P_n=13,5$  kW,  $U_n=84$  V,  $I_n=190$  A,  $n_n = 3300$  obr./min, wsp. przeciążalności  $p_n = 2,3$ . W samochodzie tym także nie ma zabudowanej głowicy pomiarowej momentu, lecz istnieje możliwość pomiaru mocy pobieranej przez silnik z baterii akumulatorów. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy przebieg czasowy tej mocy w cyklu: ruszanie, przyspieszanie, jazda ustalona, hamowanie. Hamowanie pojazdu odbywało się jedynie przy pomocy hamulców mechanicznych bez użycia maszyny elektrycznej i hamowania odzyskowego.



Rys.2. Fragment cyklu jazdy pojazdu elektrycznego – 450 s

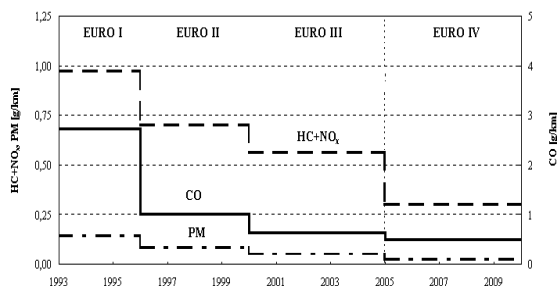
Dokonano uśrednienia tych przebiegów z kilkunastu cykli zrealizowanych w 1800 sekundach i na tej podstawie opracowano tzw. uporządkowany przebieg mocy od  $P_{max}$  do zera w funkcji czasu – rysunek 3. Moc uporządkowana pokazuje czas poboru określonego poziomu mocy podczas jazdy. Na wykresie pokazano także obliczoną moc średnią realizowanego cyklu jazdy -  $P_{sr}=5,63$  kW. Moc szczytowa cyklu wyniosła  $P_{max} = 14,43$  kW, zapotrzebowanie na taką moc trwało jedną sekundę.



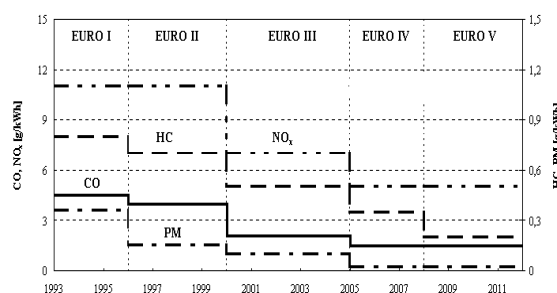
Rys.3. Przebieg mocy uporządkowanej pobieranej przez silnik podczas jazdy samochodem o napędzie elektrycznym

Przenosząc interpretację tych wyników na autobus napędzany silnikiem wysokoprężnym wynika, że krótkotrwałe zapotrzebowanie na moc szczytową powoduje, że w czasie ruszania i przyspieszania autobus zużywa największe ilości oleju napędowego (następuje duże przesunięcie w czasie listwy wtryskowej w pompie rzędowej silnika wysokoprężnego, a co za tym idzie nadmiar wtryskiwanego oleju napędowego w stosunku do masy zasysanego powietrza) oraz następuje widoczna emisja dużych ilości toksycznych spalin (rakotwórczych stałych cząstek sadzy), co objawia się dymieniem.

Od kilku lat w nowoczesnych samochodach osobowych z silnikami wysokoprężnymi instaluje się specjalne systemy dopalania cząstek stałych, a sposób rozwiązania układów oraz technologia procesu dopalania zależy od producenta [7]. W polskich autobusach takich systemów jednak nie stosuje się. Dopuszczalne poziomy emisji zanieczyszczeń dla pojazdów z silnikami wysokoprężnymi zawarte są w Dyrektywach Unii Europejskiej (tzw. Normach EURO). Wykresy obrazujące zmiany dopuszczalnych poziomów emisji związków szkodliwych w latach 1993 do 2009 z silnikami wysokoprężnymi pokazano na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Dopuszczalne poziomy emisji węglodorów HC, tlenków azotu  $NO_x$  i cząstek stałych PM dla pojazdów z silnikami wysokoprężnymi dla pojazdów do masy 3,5 tony



