



# Kondensatory są super!

*Od wynalezienia butelki lejdejskiej, pierwowzoru kondensatora, minął już długi czas, jednak w dalszym ciągu zasada gromadzenia ładunku elektrycznego pozostała zbliżona do pierwowzoru – kondensator składa się z dwóch przewodzących elektrod przedzielonych dielektrykiem.*

Postęp techniczny spowodował rozwój obu elementów kondensatora, możliwe stało się wykonanie cieńszych elektrod umożliwiających zwiększenie czynnej powierzchni okładzin przy zachowaniu niewielkiego rozmiaru obudowy, a dielektryki rozdzielające mają wyższe stałe dielektryczne i dopuszczalne napięcia pracy. Pojawiają się też elektrochemiczne sposoby gromadzenia ładunku zbliżające działanie kondensatora do baterii lub akumulatora. Wszystko to prowadzi do miniaturyzacji oraz niewiarogodnego wręcz zwiększenia pojemności, której nie można było się spodziewać jeszcze kilka lat temu. Nikogo nie dziwi kondensator ceramiczny o pojemności 330  $\mu\text{F}$  lub superkondensatory o pojemnościach mierzonych w tysiącach faradów.

Pamiętam, jak w technikum dostałem burę na lekcji elektrotechniki za „szerzenie herezji”, gdy omawiane były kondensatory – powiedziałem, że istnieją niewielkie kondensatory o pojemnościach 0,1 F. Nauczyciel twierdził, że takiej pojemności nie ma na całej kuli

ziemskiej, a w praktyce jako elektryk miał do czynienia tylko z kondensatorami o pojemności co najwyżej kilku...kilkudziesięciu  $\mu\text{F}$ , stosowanymi w układach kompensacji współczynnika mocy w świetłówkach i rozdzielniach lub używanymi przy rozruchu silników elektrycznych. Jakie było jego zdziwienie, gdy na następną lekcję przyniosłem kondensatory 0,047 F/4,5 V i 0,1 F/4,5 V o rozmiarach zbliżonych do guzika, które ówczesznie były stosowane w magnetowidach do podtrzymania pamięci programów i ustawień programatora nagrywania czasowego. Pamięci nieulotne EEPROM nie były jeszcze powszechne ze względu na wysokie koszty, a spotykane podtrzymanie baterijne zawartości pamięci było kłopotliwe w eksploatacji. Pomimo przedstawienia namacalnych dowodów niesmak pozostał, a ja tak niefortunnie rozpocząłem swoją przygodę z superkondensatorami.

**Czym jest superkondensator, ultrakondensator, pseudokondensator?** Odpowiedź jest prosta zawsze jest to rodzaj kondensatora elektrolitycznego o bardzo dużej pojemności, dochodzącej do kilku tysięcy faradów, przy dopuszczalnym napięciu pracy do kilku woltów (obecnie) na celę. Pojemność ta może być osiągnięta w superkondensatorach za pomocą technologii EDLC bazującej na elektrostatycznym gromadzeniu ładunku lub w przypadku pseudokondensatorów na elektrochemicznym gromadzeniu ładunku. Dostępne są też kondensatory hybrydowe, w których zastosowano połączenie wymienionych technologii.

**Jakie parametry cechują superkondensatory?** Podobnie jak dla wszystkich kondensatorów podstawowymi parametrami są: pojemność, napięcie pracy, zakres temperatur i rezystancja szeregową. W przypadku superkondensatorów dodatkowo specyfikowane są: maksymalne prądy ładowania i rozładowania [A, kA], często podawana jest moc szczytowa [W, kW], jaką można obciążyć kondensator, liczba cykli ładowania, prąd upływu [mA,  $\mu$ A] oraz wartość przechowywanej energii w [Wh] i przeliczenie jej na objętość lub masę kondensatora [Wh/m<sup>3</sup>, Wh/kg]. Dla kondensatorów hybrydowych opartych na związkach litu (LIC) analogicznie jak w przypadku akumulatorów litowych specyfikowane jest najniższe dopuszczalne napięcie w zaciskach. Poniżej tego napięcia procesy chemiczne zachodzące w kondensatorze prowadzą do jego degradacji i jeżeli stan ten trwa dłużej, prowadzi do nieodwracalnego zniszczenia (dosyć kosztownego) elementu. Te podstawowe parametry specyfikują praktycznie wszyscy producenci, ułatwia to dobór lub porównanie właściwości elementów.

**Dlaczego superkondensatory są tematem coraz większego zainteresowania?** Zjawisko ma co najmniej trzy przyczyny, ze wspólnym problemem bazowym, jakim jest eliminacja chemicznych źródeł energii.

Pierwsza przyczyna dotyczy urządzeń konsumenckich, gdzie kondensatory jeszcze nie mogą całkowicie zastąpić, ale już współpracują z bateriami lub akumulatorami, tworząc hybrydowe układy zasilania lub podtrzymania zasilania. Znajdują zastosowania w dyskach SSD, zasilaczach bezprzerwowych UPS, telefonach komórkowych, a nawet w kartach zbliżeniowych, pozwalając połączyć najlepsze cechy ogniw elektrochemicznych, takie jak wysoka gęstość energii, niski koszt, z zaletami superkondensatorów: **niską rezystancją wewnętrzną, możliwością przejmowania i oddawania sporych mocy chwilowych, dużą trwałością, brakiem efektu pamięci i odpornością na warunki środowiskowe.** Podczas eksploatacji superkondensatory nie wymagają żadnych szczególnych zabiegów ze strony obsługi typu formowanie, utrzymywanie minimalnego ładunku podczas użytkowania i przechowywania (z wyjątkiem superkondensatorów hybrydowych).

Sporą część aplikacji mogą stanowić urządzenia Internetu Rzeczy IoT i inteligentne sieci pomiarowe *Smart Metering*, gdzie superkondensatory współpracując z układami pozyskiwania energii z otoczenia (*Energy Harvesting*) mogą odmienić sposób projektowania układów zasilania. Zwłaszcza, że urządzenia mikroprocesorowe pobierają coraz mniejsze moce i stwarzają perspektywę całkowitej eliminacji kłopotliwych w eksploatacji źródeł chemicznych.

