

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2025

Bc. Dominik Král



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MOŽNOSTI VYUŽITÍ ULTRAKAPACITORŮ V ELEKTRICKÝCH POHONECH

APPLICATIONS OF ULTRACAPACITORS IN ELECTRIC DRIVES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Král

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Procházka, Ph.D.

BRNO 2025

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Dominik Král

ID: 230388

Ročník: 2

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Možnosti využití ultrakapacitorů v elektrických pohonech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- Proveďte literární rešerši zaměřenou na využití ultrakapacitorů v elektrických pohonech. Zahrňte aktuální zdroje, které popisují principy fungování, výhody a nevýhody ultrakapacitorů.
- Analyzujte a vyhodnoťte metody a techniky používané k ověření míry degradace ultrakapacitorů v elektrických pohonech a ověřte míru degradace na předložených vzorcích.
- Podle pokynů vedoucího navrhnete kondenzátorovou baterii pro tři specifické aplikace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- Nayak, S., Joshi, D. R., & Nayak, S. (2024). Leveraging supercapacitors to mitigate limitations and enhance the performance of battery energy storage systems: A simulation and experimental validation. *DiscoverEnergy*,4(18).<https://doi.org/10.1007/s43937-024-00042-8>[<https://link.springer.com/article/10.1007/s43937-024-00042-8>].
- Poonam, Pareek, K., & Jangid, D. K. (2022). Analysis of the effect of different factors on the degradation of supercapacitors. *Ionics*,28(7),4527–4545.<https://doi.org/10.1007/s11581-022-04650-z>[<https://ijserd.com/articles/IJSRDV4I30105.pdf>].

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 28.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Petr Procházka, Ph.D.

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje zkoumání využití ultrakapacitorů v oblasti elektrických pohonů. V první části je provedena literární rešerše zabývající se principy fungování ultrakapacitorů, jejich výhody a nevýhody ve srovnání s jinými typy uložitel energie a zároveň na možnosti jejich aplikace v různých oblastech průmyslu. Následuje přehled metod používaných k měření základních parametrů ultrakapacitorů, včetně přípravy měřicího pracoviště. V experimentální části jsou vybrané metody aplikované na reálné vzorky za účelem posouzení míry jejich degradace. V závěru je proveden návrh ultrakapacitorového uložitel pro vybrané aplikace. Práce poskytuje komplexní pohled na ultrakapacity jako alternativní či podpůrné řešení pro ukládání elektrické energie.

Klíčová slova

Superkondenzátor, ultrakapacitor, uložitel elektrické energie, EDLC, pseudokondenzátor, hybridní kondenzátory, elektrodové materiály, metody měření, měřicí pracoviště, elektrochemická impedanční spektroskopie, cyklická voltametrie, metoda pulzního zatížení, metoda nabíjení konstantním proudem.

Abstract

This diploma thesis investigates the use of ultracapacitors in the field of electric drives. The first part presents a literature review aimed at the principles of their operation, advantages and disadvantages compared to other types of energy storage, and possibilities of their deployment in various industrial sectors. This is followed by an overview of the methods used to measure the basic parameters of ultracapacitors, including the preparation of the measuring station. In the experimental part, selected methods are applied to real samples to assess the degree of their degradation. Finally, a design of an ultracapacitor energy storage system for selected applications is presented. The work provides a comprehensive view of ultracapacitors as an alternative or supporting solution for electrical energy storage.

Keywords

Supercapacitor, ultracapacitor, electrical energy storage, EDLC, pseudocapacitor, hybrid capacitors, electrode materials, measurement methods, measuring stations, electrochemical impedance spectroscopy, cyclic voltammetry, pulse loading method, constant current charging method.

Bibliografická citace

KRÁL, Dominik. *Možnosti využití ultrakapacitorů v elektrických pohonech*. Online, diplomová práce. Petr PROCHÁZKA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168890>. [cit. 2025-05-27].

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Dominik Král
VUT ID studenta:	230388
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2024/25
Téma závěrečné práce:	Možnost využití ultrakapacitorů v elektrických pohonech

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 28. května 2025

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Petru Procházkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a za ochotný přístup při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 28. května 2025

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. ULTRAKAPACITORY.....	12
1.1 HISTORIE	13
1.2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY	14
1.3 VLIVY NA ŽIVOTNOST	16
1.4 PROPOJOVÁNÍ.....	18
1.4.1 Pasivní vyvažování.....	18
1.4.2 Aktivní vyvažování	19
1.5 NABÍJENÍ/VYBÍJENÍ.....	20
1.6 APLIKACE.....	22
1.6.1 Zálohování	22
1.6.2 Spotřební elektronika	22
1.6.3 Obnovitelné zdroje energie	22
1.6.4 Doprava a logistika.....	23
1.6.5 Inteligentní měření.....	24
1.6.6 IoT.....	24
1.6.7 Jeřábové systémy	24
1.6.8 UPS.....	25
1.7 BATERIE VS SUPERKONDEZÁTORY	26
1.7.1 Provozní teplota.....	26
1.7.2 Cena.....	26
1.7.3 Životnost.....	26
1.7.4 Hustota energie a hustota výkonu	27
1.8 TYPY ULTRAKAPACITORŮ	27
1.8.1 EDLC	28
1.8.2 Pseudokondenzátory	29
1.8.3 Hybridní kondenzátory.....	30
1.9 ELEKTRODOVÉ MATERIÁLY	31
1.9.1 Aktivovaný uhlík.....	31
1.9.2 Uhlíkové aerogely	32
1.9.3 Grafen	32
1.9.4 Uhlíkové nanotrubičky.....	32
1.9.5 Vodivé polymery.....	33
1.9.6 Oxidy kovů	34
2. MOŽNOSTÍ MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ ULTRAKAPACITORŮ	35
2.1 CYKlická VOLTAMETRIE (CV).....	35
2.2 ELEKTROCHEMICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE (EIS)	37
2.2.1 Teoretická základ impedance.....	38
2.2.2 Princip metody EIS	39
2.2.3 Způsob zobrazení dat	40

2.2.4	<i>Elektrické ekvivalentní modely</i>	40
2.2.5	<i>Aplikace a význam</i>	41
2.3	MĚŘENÍ KAPACITY PŘI NABÍJENÍ KONSTANTNÍM PROUDEM	42
2.4	MĚŘENÍ ESR POMOCÍ METODY PULZNÍHO ZATÍŽENÍ.....	43
3.	PŘÍPRAVA MĚŘÍCÍHO PRACOVIŠTĚ	44
3.1	MĚŘÍCÍ PRACOVIŠTĚ SLOUŽÍCÍ K VYHODNOCENÍ KAPACITY	44
3.2	MĚŘÍCÍ PRACOVIŠTĚ SLOUŽÍCÍ K VYHODNOCENÍ ESR	45
4.	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ	46
4.1	VYHODNOCENÍ STAVU KAPACITY	46
4.2	VYHODNOCENÍ STAVU ESR.....	48
5.	NÁVRH KONDENZÁTOROVÉ BATERIE	50
5.1	KONDENZÁTOROVÁ BATERIE Č.1.....	50
5.2	KONDENZÁTOROVÁ BATERIE Č.2.....	54
5.3	KONDENZÁTOROVÁ BATERIE Č.3.....	56
5.4	KONDENZÁTOROVÁ BATERIE Č.4.....	58
5.5	KONDENZÁTOROVÁ BATERIE Č.5.....	61
5.6	KONDENZÁTOROVÁ BATERIE Č.6.....	62
	ZÁVĚR	64
	LITERATURA.....	65
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Energetická bilance pro různé typy uložení elektrické energie.[2].....	12
1.2	Konstrukce ultrakapacitoru[1].....	14
1.3	Vnitřní struktura dvouvrstvého superkondenzátoru.[7].....	16
1.4	Pasivní vyvažování s použitím rezistorů.[11].....	18
1.5	Pasivní vyvažování pomocí Zenerových diod.....	19
1.6	Aktivní vyvažování s použitím měniče.[11].....	20
1.7	Vlevo vybíjecí charakteristika superkondenzátoru a vpravo vybíjecí charakteristika lithium-iontové baterie.[14]	21
1.8	Ultrakapacitor o výkonu 1MW nacházející se v závodě Škoda Auto v Mladé Boleslavi.[19].....	25
1.9	Typy ultrakapacitorů[25].....	28
1.10	Typ ultrakapacitoru EDLC 3400 F, 2,85V [28]	28
1.11	a) depozice pod potenciálem, b) redoxní pseudokapacita, c) interkalační pseudokapacita.[27]	30
1.12	Asymetrický kondenzátor [29].....	31
2.1	Tříelektroodový systém používaný v cyklické voltametii [38].....	36
2.2	Průběh cyklické voltametrie [35]	36
2.3	Randlesův obvod.....	41
2.4	Schéma zapojení měření kapacity při nabíjení konstantním proudem	43
2.5	ESR, vybíjecí profil ultrakapacitoru [3]	43
3.1	Pracoviště určené k měření parametrů potřebných k vyhodnocení kapacity ultrakapacitoru.	44
3.2	Pracoviště určené k měření parametrů potřebných k vyhodnocení ESR ultrakapacitoru.	45
4.1	Porovnání průměrné kapacity článků pro napětí (1÷2) V	46
4.2	Průměrná kapacita článků pro napětí (1÷2) V převzato z:[45].....	47
4.3	Příklad odečtené hodnoty poklesu napětí na článku č.19.	49
4.4	Nárůst napětí na bočníku v obvodu článku č.19.....	49

SEZNAM TABULEK

1.1	Srovnání parametrů superkondenzátorů s lithium-ion bateriemi.[24]	27
2.1	Prvky ekvivalentního obvodu [42]	41
4.1	Parametry článků EPCOS B49300-G1605-Q [43]	46
4.2	Tabulka naměřených hodnot s vyhodnoceným ESR	48
5.1	Parametry použitých článků pro první návrh uložště	50
5.2	Technické parametry uložště č.1	54
5.3	Technické parametry uložště č.2	55
5.4	Technické parametry uložště č.3	56
5.5	Parametry použitých článků pro třetí návrh uložště	57
5.6	Technické parametry uložště č.4	58
5.7	Technické parametry uložště č.5	61
5.8	Parametry použitých článků pro pátý návrh uložště	62
5.9	Technické parametry uložště č.6	63

ÚVOD

V současné době se stále větší důraz klade na efektivní hospodaření s elektrickou energií. Mnoho aktuálních i budoucích událostí tento trend podporuje. Mezi tyto události patří zejména postupné odklání se od výroby elektrické energie v elektrárnách spalujících fosilní paliva. Tyto snahy přináší snahu nahrazení tradičních zdrojů energií obnovitelnými, jako jsou například fotovoltaické nebo větrné elektrárny.