Rys. 5. Dopuszczalne poziomy emisji węglodorów HC, tlenków azotu  $NO_x$  i cząstek stałych PM dla pojazdów z silnikami wysokoprężnymi powyżej 3,5 tony

### 3. Autobusy na gaz ziemny w Polsce

W Polsce próbuje się zwiększać rentowność komunikacji miejskiej poprzez dostosowanie autobusów do zasilania sprężonym gazem ziemnym CNG [10]. Obecnie jest eksploatowanych 76 autobusów zasilanych sprężonym metanem (Rzeszów, Tarnów, Przemyśl). Prowadzone są także prace mające na celu przystosowanie kolejnych 170 autobusów do tego typu paliwa, przy czym głównym bodźcem przebudowy jest zmniejszenie kosztów transportu, a nie względy ekologiczne i oszczędność energii. Doświadczenia eksploatacyjne przedsiębiorstw stosujących te rozwiązania pokazują, że jest to system dość kłopotliwy. Konieczna jest bowiem budowa nowej infrastruktury związanej z tankowaniem CNG (kompresory sprężające gaz do ciśnienia 200-250 bar, osuszacze, zbiorniki wysokociśnieniowe). Szacuje się, że koszty inwestycji są o rząd większe niż w przypadku stacji LPG. Zarówno wysokie koszty jak i brak uregulowań prawnych powoduje, że w Polsce, do stycznia 2006 działało zaledwie 12 stacji tankowania CNG, z czego pięć znajduje się w województwie Podkarpackim.

Kolejnym niekorzystnym czynnikiem, przy zasilaniu autobusów gazem CNG jest konieczność „modernizacji” silnika spalinowego pojazdu. Wiąże się to z poważną ingerencją mechaniczną w konstrukcję tłoków, głowicy czy wykonania nowego systemu zasilania i zapłonowego. Działania te wynikają z konieczności dostosowania silnika o zapłonie samoczynnym do zapłonu iskrowego i gorszych warunków spalania mieszanki. Koszt dostosowania jednego autobusu miejskiego z silnikiem wysokoprężnym do paliwa CNG przekracza 100 tys. złotych [1], przy czym dokonywane „przeróbki” silników nie są poparte odpowiednimi obliczeniami i badaniami związanymi z odmiennością procesów napełnienia, sterowania zapłonem, spalania i odprowadzania spalin (np. otwory pod świece zapłonowe rozwierca się w głowicy tam gdzie szlifierz znajdzie miejsce i będzie mu wygodnie). W rezultacie takich działań „modernizowane” autobusy cechuje wysoka usterkowość (pękanie głowic silników, uszkodzenia uszczelki podgłowicowych, uszkodzenia świec zapłonowych, zespołów tłok – cylinder, układów zapłonowych). Aby temu zapobiec instruuje się kierowców i wprowadza specjalne, długotrwałe procedury postoju silników autobusów przed ich wyłączeniem.

Inną niekorzystną cechą zasilania pojazdów paliwem CNG jest duża objętość zbiorników gazu i ich masa. Aby nie zmniejszać przestrzeni użytkowej autobusu butle często umieszcza się na dachach lub pod podłogą. Zmiana rodzaju paliwa z oleju napędowego na CNG nie rozwiązuje jednak problemu odzysku energii hamowania i jej ponownego wykorzystania podczas jazdy, a zużycie gazu jest 1,4 razy większe niż oleju napędowego. Problematyczny jest też sam proces tankowania CNG, gdyż w przypadku tankowania szybkiego może on trwać nawet do dwóch godzin a w przypadku zastosowania Agregatu Tankowania CNG (dedykowany do aut osobowych) czas ten wydłuża się do kilkunastu godzin (wydajność kilka  $m^3/h$ ). Koszt takiego urządzenia w USA to ok. 5 tys dolarów.

