

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Metody pro měření superkapacitorů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Libor PELEŠKA**  
Osobní číslo: **E12B0137P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Metody pro měření superkapacitorů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište principy funkce superkapacitorů a zhodnoťte jejich základní parametry.
2. Zpracujte literární rešerši na téma testování superkapacitorů a jejich evaluace jako zařízení pro skladování energie.
3. Proveďte měření základních parametrů (kapacita, ESR a samovybíjení) a ze získaných hodnot vypočítejte energetickou hustotu a účinnost.

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce pojednává o metodách měření superkapacitorů. V úvodu je popsán fyzikální princip funkce superkapacitorů a zhodnoceny jeho základní parametry. Další část probírá téma testování superkapacitorů a hodnotí jejich využití pro zařízení skladující energii. Na konec je provedeno měření základních parametrů a výpočet energetické hustoty a účinnosti.

## **Klíčová slova**

Superkapacitor, elektrická dvojvrstva, EDLC, kapacita, ESR, samovybíjení, skladování energie, energetická hustota

## **Abstract**

The following thesis deals with methods of measuring supercapacitor parameters. The first part describes physical principles with overview of basic parameters. Following part contains brief description of supercapacitor tests and overview of applications of supercapacitors as energy storage devices. In the last part, the measurement results are evaluated and compared.

## **Key words**

Supercapacitor, electrical double layer, EDLC, capacity, ESR, selfdischarging, energy storage, power density

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2015

Libor Peleška

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Ziglerovi za cenné rady, připomínky a vstřícné jednání při vedení této práce.

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 SUPERKAPACITORY .....</b>	<b>10</b>
1.1 TERMINOLOGIE.....	10
1.2 TYPY KAPACITORŮ .....	10
1.2.1 Běžné kapacitory.....	10
1.2.2 Elektrolytické kapacitory .....	11
1.2.3 Elektrochemické kapacitory.....	11
1.3 POPIS PRINCIPU EDLC.....	11
1.4 NÁHRADNÍ OBVODOVÝ MODEL.....	12
1.4.1 Klasický náhradní obvod .....	12
1.4.2 Model tři větví.....	14
1.5 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SUPERKAPACITORŮ.....	14
1.6 PSEUDOKAPACITORY .....	17
1.7 HYBRIDNÍ KAPACITORY .....	18
1.8 APLIKACE SUPERKAPACITORŮ.....	18
<b>2 MĚŘÍCÍ METODY SUPERKAPACITORŮ .....</b>	<b>20</b>
2.1 PŘÍSTUPY.....	20
2.1.1 Cyklická voltametrie .....	20
2.1.2 Stejnoseměrná měření.....	21
2.1.3 Elektrochemická impedanční spektroskopie .....	22
2.2 NORMY A TESTOVACÍ PROCEDURY .....	23
2.2.1 USABC.....	23
2.2.2 IEC Test Procedures .....	23
2.2.3 UC Davis Test Procedures.....	25
2.2.4 Další testovací procedury .....	25
<b>3 TESTOVÁNÍ SUPERKAPACITORŮ.....</b>	<b>33</b>
3.1 POUŽITÉ MĚŘÍCÍ METODY .....	33
3.1.1 Stanovení kapacity a ESR .....	34
3.1.2 Samovybití a unikající proud.....	41
3.2 VÝPOČET PARAMETRŮ Z NAMĚŘENÝCH HODNOT .....	43
3.2.1 Maximální energie .....	43
3.2.2 Maximální výkon.....	44
3.2.3 Efektivita .....	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
3.2.4 Energetická hustota .....	45
3.2.5 Výkonová hustota.....	46
3.3 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	46
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>48</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>49</b>

## Seznam symbolů a zkratek

EDLC ..... Elektronický dvouvrtsvý kapacitor

*Tab.* ..... Tabulka

*Obr.* ..... Obrázek

U ..... Napětí

I ..... Proud

R ..... Elektrický odpor

C ..... Elektrická kapacita

W ..... Energie

P ..... Elektrický výkon

ESR ..... Ekvivalentní Sériová Rezistivita

MATLAB..... Matrix laboratory



## Úvod

Předkládaná práce pojednává o principu uchování energie v superkapacitorech a je dále zaměřena na metody měření superkapacitorů. Text je rozdělen do tří částí. První popisuje superkapacitory, princip jejich činnosti, základní parametry a možné využití. Druhá kapitola je věnována měření superkapacitorů. Jsou zde uvedeny různé přístupy k zjišťování parametrů kapacitorů a testování jejich vlastností. Kvůli různorodosti přístupů bylo nutné vytvořit normy a testovací procedury, které jsou zde zmíněny. Třetí část obsahuje některá měření superkapacitorů, následný výpočet parametrů a zhodnocení výsledků.

Kapacitor obsahuje dvě elektrody oddělené izolačním dielektrickým materiálem. Když je na kapacitor přivedeno napětí opačné náboje se nahromadí na povrchu každé elektrody. Náboje zůstávají odděleny dielektrikem, které vytváří elektrostatické pole umožňující uchování energie. Obecně je dělíme do následujících tří skupin: elektrostatické, elektrolytické a elektrochemické.

Elektrochemické dvouvrstvé kapacitory často nazývané také ‘superkapacitory’ či ‘ultrakapacitory’ jsou zařízení umožňující velmi rychle uložit nebo doručit elektrickou energii, ale uloží méně energie než většina baterií. Původně byly EDLC používány spolu se systémem baterií pro zvýšení celkové hustoty náboje – poměru ve kterém se systém dokáže nabít nebo vybit – zařízení, upravuje špičkové výkyvy při dodávání nebo odebírání když systém baterií poskytuje celkovou úložnou kapacitu. Nyní představují nový druh technologie skladování energie, který nebyl dříve použit.

# 1 Superkapacitory

Kapacitor uchovává energii v elektrostatickém poli mezi dielektrikem a pevnou elektrodou. Všechny další typy kapacitorů bez ohledu na jejich obchodní jméno (superkapacitory, ultrakapacitory, pseudokapacitory, EDLC) vychází z tohoto principu. U klasických kapacitorů jsme byli omezeni jejich nízkou hodnotou elektrické kapacity na nízkovýkonová a krátkodobá záložní využití [1].

## 1.1 Terminologie

Superkapacitory můžeme rozdělit na základě mechanismu uložení energie do tří tříd: elektrochemické dvouvrstvé kapacitory – EDLC, pseudokapacitory a hybridní kapacitory. Mechanizmy uložení jsou u EDLC elektrostatické, u pseudokapacitorů chemické a kombinace těchto dvou v hybridních superkapacitorech. Chemické procesy jako oxidačně-redukční reakce zahrnují přesun náboje mezi elektrodou a elektrolytem. Elektrostatický mechanismus nevyužívá chemické reakce, ale rozmisťuje náboje po povrchu za využití fyzikálních zákonů které nemusí vytvářet, nebo lámat chemické vazby[2]. V této práci je použito označení superkapacitory pro EDLC.

## 1.2 Typy kapacitorů

Kapacitor obsahuje dvě elektrody oddělené izolačním dielektrickým materiálem. Když je na kapacitor přivedeno napětí opačné náboje se nahromadí na povrchu každé elektrody. Náboje zůstávají odděleny dielektrikem, které vytváří elektrostatické pole umožňující uchování energie [2]. Obecně je dělíme do následujících tří skupin: elektrostatické, elektrolytické a elektrochemické.

### 1.2.1 Běžné kapacitory

Elektrostatické kapacitory používají jako dielektrikum nevodivý materiál vložený mezi kovové elektrody. Pracovní napětí tak závisí na elektrické pevnosti použitého materiálu. Elektrická kapacita je definována jako poměr celkového náboje a potenciálového rozdílu na elektrodách.

### 1.2.2 Elektrolytické kapacitory

Elektrolytický kapacitor je podobný elektrostatickému, ale používá vodivé elektrolytické soli v přímém kontaktu s kovovými elektrodami. Například hliníkové elektrolytické kapacitory jsou vyrobeny ze dvou vodivých hliníkových fólií potažených izolační vrstvou oxidů a distančním papírem máčeným v elektrolytu. Velmi tenká oxidační vrstva slouží jako dielektrikum, čímž dosáhneme vyšší hodnoty kapacity na jednotku objemu. Pro nabití této vrstvy je důležité dodržet správnou polaritu, jinak může dojít k jejímu narušení[1].

### 1.2.3 Elektrochemické kapacitory

Elektrochemické kapacitory (Superkapacitory) používají jako nabíjecí/vybíjecí rozhraní materiály s velkým povrchem, jako porézní uhlíky nebo některé oxidy kovů. Vycházejí ze stejného základního principu jako ostatní druhy a jsou navrženy pro rychlé uložení a vydání energie. Jejich elektrody mají větší efektivní povrch a jsou méně vzdálené, což vede k nárůstu kapacity i množství pojaté energie. Jejich kapacita může být v rozsahu desítek, stovek až tisíců farad. Elektrochemické dvouvrstvé kapacitory mají navíc mezi elektrodami separátor bránící elektrickému kontaktu, jako je tomu u baterií. Každé rozhraní představuje samostatný kapacitor a celý prvek tedy můžeme chápat jako dva kapacitory v sérii[3].

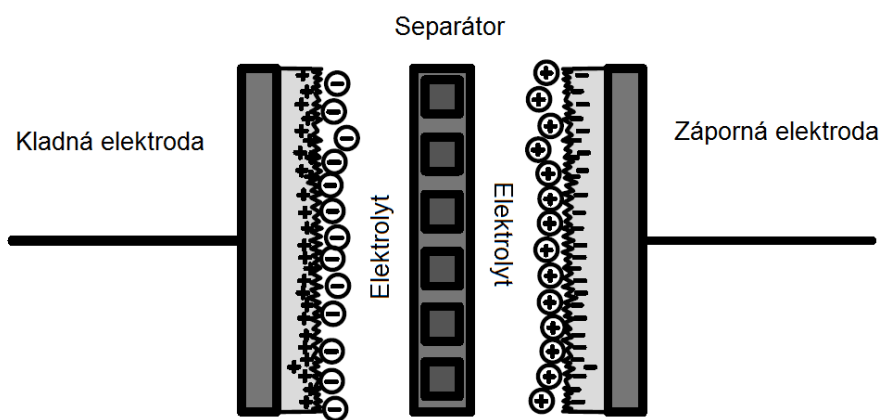
Jedná se o zařízení s vysokou energetickou a výkonovou hustotou, skoro 95% účinností a dlouhou délkou života. Uchovávají náboj stejným způsobem, jako klasické kapacitory, neakumuluje se ale ve dvojici elektrod nýbrž na rozhraní povrchu elektrody a elektrolytického roztoku. Skládají se ze dvou elektrod umožňující rozprostřít potenciál napříč článkem, každou na jedné straně rozhraní. Mezi ně je umístěn ionty propustný separátor bránící elektrickému kontaktu, ale umožňující průchod iontů z elektrolytu. Elektrody jsou vyrobeny z materiálů s vysokou měrnou povrchovou plochou jako porézní uhlík nebo uhlíkových nanotrubeček. Schopnost rychlého nabití a vybití bez ztráty efektivity po tisíce cyklů z nich činí vhodné pro využití v systémech skladování energie[4].

## 1.3 Popis principu EDLC

Princip uchování náboje je u EDLC stejný jako u klasického kapacitoru. Na rozdíl od rovinných elektrod klasického kapacitoru jsou elektrody EDLC porézní s upraveným co

nejvyšším povrchem. EDLC mohou uložit podstatně více energie než klasický kapacitor. Díky malé tloušťce dvou vrstev a velkému počtu pórů na povrchu elektrodového materiálu se na něm může rozprostřít větší náboj.

Konstrukce EDLC je podobná baterii. Dvě elektrody ponořené v elektrolytu s ionty propustným separátorem mezi nimi, který brání elektrickému kontaktu. V nabitém stavu se anionty a kationty elektrolytu pohybují ke kladné a záporné elektrodě čili vytvářejí dvě dvojvrstvy, každou na rozhraní elektroda-elektrolyt. Rozdělení iontů často vede k rozdílu potenciálů napříč kapacitorem[3].



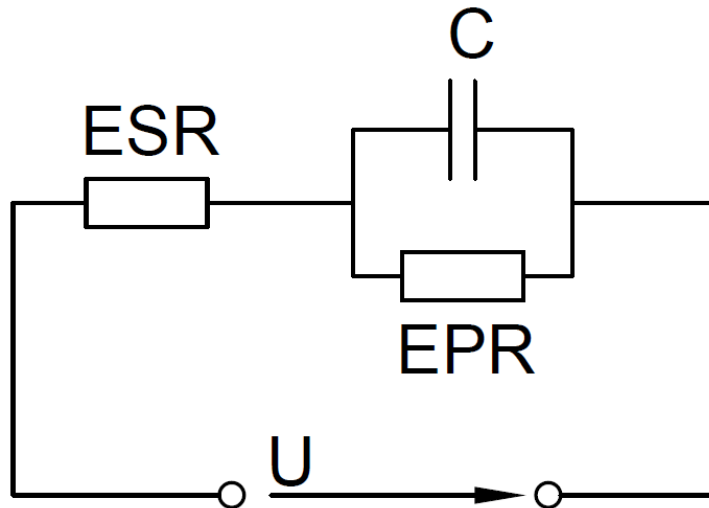
Obr. 1: Struktura EDLC [3]

## 1.4 Náhradní obvodový model

Procesy uložení náboje v EDLC jsou velmi odlišné než v klasických kapacitorech, proto se k popisu činnosti nedají použít klasické náhradní modely. Počet modelů vychází ze způsobu využití superkapacitorů.

### 1.4.1 Klasický náhradní obvod

Jednoduchý model obsahuje kapacitu  $C$  ekvivalentní sériovou (ESR) a paralelní (EPR) rezistivitu. Na základě zjištění úniku proudu a pozorováním vlivů dlouhodobého uskladnění energie můžeme vytvářet první simulace chování EDLC.



