

## 1. Podstawowe własności i zastosowanie

Ultrakondensatory (zwane również superkondensatorami) stanowią rodzaj kondensatora elektrolitycznego, który z uwagi na sposób konstrukcji wykazuje niezwykle dużą pojemność elektryczną (rzędu kilku tysięcy faradów) w porównaniu do klasycznych kondensatorów elektrolitycznych dużej pojemności. Największą zaletą ultrakondensatorów jest bardzo krótki czas ładowania w porównaniu z innymi urządzeniami do przechowywania energii (np. akumulatorami). Mają one również niewielkie rozmiary, mogą magazynować znacznie więcej energii niż kondensatory konwencjonalne i uwalniać ją znacznie szybciej niż akumulatory. Dlatego też, ultrakondensatory są coraz częściej stosowane równolegle z innymi źródłami energii, np. ogniwami paliwowymi, w celu krótkotrwałego dostarczania mocy szczytowej, co pozwala na znaczne zmniejszenie rozmiarów całego układu.

Przy pomocy ultrakondensatorów można uzyskać bardziej ekonomiczne, niezawodne i bezobsługowe rozwiązania, które dodatkowo charakteryzują się zdecydowanie dłuższą żywotnością. Ultrakondensatory są stosowane z powodzeniem w branży motoryzacyjnej, elektronice, telekomunikacji, medycynie oraz aplikacjach wojskowych:

- Dzięki ultrakondensatorom samochody z napędem hybrydowym uzyskują większą moc przy przyspieszaniu oraz rozruchu. Ich zastosowanie pozwala również zwiększyć moment obrotowy i zredukować zużycie paliwa.
- Ultrakondensatory stosowane są do magazynowania energii odzyskiwanej podczas hamowania pociągów i autobusów.
- W pociągach spalinowych ultrakondensatory są używane jako moduły rozruchowe silników diesla, o bardzo wydajnych parametrach prądowych. Znaczna różnica w ciężarze – ok. 300kg, w porównaniu do tradycyjnej baterii rozruchowej, pozwala na zwiększenie objętości zbiorników paliwa o 300 litrów.
- Dzięki ultrakondensatorom wózki widłowe mają lepsze przyspieszenie oraz większą siłę udźwigu. Energia przy hamowaniu i opuszczaniu ciężarów jest odzyskiwana, przez co można stosować mniejszy akumulator oraz wydłużyć jego żywotność.
- Ze względu na ich niezawodność i niską wagę, w wielu nowych samolotach pasażerskich automatyka pokładowa jest oparta na ultrakondensatorach.
- Ultrakondensatory stosuje się coraz częściej w nowoczesnym sprzęcie elektronicznym (aparaty cyfrowe, telefony komórkowe), co pozwala uzyskać dużą żywotność i obniżenie gabarytów.
- Skomplikowane systemy hydrauliczne, które działają w oparciu o baterie stosowane w elektrowniach wiatrowych są aktualnie zastępowane przez proste rozwiązania zawierające ultrakondensatory. Ekstremalne temperatury oraz bardzo utrudniony dostęp do urządzeń znajdujących się w takiej elektrowni udowodniły, że silnik elektryczny działający w oparciu o ultrakondensatory jest obecnie najlepszym rozwiązaniem.
- Różne rodzaje ultrakondensatorów są stosowane jako rezerwowe źródła napięcia.

Mniejsze montowane są wprost na płytkach drukowanych i służą do podtrzymywania zawartości pamięci w komputerach i innych urządzeniach podczas awarii zasilania. Mogą być stosowane zamiast akumulatorów w sprzęcie domowym, w zabawkach, w sprzęcie medycznym, przemysłowym, w instalacjach ogniw słonecznych, itd. Ultrakondensatory mogą służyć do budowy bezprzerwowych zasilaczy, tzw. UPS-ów (Unin-



erruptible Power Supply). Fotografia na poprzedniej stronie pokazuje potężny zespół awaryjnego zasilania z wykorzystaniem ultrakondensatorów EPCOS, wystawiony na targach w Hanowerze w ubiegłym roku. Wykorzystując 115 kondensatorów po 2700F połączonych w szereg można uzyskać moc maksymalną 450kW. Przy obciążeniu 20kW zespół dostarcza energię przez pół minuty, co całkowicie wystarcza do włączenia rezerwowego agregatu prądotwórczego z silnikiem spalinowym

Do zalet ultrakondensatorów należą:

- Bardzo duża szybkość i prostota ładowania/rozładowania (w porównaniu do baterii i akumulatorów),
- Niewielka degradacja własności przy wielokrotnym rozładowaniu i ładowaniu (nawet do miliona cykli),
- Duża sprawność cyklu (95% i więcej),
- Niewielka toksyczność użytych materiałów (nie zawierają bardzo szkodliwych dla środowiska metali – ołowiu i kadmu)
- Duża trwałość (ponad 10 lat),
- Odporność na zwarcie (można je bez szkody rozładować do zera),
- Możliwość wydajnej pracy w szerokim zakresie temperatur (nawet do  $-40^{\circ}\text{C}$ ),
- Relatywnie niski koszt przypadający na jednostkę pojemności,
- Bezawaryjność i niskie koszty konserwacji.

Wady ultrakondensatorów:

- Ilość zgromadzonej energii na jednostkę masy urządzenia jest ciągle o rząd wielkości niższa (5 Wh/kg) niż dla źródeł chemicznych (40 Wh/kg),
- Zmienna wartość napięcia na zaciskach ultrakondensatora (napięcie spada wykładniczo przy rozładowaniu); w celu efektywnego wykorzystania energii niezbędne są skomplikowane układy energoelektroniczne,
- Niektóre typy ultrakondensatorów mają tendencję do samorozładowywania się.

