MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
4-M/2012
ZESZYT 9
ROK 109
ISSUE 9
YEAR 109

JERZY MERKISZ, MACIEJ BAJERLEIN, PAWEŁ DASZKIEWICZ*

NOWOCZESNE ROZWIĄZANIA TECHNICZNE AKUMULATORÓW STOSOWANYCH W MIEJSKICH AUTOBUSACH ELEKTRYCZNYCH JAKO FORMA ZWIĘKSZENIA ZASIĘGU

MODERN BATTERY TECHNOLOGY USED IN URBAN BUSES AS A FORM OF INCREASING THE ELECTRIC RANGE

Streszczenie

Naukowcy z Instytut Silników Spalinowych i Transportu przeprowadzili badania dotyczące dostępnych rozwiązań wykorzystywanych przy projektowaniu i budowie autobusu w pełni elektrycznego. Analiza wymagała pozyskania wiedzy na temat właściwości użytkowych i funkcjonalnych poszczególnych elementów. Istniała także konieczność wykonania analizy założonych parametrów funkcjonalnych poszczególnych układów. Na podstawie porównań dokonano wyboru komponentów, które zostaną poddane badaniom funkcjonalnym. Weryfikacja taka pozwoliła na uzyskanie wiedzy na temat rzeczywistych parametrów komponentów wykorzystanych do budowy układu napędowego pojazdu. Jednym z najważniejszych etapów jest dobór akumulatorów energii, o których mowa w artykule.

Słowa kluczowe: akumulacja energii, autobus elektryczny, napęd pojazdu, sprawność energetyczna

Abstract

Researchers at the Institute for Combustion Engines and Transport conducted a survey of available solutions used in the design and construction of a fully electric bus. The analysis required to obtain knowledge about the performance and functional parts. There was also a need to analyze the assumed functional parameters of individual systems. On the basis of comparisons made was the choice of components to be tested functionally. This review allowed us to gain knowledge about the actual parameters of components used to build the propulsion of the vehicle. One of the most important steps is the selection of energy storage as referred to in the article.

Keywords: energy storage, electric bus, vehicle power, energy efficiency

* Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz, dr inż. Maciej Bajerlein, mgr inż. Paweł Daszkiewicz, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska.

1. Wstęp

Warunki pracy układów napędowych pojazdów poruszających się w obszarach współczesnych aglomeracji miejskich oraz poza miastami są zasadniczo różne. W miastach pojazdy bardzo często ruszają i zatrzymują się. Często fazę ruszania i hamowania oddziela faza postoju pojazdu. Częstotliwość pojawiania się wymienionych faz jest duża, a jej wartość zależy od pory dnia, przepustowości tras komunikacyjnych itp. W tych warunkach w klasycznym napędzie pojazdu silnik cieplny pracuje w znacznym zakresie zmian mocy, prędkości kątowej i sprawności. Ogólną sprawność energetyczną klasycznego napędu pogarsza nieodwracalna zamiana energii kinetycznej pojazdu na ciepło podczas częstych hamowań. Ruch międzymiastowy natomiast charakteryzuje względnie stabilna praca układu napędowego. Na autostradach ruch pojazdów ze stałą prędkością odbywa się przez długie okresy. Tak znaczne zróżnicowanie warunków ruchu miejskiego i autostradowego uniemożliwia wysokosprawną pracę tego samego układu napędowego. W latach siedemdziesiątych pojawiła się koncepcja budowy pojazdów przeznaczonych wyłącznie do ruchu miejskiego lub pojazdów wyposażonych w alternatywnie działający układ napędowy. Słuszność jej uzasadnia ponadto fakt, że ilościowy udział ruchu miejskiego w ogólnym bilansie ruchu jest przeważający. Na podstawie cykli jazdy można wyznaczyć, jaka część energii wytworzonej w czasie ruchu pojazdu może być akumulowana. W przypadku idealnej rekuperacji cała energia hamowania, wyłączając jedynie straty na opory powietrza i opory toczenia, może być akumulowana w zakresie od prędkości początkowej do końcowej ruchu opóźnionego [27]. Naturalne warunki ruchu miejskiego skłaniają do akumulacji energii w dwóch przypadkach: rekuperacji energii kinetycznej pojazdu podczas hamowania oraz przejmowania nadmiaru chwilowej mocy silnika nad chwilową mocą na kołach niezbędną do napędu pojazdu. Obydwa przypadki mogą występować jednocześnie lub oddzielnie. Ze względu na sposób akumulacji energii w układach hybrydowych przewiduje się trzy podstawowe rodzaje akumulatorów: kinetyczne (mechaniczne), hydropneumatyczne i elektrochemiczne (tab. 1). Każdy z tych akumulatorów wymaga współpracy z odpowiednim układem przesyłania oraz transformacji energii. Sprawności tych układów nie są jednakowe i obciążają cały układ swymi stratami [6].

Tabela 1

Wartość opałowa paliw [1]

Właściwości	Akumulator		
	kinetyczny	hydropneumatyczny	elektrochemiczny
Gęstość energii [kJ/kg]	3–10 (360)	0,9–3,2	72–400
Gęstość mocy [W/kg]	bez ograniczeń	300	100–160
Sprawność magazynowania:			
okres krótki	dobry	dobry	doskonały
okres długi	bardzo zły	dobry	średni
Sprawność przemiany	dobry	zły	zły
Okres użytkowania	doskonały	doskonały	bardzo zły
Dopuszczalne przeciążenia	dobry	dobry	bardzo zły
Niezawodność	dobry	dobry	zły
Brak konieczności konserwacji	dobry	dobry	zły
Łączny koszt	niski	wysoki	bardzo wysoki

2. Zadania oraz podział akumulatorów

2.1. Akumulatory mechaniczne

Akumulatory mechaniczne (kinetyczne) to inercyjne (żyroskopowe) akumulatory energii. Inercyjnym akumulatorem energii nazwano bezwładnościowy akumulator, którego element inercyjny (bezwładnik) wykonuje w stanie naładowania ruch obrotowy. Konstrukcja bezwładnika jest bardziej złożona niż konstrukcja koła zamachowego, które charakteryzuje się mniejszą gęstością energii. W celu zwiększenia gęstości energii akumulator inercyjny ma specjalnie wykonaną obudowę, ułożyskowanie i urządzenia pomocnicze mające na celu zmniejszenie strat energii. Na efektywną akumulację energii w ruchu obrotowym wpływa wiele czynników związanych z kształtem, rozkładem masy, naprężeniami maksymalnymi i oporami aerodynamicznymi.