S rozvojem elektráren využívajících obnovitelné zdroje energie se stále častěji objevuje otázka efektivního ukládání elektrické energie. Tato problematika nabývá na významu zejména v souvislosti se vznikem přebytků energie, kterou není možné v daném okamžiku využít, a potřebou jejího uchování pro pozdější využití v době jejího nedostatku. Podobná výzva se objevuje i v případech, kdy je nutné krátkodobě uložit velké množství energie, například při rekuperaci energie v dopravních systémech. V důsledku toho narůstá poptávka po elektrotechnických součástkách schopných spolehlivě a rychle uchovávat elektrickou energii, a to jak v malých aplikacích, tak v průmyslových odvětvích. Ultrakapacitory mohou sloužit jako zdroj špičkového výkonu, čímž přispívají ke zvýšení účinnosti a snížení zatížení bateriových systémů.

Skládání elektrické energie je možné realizovat několika způsoby, přičemž tato práce se bude primárně věnovat ultrakapacitorům, přičemž budou současně posouzeny jejich výhody a nevýhody ve srovnání s jinými typy energetických uložišť a posouzena jejich vhodnost pro využití v různých oblastech průmyslu s ohledem na podmínky, na které je nutné brát ohled z hlediska jejich možného užívání.

Dále se práce zaměří na představení jednotlivých typů ultrakapacitorů a vysvětlení principu jejich fungování. V této souvislosti budou analyzovány nejvíce používané materiály elektrod. Právě díky těmto materiálům dosahují ultrakapacitory mimořádně zajímavých hodnot z hlediska velikosti kapacity uchovávaného elektrického náboje.

Bude zde provedena analýza možností měření základních parametrů ultrakapacitorů, která poslouží jako podklad pro návrh a sestavení měřicího pracoviště. Na tomto pracovišti budou následně tyto parametry experimentálně změřeny na předložených vzorcích a výsledky budou vyhodnoceny.

Hlavním cílem této diplomové práce je tedy seznámení se s ultrakapacitory jako s efektivním řešením pro ukládání elektrické energie, představení metod měření jejich základních parametrů. Experimentální část se zabývá přípravou měřicího pracoviště a aplikace vybraných metod k ověření reálného stavu na předložených vzorcích. V závěru jsou provedeny návrhy ultrakapacitorových uložišť na základě předložených požadavků.

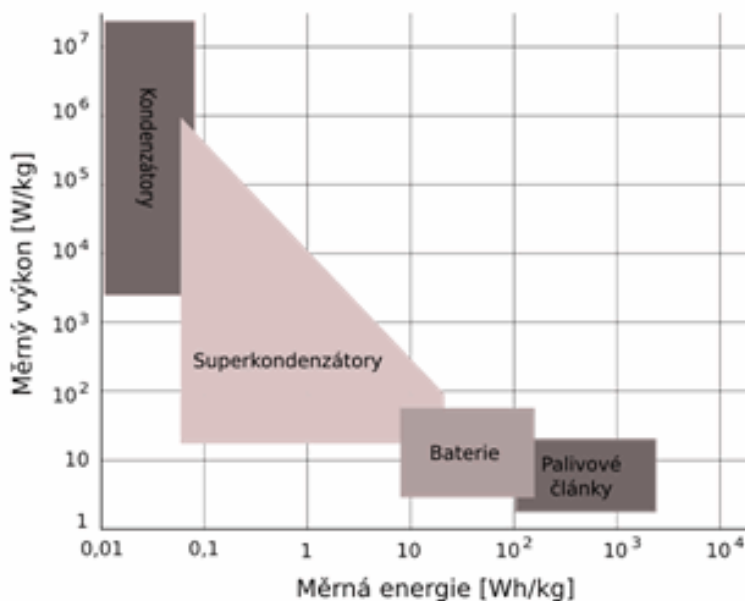
1. ULTRAKAPACITORY

Jedná se o elektrochemické kondenzátory v literatuře je také možné se setkat s názvy jako superkondenzátory, ultrakapacity. Jde o elektrotechnické součástky, které dokážou velmi efektivně a rychle pojmout a vydat velké množství elektrické energie. Principem funkce mechanismu ukládání elektrické energie se svým chováním nachází někde na pomezí mezi klasickými kondenzátory a akumulátory.

Samotné kondenzátory uchovávají náboj pomocí elektrostatického pole a hodí se spíše pro krátkodobé uložení energie. Jsou známi svým rychlým nabíjecím procesem.[1]

Za to akumulátory fungují na bázi ukládání energie pomocí chemických reakcí a jsou vhodné spíše k dlouhodobému uložení elektrické energie. Je nutné u nich brát v potaz větší důraz na pomalejší nabíjecí procesy. [1]

Jako vhodnou alternativou mezi oběma zmíněnými typy se jeví využití tzv. ultrakapacitorů (superkondenzátorů).[1] Jsou totiž schopny uchovávat větší množství energie než konvenční kondenzátory, a zároveň dodávat větší výkon než baterie (viz. obrázek 1.1.).



Obrázek 1.1 Energetická bilance pro různé typy uložení elektrické energie.[2]

K ukládání energie využívají dvou principů: elektrické dvojvrstvy a vratné chemické reakce. Superkondenzátory rozdělujeme na dvě základní skupiny právě v závislosti na způsobu ukládání náboje. [2]

První skupinou jsou tzv. EDLC (Elektrické Double Layer Capacitor), které pracují na principu elektrické dvojvrstvy. U tohoto typu nedochází k chemickým reakcím a náboj je vázán na elektrodě pomocí elektrostatické síly. Svým chováním se blíží spíše klasickým kondenzátorům.[2]

Druhým typem jsou pseudokondenzátory, které jsou založené na vratných oxidačně - redukčních reakcích na povrchu elektrod. Svým chováním se blíží spíše bateriím ve srovnání s EDLC, jelikož energie v nich je uchovávána pomocí elektrochemických reakcí.[2]

Superkondenzátory mohou typicky svojí kapacitou dosahovat v řádu jednotek až tisíců Faradů.[1]

1.1 Historie

Koncept ukládání elektrické energie pomocí elektrické dvojvrstvy je znám již od konce 18. století. Jedná se o vrstvu, která vzniká na pomezí elektrolytu a pevné látky. Elektrochemické kondenzátory využívají tzv. dvouvrstvou kapacitu, která vzniká na celém povrchu rozhraní mezi elektrodou a roztokem elektrolytu. Poprvé tento model dvojvrstvého kondenzátoru pro ukládání náboje na povrchu elektrody, respektive mezi elektrodou a elektrolytem představil v roce 1845 německý fyzik Hermann von Helmholtz. Avšak v této době nebyl ještě znám kvantový model, a proto nebylo možné přesně popsat a objasnit elektrochemické procesy.[3]

První zařízení pro ukládání energie bylo sestrojeno Beckerem ze společnosti General Electric v roce 1954 během experimentů se zařízeními využívajícími porézní uhlíkové elektrody, když poprvé pozoroval efekt EDLC. Domnívali se, že energie je ukládána v pórech uhlíku. Zaznamenali, že zařízení vykazovalo výjimečně vysokou kapacitu, ačkoliv mechanismus byl ještě v té době neznámý. Toto elektrochemické kondenzátorové zařízení bylo následně také Beckerem patentováno v roce 1957. Bylo to jednoduché zařízení, které bylo dosti podobné baterii, kdy obě elektrody byly ponořené do nádoby s elektrolytem. Samotné zařízení následně nebylo nikdy využito ke komerčním účelům a dále na něj nenavázali.[3]

