

**Marcin FICE, Rafał SETLAK**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, ZAKŁAD INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ W TRANSPORCIE

**Hybrydowy autobus miejski z podwójnym zasobnikiem energii**

Dr inż. Rafał SETLAK

Adiunkt w Zakładzie Inżynierii Elektrycznej w Transporcie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Prowadzi prace badawcze nad elektrycznymi napędami 4WD w pojazdach specjalnych, energooszczędny napędami pojazdów trakcyjnych oraz samochodami elektrycznymi i hybrydowymi.



e-mail: rafal.setlak@polsl.pl

Mgr inż. Marcin FICE

Doktorant w Zakładzie Inżynierii Elektrycznej w Transporcie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Uczestniczy w pracach badawczych związanych z hybrydowymi układami napędowymi samochodów miejskich, energoelektrycznymi układami sterowania i zasilania napędów elektrycznych oraz diagnostyką układów elektrycznych i elektronicznych samochodów.



e-mail: marcin.fice@polsl.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono nowatorski system napędu hybrydowego autobusu miejskiego. Proponowany napęd składa się z silnika spalinowego, maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi, baterii akumulatorów i superkondensatorów. Napęd ten pozwoli na odzyskiwanie energii podczas hamowania i wykorzystania jej podczas ruszania i przyspieszania. Zastosowanie superkondensatorów pozwala na zwiększenie sprawności magazynowania energii kinetycznej pojazdu.

**Słowa kluczowe:** napęd hybrydowy, akumulator, superkondensator, maszyna elektryczna, magnes trwały, silnik spalinowy.

**Hybrid city bus with dual energy storage****Abstract**

This paper presents an alternative solution of the electric hybrid drives for a city bus. 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 syste.

**Keywords:** hybrid drive, battery, supercapacitor, electric machine, permanent magnet, internal combustion engine.

**1. Wstęp**

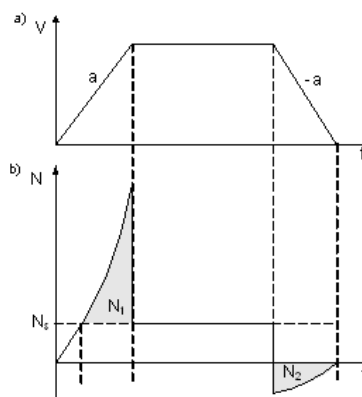
Głównym celem stosowania napędu hybrydowego, czyli połączenia napędu spalinowego oraz elektrycznego, jest możliwość odzyskiwania energii hamowania i jej późniejsze wykorzystanie podczas ruszania i przyspieszania. Omawiany napęd hybrydowy pozwala na znaczne obniżenie zużycia paliwa oraz co się z tym wiąże także zanieczyszczenia spalinami.

Poważnym problemem wprowadzenia napędu hybrydowego, spalinowo-elektrycznego, do produkcji masowej jest jego cena. Obserwując rynek motoryzacyjny można dojść do wniosku, iż niewielu producentów samochodów wprowadza na rynek pojazdy wyposażone w tego typu napęd. Wiele projektów nie wyszło poza fazy testów. Faktem jest, że napęd taki sprawdza się jedynie w warunkach aglomeracji miejskiej gdzie pojazd samochodowy wykonuje dużo manewrów przyspieszania i hamowania.

Typowym przykładem pojazdu pracującego w cyklu przyspieszanie – hamowanie jest autobus jeżdżący w miejskiej sieci komunikacyjnej. Ruch autobusu miejskiego można podzielić na kilka faz:

- ruszanie,
- przyspieszanie,
- jazda ze stałą prędkością,
- hamowanie.

Przykładowy cykl jazdy zawierający wyżej wymienione fazy został umieszczony na rys. 1.