Energię zawartą w akumulatorze kinetycznym można wyrazić wzorem:

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot J_A \cdot \omega^2 \tag{1}$$

gdzie:

J_A – masowy moment bezwładności [kg·m^2],

ω – prędkość kątowa [rad/s].

Jak wynika z powyższego, w akumulacji dużej ilości energii bardziej istotne zadanie spełnia prędkość kątowa ω niż masa bezwładnika m, stanowiąca składnik momentu bezwładności. Przykładowo dla bezwładnika w kształcie płaskiego krążka masowy moment bezwładności jest wyrażony:

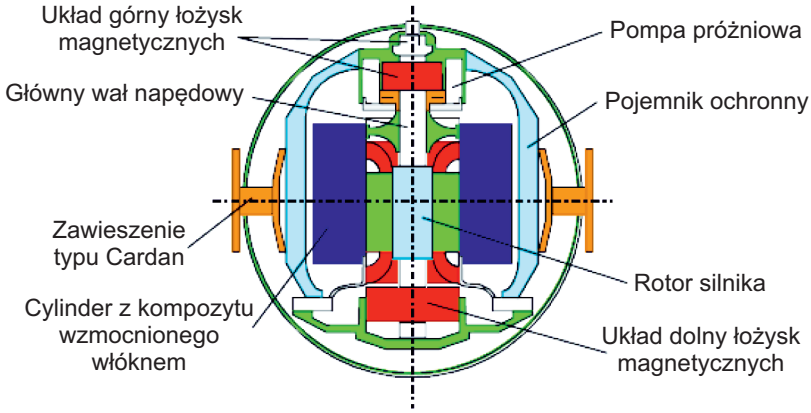
$$J_A = \frac{1}{2} \cdot J_A \cdot m \cdot r^2 \tag{2}$$

gdzie:

r^2 – promień krążka.

Maksymalna wartość prędkości kątowej jest ograniczona odpowiednią wytrzymałością materiału. Do konstrukcji bezwładników coraz częściej wykorzystywane są kompozyty włókniste, które charakteryzuje wytrzymałość większa niż stali i dużo mniejszy od niej ciężar właściwy. Przykładem pojazdu hybrydowego wykorzystującego nietypowe rozwiązanie – koło zamachowe – jest turbinowo-żyroskopowe auto (rys. 1). Bezwładnik w tym zespole napędowym ma postać wirującego cylindra, wykonanego z kompozytu o wysokiej wytrzymałości, wzmocnionego włóknem węglowym. Zarówno turbina spalinowa (zamontowana w pojeździe), jak i akumulator kinetyczny są sprzężone z generatorami. Połączenie turbiny gazowej z generatorem jest nazywane turbogeneratorem. Turbogenerator napędza samochód podczas jazdy ze stałą prędkością i jednocześnie uzupełnia energię akumulatora. Energia kinetyczna akumulatora jest zużywana przy przyspieszaniu pojazdu, a podczas hamowania akumulator odzyskuje energię, która normalnie byłaby tracona w wyniku tarcia. Pierwotnym źródłem energii jest w pojeździe turbina spalinowa. Poziom emisji związków toksycznych spada niemal do zera, gdy zastosuje się dopalanie katalityczne. Prędkość obrotowa turbiny jest o rząd większa niż silników tłokowych. Przy budowie akumulatora kinetycznego użyto nowe rozwiązania konstrukcyjne, którymi są: łożyska magnetyczne oraz specjalna obudowa. Koło zamachowe zaprojektowane przez Rosen Motors składa się z tytanowej piasty i cylindra wykonanego z kompozytu wzmacnianego włóknem węglowym. Cylinder może wirować z prędkością 60 000 obr./min.

W celu zmniejszenia tarcia występującego przy takich prędkościach obrotowych koło jest zawieszone na magnetycznych łożyskach, zachowując jednocześnie na stałym poziomie (0,13 mm) luz między ruchomymi i nieruchomymi elementami urządzenia, nawet wtedy, gdy samochód przejeżdża po nierównej nawierzchni.



Rys. 1. Akumulator kinetyczny napędzający pojazd hybrydowy [7]

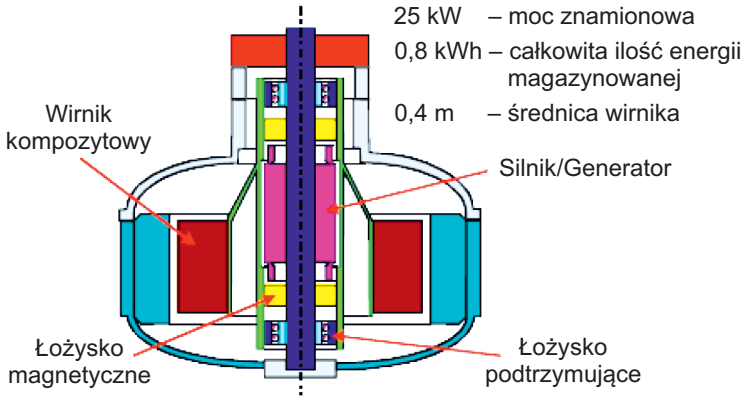
Fig. 1. Kinetic battery hybrid vehicle propulsion [7]

Aby czerpać energię z koła lub mu ją przekazywać, jest ono połączone z generatorem wałem sprzęgającym. Teoretycznie, siły żyroskopowe powstające na skutek wirowania koła zamachowego mogą powodować przeciążenie magnetycznych łożysk. Zapobiega temu system przegubów pierścieniowych, który izoluje wirujący cylinder od ruchów żyroskopowych pojazdu. Ponieważ opór powietrza spowalniałby koło zamachowe, a w wyniku tarcia wydzielałyby się spore ilości ciepła, do wypompowywania powietrza z przestrzeni wokół koła zamachowego niezbędna jest pompa próżniowa. Składa się ona z lekkiej pompy molekularnej i sita cząsteczkowego. Z powodu szczątkowego oporu aerodynamicznego i magnetycznego koło zamachowe traci jednak energię. Powinno ono cały czas wirować, nawet wtedy, gdy samochód jest zaparkowany, ponieważ to ono uruchamia turbinę gazową. Naukowcy pracują nad kołem, które będzie mogło wirować bez uzupełniania energii co najmniej przez kilka tygodni. W przypadku zatrzymania się koła dwa 12-woltowe akumulatory wprawią w ruch turbinę, która w ciągu dwóch minut rozpędzi koło ponownie.