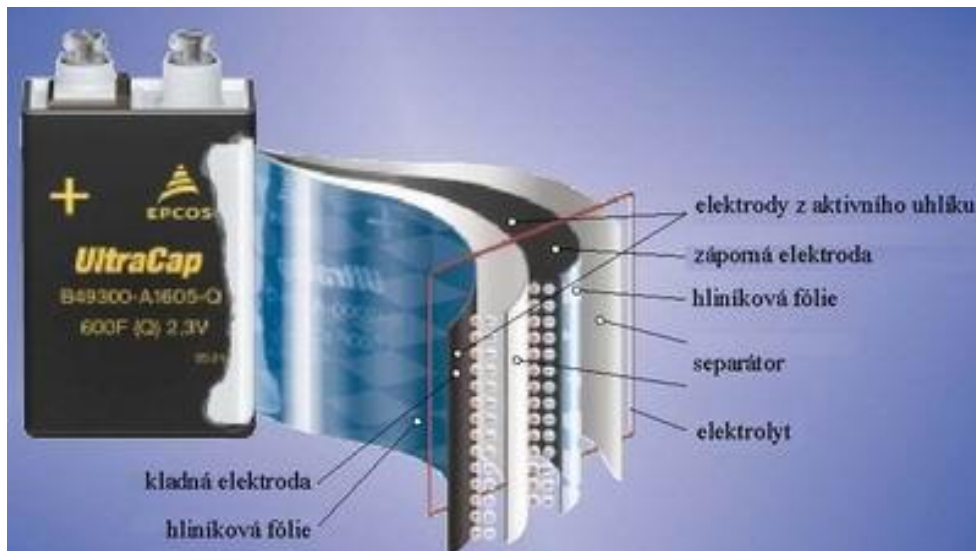
V roce 1966 vědci ze společnosti Standard Oil of Ohio vyvinuli modernější verzi těchto zařízení, když náhodou znovu objevili účinky dvouvrstvého kondenzátoru při práci na návrhu palivového článku.[4] Konstrukce článku využívala dvě vrstvy aktivního uhlí oddělené tenkým porézním izolátorem, což umožnilo výrazné zlepšení schopnosti ukládat energii. Tento design se stal základem většiny dnešních elektrických dvouvrstvých kondenzátorů.[3]

Standard Oil svůj vynález nekomercializovala, ale licenci poskytla japonské společnosti Nippon Electric Company (NEC). Tato firma následně pokračovala ve vývoji a v roce 1978 začala uvádět na trh “superkondenzátor“.[4][3] Tento typ zařízení s nízkým napětím a vysokým vnitřním odporem byl primárně určen pro aplikace zálohování paměti a čipů. Sloužil jako záložní zdroj pro zařízení jako jsou videorekordéry, mikrovlnné trouby a další zařízení spotřební elektroniky. NEC se stala první firmou, která úspěšně komerčně uvedla dvojvrstvé kondenzátory pod názvem “superkondenzátor“.[3][4] Následně až 90. léta přinesla pokroky v oblasti použitých materiálů a výrobních metod, což vedlo k nižším nákladům a získávání lepších výkonových parametrů.[4]

1.2 Základní principy

Na rozdíl od konvenčních kondenzátorů, které používají pevný a suchý dielektrický materiál (teflon, polyetylen, papír...), tak ultrakapacitor používá mezi svými elektrodami kapalný elektrolyt, což z něj dělá spíše elektrochemické zařízení podobné elektrolytickému kondenzátoru. Přestože je ultrakapacitor typem elektrochemického zařízení při ukládání elektrické energie nedochází k žádným chemickým reakcím. Z toho plyne, že ultrakapacitor zůstává čistě elektrostatickým zařízením, které uchová svou elektrickou energii ve formě elektrického pole mezi svými dvěma vodivými deskami.[5]

Zpočátku je nutné představit samotnou strukturu superkondenzátoru. Jak je možné vidět na obrázku 1.2 struktura dvouvrstvého superkondenzátoru je složena z následujících částí: kladná elektroda, hliníková fólie, semipermeabilní membrána (separátor), aktivní uhlík, elektrolyt a záporná elektroda.



Obrázek 1.2 Konstrukce ultrakapacitoru[1]

Oboustranně potažené elektrody jsou vyrobeny z grafitového uhlíku ve formě aktivního vodivého uhlíku, uhlíkových nanotrubiček nebo uhlíkových gelů.[5][1] Separátor udržuje elektrody od sebe, jde v podstatě o porézní papírovou (může být také vyroben z uhlíku nebo plastu) membránu, která umožňuje průchod kladných iontů, ale zároveň zabraňuje průchodu větších elektronů. Jak uhlíkové elektrody, tak papírový separátor jsou impregnovány kapalným elektrolytem, přičemž mezi nimi je použita hliníková fólie, která slouží jako kolektor proudu pro elektrické spojení s vyvedenými kontakty ultrakapacitoru. Elektrolyt funguje jako prostředník pro přenos iontů z jedné elektrody na druhou.[5][6]

Za markantním navýšením kapacity stojí aktivní uhlík, který je tak porézní, že nabízí plochu 10 000 až 100 000krát větší, než je lineární povrchová plocha. Jednoduše by se dalo říci, že se v této pórovité struktuře přichytí více iontů. Za zvýšením kapacity nestojí pouze zvýšení aktivní plochy, ale také velmi malá vzdálenost mezi deskami.[3] Avšak

s malou vzdáleností vzniká problém s napětím na kondenzátoru, kdy napětí na kondenzátoru může být jen velmi nízké. To je zapříčiněno tím, že jmenovité napětí článku je dáno hlavně rozkladným napětím elektrolytu. Velmi tedy závisí na druhu použitého elektrolytu. Typická hodnota pracovního napětí článku je pak mezi 1 až 3 volty v závislosti na použitém elektrolytu.[5][3] Tato problematika se zpravidla následně řeší propojením více kondenzátorů do sériově-paralelní kombinace. Sériovým propojením více článků dojde k zvětšení jmenovitého napětí, ale zároveň dojde ke snížení jeho kapacity. Aby bylo dosaženo požadované kapacity propojují se jednotlivé články následně ještě do paralelní kombinace. Pro přehlednost je dobré si závislosti mezi veličinami uvést do souvislosti s rovnicemi.

Pro sériové propojení platí:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (1.1)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (1.2)$$

Pro paralelní kombinaci platí:

$$C = C_1 + C_2 \quad (1.3)$$

$$U = U_1 = U_2 \quad (1.4)$$

,kde C_1, C_2 jsou kapacity kondenzátorů a U_1, U_2 jsou jejich jmenovité napětí.

Výpočet kapacity kondenzátoru je dán vztahem

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (1.5)$$

kde ε je permitivita materiálu mezi deskami, S je plocha desek a d je vzdálenost mezi deskami.

V závislosti na kapacitě se pojí velikost možné uložené energie, kterou získáme ze vztahu

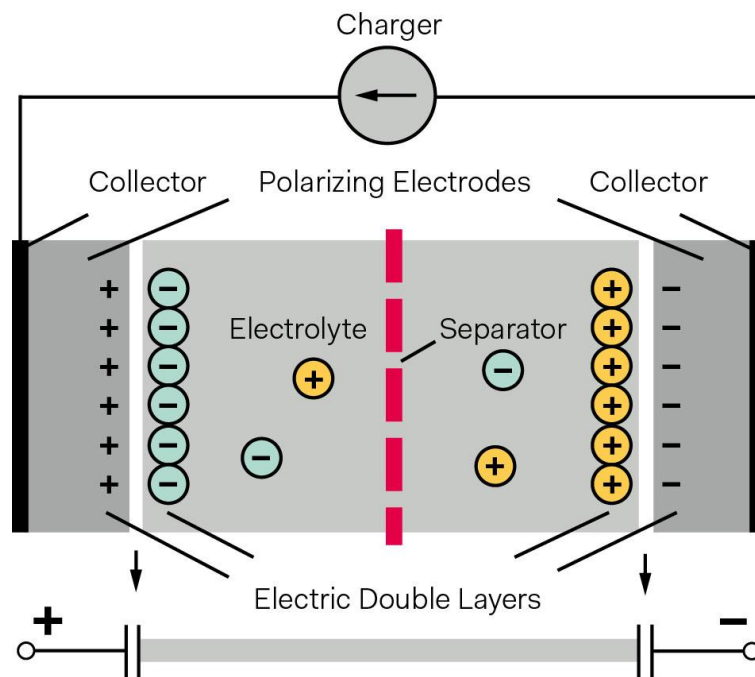
$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (1.6)$$

, kde C je kapacita a U napětí ultrakapacitoru. S tím se také pojí velikost náboje, která se získá vztahem:

$$Q = C \cdot U \quad (1.7)$$

Z čehož se dá vycházet, že se zvyšující plochou desek a zmenšující vzdálenosti mezi deskami se zvyšuje kapacita kondenzátoru. Stručně řečeno superkondenzátory získávají svou mnohem větší kapacitu kombinací desek s větší efektivní plochou a menší vzdáleností mezi nimi.

V případě že se nachází superkondenzátor v nenabitém stavu, tak jsou částice s nenulovým nábojem (ionty) rovnoměrně rozloženy ve vodivém elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami.[1] Když následně dojde k přiložení napětí na elektrody, tak začne docházet k přesunu záporně nabitých iontů ke kladné elektrodě a přesunu kladně nabitých iontů k elektrodě záporné.[7][8] Když se desky nabijí, na obou stranách separátoru se vytvoří opačný náboj, který vytváří to, co se nazývá elektrická dvouvrstva, možná jen jedna molekula tlustá (ve srovnání s dielektrikem, které se může pohybovat v tloušťce od několika mikro do milimetru nebo více v konvenčním kondenzátoru).[8] Tento mechanismus dává superkondenzátorům schopnost ukládat a znovu dodávat velké množství energie ve velmi krátkém časovém úseku.[7] Z obrázku 1.3 vyplývá, že je možné brát vnitřní strukturu jako ekvivalenci dvou sériově propojených kondenzátorů vzniklých jeden na každé elektrodě, zároveň je zde zobrazená elektrická dvouvrstva.



