



Akumulatory vs superkondensatory

Zasilanie urządzenia elektronicznego jest jednym z tych obszarów, w którym problem „zbyt krótkiej koldry”, czyli nieuniknionego kompromisu pomiędzy przeciwstawnymi parametrami, wydaje się szczególnie dotkliwy. Projektując układ elektroniczny z wewnętrznym źródłem zasilania, warto zastanowić się, czy lepszym wyborem do danej aplikacji okaże się klasyczny akumulator, czy nowoczesny superkondensator.

Akumulator czy superkondensator – sztuka kompromisu

Siłą napędową do rozwoju współczesnej elektroniki są przede wszystkim półprzewodniki, ale nie tylko one – równie istotne okazują się nowoczesne źródła energii, bez których niemożliwa byłaby skuteczna miniaturyzacja urządzeń mobilnych, komputerów czy wszelkiej maści gadżetów ubieralnych (*wearable*). Na pierwszym etapie tej rewolucji klasyczne baterie jednorazowe zostały w dużej mierze wyparte przez znacznie wygodniejsze w użyciu i bardziej ekonomiczne akumulatory. Natomiast obecnie można zauważyć kolejny trend – wschodzącą gwiazdą w świecie źródeł zasilania są superkondensatory. Choć trudno spodziewać się, aby w najbliższych kilku latach elementy te miały wyprzeć z rynku konwencjonalne akumulatory elektrochemiczne, to bez wątpienia ich udział w branży będzie coraz większy i bardziej znaczący.

Spróbujemy porównać akumulatory i superkondensatory z technicznego oraz użytkowego punktu widzenia, a także zaprezentujemy szereg przykładowych aplikacji i praktycznych porad dotyczących ich stosowania w projektowanych urządzeniach elektronicznych. Skupimy się przede wszystkim na efektywnych rozwiązaniach małych źródeł zasilania, odpowiednich do zastosowania w systemach wbudowanych, urządzeniach *ultra low-power*, zasilaczach buforowych itp. Natomiast jedynie wspomniemy o rozwiązaniach energoelektronicznych (np. zasilaniu pojazdów elektrycznych czy magazynach energii w rozproszonych systemach dystrybucji energii elektrycznej), które z natury rzeczy wymagają stosowania znacznie bardziej złożonych systemów zabezpieczających, monitorujących i zarządzających

procesami ładowania oraz rozładowania, ale są istotne dla szerszego obrazu sytuacji.

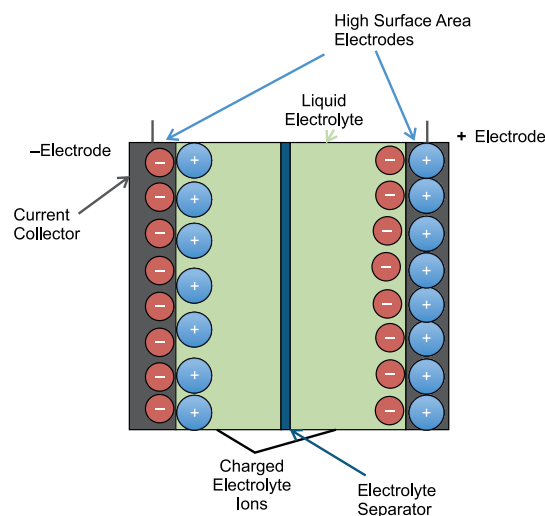
Akumulatory – krótki przegląd technologii

Obecnie na rynku podzespołów elektronicznych można znaleźć szeroki wachlarz akumulatorów, różniących się zarówno technologią wykonania (z chemicznego punktu widzenia), jak i wymiarami, sposobem montażu, pojemnością, napięciem, wydajnością prądową czy odpornością na warunki panujące w środowisku pracy. Często o wyborze źródła zasilania do określonej aplikacji decydują nie tylko podstawowe parametry techniczne, ale nawet odpowiednie certyfikaty bezpieczeństwa, warunkujące użycie akumulatora w danym urządzeniu – doskonałym przykładem będą tutaj urządzenia medyczne. Poniżej prezentujemy skrót najważniejszych informacji na temat rodzajów akumulatorów, stosowanych obecnie w różnych gałęziach elektroniki.

- **Akumulatory NiCd (niklowo-kadmowe)** – jedna ze starszych generacji akumulatorów, dawniej powszechnie spotykana m.in. w postaci ogniw w rozmiarze R6 (AA, czyli popularne „paluszki”) czy też R03 (AAA). Obecnie akumulatory te są wycofywane z uwagi na toksyczność kadmu i problematyczną utylizację zawierających go produktów.
- **Akumulatory NiMH (niklowo-metalowo-wodorkowe)** – bardziej wydajne od NiCd i wciąż szczególnie popularne w segmencie małych akumulatorów o rozmiarach typowych dla klasycznych baterii (R03, R6, R14, R20, a także 6F22). Upowszechnienie ogniw oraz pakietów NiMH i spadek cen sprawiły, że rozwiązanie to ostatecznie wyparło z rynku akumulatory niklowo-kadmowe, a także – w wielu zastosowaniach – jednorazowe baterie. Dobrym przykładem są wydajne akumulatory Eneloop firmy Panasonic, chętnie wybierane w zastosowaniach profesjonalnych (np. przy zasilaniu reporterskich lamp błyskowych, wymagających zarówno wysokiej pojemności oraz wydajności prądowej, jak i odporności na duże wahania temperatury otoczenia). Akumulatory NiMH występują ponadto w miniaturowych wersjach pastylkowych, a także różnego rodzaju pakietach (często przeznaczonych do montażu THT bezpośrednio na płytce drukowanej). W literaturze i wielu urządzeniach komercyjnych można spotkać się z zastosowaniem niewielkich akumulatorów

tego typu jako źródła zasilania, służącego do podtrzymywania pamięci ulotnej i/lub pracy zegara czasu rzeczywistego (RTC). Rozwiązanie takie ma ogromną przewagę nad znacznie popularniejszymi aplikacjami korzystającymi z baterii litowych (np. CR2032), niweluje bowiem konieczność okresowej wymiany baterii co kilka lat eksploatacji urządzenia.