Ze względów bezpieczeństwa każde szybko wirujące urządzenie – od ogromnych silników odrzutowych po małe koła zamachowe – musi być odpowiednio osłonięte. W przeciwnym razie, w wyniku awarii jego szczątki zostałyby rozrzucone ze znaczną siłą. Opracowano obudowę ze stali wzmocnionej kompozytami i włóknem węglowym. W razie kolizji obudowa pozostaje nienaruszona, ponieważ zaprojektowano ją tak, aby wytrzymała siłę uderzenia odłamków rozpadającego się koła zamachowego, dużo większą niż występująca podczas zderzenia. Obudowa jest przymocowana do pojazdu pasami wzmocnionymi kevlarem [7].

Ważną cechą kompozytowych wirników jest ich wytrzymałość zmęczeniowa. Kiedy nieruchome koło zamachowe z wieńcem kompozytowym jest rozpędzane, naprężenia, a więc i odkształcenia, są funkcją jego promienia. Kiedy koło zamachowe zatrzymuje się, odkształcenia zanikają. Cykliczne powtarzanie takich zmian może prowadzić do uszkodzenia zmę-

czeniowego wieńca. Oznacza to potrzebę rozważenia obudowy bezpieczeństwa wirnika wewnątrz właściwej obudowy na wypadek uszkodzenia. Stosowanie bezpiecznych obudów dla tak wysokich energii, jakie są zmagazynowane w wirującym z dużą prędkością kole zamachowym, może wymagać znacznej dodatkowej masy. Inne rozwiązanie akumulatora elektrokinetycznego przedstawia rys. 2 [1]. Koło zamachowe obraca się na pionowo umieszczonym wale, znajdującym się wewnątrz szczelnej obudowy. Wewnątrz utrzymuje się bardzo wysoką próżnię, w celu zmniejszenia oporów aerodynamicznych, hamujące wirnik akumulatora. Bezpośrednio na wale z kołem zamachowym zamocowany jest wirnik silnika/generatora.



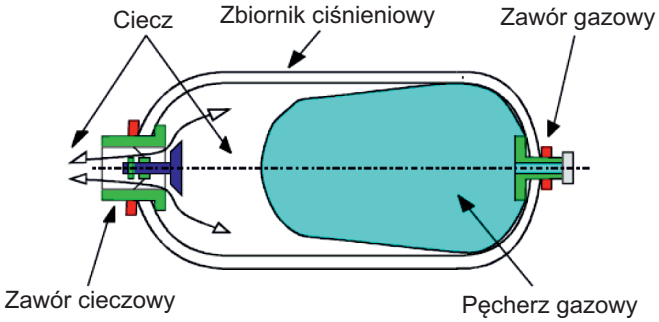
Rys. 2. Zespół napędowy akumulatora inercyjnego wykorzystujący wirnik kompozytowy [5]

Fig. 2. Powertrain Battery inertial rotor using composite [5]

Podczas hamowania pojazdu energia kinetyczna jest odzyskiwana przez silnik elektryczny akumulatora inercyjnego, który pracuje wtedy jako generator i przekazuje energię do koła zamachowego. Energia ta powoduje przyspieszenie obrotów wirnika. Jeśli później jest potrzebna energia do przyspieszania pojazdu, zwrot „przepływu energii" jest przeciwny. Zmniejszeniu ulega prędkość kątowa koła zamachowego [1]. Przykładem mechanicznego układu hybrydowego jest konstrukcja VW bory wyposażonego w bezwładnik oraz przekładnię bezstopniową CVT wraz z przekładnię planetarną, dzięki czemu przy wykorzystaniu funkcji *stop & go* możliwa jest 20-procentowa oszczędność zużycia paliwa.

2.2. Hydroakumulatory

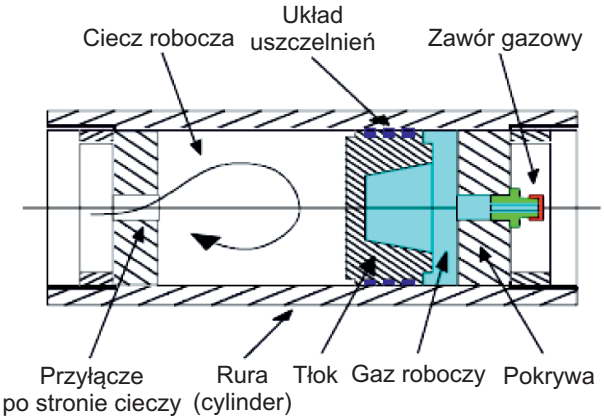
Z grupy hydroakumulatorów w napędach hybrydowych zastosowanie znajdują akumulatory: hydropneumatyczne i tłokowe. Mają one spełniać następujące funkcje: akumulowanie energii, kompensowanie przecieków cieczy roboczej, tłumienie uderzeń i drgań.



Rys. 3. Akumulator hydropneumatyczny [6]

Fig. 3. Hydropneumatic accumulator [6]

Hydroakumulator (rys. 3) składa się ze zbiornika o dużej wytrzymałości, który przejmuje całkowite ciśnienie panujące w układzie hydraulicznym. Wewnątrz zbiornika znajduje się membrana wykonana z elastomerów, rozdzielająca przestrzeń wypełnioną cieczą i gazem. Do napełniania jej służy zawór gazowy umieszczony w górnej części akumulatora. W jego dolnej części jest umieszczony zawór cieczowy, który przede wszystkim zapobiega porywaniu ze sobą membrany przez ciecz roboczą wypływającą z akumulatora. W tym celu swobodnemu przekrojowi zaworu nadaje się taki kształt, by nie mogło nastąpić przekroczenie zależnego od wielkości akumulatora maksymalnego natężenia przepływu około 120 dm^3/s. Specjalne konstrukcje, tzw. akumulatory *high-flow* (wysokoprzepływowe), dopuszczają natężenie przepływu do 140 dm^3/s.