Obrázek 1.3 Vnitřní struktura dvouvrstvého superkondenzátoru.[7]

1.3 Vlivy na životnost

Ultrakapacitory mají mnohem delší životnost než typické bateriové systémy, ale jejich životnost je stále omezená různými vlivy. Na rozdíl od baterií u nich nedochází k prudkému poklesu na konci životnosti, ale spíše postupně degradují v průběhu doby jejich fungování. Samotná životnost je výrazně ovlivněna okolní teplotou, provozním

proudem a použitým napětím. Díky omezení těchto faktorů lze životnost ultrakapacitorů prodloužit. Nejdramatičtější vliv na degradaci má vnitřní odpor. Konec životnosti se odvíjí v závislosti na požadavku v aplikaci, kde se využívá. Většinou se bere pokles kapacity o 30 % a zdvojnásobení vnitřního odporu.[9][10] Hlavní faktory snižující kapacitu a zvyšující vnitřní odpor superkondenzátorů pramení z oxidace elektrod, z rozkladu elektrolytu a vzniku produktů blokujících póry, zeslabení adheze mezi aktivní hmotou elektrody a kolektorem.[10]

Obecně platí, že snížením okolní teploty se prodlouží životnost ultrakapacitorů, protože typická životnost je ovlivněna zejména napětím a teplotou. Nedoporučuje se provozovat články při teplotách vyšších, než je maximální uvedená provozní teplota. To zkracuje nejen životnost článku, ale může také způsobit poškození. Například možným únikem elektrolytu nebo prasknutí.[9] Za tímto problémem hlavně stojí tvorba plynných produktů při rozkladu. Hromadění těchto produktů v článku způsobuje růst vnitřního tlaku.[10] V případě aplikace je nutné zvážit nejen okolní teplotu, ale také zohlednit faktory, jako je generované teplo od vyzařujících prvků jednotky a vlastní zahřívání v důsledku zvlnění proudu.[9][10]

Podobně jako výše zmíněná teplota ovlivňuje životnost také provozní napětí. Snížením provozního napětím oproti jmenovitému se prodlouží životnost ultrakapacitoru. Při návrhu obvodů je nutné dbát na to, aby nebyly vystaveny vyššímu napětí, než je jejich jmenovité.[9]

Ultrakapacity disponují vlastností nízkého vnitřního odporu a schopnosti dodávat vysoký výkon/proud. Avšak je nutné dbát zvýšené pozornosti při nabíjení/vybíjení vysokými proudy. Vysoký proud by mohl vyvolat samovolné zahřívání uvnitř kondenzátoru, což by vedlo k rychlému zvýšení provozní teploty. V případě, že se využívá v aplikacích, kde je vystaven vysokým proudům, je třeba dbát na dostatečné chlazení.[9] Zejména jsou zatěžovány vysokým proudem zařízení pracující na bázi redoxních reakcí (pseudokondenzátory), které mají přirozeně pomalejší mechanismus nabíjení než EDLC. V důsledku působení proudu u nich vznikají nevratné reakce.[10]

Kromě těchto podmínek prostředí hraje při stárnutí zásadní roli chemická čistota použitých materiálů. Negativní dopad způsobují nečistoty v materiálu, které zavádějí do systému méně stabilní sloučeniny. Díky tomu dochází k rozkladu rychleji než u čistých látek. Zatímco tyto parazitní redoxní reakce spotřebovávají náboje, vytvořené produkty rozkladu mohou dále vytvářet další reakce s komponentami buněk, což vede k další degradaci. To vše ukazuje složitost stárnutí superkondenzátorů. Velké množství různých materiálových kombinací umožňuje mnoho možných mechanismů rozkladu spojených s vlivem provozních podmínek, proto je velmi složité popsat univerzální proces stárnutí.[10]

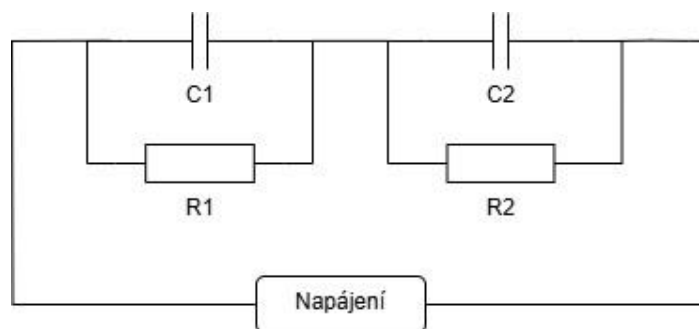
1.4 Propojování

Jak již bylo zmíněno z důvodu nízkého jmenovitého napětí článku zapojujeme superkondenzátory do větších celků. Aby bylo dosaženo užitečného napětí pro danou aplikaci, jsou články zapojovány do série a tím se vytvoří systém. Nicméně spojení jednotlivých článků do série vede k nerovnoměrnému rozložení napětí napříč celým systémem. Tato nerovnoměrnost je způsobena zejména tím, že kapacita superkondenzátoru není pro každou jednotku přesně stejná.[11] V praxi i když jsou články vyráběny na stejné výrobní lince, tak se mohou lišit jejich vnitřní charakteristikou. Pod vnitřní charakteristiku spadá jejich ESR (ekvivalentní sériový odpor), kapacita a rychlost samovybíjení. Rychlost samovybíjení je dána velikostí svodových proudů, a tedy odporů jednotlivých článků. Takové rozdíly následně způsobují problémy. Například, články s nižší kapacitou mají tendenci nabíjet/vybíjet rychleji, což způsobuje nerovnováhu napětí. Rozdíly v hodnotách ESR zase vedou k rozdílným poklesům napětí, což komplikuje správu článků. To je způsobeno tím, že články s vyšším ESR dosahují konečného vybití dříve než ostatní články, což snižuje využitelnou energii. Nerovnováha článků také může způsobovat nerovnoměrné rozložení teploty, což nepříznivě přispívá k degradaci. Je tedy nutné zavést dostatečné vybalancování článků. To se provádí dvěma způsoby:[12]

- Aktivní vyvažování
- Pasivní vyvažování

1.4.1 Pasivní vyvažování

Základní myšlenka pasivního vyvažování spočívá v pohlcování přebytečné energie v člancích s vyšším stavem nabití (SOC). To se provádí nejčastěji paralelním připojením rezistoru ke každému článku v daném systému (obr. 1.4.) Pakliže je napětí na některém z článků příliš vysoké, dojde k sepnutí a přebytečný náboj se spotřebuje na odpovídajícím rezistoru.[12] Hodnoty těchto odporů jsou voleny tak, aby jejich proud kompenzoval rozdíly ve svodových proudech kondenzátorů a vyrovnal jejich napětí v klidovém režimu.

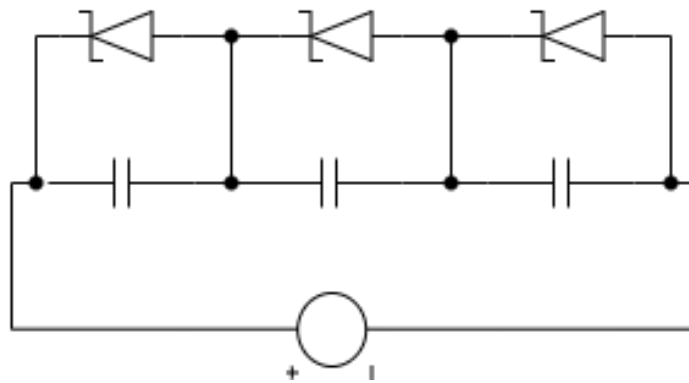


Obrázek 1.4 Pasivní vyvažování s použitím rezistorů.[11]

Pasivní vyvažování je samo o sobě velmi jednoduché a levné, ale samotná efektivita této metody je nízká. To je zapříčiněno ztrátami vznikajícími na balančních prvcích.[12] Dochází zde totiž ke kontinuálním ztrátám energie v odporech nejen během nabíjení a vybíjení, ale i v režimu stand-by. Z toho důvodu není vhodná pro aplikace s omezenými energetickými zdroji nebo pro systémy s nízkým samovybíjením.[13]

Své využití našlo spíše u aplikací, které nevyžadují časté nabíjení/vybíjení a zároveň jsou schopny tolerovat dodatečný proud vnikající na balančních rezistorech.[9]

Další pasivní metodou je využití Zenerových diod připojených paralelně k jednotlivým ultrakapacitorům. Tyto diody začínají vést proud ve chvíli, kdy napětí článku překročí stanovenou hodnotu – tzv. prahové napětí. Výhodou tohoto řešení oproti metodě využívající pouze rezistory je, že ke ztrátám dochází až při překročení určitého napětí, čímž se zvyšuje celková účinnost obvodu. Nicméně tato metoda není bez nedostatků – Zenerovy diody vhodné pro nízké napětí okolo 2,5 V nejsou běžně dostupné ve výkonných variantách. Navíc vykazují značné výrobní tolerance z hlediska průrazného napětí a změny parametrů v závislosti na teplotě, což přináší komplikace při jejich užití.[13]

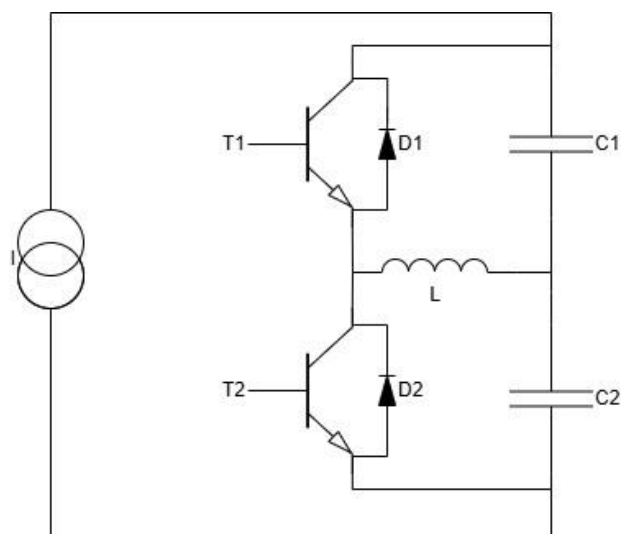


Obrázek 1.5 Pasivní vyvažování pomocí Zenerových diod

1.4.2 Aktivní vyvažování

Základní myšlenka za aktivním vyvažováním spočívá v přenosu energie (pomocí kondenzátorů, transformátorů nebo měničů DC-DC) z článků s vysokým SoC na články s nižším SoC.[12]

Aktivní vyvažovací metody nabízejí relativně vyšší účinnost a rychlost vyvažování. Na druhou stranu obvody jsou složitější a nákladnější, protože často obsahují několik cívek, kondenzátorů, tranzistorů atd. [12] Jak je možné vidět na obrázku zapojení 1.6.



