

**Beata ANTOSIEWICZ<sup>1</sup>, Piotr BICZEL<sup>1</sup>,  
Maciej KWIATKOWSKI<sup>2</sup>**

Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych (1)  
Impact Clean Power Technology S.A. (2)

## **Nowoczesne akumulatory do zastosowań w transporcie i energetyce**

**Streszczenie.** *W artykule przedstawiono porównanie nowoczesnych ogniwa elektrochemicznych różnych technologii, które mogą być stosowane w pojazdach i energetyce. Mnogość różnych technologii ogniw utrudnia prawidłowy wybór dla konkretnego zastosowania. Stąd intencja autorów przybliżenia i porównania różnych ogniw w sposób, który może być użyteczny dla potencjalnego projektanta urządzeń magazynujących energię.*

**Słowa kluczowe:** akumulatory, ogniwa litowo-jonowe, kwasowo-ołowiowe, pojazdy elektryczne, generacja rozproszona, metoda kosztu cyklu życia

### **Wprowadzenie**

Akumulatory, czyli ogniwa elektrochemiczne drugiego rodzaju, znajdują coraz szersze zastosowanie. Roczna produkcja ogniw rośnie, użytkownicy mają wokół siebie coraz więcej urządzeń zasilanych akumulatorami. Wzrost sprawności odbiorników, wzrost gęstości energii ogniw, tendencja do mobilności powodują, że często wolimy urządzenie zasilane bateriami, niż płaczące się przewody elektryczne.

Współczesne zastosowania ogniw można podzielić na kilka grup: w sprzęcie przenośnym powszechnego użytku, w pojazdach, w urządzenia energetycznych. Tradycyjnie wyróżnia się trzy podstawowe tryby pracy akumulatorów: pracę cykliczną, rozruchową i buforową. Każde z tych zastosowań i rodzajów prac wymaga innych ogniw. Stąd mnogość konstrukcji i układów elektrochemicznych.

Ograniczając się do pojazdów i urządzeń energetycznych można wyróżnić następujące reżimy pracy:

w pojazdach:

- praca rozruchowa,
- trakcyjna,
- podtrzymanie zasilania,

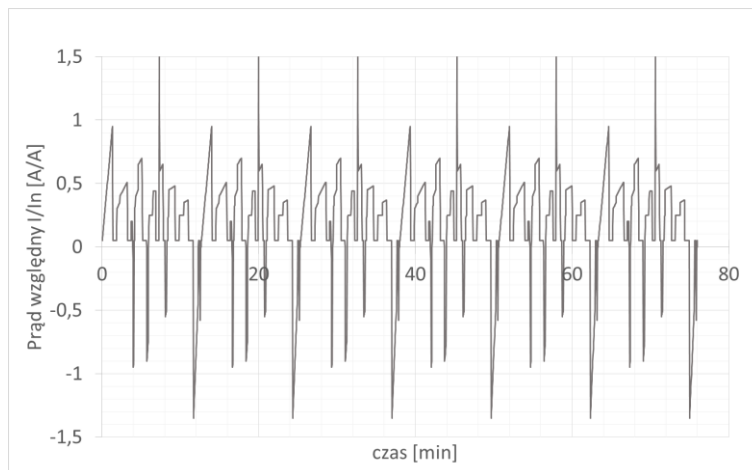
oraz w energetyce:

- praca buforowa,
- praca cykliczna.

