

SUPERKONDENSATORY JAKO MATERIAŁY DO MAGAZYNOWANIA ENERGII

prof. dr hab. Anna Lisowska-Oleksiak / Politechnika Gdańska

dr inż. Andrzej P. Nowak / Politechnika Gdańska

mgr inż. Monika Wilamowska / Politechnika Gdańska

1. WSTĘP

W ostatnich latach kryzys paliwowy oraz zmiany klimatyczne wymusiły na administracjach krajów o wysokim poziomie technicznym wprowadzenie zmian prawnych, obligujących do zmniejszenia emisji CO₂ i dywersyfikacji źródeł energii. Urządzenia wykorzystujące odnawialne źródła energii, tj. siłownie wiatrowe, stacje baterii słonecznych, są na etapie intensywnego rozwoju zarówno na poziomie badawczym, wdrożeniowym, jak i użytkowym. Połączenie wielu źródeł energii elektrycznej w jeden system wymaga odpowiednich urządzeń do jej magazynowania i konwersji. Kraje o dużym doświadczeniu z energetyką wiatrową i słoneczną proponują różne rozwiązania. Są nimi m.in. systemy ogniw galwanicznych z wykorzystaniem systemu tzw. RFC (ang. *redox flow cell*) oraz stacje kondensatorów elektrochemicznych. Technologie oparte na kondensatorach elektrochemicznych zostały już wdrożone na świecie [1]. Samochody o napędach hybrydowych również wyposażone są w superkondensatory, pełniące funkcję podzespołu o wysokiej gęstości mocy [2].

Kondensatory elektrochemiczne znane są od wielu lat. W 1957 roku Becker (General Electrics) opatentował konstrukcję kondensatora, w którym materiał węglowy o silnie rozwiniętej powierzchni stanowił materiał elektrodowy, a kwas siarkowy użyto jako elektrolit [3]. Z kolei rok 1970 traktuje się jako początek zastosowania kondensatorów elektrochemicznych (EC) w urządzeniach komercyjnych, kiedy to firma SOHIO podjęła próby wprowadzenia ich na rynek [4]. W latach 90. nastąpił ogromny wzrost badań naukowych i technologicznych dotyczących kondensatorów elektrochemicznych. Fakt ten należy wiązać z zastosowaniem EC w pojazdach elektrycznych i pojazdach z napędem hybrydowym. Wyczerpującym i szczegółowym źródłem informacji na temat kondensatorów elektrochemicznych jest monografia Conwaya [5].

2. ZASADY MAGAZYNOWANIA ENERGII W KONDENSATORACH ELEKTROCHEMICZNYCH

Energia elektryczna w urządzeniach elektrochemicznych zasadniczo może być magazynowana na dwa podstawowe sposoby:

1) przez wykorzystanie przemiany chemicznej

lub/oraz

2) bezpośrednio na drodze gromadzenia ładunku elektrostatycznego w obszarze złącza pomiędzy elektrodą a elektrolitem.

W pierwszym przypadku następuje zamiana energii reakcji chemicznej na energię elektryczną zgodnie z równaniem: $W = -z \times F \times E$ (W – praca, jaką można wykonać, z – ilość przeniesionych elektronów, F – stała Faradaya 96485 C/mol, E – zmiana potencjału). Przemianę tego typu nazywamy reakcją faradajowską. Urządze-

Streszczenie

Kondensatory elektrochemiczne, zwane także superkondensatorami lub ultrakondensatorami, magazynują energię w polu elektrycznym elektrochemicznej warstwy podwójnej. Zastosowanie elektrod o rozwiniętej powierzchni powoduje uzyskanie dużych wartości pojemności. Już od wielu lat dostępne są na rynku małe kondensatory elektrochemiczne, które stosowane są w niewielkich urządzeniach elektronicznych. Ogromny postęp w inżynierii materiałowej, ewoluującej w kierunku nanotechnologii, sprawia, iż