## 2. Budowa i zasada działania

Już na początku trzeba jasno powiedzieć: w superkondensatorach nie zachodzą reakcje chemiczne. Nie jest to więc odmiana akumulatorów. Nie jest to także odmiana kondensatorów elektrolitycznych z dielektrykiem napowierzchni jednej z elektrod. Niewątpliwie są to jednak kondensatory. W konwencjonalnym kondensatorze energia jest magazynowana w postaci ładunku elektrycznego na dwóch metalowych okładkach izolowanych cienką warstwą dielektryka. Bateria (ogniwo elektrochemiczne) gromadzi energię za pomocą wiązań chemicznych powstających w wyniku reakcji utleniania i redukcji między elektrolitem a elektrodami. W superkondensatorach również występuje elektrolit, jednak jak już wcześniej zauważyliśmy nie zachodzą reakcje chemiczne. Nie ma także dielektryka.

W celu wyjaśnienia sposobu uzyskiwania tak dużych pojemności w ultrakondensatorach warto przypomnieć zależność, z której korzystamy do jej obliczania:

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} [F], \text{ gdy } d \rightarrow 0, C \rightarrow \infty$$

gdzie:

A – pole powierzchni okładki kondensatora

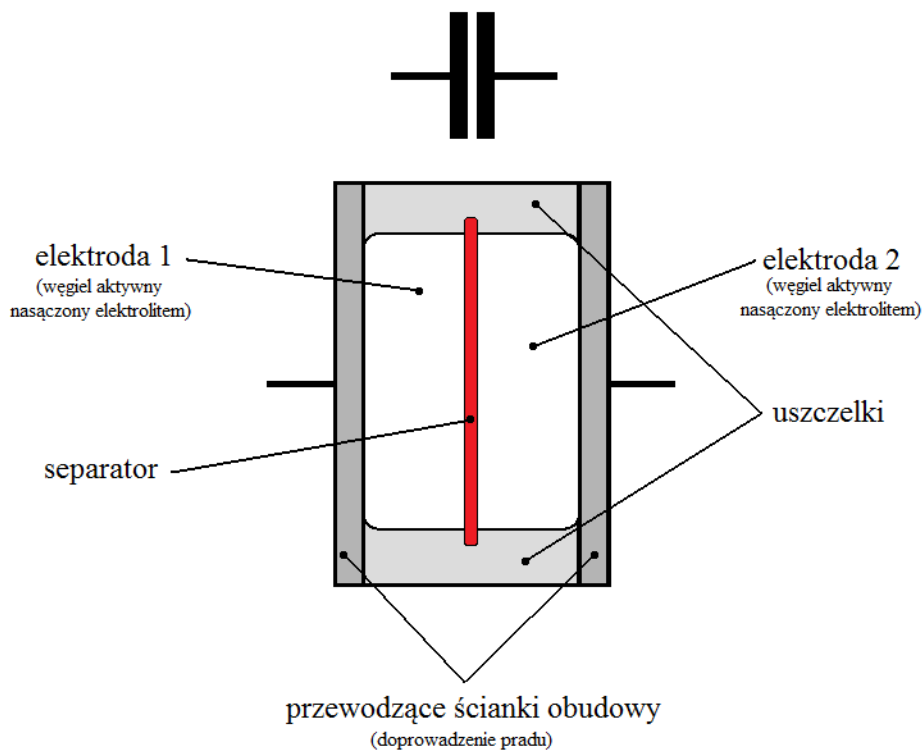
d – odległość między okładkami

$\varepsilon_r$  – stała dielektryczna ośrodka między okładkami

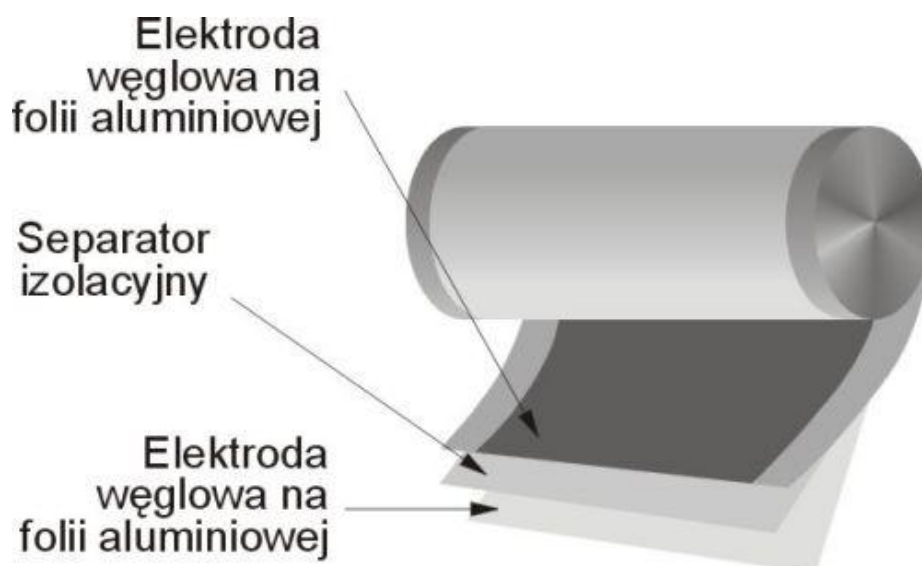
$\varepsilon_0$  – stała dielektryczna próżni

Z zależności wynika, że im większa powierzchnia okładek i im mniejsza odległość między nimi, tym większą pojemność ma kondensator. Technologia ultrakondensatorów opiera się właśnie na tych dwóch czynnikach. W praktyce elektrody wykonuje się z węgla aktywnego lub węglowych aerozeli, które posiadają porowatą strukturę i dużą powierzchnię właściwą (stosunek powierzchni do ilości /masy/ substancji) - nawet do 2500 m<sup>2</sup>/g. Natomiast odległość oddzielającą ładunki wyznacza rozmiar znajdujących się w elektrolicie jonów, przyciągniętych przez elektrodę. Nie przekracza ona kilku nanometrów i jest znacznie mniejsza od osiągalnej przy użyciu konwencjonalnych materiałów dielektrycznych. Podsumowując, zbieżność wielkiej skutecznej powierzchni elektrod z bardzo małą dzielącą je odległością decyduje o ogromnej pojemności ultrakondensatora.