Także branża oświetleniowa korzysta z superkondensatorów do magazynowania energii. Pojawiają się oprawy oświetlenia ulicznego LED z autonomicznym zasilaniem w postaci paneli fotoelektrycznych i magazynu energii opartej na baterii superkondensatorów oraz oprawy oświetlenia awaryjnego i kierunkowego z podtrzymaniem superkondensatorowym w miejsce zawodnych akumulatorów NiCd, NiMh, itd.

Drugi powód to przemysł transportowy, gdzie tworzone są hybrydowe układy zasilania i to nie tylko jako połączenie ogniw chemicznych z superkondensatorami, co wydaje się rozwiązaniem naturalnym, ale także w transporcie szynowym przy współpracy sieci trakcyjnej (przewodowej) i baterii superkondensatorów. Przykładem może być pomysł na „bezprowadowy” tramwaj działający na krótkich odcinkach pozbawionych trakcji ze względów technicznych lub nawet estetycznych. Problem szczególnie istotny w zabytkowych centrach miast dbających o wizerunek, gdzie torowisko w brukowanej ulicy jeszcze jakoś ujdzie, ale wisząca trakcja i słupy wsparcze nie dodają uroku starówkom.

Moduły superkondensatorów znajdują zastosowanie w transporcie kolejowym, czy to w systemach wspomagania rozruchu silników trakcyjnych, czy w systemach KERS (odzysku energii kinetycznej), także w lokomotywach Diesla. Oczywiście starsze tramwaje i pociągi umożliwiają odzysk energii hamownia, lecz musi być spełniony warunek odebrania jej przez inny pojazd w tym samym fragmencie sieci, co jest dosyć trudne do zaplanowania – gdy np. jeden tramwaj

hamuje, drugi musi jednocześnie przyspieszać, aby wygenerowaną energię pochłonąć. W przeciwnym wypadku nadmiarowa energia musi być wytracona bezpowrotnie w rezystorach, aby nie spowodować nadmiernego wzrostu napięcia w trakcji zasilającej, gdyż podstacje zasilające raczej nie mają możliwość zwrotu energii do sieci energetycznej, co pewnie ulegnie zmianie w nieodległej przyszłości.

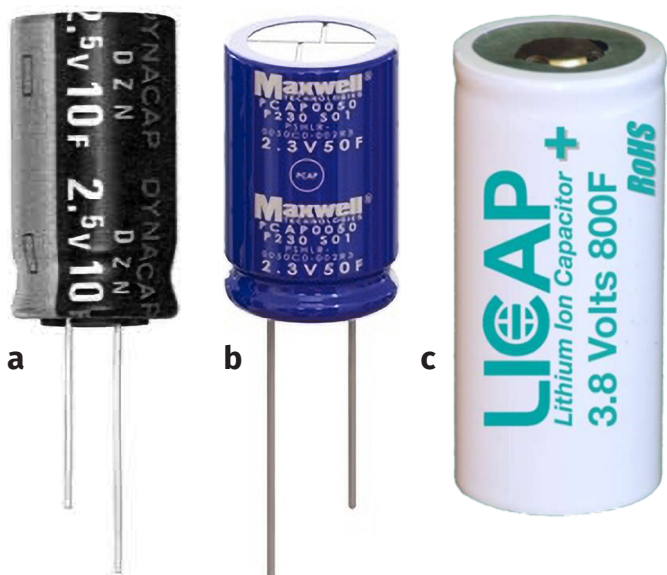
Lokalne odzyskiwanie energii i gromadzenie w modułach superkondensatorowych uwalnia od konieczności „synchronizacji” odzysku pojazdu hamującego i poboru pojazdu przyspieszającego, co prowadzi nawet do 20% oszczędności energii elektrycznej, pomijając wpływ na trwałość elementów mechanicznych takich jak tarcze i klocki hamulcowe. W samochodach, nie tylko holidach F1, które pobierają coraz większą ilość energii elektrycznej, także spotykane są rozwiązania oparte na bateriach superkondensatorów, wspomagające system zasilania pojazdu oraz umożliwiające odzysk energii podczas hamowania. Pojawiają się autonomiczne autobusy z zasilaniem tylko z superkondensatorów, lecz wymagają one dodatkowej infrastruktury ładującej, ponieważ pojemności w dalszym ciągu nie pozwalają zgromadzić wymaganej energii na całonocne kursowanie po mieście,

Trzeci powód jest związany z energetyką komercyjną, która ze względu na zwiększającą się ilość kompletnie „nieprzewidywalnych” źródeł energii odnawialnej, takiej jak elektrownie wiatrowe i słoneczne, zmagają się z problemem mocy szczytowych i niezbyt dobrej współpracy źródeł odnawialnych z klasycznymi elektrowniami. Narasta potrzeba magazynowania energii w systemach GESS (*Grid Energy Storage Systems*) i oddawania jej do sieci, gdy produkcja źródeł odnawialnych spada i nie bilansuje zapotrzebowania. Także obserwowany od kilku lat proces rozpraszania produkcji energii, pojawienie się nowego podmiotu, jakim jest prosument (producent i jednocześnie konsument energii, w zależności od pory dnia) oraz mikrosieci (*Micro Grids*), stawia coraz większe wymagania w rozdziale i zarządzaniu przepływem energii. W tym zastosowaniu superkondensatory pomimo wysokiej ceny są elementami znacznie trwalszymi niż akumulatory. **Duża liczba cykli pracy, wysokie moce chwilowe i znacznie dłuższy cykl życia zapewniają przewagę nad akumulatorami chemicznymi.**

Niezaprzeczalną zaletą w aplikacjach sieciowych są też niższe całkowite koszty użytkowania pomimo wyższych nakładów inwestycyjnych. Superkondensatory (z wyjątkiem hybryd) nie wymagają podczas eksploatacji specjalnych zabiegów konserwacyjnych, poza kontrolą napięcia maksymalnego na celi i prądu ładowania (warunkowo), nie są potrzebne układy korygujące pracę ładowarki podczas zmian temperatury otoczenia. Superkondensatory podczas pracy nie wydzielają gazów toksycznych lub wybuchowych jak ma to miejsce w przypadku akumulatorów kwasowych, co upraszcza projektowanie m.in. wentylacji pomieszczeń technicznych.