Obr.2: Náhradní obvod superkapacitoru

Paralelní rezistivitu určíme ze souvislosti s pomalým nabíjením kapacitoru do jeho jmenovité hodnoty napětí a poté uplynutí stejného množství času před měřením napětí na svorkách. EPR představuje efekt samovybíjení. Ve chvíli kdy je úbytek exponenciální, paralelní rezistivitu určíme z následujícího vztahu:

$$EPR = -t / \left( \ln \left( \frac{U_2}{U_1} \right) C \right) \quad (1)$$

Kde  $t$  je čas,  $U_1$  je počáteční napětí,  $U_2$  je koncové napětí a  $C$  je předpokládaná jmenovitá kapacita. Časová konstanta,  $C$  a EPR bývá celkem velká, takže EPR můžeme zanedbávat v případě krátkého vybití do pár minut. Při stanovení ESR se tak děje a náhradní obvod se stává pouze z ESR a kapacity. Vycházíme tedy ze změny napětí  $\Delta U$  a změny proudu  $\Delta I$  ke které dojde při vybíjení[1].

$$ESR = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (2)$$

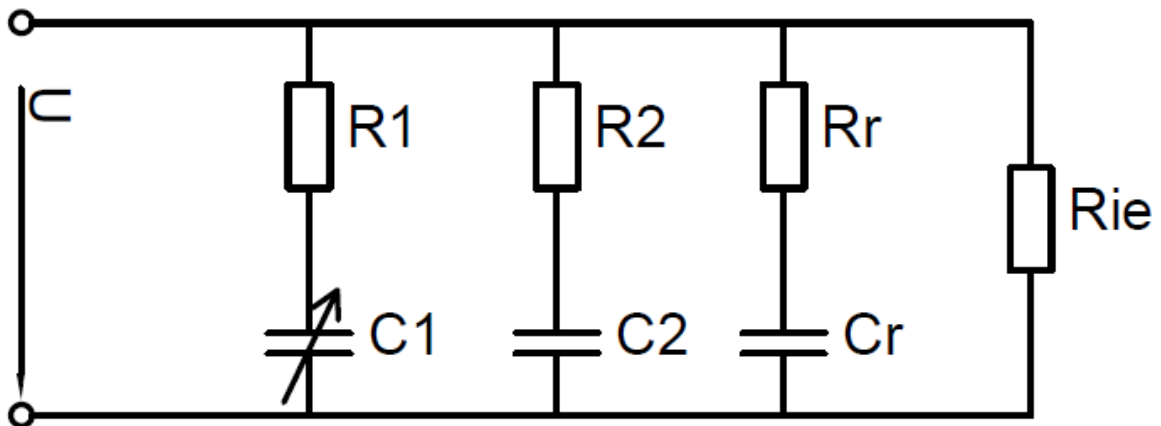
Při určování kapacity  $C$  v náhradním obvodu vycházíme ze stanovení změny elektrostatické intenzity, ke které dojde při nabíjení/vybíjení a je dána:

$$\Delta E = \left( \frac{1}{2} \right) C (U_1^2 - U_2^2) \quad (3)$$

Po stanovení změny energie z integrálu okamžité energie  $C$  získáme následovně[1].

$$C = (2 \int_{t_1}^{t_2} u i dt) / (U_1^2 - U_2^2) \quad (4)$$

#### 1.4.2 Model tří větví



Obr.3: Schéma modelů tří větví

První větev symbolizuje rezistivitu  $R_1$  a proměnnou kapacitu  $C_1$  stávající z konstantní kapacity a kapacity závislé na přiloženém napětí. Tato větev zachycuje napěťovou závislost kapacity a popisuje chování superkapacitoru během nabíjení nebo vybíjení. Druhá větev obsahující  $R_2$  a  $C_2$  zastupuje rozdělení náboje. Třetí větev skládající se z  $R_r$  a  $C_r$  lépe představuje samovybíjecí procesy zapříčiněné difuzí řízenými redoxními reakcemi. Unikající proud je úměrný koncentrací přechodu z difúzního druhu redoxní reakce. Časová závislost koncentrace přechodu v určité vzdálenosti od roviny je zpravidla nepřímo úměrná druhé odmocnině času, což vede ke klesajícímu samovybíjení. Z velikosti samovybíjení lze určit životnost superkapacitoru.[5]

#### 1.5 Základní parametry superkapacitorů

Při výběru superkapacitoru nahlížíme na různé parametry. Ve většině případů primárně sledujeme kapacitu, podle které pak vybíráme z různých typů od různých výrobců. Jiné parametry jsou sledovány při výzkumu materiálů a technologií výroby superkapacitorů.

V závislosti na aplikaci nás zajímají více či méně další směrodatné vlastnosti, které musíme zohlednit.

### 1.5.1.1 Kapacita

Kapacita je schopnost pojmout náboj. Její velikost vychází z poměru velikosti náboje  $Q$  na elektrodách a napětí  $U$  mezi nimi.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (5)$$

Hodnoty nábojů na elektrodách se rovnají, jen mají opačnou polaritu. Hodnota, pro kterou byl kapacitor navržen, se nazývá jmenovitá kapacita a vždy se stanovuje s určitou tolerancí[6]. V případě superkapacitorů je rozsah hodnot řádově v jednotkách Farad, což je o tři až šest řádů výše než u kapacitorů klasických[7].

### 1.5.1.2 Napětí článků

Superkapacity pracují na nízkých napětích. Bezpečné využití vyžaduje udržovat napětí pod určitým limitem jmenovitého napětí. To obsahuje rezervu před průrazným napětím, při kterém se elektrolyt rozkládá. Průrazné napětí rozkládá dělicí Helmholtzovu vrstvu a její molekuly vody se rozdělují na vodík a oxid. Tyto molekuly již pak nezvládnou udržet elektrické náboje od sebe navzájem. Vzdálenost uhlíkových zrněk a druh použitých elektrolytů vymezuje provozní napětí kapacitoru na hodnotu okolo 2.5V[7]. Provozování superkapacitorů pod hodnotou jejich jmenovitého napětí dlouhodobě zlepšuje jejich elektrické parametry (stabilnější kapacita a vnitřní odpor, životnost může být prodloužena)[8]. Pro odebrání vyšších hodnot napětí zapojujeme kapacitory do série. Výrobce pro každý typ kapacitoru udává jmenovité napětí, na něž je kapacitor konstruován a podle něhož je označen. Provozní napětí je potřeba snižovat s růstem teploty (výrobce obvykle udává v datasheetu graf závislosti).

### 1.5.1.3 Vnitřní odpor

Ovlivňuje velikost proudu, který ze superkapacitoru odebíráme a tím i rychlost nabití/vybití. Nabíjení/vybíjení totiž úzce souvisí s pohybem nosičů náboje (ionty) v elektrolytu přes vrstvu separátoru k porézní struktuře elektrod. V průběhu tohoto pohybu

vznikají ztráty. Ztráty se zvyšují s rostoucí hloubkou průniku nosičů náboje do pórů elektrod, takže velikost vnitřního odporu závisí na stavu nabití superkapacitoru. V náhradním schématu je označován jako ekvivalentní sériová rezistivita – ESR[8].

#### 1.5.1.4 Účinnost

Poměr energie použité k nabití a energie, kterou lze získat zpět. Účinnost uložení energie do superkapacitoru a efektivita jejího znovuvyužití závisí zásadní měrou na přenosu výkonu mezi bodem odběru / zdrojem redundantní energie a superkapacitorem. Zejména pokud se jedná o účinnost zvyšovacího/snižovacího měniče, obvykle přítomnému a připojenému k superkapacitoru. Účinnost samotného superkapacitoru bývá velmi vysoká (až 98 %)[9].

#### 1.5.1.5 Životnost

Životnost superkapacitoru je vymezena počtem cyklů nabití a vybití při pokojové teplotě okolí 25°C . Po každé periodě se nevratně snižuje kapacita C a roste sériový odpor ESR. Doba života superkapacitoru je stanovena poklesem kapacity na 80% jmenovité hodnoty nebo zvýšením sériového odporu na dvojnásobek jmenovité hodnoty. Opakovaným vybíjením a nabíjením s periodou okolo 10s se jeho teplota zvyšuje o přibližně 15°C. Pro návrh aplikace se superkapacitorem se doporučuje měření oteplení, aby se nedošlo k přehřátí elektrolytu[7]. Životnost kapacitoru je poloviční s každým přírůstkem teploty o 10°C. V porovnání s akumulátory je životnost superkapacitoru daleko vyšší. Výrobci uvádějí až 1 milión nabíjecích/vybíjecích cyklů. Avšak i po dosažení této hranice je superkapacitor stále schopen pracovat, ovšem se zhoršenými vlastnostmi (snížená kapacita, zvýšený ekvivalentní vnitřní odpor)[9].

#### 1.5.1.6 Unikající proud

Unikající proud je nabíjecí proud potřebný pro udržení superkapacitoru na specifické napěťové hladině. Čím déle superkapacitor udržuje napětí, tím je unikající proud nižší. Velikost unikajícího proudu je závislá na teplotě prostředí, ve kterém je zařízení provozováno. Většina výrobců udává velikost unikajícího proudu při pokojové teplotě 25°C. Další faktory ovlivňující velikost unikajícího proudu jsou stáří a míra jeho používání[10].



### 1.5.1.7 Samovybíjení

Protože nabité superkapacitory mají vyšší stav potenciální energie iontů než superkapacitory vybité, vzniká termodynamický tlak na jejich vybití. Dochází k němu, když se superkapacitor vybíjí uvnitř otevřeného okruhu. K samovybíjení dochází u každého zařízení pro uložení energie včetně baterií a kapacitorů. Nicméně ve vyšší míře k tomuto jevu dochází u superkapacitorů. Proto je pro ně také škodlivější. Toto způsobuje absence jakékoliv překážky reverzního chodu, která by zpomalila termodynamicky nebo kineticky tok molekul, jak je tomu v případě systémů založených na chemických reakcích. Také potenciálový rozdíl je zde velmi velký a vzdálenost mezi elektrodami velmi malá. Vlivem těchto faktorů je mnohem obtížnější tento potenciálový rozdíl zachovat, než je tomu tak u baterií. Je zde celá řada mechanismů samovybíjení, většina je výsledkem nekontrolovaných redoxních reakcí, jako například redukce a oxidace nečistot v materiálech elektrod[2].

### 1.5.1.8 Energetická hustota

Energetická hustota je množství energie na jednotku hmotnosti, nebo objemu a charakterizuje schopnost nabíjení/vybíjení. Energie obsažená v superkapacitoru vyjádřená v Joulech v poměru k hmotnosti nebo objemu určí energetickou hustotu. U superkapacitorů sledujeme hlavně hodnotu maximální energetické hustoty. Tato veličina se získává nepřímo různými výpočty[11].

### 1.5.1.9 Výkonová hustota

Výkonová hustota je mnohem komplikovanější pojem. Požívají se dvě specifikace výkonové hustoty. V radiotechnice a anténách je to výkon vztažený na plochu zářiče. Nás však více zajímá druhá definice výkonové hustoty, která se používá pro systémy skladování energie. V tomto případě je výkon dodaný do zařízení vztažen k jeho objemu nebo hmotnosti[11].

## 1.6 Pseudokapacitory

Některé materiály dokáží využít rychlých a reversibilních redoxních reakcí na svém povrchu, což je jiný druh získávání kapacity. Tato poměrně značná kapacita není elektrostatického původu, proto používáme předponu pseudo. Vzniká při dokončení nabíjecího procesu, mezi elektrodou a elektrolytem, když dochází k omezení konečným

množstvím aktivního materiálu nebo dostupného povrchu[6]. Princip redoxních procesů přibližuje tento druh kapacitorů svým chováním k bateriím.

Porézní uhlíky mají výrazný podíl heteroatomů a povrchové funkce mohou také obsahovat pseudokapacitní složku celkové kapacity. Tato dvouvrstvá kapacita odvozená ze zvětšeného uhlíkového povrchu doplněná pseudokapacitní složkou zvětšenou redoxními reakcemi zvyšuje celkovou kapacitu materiálu.[3] Všechny užité chemické procesy pomáhají získat větší kapacitu a energetickou hustotu než EDLC. Elektrody jsou tvořeny z vodivých polymerů nebo oxidů kovů[2]. Zvýšení pseudokapacitní složky ovšem zpomaluje rychlost nabíjení a snižuje životnost.

## 1.7 Hybridní kapacitory

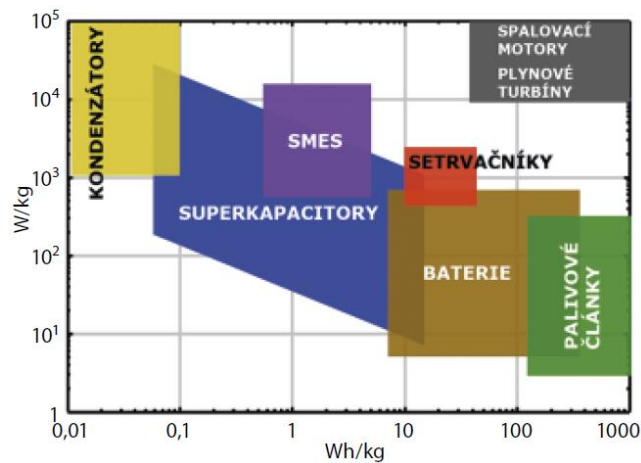
Hybridní kapacitory se snaží rozšířit výhody a zmírnit nevýhody obou předchozích technologií k dosažení lepších výkonostních charakteristik. Použitím chemických a dalších jiných procesů k uskladnění energie získají vyšší energetickou a nábojovou hustotu než EDLC bez ztráty dostupnosti a stability cyklů, která omezuje pseudokapacitory. Výzkum se věnuje třem různým typům hybridních kapacitorů dělicích se podle druhu elektrody: kompozitní, asymetrická a bateriového typu[2].

## 1.8 Aplikace superkapacitorů

Superkapacitory se již dnes mají široké spektrum využití avšak většina způsobů je stále ve vývoji. Oproti původnímu akumulátoru je toto řešení méně prostorově a hmotnostně náročné a je schopné okamžitě dodat maximální výkon, rovněž lze ocenit teplotní stálost kapacity. Dalším možným využitím superkapacitoru je funkce záložního zdroje v hybridních vozidlech. Hybridní vozidla si sama vyrábí elektřinu motoru-generátoru, nebo palivovém článku a využívají ji k pohonu. Záložní zdroj nahromadí přebytečnou energii vzniklou při brzdění, nebo jízdě z kopce a pak ji poskytne ve chvílích, kdy zdroj nemůže potřebné množství energie například při rozjezdu či zrychlování. V kombinaci s akumulátorem lze využít superkapacitor jako zdroj pro nabíjení baterie, která slouží jako dlouhodobý zdroj.