Rys. 4. Hydrauliczny akumulator tłokowy [6]

Fig. 4. Hydraulic piston type accumulator [6]

Typową budowę akumulatora tłokowego przedstawiono na rysunku 4. Głównymi składnikami są: rura walcowa, tłok z układem uszczelnień oraz umieszczone z obu stron pokrywy zamykające, zawierające również przyłącze cieczowe i gazowe. Rura walcowa spełnia dwa

zadania: po pierwsze służy do przenoszenia ciśnienia roboczego, po drugie realizuje prowadzenie tłoka, który oddziela przestrzeń gazu od przestrzeni cieczy. W obydwu przestrzeniach powinien występować możliwie wyrównany poziom ciśnienia i z tego względu wymaga się, by tarcie między uszczelnieniem tłoka i ścianką było bardzo małe. Układ uszczelnień o mniejszym tarciu powoduje mniejszą różnicę ciśnień, a tym samym lepszą charakterystykę działania. Opór tarcia nie jest stały, lecz wzrasta wraz ze zwiększeniem ciśnienia. Sposób działania akumulatorów hydropneumatycznych jest oparty na wykorzystaniu ściśliwości gazu do akumulowania energii. Jako czynnik roboczy najczęściej stosowany jest azot, jako gaz obojętny. Czas trwania procesu ładowania i rozładowania wpływa na rodzaj przemiany termodynamicznej gazu:

– czas trwania procesu poniżej 60 s – przemiana adiabatyczna,
– czas trwania procesu 60–180 s – przemiana politropowa,
– czas trwania procesu powyżej 180 s – przemiana izotermiczna.

W czasie ładowania lub rozładowywania masa gazu w akumulatorze nie ulega zmianie. Z badań nad termodynamicznymi właściwościami azotu wynika, że w zakresie normalnych warunków eksploatacyjnych panujących w układzie hydraulicznym, tzn. przy ciśnieniu od 5 do 30 MPa i temperaturze 250–300 K, azot powinien być traktowany jako gaz rzeczywisty. Sprawność hydropneumatycznego akumulatora energii wynosi około 78%, przy założeniu adiabatycznego sprężania gazu w zakresie ciśnień $p_1/p_2 = 0{,}4$. W rzeczywistości straty energii zależą od tzw. termicznej stałej czasowej. Im jest ona wyższa, tym mniejsze są straty energii w akumulatorze hydraulicznym. Przy doborze akumulatora należy uwzględnić określone warunki (tab. 2), których zachowanie pozwala osiągnąć przewidywaną konstrukcyjnie trwałość. Akumulatory hydropneumatyczne podlegają przepisom o zbiornikach ciśnieniowych, ich montaż, wyposażenie i eksploatacja powinny odbywać się według ustaleń zawartych w odpowiadających im przepisach technicznych (w Polsce – przepisy Urzędu Dozoru Technicznego).

Tabela 2

Warunki zastosowania akumulatorów hydraulicznych [6]

Warunek	Akumulator pęcherzowy	Akumulator tłokowy
Wstępne ciśnienie gazu p_o	$\leq 0{,}9\ p_1$	$\leq p_1 - 0{,}5$ MPa
	$= 0{,}6 - 0{,}9\ p_2$ (absorpcja uderzeń)	$\geq 0{,}2$ Mpa (tłok normalny)
	$= 0{,}6\ p_2$ (tłumienie pulasacji)	
Maksymalny dopuszczalny stosunek cisnień p_2/p_0	$\leq 4{:}1$	Nie ma ograniczeń
Maksymalne natężenie przepływu cieczy roboczej	Do 120 dm3/s zależne od wielkości akumulatora	Maksymalna prędkość tłoka:
		= 3,5 m/s (tłok ze zmniejszonymi stratami tarcia)
	Do 140 dm^3/s dla *high-flow*	2 m/s (tłok normalny)

p_1 – minimalne ciśnienie pracy zbiornika, p_2 – maksymalne ciśnienie pracy zbiornika

Pomimo trudności technologicznych nadal prowadzi się badania nad hydraulicznym układem hybrydowym. Układ ten zastosowano w fordzie mighty F-350 tonka (z roku 2003), który wyposażono w hydrauliczny system zwiększania mocy napędowej na kołach (HLA – *Hydraulic Launch Assist*). Wykorzystanie systemu w lekkich ciężarówkach powoduje zmniejszenie zużycia paliwa o 25–35%, przez odzyskiwanie energii podczas hamowania i ponowne jej wykorzystanie do przyspieszania pojazdu. Układ składa się z silnika/pompy hydraulicznej połączonych z układem napędowym i dwóch akumulatorów wypełnionych cieczą hydrauliczną oraz azotem. Podczas hamowania energia kinetyczna pojazdu jest wykorzystywana do sprężania azotu do ciśnienia około 350 bar. Podczas przyspieszania istnieje możliwość wykorzystania przez 10–15 s układu hydraulicznego zwiększania mocy.

2.3. Akumulatory elektrochemiczne

Akumulator elektrochemiczny składa się z dwóch różnych elektrod umieszczonych w mieszaninie związków chemicznych – elektrolicie. W wyniku reakcji chemicznych, zachodzących między materiałem elektrod a elektrolitem na jednej z nich pojawia się niedobór elektronów (elektroda dodatnia), a na drugiej ich nadmiar (elektroda ujemna). Zgromadzona energia chemiczna jest zamieniana w ten sposób na energię elektryczną. Po jej wyczerpaniu stan wyjściowy akumulatora można zregenerować w procesie ładowania. Możliwość ładowania odróżnia akumulatory od ogniw galwanicznych, których zasada działania jest taka sama, jednakże swą funkcję spełniają jednorazowo. Jedynie raz można wykorzystać zgromadzoną w ogniwie energię chemiczną. Procesu nie można odwrócić, a po wyczerpaniu ogniwa nie nadaje się ono do ponownego użytku. Elektrochemiczny akumulator energii jest stosowany w hybrydowych układach napędowych pojazdów jako wtórne źródło energii. Jest również źródłem energii w pojazdach elektrycznych. Jako jedyne źródło energii nie jest w stanie konkurować z silnikiem spalinowym ze względu na niewystarczającą energię właściwą. Cechą krytyczną jest jego duża masa, niezbędna do uzyskania takiej pojemności energetycznej, aby zasięg pojazdu elektrycznego był dostateczny. W napędach hybrydowych ilość energii, jaką akumuluje lub wydatkuje akumulator, jest ograniczona właściwościami cyklu jazdy, a w małej mierze jest zależna od jej zasięgu.