Może po wykupieniu przez Elona Muska firmy Maxwell, następna wersja powerwalla będzie oparta na superkondensatorach? I tu mała dygresja, powerwall to drogie, ale fajne urządzenie do gromadzenia energii odnawialnej i wyrównywania szczytów poboru mocy. Jak wiadomo, nasze taryfy za energię elektryczną zależą od rodzaju przyłącza, większość z nas korzysta z taryfy G11 (24/7) z najsłabszym przyłączem jedno- lub trójfazowym (2,3...8 kW), z którego tak naprawdę zasilana większą mocą jest tylko kuchenka indukcyjna lub piekarnik. Oba urządzenia pracują z pełną mocą może kilka... kilkanaście minut dziennie (chyba że ktoś prowadzi stołówkę lub ma wilczy apetyt). Pralkę, zmywarkę i odkurzacz można „poprzesusować” w czasie tak, by nie nakładały się z poborem prądu. A gdyby tak moc konieczną w szczycie obiadowym magazynować w małym domowym superkondensatorowym powerbanku i zmieniać przyłączy na najtańsze jednofazowe? Może zaoszczędzone przez czas życia powerbanku pieniądze dałyby radę spłacić taki układ, przy założeniu, że superkondensatory będą coraz powszechniejsze i tańsze, a energia i przesył coraz droższe? Problem wydolności sieci energetycznej może się uwydatnić, jak już wszyscy będziemy jeździć superekologicznymi



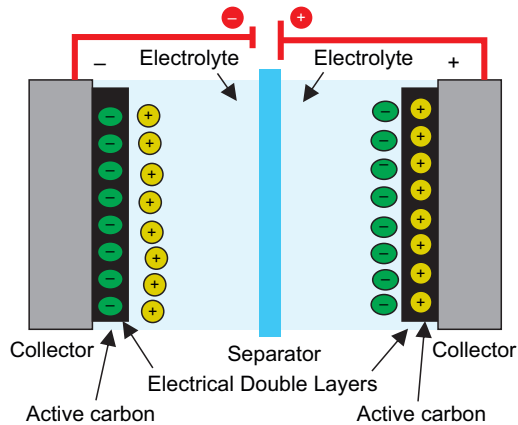


Fotografie 1a, 1b, 1c. Przykładowe superkondensatory wykonane w różnych technologiach (z materiałów producentów)

samochodami elektrycznymi i generować będziemy cowieczorne osiedlowe blackouty, gdy wszyscy jednocześnie będą ładować swoje hehikuly po powrocie z pracy...

Po co o tym pisać? Ponieważ najwyższy czas wziąć udział w tym postępie. Technicy i inżynierowie elektronicy i elektroenergetycy coraz częściej będą się spotykali z obsługą superkondensatorów w istniejących aplikacjach, ale co ważniejsze, także z projektowaniem aplikacji z zastosowaniem tych nowoczesnych elementów. Dlatego warto przyrzeć się budowie superkondensatorów, ich parametrom, zaletom i wadom oraz rozeznac się w ofercie rynkowej.

Znaczącymi dostawcami superkondensatorów są Maxwell, (który aktualnie został wykupiony przez Teslę – czyżby szykował się odwrót od płonących akumulatorów litowych?), Panasonic, Nippon-Chemicon, Eaton, Elna, Murata, TAIYO-Yuden, Samwha, TDK-Epcos, Kemet, Illinois Capacitor, Skeleton Tech, IOXUS, Licap-tech, Cornell Dubilier, AVX, CAP-XX, Vinatex (kolejność przypadkowa). Część z firm specjalizuje się w produkcji superkondensatorów (np. Maxwell, IOXUS) i modułów, a dla niektórych jest to tylko uzupełnienie oferty oferowanych podzespołów biernych (np. TDK, Kemet). Na rynku dostępne są jeszcze superkondensatory Nesscap (wykupionego przez Maxwella) producenta m.in. XP-Series XTRA performance przystosowanych do długotrwałej pracy w trudnych warunkach środowiskowych.



Rysunek 2. Budowa superkondensatora EDLC (z materiałów Murata)

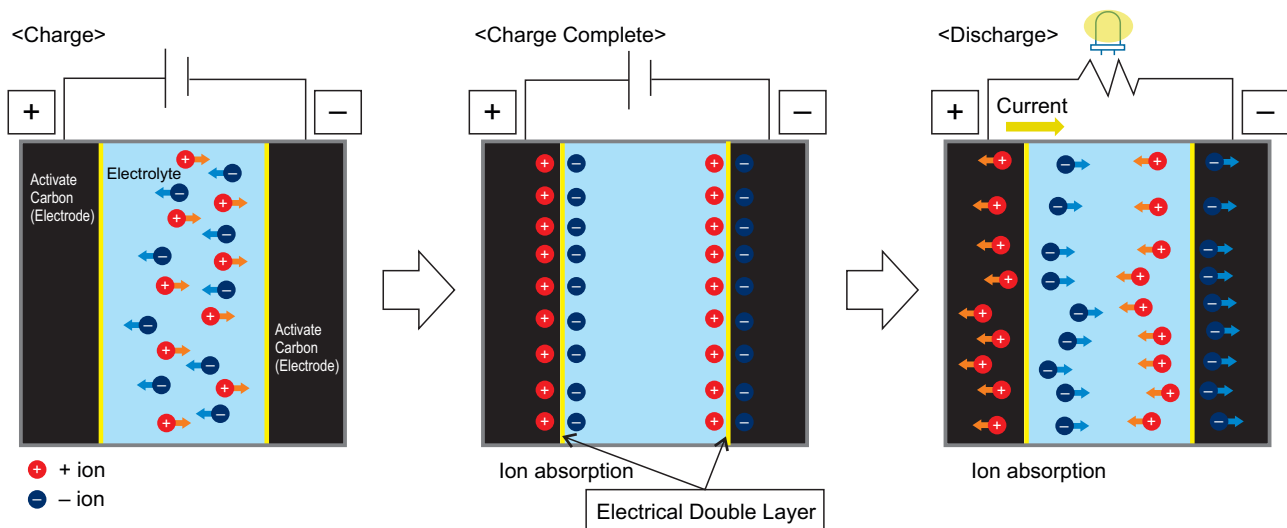
### Technologie wykonania superkondensatorów