Obrázek 1.6 Aktivní vyvažování s použitím měniče.[11]

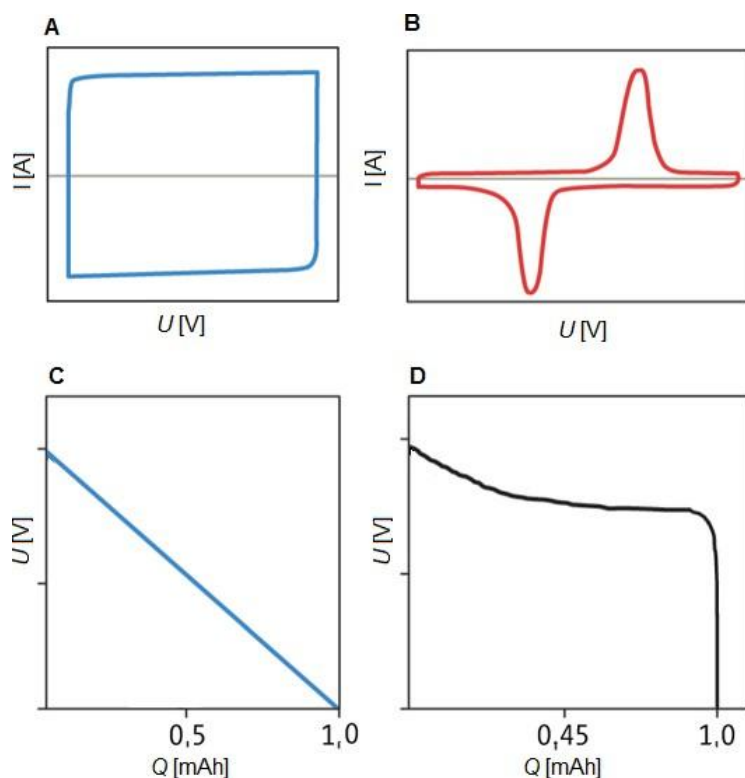
Jeden z osvědčených přístupů využívá spínané odpory řízené elektronickým obvodem. V tomto případě každý kondenzátor má paralelně připojený rezistor, který je aktivován tranzistorovým spínačem. Napětí na kondenzátorech je stále monitorováno, a pokud napětí jednoho z článku překročí definovanou mez (např. 2,5V), spínač se sepne a část nabíjecího proudu je vedena přes paralelní odpor. Tím se omezí další nárůst napětí na článku. Když následně dojde k poklesu napětí pod nastavený práh, spínač se opět vypne. Tato metoda umožňuje dynamickou regulaci při nabíjení/vybíjení, tak jsou jednotlivé články chráněny před přepětím. [13]

V praxi bývá řízení realizováno pomocí jednoduchého komparátoru napětí, který porovnává aktuální napětí s referenční hodnotou, a podle výsledku následně ovládá tranzistor (například MOSFET).[13]

Metoda aktivního balancování se především využívá u aplikací, které disponují vysokou mírou cyklování, protože v ustáleném stavu obvykle odebírá mnohem menší proud a větší proudy vyžaduje pouze tehdy, když napětí na kondenzátoru klesne. Díky tomu u nich nevznikají tak velké ztráty na balančních prvcích. [9]

1.5 Nabíjení/vybíjení

Mezi základními elektrickými charakteristikami lithium-iontových akumulátorů a superkondenzátorů se řadí průběh napětí U , tedy profil vybíjecí křivky, jak je znázorněno na obrázku pod odstavcem. Z obrázku je patrné, že lithium-iontový akumulátor při stálém odběru proudu udržuje napětí konstantní, zatímco u superkondenzátoru se snižuje napětí lineárně. Tento rozdíl má za následek, že zatímco energie v superkondenzátoru je v poslední třetině jeho kapacity téměř zanedbatelná (v tomto bodě je vybíjení již velmi neefektivní), energie v lithium-iontovém akumulátoru zůstává téměř nezměněna až do úplného vyčerpání. [14]



Obrázek 1.7 Vlevo vybíjecí charakteristika superkondenzátoru a vpravo vybíjecí charakteristika lithium-iontové baterie.[14]

Lineární vybíjecí křivka je tedy nevýhodou ve srovnání s Li-ion bateriemi. Pro lepší přehlednost je dobré si uvést příklad. Například baterie, která by se nacházela na 50% nabití a disponovala by jmenovitou hodnotou napětí 2,7 V, bude i nadále schopna dodávat napětí blízké 2,7 V. Naproti tomu superkondenzátor s jmenovitou hodnotou 2,7 V, rovněž nabitý na 50 %, bude schopen vydávat již jen polovinu svého maximálního napětí, tedy přibližně 1,35 V. To znamená, že napětí klesne pod minimální provozní napětí a zařízení napájené superkondenzátorem by muselo být vypnuto dříve, než by bylo možné využít veškerou energii.[15]

Řešením tohoto problému je použití napěťového měniče řízeného pulsně-šířkovou modulací (PWM). Typickými parametry této regulační metody jsou spínací frekvence f nebo spínací perioda $T = 1 / f$ a šířka impulsu z , určená vztahem mezi dobou aktivace spínacího prvku a celkovou periodou spínání $z = tz / T$. V závislosti na směru toku energie je můžeme rozdělit na dva typy: měniče pracující ve snižujícím režimu a měniče pracující v režimu zvyšujícím. [1]

V režimu snižujícím přechází energie z oblasti vyššího napětí na oblast nižšího napětí. Naopak v režimu zvyšujícím je tok energie v obvodu opačný. [1]

Samotná nabíjecí doba superkondenzátoru se pohybuje mezi 1 až 10 sekundami, přičemž proces nabíjení připomíná ten u elektrochemických baterií. Velikost nabíjecího proudu je však výrazně omezena schopností nabíjecího zařízení regulovat tento proud. Je nutné zavést opatření pro omezení prudkého nárůstu proudu při nabíjení zcela vybitého

superkondenzátoru, jelikož by jinak superkondenzátor okamžitě absorboval maximální možný proud ze zdroje.[2]

Superkondenzátory při cyklickém nabíjení a vybíjení disponují prakticky neomezeným počtem cyklů, což je výrazný rozdíl oproti elektrochemickým bateriím, jejichž životnost je omezená počtem pracovních cyklů. Tato zařízení trpí jen minimálním opotřebením, když se používají opakovaně. Navíc superkondenzátory stárnou mnohem méně než tradiční baterie, přičemž jejich kapacita se za deset let za standardních okolností sníží z počátečních 100 % na 80 %. Co se týče samovybíjení, superkondenzátory se vybíjí rychleji než elektrostatické kondenzátory a mírně rychleji než elektrochemické baterie, což je důsledek použití organického elektrolytu. V průběhu 30 až 40 dní dochází k poklesu z plného nabití na 50 %. Naproti tomu olovené akumulátory a lithiové baterie vykazují samovybíjení přibližně na úrovni 5 % za měsíc.[2]

1.6 Aplikace

Superkondenzátory mají v průmyslu velmi široké použití. Je možné se s ním setkat v mnoha odvětvích, které budou následně představeny.

1.6.1 Zálohování

V těchto krátkodobých aplikacích se ultrakapacity používají již mnoho let. Mnoho přístrojů nyní obsahuje digitální komponenty s pamětí, a i velmi krátké přerušení napájení by mohlo způsobit ztrátu uložených informací. Zde tedy mohou superkondenzátory fungovat jako dobrý záložní zdroj díky jejich dlouhé životnosti. Navíc disponují výhodou u těchto aplikací, že nemusí docházet k jejich výměně z důvodu kratší životnosti, jako by docházelo v případě použití baterie.[11]

1.6.2 Spotřební elektronika

Baterie jsou široce používány v přenosných energetických aplikacích, jako jsou telefony a notebooky. Mnoho těchto aplikací požaduje vysoký výkon pulsních proudů, což vede k snížení výkonnosti baterie. Superkondenzátory ve spojení s užíváním baterií jsou mnohem efektivnější alternativou, jelikož dokážou ulevit a pokrýt potřebu od velkých požadavků na zatížení, čímž se také prodlouží životnost baterií.[11] Z hlediska této spotřební elektroniky se dále využívají v kancelářské technice. Například společnost Ricoh Co. používá ultrakapacity ve svých tiskárnách, kde slouží k ukládání energie potřebné pro rychlé zahřátí zařízení, díky tomu se následně minimalizuje čas strávený v energeticky náročném pohotovostním režimu.[16]

1.6.3 Obnovitelné zdroje energie

V aplikacích spojených s užíváním fotovoltaických panelů musí být baterie měněny každých 3-7 let v závislosti na kontinuálním cyklování, což má na ně negativní následek. V případě využití superkondenzátoru by šlo o 20 let, což by snížilo samotné požadavky

na údržbu a výměnu. Superkondenzátory navíc vykazují vyšší účinnost nabíjení než baterie. Vynikají také schopností efektivního provozu v širším rozmezí teplot, což by pro ně nečinilo problém, aby byly použity na místech s chladnými klimatickými podmínkami ve srovnání s bateriemi. Baterie je nutné udržovat na pokojové teplotě pomocí pomocných systémů, což způsobuje další ztráty. Hlavní nevýhodou superkondenzátorů je jejich nízká energetická hustota. To způsobuje nadměrné kapitálové náklady na dosažení uložité velikostně rovnocenného s bateriemi a jsou proto tedy zřídka volenou možností. [11]