Cechą istotną akumulatorów elektrochemicznych, zastosowanych w pojazdach elektrycznych i hybrydowych, jest ich obciążalność prądowa przy szczytowej mocy pędnej na kołach jezdnych pojazdu. W pojazdach hybrydowych moc chwilowa podczas ładowania i wyładowania ma decydujący wpływ na masę akumulatora. Ponadto współpraca akumulatora z innym źródłem energii w napędach hybrydowych daje możliwość uzupełnienia jego energii (niezależnie od ilości energii pochodzącej z hamowania odzyskującego) [7]. Akumulator elektrochemiczny jako źródło energii należy dziś do najbardziej krytycznie ocenianych elementów napędu pojazdu. Jego podstawowymi wadami są: niezadowalający zasięg pojazdu oraz ograniczenia w procesie ładowania i rozładowania. W szczególności dotyczy to obecnie najtańszych, najbardziej dostępnych, trwałych, udoskonalanych akumulatorów ołowiowych, przeznaczonych do akumulacji energii w elektrochemicznych napędach hybrydowych. Ogniwa ołowiowe mają najniższy stosunek akumulowania energii do masy, wynikający z dużych gęstości materiałów składowych. Przy stosunku 50 (W·h)/kg, ogniwo o pojemności 25 kW·h ważyłoby 500 kg. Najczęściej stosowane materiały w nowoczesnych akumulatorach ołowiowych to: ołów, tlenek ołowiu i przekładki z włókna szklanego. Obudowa jest wykonana zwykle z polipropylenu. Elektrolitem w akumulatorach kwasowych jest 22–26-procentowy kwas

siarkowy. Wszystkie materiały stosowane do wytworzenia tego typu akumulatora nadają się do powtórnego użycia po odpowiedniej przeróbce – recyklingu [4].

Ze względu na wady akumulatora ołowiowego rozpoczęto poszukiwania innych zestawów elektrod i elektrolitów. W akumulatorze ołowiowym elektrolitem był kwas. Zwrócono również uwagę na roztwory zasadowe. Początkowo, pod koniec lat dwudziestych XX wieku akumulator niklowo-kadmowy zaczęto stosować do rozruchu silników w samolotach. Główną ich wadą, poza tym, że materiał elektrod ulega rekrystalizacji, która wyraźnie ujawnia się w przypadku nieprzestrzegania procedury ładowania i gwałtownie zmniejsza ich wydajność, jest duża toksyczność kadmu i wynikające stąd problemy z utylizacją. Ogniwa niklowo-kadmowe są masowo wytwarzane na potrzeby przemysłu. Żywotność ogniw wynosi około 2000 cykli ładowania (6–10 lat), co oznacza, że nie muszą być wymieniane w trakcie eksploatacji pojazdu.

Ogniwa te mogą pracować w temperaturach od –40 do 80°C. Aktywnym materiałem w spiekanej dodatniej elektrodzie jest $Ni(OH_2)$ z podkładem z niklu, żelaza i grafitu. Elektrolitem jest wodorotlenek potasu z cienkimi warstwami separatora wykonanego ze stalowych płytek z domieszką niklu. Gęstość energii jest większa niż najnowszych akumulatorów ołowiowych.

Bardziej przyjazny środowisku jest obecnie akumulator niklowo-wodorkowy (NiMH). Akumulator NiMH jest następcą opracowanego w latach sześćdziesiątych odwracalnego ogniwa niklowo-wodorowego. Proces elektrochemiczny w obu tych bateriach jest taki sam, różnica polega na metodzie magazynowania wodoru. Pierwowzór składał się z elektrody z wodorotlenku niklu i elektrody platynowej, zanurzonych w roztworze wodorotlenku sodu lub potasu. Gazowy wodór gromadzony był albo w połączonym z ogniwem zbiorniku, albo w samym, zamkniętym hermetycznie ogniwie. Panujące tam wysokie ciśnienie wodoru było podstawową wadą tego akumulatora. Jednak duża jego niezawodność oraz bardzo długi czas życia, przekraczający 7 tys. pełnych cykli ładowania i rozładowania, budziły zainteresowanie.

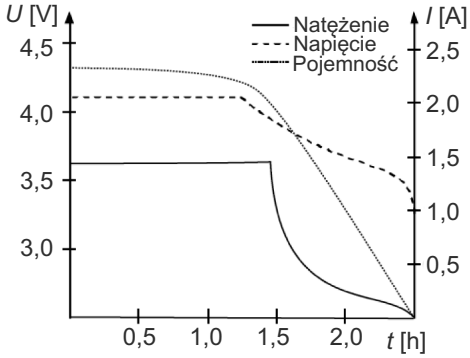
Problemem było bezpieczeństwo gromadzenia wodoru w ogniwie. Jego ujemna elektroda wykonana była ze stopu niklu i lantanu. Potrafi ona zaabsorbować wodór o objętości 1000 razy większej, niż wynosi jej objętość własna. Obecnie elektrodę stanowią rozmaite stopy metali ziem rzadkich, niklu, kobaltu, manganu, boru, tytanu, glinu lub wanadu. Myśli się również o dużych akumulatorach tego typu do napędu samochodów elektrycznych.

Czas ich życia wynosi według różnych źródeł od 3 do 10 lat. Nie mogą one pracować w wysokich temperaturach i potrzebują intensywnego chłodzenia. Duża gęstość energetyczna, wynosząca około 70 (W·h)/kg, stanowi o tym, że ogniwa te są małe i lekkie (około 30% lżejsze od akumulatorów ołowiowych). Zespół ogniw o pojemności 25 kW·h miałby masę 330 kg. Współczesne technologie pozwalają na podniesienie gęstości energii do ponad 120 (W·h)/kg, a przy zastosowaniu nowych materiałów będzie możliwe 500 (W·h)/kg. Pozwoliłoby to na obniżenie masy zestawu baterii do 50 kg.

Proces ładowania i rozładowania jest związany z przenoszeniem jonów litu przez elektrolit. Podczas ładowania pobierają one elektron od elektrody ujemnej i jednocześnie są unieruchamiane w jej strukturze jako obojętne atomy. Podczas rozładowania oddają elektron elektrodzie i przechodzą do elektrolitu jako jony litu. Podobny, tylko odwrotny proces zachodzi na elektrodzie dodatniej. Parametry pracy akumulatora Li-Ion przedstawiono na rysunku 5.