Obecnie na rynku dostępne są superkondensatory wykonane w technologiach:

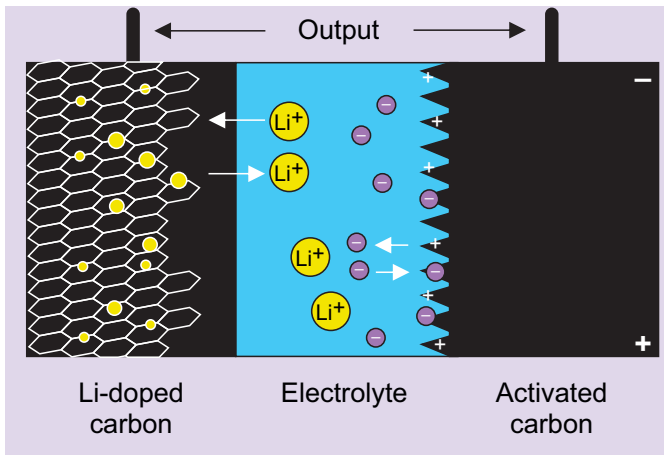
- dwuwarstwowej EDLC (*Supercapacitor, Ultracapacitor*), np. Elna Dynacap (fotografia 1a),
- pseudokondensatory (*Pseudocapacitor*), np. Maxwell PCAP, (fotografia 1b),
- hybrydowej, np. Licap Technologies LC (fotografia 1c).

Najpowszechniej spotykane są superkondensatory EDLC (*Electrical Double Layer Capacitor*), w których ładunek przechowywany jest elektrostatycznie, a zasada działania nie wymaga procesów chemicznych (jak w bateriach lub akumulatorach), a jedynie gromadzenia i przepływu ładunków elektrycznych. Funkcję okładzin przejmują dwie identyczne porowate elektrody. Najczęściej są wykonane z węgla aktywnego, mogą mieć postać żelu, nanorurek węglowych lub grafenu, istotne jest, by miały dużą powierzchnię i niską rezystancję. Dzięki wysokiej porowatości materiału możliwe jest znaczne zwiększenie powierzchni aktywnej okładzin superkondensatora i uzyskanie bardzo dużej przewodności elektrycznej, co skutkuje zmniejszeniem rezystancji ESR.

Aby zapobiec wewnętrznemu zwarciu między elektrodami, rozdziela się je separatorem, który jednak nie pełni funkcji klasycznego dielektryka. Separator nie blokuje też przepływu jonów w elektrolicie po przyłożeniu napięcia do elektrod. Funkcję dielektryka pełnią obszary styku elektrolitu i elektrody, które dzięki porowatości materiału umożliwiają uzyskanie ponadprzeciętnej pojemności. Schematyczną budowę superkondensatora EDLC pokazano na rysunku 2, a zasadę działania na rysunku 3. Dzięki brakowi reakcji chemicznych nie następuje degradacja elektrod, możliwe jest więc uzyskanie wysokiej trwałości i dużej liczby cykli ładowania i rozładowania.



Rysunek 3. Zasada działania superkondensatora EDLC (z materiałów Murata)



Rysunek 4. Budowa kondensatora hybrydowego LIC (za notą Socomec)

Drugim sposobem budowy superkondensatora jest tzw. pseudokondensator. Nazwa nie jest przypadkowa – pseudokondensator gromadzi energię na innej zasadzie niż klasyczny kondensator. Odbywa się to dzięki reakcjom elektrochemicznym (redox, adsorbpcji), jakim podlegają elektrody i elektrolit. Jako materiały elektrod stosowane są tlenki metali (ruten, iryd, mangan) lub przewodzące polimery. **Największą zaletą pseudokondensatorów jest praktycznie dwukrotnie większa wartość gęstości zgromadzonej energii w porównaniu z technologią EDLC oraz niższa rezystancja szeregową ESR**; obie cechy osiągnięte są niestety kosztem trwałości kondensatora.

Trzecim rodzajem są kondensatory hybrydowe, które łączą obie opisane wcześniej technologie. Różnią się konstrukcją elektrod, wykonywanych w niektórych typach jako kompozyt oparty na węglu i przewodzącym metalu (polimer) lub wręcz asymetryczną konstrukcją elektrod ze względu na różne materiały anody i katody. Dla przykładu – jedna elektroda bazuje na technologii gromadzenia ładunku jak w EDLC, a druga na reakcjach chemicznych jak w pseudokondensatorach.

Kondensatory hybrydowe charakteryzują się zwiększoną gęstością energii osiągniętą bez znaczącej utraty trwałości w porównaniu z pseudokondensatorami i niskim samorozładowaniem w odniesieniu do technologii EDLC. Reprezentantami technologii hybrydowej są kondensatory litowe LIC. Zbudowane są asymetrycznie, jedna z elektrod domieszkowana jest litem, druga tak jak w EDLC wykonana jest z węgla aktywowanego. Schematyczną budowę kondensatora hybrydowego w technologii LIC pokazano na **rysunku 4**. Budowę i cechami są bardziej podobne do ogniw (baterii) litowych LIB niż do klasycznym kondensatorów. Hybrydowe kondensatory litowe mają wyższe dopuszczalne napięcie pracy – 3,8 V (max. 4,2 V).