### 4. Zasobniki energii elektrycznej

Prowadzone przez autorów oraz inne ośrodki [13] badania eksploatacyjne w ruchu miejskim napędu hybrydowego i elektrycznego pokazały, że zastosowanie do komunikacji miejskiej napędu składającego się z silnika spalinowego, silnika elektrycznego i baterii akumulatorów

nie spełnią pokładanych w nim nadziei. Niekorzystnymi czynnikami w przypadku akumulatorów ołowiowych jest niska gęstość mocy, problemy z poborem dużych prądów chwilowych z baterii, wysokie wymagania jakościowe co do wartości prądów i napięć ładowania, duża masa akumulatorów czy stosunkowo niska trwałość (liczba cykli ładowanie-rozładowanie) [9].

Tab.1.

Porównanie parametrów akumulatorów i superkondensatorów [14]

	Ołowiowy Pb-PbO <sub>2</sub>	Super - kondensatory
Temp. Pracy [°C]	-20 - 60	-30 - 70
Gęstość energii [Wh/kg]	32	0,6 - 4
Gęstość mocy [W/kg]	44	1000 - 3300
Napięcie ogniwa [V]	2	2,3 – 2,5
Trwałość [cykle do 80% wyładowania]	do 1500	500 000

Porównanie wybranych parametrów kwasowo-ołowiowych ogniw trakcyjnych typu 8A180 zastosowanych i eksploatowanych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w pojeździe o napędzie hybrydowym i superkondensatorów pokazano w tabeli 1. Parametry baterii akumulatorów zastosowanych w pojeździe:  $U_n = 84$  V,  $Q_5 = 180$  Ah, masa 420 kg.

Inne typy akumulatorów stosowanych w samochodach hybrydowych lub elektrycznych posiadają o wiele niższy stosunek mocy do ceny. W Polsce dostępne są w sprzedaży trzy modele osobowych pojazdów hybrydowych producentów Japońskich wykorzystujące akumulatory Litowo-Jonowe (Li-Ion).

Poprawę parametrów pojazdu można uzyskać przez wprowadzenie efektywnych metod odzysku energii hamowania pojazdu oraz jednoczesne obniżenie masy zasobników energii. Można to uzyskać stosując hybrydowe źródło energii, czyli dwa współpracujące magazyny energii: baterię akumulatorów oraz wysoko zaawansowane technologicznie superkondensatory [2], [8]. W takim przypadku można zastąpić część ciężkich akumulatorów baterią superkondensatorów.

Pojedyncza celda dostępnego na rynku superkondensatora o pojemności 1200F i napięciu 2,5 V

posiada gęstość energii  $q_{en} = 3,2$  Wh/kg, a gęstość mocy  $p_w = 3000$  W/kg. Trwałość modułu wynosi 500 000 cykli, a masa 0,33 kg [4]. Zaletą superkondensatorów jest fakt, że są zdolne do przyjmowania i wydawania prądów o wartości do 500 A bez utraty trwałości. W tradycyjnych akumulatorach kwasowo-ołowiowych nie ma możliwości przyjmowania dużych mocy hamowania pojazdu bez znaczącego obniżenia żywotności.

## 5. Koncepcja napędu hybrydowego pojazdu miejskiego

Dodanie maszyny elektrycznej wzbudzonej magnesami trwałymi do zamontowanego w autobusie silnika spalinowego stwarza możliwości:

- odzyskiwania energii hamowania pojazdu przy zmniejszaniu prędkości i jeździe ze wzniesienia. Maszyna elektryczna pracuje wtedy w trybie pracy prądnicowej, a energia przekazywana jest do zasobnika energii elektrycznej,

- wykorzystania maszyny elektrycznej do rozruchu silnika spalinowego (maszyna elektryczna pracuje jako rozrusznik),

- wspomaganie silnika spalinowego przy ruszaniu pojazdu i przy podjazdach na wzniesienia. Maszyna elektryczna pracuje wtedy jako silnik elektryczny, który wykorzystuje energię zmagazynowaną w zasobniku energii elektrycznej,

- w pojeździe z napędem hybrydowym moc silnika spalinowego może być mniejsza w stosunku do mocy silnika już zainstalowanego w pojeździe, gdyż suma mocy silnika spalinowego i mocy maksymalnej silnika elektrycznego pokrywa zapotrzebowanie pojazdu na moc – rysunek 3.