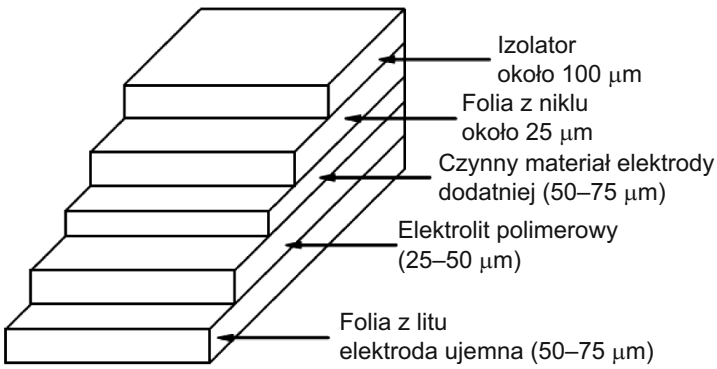
Amerykanie w swojej konstrukcji akumulatora litowego powrócili do elektrody z metalicznego litu, ciekły elektrolit zastąpili jednak stałym polimerem, przez który transportowane są jony litu. Badania nad tym akumulatorem, nazwanym Li-polimerem, są prowadzone

bardzo intensywnie. Już na samym początku okazało się, że jego technologia jest łatwiejsza i tańsza od technologii Li-Ion. Pozwala ona również wytwarzać cienkie, giętkie ogniwa, nie grubsze niż 1 mm (rys. 6). Ich wadą jest jednak łatwość uszkodzenia w wyniku niewielkiego nawet przeładowania.



Rys. 5. Przebieg zmiany potencjału oraz natężenia prądu podczas rozładowania ogniwa Li- Ion o pojemności 2,1 A·h [3]

Fig. 5. The course of changes in potential and current during discharge cell Li-Ion 2.1 A·h [3]



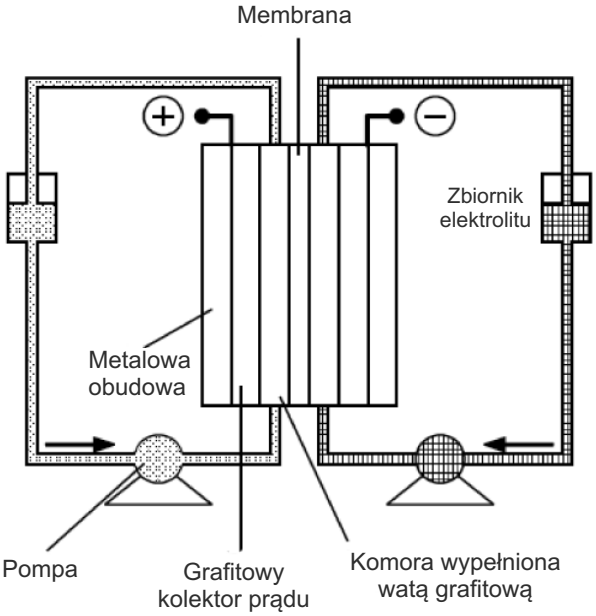
Rys. 6. Akumulator litowo-polimerowy [8]

Fig. 6. Rechargeable lithium-polymer [8]

Zasada jego działania jest taka sama jak akumulatora Li-Ion. Inna jest jednak budowa. Elektrodę dodatnią wykonuje się z podobnych materiałów jak w Li-Ion, elektrodę ujemną stanowi natomiast metaliczny lit. Elektrolitem jest polimer zawierający jony litu. Można wykonywać go w postaci płaskiej, tzw. akumulatory papierowe, lub w postaci walcowej. Konstrukcję akumulatora wanadowego przedstawiono poniżej. Składa się on z dwóch komór oddzielonych od siebie półprzepuszczalną przegrodą. Stanowią one elektrody: dodatnią i ujemną. Do obydwu tłoczony jest wodny roztwór jonów wanadu w kwasie siarkowym, do

każdej inny, zawierający wanad o innym stopniu utlenienia. W wyniku procesów elektrochemicznych, które zachodzą w roztworach, na elektrodzie dodatniej pojawia się niedobór, a na ujemnej nadmiar elektronów. Roztwory tłoczone są do baterii w obiegu zamkniętym z dwóch osobnych zbiorników. Elektrodami w tym akumulatorze są dwie metalowe komory, wyłożone płytami z grafitu i wypełnione watą grafitową (rys. 7). Rozdzielone są one półprzepuszczalną membraną wykonaną na przykład z sulfonowanego polistyrenu. Obecnie przydatność tego typu zasilania jest sprawdzana w wózkach golfowych.

Innym oryginalnym pomysłem w dziedzinie odwracalnych, chemicznych źródeł energii elektrycznej jest akumulator zbudowany wyłącznie z materiałów polimerowych, niezawierający zarówno atomów żadnego z metali, jak też ciekłego elektrolitu (rys. 8).



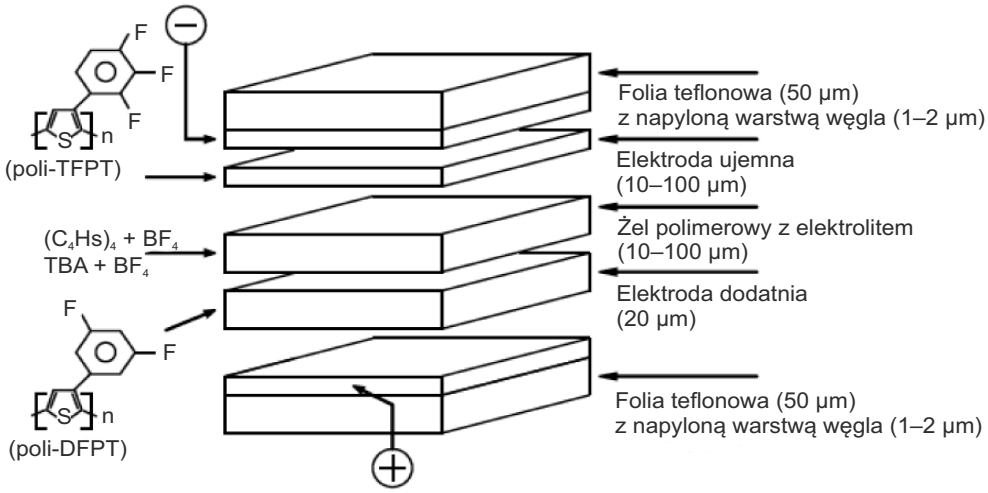
Rys. 7. Akumulator wanadowy [8]

Fig. 7. Vanadium Battery [8]

W stanie naładowanym jony soli amoniowej łączą się z materiałem elektrod. Podczas rozładowania połączenia rozpadają się (z pobraniem lub oddaniem elektronu) i uwolnione jony przechodzą do żelu polimerowego.