Niestety technologia hybrydowa ma istotną w niektórych zastosowaniach wadę w postaci minimalnego napięcia na zaciskach, zawiera się ono w okolicach 2,2...2,5 V/kondensator. Obniżenie napięcia poniżej tego progu powoduje degradację kondensatora prowadzącą do jego zniszczenia. Z tego powodu wszystkie kondensatory LIC dostarczane są w stanie częściowego naładowania (podobnie jak akumulatory litowe). Komplikuje to kwestie transportu, przechowywania i montażu automatycznego. Aplikacja LIC w układzie docelowym musi uwzględnić dodatkowe zabezpieczenie i konserwację podtrzymującą nieistotną w przypadku EDLC, co podnosi złożoność i koszty rozwiązania. Pomimo wad, technologią kondensatorów hybrydowych interesuje się NASA, znajdując jej zastosowanie w satelitach.

### Obudowy superkondensatorów

W związku z dużą różnorodnością aplikacji możemy wybierać nie tylko pojemność i napięcie znamionowe, ale także zoptymalizowaną konstrukcję obudowy, w jakiej zamknięty jest superkondensator. W aplikacjach o małych wymaganiach co do ilości zgromadzonej energii przydatne są kondensatory *Coin-Type* (moneta, choć bardziej



Fotografia 5. Przykładowe kondensatory *Coin-Type* EDLC (za notą Cornell Dubilier)

przypominają pastylkę lub guzik) zamknięte w niewielkich obudowach przystosowanych do montażu automatycznego za pomocą standardowych narzędzi. W zależności od aplikacji kondensatory mogą być wykonane w wersji pionowej, poziomej i o różnej formie wyprowadzeń THT/SMD, co pokazano na **fotografii 5**. W tym typie obudowy wykonywane są praktycznie tylko kondensatory EDLC przy pojemności poniżej 2,2 F i napięciu do 5,5 V.

W przeciwieństwie do baterii, rozładowany kondensator może być lutowany w tym samym procesie co pozostałe elementy elektroniczne. Nie ma ryzyka zwarcia elektrod i potrzeby stosowania podstawek i późniejszego ręcznego montażu. Zawsze należy jednak sprawdzić w nocie producenta możliwość montażu, a w szczególności mycia po procesie dla każdego typu zastosowanego kondensatora, gdyż jak wszystkie kondensatory elektrolityczne, ze względu na konstrukcję obudowy nie zawsze zapewniają całkowitą szczelność przepustów. W przypadku tego typu superkondensatorów należy także sprawdzić zastosowanie, gdyż część z nich jest optymalizowana dla aplikacji o niewielkim ciągłym poborze mocy takich jak np. podtrzymanie

Tabela 1. Zestawienie parametrów wybranych kondensatorów *Coin-Type*

Producent	Typ	Pojemność [F]	Napięcie [V]	ESR [Ω]
Cornell Dubilier	EDC104Z5R5C	0,100	5,5	75
Cornell Dubilier	EDC104Z6R3C	0,100	6,3	120
Cornell Dubilier	EDC224Z5R5C	0,220	5,5	75
Cornell Dubilier	EDC224Z6R3C	0,220	6,3	75
Cornell Dubilier	EDC105Z6R3C	1,000	6,3	30
Cornell Dubilier	EDC155Z5R5C	1,500	5,5	30
EATON	KW-5R5C104R	0,100	5,5	50
EATON	KW-5R5C224R	0,220	5,5	50
EATON	KW-5R5C105R	1,000	5,5	30
Elna	DVN-5R5D473T-R5	0,047	5,5	30
Elna	DVN-5R5D104T-R5	0,100	5,5	30
Elna	DXS-3R6V473U	0,047	3,6	25
Elna	DXS-3R6V105U	1,000	3,6	20
Elna	DXJ-5R5V473U	0,047	5,5	200
Kemet	FYH0H473ZF	0,047	5,5	100
Kemet	FYD0H225ZF	2,200	5,5	35
Kemet	FA1A104ZF	0,100	11	8
Kemet	FA1A474ZF	0,047	11	4
Panasonic	EECRG0V105V	1,000	3,6	20
Panasonic	EECS5R5V105	1,000	5,5	30

pamięci RAM lub zegara RTC i ma względnie dużą rezystancję wewnętrzną (Elna Dynacap DXJ, DHL), w przeciwieństwie do standardowych wykonań przystosowanych do pracy cyklicznej o niskiej rezystancji szeregowej ESR (Elna Dynacap DZN, DU). **Superkondensatorów nie należy używać do filtracji i odsprężania zasilania, gdyż ze względu na wysoką wartość ESR mogą ulec przegrzaniu i nieodwracalnemu uszkodzeniu.** W tym wykonaniu dostępne są też stopy kondensatorowe o wyższym napięciu pracy uzyskanym poprzez szeregowe łączenie kondensatorów o niższym napięciu pracy. Typowe napięcia pracy to 3,6 V, 5,5 V, spotykane są też stopy 11 V (Kemet FA1A). Tak wykonane kondensatory nie mają wyprowadzeń balansowania, wewnętrzne kondensatory dobierane są przez producenta i mają zbliżone przechowywane ładunki lub stosowany jest prosty dzielnik rezystorowy wyrównujący napięcia na kondensatorach. Niewielkie moce, z jakimi są ładowane i rozładowane, nie wymagają złożonych układów ładowarek, a ładowanie sprowadza się do doboru rezystora ograniczającego prąd ładowania i diody zapobiegającej przepływowi wstęcznemu prądu po zaniku zasilania. Polecam ten typ superkondensatora do eliminacji baterii litowych w układach podtrzymania RTC. Szczególnie w aplikacjach w których istnieje realne wymaganie pracy w szerokim zakresie temperatur, z naciskiem na temperatury ujemne (np. wymogi *cold-start*), gdzie typowe baterie litowe ulegają degradacji, a wersje z rozszerzonym zakresem temperatur (-40 do +85°C), takie jak np. Murata CR2032X, nie są łatwo dostępne, mają ceny porównywalne z superkondensatorami, nie wspominając o problemach z transportem i komplikacjach w montażu PCB. Porównanie kilku rodzin kondensatorów *Coin-Type* pokazano w **tabeli 1**.