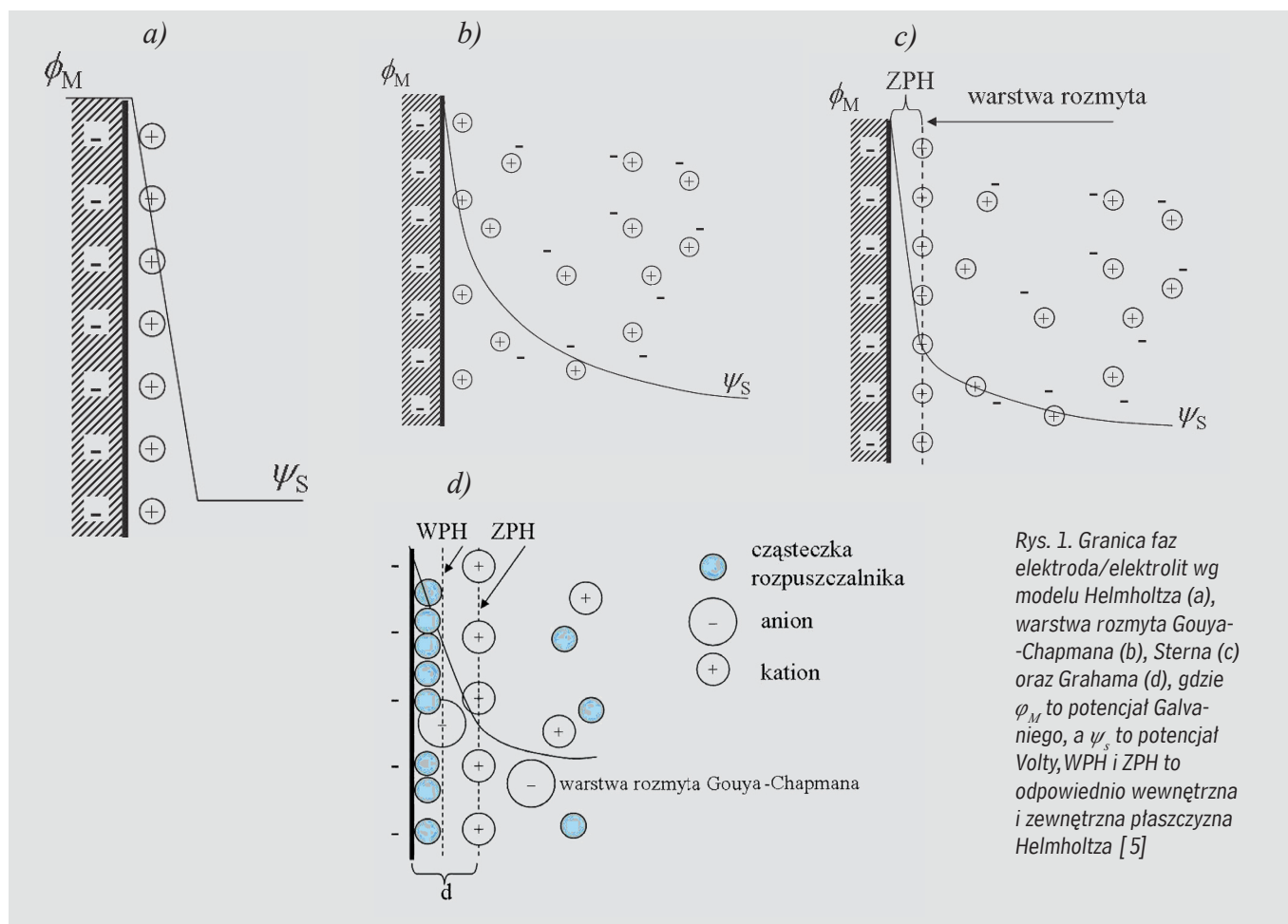
superkondensatory stają się coraz bardziej niezawodnymi urządzeniami współpracującymi zarówno z elektrowniami wiatrowymi, jak i systemami ogniw fotowoltaicznych. Doskonalenie technologii superkondensatorów polega na poprawieniu ich parametrów pracy, zwłaszcza zakresu napięć, oraz uzyskiwanej mocy. W niniejszej pracy przedstawione zostaną podstawowe zasady działania superkondensatorów, charakterystyka ich pracy oraz przykłady ich użycia.

nia wykorzystujące reakcje faradajowskie to ogniwa galwaniczne (baterie*, akumulatory, ogniwa paliwowe) oraz superkondensatory redoks.

Drugi mechanizm gromadzenia ładunku, tzw. niefaradajowski, jest podstawą działania kondensatora elektrochemicznego. Na granicy faz elektroda/elektrolit istnieje kondensator elektrycznej warstwy podwójnej *dl* (ang. *double layer*), utworzony z ładunków na metalu i jonów o odmiennym znaku w roztworze bezpośrednio sąsiadującym z powierzchnią elektrody.

MODELE ELEKTRYCZNEJ WARSTWY PODWÓJNEJ

Koncepcja tworzenia się elektrycznej warstwy podwójnej ma swoją wielowiekową historię. W czasach nowożytnych jej początek stanowią prace Helmholtza (1857) dotyczące faz zdyspergowanych. Rozwój myśli naukowej w tej dziedzinie przedstawiono na rys. 1. Pierwsze modele uwzględniają fakt porządkowania ładunków (Helmholtz 1857) (rys. 1a) oraz efekt rozmycia warstwy na skutek ruchów termicznych (model Gouya-Chapmana) (rys. 1b). Model Sterna (1927) (rys. 1c) łączy te dwa podejścia. W efekcie teoria mówi, iż mamy do czynienia z dwoma kondensatorami połączonymi szeregowo. Są to: kondensator warstwy sztywnej o pojemności C_H i kondensator warstwy rozmytej o pojemności C_{dyf} . Całkowita pojemność elektrycznej warstwy podwójnej wynosi: $C_{dl}^{-1} = C_H^{-1} + C_{dyf}^{-1}$. Wynika z tego, że porządkowanie ładunków w miejscu kontaktu dwóch przewodzących elektrycznie faz prowadzi do generowania kondensatora. Pojemność C kondensatora elektrycznej warstwy podwójnej jest zależna od zgromadzonego ładunku w odpowiednim zakresie potencjałów $C = dq/dV$ i zależy od jego geometrii (powierzchni A i odległości okładek d). Kondensator granicy faz ma grubość d zależną od rozmiarów cząsteczek rozpuszczalnika i w tym przypadku d oznacza średnicę tychże cząsteczek lub ich klastrów. Prace Grahama (1947), model Parsonsa (1978) uwzględniają obecność dipoli rozpuszczalnika w kondensatorze granicy faz, patrz (rys. 1d).