### **Wymagania dla akumulatorów w różnych warunkach pracy**

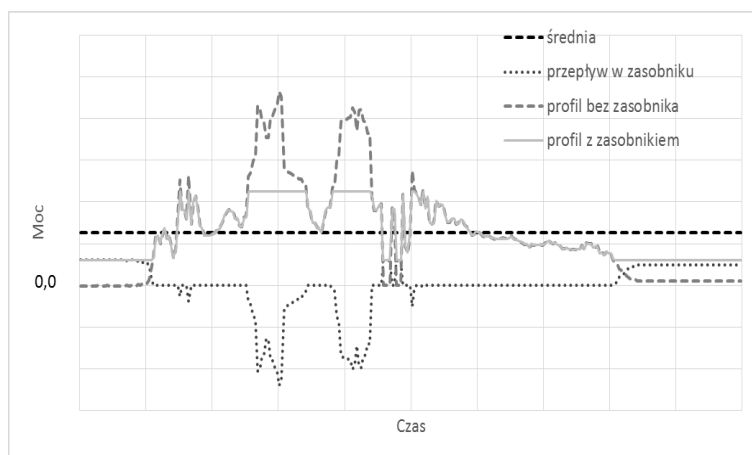
Praca cykliczna w energetyce i praca trakcyjna są dość podobne, zwłaszcza od upowszechnienia się napędów przekształtnikowych i hamowania odzyskowego. W obydwu przypadkach chodzi o cykliczne naładowanie i rozładowanie baterii. Cykle mogą różnić się głębokością i częstością występowania. Głębokość cykli i częstość ich występowania mogą być charakterystyczne dla danego zastosowania. Na rys. 1 przedstawiony jest przykładowy przebieg prądu pojazdu trakcyjnego. Widać okresy poboru i generacji energii. Taki przebieg może być rozłożony na składową pobieraną z sieci, związaną ze zużyciem energii, i tę przepływającą przez baterię, związaną

z recyrkulacją energii. Widać, że bateria będzie musiała wykonać bardzo dużo cykli w krótkim czasie o dużych wartościach. Liczba cykli będzie wynosiła kilkaset dziennie. Akumulator musi być przystosowany do wielkiej liczby cykli i dużych wartości prądu.



Rys. 1. Przykładowy przebieg prądu pobieranego z sieci przez tramwaj odniesiony do prądu znamionowego

Podobnie rys. 2 przedstawia dobowy profil mocy układu prosumenckiego, wyposażonego w akumulator do wyrównywania przepływów mocy, gdzie celem jest redukcja obciążeń szczytowych i obniżenie mocy zamówionej odbiorcy. Tutaj niezbędne są akumulatory zdolne do wytrzymania dużej liczby cykli o różnych głębokościach, ale cykle te będą dość płytkie, a pełen cykl przeładowania powinien występować nie więcej niż raz na dobę.



Rys. 2. Przykładowy dobowy przebieg mocy w układzie prosumenckim z akumulatorem.

Praca w reżimie podtrzymania zasilania i pracy buforowej również są podobne. W obu wypadkach zasadą jest, że bateria jest cały czas utrzymywana w stanie naładowania i tylko w niektórych momentach, gdy zaniknie zasilania podstawowe, jest

## **IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016**

rozładowywana, zasilając odbiory. Wymaga to akumulatorów o konstrukcjach odpornych na długotrwałe utrzymywanie takich samych warunków termodynamicznych i elektrochemicznych. Tutaj szczególnie istotna jest odporność akumulatorów na temperaturę pracy.

Charakterystycznym rodzajem pracy akumulatorów w pojazdach jest praca rozruchowa. Do niedawna ten tryb pracy występował wyłącznie w pojazdach. Polega on na tym, że akumulator musi wydać impuls prądu niezbędnego do uruchomienia podstawowego źródła zasilania urządzenia. Najczęściej silnika spalinowego. Taki charakter pracy wymaga stosowania akumulatorów zdolnych do krótkotrwałej pracy praktycznie w zwarciu.

Zastosowania transportowe i energetyczne różnią się jeszcze dwoma istotnymi parametrami: temperaturą pracy ogniw i ich wielkością. W zastosowaniach mobilnych wymagane jest zazwyczaj zdolność do pracy w szerokim zakresie temperatur, w tym w temperaturach ujemnych oraz wymagane są duża gęstość energii i energia właściwa.

Ostatnim wymaganiem dla baterii jest aspekt ekonomiczny. Baterie muszą pracować na tyle długo, żeby koszt ich zakupu w przeliczeniu na okres eksploatacji był akceptowalny. Również należy minimalizować koszty eksploatacji, w tym przede wszystkim koszt okresowego badania dostępnej pojemności baterii oraz wymagania dla pomieszczeń.