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

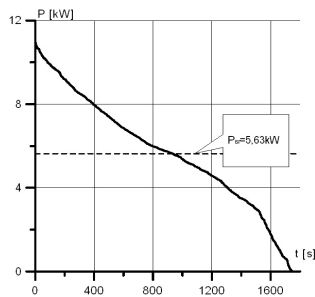
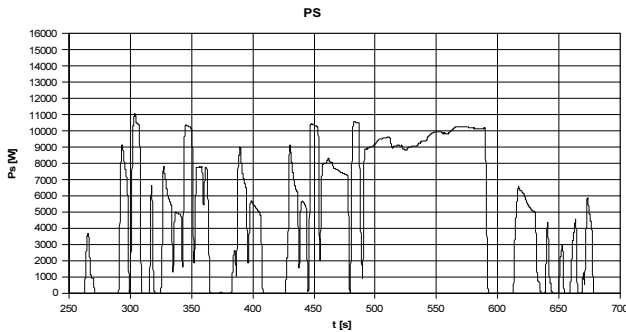
Fig. 1. Drive cycle example: a) velocity, b) power demand.  $N_s$  – average power during drive with constant speed,  $N_1$  – power demand during acceleration,  $N_2$  – power losses during braking cycle in the form of heat

Poruszanie się autobusu w terenie miejskim wymusza częste hamowania, ruszania i przyspieszania. Warunki miejskie praktycznie nie dopuszczają do poruszania się pojazdem samochodowym ze stałą prędkością. Przy ruszaniu z miejsca i podczas przyspieszania zapotrzebowanie na moc silnika jest znacznie większe niż podczas jazdy ze stałą prędkością (rys. 1b). Moc ta potrzebna jest nie tylko na pokonanie oporów ruchu ale także na zwiększenie energii kinetycznej pojazdu na płaskim odcinku drogi oraz energii potencjalnej podczas podjazdu pod górę. Natomiast podczas hamowania energia ta jest bezpowrotnie tracona w postaci ciepła wydzielanego w hamulcach ciernych pojazdu. Wykorzystanie hamowania odzyskowego w postaci magazynowania energii elektrycznej i późniejsze jej wykorzystanie do ruszania i przyspieszania jest ideą połączenia napędów spalinowego i elektrycznego

**2. Badania eksploatacyjne****2.1. Badania na pojeździe elektrycznym**

Przeprowadzone badania na pojeździe elektrycznym pozwoliły zarejestrować przebieg zapotrzebowania na moc w funkcji czasu podczas jazdy na trasie autobusu miejskiego. Pojazdem tym był samochód marki Wartburg wyposażony w szeregowy silnik elektryczny prądu stałego 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 samocho-

dzie tym istnieje możliwość pomiaru mocy pobieranej przez silnik elektryczny z baterii akumulatorów. Przykładowy fragment przebiegu mocy podczas jazdy testowej przedstawiono na rys. 2. Hamowanie pojazdu wykonywane było hamulcami mechanicznymi bez odzyskiwania energii elektrycznej.



Rys. 2. Fragment cyklu jazdy pojazdu elektrycznego – 450s oraz uporządkowany przebieg mocy

Fig. 2. Fragment of electric vehicle test dive cycle – 450 and power arrange in time order

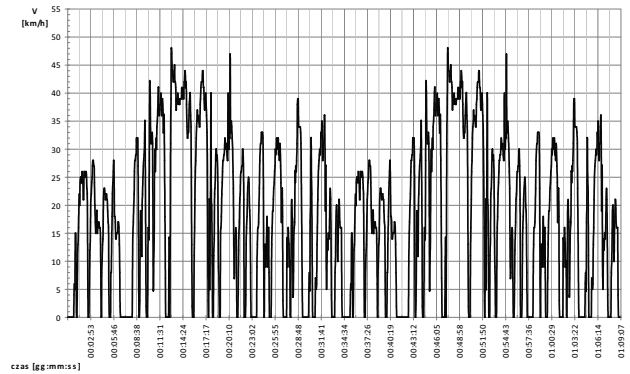
Uśrednienie przebiegu mocy z jazdy która trwała 1800 s pozwoliło wykreślić tzw. uporządkowany wykres mocy (rys. 2). Moc uporządkowana pokazuje czas poboru określonego poziomu mocy podczas jazdy. Na wykresie pokazano także obliczoną moc średnią realizowanego cyklu jazdy -  $P_{\text{sr}} = 5,63 \text{ kW}$ . Moc szczytowa cyklu wyniosła  $P_{\text{max}} = 14,43 \text{ kW}$ , zapotrzebowanie na taką moc trwało tylko jedną sekundę [3].