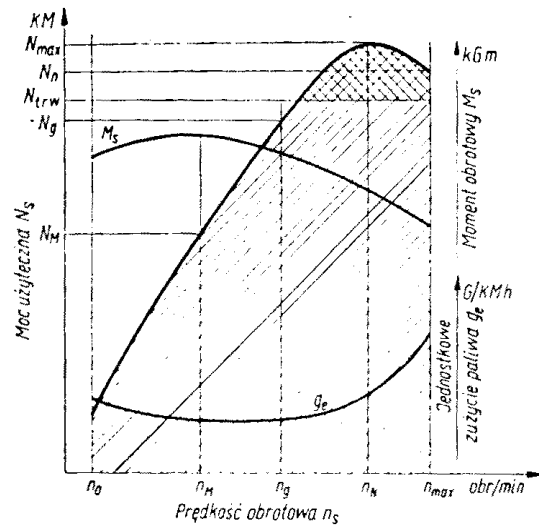
Silnik elektryczny może być przeciążany momentem nawet trzy razy, przeciążenia te nie mogą spowodować przegrzania izolacji, a zatem ich czas musi być uzależniony od temperatury uzwojenia.

Ocenia się, że odzyskanie energii hamowania i jej ponowne wykorzystanie przy ruszaniu autobusu pozwoli zmniejszyć zużycie paliwa przy jeździe w mieście o około 30% [6]. Elektryczne hamowanie pojazdu podczas którego zachodzi odzysk energii pozwoli ponadto na oszczędności eksploatacyjne wynikające ze zmniejszenia zużycia okładzin, tarcz i bębnow hamulcowych pojazdu.

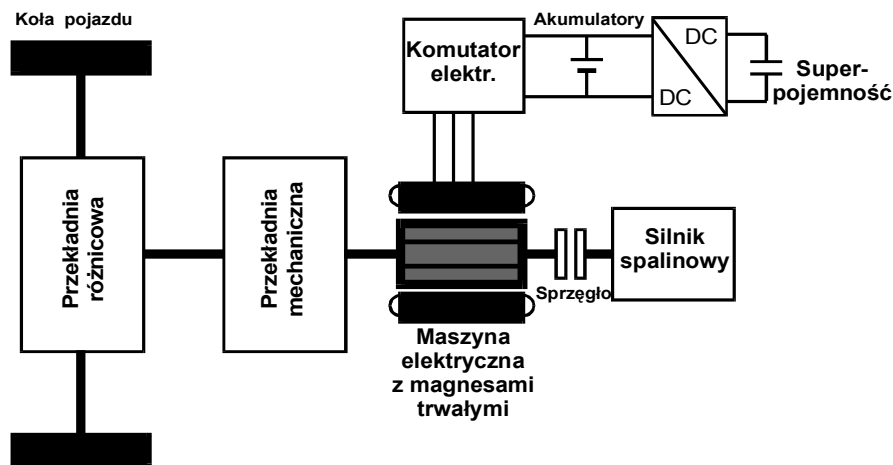
W pojeździe hybrydowym przy ruszaniu pojazdu (prędkość jest mała), podczas przyspie-