* Teoretycznie baterią powinno nazywać się zestaw ogniw połączonych szeregowo lub równolegle, lecz potocznie utarło się stosowanie nazwy bateria dla ogniwa jako komercyjnego wyrobu powszechnego użytku [6].

2.1. SUPERKONDENSATORY ELEKTRYCZNEJ WARSTWY PODWÓJNEJ ($ECDL_{ang}$)

W literaturze grupa kondensatorów elektrochemicznych, wykorzystujących ładunek elektrycznej warstwy podwójnej, jest znana pod nazwą ECDL (*ang. electrochemical double layer capacitors*).

Pojemność kondensatora jest proporcjonalna do powierzchni okładek kondensatora oraz stałej dielektrycznej substancji zawartej między okładkami i odwrotnie proporcjonalna do odległości między okładkami:

$$C = \frac{A \times \epsilon_0 \times \epsilon_r}{d} \quad (1)$$

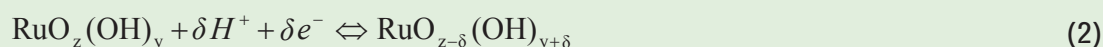
gdzie C to pojemność [Farad], A – powierzchnia elektrod, d – odległość między okładkami kondensatora, ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni, a ϵ_r – względna przenikalność elektryczna ośrodka.

Pojemność C_{dl} kondensatora elektrycznej warstwy podwójnej metal (np. Pt, Au)/elektrolit zawarta jest w granicach $16\text{--}50 \mu\text{F}/\text{cm}^2$. Wielkość ta nie jest atrakcyjna z praktycznego punktu widzenia.

Zgodnie z zależnością (1) znaczący wzrost pojemności C_{dl} uzyskuje się, stosując materiały elektrodowe o tzw. rozwiniętej powierzchni. Są to węgle przewodzące o strukturze porowatej, tlenki metali przejściowych oraz polimery elektroaktywne. Węgiel aktywny o powierzchni $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ i pojemności warstwy podwójnej $C_{dl} 15 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ pozwala uzyskać pojemność właściwą wynoszącą 150 F/g ($1000 \text{ m}^2/\text{g} \times 10\,000 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \times 15 \mu\text{F}/\text{cm}^2 = 150 \text{ F/g}$). Stąd nazwa „superkondensator” lub „ultrakondensator” dla urządzeń wykorzystujących pojemność warstwy podwójnej elektrod z materiałów o wysoko rozwiniętej powierzchni. W praktyce stosuje się warstwy elektrodowe grubości kilku mikrometrów.