1.6.4 Doprava a logistika

Ultrakapacity nacházejí v automobilech uplatnění v několika oblastech díky jejich schopnosti rychlého nabíjení, vybití a poskytování vysokého výkonu. Dají se využívat v mnoha směrech:

Hybridní elektrická vozidla: Ultrakapacity se zvažují jako zdroj energie pro zrychlení, což by umožňovalo použití menších baterií. nebo by mohli být v budoucích letech zcela nahrazeny právě ultrakapacity.[16][3]

Elektrohydraulické systémy: V některých hybridních vozidlech jako je Toyota Prius našli ultrakapacity od firmy Panasonic své využití k napájení elektrohydraulického čerpadla v mechanickém brzdovém systému.[16]

Systém stop – start: Ultrakapacity by mohly být použity i v běžných automobilech, kde spalovací motor vypne při zastavení a okamžitě nastartuje po uvolnění brzdového pedálu. To pomáhá snížit spotřebu paliva a emise. Dokázaly by tak s výkonným startérem zajistit rychlé nastartování motoru. Jedna z kurýrních společností již započala s takovou jejich aplikací. Převážná společnost započala využívání ultrakapacitorů od firmy NessCap ve svých dodávkách z důvodu častých zastávek a rozjezdů ve městech.[16]

Rekupační brzdění: Ultrakapacity mohou sloužit k ukládání energie získané při brzdění (rekuperci), která by se jinak ztrácela v podobě tepla. Tato uložená energie se pak může znovu použít k pohonu vozidla.[16][3]

Vyrovnání zatížení baterie: V hybridních systémech mohou snížit zatížení baterie tím, že přeberou požadavek krátkodobé špičky ve výkonu, což může prodloužit životnost baterie.[16][3]

Katalyzátory: Katalyzátory vypouští neupravené výfukové plyny do doby, než se zahřejí, přičemž by bylo možné katalyzátory rychle přehřát pomocí ultrakapacitorů.[3]

Trakční systémy: Ultrakapacity mohou být využity v elektrických pohonech pro vlaky, tramvaje a autobusy. Stejně jakou u silničních vozidel zde mohou sloužit k rekuperci brzděné energie a poskytování dodatečného výkonu při rozjezdu.

1.6.5 Inteligentní měření

Ultrkapacitory jsou součástí vývoje inteligentních měřících systému. Zjednodušují dálkové odečítání měřidel, jako jsou elektroměry, vodoměry, plynoměry nebo měřiče tepla. Díky svým vlastnostem poskytují potřebné uložení elektrické energie pro bezproblémový sběr a přenos dat. [17]

1.6.6 IoT

Pro IoT mají ultrkapacitory klíčovou roli. Jsou zásadní pro přenos dat na dálku, zajišťují energii pro aktivaci signálu a umožňují vzdálenou správu a ovládání systémů. Zlepšují tak konektivitu a zajišťují efektivní provoz IoT. Díky svým vlastnostem jsou ultrkapacitory nezbytné pro zlepšení efektivity, spolehlivosti a výkonu v mnoha průmyslových odvětvích. S dalším vývojem budou jistě vznikat další inovativní aplikace, které změní budoucnost ukládání energie a řízení napájení.[17]

1.6.7 Jeřábové systémy

Ultrkapacitory hrají klíčovou roli v optimalizaci spotřeby elektrické energie v přístavních jeřábech, kde umožňují snížení špičkového odběru a efektivní využití regenerativní energie. Jejich využití spočívá v propojení s hlavní napájecí soustavou jeřábů přes obousměrný DC/DC měnič, který umožňuje obousměrný tok energie mezi ultrkapacitory a jeřábovým pohonným systémem.[18]

Během operací zvedání a spouštění kontejnerů dochází k výrazným výkyvům v odběru elektrické energie. Když jeřáb zvedá kontejner, jeho pohon vyžaduje značné množství elektrické energie, což vede k vysokým špičkám v odběru elektrické energie. Naopak při spouštění kontejneru vzniká brzdná energie, která by se v běžném systému buď přeměnila na teplo, nebo by se neefektivně vracela do elektrické sítě. Využití ultrkapacitorů řeší tento problém tak, že během brzdění ukládají vzniklou energii, kterou využívají při následném dalším zvedání, čímž dochází ke snížení celkového odběru elektrické energie ze sítě.[18]

Studia prokázala, že díky této metodě dochází ke snížení špičkového potřebného výkonu až o 62 %. Byla provedena analýza v přístavním terminálu Pier E v Long Beach, která ukázala že skupina pěti jeřábů vybavených ultrkapacitory může ušetřit okolo 38 000-53 000\$ v závislosti na snížení požadavku špičkového výkonu. Samotná návratnost na investici do ultrkapacitorů by byla dle článku okolo 3,5 roku. V této aplikaci měl každý jeřáb své vlastní ultrkapacitorové uložení, které bylo sestaveno z 42 modulů Maxwell BMOD0063 P125. Jednalo se o konfiguraci zapojení šesti sériových větví a sedmi paralelních, což vedlo k celkové využitelné kapacitě 45,47F a napětí 750V. Kromě ekonomických výhod přináší ultrkapacitory také technologická zlepšení. Jejich vysoká hustota výkonu a rychlá odezva umožňují okamžité reakce na změny v zatížení jeřábového systému. Dalším přínosem je snížení tepelných ztrát v systému, protože brzdná energie není rozptylována v podobě tepla, ale je efektivně využita.[18]

Celkově tedy nasazení ultrakapacitorů v jeřábech může přinášet značné přínosy z hlediska provozu ekonomiky i ekologie. Díky omezení špičkového odběru, efektivnímu využití rekuperované energie a vyšší účinnosti pohonného systému, dochází nejen k úspoře nákladů, ale i celkovému chodu provozu v přístavní infrastruktuře. Aplikace ultrakapacitorů v tomto odvětví ukazuje ideální strategii pro modernizaci a snížení energetické spotřeby.

1.6.8 UPS

Unikátní projekt byl realizován společností Ško-Energo za spolupráce s dalšími firmami, kdy se podíleli na realizaci zařízení, které má plnit stejnou funkci jako UPS známé z počítačové techniky. Zařízení o výkonu 1MW se nachází v hlavním závodě automobilky Škoda Auto v Mladé Boleslavi. Ultrakapacitor slouží k zálohování elektronických zařízení v lakovně a je schopno vyrovnat i větší poklesy napětí až do jedné sekundy, přičemž na výkyvy je schopné zareagovat do 10ms. Po dobu poklesu zajistí dodávku proudu a poté se automaticky připojí a dobije. Zařízení o tomto výkonu je uloženo v lodním kontejneru, jak je možné vidět na obrázku 1.8. [19]



Obrázek 1.8 Ultrakapacitor o výkonu 1MW nacházející se v závodě Škoda Auto v Mladé Boleslavi.[19]

1.7 Baterie vs Superkondenzátory

Zásadním rozdíl mezi superkondenzátory a bateriemi spočívá v jejich mechanismu akumulace energie. Baterie ukládají energii v chemické formě prostřednictvím elektrochemických reakcí. Pracují na bázi Faradayova zákona elektrolýzy, kdy ionty proudí mezi elektrodami a dochází k přeměně chemické energie na elektrickou. V případě vybíjení je tento proces opačný. Na druhou stranu superkondenzátory akumulují energii elektrostaticky, jak již bylo zmíněno. [20] Mezi superkondenzátory a bateriemi jsou hlavní rozdíly: hustota energie, hustota výkonu, životnost a cena, provozní teplota.

1.7.1 Provozní teplota

Obecně platí, že baterie pracují v omezeném teplotním rozsahu. To zahrnuje negativní vliv nízkých a vysokých teplot. U lithium-iontových baterií se typický rozsah provozních teplot pohybuje od -20 °C do $+40\text{ °C}$. Při nízkých teplotách dochází ke zpomalení chemické reakce a rychlosti přenosu náboje. To způsobuje snížení iontové vodivosti a koeficientu difúze. V případě vystavení baterií vysokým provozním teplotám nebo zatěžování vysokým výkonem/proudovým zatížením mohou vést z důvodu vnitřních výrobních nedokonalostí (např. vady elektrod) k extrémnímu zahřívání a náhlému zvýšení teploty. V takových případech může dojít k tepelnému úniku, což může vyvolat samovznícení, nebo dokonce k výbuchu. Z hlediska bezpečnosti je proto nutné sledování teploty baterií při nabíjení i vybíjení, neboť během procesů dochází k nevyhnutelné tvorbě tepla. Z tohoto důvodu vyžadují baterie dražší a technicky složitější monitorování teploty. Oproti tomu superkondenzátory pracují v širším rozsahu provozních teplot od -40 °C až $+85\text{ °C}$. U superkondenzátorů nedochází k samovolnému urychlení reakcí a ani k tak výraznému zahřívání jako u baterií. To je dána řádově nižším vnitřním odporem a tím, že přenos ukládání elektronů není založen faradaickém procesu. [21]

1.7.2 Cena

Superkondenzátory jsou ve srovnání s bateriemi nákladnou alternativou. Náklady mohou být více než desetkrát vyšší ve srovnání se stejnou kapacitou baterie. [22]