- **Akumulatory Li-Ion (litowo-jonowe)** – najbardziej rozpowszechniony rodzaj akumulatorów, obecny m.in. w urządzeniach mobilnych, komputerach przenośnych, modelach RC, dronach, urządzeniach medycznych, latarkach i wielu innych. Akumulatory tego typu cechują się wysoką pojemnością, dużą wydajnością prądową oraz sporą gęstością energii, pozwalającą ponadto na dość szybkie ładowanie. W odróżnieniu od wcześniej opisanych akumulatorów zasadowych, litowo-jonowe źródła energii elektrycznej wymagają ściśle kontrolowanych parametrów eksploatacji, w szczególności dotyczy to procesu ładowania – doskonale znane z doniesień prasowych są samozapłony i eksplozje akumulatorów litowo-jonowych, wynikające z wad produkcyjnych i/lub nieprawidłowości układu ładowarki. Obecnie zdecydowana większość akumulatorów Li-Ion jest fabrycznie wyposażona w podstawowy układ zabezpieczający, ale nie zwalnia on konstruktora urządzenia bazującego na akumulatorze litowo-jonowym z konieczności zapewnienia zewnętrznego kontrolera ładowania.
- **Akumulatory Li-Poly (litowo-polimerowe)** – drugi, obok akumulatorów Li-Ion, rodzaj ogniw i pakietów często spotykany zarówno w elektronice codziennego użytku (np. tabletach czy opaskach sportowych), jak i w rozwiązaniach modelarskich. Bezpieczniejsze (choć także wymagające stosowania zarówno wbudowanych, jak i zewnętrznych zabezpieczeń) oraz lżejsze od akumulatorów litowo-jonowych, zapewniają możliwość bardzo szybkiego ładowania i występują w zróżnicowanych rozmiarach. Co ciekawe, do najbardziej wymagających, miniaturowych aplikacji powstała wąska grupa ultracienkich akumulatorów elastycznych, niebywale zwiększających możliwości zaaranżowania projektu mechanicznego obudowy małych urządzeń (w szczególności ubieralnych - *wearable*).
- **Akumulatory LiFePO₄** (litowo-żelazowo-fosforanowe) – kolejna podgrupa akumulatorów o strukturze chemicznej bazującej na licie, zdobywająca coraz większą popularność w wymagających systemach zasilania pojazdów elektrycznych, elektronarzędzi oraz magazynach energii dla fotowoltaiki. **LiFePO₄** oferuje dość dużą gęstość energii (a więc także pojemność), wysoką odporność na trudne warunki eksploatacji (w tym głębokie rozładowanie) i długą żywotność. Nie mają przy tym efektu pamięciowego.
- **Akumulatory bezobsługowe** – do tej grupy należą akumulatory kwasowo-ołowiowe nowej generacji, w których ciekły elektrolit (dawniej wymagający okresowego, ręcznego uzupełniania i kontroli poziomu) został zastąpiony elektrolitem zsiocionym w postaci żelu (akumulatory żelowe) lub zamknięty w specjalnych przedziałach, wykonanych z maty szklanej (akumulatory AGM). Produkty z tej grupy zapewniają dużą pojemność (od kilku do ponad 120 Ah), jednak gęstość energii jest dość mała (nawet najmniejsze akumulatory bezobsługowe są wielokrotnie cięższe od zbliżonych pod względem pojemności i napięcia pracy pakietów litowo-jonowych czy NiMH). Zaletą akumulatorów AGM i żelowych jest niska cena, możliwość pracy w dowolnej pozycji (bez ryzyka wycieku elektrolitu poza komorę akumulatora), a także łatwość współpracy z systemami zasilania buforowego (bezprzerwowego). Cechy te sprawiają, że akumulatory kwasowo-ołowiowe są chętnie stosowane we wszelkiego rodzaju systemach alarmowych, zasilaczach UPS oraz podsystemach zasilania awaryjnego infrastruktury telekomunikacyjnej.



Rysunek 1. Schemat konstrukcji superkondensatora EDLC

Budowa i działanie superkondensatorów

Superkondensatory różnią się budową i zasadą działania od klasycznych kondensatorów elektrolitycznych, choć z pozoru wydają się do nich podobne. Zasadnicza różnica polega na tym, że najczęściej występujące w praktyce superkondensatory mają postać nieco bardziej złożoną – ich nazwa, electric double-layer capacitor (EDLC), wskazuje na dwuwarstwową strukturę. Oznacza to, że okładziny kondensatora są oddzielone od elektrolitu przez „własne” warstwy dielektryka, co sprawia, że model zastępczy takiego kondensatora zawiera de facto dwa szeregowo połączone kondensatory. Pomiędzy okładzinami znajduje się dodatkowo warstwa przepuszczalnego dla jonów separatora, którego celem jest zapobieganie przypadkowemu zwarciu elektrod. Schemat konstrukcji superkondensatora EDLC został pokazany na **rysunku 1**.