2.2. KONDENSATORY ELEKTROCHEMICZNE WYKORZYSTUJĄCE TZW. PSEUDOPOJEMNOŚĆ REDOKS

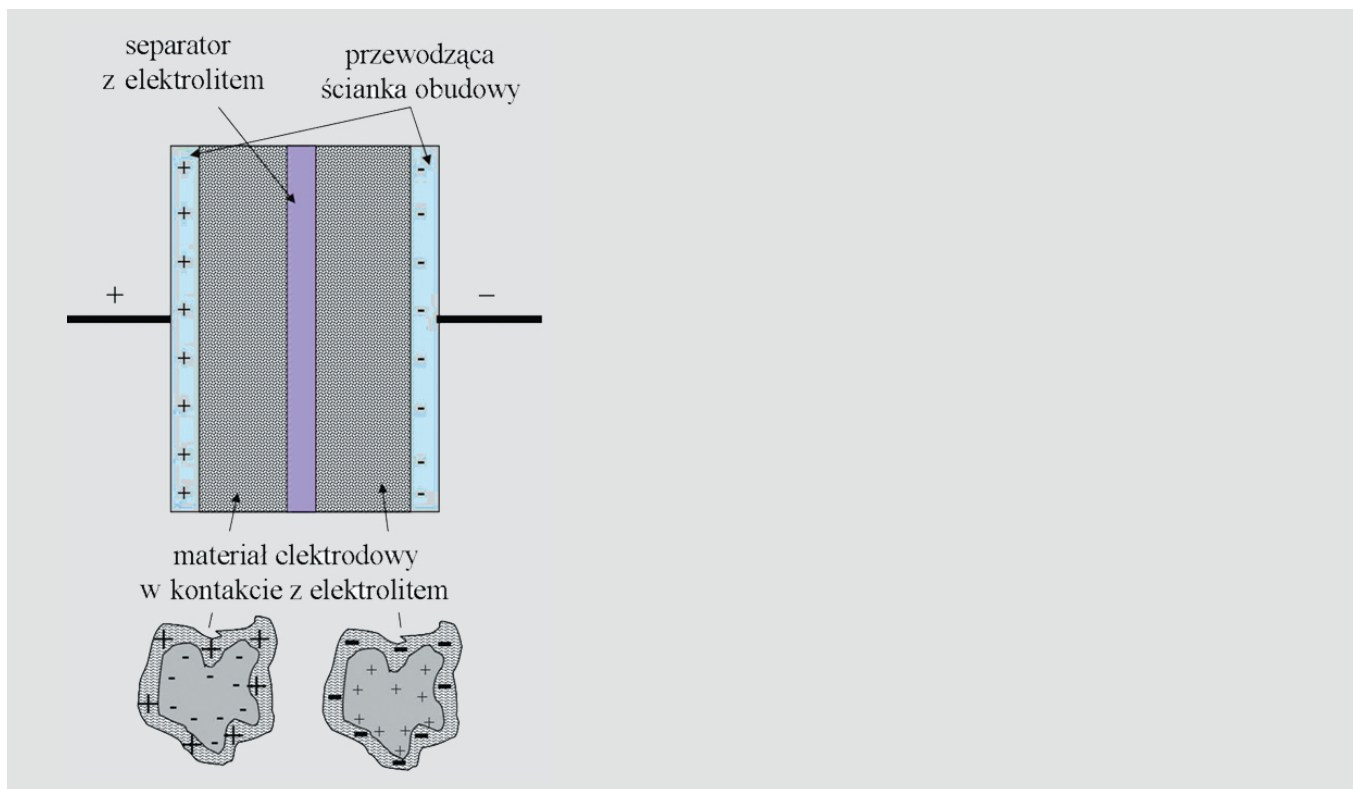
Kondensatory elektrochemiczne wykorzystujące tzw. pseudopojemność redoks to drugi typ kondensatorów elektrochemicznych w praktyce szeroko stosowanych. Są to tzw. kondensatory elektrochemiczne typu redoks (*ang. redox electrochemical capacitors*) lub superkondensatory redoks (*ang. redox supercapacitors*). Urządzenia te obok wykorzystania ładunku elektrycznej warstwy podwójnej są źródłem prądu pochodzącego od reakcji przeniesienia ładunku, dotyczącej substancji zaadsorbowanych na powierzchni i ulegających przemianie w swej naturze faradajowskiej. Różnica pomiędzy zwykłą reakcją redoks a omawianym zjawiskiem leży w dostępności substratu. W kondensatorach przeniesienie ładunku jest ściśle limitowane do powierzchni elektrody. Proces zachodzi wieloelektronowo i w szerokim przedziale potencjałów. W tego typu urządzeniach wykorzystuje się materiały zdolne do wchodzenia w powierzchniowe reakcje redoks (np. tlenki rutenu, polimery elektroaktywne). Przykładem reakcji, w której wykorzystujemy pseudopojemność redoks, jest reakcja przebiegająca na powierzchni tlenków rutenu, gdzie powierzchniowe grupy hydroksylowe w środowisku kwaśnym ulegają redukcji zgodnie z równaniem [7]:



Warto zauważyć, że stechiometria tej reakcji jest bardzo złożona, a warstwa powierzchniowa grup --OH traktowana jest jako całość. Współczynniki stechiometryczne reakcji odnoszą się do monowarstwy grup aktywnych powierzchni.

3. RÓŻNICE MIĘDZY KONDENSATORAMI A OGNIWAMI GALWANICZNYMI

Zarówno kondensatory, jak i ogniwa galwaniczne zbudowane są z dwóch elektrod oddzielonych elektrolitem (rys. 2). Różnica dotyczy charakteru użytych materiałów elektrodowych i mechanizmu gromadzenia ładunku. Dla kondensatorów elektrochemicznych najczęściej obie elektrody wykonane są z tego samego materiału. W ogniwach galwanicznych elektrody różnią się pod względem chemicznym (materiał anodowy jest inny niż materiał katodowy).