szania oraz jazdy z dużym obciążeniem, silnik spalinowy powinien pracować przy obciążeniu ekonomicznym. Praca silnika spalinowego z obciążeniem w zakresie mocy (0,5 – 1) tzw. mocy ekonomicznej jest korzystna ze względu na występującą wtedy maksymalną sprawność procesów przetwarzania energii i minimalne jednostkowe zużycie paliwa. Przykładowy przebieg charakterystyki eksploatacyjnej silnika spalinowego pokazano na rysunku 6 [3]. Potrzebny większy moment napędowy dostarcza silnik elektryczny, który może być przeciążony [5]. Umożliwia to pracę silnika spalinowego bez emitowania cząstek sadzy, co jest dodatkowym efektem ekologicznym. Przeprowadzono wstępne analizy i obliczenia, które pozwoliły na wybór koncepcji rozwiązania hybrydowego systemu przetwarzania i sterowania przepływem energii dla autobusu miejskiego o napędzie spalinowo-elektrycznym. Według autorów będzie on posiadać tradycyjny silnik wysokoprężny, lecz o zmniejszonej mocy o około 30-40% względem obecnie zainstalowanego. Silnik elektryczny będzie miał moc znamionową około 20% mocy obecnego silnika spalinowego. Schemat proponowanego napędu hybrydowego autobusu pokazano na rysunku 7, natomiast na rysunku 8 pokazano schemat elektryczny takiego układu wspomagania napędu. Silnik spalinowy w chwilach przyspieszania i zwiększonego zapotrzebowania na moc byłby wspomagany przez silnik elektryczny z magnesami trwałymi [2], [14]. Podczas hamownia pojazdu, jazdy z mocą mniejszą od mocy zadanego cyklu, podczas pracy na biegu

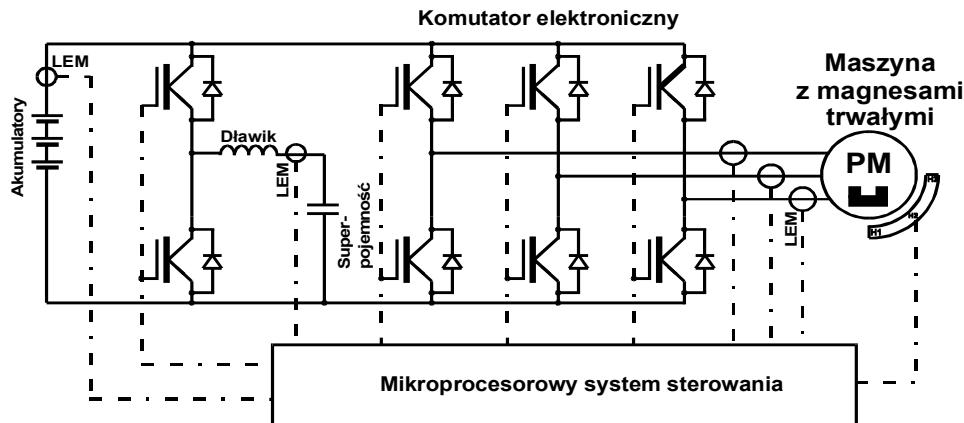
jałowym silnika spalinowego, oraz w czasie postoju, maszyna elektryczna pracowałaby jako prądnica oddając energię elektryczną do zasobnika.



Rys.6. Charakterystyka eksploatacyjna silnika.  $N_{max}$  – moc maksymalna silnika,  $N_n$  – największa możliwa do uzyskania moc silnika,  $N_{trw}$  – największa moc jaką silnik może rozwijać trwale,  $N_g$  – moc ekonomiczna, odpowiada najmniejszemu jednostkowemu zużyciu paliwa,  $N_M$  – moc odpowiadająca największemu momentowi obrotowemu rozwijanemu przez silnik,  $n_0$  – prędkość biegu jałowego,  $n_M$  – prędkość obrotowa przy której silnik rozwija największy moment obrotowy,  $n_g$  – prędkość obrotowa przy której występuje najmniejsze jednostkowe zużycie paliwa,  $n_N$  – prędkość obrotowa przy której silnik rozwija swoją maksymalną moc,  $n_{max}$  – największa możliwa prędkość obrotowa osiągnięta przez silnik