Superkapacitory lze rovněž aplikovat pro zefektivnění rekuperace ve stejnosměrných dopravních sítích. Superkapacitory uloží rekuperovanou energii, která by jinak musela být ihned spotřebována jinak bude nevyužita. Toto řešení sníží namáhání sítě a ušetří energii (20-

40%). Také se utlumí rázy vznikající při rozjezdu stejnosměrných motorů. K rekuperaci lze superkapacity využít i ve střídavých sítích kde vysoké odběry při rozjezdu stroje a návrat energie do sítě brzděním jsou doprovázeny výraznými změnami napětí a dochází k značnému zatěžování sítě. Připojením superkapacitoru s frekvenčním měničem lze snížit objem energie vyměněné mezi zdrojem a spotřebičem, čímž lze regulovat změny napětí a zajistit plynulý provoz bez oscilací[13].



Obr.4: Ragoneho diagram(převzato z [13])

Superkapacity se také uplatňují jako záložní zdroje pro kompenzaci klesání či výpadku napájecího napětí systému řízení úhlu natočení a délku lopatek ve větrných elektrárnách. Tento systém efektivně zužitkuje sílu větru, optimalizuje výkon a zabraňuje poškození zařízení při nadměrné zátěži[14].

## 2 Měřicí metody superkapacitorů

Ke stanovení každého parametru superkapacitorů lze přistupovat více způsoby. Některé jsou vhodné pro sledování jejich chování v prostředí, kde pak budou užívány. Další umožňují pozorovat reakce na rozhraní materiálů. Z důvodu různorodosti přístupů k měření a metodik výpočtů parametrů byly stanoveny normy a charakterizovány testovací procedury. Přístupy i normy a procedury jsou popsány v této kapitole.

### 2.1 Přístupy

Sledované parametry lze stanovit různými způsoby. Některé techniky se využívají hlavně ke sledování vlastností a elektrochemických dějů uvnitř materiálů. Jiné naopak testují superkapacitory v podmínkách nejčastějšího využití. Zde jsou uvedeny nejrozšířenější.

#### 2.1.1 Cyklická voltametrie

Cyklická voltametrie je v elektrochemii často používaná technika, při které je na jednu elektrodu přiváděn proměnný potenciál trojúhelníkového charakteru a měřen dodávaný/odebíraný proud. Proud  $I$ , který protéká elektrochemickým prvkem je vztažen k napětí  $U$  v daném rozsahu. Napětí  $U$  opakovaně přechází mezi dvěma extrémy. Páru přechodů v opačném směru se říká cyklus. Přechod napětí v ideálním kapacitoru je dán následující rovnicí:

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (6)$$

$dU/dT$  je snímaný poměr lineárního růstu napětí za čas. Pro superkapacitory se používají většinou hodnoty mezi 0,1mV/s a 1V/s. Měření s nižšími snímacími poměry bývají přesnější, ale zaberou více času. Naopak rychlejší snímací poměry změří nižší hodnotu kapacity. To je zapříčiněno tím, že rychlý snímací poměr může vyžadovat více proudu, než je přístroj schopen dodávat, nebo měřit[15].

Tento přístup přináší výhodu současného měření kapacity a sériové rezistivity ESR během jednoho měření. Ale je těžké udržovat teplotu komponentů, protože závisí na proudu a na tepelné rezistivitě komponentů[3]. Metoda se rovněž používá pro analýzu oxidačních a redukčních procesů na rozhraních tak k charakterizaci reverzibility dielektrických systémů.

## 2.1.2 Stejnoseměrná měření

Superkapacitory nachází své nejširší spektrum upotřebení ve stejnosměrných aplikacích, kde se využívá jejich nabíjení a vybíjení. Stejnoseměrná měření proto podávají směrodatná data více pro návrh jejich využití více, než pro sledování vlastností materiálů.

Na začátku polarizace jsou oblasti elektrod těžko přístupné pro ionty, stejně tak nespárovaná oblast elektrody není nabitá, protože ionty musí pokrýt velkou vzdálenost. V podmínkách elektrických obvodů to odpovídá velké sériové rezistivitě v cestě iontů. Během stejnosměrných měření proud protéká z nabitě oblasti do oblasti nabitě méně [3].

### 2.1.2.1 Měření časové konstanty

Časová konstanta se vztahuje k času, který je potřebný pro nabití/vybití kapacitoru. Za jednu dobu  $\tau$  se kapacitor nabije na 63,2 % svého napětí, stejně tak se vybije na 36,8% svého výsledného napětí. Konstantu určujeme při nulovém externím odporu. Potom jediným omezujícím odporem je pouze vlastní odpor. U superkapacitorů s kapacitou řádově jednotek až stovek Farad a hodnotou ESR řádově v miliohmeh a menší se časová konstanta pohybuje v řádu zhruba sekund. Časovou konstantu vypočteme z následujícího vztahu, kde  $R$  je vybíjecí odpor a  $C$  je kapacita superkapacitoru[16].

$$\tau = R \cdot C \quad (7)$$

### 2.1.2.2 Nabíjení a vybíjení konstantním proudem

Tato metoda se nejčastěji používá ke stanovení kapacity a ESR. Princip spočívá v nastavení konstantního proudu, kterým pak superkapacitor vybíjíme a zaznamenáváme průběh napětí v závislosti na čase. Z tohoto průběhu pak odečteme hodnoty, ze kterých se stanoví kapacita a ESR. Metoda se používá nejčastěji k ověření parametrů stanovených výrobcem, před samotnou aplikací nebo vyzkoušení v podmínkách užívání superkapacitoru. Proto existuje více způsobů, jak nabíjení a vybíjení konstantním proudem vykonávat většinou má každý výrobce svůj[5].

### 2.1.2.3 Nabíjení a vybíjení konstantním výkonem

Při používání superkapacitorů v trakci jsou nabíjeny nebo vybíjeny proměnným proudem podle akcelerace či brždění dopravního prostředku. Proto se využívají tato měření

ke stanovení vlastností při takové aplikaci. Během nabíjení řídíme průběh napětí a proudu tak, abychom dodávali do superkapacitoru konstantní výkon. Po kratší pauze pak opačným způsobem pak výkon odebereme. Získáme tak charakteristiky pro různá výkonová zatížení, ale i parametry jako kapacita, rezistivita nebo životnost. Metoda vyžaduje sofistikovanější programovatelný zdroj, protože potřebujeme řídit průběh napětí a proudu[17].

#### **2.1.2.4 Pulzní testy**

Pulzní testování je zahrnováno ve vyhodnocování výkonnosti a možnostech využití, protože superkapacitory jsou v praxi také používány v přechodném provozu. Pulzní cykly jsou sekvence nabíjecích a vybíjecích pulzů specifických proudů či výkonů s danou dobou trvání. Pulzními testy se zkouší jak uhlíková tak hybridní a pseudokapacitní zařízení. Z těchto testů se pak stanovuje například energetická hustota, kapacita, ESR, EPR nebo zpětná účinnost, což je poměr energie vybité k energii dodané během nabíjecího cyklu[3]. Pro pulzní testy jsou stanoveny různé normy a testovací procedury jako USABC, UC Davis apod.

#### **2.1.2.5 Dlouhodobé testy**

Dlouhodobé testy se používají k měření samovybíjení a unikajícího proudu. Probíhají za pokojové teploty po dobu 70-75 hodin, během této doby by neměly být vystavovány teplotním výkyvům. U měření samovybíjení superkapacitor nabijeme, ponecháme s rozpojenými vývody a snímáme hodnotu napětí, z které pak vypočteme velikost samovybíjení v procentech i ve voltech. V případě měření unikajícího proudu zapojíme do série se superkapacitorem rezistor na kterém snímáme napětí, od zdroje je neodpojujeme. Z podílu hodnoty napětí a velikosti rezistoru získáme velikost unikajícího proudu[18].

#### **2.1.3 Elektrochemická impedanční spektroskopie**

Podstatou elektrochemické impedanční spektroskopie je vybuzení zkoumaného prvku harmonickým signálem o velmi malé amplitudě (rozsah 5–10 mV) na různých frekvencích a následným sledováním proudové odezvy. Se změnou frekvence signálu dojde i ke změnám v jednotlivých složkách impedance. Hlavní užití nachází při zkoumání mechanismů elektrochemických reakcí, pasivních povrchů a v měření dielektrických a transportních vlastností materiálů. Pomocí této metody také lze stanovit stav kapacitoru a jeho životnost. Hlavní výhodou je získání velkého množství dat během jediného měření a její linearita, díky které se dají výsledky interpretovat pomocí teorie lineárních systémů. Kvůli náročnosti na

matematické znalosti nebývá naplno využito možností této metody, proto se získaná data znázorňují pomocí elektrických náhradních modelů[19].

## 2.2 Normy a testovací procedury

Aby bylo možné parametry superkapacitorů porovnávat, museli být sjednoceny metody jejich získávání. Proto bylo vytvořeno několik norem obsahujících testovací procedury a metodologii výpočtu parametrů. Z počátku byla snaha aplikovat testy zkoušené na bateriích, což se ukázalo jako nepříliš vhodné a vzniklo několik dalších norem. Většina těchto procedur obsahuje stejné testy, jen při jiných podmínkách s někdy i podobnou metodikou výpočtu. Pravidlem bývá, že každý výrobce má ještě navíc své vlastní procedury, které poskytuje zákazníkům.

### 2.2.1 USABC

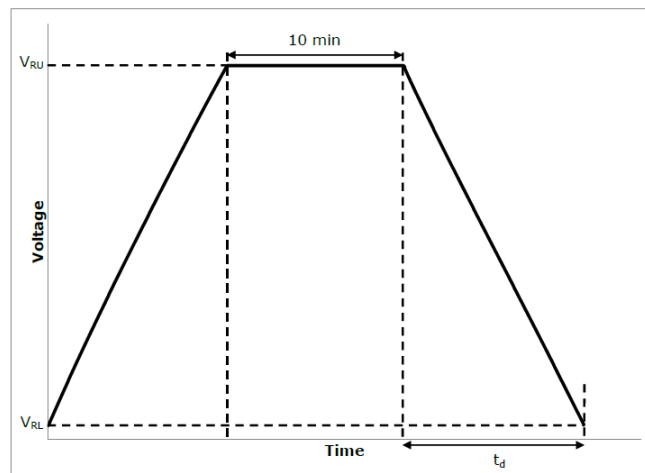
S tímto přístupem přišli výrobci vozidel ve spojených státech. Jedná se o charakteristické testy vycházející z hodnoty maximálního proudu stanoveného výrobcem. Procedury nejsou příliš vhodné pro zkoušení superkapacitorů a jsou navrženy spíše pro baterie použité v hybridních automobilech. Proto z nich nelze stanovit charakteristické vlastnosti zařízení skladujícího energii, avšak některé údaje z nich lze vyvodit. The USABC test manual je soubor testovacích procedur zahrnující nabíjení/vybíjení konstantním proudem, pulzní testy pro stanovení rezistivity, nabíjení/vybíjení konstantním výkonem, sekvenční cykly nabíjení a vybíjení a testování modulů s 15 až 20 prvky v sérii. Norma USABC obsahuje rychlé pulzní testy, ze kterých se stanoví rezistivita v nabitém stavu a zpětná efektivita nabíjecích a vybíjecích cyklů. Také detailně specifikuje testy samovybíjení [3].

### 2.2.2 IEC Test Procedures

Metodika IEC byla vyvinuta pro stanovení elektrické kapacity a elektrického odporu elektrochemických kapacitorů. Tyto procedury jsou závislé na využití kapacitoru a jsou určeny k zjištění vlastností konkrétních zařízení. Činnosti IEC norem jsou limitovány tím, že jde o jeden test stanovující činnost kapacitoru při jednom určitém proudu. Je dohodnuto zkoušení kapacitorů jako ideálních dvouvrstevých kapacitorů s konstantními hodnotami kapacity  $C$  a rezistivity  $R$ [18].

### 2.2.2.1 IEC 62391-1

Tato metodika využívá ke stanovení kapacity a ESR zkoušek konstantním proudem. Pro stanovení kapacity superkapacitor nabijeme na jmenovité napětí a necháme připojený na zdroji po dobu půl hodiny. Po 30 minutách přepojíme a necháme superkapacitor vybit do zátěže nastaveným konstantním proudem  $I_d$  na minimální hodnotu napětí při které zátěž udrží proud stabilní. V průběhu vyhledáme hodnoty napětí 80% a 40% jmenovitého napětí a poznamenejeme si, v který okamžik těchto hodnot bylo dosaženo.



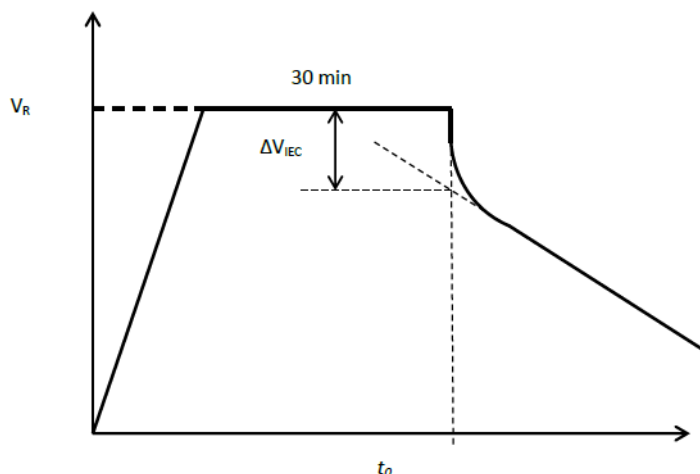
Obr5.: Stanovení kapacity dle normy IEC 62391-1

Kapacitu pak stanovíme následujícím vztahem:

$$C = \frac{I_d \cdot (t_{80} - t_{40})}{U_{80} - U_{40}} \quad (8)$$

Pro zjištění ESR postupujeme stejně jako u kapacity, jen se doporučuje nastavit větší vybíjecí proud  $I_d$ . Z průběhu vybíjecí křivky si aproximujeme linku propadu po přepojení na zátěž a linii poklesu při vybíjení. Poté odečteme hodnotu napětí od jejich průsečíku a získáme hodnotu  $\Delta U_{IEC}$ [20].