Przewiduje się, że będzie on wykorzystany w nowej generacji kart kredytowych oraz w zespołach z bateriami słonecznymi jako źródło zasilania pojazdów kosmicznych.

Duże nadzieje należy wiązać z generacją akumulatorów wysokoenergetycznych, które mogą zmienić szanse napędu elektrycznego. Koncern ASEA Brown Boveri (ABB) poinformował o obiecujących rezultatach prac prowadzonych nad baterią sodowo-siarkową (NaS).

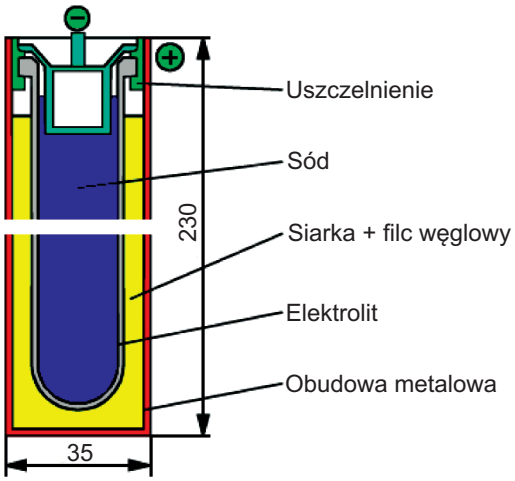


Rys. 8. Akumulator polimerowy [8]

Fig. 8. Polymer Battery [8]

Schemat podstawowego cylindrycznego ogniwa NaS o średnicy 35 mm i wysokości 230 mm przedstawiono na rysunku 9.

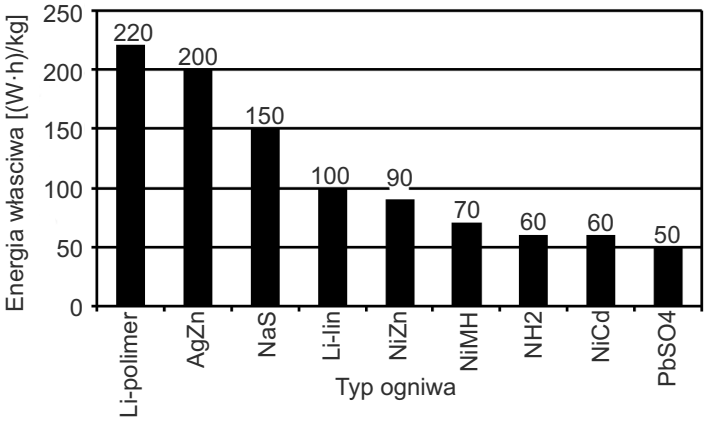
Dla powodzenia przedsięwzięcia dotyczącego przygotowania produkcji baterii NaS istotne było uzyskanie stałego elektrolitu trójtlenku aluminium w postaci rozdrobnionego materiału ceramicznego. W zależności od stanu naładowania napięcie pojedynczego ogniwa wynosi od 1,78 do 2,08 V, a jego pojemność 45 A·h. W celu osiągnięcia potrzebnej do napędu samochodu pojemności energetycznej, pojedyncze ogniwa są łączone równolegle i tworzą akumulator.



Rys. 9. Schemat ogniwa akumulatora sodowo-siarkowego [6]

Fig. 9. Schematic cell sodium-sulfur battery [6]

Jednym z ważnych problemów przy konstruowaniu akumulatora było zapewnienie takich właściwości izolacyjnych ich obudowy, by zapewniały one utrzymanie temperatury eksploatacyjnej w przedziale 300–400°C. Uzyskano to dzięki wyłożeniu płatami z włókna szklanego 30-milimetrowej przestrzeni między płaszczyznami obudowy i wytworzeniu w niej próżni. Wobec stwierdzenia, że przemienne ochładzanie akumulatora do temperatury otoczenia na skutek przerwy w eksploatacji i następnie ich podgrzewanie do około 350°C po ponownym uruchomieniu jest bardzo szkodliwe dla żywotności i może być przeprowadzone maksymalnie 30 razy, zalecono, by w miarę możliwości były one eksploatowane codziennie. Charakterystykę opisanych powyżej akumulatorów zebrano i przedstawiono na rys. 10.

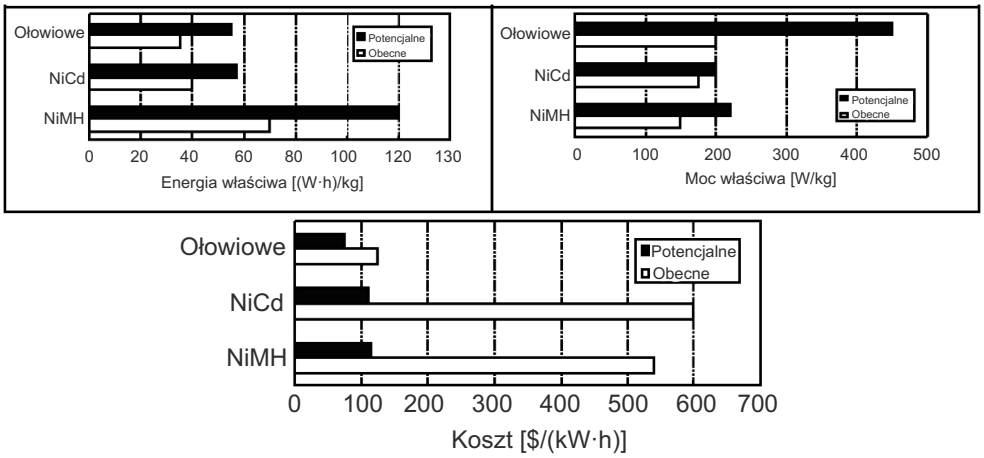


Rys. 10. Porównanie energii uzyskiwanej z różnych rodzajów ogniw [6]

Fig. 10. Comparison of energy from different types of cells [6]