Podobnie konstrukcyjnie do kondensatorów EDLC są tzw. kondensatory hybrydowe, w których magazynowanie ładunku elektrycznego odbywa się poprzez dwa mechanizmy. Pierwszy z nich – typowy dla kondensatorów, czyli na drodze elektrostatycznego gromadzenia energii. Drugi mechanizm opiera się na zjawiskach elektrochemicznych, które sprawiają, że superkondensator zachowuje się nieco podobnie do konwencjonalnego akumulatora. Taka hybrydowa zasada działania sprawia, że charakterystyki ładowania i rozładowania są nieco bardziej złożone niż w klasycznych kondensatorach, jednak i tak zachowanie superkondensatorów w rzeczywistych układach determinowane będzie głównie przez składową elektrostatyczną. Oznacza to (w przybliżeniu) liniowy spadek napięcia w funkcji stopnia naładowania, co stanowi bodaj największą trudność aplikacyjną dla projektantów, stosujących superkondensatory w miejsce baterii lub akumulatora.

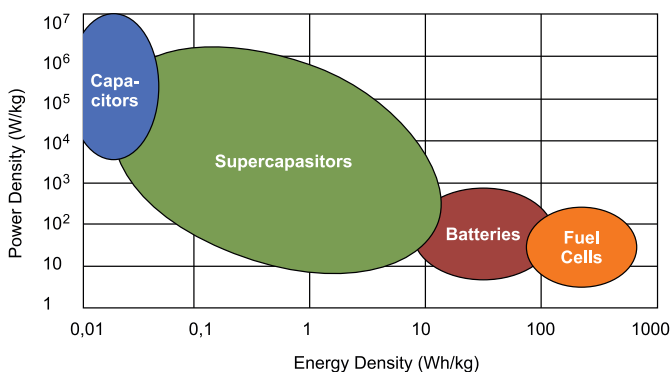
Superkondensatory vs akumulatory – porównanie parametrów

Decydując się na wybór superkondensatora lub akumulatora do projektowanego urządzenia, należy rozważyć szereg kluczowych parametrów technicznych.

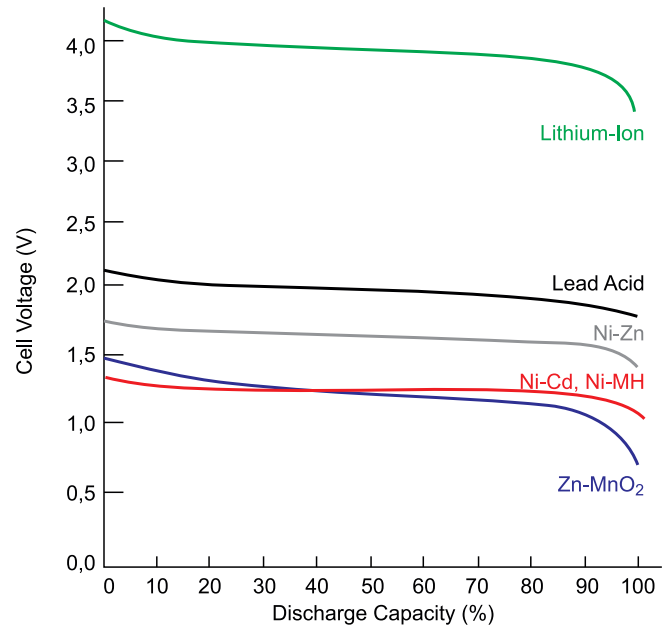
1. **Szybkość ładowania** – niewątpliwą zaletą superkondensatorów jest bardzo krótki czas ładowania, zależny od pojemności oraz ustawionego ograniczenia prądowego – w przypadku mniejszych pojemności zwykle nie ma problemu z uzyskaniem czasu ładowania na poziomie od ułamka sekundy do, co najwyżej, kilku sekund. Są to zatem przedziały nieosiągalne dla jakichkolwiek dostępnych na rynku akumulatorów, w przypadku których choćby częściowe doładowanie wymaga przynajmniej kilku... kilkunastu minut.
2. **Gęstość energii** – parametr ten, wyrażany w jednostkach energii na kilogram masy danego źródła (zwykle [Wh/kg]), dla

superkondensatorów jest wielokrotnie niższy niż w przypadku jakiegokolwiek rodzaju akumulatora. Oznacza to, że zgromadzenie tej samej ilości energii, co w określonym akumulatorze (np. pakiecie Li-Ion) wymagałoby użycia wielokrotnie większego (a więc też cięższego) superkondensatora.

3. **Gęstość mocy** – parametr wyrażany w jednostkach mocy na kilogram masy źródła [W/kg], znacznie wyższy dla superkondensatorów, niż dla konwencjonalnych akumulatorów elektrochemicznych. Wysoka wartość gęstości mocy oznacza, że nawet niewielki superkondensator jest w stanie dostarczyć do odbiornika prąd o stosunkowo dużym natężeniu – ma to związek m.in. z bardzo niską szeregową rezystancją zastępczą (ESR). Porównanie różnego rodzaju źródeł energii na płaszczyźnie gęstości energii i mocy zostało pokazane na **rysunku 2**.
4. **Żywotność** – superkondensatory cechują się znacznie dłuższą żywotnością niż konwencjonalne kondensatory elektrolytyczne – choć także ulegają nieuniknionym procesom starzenia, to liczba ich cykli ładowania w gwarantowanym czasie życia jest praktycznie nielimitowana (zwłaszcza w przypadku niewielkich modeli EDLC, przeznaczonych do montażu na PCB). Cechy te sprawiają, że to właśnie superkondensatory są wręcz idealnym wyborem dla aplikacji, w których w czasie normalnego cyklu pracy następuje częste (także okresowe) przeładowywanie.
5. **Napięcie znamionowe** – bodaj największą wadą superkondensatorów jest wyjątkowo niskie napięcie pracy – w większości przypadków nie przekracza ono wartości rzędu 2,8...5,5 V. Ograniczenie takie wiąże się ze strukturą wewnętrzną tych podzespołów – spory udział ma tutaj zarówno materiał przekładki (separatora), jak i zastosowany elektrolit. O ile w przypadku akumulatorów szeregowo łączenie poszczególnych ogniw w pakiety jest klasyczną techniką zwiększania napięcia wyjściowego, to w superkondensatorach wiąże się ono z drastycznym spadkiem pojemności zastępczej, co więcej – często wymaga także zastosowania technik wyrównywania napięć na poszczególnych kondensatorach w celu zapobieżenia uszkodzeniu jednego z nich przez zbyt duże różnice pojemności (nieuniknione przy dość dużej tolerancji produkcyjnej).
6. **Zakres temperatur pracy** – część superkondensatorów jest dostosowana do pracy w szerokim zakresie temperatur otoczenia. O ile większość akumulatorów wykazuje znacznie zaniżoną efektywną pojemność w niskich temperaturach, superkondensatory mogą pracować nawet w mroźnych warunkach do -40°C . Większość superkondensatorów radzi sobie doskonale także z podwyższonymi temperaturami otoczenia, zwykle od $+65$ do $+85^{\circ}\text{C}$.
7. **Cena** – nowoczesne superkondensatory są wciąż stosunkowo kosztowne w produkcji, co sprawia, że w aplikacjach wyjątkowo wrażliwych na ceny zastosowanie akumulatorów lub baterii jednorazowych może okazać się ekonomiczną koniecznością. Koszty rosną drastycznie zwłaszcza w przypadku miniatury