Obr5.: Stanovení kapacity dle normy IEC 62391-1

ESR pak stanovíme poměrem skoku napětí  $\Delta U_{IEC}$  a vybíjecího proudu  $I_d$ :

$$ESR = \frac{\Delta U_{IEC}}{I_d} \quad (9)$$

### 2.2.3 UC Davis Test Procedures

Tyto procedury jsou velice vhodné pro hodnocení výkonnosti zařízení o různých rozměrech či stádiu vývoje (od komerčních již na trhu až po vyvíjené do hybridních vozidel). Pomocí UC Davis testovacích procedur lze zjistit parametry jako je energetická hustota, napětí a kapacitu jednoho prvku, sériovou a paralelní rezistivitu, výkonovou hustotu při 95% efektivitě nabíjení a vybíjení, teplotní závislost rezistivity při nižších teplotách, počet cyklů pro úplné vybití, samovybíjení při různých napětích a teplotách a počet hodin udržitelného napětí za vyšších teplot. Provádí se zkoušky nabíjení/vybíjení konstantním proudem, rezistivita se stanovuje pulzními testy, dále se provádí nabíjení/vybíjení konstantním výkonem, sekvenční cykly nabíjení a vybíjení a testování modulů s 15 až 20 prvky v sérii podobně jako u metodiky USABC. Zkušební podmínky pro každé zařízení vychází z jejich kapacity, rezistivity a hmotnosti. Tyto hodnoty jsou předkládány výrobcem[3].

### 2.2.4 Další testovací procedury

Mnoho laboratoří má své vlastní zkušební procedury. Stejně tak jednotlivý výrobci superkapacitorů dávají způsoby stanovení parametrů k dispozici zákazníkům. Výrobce předává tuto metodiku zákazníkovi, aby si mohl vyzkoušet, jak se chová superkapacitor při

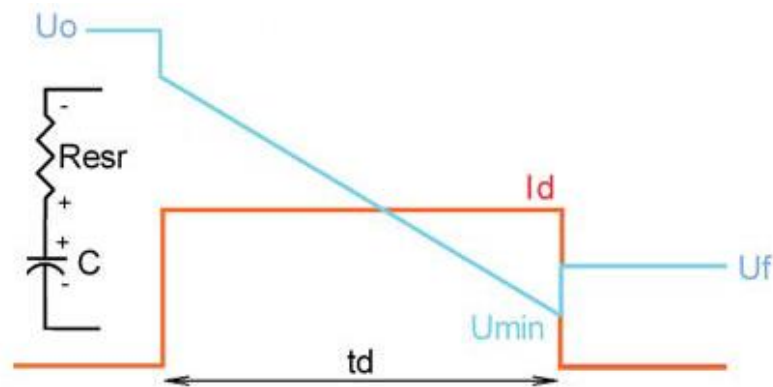
podmínkách jeho aplikace. Ve většině případů obsahují stejné druhy testů, které se liší jen některými vlastnostmi nebo způsobem určení veličiny.

Zkušební testy laboratoře YUNASKO obsahují nabíjení a vybíjení konstantním proudem a napětím. Je podobná proceduře IEC, rovněž získává data vybíjecí části křivky. Používá však jiné hodnoty testovacích proudů a jinou metodu pro výpočet kapacity a ESR[18].

#### **2.2.4.1 Maxwell Technologies Test Procedures for Ultracapacitors**

Je soubor procedur pro měření kapacity, ESR, unikajícího proudu a samovybíjení vydaný výrobcem Maxwell Technologies . Jsou zde podrobně popsány schémata, parametry a jednotlivé kroky měření. Jsou to procedury, kterými výrobce stanovuje parametry předkládané zákazníkovi[21]. Další způsob předkládaný výrobcem MAXWELL zákazníkovi je měření konstantním proudem popsané blíže referenci[7]. Je k němu potřeba osciloskop, kterým budeme sledovat napětí na superkapacitoru, stabilizovaný zdroj a zátěž s nastavitelným odběrem konstantního proudu.

Nejprve je potřeba nastavit velikost stálého proudu - Maxwell doporučuje 20% až 50% maximální hodnoty. Dále nastavíme napětí na zdroji, které nesmí překročit maximální napětí superkapacitoru. Připojíme superkapacitor ke zdroji a nabijeme ho na jmenovité napětí. Poté odpojíme napájecí zdroj. Zdroj je nutné vypojit, protože některé zdroje zatěžují superkapacitor i ve vypnutém stavu. Následně připojíme zátěž. Nyní vybijeme superkapacitor na hodnotu napětí při které ještě zátěží prochází konstantní proud. Okamžitě po dosažení nejnižšího napětí se zátěž odpojí a napětí na superkapacitoru se vrátí na hodnotu měřenou v nezátíženém stavu. Vybíjení lze zastavit při kterékoliv hodnotě napětí. Z grafů pak odečteme hodnoty  $U_0$  – počáteční napětí na superkapacitoru,  $U_{\min}$  – nejnižší napětí na superkapacitoru a  $t_d$  – čas vybití z  $U_0$  na  $U_f$ .



Obr.7: Stanovení kapacity a ESR dle výrobce MAXWELL (převzato od výrobce z Ref.[7])

Z následujících vztahů pak počítáme kapacitu, ESR a uloženou energii :

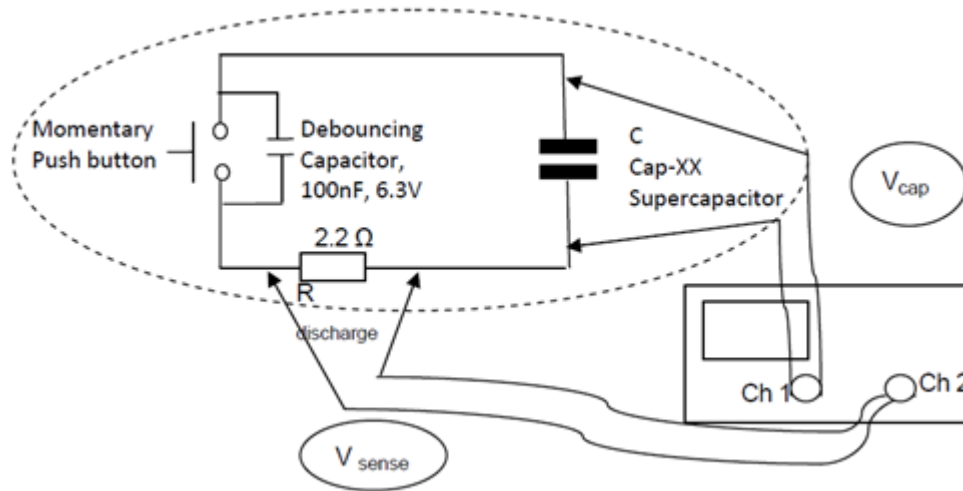
$$C = \frac{I_d \cdot t_d}{U_0 - U_f} \quad (10)$$

$$R_{ESR} = \frac{U_f - U_{min}}{I_d} \quad (11)$$

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_0^2 - U_f^2) \quad (12)$$

#### 2.2.4.2 CAP-XX Simple Measurement of Supercapacitor Parameters

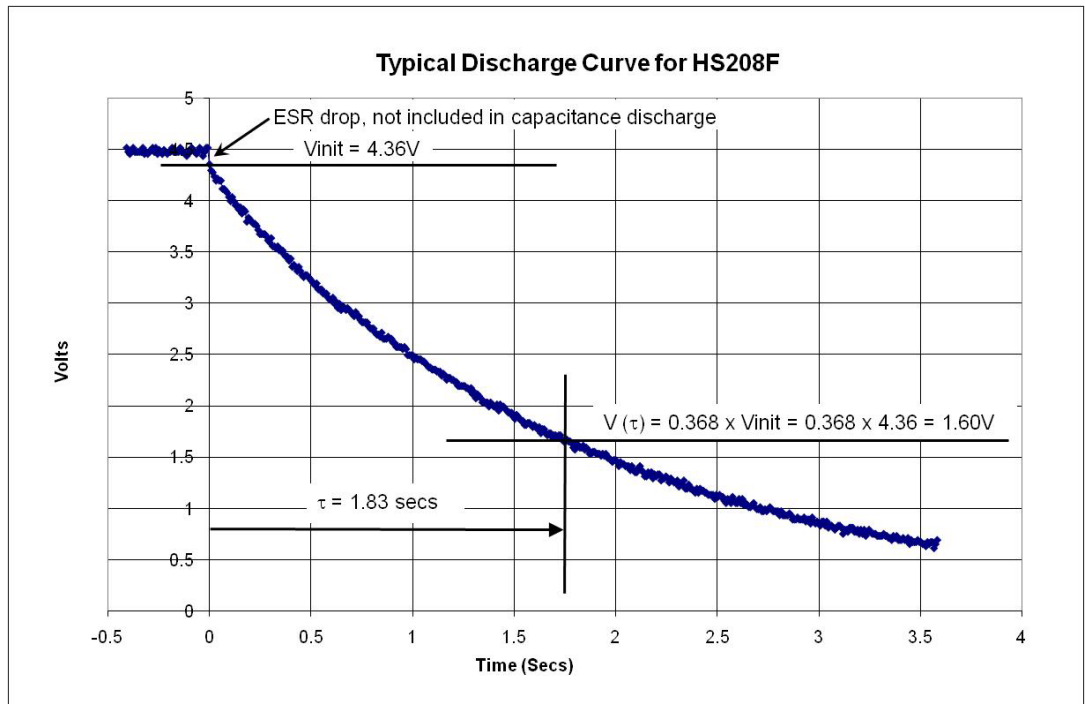
Je manuál výrobce CAP-XX pro stanovení parametrů. Metodika podrobně krok za krokem popisuje měření ESR a kapacity pomocí měření časové konstanty. Dále popisuje dlouhodobé měření unikajícího proudu.



Obr.9: Schéma pro měření metodou výrobce CAP-XX (převzato od výrobce z Ref.[22])

Supercapacitor nabijeme na jmenovité napětí a odpojíme od zdroje. Poté necháme vybit do zátěže. Z průběhu odečteme hodnotu  $U_{init}$ , což je první hodnota následující po propadu z maximálního napětí po odpojení od zdroje. Tento propad je způsoben ESR. Za jednu časovou konstantu  $\tau$  se kapacitor vybije na 36,8% přivedeného napětí. Velikost napětí v čase  $\tau$  tedy snadno zjistíme následovně:

$$u(\tau) = U_{init} \cdot 0,368 \quad (13)$$

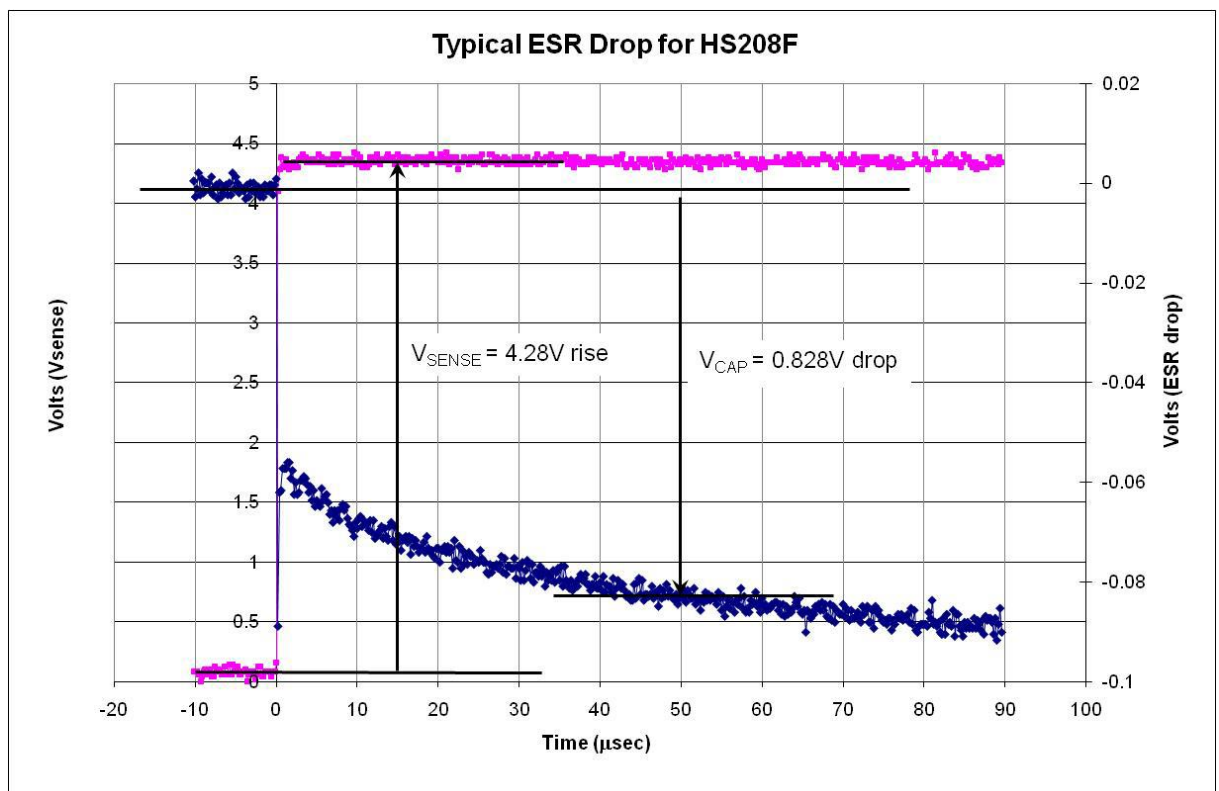


Obr.10: Detail vybijecí křivky a odečtení parametrů pro výpočet kapacity dle výrobce CAP-XX(převzato od výrobce z Ref.[22])

Analýzou průběhu zjistíme, v jakém čase dojde napětí na úroveň  $u(\tau)$ , od kterého odečteme okamžik propadu. Takto získáme velikost  $\tau$ . Dosadíme do vztahu z kapitoly 1.2.2.1 za  $R$  vybíjecí odpor  $2,2k\Omega$  ze schématu dostaneme:

$$C = \frac{\tau}{R} \quad (14)$$

Pro zjištění velikosti ESR vycházíme ještě z napětí na rezistoru. Z průběhu grafu a roztáhnout časovou základnu na osciloskopu. Po nabití kapacitoru obvod na krátkou chvíli rozpojíme. Zjistíme, na jakou hodnotu vzrostlo napětí na rezistoru a o kolik pokleslo napětí na superkapacitoru po  $50\mu s$ . Když známe velikost napětí na vybíjecím odporu, můžeme zjistit z poměru napětí k odporu rezistoru, tedy  $2,2k\Omega$ , velikost proudu tekoucího obvodem. Tento proud a rozdíl napětí na superkapacitoru před propadem a napětí po  $50\mu s$ , dosadíme do ohmova zákona pro stanovení ESR[22].