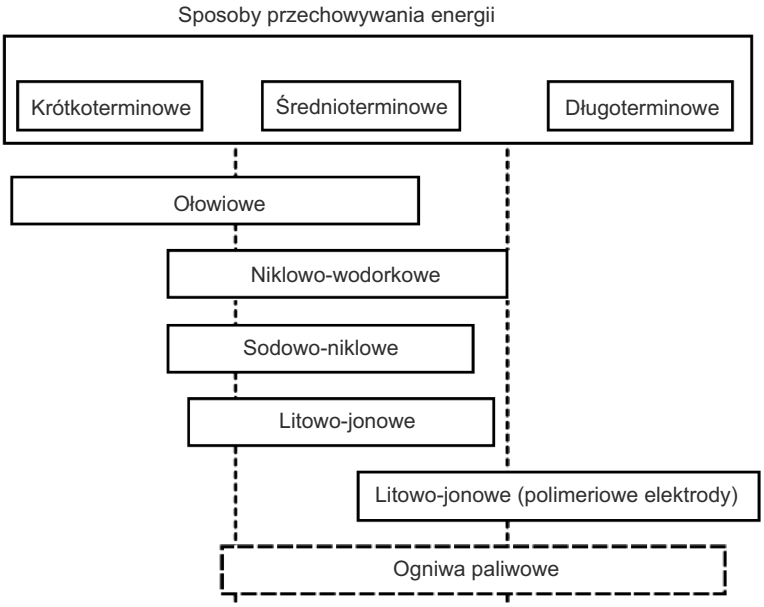
Wzrost zagrożenia środowiska i kurczenie się zasobów paliw węglowodorowych doprowadziły do nasilenia prac nad zastosowaniem silników elektrycznych do napędu samochodów. Ich rezultatem są nowe typy akumulatorów, o krótszym okresie ładowania, mniejszej masie i większej wydajności energetycznej (rys. 11), co spowodowało wydłużenie zasięgu samochodów.

Główną przyczyną skracania czasu życia akumulatorów oraz szybkiego zmniejszania ich pojemności jest niewłaściwa eksploatacja. Aby dokładnie czuwać nad procedurą ładowania i rozładowywania, zaczęto wbudowywać w akumulatory układy scalone pełniące rolę kontrolerów. Są to tzw. inteligentne akumulatory (droższe o około 30% od klasycznych baterii i, jak na razie, jeszcze mało popularne). Nakłady skierowane są obecnie na utworzenie jednego standardowego systemu, obejmującego wszystkie inteligentne akumulatory niezależnie od ich typu – SBS (*Smart Battery System*). Rozwój napędów hybrydowych i elektrycznych jest uwarunkowany poziomem technologicznym akumulatorów. Najbardziej pożądanym typem są baterie *long term*, charakteryzujące się możliwością długookresowego dostarczania energii elektrycznej. Największe zastosowanie mogą mieć baterie litowo-jonowe (rys. 12).



Rys. 11. Charakterystyka obecnych i przyszłych możliwości akumulatorów

Fig. 11. Characteristics of current and future capacity batteries



Rys. 12. Zaawansowane systemy akumulatorów oraz odpowiadające im sposoby przechowywania energii do napędu pojazdów elektrycznych [2]

Fig. 12. Advanced battery systems and corresponding methods of energy storage to power electric vehicles [2]

Jednym z wyborów podejmowanych przy projektowaniu pojazdów o napędzie hybrydowym jest podział mocy i energii między silnik spalinowy i urządzenie magazynujące. Przy obecnym stanie zaawansowania konstrukcji akumulatorów elektrochemicznych uzyskanie większej mocy pojazdu w większym stopniu przez silnik spalinowy, a w mniejszym stopniu przez akumulatory – prowadzi do obniżenia masy pojazdu.

3. Wnioski

1. Szerokie wprowadzenie technologii elektrycznych wymaga dostępności inteligentnych sieci elektrycznych i inteligentnych systemów ładowania pojazdów, dostosowanych do wymagań klientów.
2. Istnieje bardzo wiele pierwotnych źródeł energii elektrycznej, co daje wysoką elastyczność zaopatrzeniową.
3. Znacznie wyższa wydajność energetyczna silnika elektrycznego w porównaniu z silnikiem spalinowym.
4. Usterki układu napędzającego pojazd z indywidualnym napędem silnikiem elektrycznym każdego z kół jezdnych mogą w niekorzystnych warunkach drogowych prowadzić do utraty możliwości sterowania pojazdem, powodując powstanie zagrożenia bezpieczeństwa.
5. Rozwój pojazdów hybrydowych, jak również pojazdów o napędzie czysto elektrycznym prowadzi nieuchronnie do zwiększenia kompleksowości zagadnień koniecznych do rozwiązania na etapie projektowania.
6. Rozwój konstrukcji silników elektrycznych otwiera nowe możliwości w zakresie sterowania dynamiką ruchu pojazdu. Szczególnie atrakcyjną alternatywę stanowi wektorowanie momentu napędowego.
7. Najnowsze akumulatory litowo-żelazowo-fosforowe są najbezpieczniejszym rozwiązaniem, charakteryzującym się małym prawdopodobieństwem przegrzania i pożaru. Koszty produkcji są niskie. Niewielka gęstość energii i pogorszenie parametrów pracy w niskich temperaturach należy wymienić jako podstawowe wady.
8. Efekty bezpośrednie stosowania pojazdów EV:
   - znaczące obniżenie emisji spalin,
   - znaczące ograniczenie hałasu,
   - dłuższe przebiegi silnika (mniejsze i równomierne obciążenie),
   - mniejsze zużycie elementów układu hamulcowego.

Literatura

[1] Amann C.A., *The Stretch for better Passenger Car Fuel Economy*, A Citical Look. Automotive Engineering, nr 3, 2008.
[2] Bassini M., *New OE Battery Concept for Specific Performances Improvement, F98TP067*, Fisita World Automotive Congress, Paris 2008.
[3] Czerwiński A., *Akumulatory, baterie, ogniwa*, Warszawa 2005.
[4] Gaines L., Singh M., *Energy Impacts in Producing and Recycling EV Bateries*, Automotive Engineering, nr 2, 2006.

[5] J o s t K., *Composite flywheel rotors for hybrid EVs*, Automotive Engineering, nr 10, 2005.
[6] P a w e l s k i Z., *Napęd hybrydowy dla autobusu miejskiego*, Łódź 2006.
[7] R o s e n H.A., C a s t l e m a n D.R., *Koła zamachowe w pojazdach hybrydowych*, Świat Nauki, nr 12, 2007.
[8] T y c z k o w s k i J., *Kłopoty z akumulatorem*, Wiedza i Życie, nr 12, 2009.