Rysunek 2. Porównanie różnego rodzaju źródeł energii pod względem gęstości energii i mocy



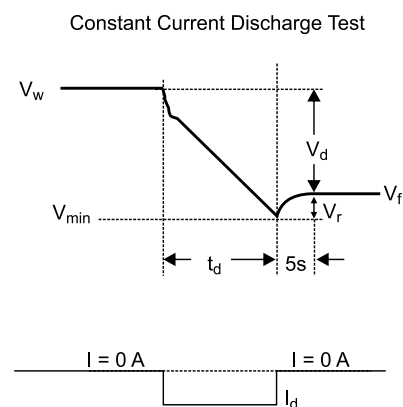
Rysunek 3. Przykładowe kształty charakterystyk rozładowania dla popularnych rodzajów akumulatorów

kondensatorów do montażu SMD oraz wersji THT o bardzo dużej pojemności.

8. **Charakterystyki rozładowania** – jak wspomniano wcześniej, jedną z najistotniejszych różnic pomiędzy akumulatorami, a kondensatorami, jest kształt ich napięciowych charakterystyk rozładowania. W przypadku akumulatorów napięcie przez długi czas spada powoli, aż do momentu osiągnięcia pewnego obszaru krytycznego, powyżej którego następuje gwałtowny spadek prowadzący do głębokiego rozładowania – o ile urządzenie nie wyłączy się samoczynnie odpowiednio wcześniej. Przykładowe kształty charakterystyk dla popularnych rodzajów akumulatorów pokazano na **rysunku 3**. Dla superkondensatorów charakterystyka rozładowania jest początkowo nieliniowa (**rysunek 4**), ponieważ zmienny w czasie spadek napięcia na rezystancji ESR „nakłada się” niejako na stopniowe obniżanie napięcia, spowodowane malejącą ilością ładunku elektrycznego zgromadzonego w kondensatorze. Dopiero po pewnym czasie krzywa przyjmuje charakter liniowy – odpowiada za to dalsza redukcja ładunku zmagazynowanego w pojemności superkondensatora.

Superkondensatory zamiast akumulatorów?

Powszechnym skrótem myślowym jest traktowanie superkondensatorów jako szybkich i wydajnych zamienników baterii oraz akumulatorów w niemal dowolnych zastosowaniach. Warto jednak pamiętać, że z uwagi na wskazane powyżej różnice, jak również na istotne



Rysunek 4. Typowa charakterystyka rozładowania superkondensatora

ograniczenia tej, jakkolwiek młodej, technologii – bezpośrednio zastąpienie jednego rodzaju źródła energii przez inne jest możliwe tylko pod pewnymi warunkami i w ściśle określonych sytuacjach. Paradoksalnie, do takich przykładów należą nie małe i średniej wielkości urządzenia elektroniczne, ale... systemy dużej mocy. Coraz więcej słyszymy ostatnio o zasilaniu (lub wspomaganie zasilania) pojazdów elektrycznych za pomocą superkondensatorów. Istotnie, takie rozwiązanie wydaje się bardzo atrakcyjne z uwagi na aspekty użytkowe – duża gęstość mocy może być z powodzeniem wykorzystana podczas przyspieszania, znakomicie poprawiając dynamikę jazdy. Znaczna szybkość ładowania nakazuje spodziewać się, że samochód przyszłości będzie mógł zostać naładowany w czasie niewiele dłuższym niż zwykle tankowanie konwencjonalnego pojazdu.

Innym przykładem są magazyny energii, stosowane w nowoczesnych, rozproszonych systemach dystrybucji energii elektrycznej. Włączenie do sieci elektroenergetycznej prosumentów (którzy oprócz korzystania z energii mogą również sprzedawać jej nadwyżki z powrotem do sieci), a także coraz liczniejszych odnawialnych źródeł energii (OZE) sprawia, że zachodzi potrzeba magazynowania niewykorzystanej energii w momentach małego obciążenia sieci. Takie rozwiązanie pozwala skorzystać z niej w okresach zwiększonego zapotrzebowania związanego z cyklem dobowym (np. pracą zakładów przemysłowych). Z drugiej strony, zastosowanie magazynów energii jest kluczowe z uwagi na włączenie do sieci wysoce prądożernych stacji ładowania pojazdów elektrycznych – zwykła sieć energetyczna nie byłaby w stanie podołać impulsowemu wzrostowi poboru mocy. W takich zastosowaniach superkondensatory są w stanie oddać niewykorzystaną energię, właśnie ze względu na zdolność do bardzo szybkiego ładowania i rozładowania.