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 [2].

## 2.2. Pomiar cyklu jazdy autobusu miejskiego

Wyznaczenie teoretycznej energii i mocy danego cyklu jeźdźnego rzeczywistego autobusu możliwe było po przeprowadzeniu pomiarów i rejestracji prędkości pojazdu na rzeczywistej trasie autobusu miejskiego. Do pomiarów wybrano autobus linii 57 poruszający się na trasie Gliwice – Brzezinka, Zabrze – os. Helenka. Długość trasy wynosi 30 km, a czas w jakim autobus pokonał trasę wynosi 70 min. Na rys. 3 przedstawiony został przebieg prędkości w funkcji czasu przejazdu.

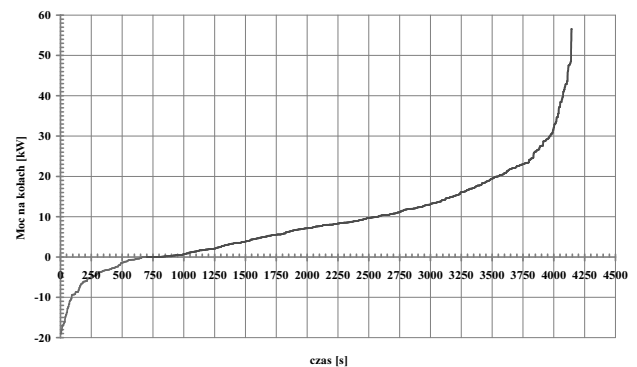
Na podstawie danych prędkości zarejestrowanych podczas jazdy na trasie oraz znanych oporów ruchu autobusu można było oszacować teoretyczne zapotrzebowanie na moc oraz zużycie energii. Do obliczeń oszacowano sprawność przepływu energii 0,85.



Rys. 3. Wykres prędkości w czasie autobusu KZK GOP linii 57 w ciągu cyklu jeźdźnego

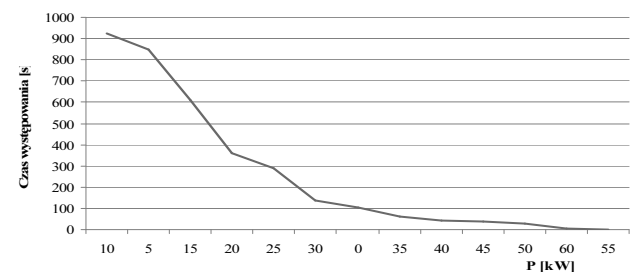
Fig. 3. Diagram of velocity as function of time for bus nr 57 during drive cycle

Na rysunku 4 przedstawiono uporządkowany wykres mocy oraz częstość występowania zadanych poziomów mocy. Średnie obliczone zapotrzebowanie na moc trasy autobus wynosi 21 kW, maksymalna obliczona moc trasy wynosi 60 kW, Zapotrzebowanie na moc maksymalną w czasie jazdy na trasie trwało ok. 6 sekund. Zużyta obliczona energia na trasie autobusu wynosi 24,5 kWh [1].



Rys. 4. Uporządkowany przebieg mocy przejazdu na trasie autobusu oraz częstość występowania danej wartości mocy na trasie przejazdu autobusu

Fig. 4. Power demand arrange in time order of drive cycle and occurrence of given power value frequency on drive cycle



## 3. Akumulatory i superkondensatory

Do magazynowania energii elektrycznej w pojazdach spalino-elektrycznych obecnie stosuje się akumulatory. Doświadczenia prowadzone przez autorów oraz inne ośrodki [4] wykazały,

że napęd samochodu składającego się z silnika spalinowego, maszyny elektrycznej i baterii akumulatorów nie spełnia swojego zadania. Niska gęstość mocy, brak możliwości pobierania i wydawania dużych wartości chwilowych prądów bez utraty sprawno-

ści, duża masa oraz mała liczba cykli ładowanie-rozładowanie [5] są niekorzystnymi czynnikami w przypadku akumulatorów ołowiowych. W pojeździe elektrycznym zbudowanym na Politechnice Śląskiej zastosowano akumulatory kwasowo-ołowiowe do zastosowań trakcyjnych typu 8A180. Masa baterii zastosowanych akumulatorów o napięciu UN = 84V i pojemności Q5 = 180 Ah wynosi 420 kg. Średni promień dojazdu w warunkach miejskich wynosi ok. 30 km.