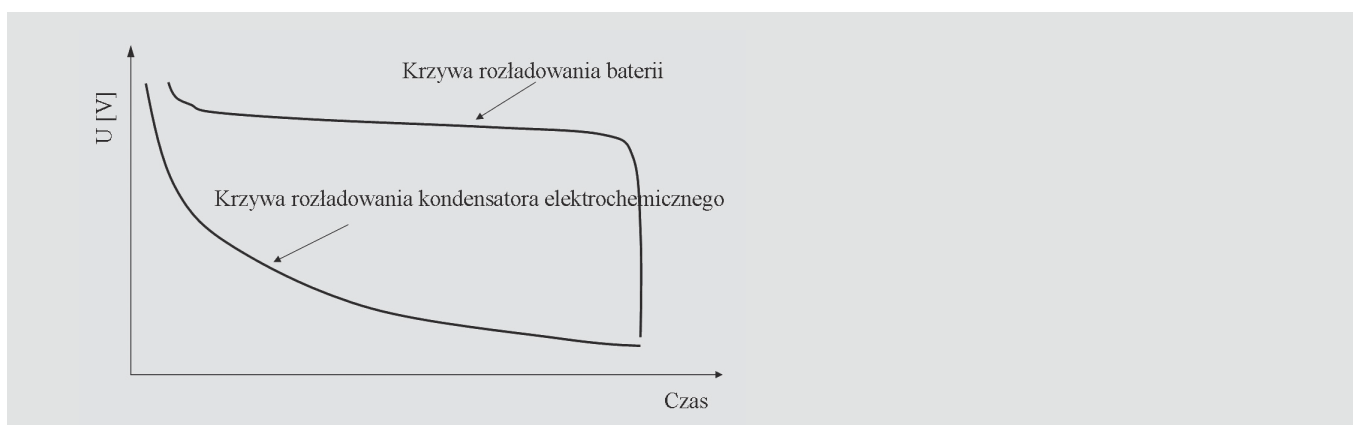


Rys. 2. Schemat budowy kondensatora elektrochemicznego

W procesie ładowania i rozładowania kondensatora obserwuje się ciągłą wewnętrzną zmianę potencjału elektrody V zgodnie z zależnością:

$$C = q/V \text{ lub } q = C \times V \quad (3)$$

Krzywe rozładowania kondensatora elektrochemicznego i baterii przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Krzywe rozładowania kondensatora elektrochemicznego i baterii

W przeciwieństwie do tego ładowanie/rozładowanie ogniw galwanicznych odbywa się przy zachowaniu stałego potencjału, za wyjątkiem stanu naładowania 0 i 100% (rys. 2).

Konsekwencją wynikającą z opisaney różnicy jest fakt, że energia E , zgromadzona przez kondensator, wynosi:

$$E = 1/2 C \times U^2 \text{ lub } E = 1/2 q \times U \quad (4)$$

podczas gdy dla baterii poziom energii wynosi $q \times U$, czyli jest dwukrotnie wyższy od poziomu energii w kondensatorze o takim samym napięciu $U = \Delta V$.

Moc superkondensatora wyraża równanie:

$$P = \frac{U^2}{4 \times R} \quad (5)$$

gdzie R to rezystancja urządzenia.

Z równania (4) wynika, że wzrost wartości energii zgromadzony w kondensatorze może być osiągnięty poprzez:

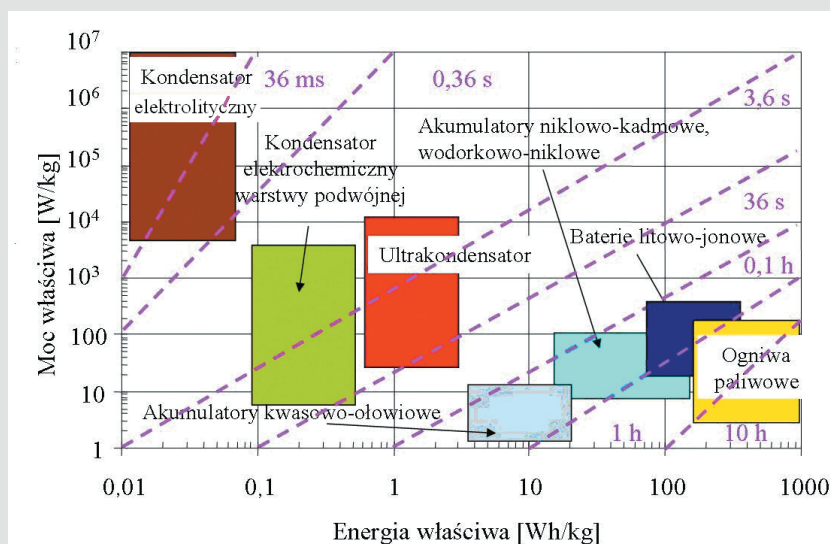
- 1) wzrost pojemności, możliwy do osiągnięcia przez
 - a) zwiększenie powierzchni aktywnej elektrod
 - b) zmniejszenie odległości między okładkami
 - c) zwiększenie względnej przenikalności dielektrycznej ośrodka
- 2) zwiększenie napięcia.

Zgodnie z równaniem (5) zwiększenie mocy można uzyskać w wyniku:

- 1) zwiększenia napięcia
- 2) zmniejszenia rezystancji.

Konstruując urządzenie, mamy wpływ na wielkość mocy użytecznej poprzez dobór materiałów, geometrii elektrod i elektrochemicznej stabilności elektrolitu.

Kondensatory elektrochemiczne plasują się wśród urządzeń do magazynowania i konwersji energii pomiędzy kondensatorami elektrolitycznymi* a bateriami. Ilustruje to załączony diagram Ragone'a (rys. 4).



Rys. 4. Diagram Ragone'a dla różnych urządzeń elektrochemicznych [8, 9]

Stałe czasowe (RC) (linie przerywane na diagramie) wskazują, że czas ładowania i rozładowania odwracalnych ogniw galwanicznych jest znacznie dłuższy niż czas tych procesów w kondensatorach elektrochemicznych.