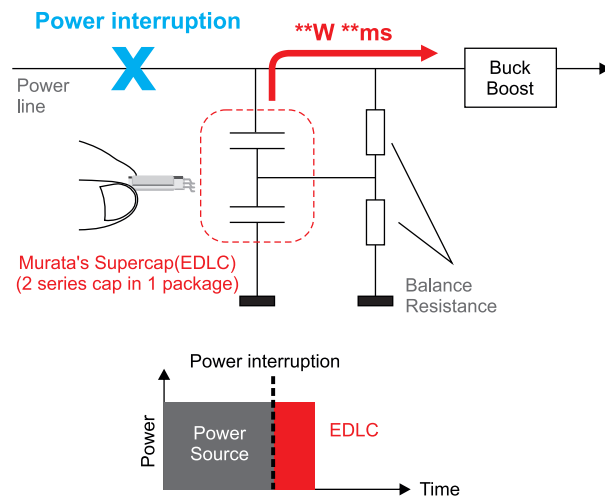
Systemy zasilania buforowego na bazie superkondensatorów

W niektórych systemach wbudowanych cenną zaletą jest możliwość podtrzymania zasilania procesora i kluczowych komponentów, np. po awarii sieci elektroenergetycznej, w celu prawidłowego zamknięcia systemu operacyjnego, zapisania najważniejszych danych do pamięci czy też przywrócenia informacji z pamięci ulotnej po powrocie zasilania do normy. Nie zawsze bowiem konieczne (a tym bardziej opłacalne) jest zasilanie całego urządzenia – zwykle wystarczające okazuje się dostarczenie, przez pewien krótki czas, napięcia zasilającego procesor, wraz z ewentualnymi zewnętrznymi układami pamięci, niezbędnymi do zakończenia procedury kontrolowanego wyłączenia. Z codziennej praktyki inżynierskiej znane są sytuacje, gdy dane systemów operacyjnych, zapisanych na kartach microSD minikomputerów (np. Raspberry Pi), ulegają uszkodzeniu po nagłym wyłączeniu zasilania w niefortunnym momencie.

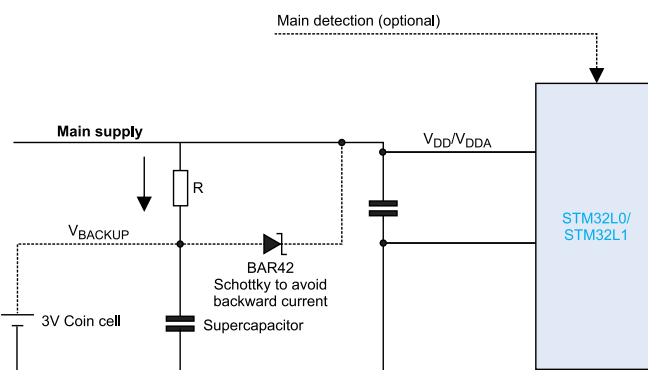
W niektórych przypadkach możliwe jest efektywne wykorzystanie energii, zgromadzonej w klasycznych kondensatorach elektrolitycznych filtrujących zasilanie (z takiego rozwiązania korzystają m.in. znane drukarki 3D marki Prusa Research w celu zapisania danych o pozycji głowicy w momencie zaniku lub drastycznego obniżenia napięcia zasilania sieciowego i przywrócenia procesu wydruku po powrocie prawidłowych parametrów sieci). Jeżeli jednak do wykonania procedury konieczna jest większa ilość energii – warto sięgnąć po superkondensator, pracujący w trybie zasilania buforowego.

Zasadę działania systemu podtrzymania zasilania z użyciem superkondensatorów pokazano na **rysunku 5**. Po odcięciu głównego źródła zasilania szeregowo połączone superkondensatory oddają energię do odbiornika za pośrednictwem przetwornicy DC/DC. Dodatkowe rezystory – kosztem zmniejszenia efektywności układu poprzez wprowadzenie strat energii – ustalają balans napięć, zapobiegając przebiegu jednego z kondensatorów.

Wbrew pozorom, tak prosty układ, jakkolwiek doskonale znany z praktyki inżynierskiej w zastosowaniu do akumulatorów



Rysunek 5. Zasada działania systemu podtrzymania zasilania z użyciem superkondensatorów



Rysunek 6. Jedna z najprostszych, praktycznych aplikacji niwelujących problem silnego impulsu prądowego, pojawiającego się podczas ładowania superkondensatora

kwasowo-olowiowych, nie sprawdziłyby się jednak w większości realnych sytuacji projektowych – głównym problemem byłyby silny impuls prądowy, pojawiający się podczas ładowania superkondensatora tuż po włączeniu zasilania urządzenia. Należy zatem przewidzieć właściwe środki zaradcze.

Jedną z najprostszych praktycznych aplikacji niwelujących wspomniany problem została pokazana na **rysunku 6**. Rezystor R służy do ograniczenia prądu ładowania do wartości równej:

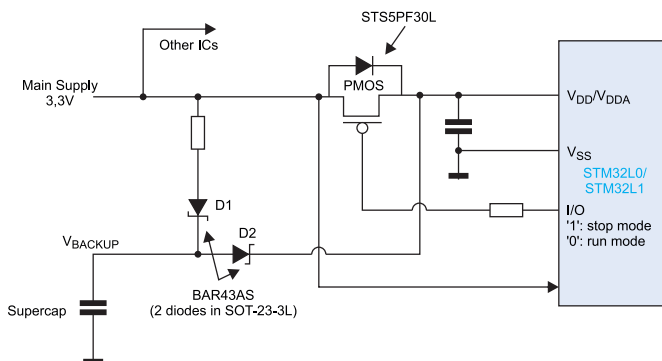
$$I_{chg} = \frac{V_{DD}}{R + ESR}$$

gdzie:

V_{DD} – główne napięcie zasilania,

ESR – zastępcza rezystancja szeregową superkondensatora.