Rys.7. Schemat blokowy napędu hybrydowego autobusu



Rys.8. Schemat elektryczny układu wspomagania napędu

## 6. Wnioski

Autobus z napędem spalinowo-elektrycznym (hybrydowym) jest najbardziej ekonomiczny w eksploatacji w warunkach miejskich, ma mniejsze zużycie paliwa o około 30%, jest bardziej ekologiczny i trwalszy w eksploatacji od autobusu z napędem spalinowym. Maszyna elektryczna umożliwia odzysk energii hamowania autobusu, a bateria akumulatorów i superkondensatory jej czasowe magazynowanie. Maszyna elektryczna wspomaga silnik spalinowy, wykorzystując zmagazynowaną energię, w czasie gdy zapotrzebowanie na moc jest duże, to jest przy ruszaniu i przyspieszaniu autobusu. Zastosowanie dwóch współpracujących zasobników energii: akumulatorów i baterii superkondensatorów umożliwia w pełni wykorzystać możliwości napędu hybrydowego. Krótki czas oraz stosunkowo duża częstotliwość zmian kierunku przepływu energii elektrycznej podczas rozpędzania i hamowania autobusu wymusza konieczność szybkiego ładowania i rozładowywania źródła energii. W przypadku superkondensatorów mogą one być naładowane i rozładowane w ciągu kilku sekund bez narażenia ich na zniszczenie, co jest ich wielką zaletą w porównaniu z tradycyjnymi akumulatorami. Zastosowanie układu energoelektronicznego z mikroprocesorowym układem sterowania umożliwia optymalne zarządzanie przepływem energii między maszyną elektryczną, akumulatorami i baterią superkondensatorów.

## Literatura

- [1]. Auto Technika Motoryzacyjna, nr 574, 575, 576, rok 2005/2006
- [2]. Dixon J. W., Ortuzar M.E.: *Supercapacitors +DC-DC converters in regenerative braking system*. IEEE AESS Systems Magazine, 2002
- [3]. Dębicki M.: *Teoria samochodu, teoria napędu*. WNT, Warszawa
- [4]. Epcos Dane katalogowe kondensatorów Ultra-Cap
- [5]. Glinka T., Fręchowicz A.: *Brushless DC Motor Operating in Constant Power Range*. ICEM 2002 15 th International Conference on Electrical Machines Brugge, Belgium, 2002,
- [6]. Grzenik R., Kałuża E.: *Możliwości wykorzystania hamowania rekuperacyjnego w celu zwiększenia efektywności użytkowania energii w infrastrukturze transportu miejskiego*. Materiały Konferencyjne X Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2002, Zakopane, 2002,
- [7]. Janiszewski T., Mavrantzas S.: *Elektroniczne układy wtryskowe silników wysokoprężnych*. WKŁ, Warszawa 2001
- [8]. Jeong Jin-uk, Lee Hyeoun-dong, Kim Chul-soo, Choi Hang-Seok, Cho Bo-Hyung.: *A Development of an Energy Storage System for Hybrid Electric Vehicles Using Supercapacitors*. EVS'19, Busan, Korea, 2002
- [9]. Lang M.: *Zukunftskonzepte für das Auto*. VEO – Journal, nr 7-8, 1996
- [10]. Nowoczesny Warsztat, nr 82, rok 2005
- [11]. Ortuzar M., Dixon J., Moreno J.: *Design, Construction and Performance of a Buck-Boost Converter for Supercapacitors – Based Auxiliary Energy System for Electric Vehicles*. IEEE IEC, Virginia, USA, 2003
- [12]. Setlak R.: *Rozwiązania napędów pojazdów hybrydowych*. Seminarium Sekcji Trakcji Elektrycznej Komitetu Elektrotechniki PAN, Katowice 20.02.2002
- [13]. Setlak R.: *Stanowisko badawcze – samochód elektryczny i hybrydowy*. Śląskie Wiadomości Elektryczne, Nr 2/2003
- [14]. Simoes M.G., Vieira P. Jr.: *A High-Torque Low-Speed Multiphase Brushless Machine. A Perspective Application for Electric Vehicles*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, No. 5, October 2002
- [15]. Szumanowski A.: *Akumulacja energii w pojazdach*. WKŁ, Warszawa, 1984