Baterie, jak i niskotemperaturowe ogniwa paliwowe są urządzeniami o niskiej gęstości mocy w porównaniu z mocą kondensatorów elektrolitycznych. Jednocześnie baterie mają wyższą wartość gęstości energii niż kondensatory. Zastosowanie w urządzeniu zarówno baterii, jak i kondensatorów elektrochemicznych może po-

* W przeciwieństwie do kondensatorów elektrochemicznych pojemność małych kondensatorów elektrolitycznych (o wymiarze kilku cm) jest bardzo mała, rzędu mikro- lub nanofaradów. Kondensatory elektrolityczne zawdzięczają swoją nazwę od sposobu utworzenia separatora między okładkami. Kondensatory elektrolityczne to urządzenia, w których okładki utworzone są z takich metali, jak aluminium, tantal, tytan, niob itp. Okładki są oddzielone cienkim filmem tlenku danego metalu o grubości 10–100 nm. Film ten otrzymuje się na drodze polaryzacji anodowej obu okładek. Kondensatorów elektrolitycznych nie należy mylić z kondensatorami elektrochemicznymi.

lepszyć parametry pracy takiego urządzenia. Liczba cykli ładowania-rozładowania jest dla kondensatorów elektrochemicznych wielokrotnie wyższa w porównaniu z liczbą cykli ładowania akumulatorów. Wynika to z faktu, iż w ogniach podczas reakcji przeniesienia ładunku dochodzi do tworzenia nowych faz oraz utrudnień wynikających z procesów ubocznych. Kondensator elektrochemiczny wykorzystuje głównie ładunek elektrostatyczny, zatem z teoretycznego punktu widzenia proces ładowania i rozładowania mógłby zachodzić w nieskończoność.

4. MATERIAŁY ELEKTRODOWE

4.1. WĘGLE PRZEWODZĄCE

Materiały węglowe są często stosowanym materiałem elektrodowym przy konstrukcji kondensatorów elektrochemicznych [5, 7, 10]. Jak wiadomo, zdolność do przewodzenia prądu elektrycznego zawdzięczają obecności płaszczyzn grafenowych, w których atomy węgla C posiadają hybrydyzację sp^2 (w przeciwieństwie do nieprzewodzących odmian węgla sp^3). Rezystancja grafitu czy tzw. węgla miękkich lub węgla typu HOPG (ang. *highly oriented pyrolytic graphite*) jest wysoka i zależy od budowy i porowatości.

Węgłe aktywne są materiałami o bardzo silnie rozwiniętej powierzchni. W skali technicznej są otrzymywane z surowców naturalnych, tj. paliw kopalnych oraz materiałów organicznych (np. drewno, pestki owoców, skorupy orzechów). W warunkach laboratoryjnych stosuje się również sacharozę oraz żywice syntetyczne.

Dostępne są elektrody węglowe o powierzchni sięgającej nawet $2500 \text{ m}^2/\text{g}$. Materiał węglowy stosuje się w postaci proszku, tkanin, filcu czy włókien. Magazynowanie energii elektrycznej na elektrodach węglowych jest pojemnościowe w elektrochemicznej warstwie podwójnej. Są to tzw. elektrochemiczne kondensatory ECDL.

Postęp w dziedzinie nanotechnologii pozwala rokować, iż w najbliższych latach użycie nanomateriałów węglowych w postaci nanorurek jednościennej i wielościennej czy nanocząstek pozwoli uzyskać lepsze rezultaty w odniesieniu do pojemności właściwej materiałów elektrodowych.

4.2. TLENKI METALI

Zastosowanie tlenków metali przejściowych jako elektrod w konstrukcji kondensatorów elektrochemicznych typu redoks jest powszechne. Najczęściej używane są tlenki rutenu (RuO_x) [5, 7], dla których wartość x zmienia się w zakresie od 1,9 do 2,0. Pojemność właściwa kondensatorów z tlenkiem rutenu może osiągać wartość nawet do 720 F/g . Jest to najwyższa osiągnięta wartość pojemności właściwej wśród znanych materiałów elektrodowych, jednakże stosowanie RuO_x jest ograniczone ze względu na wysoką cenę tego materiału. Obiecujące wydaje się być stosowanie tlenków manganu, tlenków żelaza, indu, cyny, wanadu oraz ich połączeń, dla których wartość pojemności właściwej jest na poziomie ok. 150 F/g . Superkondensator składający się z Fe_3O_4 jako elektrody ujemnej oraz z MnO_2 jako elektrody dodatniej cechuje się napięciem pracy do $1,8 \text{ V}$ w elektrolicie wodnym. Pojemność właściwa takiego urządzenia to $21,5 \text{ F/g}$, jego rzeczywista moc właściwa osiąga wartość 405 W/kg , a energia właściwa wynosi $8,1 \text{ Wh/kg}$ [11].

Materiały tlenkowe, tak jak i węgle, są stabilne w trakcie tysięcy cykli ładowania i rozładowania.