Dioda Schottky'ego zabezpiecza układ przed powstawaniem prądów wstecznych, dzięki czemu ładowanie kondensatora jest możliwe



Rysunek 7. Rozbudowana i bardziej uniwersalna aplikacja systemu podtrzymania zasilania z użyciem superkondensatorów

jedynie poprzez rezystor. Układ jest dostosowany do zasilania ze źródeł napięcia stałego o napięciu wyższym o co najmniej 0,3 V niż wymagane do poprawnej pracy procesora napięcie podtrzymujące. Istotnym wymaganiem jest zapewnienie dużej impedancji źródła po jego wyłączeniu, gdyż w przeciwnym wypadku superkondensator będzie rozładowywany bezpośrednio do źródła, co znacząco zredukuje czas podtrzymania pracy układu.

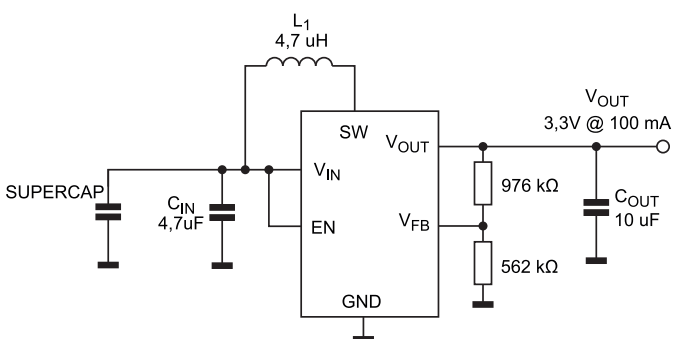
Znacznie lepszym i bardziej uniwersalnym rozwiązaniem jest obwód zasilania przedstawiony na **rysunku 7**. Dodatkowa dioda Schottky'ego włączona szeregowo z rezystorem R zapobiega rozładowywaniu superkondensatora przez główne źródło zasilania i/lub inne bloki urządzenia. Transystor polowy umożliwia programowy wybór źródła napięcia – w stanie przewodzenia zapewnia on ścieżkę o małej impedancji, podłączając wyprowadzenia zasilania procesora do głównego zasilacza urządzenia, zaś odłączenie (po wykryciu spadku napięcia przez linię Wake-up) umożliwi rozpoczęcie rozładowywania superkondensatora, po wcześniejszym wprowadzeniu mikrokontrolera w tryb obniżonego poboru mocy (STOP).

Warto zwrócić uwagę na fakt, że sporym błędem może być próba zastosowania superkondensatora zamiast baterii lub akumulatora NiMH w celu podtrzymywania zegara RTC i pamięci RAM lub rejestrów z tzw. obszaru *backup domain* (np. w mikrokontrolerach STM32). Rozwiązanie takie sprawdzi się jedynie w tych urządzeniach, które podczas normalnej pracy są stale (lub przez większość czasu) podłączone do innego źródła zasilania (np. zegary LED z zasilaniem sieciowym). Należy bowiem pamiętać, że superkondensatory cechują się stosunkowo wysokimi prądami samorozładowania, co sprawia, że czas podtrzymywania pracy RTC i/lub pamięci RAM przez superkondensator byłby wielokrotnie niższy niż w przypadku nawet niewielkiej baterii litowej lub akumulatora niklowo-wodorkowego.

Zasilanie buforowe o napięciu powyżej 5 V

Zaprezentowane na rysunkach 4 i 5 schematy przykładowych systemów zasilania buforowego mają rację bytu w przypadku niskomocowych mikrokontrolerów i innych układów zdolnych do pracy przy napięciu zasilania na poziomie około 1,8..3,3 V. Jeżeli zachodzi potrzeba uzyskania wyższych napięć (np. 5 V) do wyboru pozostają cztery wyjścia:

- Zastosowanie superkondensatora o wyższym dopuszczalnym napięciu pracy** – o ile większość popularnych superkondensatorów jest przeznaczona do pracy przy napięciach do 5,5 V, to na rynku dostępne są modele złożone z kilku cel (np. seria 196 HVC ENYCA marki Vishay zawiera superkondensatory o napięciach pracy od 1,4 V do 8,4 V w zakresie sumarycznej pojemności od 4 F do 90 F).
- Zastosowanie kondensatorów szeregowych o jednakowej pojemności nominalnej** – w tym przypadku konieczne jest użycie pasywnego dzielnika napięcia lub aktywnego balansera,



Rysunek 8. Podstawowy schemat aplikacyjny układu MCP1640 zdolnego do pracy przy startowym napięciu wejściowym w zakresie już od 0,65 V

zabezpieczającego kondensator o najmniejszej pojemności (rzeczywistej) przed przebicciem.

- Zastosowanie konwertera DC/DC typu boost** – jest to rozwiązanie najbardziej ekonomiczne ze wszystkich przytoczonych, ponieważ pozwala odzyskać maksymalnie dużo energii zgromadzonej w superkondensatorze.
- Zastosowanie scalonego kontrolera ładowania/rozładowania superkondensatorów** – na rynku dostępne są obecnie wyspecjalizowane kontrolery, pozwalające na prostą i efektywną obsługę systemów zasilania na bazie superkondensatorów.