Uproszczony schemat budowy ultrakondensatora przedstawiono na rys. 1., zaś na rys 2. praktyczny sposób jego realizacji.

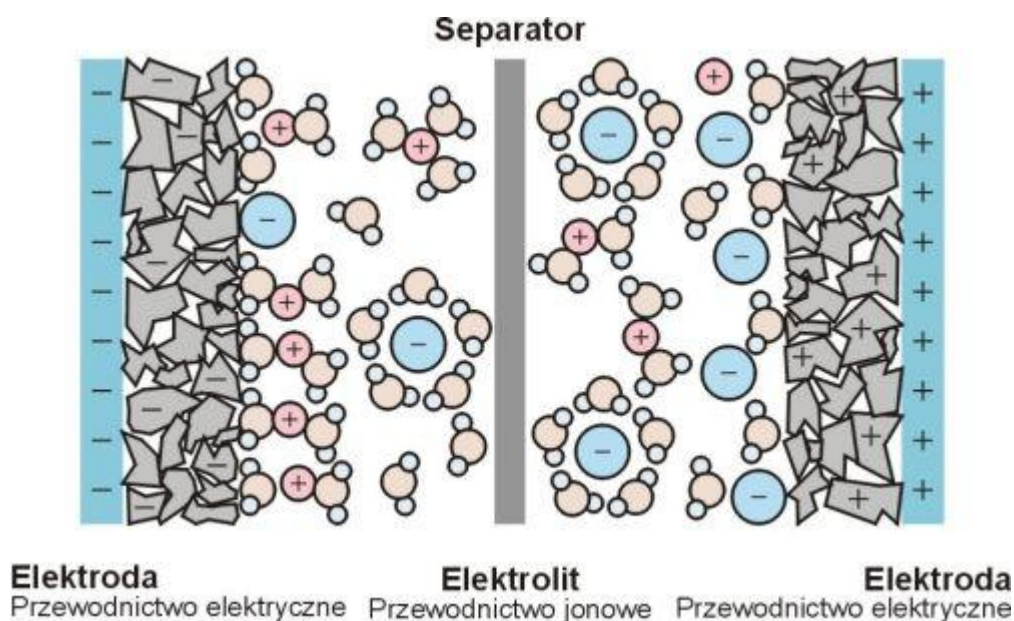


Rys.1. Schemat budowy ultrakondensatora



Rys.2. Praktyczny sposób realizacji budowy ultrakondensatora

Urządzenie składa się z dwóch niereaktywnych elektrod nasączonych elektrolitem (najczęściej jest to roztwór kwasu siarkowego lub wodorotlenek potasu), pomiędzy które jest przyłożone napięcie. Do dodatniej płyty przyciąga ono jony ujemne, a do ujemnej jony dodatnie. Powstają w ten sposób dwie warstwy oddzielonych od siebie ładunków, jedna w płycie dodatniej, a druga w ujemnej (rys. 3).



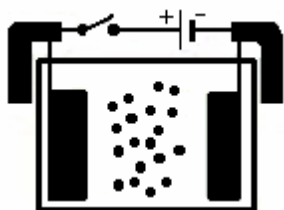
Rys. 3. Rozmieszczenie ładunków w ultrakondensatorze.

W elektrolicie jony równoważą się wzajemnie, ale po przyłożeniu pola elektrycznego dyfundują do przeciwnych elektrod. Porowate elektrody węglowe są bardzo wydajnymi zasobnikami elektronów i jonów. Elektrony związane z jonami elektrolitu zbierają się w węglowej warstwie elektrody ujemnej. Natomiast w dodatniej elektrodzie węglowej (z prawej strony rysunku) gromadzą się wakansy elektroniczne, związane z anionami elektrolitu. Elektrolit cały czas zachowuje przewodnictwo, umożliwiając przepływ prądu pomiędzy elektrodami tego dwuwarstwowego kondensatora w czasie jego ładowania i rozładowywania.

Ważną rolę pełni separator. Ta cieniutka, porowata folia z tworzywa sztucznego nie pełni roli klasycznego dielektryka. Separator uniemożliwia bezpośrednie zwarcie elektryczne obu węglowych elektrod. Jednocześnie separator nie jest żadną przeszkodą dla jonów, które przepuszcza bez przeszkód, dzięki czemu po dołączeniu napięcia mogą się one przemieszczać w kierunku odpowiednich elektrod.

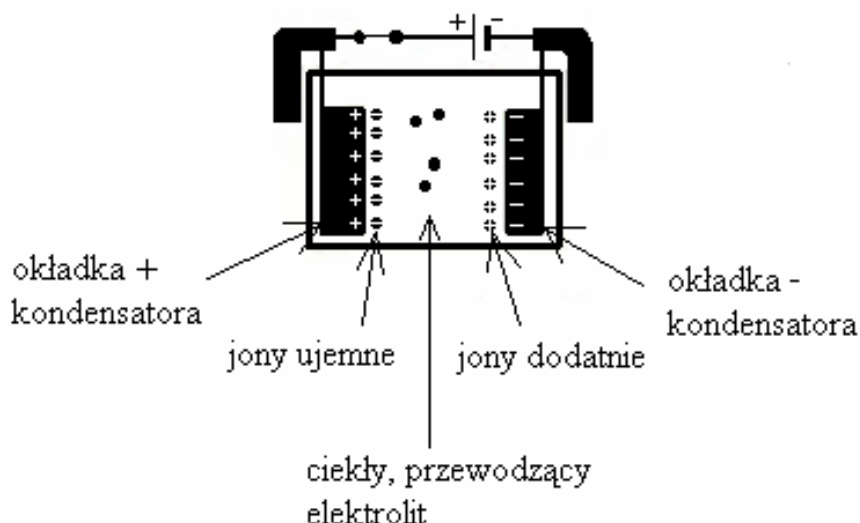
### 3. Ładowanie i rozładowywanie kondensatorów

Ładowanie superkondensatora polega na odpowiednim przemieszczaniu się jonów wewnątrz elektrolitu pod wpływem przyłożonego napięcia prądu stałego. W stanie rozładowania (spoczynku) jony rozłożone są w sposób chaotyczny na całej powierzchni elektrolitu, co przedstawia rysunek 4.