Producenci pojazdów napędzanych hybrydowo stosują nowocześniejsze typy akumulatorów jakimi są akumulatory litowo-jonowe. Jednak akumulatory te posiadają o wiele niższy stosunek mocy do ceny. Nie rozwiązuje to także dużej masy akumulatorów oraz wrażliwości ogni na pobór oraz oddawanie dużych wartości prądów. W Polsce dostępne są w sprzedaży trzy modele osobowych pojazdów hybrydowych producentów Japońskich wykorzystujące akumulatory Litowo-Jonowe (Li-Ion).

Poprawę parametrów pojazdu o napędzie hybrydowym 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 [6, 7]. W takim przypadku można zastąpić część ciężkich akumulatorów baterią superkondensatorów.

Przykładowa bateria superkondensatorów dostępna na rynku o pojemności 58F i napięciu 15 V posiada gęstość energii  $q_{en} = 3,63 \text{ Wh/kg}$ , a gęstość mocy  $p_w = 3 \text{ kW/kg}$ . Trwałość modułu wynosi 500 000 cykli, a masa 0,5 kg [8] (rys. 7). Zaletą superkondensatorów jest fakt, że są zdolne do przyjmowania i wydawania prądów o wartości do 800 A bez utraty trwałości. W tradycyjnych akumulatorach kwasowo-ołowiowych nie ma możliwości przyjmowania dużych mocy hamowania pojazdu bez znaczącego obniżenia żywotności.

Całkowite wyeliminowanie tradycyjnych akumulatorów z proponowanego napędu hybrydowego nie jest możliwe, jedynie sensowne jest zastosowanie obu, pracujących równolegle, zasobników energii elektrycznej. Superkondensatory mają zastosowanie tam, gdzie potrzebny jest duży wydatek mocy w krótkim przedziale czasu (np. podczas ruszania i początkowego przyspieszania autobusem) oraz szybkie magazynowanie dużych ilości energii przy przepływie dużych wartości prądów (hamowanie elektryczne). Akumulatory mają wówczas za zadanie jedynie dostarczanie energii elektrycznej podczas rozruchu silnika lub podczas manewrów z małymi prędkościami bez konieczności uruchamiania silnika spalinowego. Energia z akumulatorów pobierana jest także podczas wspomaganie silnika spalinowego przez maszynę elektryczną podczas długotrwałego zapotrzebowania na zwiększoną moc silnika spalinowego (np. jazda pod górę) oraz podczas doładowywania kondensatorów.

Tab. 1. Porównanie parametrów akumulatorów i superkondensatorów [14]

Tab. 1. Comparison between parameters of batteries and supercapacitors [14]

	Ołowiowy Pb-PbO <sub>2</sub>	Superkondensatory
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% wyladowania]	do 1500	500 000

#### 4. Dobór pojemności superkondensatorów do autobusu

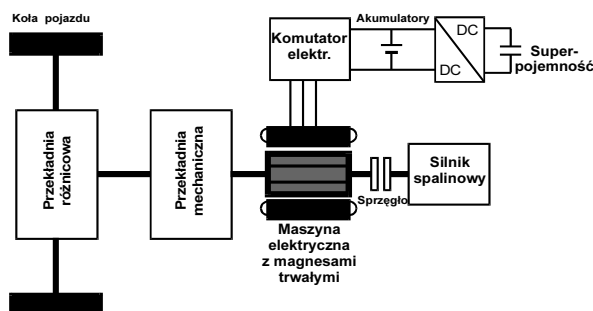
W projekcie założono, że energia zgromadzona w kondensatorowym zasobniku energii elektrycznej powinna pozwolić na rozpędzenie autobusu do prędkości 40 km/h. Obliczeń dokonano dla autobusu Jelcz PR110, którego dopuszczalna masa całkowita wynosi 17 ton [1]. Energia potrzebna na przyspieszenie autobusu do prędkości 40 km/h w czasie 9,5 s wynosi 1300 kJ co daje 0,361

kWh. Zakładając napięcie baterii kondensatorów 120 V pojemność takiej baterii wynosi 218 F. Masa baterii superkondensatorów o pojemności 218 F i napięciu 120 V złożona z ogni 58F/15V wynosi 136 kg. Pojemność ta została wyznaczona z zależności:

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (1)$$

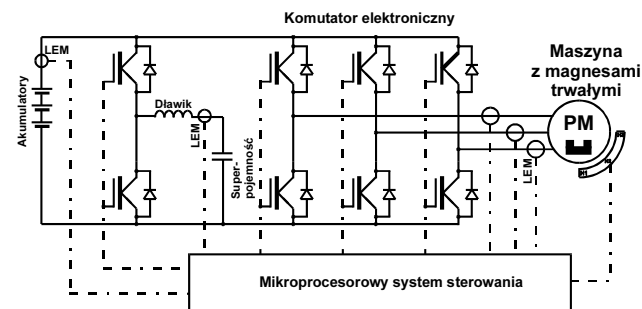
#### 5. Napęd hybrydowy - spalinowo-elektryczny

Schematy blokowy i elektryczny proponowanego napędu hybrydowego przedstawione zostały na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Napęd hybrydowy, spalinowo-elektryczny

Fig. 5. Hybrid electric drive



Rys. 6. Schemat elektryczny układu zasilania silnika typu brushless

Fig. 6. Scheme of DC brushless motor supply system

Napęd hybrydowy, spalinowo-elektryczny, daje możliwości oszczędności paliwa oraz korzyści ekologiczne, a także zmniejszenie zużycia takich materiałów jak okładziny, bębny i tarcze hamulcowe. Zainstalowanie maszyny elektrycznej obok silnika spalinowego pozwoli na:

- odzyskiwanie energii hamowania podczas zwalniania i jazdy ze wzniesienia. Maszyna elektryczna podczas zmniejszania prędkości pracować będzie jako prądnica oddając energię do zasobników (akumulatorów i superkondensatorów),
- wspomaganie silnika spalinowego w nieekonomicznych zakresach pracy, czyli podczas dużych obciążeń (jazda pod górę), podczas ruszania i przyspieszania. Maszyna elektryczna pracuje wówczas jako silnik pobierając energię elektryczną z zasobników,
- możliwość uruchamiania silnika spalinowego przez maszynę elektryczną (można zrezygnować z rozrusznika),
- zmniejszenie mocy silnika spalinowego o 40% względem istniejącego, ponieważ suma mocy silnika spalinowego i elektrycznego pozostanie taka sama.

Zastosowanie maszyny elektrycznej prądu stałego z magnesami trwałymi umożliwi wykorzystanie maszyny o mocy ok. 20% mocy silnika spalinowego, ponieważ maszyna elektryczna może być krótkotrwale przeciążana momentem nawet trzykrotnie [9]. Ocenia się, że odzysk energii hamowania, oraz zmniejszenie wielkości silnika spalinowego pozwoli zmniejszyć zużycie paliwa

o ok. 30% [10]. Maszyna elektryczna umożliwia pracę silnika w ekonomicznym zakresie pracy przy najmniejszym jednostkowym zużyciu paliwa. Jazda z mocą mniejszą niż moc zadanego cyklu, podczas jazdy ze wzniesienia lub praca silnika na biegu jałowym pozwoli na doładowywanie podczas jazdy akumulatorów i superkondensatorów. Hamowanie elektryczne zmniejszy także zużycie elementów hamulców mechanicznych, ponieważ silnik elektryczny przejmie ok. 70% mocy hamowania.

Zastosowanie nowoczesnego mikroprocesorowego systemu zarządzania przepływem energii pomiędzy maszyną elektryczną i zasobnikami energii pozwoli na zwiększenie sprawności całego układu napędowego i zmniejszy emisję zanieczyszczeń do atmosfery.