1.7.3 Životnost

Superkondenzátory jsou z hlediska životnosti výrazně odolnější než baterie. Zatímco běžné baterie, které se najdou v telefonech, noteboocích a elektrických autech, se začnou opotřebovávat po několika stovkách nabíjecích cyklů. Superkondenzátory lze nabíjet a vybíjet až milionkrát bez jakékoli degradace.[23] Cyklické namáhání baterií vede k praskání materiálu elektrody a rozkladu rozpouštědla i solné složky elektrolytu, což postupně znemožňuje reverzibilní elektrochemické reakce. U lithium-iontových baterií se navíc vytváří na povrchu elektrod pasivační vrstva nazývaná interfáze pevného

elektrolytu (SEI). Tato vrstva umožňuje průchod elektronů a zabraňuje rozkladu elektrolytu, ale zároveň spotřebovává aktivní lithiium a materiály elektrolytu. To zase způsobuje snížení kapacity a hustoty výkonu. Superkondenzátory oproti tomu netrpí těmito fázovými změnami, ani chemickým rozkladem během cyklů.[21]

1.7.4 Hustota energie a hustota výkonu

Jedním z primárních rozdílů je hustota energie a hustota výkonu. Hustota energie označuje množství energie uložené na jednotku hmotnosti nebo objemu, zatímco hustota výkonu udává, jak rychle lze energii dodat. Baterie disponují vyšší hustotou energie než superkondenzátory, a jsou proto vhodnější pro aplikace vyžadující dlouhodobé napájení. Superkondenzátory naopak vynikají vysokou hustotou výkonu, což z nich dělá ideální řešení pro aplikace, které vyžadují rychlé energetické impulzy.[20]

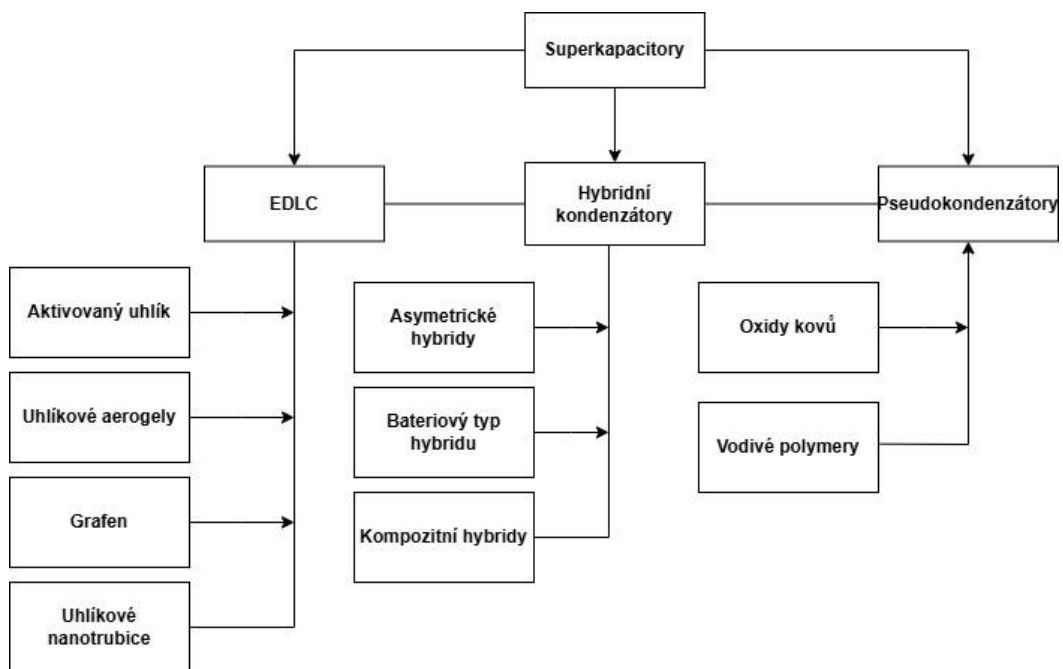
Pro detailnější přehlednost je zde v tabulce 1.1 uvedené praktické srovnání parametrů superkondenzátoru s lithiium-ion bateriemi.

Tabulka 1.1 Srovnání parametrů superkondenzátorů s lithiium-ion bateriemi.[24]

Typ	Superkondenzátor (EDLC)	Lithium-ion
Doba nabití	1-10 s	10-60 min
Počet cyklů [-]	1 000 000	500 a více
Jmenovité napětí [V]	2,3-2,75V	3,6 nominálně
Hustota energie [Wh/kg]	5	120-240
Specifický výkon [W/kg]	10 000 a více	1000-3000
Životnost	10 až 15 let	5 až 10 let
Nabíjecí teplota [°C]	-40 až +65	0 až +45
Vybíjecí teplota [°C]	-40 až +65	-20 až +60
Samovybíjení (30 dní)	velké (5-40 %)	5 % a méně
Cena za kWh [\$]	10 000	250–1000 (velký systém)

1.8 Typy ultrakapacitorů

Superkondenzátory je možné klasifikovat v závislosti na principu ukládání náboje do tří skupin. Nejrozšířenějšími dvěma skupinami jsou elektrické dvouvrstvé kondenzátory (EDLC) a pseudokondenzátory. Třetí a poslední skupinou jsou superkondenzátory hybridní. Dále se rozdělují v závislosti na použitém elektrodovém materiálu viz. obrázek 1.9.



Obrázek 1.9 Typy ultrakapacitorů[25]

1.8.1 EDLC

EDLC pracuje na bázi elektrické dvojvrstvy, popsané více v kapitole 1.2. Jde čistě o elektrostatický princip ukládání energie. Nejedná se tedy o žádný faradayovský proces, což znamená, že nedochází přesunu náboje mezi elektrodou a elektrolytem. Tento proces tedy nevyužívá chemického mechanismu. V důsledku toho je vysoce reverzibilní a disponuje vysokou cyklickou stabilitou.[26][27] Ukázka jednoho článku EDLC (viz. obr. 1.1).



Obrázek 1.10 Typ ultrakapacitoru EDLC 3400 F, 2,85V [28]

Nejčastěji používanými materiály elektrod jsou aktivované uhlíky díky specifické ploše a střední nákladovosti. Dále se velmi hojně využívají další formy uhlíku, jako jsou: uhlíkové nanotrubičky, uhlíkové aerogely, uhlíkové tkaniny nebo grafen.[26] Tyto uhlíkové nanomateriály jsou speciální struktury pro EDLC. Díky těmto unikátním materiálům mají EDLC obrovskou specifickou povrchovou plochu, dobrou elektrickou

vodivost, vynikající mechanickou a chemickou stabilitu. S ohledem na jejich vlastnosti jsou vhodné pro aplikace vyžadující vysoký výkon a vysoké přechodné zatížení. [27]

Napětí EDLC se pohybuje v rozmezí od 1,3V do 1,8V pro vodné elektrolyty a od 2,3V do 3 V pro organické elektrolyty. Energetická hustota těchto kondenzátorů se pohybuje mezi 5 až 8 Wh/kg.[29]

1.8.2 Pseudokondenzátory

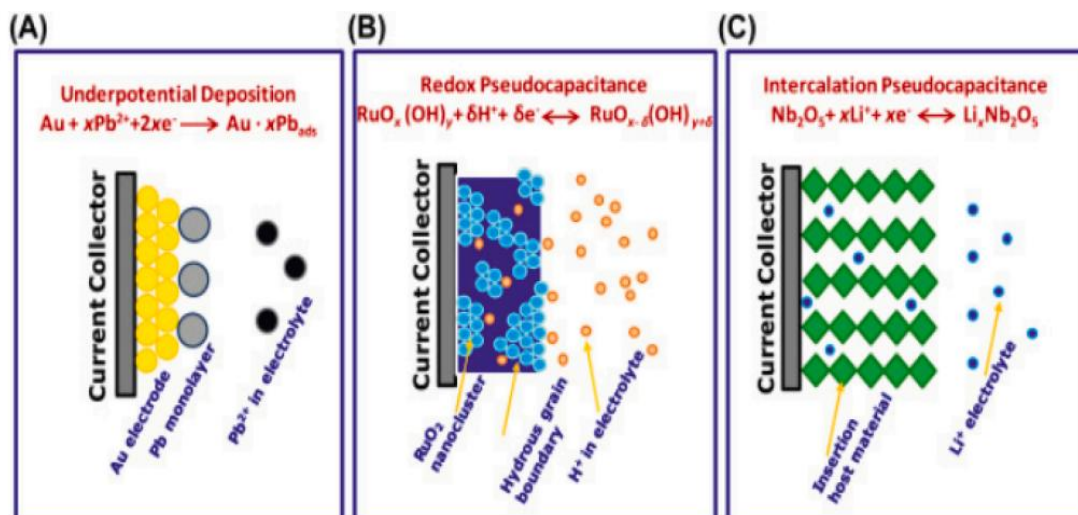
Pseudokondenzátor je typ superkondenzátoru, který se svou funkcí nachází mezi baterií a klasickým kondenzátorem s dvojitou elektrickou vrstvou. Z toho vychází i označení pseudo, jelikož mechanismus ukládání energie vychází z baterií, zatímco provozní chování je bližší klasickým kondenzátorům. Stejně jako jiné superkondenzátory disponuje dvěma elektrodami oddělenými elektrolytem. Ukládání náboje probíhá nejen díky elektrostatickému jevu na rozhraní elektroda – elektrolyt, jako u EDLC, ale také probíhá prostřednictvím oxidačně – redukčních (redoxních) reakcí na povrchu elektrod. Tyto reakce jsou obdobou chemických procesů, které probíhají právě v bateriích.[3]