Obr.11: Detail ESR propadu a odečtení parametrů pro výpočet kapacity dle výrobce CAP-XX(převzato od výrobce z Ref.[22])

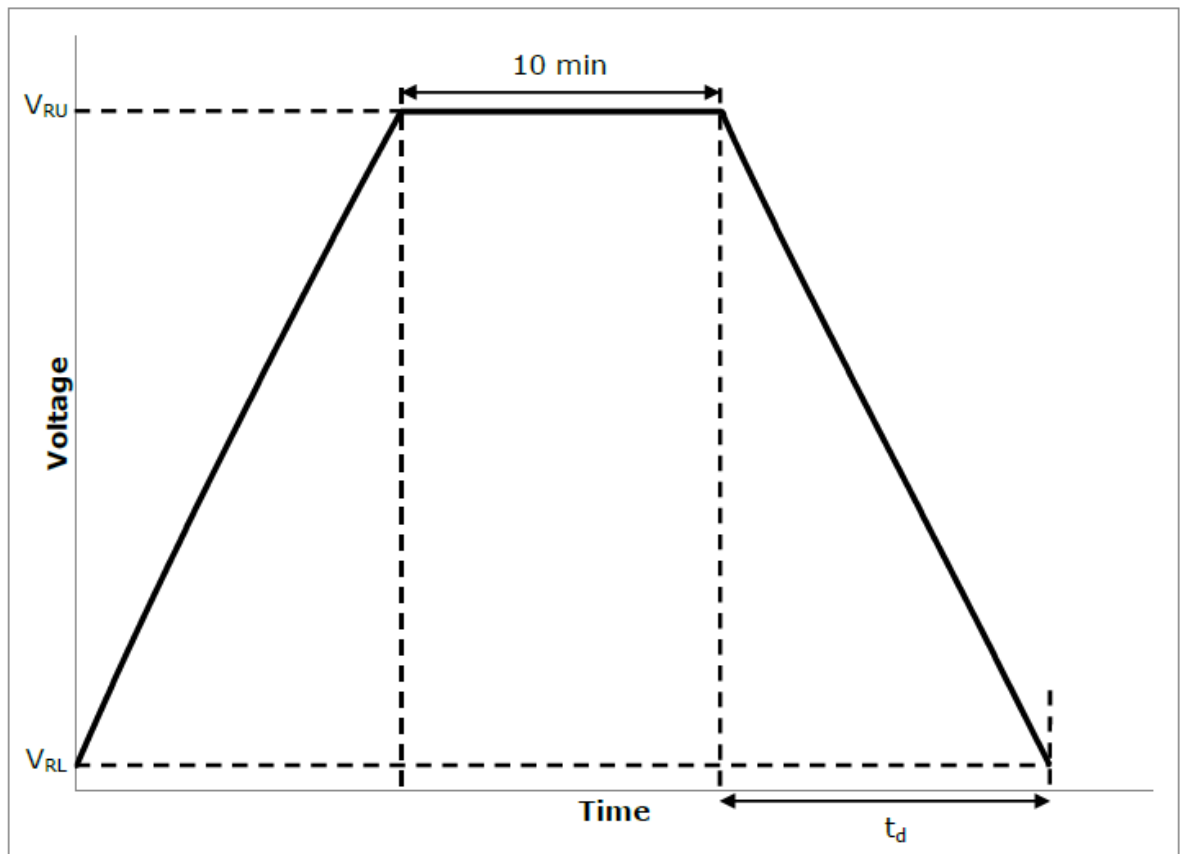
### 2.2.4.3 KEMET Representative Test Procedures for Customer Evaluations

Podobnou metodu má i společnost KEMET Electronic Components. KEMET charakterizuje své výrobky pomocí cyklů nabíjení konstantním proudem nebo napětím a vybíjení konstantním proudem. Výrobce předpokládá zkoušení jeho vlastních zařízení, tudíž předpokládá znalost katalogových údajů, proto doporučuje velikost vybíjecích proudů určit z následujících vztahů:

$$I_{d c} = \frac{4 \cdot U_0 \cdot C}{1000} \quad (15)$$

$$I_{d ESR} = 10 \cdot I_{d c} \quad (16)$$

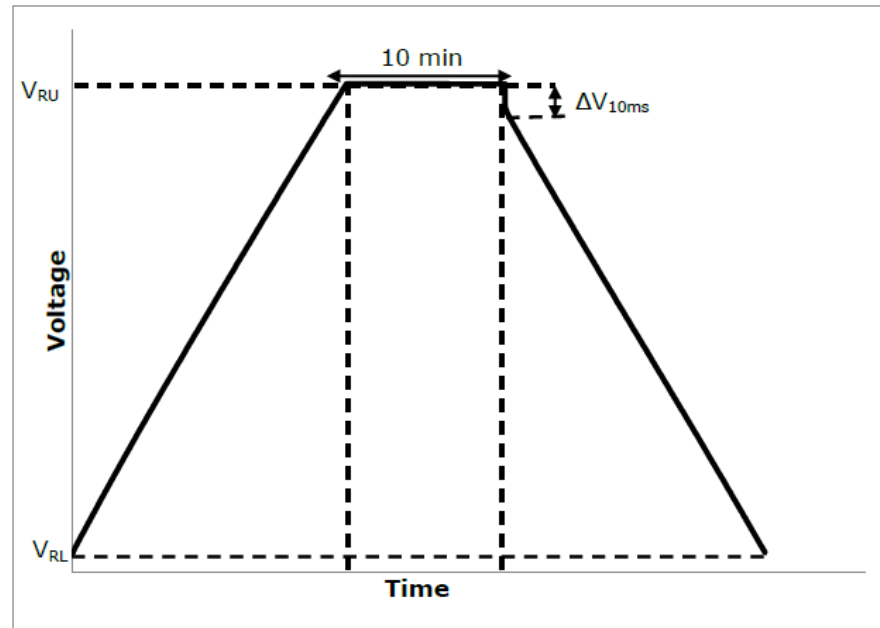
kde  $U_0$  je jmenovité napětí superkapacitoru. Lze však použít jakýkoliv proud nižší než je maximální proud, který by superkapacitor poškodil. Pro stanovení ESR nejprve superkapacitor nabijeme na jeho jmenovité napětí a odpojíme na 10 minut. Během měření zaznamenáváme průběh napětí na superkapacitoru a proud tekoucí obvodem. Připojíme ze zdroje na zátěž s nastaveným vybíjecím proudem a necháme vybit, dokud zátěž udrží konstantní proud.



Obr.12: Stanovení kapacity dle výrobce KEMET (převzato od výrobce z Ref.[20])

Zjišťujeme velikost propadu z maximální poslední nejvyšší hodnoty napětí na superkapacitoru k hodnotě následující  $10 \pm 5\text{ms}$  značený jako  $\Delta U_{10\text{ms}}$ , musíme také zaznamenat proud  $I_d$  tekoucí obvodem po tento čas. Potom už ESR určíme jako:

$$ESR = \frac{\Delta U_{10\text{ms}}}{I_d} \quad (17)$$



Obr.13: Stanovení kapacity a ESR dle výrobce MAXWELL (převzato od výrobce z Ref.[7])

Kapacita se počítá ze změny napětí během celého vybíjení. Nejprve superkapacitor nabijeme a ponecháme 10 minut odpojený. Poté přepojíme na zátěž a necháme vybit.  $U_{max}$  je nejvyšší hodnota napětí a  $U_{min}$  nejnižší při které zátěž drží konstantní proud.  $I_{dC}$  je vybíjecí proud a  $t_d$  je doba vybití z  $U_{max}$  na  $U_{min}$ .

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{t_d \cdot I_{dC}}{U_{max} - U_{min}} \quad (18)$$



### 3 Testování superkapacitorů

V této kapitole se budu věnovat měřením, které jsem prováděl na superkapacitorech výrobce MAXWELL z laboratoře KTE. K měření jsem používal stabilizovaný zdroj STATRON Typ 2225 a osciloskop Tektronix TDS2014B rovněž z laboratoře KTE. Jsou zde popsány a zhodnoceny jednotlivé metody měření a stanovení jejich základních parametrů. Z naměřených hodnot je vypočtena energetická hustota a účinnost. V tabulce jsou parametry uváděné výrobcem.



Obr.14 Měřené vzorky superkapacitorů

Tabl.: Parametry superkapacitorů udávané výrobcem

	Kapacita [F]	Tolerance [%]	ESR [mΩ]	Tolerance [%]	Jmenovité napětí [V]	Unikající proud [mA]
PC 5	4	±20%	400	±25%	2.5	0.02
PC 10	10	±20%	180	±25%	2.5	0,04
PC 5-5	2	±20%	800	±25%	5	0,02
BOOSTCAP	100	+20%	15	max	2.7	0,026
BOOSTCAP D-cell	310	+20%	3,2	max	2.7	0,3

#### 3.1 Použité měřicí metody

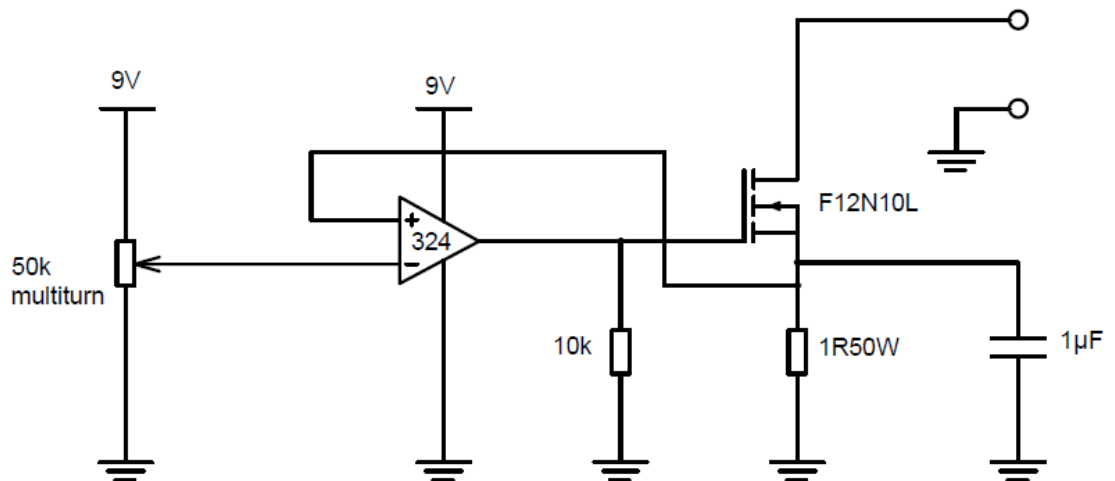
Ke stanovení parametrů jsem zkusil dojít více různými způsoby, které popíši v této části. Měření samovybíjení a unikajícího proudu se principem ve zvolených metodikách příliš nelišilo. Následujících pár odstavců je věnováno této problematice.

### 3.1.1 Stanovení kapacity a ESR

Ke zjištění velikosti kapacity a ESR se dá dojít více postupy. Dva z nich jsou měření konstantním proudem a měření časové konstanty. Při provádění testů jsem vycházel z postupů poskytovaných výrobcí zákazníkům, z naměřených dat jsem pak použil více metod k výpočtu velikosti parametrů.

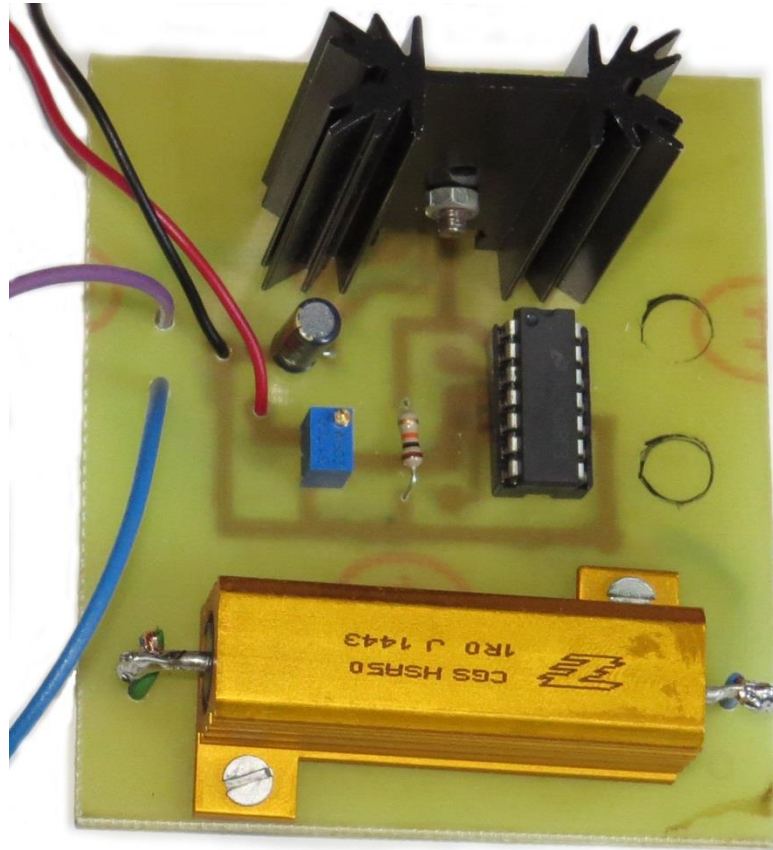
#### 3.1.1.1 Měření konstantním proudem

Toto měření je inspirováno postupem výrobce MAXWELL popsaného v kapitole 2.2.4.1 nebo referenci[reference maxwell].