Rys.4. Rozmieszczenie jonów w rozładowanym superkondensatorze.

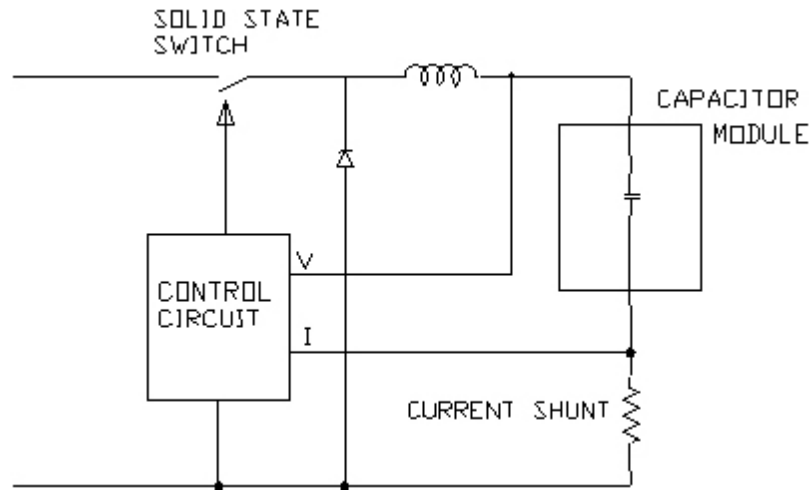
Po przyłożeniu do zacisków ultra kondensatora napięcia o wartości niższej od wartości napięcia granicznego charakterystycznego dla danego elektrolitu jony znajdujące się w elektrolicie zaczynają się przemieszczać w kierunku odpowiednich elektrod – aniony przesuwały się w pobliże anod, a kationy w kierunku katod. W takiej sytuacji nie występuje przepływ prądu przez superkondensator. Na skutek zbyt małego napięcia jony nie mogą przedostać się do swoich elektrod, a jedynie gromadzą się w ich pobliżu. Powoduje to utworzenie na granicy elektroda – roztwór dwóch warstw elektrycznych, na których akumulują się nośniki prądu o takiej samej wartości jak ładunek zgromadzony na powierzchni elektrody, ale o przeciwnym znaku. Sytuację tą obrazuje rysunek 5. Ilość ładunku zgromadzonego zależy od wartości przyłożonego napięcia.



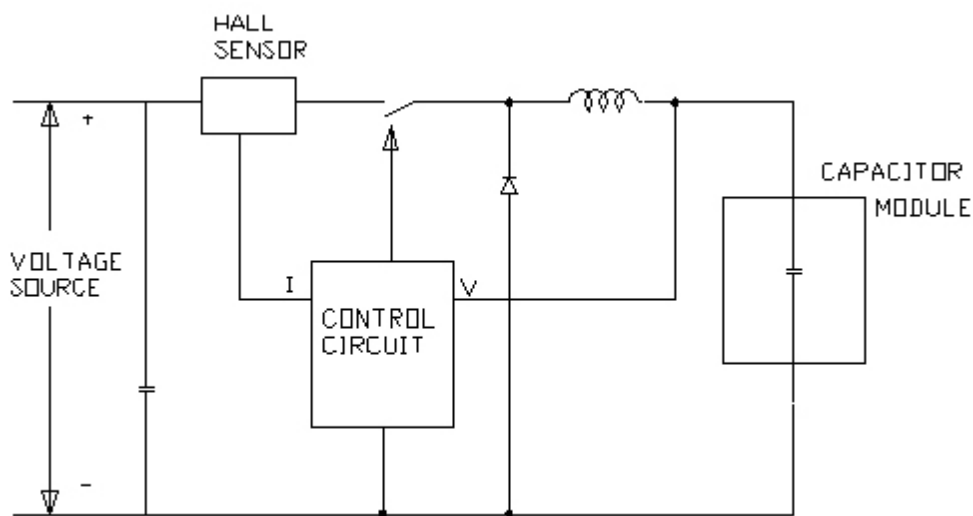
Rys.5. Rozmieszczenie jonów wewnątrz superkondensatora pod wpływem przyłożonego napięcia.