Drugim typem obudowy, wymuszonej aplikacją w układach zasilania telefonów, dysków SSD, a ostatnio także w kartach płatniczych, jest obudowa *Thin lub Ultra-thin*. Ma kształt prostopadłościanu o niewielkiej wysokości (0,4...4 mm) i przypomina akumulator litowy. Wygląd superkondensatora w obudowie *Ultra-thin* pokazano na **fotografii 6**. Wykonywane są na napięcia 2,5...5,5 V, pojemności nie przekraczają kilku faradów. Są to parametry wystarczające w ich typowych zastosowaniach, które polegają głównie na podtrzymaniu pracy



**Fotografia 6. Kondensator w obudowie *Ultra-thin* (za notą Murata DMHA)**



**Fotografia 7. Kondensatory w obudowie cylindrycznej (za notą Samwha)**

urządzenia przez kilka sekund po zaniku zasilania np. bezpiecznego dokończenia zapisu pamięci w dysku SSD lub przeprowadzenia transakcji wykorzystującej komunikację bezprzewodową. Pakiety z połączonych szeregowo kondensatorów mają wyprowadzenie środkowe (MID) lub niezależne wyprowadzenia dla każdego z kondensatorów, umożliwiające podłączenie zewnętrznego balansera wyrównującego ładunek połączonych w szereg kondensatorów. Ten typ optymalizowany jest do układów buforowania i podtrzymania zasilania i cechuje się niską rezystancją ESR, ułatwiającą szybkie ładowanie i rozładowanie, bez wprowadzania strat energii. Przykładowe zestawienie cech kondensatorów *Thin, Ultra-thin* pokazano w **tabeli 2**.

Najczęściej superkondensatory zamykane są w obudowach cylindrycznych z wyprowadzeniami w postaci drutu dla mniejszych pojemności (Samwha Green-CAP DS), SNAP-IN dla średnich prądów (Samwha Green-CAP DS) i terminali śrubowych, M6...M12 dla aplikacji wysokoprądowych (Nippon-Chemicon DXF, Samwha DP). Przykładowe kondensatory w obudowach cylindrycznych pokazano na **fotografii 7**.

Obudowy cylindryczne z wyprowadzeniami drutowymi są stosowane w kondensatorach o pojemnościach rzędu 1...100 F przy napięciu 2,5/2,7 V, obudowy SNAP-IN zawierają kondensatory o pojemnościach 100...400 (500) F na napięcia 2,5/2,7 V, zaś duże obudowy z zaciskami śrubowymi, przeznaczone do aplikacji dużych mocy, zawierają kondensatory 300 F/2,5 V, aż do 3400 F/3,0 V (Maxwell DuraBlue), 3150 F/2,8 V (DXF Nippon Chemicon) lub rekordowego 6500 F/2,7 V (Samwha typ DE).

Istnieje jeszcze podgrupa kondensatorów w obudowach cylindrycznych o rozmiarach zgodnych z bateriami D i wyprowadzeniami w postaci blaszek stykowych do konektorów 4, 8/6,3 mm, ale powoli jest wycofywana z produkcji i zastępowana kondensatorami w obudowach cylindrycznych z wyprowadzeniami SNAP-IN.

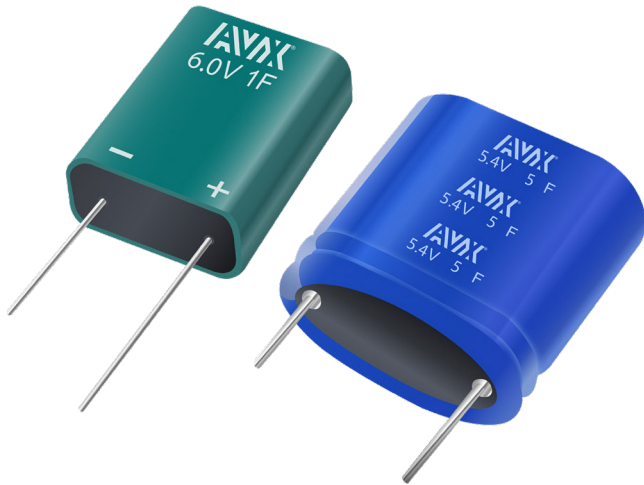
Dla kondensatorów o wyższych dopuszczalnych prądach dostępne są podtypy o zwiększonej liczbie wyprowadzeń SNAP-IN, które także zapewniają lepsze mocowanie mechaniczne kondensatora (np. Maxwell BC).

Kondensatory cylindryczne z wyprowadzeniami drutowymi dostępne są też w wersji modułowej złożonej z dwóch lub trzech połączonych szeregowo elementów np. AVX SCM (**fotografia 8**). Moduły oferują pojemności do kilku faradów. Występują w wersjach

**Tabela 2. Zestawienie parametrów wybranych kondensatorów *Ultra-thin***

Producent	Typ	Pojemność [F]	Napięcie [V]	ESR [Ω]	Wymiary [mm]
Murata	DMT334R2S474M3DTA0	0,470	4,2	0,13	14×21×3,5
Murata	DMF3Z5R5H474M3DTA0	0,470	4,2	0,045	14×21×3,2
Murata	DMHA14R5V353M4ATA0	0,035	4,5	0,3	20×20×0,4
CAP-XX	GA209F	0,090	5,0	0,095	20×18×2,1
CAP-XX	GS130F	2,400	2,5	0,015	39×17×3,9
CAP-XX	HS230F	1,200	5,5	0,045	39×17×3,9
CAP-XX	HW109F	0,300	2,8	0,05	28,5×17×1,0
TDK	EDLC041720-100-2F-13	0,010	3,2	7	17×27×0,5





Fotografia 8. Moduł kondensatorowy SCM (za notą AVX)

z dopuszczalnym napięciem 5,4/5,0 V, 6,0/5,5 V, 7,5 V, 9/8,1 V, zważając konstruktora od konieczności zapewnienia balansowania ładunku, a zakres dostępnych napięć ułatwia dobór modelu pod



Fotografia 9. Kondensatory Durablué i akcesoria w pakiecie (za notą Maxwell)

konkretne zastosowanie. Zestawienie przykładowo wybranych modułów pokazano w tabeli 3.