Podsumowanie powyższych rozważań przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Wymagania dla akumulatorów w różnych zastosowaniach.

Dziedzina	Rodzaj pracy	Duża gęstość energii	Duża energia właściwa	Duża żywotność cykliczna	Odporność na temp.	Praca mocowa	Brak emisji
Transport	rozruchowa	+	+	-	+++	+++	+
	podtrzymanie zasilania	++	++	---	+++	-	++
	trakcyjna	+++	+++	+++	+++	++	+++
Energetyka	cykliczna	+	+	+++	+	++	+++
	buforowa	---	---	---	++	+	++

Jak widać w podobnych zastosowaniach wyższe wymagania stawia się akumulatorom przeznaczonym do pojazdów. Należy też zwrócić uwagę, że wymagania, które niedawno uznawano za nieistotne, stają się ważne wraz z usuwaniem wad dotychczasajszszych.

### **Współczesne ogniwa elektrochemiczne drugiego rodzaju**

Różne warunki pracy spowodowały wykształcenie się wielu rodzajów ogniw. Pierwsze i najstarsze to ogniwa kwasowo-ołowiowe. Kolejne to akumulatory niklowe: niklowo-kadmowe i metalo-wodorkowe. Najnowszą i najbardziej zróżnicowaną grupę stanowią ogniwa litowo-jonowe. Ponieważ wymagania dla baterii są formułowane w ten sposób, że oczekuje się od nich zachowania podobnego do kondensatorów, ostatnio wykształca się nowa grupa urządzeń: superkondensatory litowo-jonowe (LIC).

Komercjalizacja różnych ogniw odbywała się w następujących latach:

kwasowo-ołowiowych:	1881 r.,
niklowo-kadmowych:	1960 r.,
niklowo-metalo-wodorkowych:	1990 r.,
litowo-jonowych typu LFP:	1996 r.,
litowo-jonowych typu NMC:	2008 r.,

litowo-jonowych typu LTO: 2012 r.,  
ogniwa LIC: 2015 r.

Motywacją do poszukiwania kolejnych, lepszych rozwiązań, jest skonstruowanie bardzo lekkiej, małej baterii, zdolnej zmagazynować dużo energii, o bardzo dużej liczbie cykli i dużej żywotności liczonej w latach eksploatacji.

Najstarsze i najlepiej znane są ogniwa kwasowo-ołowiowe. Magazynowanie energii odbywa się tu poprzez zmianę energii chemicznej elektrod i elektrolitu. W akumulatorze naładowanym katoda składa się z tlenku ołowiu, anoda z ołowiu, a elektrolit to gęsty roztwór kwasu siarkowego. Po rozładowaniu na elektrodach tworzy się siarczan ołowiu, a gęstość elektrolitu spada. Pochłanianie i oddawanie energii wiąże się ze reakcjami chemicznymi, w tym z rozkładem i tworzeniem wody.

W naładowanym akumulatorze niklowo-kadmowym katoda zbudowana jest z zasadowego tlenku niklu a anoda z metalicznego kadmu. Po rozładowaniu katoda składa się z wodorotlenku niklu, a anoda z wodorotlenku kadmu.

Akumulator niklowo-metalowodorowy jest podobny w budowie do niklowo-kadmowego. W stanie naładowania katoda to zasadowy tlenek niklu. Jednak materiałem anody są stopy metali wiążące w swej strukturze atomy wodoru. Po rozładowaniu katoda składa się z wodorotlenku niklu, a anoda z czystych metali. Dodatkowo wytwarza się pewna ilość wody.

Odmienne właściwości mają ogniwa litowo-jonowe. W tej grupie wyodrębnia się co najmniej trzy istotne podgrupy, różniące się składem chemicznym elektrod:  
NMC, z katodą złożoną z tlenków niklu, manganu i kobaltu, a anodą zbudowaną z grafitu;

LFP, z katodą złożoną z fosforanu niklowo-żelazowego, a anodą zbudowaną z grafitu;

LTO, z katodą wykonaną z tlenku kobaltowo-litowego, a anodą z tlenku litowo-tytanowego i grafitu.