Przemieszczenie jonów w elektrolicie wymaga dostarczenia energii. Można tutaj przywołać przykład sprężyny. Jony dążą do swojego położenia spoczynkowe. Aby ją odchylić od tego położenia neutralnego, potrzebna jest pewna siła i pewna energia (tak samo jak w przypadku

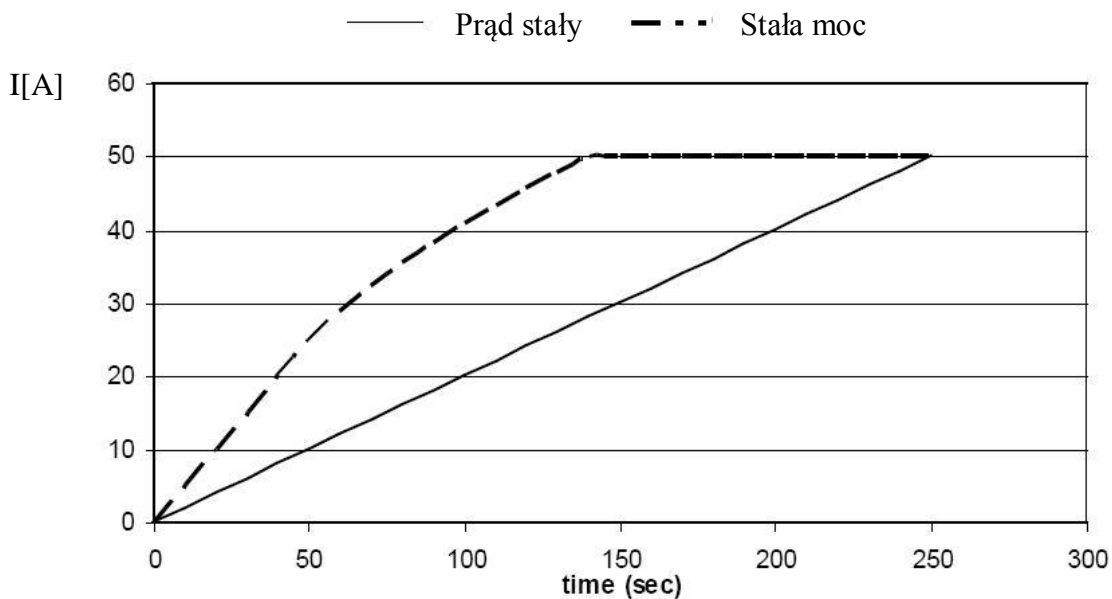
sprężyny). Energii tej trzeba dostarczyć w procesie ładowania kondensatora, ale można ją odebrać w procesie rozładowania, gdy "sprężynujące" jony wracają do położenia spoczynkowego. Energia gromadzona jest w mikrosporach oraz na granicy pomiędzy stały materiałem elektrod, a elektrolitem. Zatem w odróżnieniu od tradycyjnych kondensatorów energia nie jest gromadzona w atomach dielektryka.



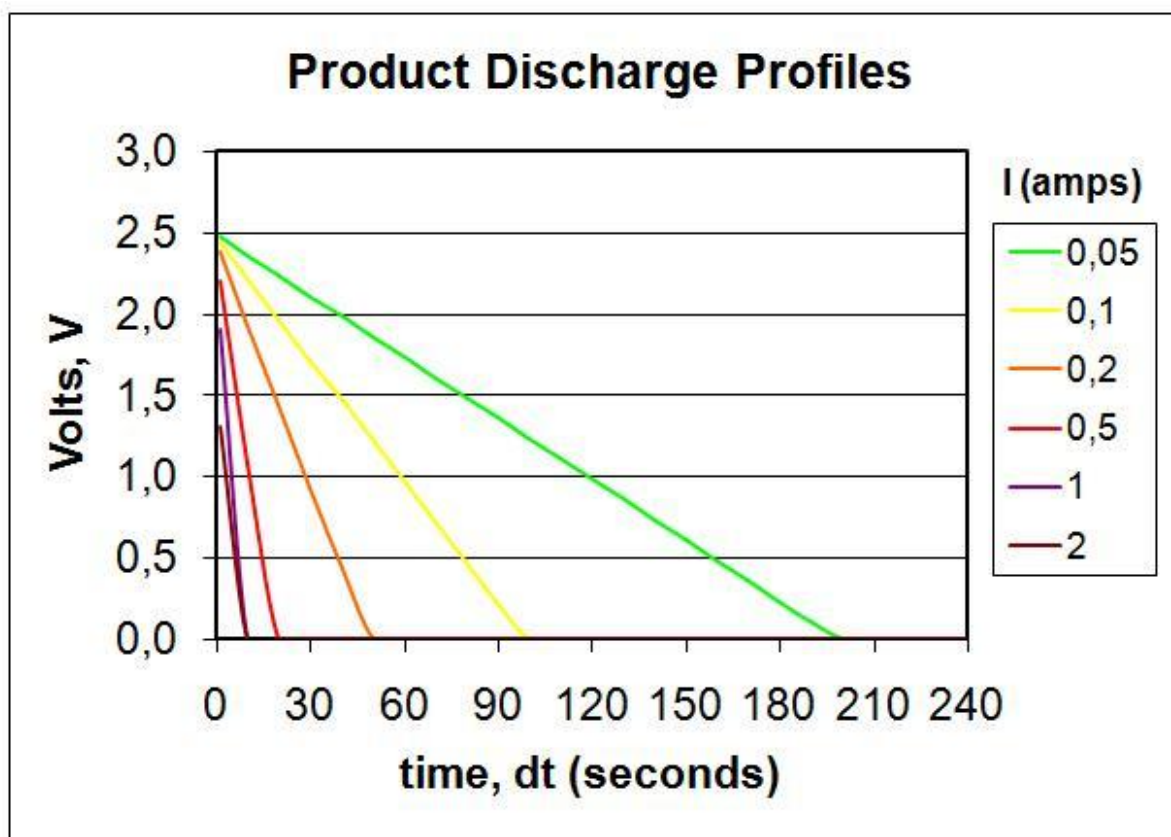
Rys.6. Schemat ładowania superkondensatora prądem stałym



Rys.7. Schemat ładowania superkondensatora stałą mocą.



Rys.8. Porównanie czasu ładowania superkondensatora przy użyciu prądu stałego i stałej mocy.



Rys.9. przykładowy wykres rozładowywania superkondensatora w zależności od wartości prądu.