Wybór przetwornicy DC/DC do obsługi superkondensatora

W przypadku wyboru trzeciej z przedstawionych ścieżek projektowych warto zastanowić się nad odpowiednim doбором przetwornicy DC/DC, która sprawdzi się we współpracy z superkondensatorami. Spośród wszystkich parametrów tych układów szczególną uwagę należy zwrócić na trzy spośród nich:

- Zakres napięć wejściowych** – przy założeniu, że celem użycia przetwornicy jest odzyskanie maksymalnie dużo energii zgromadzonej w superkondensatorze (a nie tylko zwiększenie napięcia na krótki czas, potrzebny np. do zapisania danych w pamięci nieulotnej), konieczna okazuje się selekcja układu o możliwie najszerszym zakresie napięć wejściowych, obejmującym jak najniższe napięcie startowe.

Na rynku dostępnych jest wiele miniaturowych konwerterów spełniających to wymaganie – jako przykład warto przytoczyć rodzinę układów MCP1640 firmy Microchip, zdolnych do pracy przy startowym napięciu wejściowym w zakresie już od 0,65 V. Podstawowy schemat aplikacyjny został pokazany na **rysunku 8**. Innym, godnym uwagi przykładem jest układ LM2621 – przy prądzie zasilania na poziomie 80 μ A jest w stanie dostarczyć prąd wyjściowy do 1 A, co pozwala na zastosowanie w urządzeniach wymagających większej mocy (w tym przypadku konieczny będzie superkondensator o dużej pojemności lub bateria kilku mniejszych, połączonych równolegle).

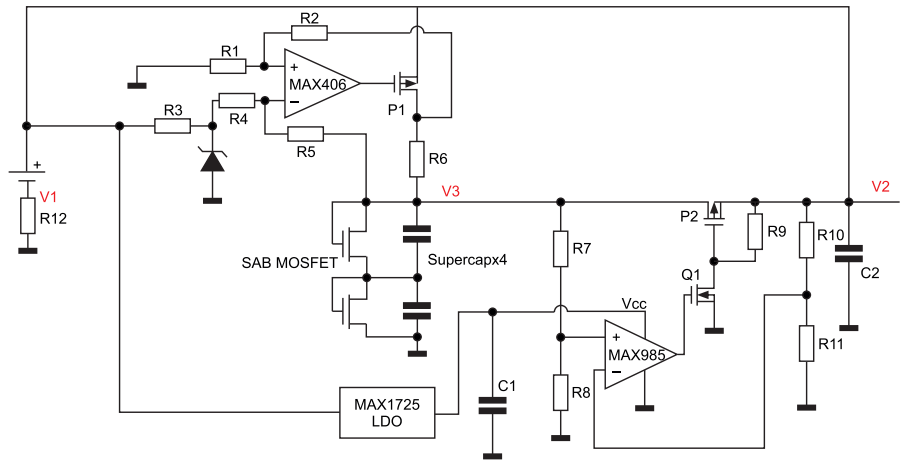
- Sprawność** – tak jak w każdym innym przypadku, wysoka sprawność przetwornicy DC/DC pozwala możliwie najpełniej wykorzystać stosunkowo niewielką ilość energii, zgromadzonej w superkondensatorze. Warto jednak mieć na uwadze, że w wielu aplikacjach – w szczególności z segmentu ultra-low power – znacznie ważniejsza okazuje się wartość natężenia prądu zasilania pobieranego przez samą przetwornicę, gdyż to właśnie ten parametr staje się główną składową strat energii wprowadzanych przez konwerter DC/DC do układu o niewielkim zapotrzebowaniu na moc zasilania. Wspomniany wcześniej układ MCP1640 wymaga do prawidłowego działania prądu o natężeniu zaledwie 19 μ A, dzięki czemu może z powodzeniem zostać zastosowany w urządzeniach niskomocowych.

- Sterowanie (linia EN/SHDN)** – warto zwrócić uwagę na możliwość wyłączenia przetwornicy podczas normalnej pracy urządzenia, co umożliwi redukcję sumarycznego zużycia energii i pozwoli szybciej naładować superkondensator po zużyciu zgromadzonego w nim ładunku. Obecnie zdecydowana większość scalonych kontrolerów DC/DC ma linię zezwalającą. Oszczędność energii okaże się przydatna szczególnie w urządzeniach, których głównym źródłem zasilania są baterie lub akumulator – przykładowo, przywołany wcześniej kontroler MCP1640 w stanie wyłączenia pobiera zaledwie 0,7 μ A (maks. 2,3 μ A).

Scalone kontrolery ładowania/rozładowania superkondensatorów

Dobrym wyborem w bardziej wymagających aplikacjach superkondensatorów jest zastosowanie gotowego, scalonego kontrolera ładowania/rozładowania. Na rynku pojawia się obecnie coraz

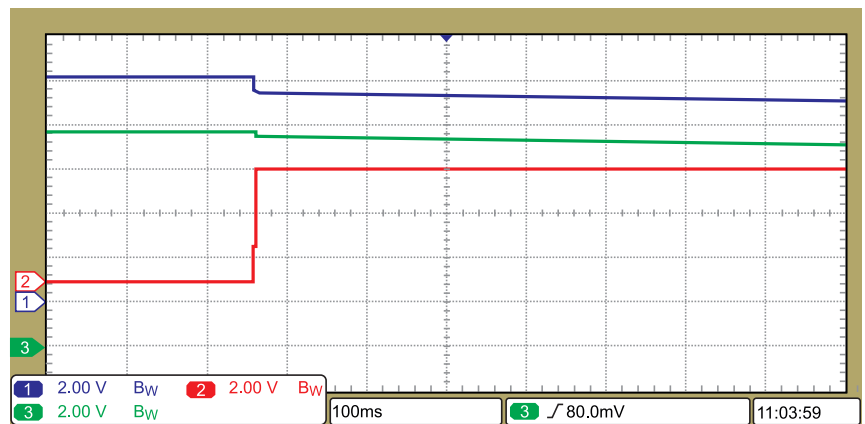
Ciekawą propozycję dla konstruktorów pracujących nad lampami błyskowymi i innymi aplikacjami, wymagającymi dostarczenia silnych impulsów prądowych (do 4 A) do diod LED dużej mocy, przygotowała firma ON Semiconductor. Układ CAT3224 jest specjalizowanym kontrolerem superkondensatora, oferującym ponadto dwa wbudowane źródła prądowe o dużej wydajności oraz aktywny balancer, umożliwiającą podłączenie dwóch superkondensatorów. Prezentowane rozwiązanie jest przy okazji kolejnym przykładem doskonałej współpracy akumulatorów (w tym przypadku rekomendowane są ogniwa Li-Ion) z superkondensatorami. Schemat aplikacyjny został pokazany na rysunku 12.