Do aplikacji wymagających samodzielnego zestawiania pakietów o dużych gromadzonych energiach dostępne są kondensatory

Tabela 3. Zestawienie parametrów wybranych modułów SCM (za notą AVX)

Producent	Typ	Pojemność [F]	Napięcie [V]	ESR [Ω]	Prąd szczytowy [A]	Zgromadzona energia [Wh]	Wymiary [mm]	Uwagi
AVX	SCMQ14C474PRBA0	0,47	5,0	0,400	0,8	0,0016	L=14, d=6,3	
AVX	SCMR14C474PRBBA0	0,47	5,4	0,300	0,86	0,0019	L=14, d=8	
AVX	SCMT32D755SRBB0	7,50	5,4	0,160	9,2	0,0304	L=32, d=12,5	
AVX	SCMQ14F474PRBA0	0,47	5,5	0,500	0,54	0,002	L=14, d=6,3	
AVX	SCMU33F156SRBB0	15,00	5,5	0,035	23,57	0,063	L=16, d=32	
AVX	SCMR22H155PSBB0	1,50	6,0	0,56	2,45	0,0075	L=24, d=9,5	Obudowa z tworzywa
AVX	SCMR14G334SRBA0	0,33	7,5	0,45	0,95	0,0026	L=14, d=8	
AVX	SCMR22G105SRBB0	1,00	7,5	0,18	2,76	0,0078	L=22, d=8	
AVX	SCMR14J334SRBA0	0,33	9,0	0,5	0,69	0,03	L=14, d=8	
AVX	SCMR22L105SSBB0	1,00	9,0	0,84	2,45	0,0113	L=24, d=9,5	Obudowa z tworzywa

Tabela 4. Zestawienie parametrów wybranych kondensatorów cylindrycznych

Producent	Typ	Pojemność [F]	Napięcie [V]	ESR [Ω]	Prąd upływu [mA]	Prąd ciągły [A]	Zgromadzona energia [Wh]	Wymiary [mm]	Uwagi
Maxwell	BCAP0001P270T01	1	2,7	0,055	0,006	0,4	0,001	D=8, L=12	standard
Maxwell	BCAP0050P300X11	50	3,0	0,010	0,1	7,1	0,0625	D=18, L=40	XP series
Maxwell	PCAP0300P230S07	300	2,3	0,013	0,96	-	0,22	D=22, L=46	SNAP-IN, pseudo-capacitor
Maxwell	BCAP0310P270T10	310	2,7	0,002	0,45	25	0,31	D=33, L=61,5	standard, osiowy
Maxwell	BCAP3400P300K04	3400	3,0	0,013	12	140	4,25	D=60,4, L=144,36	DuraBlue, osiowy M12
IOXUS	RSC2R7308LR	3000	2,7	0,22	5	145	3,04	D=60,4, L=144,36	iCAP
Samwha	DP	3000	2,7	0,008	8,1	150	3,05	D=63, L=130	DP
Samwha	DE	6500	2,5	0,007	17,55	343	6,58	D=89, L=150	DE
Samwha	DS	50	2,7	0,01	0,14	-	0,0484	D=89, L=150	DE
Nippon Chemicon	DDXF2R8LGM3B2EDH2S	3500	2,8	0,0003	-	-	3,5	D=64,5, L=180	promieniowy, M6
Nippon Chemicon	DDXG2R5LGN301AB65S	300	2,5	0,0012	-	-	0,3	D=40, L=65	promieniowy, M5

z wyprowadzeniami osiowymi z gwintem M12, przystosowanymi do przewodzenia prądów rzędu kA (Maxwell Durablue) lub wyprowadzeniami przeznaczonymi do zgrzewania (Maxwell BCA-PxxxxP270K05). Dla tych typów dostępne są akcesoria w postaci mostków prądowych o odpowiednio niskiej rezystancji, zapewniających nie tylko połączenie elektryczne, ale też mechaniczne pakietu oraz balansery dla współpracującej pary kondensatorów. Pakiet



Fotografia 10. Moduł superkondensatora hermetyzowanego BMOD0058 (za notą Maxwell)



Fotografia 11. Kondensator ESM ULTRA 31/1800 w formie akumulatora ołowiowego (za notą Maxwell)



Fotografia 12. Superkondensatory pryzmatyczne Ultimo (za notą JMenergy)

kondensatorów Maxwell Durablue z akcesoriami pokazano na **fotografii 9**. Pakiety dostępne są też w obudowach hermetyzowanych IP54, np. w postaci modułu 58 F/16 V BMOD0058E016B02 (Maxwell), którego wygląd pokazano na **fotografii 10**. Zestawienie cech wybranych kondensatorów cylindrycznych prezentuje **tabela 4**.

Do zastosowań w transporcie produkowane są moduły superkondensatorów zgodne wymiarami z klasycznymi akumulatorami ołowowymi 12 V (**fotografia 11**). Cechują się pracą w szerokim zakresie temperatur ( $-40...+85^{\circ}\text{C}$ ), wysoką wydajnością prądową w ujemnych temperaturach oraz szybkim ładowaniem. Znajdują zastosowanie w ciężarówkach jako wspomaganie rozruchu silnika Diesla w niskich temperaturach (*cold start*) oraz w energetyce odnawialnej mniejszych mocy.