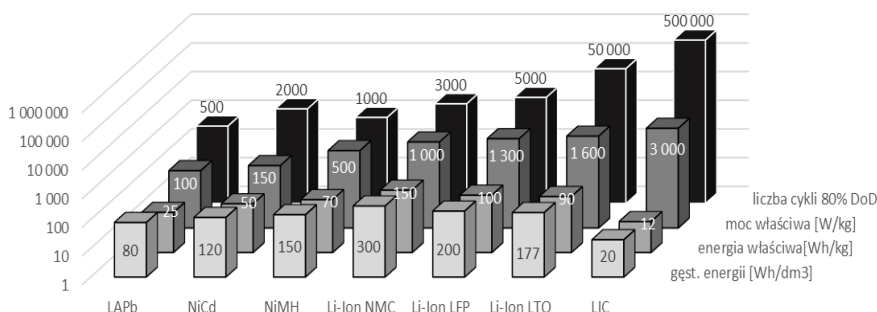
We wszystkich grupach ogniw litowo-jonowych magazynowanie i uwalnianie energii wiąże się z przemieszczeniem atomów litu pomiędzy elektrodami. W ogniwie naładowanym atomy litu są interkalowane do struktury krystalicznej anody, natomiast w rozładowanym w strukturze katody. W odróżnieniu do wyżej wymienionych rodzajów, elektrolit jest wyłącznie nośnikiem jonów litu i nie bierze udziału w procesie magazynowania energii. Lit nie stanowi również materiału konstrukcyjnego elektrod i nie bierze udziału w reakcjach chemicznych z materiałem elektrolitu. Stąd większa trwałość tych ogniw, zarówno cykliczna, jak i czasowa.

Superkondensator litowo-jonowy LIC jest połączeniem superkondensatora i akumulatora litowo-jonowego, gdzie katoda ogniwa litowo-jonowego jest de facto superkondensatorem. Celem jest uzyskanie znacznie większych energii zmagazynowanych niż w wypadku superkondensatora przy zachowaniu możliwych wielkości i czasu narastania prądów oraz liczby cykli.

### **Porównanie właściwości wybranych ogniw drugiego rodzaju**

Jak omawiane wyżej właściwości ogniw przekładają się na parametry elektryczne, ważne z punktu widzenia eksploatacji akumulatorów? W celu zobrazowania różnic zebrano na poniższych rysunkach porównanie podstawowych typów ogniw. Podstawowe cztery parametry to gęstość energii, energia właściwa, gęstość moc i przeciętna liczba cykli (80% DoD przy 25°C) są przedstawione na rys. 3.

## IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

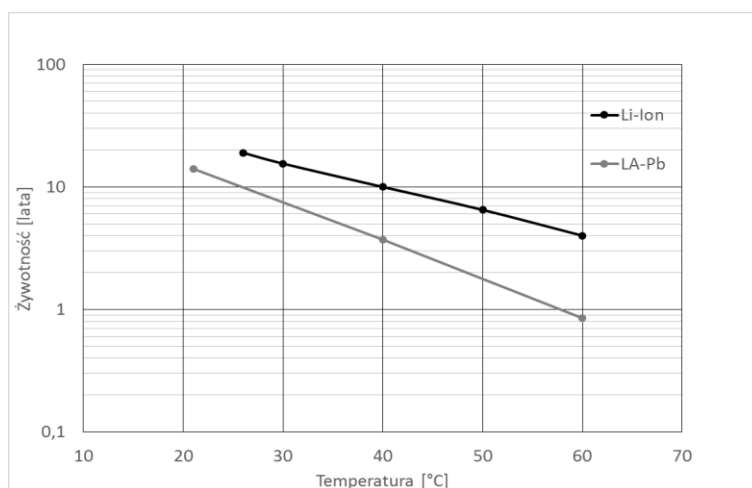


Rys. 3. Porównanie podstawowych parametrów omawianych ogniw.