Rysunek 13. Układ aktywnej kompensacji spadku napięcia na rezystancji wewnętrznej głównego źródła zasilania (akumulatora)

Bezpośrednia współpraca superkondensatorów z akumulatorami lub bateriami

Omawiając tematykę superkondensatorów i akumulatorów, nie sposób nie wspomnieć o jeszcze jednym ważnym przykładzie współpracy obu typów źródeł energii. Stosując komparator, wzmacniacz operacyjny i stabilizator LDO, można zbudować układ aktywnej kompensacji spadku napięcia na rezystancji wewnętrznej głównego źródła zasilania (akumulatora) – przykład takiego układu, opracowanego przez inżynierów aplikacyjnych firmy Maxim, został pokazany na rysunku 13. Za ładowanie kondensatorów odpowiada źródło prądowe oparte na wzmacniaczu MAX406, współpracującym z rezystorem bocznikowym R6 (w trybie różnicowym) oraz tranzystorem wyjściowym P1. Komparator MAX985 dokonuje ciągłej kontroli napięcia na kondensatorach oraz na szynie zasilania urządzenia, w razie potrzeby otwierając tranzystor P2, dzięki czemu superkondensatory są dołączane równolegle do akumulatora, wspomagając jego działanie i zapobiegając obniżeniu napięcia zasilania w stanie przejściowym po włączeniu silnego obciążenia. Efekty działania układu zostały pokazane na rysunku 14 (kanał 1 – napięcie na akumulatorze, kanał 2 – napięcie wyjściowe, kanał 3 – napięcie na dodatnim wyprowadzeniu „górnego” superkondensatora).



Rysunek 14. Efekt działania układu z rysunku 13, kanał 1 – napięcie na akumulatorze, kanał 2 – napięcie wyjściowe, kanał 3 – napięcie na dodatnim wyprowadzeniu „górnego” superkondensatora

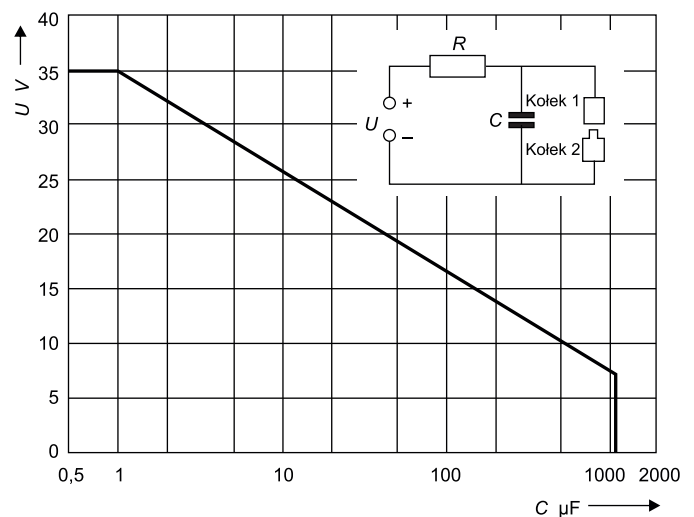
Zastosowanie (super)kondensatorów a normy

Warto pamiętać, że w niektórych aplikacjach istnieją pewne ograniczenia, niepozwalające na użycie superkondensatorów, a nawet jakichkolwiek elementów pojemnościowych o dużej pojemności. Wymaganie takie można znaleźć m.in. w normie PN-EN 60601-1:2011, w sekcji dotyczącej bezpieczeństwa elektronicznych urządzeń medycznych, które przeznaczone są do pracy w środowisku bogatym w tlen. Ograniczenie wynika z ryzyka powstania łuku elektrycznego w razie wyładowania (np. przypadkowego zwarcia) kondensatora, co mogłoby skutkować eksplozją i stworzeniem w ten sposób nieakceptowalnego ryzyka dla pacjenta i personelu medycznego. Wykres pokazujący dopuszczalne wartości napięcia roboczego w zależności od pojemności, opracowany na podstawie normy 60601-1, został zaprezentowany na rysunku 15.

Podsumowanie

W codziennej praktyce elektronika konstruktora zazwyczaj spotykamy się z konwencjonalnymi, elektrochemicznymi źródłami energii: bateriami i akumulatorami. Warto jednak pamiętać, że superkondensatory

Obciążenie pojemnościowe



Rysunek 15. Wykres pokazujący dopuszczalne wartości napięcia roboczego w zależności od pojemności, opracowany na podstawie normy 60601-1

– jakkolwiek nadal niegotowe technologicznie na całkowite zastąpienie „zwykłych” źródeł zasilania – doskonale sprawdzają się jako ich wsparcie w aplikacjach wymagających podtrzymywania zasilania po zaniku napięcia z głównego źródła czy też w roli dodatkowego magazynu energii, służącego do kompensacji obciążeniowych spadków napięcia.

inż. Przemysław Musz