Ułatwieniem dla producentów baterii superkondensatorów o większych pojemnościach są kondensatory pryzmatyczne w wersji laminowanej lub w obudowie z tworzywa sztucznego. Przykładem kondensatora w obudowie laminowanej jest Ultimo LIC CLQ1100A1A, 1100 F/3,8 V, charakteryzujący się pracą w temperaturze  $-30...+70^{\circ}\text{C}$ , rezystancją ESR ok. 1,2 m $\Omega$ , gęstości energii 10 Wh/kg, niskim spadkiem pojemności w szerokim zakresie temperatur ( $-20\%$ , przy  $-20^{\circ}\text{C}$  w odniesieniu do  $25^{\circ}\text{C}$ ) i niewielkim samorozładowaniem poniżej 5% w ciągu 3 miesięcy w  $25^{\circ}\text{C}$ . Przykładowe kondensatory pryzmatyczne w wersji laminowanej i w obudowie pokazano na **fotografii 12**.

Dla transportu szynowego lub aplikacji energoelektronicznych produkowane są moduły o napięciach 48 V i wyższych np. 160 V (**fotografia 13**). W wielu przypadkach są to bloki z wbudowanymi zabezpieczeniami i balanserami oraz także z ładowarką.

### Bezpieczeństwo eksploatacji

Po omówieniu budowy i przeglądzie dostępnych wykonania konieczne należy zapoznać się z podstawowymi zasadami bezpiecznego użytkowania superkondensatorów:

- zawsze sprawdź polaryzację kondensatora przed wlutowaniem lub podłączeniem do układu,
- nigdy nie przekraczaj napięcia znamionowego, zwiększa to prąd upływu i w efekcie grozi eksplozją lub pożarem,
- stosuj zabezpieczenia przeciążeniowe i zwarciovowe o odpowiedniej zdolności łączeniowej przystosowane do prądu stałego,
- nie przekraczaj temperatury pracy kondensatora, pomimo szerokiego zakresu temperatury dopuszczalnej, jego trwałość znacząco zależy od temperatury,
- zachowaj zalecenia producenta podczas lutowania, montażu i mycia obwodów z superkondensatorami,
- nie otwieraj, nie rozcinaj, nie zginiatąj obudowy superkondensatora,
- nie stosuj kondensatorów bezpośrednio w środowisku z ryzykiem kondensacji lub zawierającym gazy toksyczne, pomimo uszczelnienia obudowy, może pojawić się korozja wyprowadzeń lub pogorszenie parametrów kondensatora,
- nie przekraczaj dopuszczalnych prądów ładowania i rozładowania,
- nie stosuj superkondensatorów do filtracji zasilania (chyba że producent dopuszcza taki tryb pracy),
- w przypadku kondensatorów z wyprowadzeniami śrubowymi, które gromadzą dużą energię, zadbaj o odpowiedni moment dokręcania śrub (klucz dynamometryczny) oraz odpowiednie przekroje mostków prądowych – istnieje ryzyko pożaru przy zwiększeniu się rezystancji styku,
- gdy kondensatory narażone są na wibracje, zadbaj o odpowiednie mocowanie mechaniczne, stosując podkładki sprężynujące, masy zalewowe i uszczelniające pochłaniające wibracje,
- nie dopuszczaj do naprężeń mechanicznych na wyprowadzeniach kondensatorów, to w większości przypadków dosyć ciężkie elementy,
- w przypadku zestawienia baterii z kondensatorów połączonych szeregowo zastosuj balanser, utrzymujący odpowiedni rozkład napięcia na poszczególnych kondensatorach,





Fotografia 13. Kondensator BMOD0006 6F/160V w formie modułu (za notą Maxwell)

- zwiększ margines bezpieczeństwa 5...10% dla napięcia dopuszczalnego w baterii kondensatorów połączonych szeregowo, zmniejsza to nieco zgromadzony ładunek, ale zapobiega problemom przy zmianach temperatury i starzeniu się elementów oraz nieidealnej pracy balansera,
- przy projektowaniu płytek staraj się nie prowadzić ścieżek pod kondensatorami, może to zwiększać prawdopodobieństwo zwarcia z obudową kondensatora lub powodować nieprzewidziane skutki podczas rozszczelnienia się przepustów kondensatora i wycieku elektrolitu,
- w przypadku kondensatorów LIC, nie dopuszczaj do spadku napięcia na zaciskach poniżej napięcia minimalnego,

- podczas przechowywania utrzymuj odpowiednią temperaturę i wilgotność oraz w przypadku LIC minimalne napięcia na zaciskach,
- nigdy nie zwieraj zacisków superkondensatorów, zgromadzona w elemencie energia może doprowadzić do pożaru, a przy modułach o wyższym napięciu do zajarzenia łuku elektrycznego. Pożar taki może być trudny do ugaszenia, trzeba będzie odczekać do czasu rozładowania kondensatora lub przepalenia przyczyny zwarcia,
- po wycofaniu z eksploatacji superkondensatory podlegają recyklingowi.

### Podsumowanie

Artykuł tylko w skrócie przybliżył informacje o superkondensatorach, zachęcam do bliższego zapoznania się z tą obiecującą technologią przechowywania energii. Na łamach EP opublikowałem już kilka artykułów, w których te ciekawe elementy znajdują zastosowanie, np. w zasilaczach UPS dla Arduino i Launchpada. Opracowany został także zasilacz bezprzerwowy dla Raspberry Pi z superkondensatorami 4x22 F umożliwiający bezpieczne zamknięcie systemu po zaniku zasilania. Zachęcam do zapoznania się z tymi projektami oraz pomocniczymi układami balanserów i ładowarek, i do podjęcia prób zastosowania ich we własnych aplikacjach.

Adam Tatus  
adam.tatus@ep.com.pl

REKLAMA

# m.technik

Ciekawi świata są zawsze młodzi

## w prezencie na każdą okazję

przejrzyj i kupisz na

[www.ulubionykiosk.pl](http://www.ulubionykiosk.pl)



<http://bit.ly/2DKgsBJ>