4.3. POLIMERY PRZEWODZĄCE

Polimery przewodzące, zwane również syntetycznymi metalami, reprezentują bardzo atrakcyjną klasę materiałów elektrodowych, które znalazły zastosowanie w superkondensatorach [5, 12]. Są to przewodniki mieszane elektronowo-jonowe. Do najczęściej stosowanych polimerów należą polipirol oraz pochodne tiofenu. Do zalet tych materiałów należy szybki przebieg procesu utleniania i redukcji w trakcie ładowania i rozładowania urządzenia, wysoka wartość gęstości ładunku ($\sim 500 \text{ C/g}$) oraz łatwa synteza materiału elektrodowego.

Polimery przewodzące dzięki swym właściwościom do gromadzenia energii mają zastosowanie jako materiały elektrodowe w superkondensatorach. Do celów tych można wykorzystać zarówno polimery typu p , jak i typu n . Rudge i współpracownicy podzielili superkondensatory polimerowe na 3 typy:

Typ I – w którym obie elektrody wykonane są z tego samego polimeru p-przewodzącego. W stanie całkowitego naładowania jedna elektroda jest w stanie utlenionym (naładowana dodatnio), a druga w stanie neutralnym (pozbawiona ładunku). Różnica potencjałów między elektrodami wynosi ok. $0,8-1,0\text{ V}$.

Typ II – w którym elektrody zrobione są z różnych polimerów typu p, posiadających inne potencjały utlenienia i redukcji. Użycie różnych polimerów pozwala poszerzyć zakres potencjałów.

Typ III – zawiera w budowie zarówno polimer przewodzący typu p [np. politiofen, poli(3-metylotiofen)], jak i polimer przewodzący typu n (pochodne bitienyłu). III typ superkondensatorów oferuje szeroki zakres potencjałów roboczych (do 3 V dla elektrolitów niewodnych) oraz odpowiednio większą gęstość energii.

Polimery przewodzące stosowane jako elektrody w kondensatorach elektrochemicznych można modyfikować w celu polepszenia ich parametrów pracy. Czynnikiem modyfikującym są najczęściej tlenki metali przejściowych, manganu oraz wanadu. Inną możliwość daje modyfikacja polimerów przewodzących, która polega na przyłączeniu do łańcucha polimerowego grupy redoks. Kolejny sposób to wprowadzenie do matrycy polimerowej substancji nieorganicznej, która spełnia rolę wielocentrowego układu redoks [13–15]. Znane są również metody modyfikacji polimerów elektroaktywnych nanomateriałami [16]. We wszystkich przypadkach aktywność materiału kompozytowego pochodzi zarówno od polimeru elektroaktywnego, jak i od czynnika modyfikującego.

5. ELEKTROLITY

Rodzaj elektrolitu stanowi kolejne kryterium klasyfikacji kondensatorów elektrochemicznych. Spośród używanych stosuje się elektrolity wodne i niewodne (z rozpuszczalnikami aprotycznymi oraz ciecze jonowe).

5.1. ELEKTROLITY WODNE

Elektrolity wodne ograniczają możliwe do uzyskania napięcie pracy do 1 V , gdyż powyżej tej wartości w trakcie ładowania na elektrodzie polaryzowanej dodatnio następuje rozkład cząsteczki H_2O z wydzielaniem tlenu, a na elektrodzie polaryzowanej ujemnie rozkład cząsteczki wody z wydzielaniem wodoru. Zaletą stosowania elektrolitów wodnych jest wysoka wartość przewodnictwa (np. $0,8\text{ S/cm}$ dla kwasu siarkowego) oraz prosty sposób oczyszczania i suszenia materiałów elektrodowych podczas procesu produkcyjnego. Ponadto cena elektrolitu wodnego jest znacznie niższa niż cena elektrolitu niewodnego.

Aby uniknąć problemów związanych ze zmniejszeniem efektywności ładowania superkondensatora, stosuje się elektrolit o wysokim stężeniu, gwarantującym odpowiednio niską rezystancję.

5.2. ELEKTROLITY NIEWODNE Z ROZPUSSZCZALNIKAMI APROTYCZNYMI

Zastosowanie jako rozpuszczalnika cieczy organicznej, która nie zawiera w cząsteczce aktywnego chemicznie atomu wodoru, zwiększa zakres stabilności układu (brak rozkładu cząsteczek rozpuszczalnika). Daje to możliwość uzyskania większego napięcia roboczego. Im wyższa wartość napięcia, tym większa ilość energii może być zgromadzona [patrz równanie (4)]. Elektrolity niewodne pozwalają na uzyskanie napięcia do 3 V . Ograniczeniem w uzyskaniu wyższej wartości napięcia jest obecność śladów wody w elektrolicie.

Niekorzystnym efektem stosowania elektrolitów niewodnych jest wysoka wartość rezystancji właściwej, skutkiem czego jest spadek mocy kondensatora. Niemniej spadek mocy jest najczęściej kompensowany przez możliwość uzyskania wyższego napięcia.