W pracy buforowej najważniejszą cechą jest odporność na temperaturę, wyrażająca się w skróceniu żywotności w funkcji temperatury. Ważna jest też możliwość oceny stanu naładowania akumulatora oraz konieczność kompensacji temperaturowej napięcia pracy.

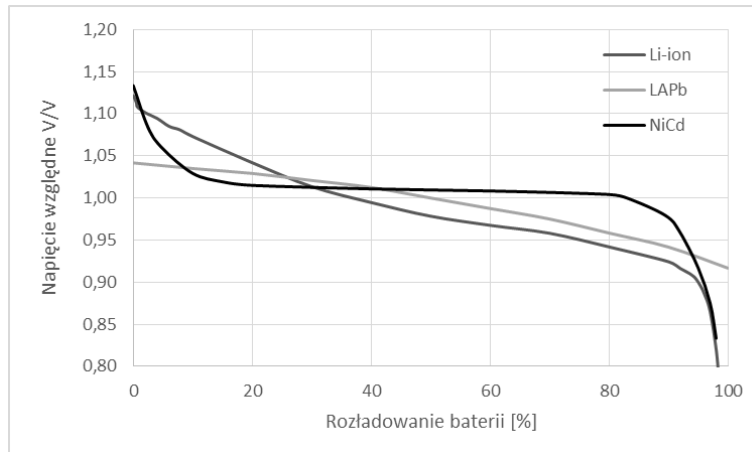
W aplikacjach buforowych, ze względu na bardzo duży prąd samorozładowania oraz efekt pamięciowy, nie stosuje się baterii niklowych. Stąd do porównania pozostają akumulatory kwasowe i litowo-jonowe. Te drugie odznaczają się znacznie większą odpornością na temperaturę. Żywotność obu rodzajów akumulatorów w funkcji temperatury przedstawia rys. 4.

Baterie litowo-jonowe nie wymagają też kompensacji temperaturowej napięcia ładowania buforowego. Ponieważ w wypadku tych ogniw możliwe jest dokładne wyznaczenie stanu SOC naładowania baterii przez układ nadzoru, nie jest konieczne okresowe wykonywanie kontrolnego rozładowania, co usuwa najbardziej kłopotliwą czynność eksploatacyjną współcześnie stosowanych ogniw kwasowych.



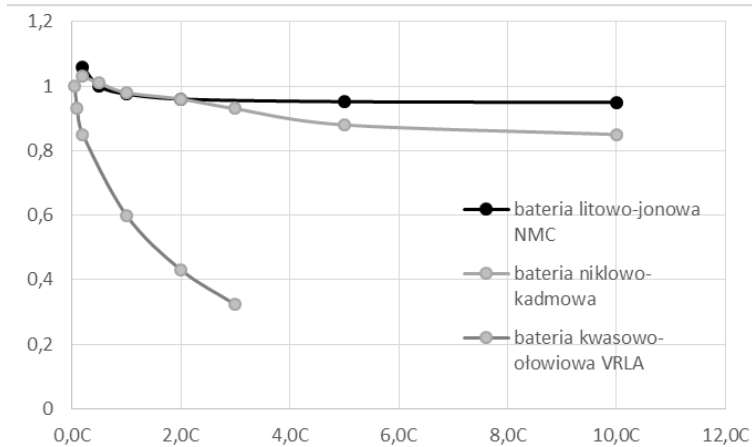
Rys. 4. Wpływ temperatury na żywotność ogniw kwasowo-olowiowych (LAPb) i litowo-jonowych (Li-ion) w funkcji temperatury w pracy buforowej.

Inną ważną cechą, którą warto porównać dla wspomnianych ogniw, jest charakterystyka rozładowania. Najlepiej by było, gdyby napięcie ogniwa było stałe w jak najszerszym zakresie rozładowania. Celem porównania ogniw różnych typów przedstawiono porównanie względnego napięcia ogniwa w funkcji względnego odebranego ładunku. Napięcie zostało unormowane do napięć nominalnych ogniwa, a ładunek do pojemności nominalnej. Porównanie to przedstawia rys. ???.