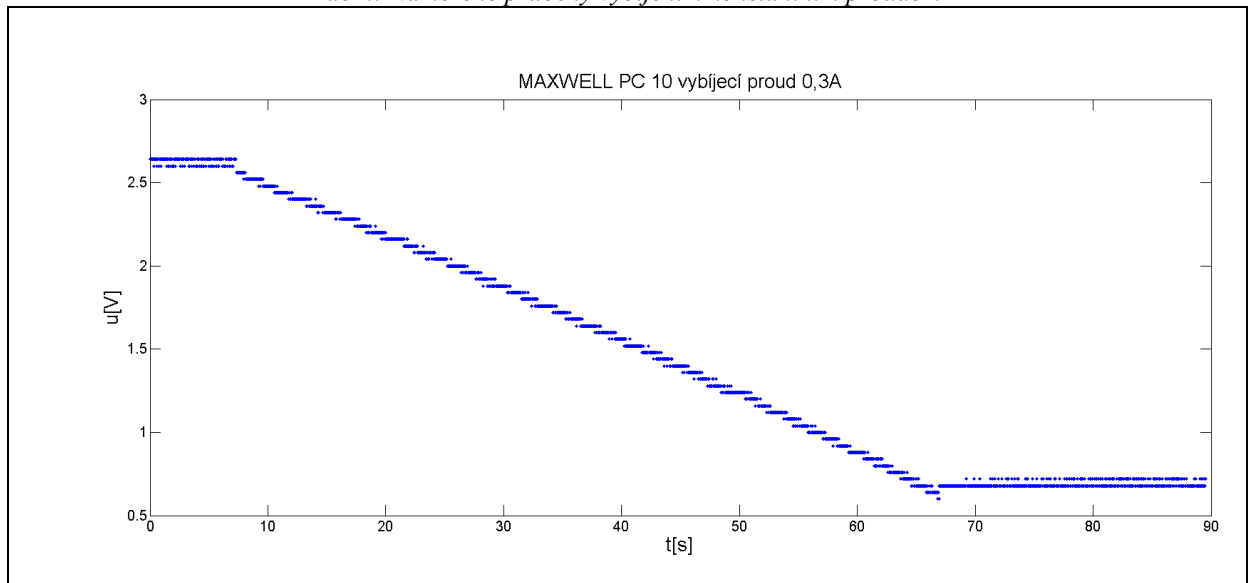
Obr.14: Schéma zátěže nastavitelné na odběr konstantního proudu

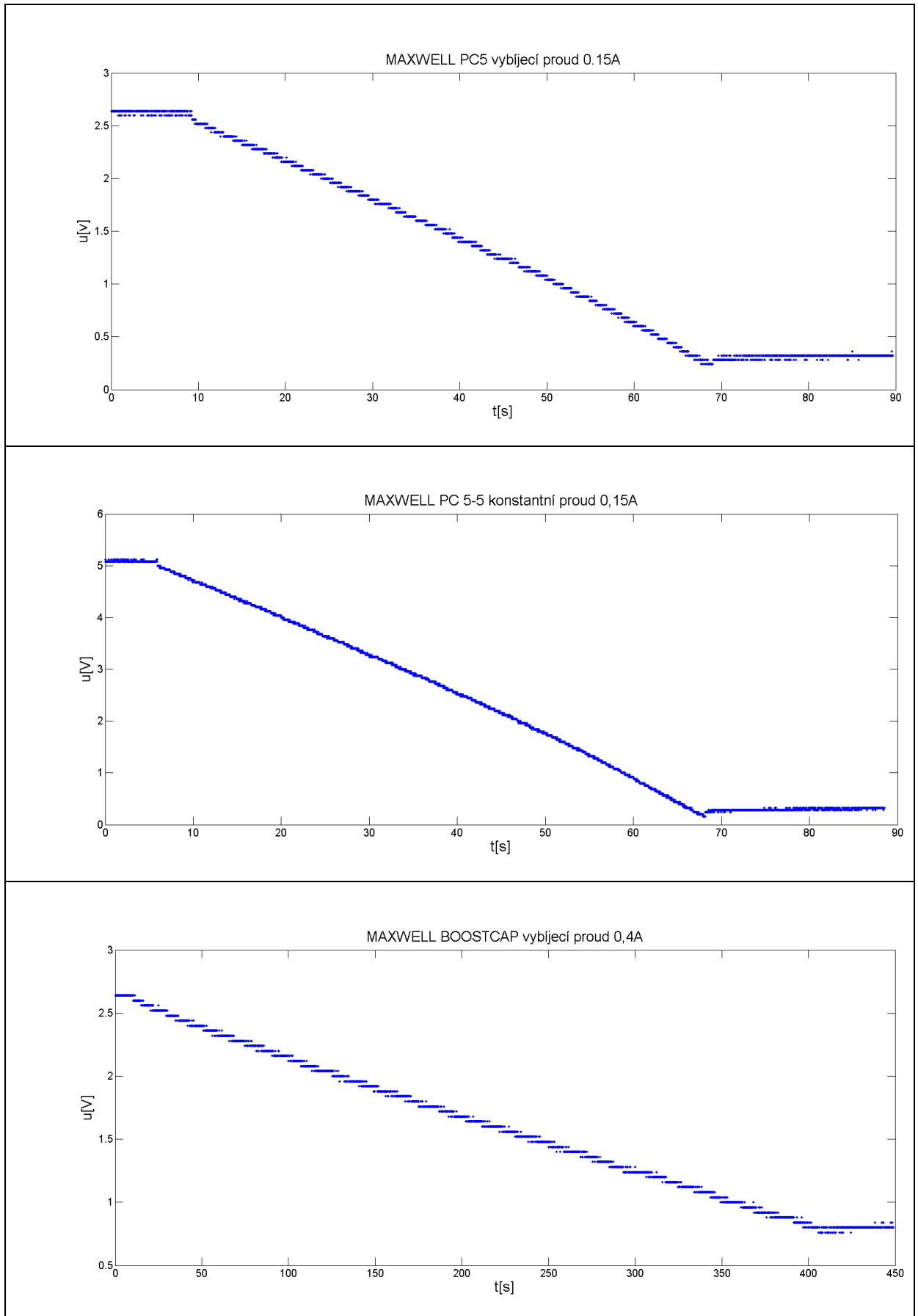
Použil jsem časovou základnu osciloskopu 2,5s, 5s, 10s a 50s v závislosti na rychlosti vybíjení, vstupní dělič osciloskopu byl nastaven na 1V/ dílek. Data byla následně zpracována v programu MATLAB.

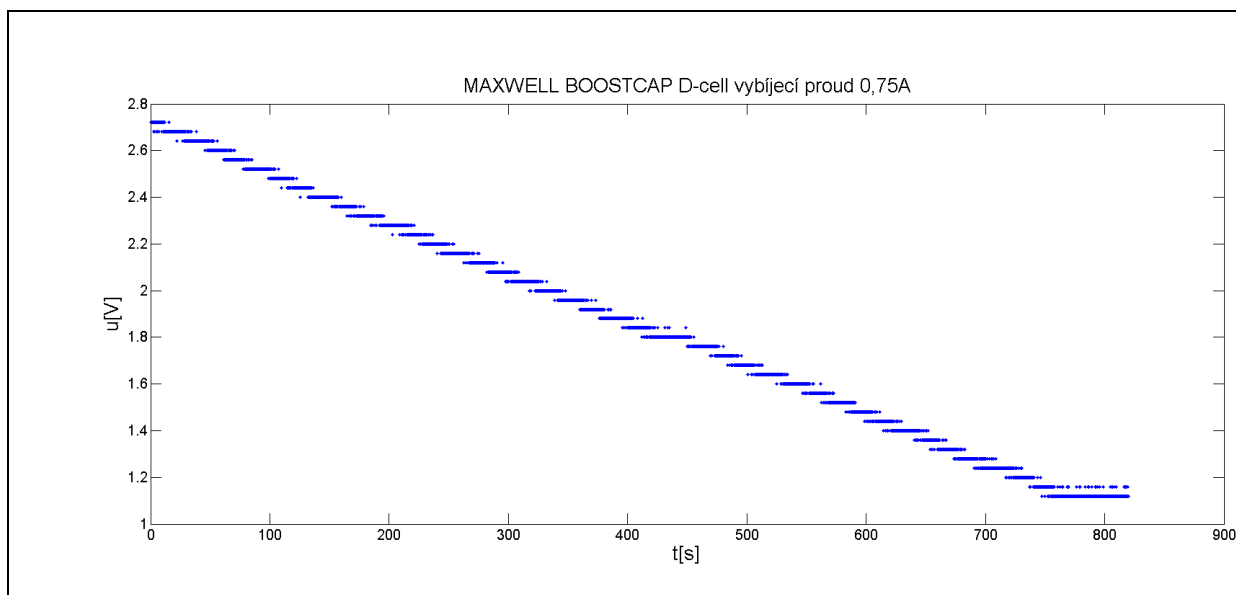


Obr. 15: Zátěž nastavitelná na odběr konstantního proudu

Tab2.: Naměřené průběhy vybíjením konstantním proudem







Tab.3: Hodnoty získané z naměřených dat podle postupu výrobce MAXWELL

	$U_0$ [V]	$U_{\min}$ [V]	$U_f$ [V]	$I_d$ [V]	$t_d$ [s]	<b>C</b> [F]	<b>ESR</b> [Ω]	E [J]	$\Delta E$ [J]
MAXWELL PC 10	2,64	0,6	0,68	0,3	59,68	<b>9,135</b>	<b>0,2667</b>	31,83	29,72
MAXWELL PC 5	2,64	0,24	0,32	0,15	59,68	<b>3,859</b>	<b>0,5333</b>	13,45	13,25
MAXWELL PC 5-5	5,12	0,16	0,28	0,15	62,2	<b>1,928</b>	<b>0,8</b>	25,27	25,19
MAXWELL BOOSTCAP	2,64	0,76	0,8	0,4	408,4	<b>88,78</b>	<b>0,1</b>	309,4	281
MAXWELL D-cell	2,72	1,12	1,16	0,75	734,2	<b>353</b>	<b>0,0533</b>	1306	1068

Z naměřených dat jsem určil parametry také podle metodiky výrobce KEMET popsané v kapitole 2.2.4.1. a v referenci[20].

Tab.4: Hodnoty získané z naměřených dat podle postupu výrobce MAXWELL

	$\Delta V_{10ms}$ [V]	$I_d$ [A]	$U_{\max}$ [V]	$U_{\min}$ [V]	t [s]	<b>C</b> [F]	<b>ESR</b> [Ω]
MAXWELL PC 10	0,08	0,3	2,64	0,68	59,72	<b>9,1408</b>	<b>0,2667</b>
MAXWELL PC 5	0,08	0,15	2,62	0,32	60,44	<b>3,9417</b>	<b>0,5333</b>
MAXWELL PC 5-5	0,12	0,15	5,12	0,28	62,84	<b>1,9475</b>	<b>0,8</b>
MAXWELL BOOSTCAP	0,04	0,4	2,64	0,8	404,2	<b>87,87</b>	<b>0,1</b>
MAXWELL D-cell	0,04	0,75	2,72	1,16	731,4	<b>351,63</b>	<b>0,0533</b>

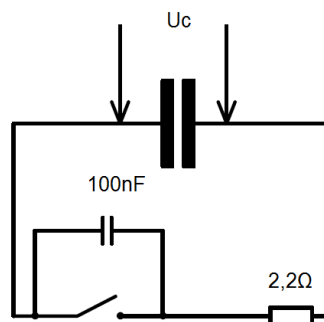
Naměřená data jsem využil rovněž pro stanovení parametrů podle postupu normy IEC 62391-1 podrobněji rozebrané v kapitole 2.2.2.1 a referenci[20].

Tab.5: Hodnoty získané z naměřených dat podle postupu normy IEC62391-1

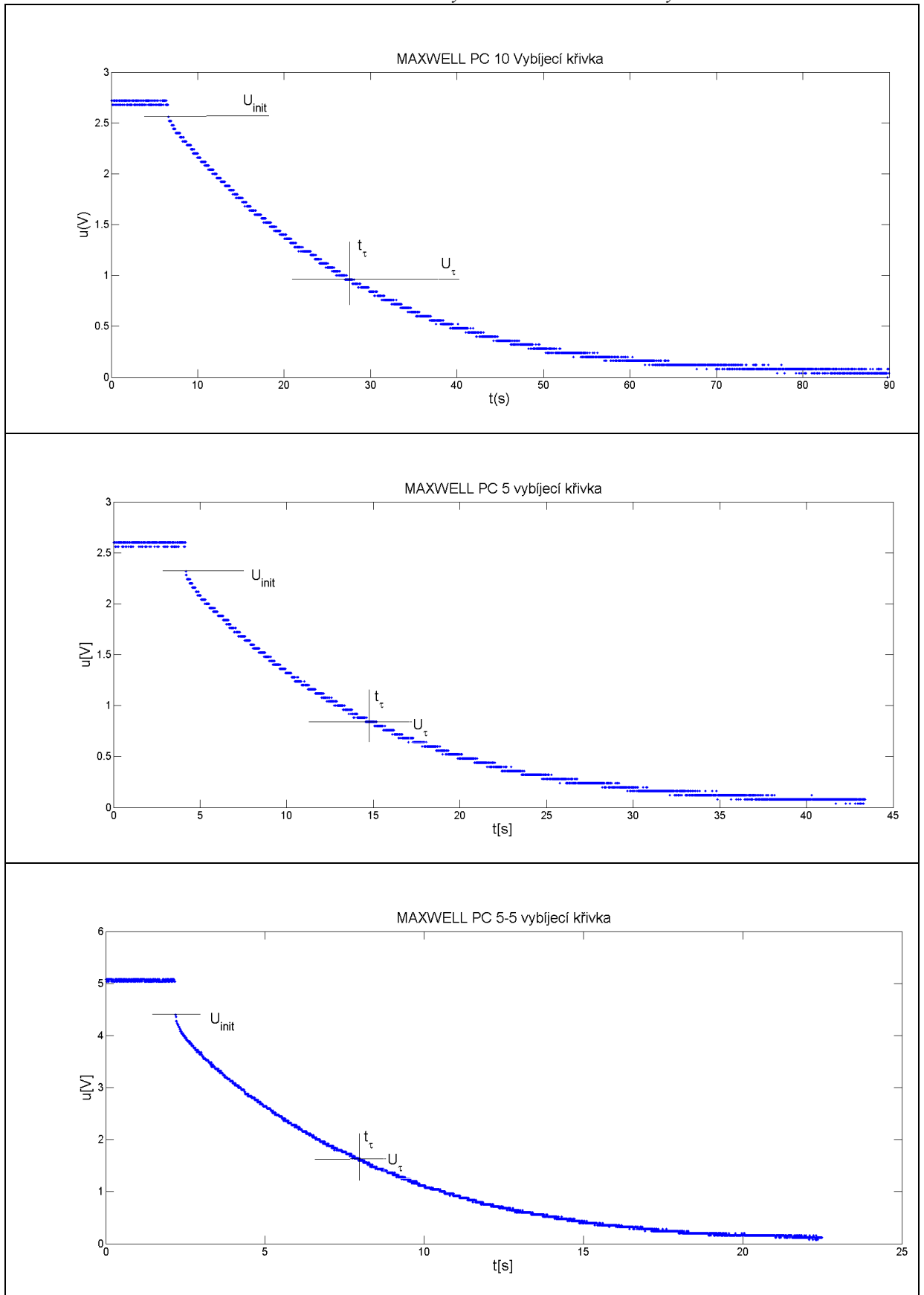
	$\Delta U_{\text{icc}}$ [V]	$I_d$ [A]	<b>ESR</b> [ $\Omega$ ]	$U_{\text{max}}$ [V]	$U_{80}$ [V]	$U_{40}$ [V]	$t_2$ [s]	$t_1$ [s]	<b>C</b> [F]
MAXWELL PC 10	0,02	0,3	<b>0,067</b>	2,66	2,128	1,064	50,88	20,96	<b>8,436</b>
MAXWELL PC 5	0,12	0,15	<b>0,8</b>	2,64	2,112	1,056	50,56	20,96	<b>4,205</b>
MAXWELL PC 5-5	0,08	0,15	<b>0,533</b>	5,12	4,096	2,048	46,44	19,04	<b>2,007</b>
MAXWELL BOOSTCAP	0,06	0,4	<b>0,15</b>	2,64	2,112	1,056	350,8	105,6	<b>92,88</b>
MAXWELL D-cell	0,04	0,75	<b>0,053</b>	2,72	2,176	1,088	752,2	253,8	<b>343,6</b>