#### 4. Nieliniowe elementy (pojemność , rezystancja wewnętrzna ESR)

Rezystancja wewnętrzna:

Pomiaru oporności dokonuje się przy rozładowywaniu kondensatora przez czas 5 sekund

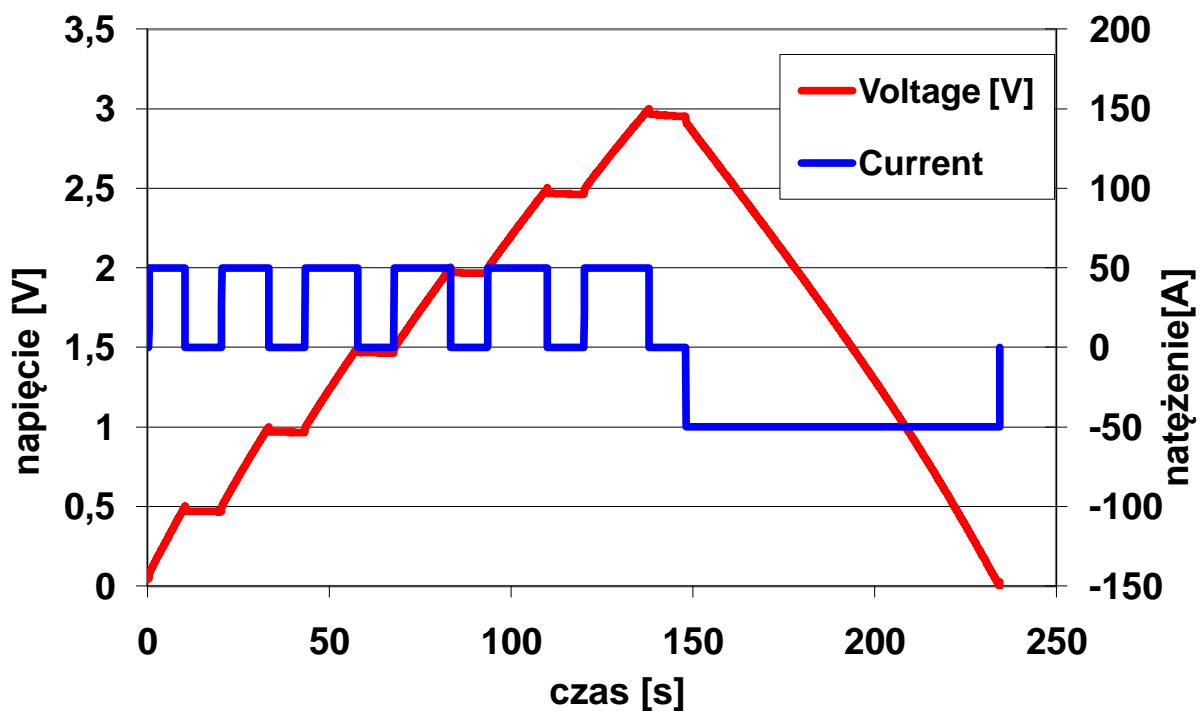
Nawiązując do poniższego wykresu, oporność (ESR) opisujemy wzorem:

$$ESR = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

$\Delta I$  – zmiana natężenia

$\Delta U$  – zmiana napięcia

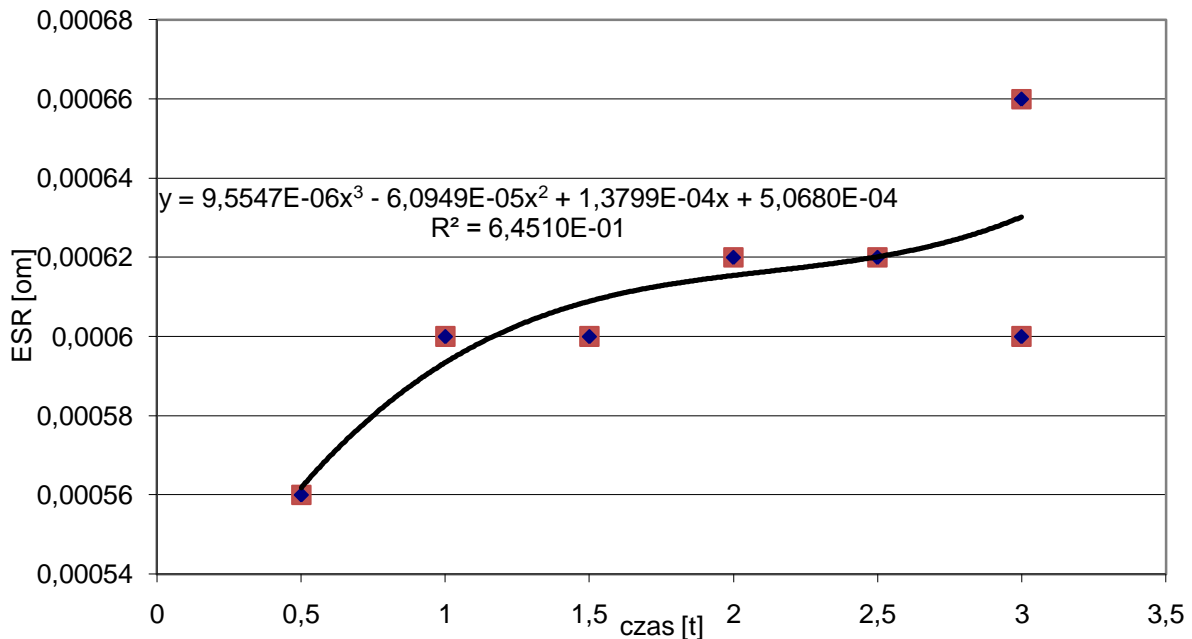
*Pomiar rezystancji rozważa wszystkie elementy opornościowe zawierając około pięć stałych czasowych produktu i uwzględnia wszystkie elementy rezystancyjne. Rzeczywisty pomiar oporu będzie niższy, jeśli będzie mierzony przez okres krótszy niż 5 sekund.*





Pomiar rezystancji wewnętrznej ESR wymaga zbadania zależności między napięciem, natężeniem i czasem. Jednym z celów ćwiczenia jest stworzenie wykresu  $ESR=f(U)$ .