5.3. CIECZE JONOWE

Ciecze jonowe są to sole, które w temperaturze pokojowej występują w stanie ciekłym. Niska temperatura topnienia wynika z budowy tych soli, które składają się z dużego i niesymetrycznego kationu (np: 1-alkilo-3-metylimidazoliowy, 1-alkilopirydyniowy) oraz niewielkiego anionu. Zakres ich stabilności elektrolitycznej zależy

jedynie od rodzaju jonów tworzących ciecz jonową. Odpowiedni dobór jonów prowadzi do otrzymania superkondensatorów pracujących w szerokim oknie potencjałowym. Znane są superkondensatory, których napięcie pracy wynosi 3 V. Ograniczeniem w stosowaniu cieczy jonowych jest niska wartość przewodnictwa, rzędu mS/cm . Niska wartość przewodnictwa powoduje, że ciecze jonowe stosowane są w kondensatorach elektrochemicznych pracujących w wyższych temperaturach.

6. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ SUPERKONDENSATORÓW

Kondensatory elektrochemiczne stają się coraz bardziej niezawodnymi urządzeniami współpracującymi zarówno z elektrowniami wiatrowymi, jak i systemami ogniw fotowoltaicznych [17]. Zdolność superkondensatorów do bardzo szybkiego ładowania i rozładowania energii, którą gromadzą, sprawia, że urządzenia te bardzo szybko dostosowują się do zmian obciążenia. Superkondensatory znalazły zastosowanie w sprzęcie domowego użytku, narzędziach elektronicznych, telefonach komórkowych, aparatach fotograficznych itp. Wykorzystywane są również w układach zasilania samochodów o napędach elektrycznych. W przemyśle motoryzacyjnym główne działanie kondensatorów elektrochemicznych polega na wspomaganiu klasycznych akumulatorów poprzez działanie jako dodatkowy bufor podczas przyspieszania oraz hamowania. Zastosowanie takiego rozwiązania obniża koszty eksploatacji pojazdu, co wynika z przedłużenia żywotności akumulatora. Superkondensatory zabezpieczają akumulator przed szkodliwym wpływem obciążeń szczytowych. Odzysk energii hamowania przez superkondensator również obniża koszty eksploatacyjne poprzez zmniejszenie zużycia energii.

7. PODSUMOWANIE

Superkondensatory dynamicznie wkraczają na rynek energetyczny. Unormowania prawne w obszarze ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju obligują do wykorzystywania odnawialnych źródeł energii, co z kolei generuje zapotrzebowanie na niezawodne systemy do magazynowania i konwersji energii.

Kondensatory elektrochemiczne są zdolne do szybkiego ładowania i rozładowania oraz cechują się długim czasem życia, lecz nie są w stanie zmagazynować tak dużej energii elektrycznej, jak akumulatory czy ogniwa paliwowe. Porównanie cech kondensatorów elektrochemicznych i akumulatorów wykazuje, że urządzenia te wzajemnie się uzupełniają. Właśnie dlatego bardzo dobrym rozwiązaniem jest połączenie superkondensatorów z chemicznymi źródłami prądu.

BIBLIOGRAFIA

1. <http://www.dailyreckoning.com.au/supercapacitors/2008/02/28/>
2. Shukla A.K., Arico A.S., Antonucci V., *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 5, 2001, s. 137.
3. Becker H.E., U.S. Patent 2 800 616 (1957).
4. Boos D.I., U.S. Patent 3 536 963 (to Standard Oil, SOHIO) (1970).
5. Conway B.E., *Electrochemical Supercapacitors*, Plenum Publishing, New York 1999.
6. Czerwiński A., *Akumulatory, baterie, ogniwa*, WKŁ, Warszawa 2005.
7. Frąckowiak E. and Bequin F., *Carbon*, vol. 39, 2001, s. 937.
8. Kötz R. and Carlen M., *Electrochim. Acta*, vol. 45, 2000, s. 2483.
9. Plitz I., Dupasquier A., Badway F., Gural J., Pereira N., Gmitter A., Amatucci G.G., *Appl. Phys. A*, vol. 82, 2006, s. 615.
10. Lota G., Lota K., Frąckowiak E., *Electrochem. Commun.*, vol. 53, 2008, s. 2210.
11. Cottineau T., Toupin M., Delahaye T., Brousse T., Belanger D., *Appl. Phys. A*, vol. 82, 2006, s. 599.
12. Mastragostino M., Arbizzani C., Soavi F., *Solid State Ion.*, vol. 148, 2002, s. 493.
13. Gómez-Romero P., Chojak M., Kulesza P.J., Asensio J.A., *Electrochem. Commun.*, vol. 5, 2003, s. 149.
14. Gómez-Romero P., Cuentas-Gallegos K., Lira-Cantú M., *Mater. J. Sci.*, vol. 40, 2005, s. 1423.
15. Lisowska-Oleksiak A., Nowak A.P., *J. Power Sources*, vol. 173, 2007, s. 829.
16. Arico A.S., Bruce P., Scrosati B., Tarascon J.-M., Schalkwijk van W., *Nat. Mater.*, vol. 4, 2005, s. 366.
17. Lisowska-Oleksiak A., Wilamowska M., Szybowska K., *Przegląd Komunalny*, Sierpień 2008.