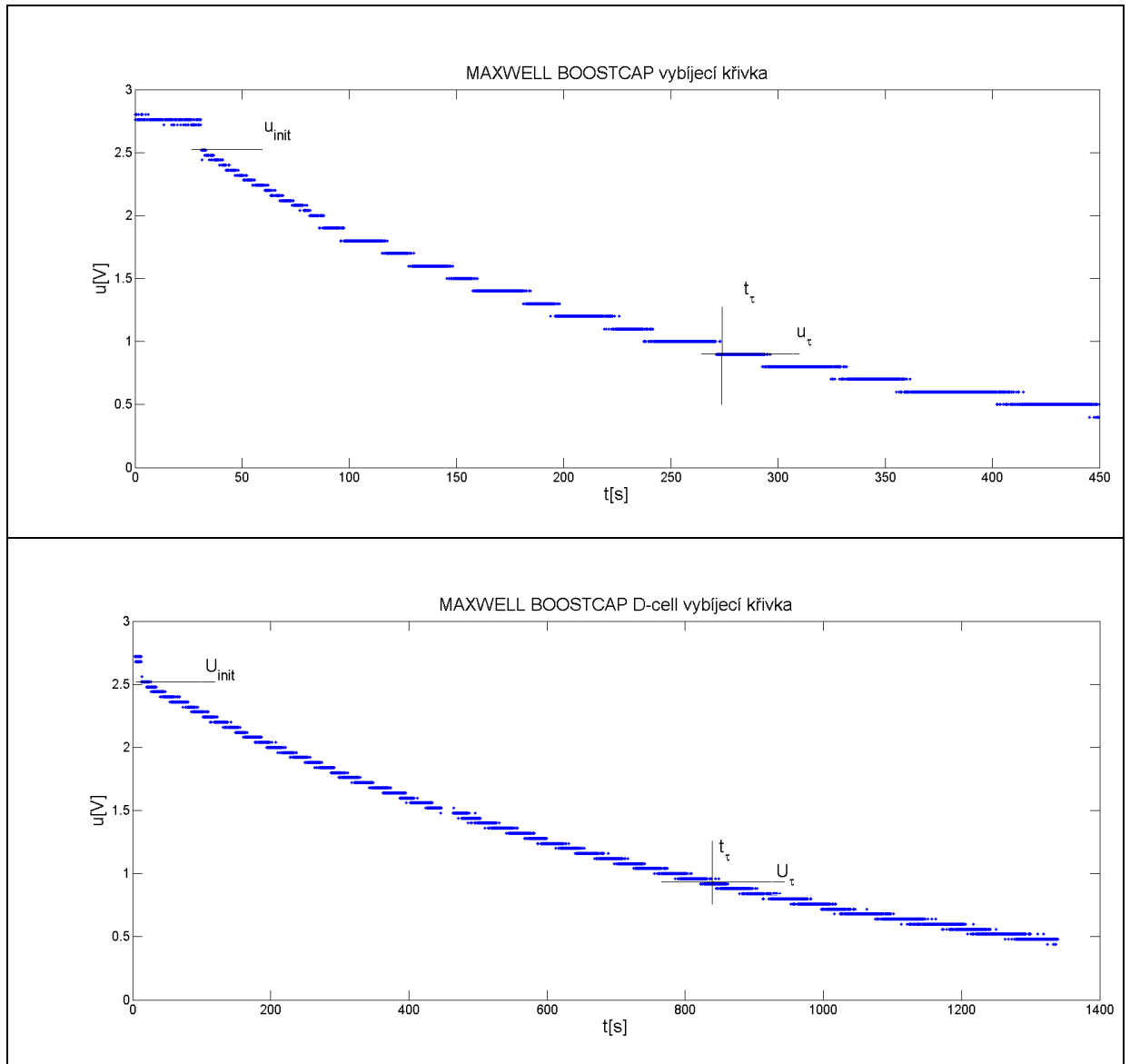
### 3.1.1.2 Měření časové konstanty

Tento postup používá ke stanovení kapacity a ESR měření časové konstanty, částečně vychází z návodu výrobce CAP-XX blíže popsany v referenci a kapitole 2.2.4.2[reference cap xx]. Použil jsem časovou základnu osciloskopu 2,5s, 5s, 10s a 50s v závislosti na rychlosti vybíjení, vstupní dělič osciloskopu byl nastaven na 1V/ dílek.

Obr.16: Schéma pro měření časové konstanty, osciloskopem snímáme napětí  $U_c$ .

Tab.6: Naměřené hodnoty měřením časové konstanty





Pro stanovení velikosti ESR jsem použil rozdíl napětí  $\Delta U$  poslední hodnoty maximálního napětí před propadem  $U_{max}$  a první hodnoty po propadu  $U_{init}$ , místo rozdílu napětí během  $50\mu s$  používaný výrobcem CAP-XX.

Tab.7: Vypočtené velikosti kapacit

Typ	$U_{max}$ [V]	$U_{init}$ [V]	$U_{\tau}$ [V]	$\tau$ [s]	<b>C[F]</b>
MAXWELL PC 10	2,72	2,56	0,942	25,16	<b>11,44</b>
MAXWELL PC 5	2,6	2,32	0,854	10,62	<b>4,827</b>
MAXWELL PC 5-5	5,08	4,4	1,619	5,8	<b>2,636</b>
MAXWELL BOOSTCAP	2,76	2,52	0,927	240,2	<b>109,2</b>
MAXWELL D-cell	2,72	2,52	0,927	829,2	<b>376,9</b>



Tab.8: Vypočtené velikosti ESR

Typ	$\Delta U[V]$	$I[A]$	<b>ESR[<math>\Omega</math>]</b>
MAXWELL PC 10	0,16	1,16364	<b>0,1375</b>
MAXWELL PC 5	0,28	1,05455	<b>0,26552</b>
MAXWELL PC 5-5	0,68	2	<b>0,34</b>
MAXWELL BOOSTCAP	0,24	1,14545	<b>0,20952</b>
MAXWELL BOOSTCAP D-CELL	0,2	1,14545	<b>0,1746</b>

### 3.1.2 Samovybíjení a unikající proud

Uváděné metodiky se liší v přístupu k měření unikajícího proudu, kde jsou rozdílné pouze časy udržení napětí na kapacitoru a jiný použitý rezistor. Princip stanovení velikosti unikajícího proudu je však ve všech případech stejný. V laboratoři byl k dispozici rezistor 2,2k $\Omega$ , použil jsem tedy metodu výrobce CAP-XX. Měření samovybíjení v metodice CAP-XX úplně chybí a zbylé dvě se liší v časech, po kterých se odečte konečné napětí. Pro tato měření jsou důležité nejmenší možné teplotní výkyvy respektive konstantní teplota okolí.

#### 3.1.2.1 Unikající proud

Pro změření unikajícího proudu nejprve nabijeme superkapacitor na jeho jmenovité napětí a udržíme jej po nějakou dobu - MAXWELL používá jednu hodinu, CAP-XX ponechává 15 minut či méně a KEMET udržuje napětí půl hodiny. Poté se připojí rezistor (MAXWELL a KEMET používají jednoohmový rezistor, CAP-XX určuje proud pomocí 2,2k $\Omega$  rezistoru) do série se superkapacitorem. Pokračujeme v držení napětí dalších 70 až 75 hodin a následně zaznamenáme napětí na rezistoru. Unikající proud se pak vypočte jako poměr napětí a velikosti elektrického odporu rezistoru.[20]

Při měření unikajícího proudu jsem nechal superkapacitor připojený na jmenovitém napětí 10 minut a poté jsem zaznamenal hodnoty napětí na rezistoru po 72 hodinách. Napětí jsem snímal na rezistoru 2,2k $\Omega$ .

Tab.9: Naměřené hodnoty unikajícího proudu

Typ	Začátek		Konec	
	U[V]	I[mA]	U[V]	I[mA]
MAXWELL PC 5-5	0,046	0,020909091	0,0456	0,020727273
MAXWELL BOOSTCAP	0,05	0,022727273	0,889	0,404090909

### 3.1.2.2 Samovybíjení

Samovybíjení se měří podobným způsobem jako unikající proud. Nabitý superkapacitor na jmenovité napětí, pro zajištění plného nabití, ponecháme připojený ke zdroji po nějakou dobu – MAXWELL udává jednu hodinu, KEMET půl hodiny. Já je nechval připojené na zdroji 15 minut. Následně jej odpojíme na 72 hodin v případě MAXWELLa, na 24 hodiny v případě KEMETu. Poté změříme napětí na svorkách. Velikost samovybíjení ve voltech je pak absolutní hodnota rozdílu naměřeného napětí od počáteční hodnoty. V procentech ho pak vyjádříme následovně:

$$\text{samovybíjení [\%]} = \left| 100 \cdot \frac{U - U_0}{U_0} \right| \quad (19)$$

$$\text{samovybíjení [V]} = U_0 - U \quad (20)$$

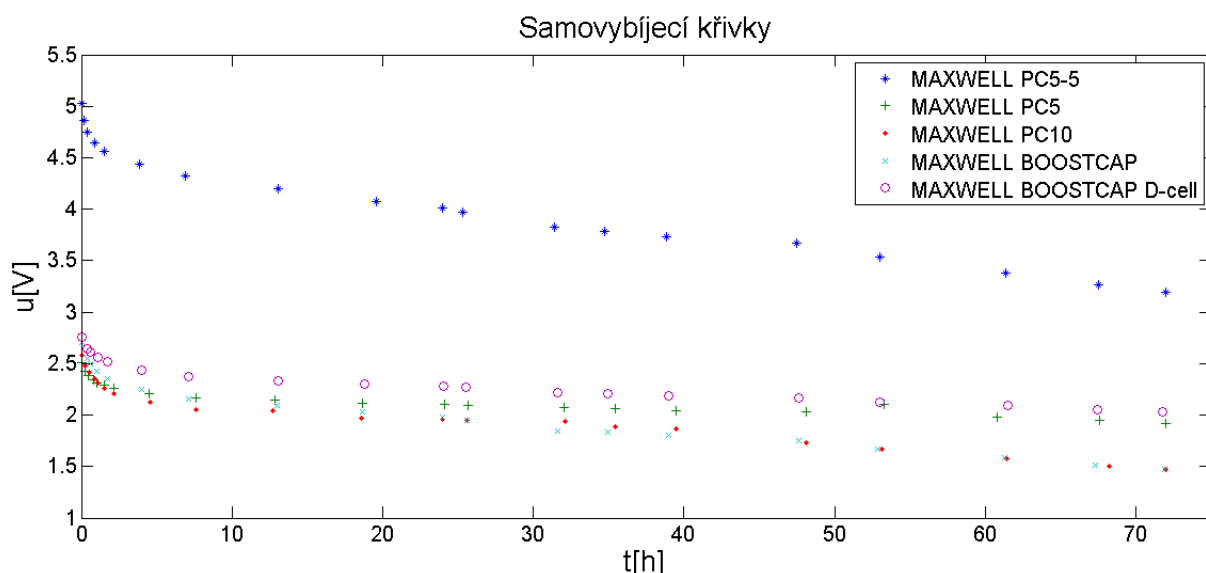
Kde  $U$  je naměřené napětí a  $U_0$  je napětí počáteční[20]. Oproti zmíněným metodám jsem napětí snímal vícekrát s různým časovým odstupem.

Tab.10: Velikost samovybíjení po 24 hodinách

Typ	$U_0$ [V]	$U$ [V]	[V]	[%]
MAXWELL PC5-5	5,03	4,1	<b>0,93</b>	<b>18,49%</b>
MAXWELL PC5	2,504	2,1	<b>0,404</b>	<b>16,13%</b>
MAXWELL PC10	2,581	1,96	<b>0,621</b>	<b>24,06%</b>
MAXWELL BOOSTCAP	2,705	1,98	<b>0,725</b>	<b>26,80%</b>
MAXWELL D-cell	2,755	2,28	<b>0,475</b>	<b>17,24%</b>

Tab.11: Velikost samovybíjení po 72 hodinách

Typ	$U_0$ [V]	$U$ [V]	[V]	[%]
MAXWELL PC5-5	5,03	3,19	<b>1,84</b>	<b>36,58%</b>
MAXWELL PC5	2,504	1,92	<b>0,584</b>	<b>23,32%</b>
MAXWELL PC10	2,581	1,47	<b>1,111</b>	<b>43,05%</b>
MAXWELL BOOSTCAP	2,705	1,47	<b>1,235</b>	<b>45,66%</b>
MAXWELL D-cell	2,755	2,3	<b>0,455</b>	<b>16,52%</b>



Obr. 17: Naměřené hodnoty samovybíjení

### 3.2 Výpočet parametrů z naměřených hodnot

Z dat jednotlivé metody stanovení kapacity a ESR byly použity některé prvky pro výpočet dalších parametrů. Zde je uveden postup kterým jsem je počítal. Pro výpočet hustot bylo nutné superkapacity zvážit.