Rys. 5. Porównanie ustępliwości napięcia w funkcji rozładowania baterii dla ogniw litowo-jonowych (Li-ion), kwasowo-ołowiowych (LAPb) i nikielowo-kadmowych (NiCd).

Do pełnego zrozumienia różnic pomiędzy omawianymi ogniwami potrzebne jest jeszcze porównanie spadku pojemności baterii ze wzrostem prądu rozładowania ogniwa (rys. 6).



Rys. 6. Porównanie spadku pojemności w funkcji prądu rozładowania ogniw kwasowo-ołowiowych i litowo-jonowych.

## IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

### Podsumowanie

Podsumowanie właściwości omówionych wyżej typów akumulatorów w kontekście wymagań postawionych w tabeli 1. przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Porównanie realizacji ww. wymagań przez ogniwa różnych typów.

Typ ogniwa	Duża gęstość energii	Duża energia właściwa	Duża żywotność cykliczna	Odporność na temp.	Praca mocowa	Brak emisji
Kwasowo- ołowiowe	---	---	-	---	-	---
Niklowo- kadmowe	+	+	+	+++	+++	---
Niklowo- metalo- wodorkowe	+	+	++	+	++	+
Li-ion NMC	+++	+++	+	+	+	+++
Li-ion LFP	++	++	+	++	++	+++
Li-ion LTO	+	+	++	+	+++	+++
LIC	---	---	+++	++	+++	+++

Porównanie tabel 1 i 2 pozwala stwierdzić, że akumulatory kwasowe będą stosowane coraz rzadziej, choć i w tej technologii nie powiedziano jeszcze ostatniego słowa. Niklowe znajdują zastosowanie głównie w pracy rozruchowej w niskich temperaturach. Przyszłość zdecydowanie należy do akumulatorów litowo-jonowych różnych typów, które najlepiej spełniają postawione wymagania.

Ostatnim czynnikiem decydującym o zastosowaniu danego rodzaju ogniwa w danej aplikacji jest koszt. Przy czym do niedawna brano pod uwagę wyłącznie koszt zakupu. To ten parametr powoduje, że akumulatory kwasowe są wciąż powszechnie wykorzystywane. Jednak coraz częściej staje się wykorzystywanie do porównania kosztów akumulatorów metod uwzględniających nakład pracy podczas eksploatacji oraz koszty utylizacji. Główną metodą stosowaną tutaj jest metoda kosztu cyklu życia. Wtedy akumulatory litowo-jonowe, postrzegane jako drogie, stają się konkurencyjne w stosunku do kwasowych i niklowych. Lepiej też można uwzględnić stopień spełnienia wymagań technicznych w ocenie ekonomicznej.

Praca współfinansowana przez NCBR i NFOŚiGW w ramach projektu GEKON, umowa nr GEKON1/02/213518/37/2015.

### Literatura

1. *A review of battery technologies for automotive applications*. EUROBAT, dostęp on-line: [http://ewfa.org/sites/default/files/rev\\_of\\_battery\\_executive\\_web\\_1.pdf](http://ewfa.org/sites/default/files/rev_of_battery_executive_web_1.pdf)
2. Biczal P., *Hybrid energy storage systems in electric traction*. TTS Technika Transportu Szynowego, 10/2015, ISSN 1232-3829, pp. 63-69

**Autorzy:** dr hab. inż. Piotr Biczal; Instytut Maszyn Elektrycznych, Elektryczny, Politechnika Warszawska, Pl. Politechniki 1, 00-601 Warszawa, e-mail: [biczal@ee.pw.edu.pl](mailto:biczal@ee.pw.edu.pl)  
inż. Beata Antosiewicz; Instytut Maszyn Elektrycznych, Elektryczny, Politechnika Warszawska, Pl. Politechniki 1, 00-601 Warszawa  
mgr inż. Maciej Kwiatkowski; Impact Clean Power Technology S.A. ul. Warszawska 57, 05-820 Piastów, [maciej.kwiatkowski@icpt.pl](mailto:maciej.kwiatkowski@icpt.pl)