## 6. Zakończenie

Zastosowanie w zasobniku energii elektrycznej akumulatorów i superkondensatorów pozwoli na zwiększenie sprawności wykorzystania energii hamowania, ponieważ superkondensatory pozwalają na pobieranie dużych wartości prądu w bardzo krótkim czasie. Krótki czas i stosunkowo duża częstotliwość cykli hamowanie-przyspieszanie wymusza częste zmiany przepływu energii elektrycznej i co się z tym wiąże częste cykle ładowania-rozładowania źródła energii. Akumulatory ołowiowe nie są w stanie przyjąć takich ilości energii w tak krótkim czasie bez znacznego obniżenia trwałości, tak więc superkondensatory doskonale uzupełniają się wraz z akumulatorami jako zasobnik energii elektrycznej. Zmagazynowana energia elektryczna jest następnie wykorzystywana podczas rozruchu i przyspieszania. W tej fazie jazdy maszyna elektryczna pobierając energię z zasobników wspomaga silnik spalinowy przez co nie musi on pracować w nieekonomicznym zakresie pracy i zużywa znacznie mniej paliwa oraz zmniejsza się emisja szkodliwych substancji do atmosfery.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy N510 054 31/3358 oraz projekt badawczy promotorski N501 0089 33

## 7. Literatura

- [1] J. Dygoń: „Stanowisko laboratoryjne hybrydowego układu napędowego pojazdu samochodowego” Praca Dyplomowa Magisterska, Gliwice 2007
- [2] Z. Kneba, S. Makowski: „Zasilanie i sterowanie silników” Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004
- [3] R. Setlak: „Stanowisko badawcze –samochód elektryczny i hybrydowy” Śląskie Wiadomości Elektryczne, Nr 2/2003
- [4] R. Setlak: „Rozwiązania napędów pojazdów hybrydowych” Seminarium Sekcji Trakcji Elektrycznej Komitetu Elektrotechniki PAN, Katowice 20.02.2002
- [5] J. Jeong, H. Lee, Ch. Kim, H. Choi: “A Development of an Energy Storage System for Hybrid Electric Vehicles Using Supercapacitors” EVS’19, Busan, Korea, 2002
- [6] J. Dixon, M. Ortuazar: “Supercapacitors + DC-DC converters in regenerative braking system” IEEE AESS Systems Magazine, 2002
- [7] M. Ortuazar, J. Dixon, J. Moreno: “Design, Construction and Performance of a Buck-Boost Converter for Supercapacitors – Based Auxiliary Energy System for Electric Vehicles” IEEE IEC, Virginia, USA, 2003
- [8] Maxwell: Dane katalogowe kondensatorów Maxwell Technologies BPAK0058-15V Ultracapacitors, www.maxwell.com
- [9] T. Glinka, A. Fręchowicz: “Brushless DC Motor Operating in Constant Power Range” ICEM 2002 15 th International Conference on Electrical Machines Brugge, Belgium, 2002
- [10] R. Grzenik, E. Kałuża: „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

Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Najnowsza książka Wydawnictwa PAK



założenia polityki krajów UE oraz strategii energetycznej Polski wobec OZE.

Na przełomie sierpnia i września ukazała się kolejna książka Wydawnictwa PAK autorstwa Tomasza Boczara pt.: Energia wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania.

W niniejszej książce przedstawiono aktualne możliwości wykorzystania energii wiatru do produkcji energii elektrycznej na obszarze Europy, ze szczególnym uwzględnieniem potencjalnych zasobów i stopnia ich wykorzystania na terenie Polski, a także województwa opolskiego. Ponadto scharakteryzowano podstawowe

Książka skierowana jest przede wszystkim do studentów oraz wykładowców prowadzących zajęcia dydaktyczne na kierunkach elektrycznych, jak również związanych z inżynierią i ochroną środowiska. Opisane zagadnienia mogą stanowić materiał dydaktyczny związany z aktualnymi możliwościami oraz przyszłymi kierunkami w pozyskiwaniu energii wiatru do produkcji energii elektrycznej.

#### Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK  
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,  
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK  
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,  
tel./fax: 032 237 19 45, e-mail: [wydawnictwo@pak.info.pl](mailto:wydawnictwo@pak.info.pl)