Przykładowa charakterystyka:

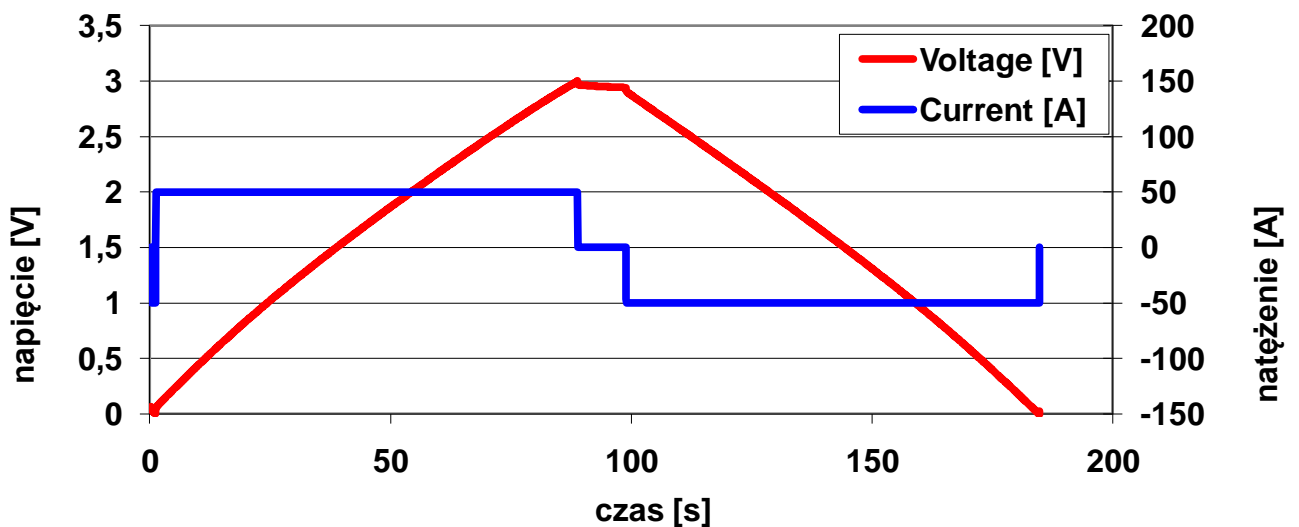


*Pojemność kondensatora:*

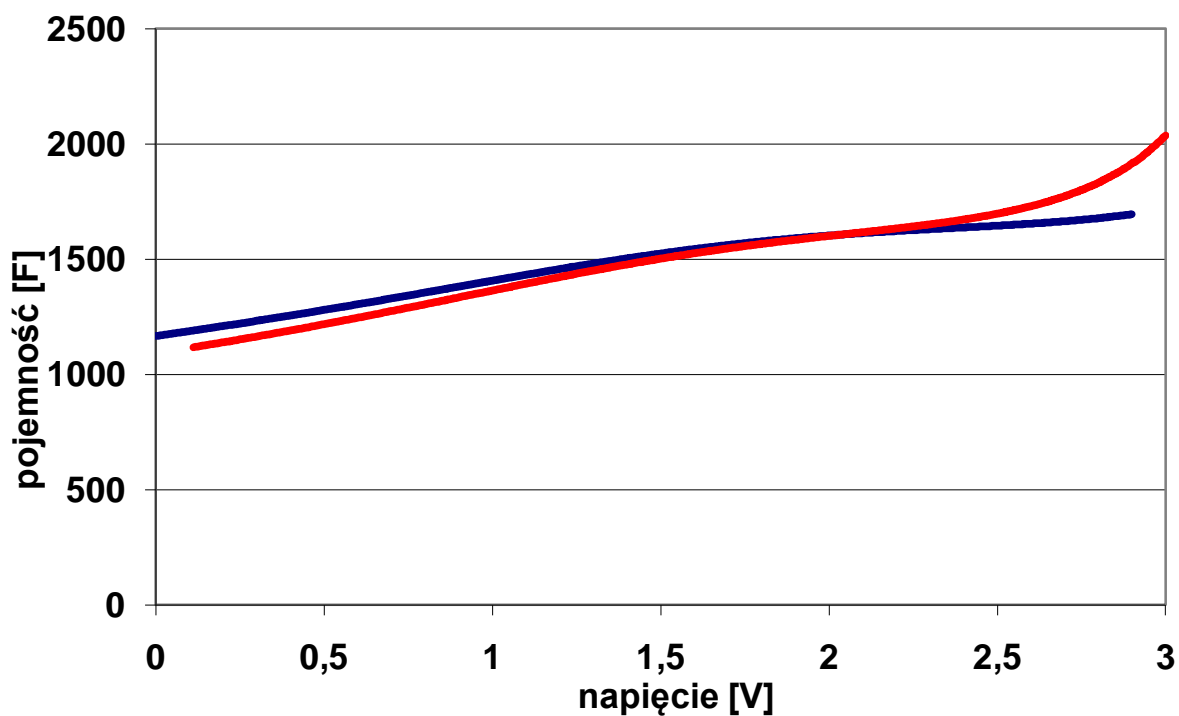
Podczas ćwiczenia badać będziemy pojemność zespołu 10 kondensatorów. Będziemy je ładować prądem o stałym natężeniu, a następnie w podobny sposób rozładowywać. Otrzymana charakterystyka napięcia i natężenia w funkcji czasu pozwoli nam, po jej zróżniczkowaniu, określić funkcję pojemności w funkcji napięcia.  $C = f(U)$