Tab.12: Hmotnosti superkapacitorů

Typ	Hmotnost[g]
MAXWELL PC 10	5.87
MAXWELL PC 5	3.36
MAXWELL PC 5-5	7.71
MAXWELL BOOSTCAP	19.5
MAXWELL BOOSTCAP D-cell	64.31

#### 3.2.1 Maximální energie

Maximální energii počítáme ze známého vztahu. Za C dosadím hodnoty napětí a kapacit získané jednotlivými metodami. V případě výpočtu dle postupu MAXWELL dosadíme za  $U_{max}$  hodnotu  $U_0$ .

$$W_{max} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{max}^2 \quad (21)$$

Tab.13: vypočtených hodnot kapacity pro jednotlivé metody

Typ	CAP-XX $W_{max}$ [J]	MAXWELL $W_{max}$ [J]	KEMET $W_{max}$ [J]	IEC62391-1 $W_{max}$ [J]
MAXWELL PC 10	42,3054	31,83	31,85392	29,8452
MAXWELL PC 5	16,31618	13,45	13,52884	14,652
MAXWELL PC 5-5	34,01753	25,27	25,52654	26,304
MAXWELL BOOSTCAP	415,8517	309,4	306,2079	323,664
MAXWELL D-cell	1394,262	1306	1300,767	1270,92

### 3.2.2 Maximální výkon

Maximální výkon superkapacitoru počítám rovněž z nejvyšší hodnoty napětí a jeho ESR. V případě výpočtu dle postupu MAXWELL opět dosadíme za  $U_{max}$  hodnotu  $U_0$ .

$$P_{max} = \frac{U_{max}^2}{ESR} \quad (22)$$

Tab.14: Vypočtené hodnoty maximálního výkonu.

Typ	CAP-XX $P_{max}$ [W]	MAXWELL $P_{max}$ [W]	KEMET $P_{max}$ [W]	IEC62391-1 $P_{max}$ [W]
MAXWELL PC 10	53,80655	26,136	26,136	67,92576
MAXWELL PC 5	25,45974	13,068	12,87075	5,57568
MAXWELL PC 5-5	75,90118	32,768	32,768	31,45728
MAXWELL BOOSTCAP	36,35673	69,696	69,696	29,73696
MAXWELL D-cell	42,37265	138,72	138,72	88,7808

### 3.2.3 Účinnost

Pro stanovení efektivity jsem použil poměr energie  $W_{drop}$  dodané při napětí  $U_{max}$  a energie odebrané při napětí následující po ESR propadu značené jako  $U_{init}$  v případě postupu CAP-XX;  $U_{iec}$  v případě IEC normy. Mimo metodiku MAXWELL, která popisuje výpočet dodané a uložené energie.

$$\eta [\%] = 100 \cdot \frac{W_{drop}}{W_{max}} \quad (23)$$

Tab.15: Napětí použité při výpočtu energie odebrané do zátěže.

Typ	CAP-XX U <sub>init</sub> [V]	IEC62391-1 U <sub>iec</sub> [V]
MAXWELL PC 10	2,56	2,64
MAXWELL PC 5	2,32	2,52
MAXWELL PC 5-5	4,4	5,04
MAXWELL BOOSTCAP	2,52	2,58
MAXWELL D-cell	2,52	2,68

Tab.16: Odebraného množství energie jednotlivými superkapacitory.

Typ	CAP-XX W <sub>drop</sub> [J]	IEC62391-1 W <sub>drop</sub> [J]
MAXWELL PC 10	2,56	2,64
MAXWELL PC 5	2,32	2,52
MAXWELL PC 5-5	4,4	5,04
MAXWELL BOOSTCAP	2,52	2,58
MAXWELL D-cell	2,52	2,68

Tab.17: Efektivitu vyhodnocené jednotlivými metodami.

Typ	CAP-XX Efektivita [%]	MAXWELL Efektivita [%]	IEC62391-1 efektivita [%]
MAXWELL PC 10	88,581	93,365	98,502
MAXWELL PC 5	79,621	98,531	91,116
MAXWELL PC 5-5	75,020	99,701	96,899
MAXWELL BOOSTCAP	83,365	90,817	95,506
MAXWELL D-cell	85,835	81,812	97,080

### 3.2.4 Energetická hustota

Energetickou hustotu zde počítám jako poměr maximální energie, která byla v superkapacitoru k jeho hmotnosti.

$$W_{dens} = \frac{W_{max}}{m} \quad (24)$$

Tab.18: Vypočtené hodnoty energetické hustoty

Typ	CAP-XX W <sub>dens</sub> [J/kg]	MAXWELL W <sub>dens</sub> [J/kg]	KEMET W <sub>dens</sub> [J/kg]	IEC62391-1 W <sub>dens</sub> [J/kg]
MAXWELL PC 10	7207,052	5063,141	5426,562	5084,361
MAXWELL PC 5	4856,006	3943,143	4026,44	4360,714
MAXWELL PC 5-5	4412,131	3267,315	3310,836	3411,673
MAXWELL BOOSTCAP	21325,73	14409,19	15702,97	16598,153
MAXWELL D-cell	21680,33	16611,12	20226,51	19762,400

### 3.2.5 Výkonová hustota

Výkonovou hustou zde určují jako poměr maximálního výkonu k hmotnosti supekapacitoru.

$$P_{dens} = \frac{P_{max}}{m} \quad (25)$$

Tab.18: Vypočtené výkonové hustoty

Typ	CAP-XX $P_{dens}$ [W/kg]	MAXWELL $P_{dens}$ [W/kg]	KEMET $P_{dens}$ [W/kg]	IEC62391-1 $P_{dens}$ [W/kg]
MAXWELL PC 10	9166,362	4452,47	4452,47	3616,15
MAXWELL PC 5	7577,304	3889,286	3830,58	518,5714
MAXWELL PC 5-5	9844,511	4250,065	4250,065	1275,019
MAXWELL BOOSTCAP	1864,448	3574,154	3574,154	476,5538
MAXWELL D-cell	658,8813	2157,052	2157,052	431,4104

### 3.3 Srovnání výsledků

Při pohledu na data získaná výpočtem z naměřených hodnot vycházejí vyšší čísla při měření časové konstanty. Na superkapacitorech typu PC5-5 a BOOSTCAP D-cell byla stanovena kapacita, vyšší než je horní tolerance udávaná výrobcem. Velikosti ESR pro menší superkapacitory však byly v toleranci, nebo od její hranice nebyly příliš vzdáleny. Při zjišťování parametrů měřením konstantním proudem od sebe výsledná čísla zjištěná různými metodami analýzy průběhů nebyla moc vzdálena. Z naměřených hodnot samovybíjení si lze povšimnout, že pád napětí z nabitého stavu je v prvních pár hodinách skoro exponenciální a pak dojde k postupné linearizaci. Velikost samovybíjení však výrobce neudává. U modelu PC 10 a BOOSTCAP 100F si lze povšimnout strmějšího lineárního poklesu než u zbylých vzorků. Při analýze průběhů podle postupu normy IEC62391-1 měli kromě modelu BOOSTCAP 100F supekacitory kapacitu v toleranci, ESR pak vyšla v toleranci pouze pro PC10 a PC5-5. Při použití postupu výrobce KEMET a MAXWELL vyšli shodné velikosti ESR, vyhovující parametrům daným výrobcem pouze v případě modelu PC5-5. Velikost kapacity nevyhovovala jen v jednom případě a to opět u modelu BOOSTCAP 100F. Při měření unikajícího proudu vyhověl nejlépe superkapacitor PC5-5, u kterého nastal předpokládaný pokles proudu po 72 hodinách. Velikost unikajícího proudu pak byla v rámci mezí udávaných výrobcem. Naopak druhý měřený vzorek nevyhověl parametrům daných výrobcem a došlo u něj dokonce k růstu unikajícího proudu. Vzhledem k této skutečnosti,

větší velikosti jeho ESR, relativně velkému samovybíjení a zjištěnou nižší velikostí kapacity (metodou měření konstantním proudem), než udává výrobce lze považovat tento vzorek za více degradovaný vlivem stáří, používání a zkoušení. Vliv degradace je potřeba vzít v úvahu u všech měřených superkapacitorů. Výrobce totiž udává po překročení hranice životnosti úbytek kapacity až 30% původní hodnoty a nárůst ESR o 100% u typů PC5, PC10 a BOOSTCAP 100F, u typu PC5-5 je to 20% pokles kapacity a 200% nárůst ESR a u typu BOOSTCAP D-cell je to 5% změna kapacity a 150% změna ESR.

## Závěr

V práci jsem se zabýval teorií superkapacitorů, přístupy k měření a měřicími procedurami. První část zmiňuje různé přístupy, kterými se k charakteristickým parametrům dostáváme. Existuje více přístupů a každý je vhodný pro získání jiných dat. Některé přístupy jsou vhodné spíše ke zkoumání vlastností materiálů během vývoje, jiné jsou vhodnější pro stanovení parametrů při konkrétní aplikaci. Existuje hodně způsobů stanovení parametrů, většinou má každý výrobce své, které se mezi sebou velmi podobají. Do budoucna by bylo vhodné stanovení jednotného postupu. Proto vznikají metodiky a normy, některé používané pro měření baterií.

Ve třetí kapitole jsem pak provedl měření a výpočet základních parametrů – kapacita, ESR, samovybíjení, unikající proud dvěma metodami. Metody částečně vycházeli z metodik uveřejněných výrobcem pro zákazníky. Ze získaných dat jsem pak dopočetl další charakteristické parametry jako maximální energii, maximální výkon, efektivita, energetická a výkonová hustota. V poslední části této kapitoly jsou zhodnoceny výsledky a posouzeny zvolené metody a vybrané vzorky superkapacitorů. Při měření časovou konstantou vycházely vyšší hodnoty než hodnoty udávané výrobcem, proto se přesnější jeví metoda měření konstantním proudem, jelikož lze spíše předpokládat, že degradací stárím dojde k poklesu kapacity.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SHARMA, Pawan, T.S BHATTI a Peter KURZWEIL. A review on electrochemical double-layer capacitors: Pathways for energy storage in the UK. *Energy Conversion and Management* [online]. 2010, **51**(12): 345-407 [cit. 2015-03-03]. DOI: 10.1016/b978-0-444-62616-5.00019-x. Dostupné z: <http://www.lowcarbonfutures.org/sites/default/files/supercapacitor.pdf>
- [2] HALPER, Martin S. a James C ELLENBOGEN. *Supercapacitors: A Brief Overview* [online]. 2006, : 41 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: [http://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06\\_0667.pdf](http://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06_0667.pdf)
- [3] BÉGUIN, François a Elżbieta FRĄCKOWIAK. *Supercapacitors: : materials, systems, and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. ISBN 978-3-527-32883-3.
- [4] GUERRERO, M.A, E. ROMERO, F. BARRERO, M.I. MILÁNES a E. GONZÁLES. Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems. *Http://peandes.unex.es* [online]. 2009, : 8 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://peandes.unex.es/archives%5CP126.pdf>
- [5] YANG, Hengzhao. *TASK SCHEDULING IN SUPERCAPACITOR BASED ENVIRONMENTALLY POWERED WIRELESS SENSOR NODES*. Georgia Institute of Technology, 2013. Dostupné z: <http://users.ece.gatech.edu/~hyang42/pdf/phd.pdf>. Disertační práce. Georgia Institute of Technology. Vedoucí práce Dr. Ying Zhang.
- [6] Capacitance: What is capacitance. *Capacitorguide.com: your guide to the world of capacitors* [online]. [cit. 2015-03-31]. Dostupné z: <http://www.capacitorguide.com/capacitance/>
- [7] Co jsou to superkapacity? *Ecom.cz* [online]. České Meziříčí [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.ecom.cz/files/documents-news/108.pdf>
- [8] Supercapacitor: Electrical parameters. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-31]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor#Electrical\\_parameters](http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor#Electrical_parameters)
- [9] MAŠEK, Zdeněk, Stanislav GREGORA, Jan MICHL a Karel DVOŘÁK. Superkapacity v dopravní technice. In: *Vědeckotechnický sborník ČD*. 25. Praha, 2008.
- [10] *APPLICATION NOTE:: Maxwell Technologies Test Procedures for Capacitance, ESR, Leakage Current and Self-Discharge Characterizations of Ultracapacitors* [online]. : 10 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetarchive.com/indexerfiles/gl/Datasheet-095/DSA00114146.pdf>
- [11] SMIL, Vaclav. Power Density Primer:: Understanding the Spatial Dimension of the Unfolding Transition to Renewable Electricity Generation (Part V – Comparing the Power Densities of Electricity Generation). MasterResource: A Free Market Energy Blog [online]. 2010 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <https://www.masterresource.org/smil-vaclav/smil-density-comparisons-v/>
- [12] MILLER, J.R. *Electrochemical Supercapacitors: Technology basics for the traditional component engineer proceedings*. 2009. vyd. Jacksonville FL: CARTS USA, 2009
- [13] ZIGLER, Martin. Systémy pro skladování elektrické energie. *Československý časopis pro fyziku*. 2015, **65**(2).
- [14] KUBÁT, Petr. *Možnosti využití superkapacitorů*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce.
- [15] BILL, Jan Bc. *SUPERSKAPACITORY S KAPALNÝMI APROTICKÝMI ELEKTROLYTY*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Marie Sedlaříková, CSc.
- [16] *Significance of the RC time constant for super capacitors*. In: BROREIN, Ed.

- Powersupply.blogs.keysight.com/ [online]. 2015, 23. leden [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://powersupply.blogs.keysight.com/2015/01/significance-of-rc-time-constant-for.html>
- [17] KRECZANIK, Paul, Christian MARTIN, Pascal VENET, Guy CLERC, Gerard ROJAT a Younes ZITOUNI. *Constant power cycling for accelerated ageing of supercapacitors* [online]. In: . Barcelona: EPE, 2009, s. 11 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00475769>
- [18] STRYZHAKOVA, Dr.N., Dr.Y. MALETIN a Dr.S. ZELINSKYI. *Testing methodology manual. Testing methodology manual* [online]. 2012, 1.1, s. 30 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.energycaps.eu/wp-content/uploads/2013/09/Testing-Methodologies-Manual.pdf>
- [19] VACULÍK, Bc. Sebastian. *Impedanční měření olověných akumulátorů*. Brno, 2012. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53308](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53308). Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Pavel Abraham.
- [20] KEMET CORPORATION. *SUPERCAPACITORS: Representative Test Procedures for Customer Evaluations* [online]. 2013, 7 s. [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://www.kemet.com/Lists/FileStore/KEMET%20Supercapacitor%20Test%20Procedures%20for%20Customer%20Evaluations.pdf>
- [21] APPLICATION NOTE: Maxwell Technologies Test Procedures for Capacitance, ESR, Leakage Current and Self-Discharge Characterizations of Ultracapacitors. [online]. s. 10 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetarchive.com/indexerfiles/gl/Datasheet-095/DSA00114146.pdf>
- [22] CAP-XX. Application Note AN1005 revision 2.1: Simple Measurement of Supercapacitor Parameters [online]. Lane Cove, Australia, 2008, 7 s. [cit. 2015].