$$C \frac{du}{dt} = I$$

$$\Rightarrow C = I \cdot \frac{dt}{du}$$

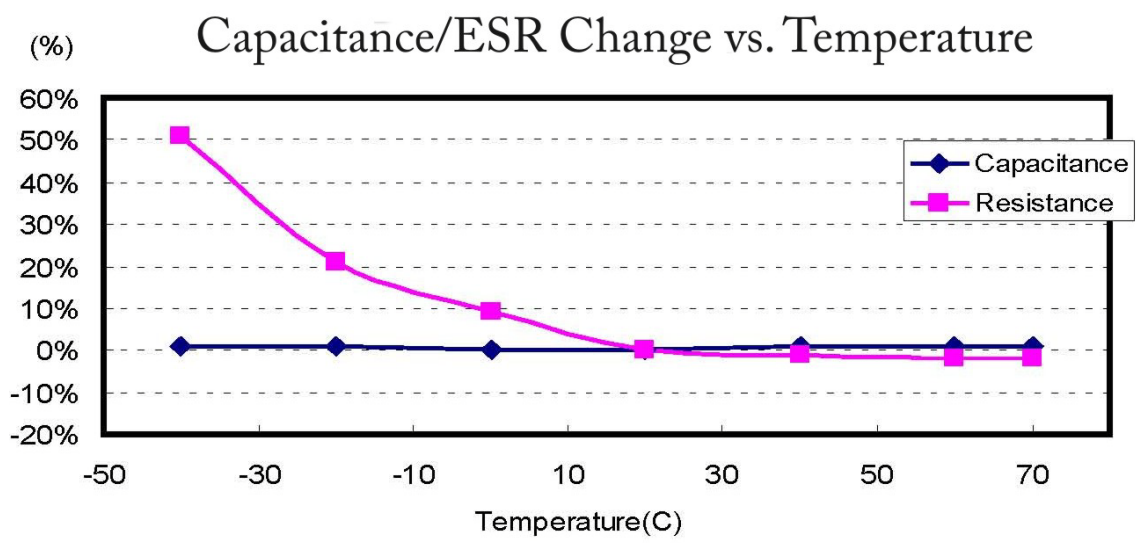
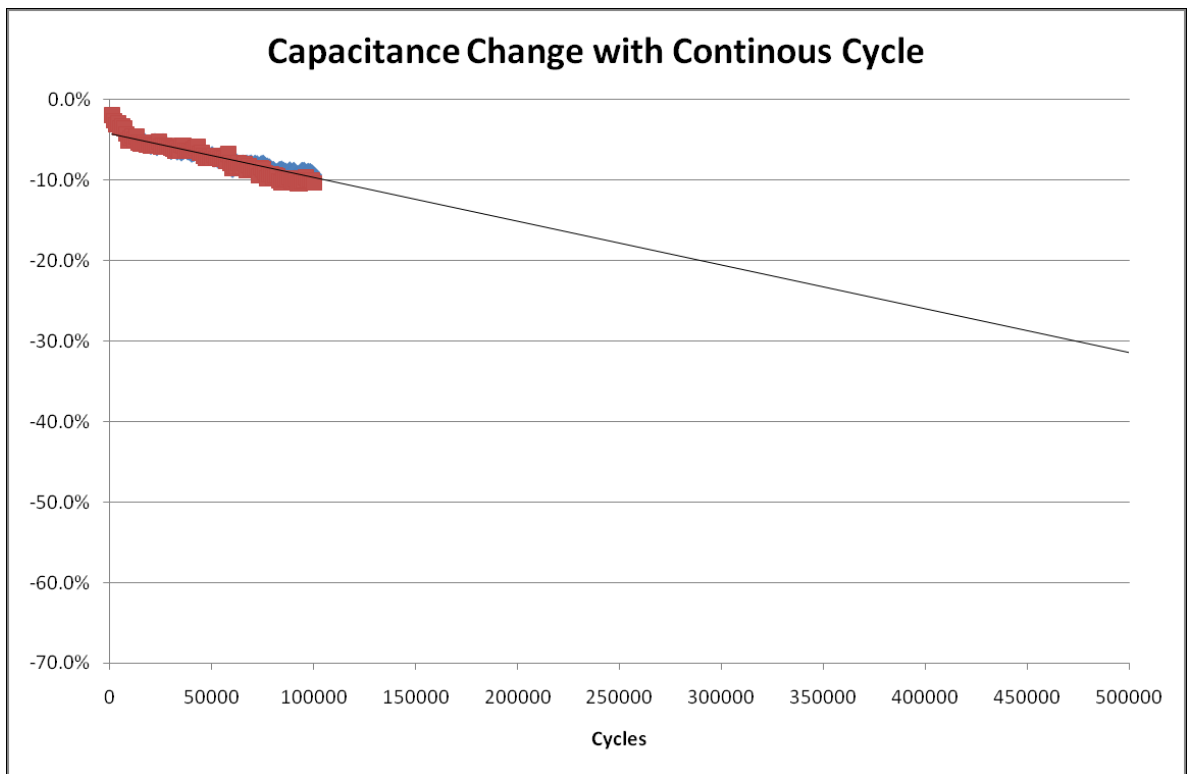


Wykres testowy dla stałego napięcia ładowania i rozładowywania



#### Żywotność:

Ważnym atrybutem ultrakondensatorów jest ich długa żywotność. Cykl testów przeprowadzono aby określić zużycie superkondensatorów podczas licznych cykli ładowania i rozładowywania. Próby zostały przeprowadzone w temperaturze otoczenia bez wymuszonego chłodzenia. Zastosowano stałe natężenie o napięciach od napięcia znamionowego do połowy napięcia znamionowego. Dopuszczono 15 sekundowe przerwy pomiędzy ładowaniem a rozładowywaniem



The temperature basic point is 25 °C.(Room Temp.)