Pseudokondenzátory využívají obdobně jako konvenční baterie faradayovské reakce, přičemž jejich kapacita je výsledkem elektrochemického přenosu náboje. Tento přenos náboje probíhá prostřednictvím oxidačně – redukčních reakcí. Ačkoliv přenos náboje je podobný bateriovému mechanismu, pseudokondenzátory disponují vyšší rychlostí přenosu náboje. To je zapříčiněno použitím tenkých vrstev redoxně aktivního materiálu na elektrodách a nižšímu průniku iontů z elektrolytu do struktury elektrody. Díky kombinaci několika mechanismů, které působí na ukládání náboje dosahují pseudokondenzátory vyšší kapacity než klasické EDLC. [26]

Na rozdíl od baterií ionty pouze přilnou bez jakýchkoliv trvalých chemických změn k atomové struktuře elektrody. To umožňuje rychlé nabíjení a vybíjení, a zároveň zvyšuje životnost, často dosahující až několik tisíc cyklů. [3]

Mezi klíčové procesy, které se podílejí na vzniku pseudokapacitance, patří depozice pod potenciálem (underpotential deposition), redoxní pseudokapacita, a interkalační pseudokapacita. Tyto tři základní typy chemických mechanismů jsou znázorněny na obrázku 1.11. [26]

Schopnost elektrod vytvářet pseudokapacitanci silně závisí také na chemické afinitě elektrodových materiálů. Vhodným materiálem z hlediska vlastností se ukázaly různé oxidy kovů, které svým chováním vykazují vysokou specifickou kapacitu. Dalším velmi používaným materiálem jsou vodivé polymery. Vodivé polymery disponují vysokou vodivostí, což vede k nízkému ESR a relativně vysoké kapacitě. Mezi takové vodivé polymery patří například: polyanilin, polythiofen, polypyrol a polyacetylen. Nevýhodou je, že elektrody z vodivých polymerů trpí omezenou cyklickou stabilitou a nižší hustotou výkonu.[26]Důvody těchto nevýhod spočívají v nevrátlosti a dynamice zúčastněných elektrochemických reakcí. Nevrátlosti způsobují rychlejší stárnutí elektrody, zatímco dynamika reakcí omezuje její výkonové schopnosti.[27]



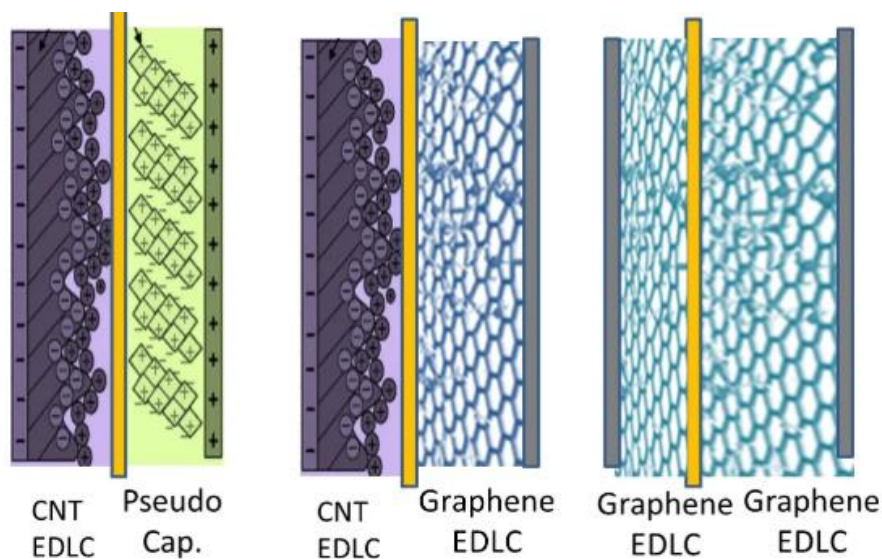
Obrázek 1.11 a) depozice pod potenciálem, b) redoxní pseudokapacita, c) interkalační pseudokapacita.[27]

Napěťové rozmezí těchto zařízení se zpravidla pohybuje mezi 3,2 až 4 V dle použitého materiálu a elektrolytu. Energetická hustota se pohybuje mezi 10 až 15 Wh/kg, přičemž v některých případech může dosáhnout až 20 Wh/kg. [29]

1.8.3 Hybridní kondenzátory

Hybridní superkondenzátory kombinují výhody EDLC a pseudokapacitorů, čímž se snaží minimalizovat jejich nevýhody a dosáhnout lepších výkonových parametrů. Využívají jak faradaických, tak nefaradaických procesů pro ukládání náboje. Hybridní kondenzátory dosahují vyšší hustoty energie a výkonu než EDLC, aniž by obětovaly cyklickou stabilitu, která omezuje pseudokondenzátory. Hybridní kondenzátory lze dále rozdělit do tří základních kategorií v závislosti na typu použitých elektrod: asymetrické, superkondenzátory bateriového typu a kompozitní hybridy.[3][26][27]

Asymetrické hybridy se skládají z dvou odlišných elektrod. Kombinují elektrody typu EDLC s pseudokapacitní elektrodou, a proto pracují jak na faradaickém, tak i nefaradaickém principu. Tato zařízení využívají odlišné mechanismy ukládání energie na jednotlivých elektrodách a snaží se tak skloubit jejich výhody. Ve většině případů se na zápornou elektrodu používá uhlíkový materiál, zatímco na kladnou elektrodu vodivé polymery nebo oxidy kovů. Díky této kombinaci dosahují asymetrické kondenzátory vyšších hustot energie a výkonu v porovnání s EDLC. Navíc vykazují lepší cyklickou stabilitu než srovnatelné pseudokapacitory.[26][30]V některých případech mohou být obě elektrody z uhlíkového materiálu, ale v různých formách. Na obrázku je například zobrazena kombinace elektrody tvořené uhlíkovými nanotrubicemi (CNT) a druhé z grafenu. Elektrody mohou být případně i ze stejného materiálu, ale s odlišnou strukturou a tloušťkou – viz obrázek 1.12, jedná se o případ situovaný vpravo.



Obrázek 1.12 Asymetrický kondenzátor [29]

Superkondenzátory bateriového typu rovněž využívají dvě rozdílné elektrody. Jsou specifické tím, že kombinují elektrodu běžně používanou v superkondenzátorech s elektrodou z bateriové technologie. [26] U těchto typů se používá rozdílné složení elektrod – záporná elektroda je z grafitu dopovaného lithnými ionty, zatímco kladná elektroda obsahuje běžný grafit. Tato struktura dosahuje vyšší energetické hustoty než klasické EDLC. [30] Zároveň si zachovává schopnost rychlého nabíjení a delší životnosti, která je pro ultrakapacitory typická ve srovnání s běžnými bateriemi. Vykazují se hodnoty typicky 30–80 Wh/kg, v některých případech i více než 100 Wh/kg. Napětí článků se pohybuje mezi 3,2 V a 4,2 V. [29]

Kompozitní hybridy pak představují třetí variantu – zde se využívají směsné materiály na obou elektrodách, přičemž materiály mohou vykazovat jak EDLC, tak pseudokapacitní vlastnosti. Uhlík zajišťuje průchod nosičů náboje, zatímco oxid kovu ukládá náboj. Samotná kapacita a vodivost velmi závisí na struktuře kompozitních materiálů. [30]

1.9 Elektrodové materiály

Materiály používané pro výrobu elektrod představují klíčový prvek těchto zařízení, jelikož přímo ovlivňují jejich elektrické vlastnosti, kapacitu, účinnost a životnost. Z toho důvodu jsou tyto materiály předmětem neustálého výzkumu. Zde budou představeny tři hlavní skupiny: uhlíkové materiály (aktivní uhlík, grafen, uhlíkové nanotrubičky, aerogely), vodivé polymery a oxidy kovů. Každá těchto skupin nabízí specifické výhody.

1.9.1 Aktivovaný uhlík

Nejběžnějším materiálem pro elektrody je aktivovaný uhlík, který je oblíbený díky své velké povrchové ploše, dobrým elektrickým vlastnostem a přiměřené ceně. Tento

materiál se vyrábí fyzikální nebo chemickou aktivací z různých uhlíkatých materiálů (např. dřevo, uhlí). Fyzikální aktivace probíhá při vysokých teplotách (700-1200 °C) za přítomnosti oxidačních plynů, jako je vodní pára nebo oxid uhličitý. Na rozdíl od toho chemická aktivace probíhá při nižších teplotách (400-700 °C) za přítomnosti chemických aktivátorů, jakou jsou různé druhy hydroxidů (zinečnatý, fosforečný, draselný). Díky svým fyzikálně-chemickým vlastnostem dosahuje aktivovaný uhlík specifické povrchové plochy až 3000 m²/g. Pomocí aktivace se navíc dosáhne široké distribuce velikostí pórů, která zahrnuje mikropóry, mezopóry a makropóry. [25]

1.9.2 Uhlíkové aerogely

Jedná se o vysoce pórovité materiály, které se získávají pyrolýzou organických aerogelů. Typicky se vyrábějí polykondenzací resorcinu a formaldehydu pomocí sol-gel procesu a následnou pyrolýzou. Úpravou podmínek sol-gel syntézy lze ovlivnit makroskopické vlastnosti aerogelů, jako je hustota, velikost a tvar pórů. Po následné pyrolýze vykazují uhlíkové aerogely vyšší elektrickou vodivost než většina aktivovaných uhlíků. Mají obvykle nejvyšší porozitu, vysokou plošnou hustotu (400-1000 m²/g), uniformní velikost pórů (většinou mezi 2 a 50nm) a vysokou hustotu.[31]

Sol-gel proces umožňuje výrobu různých forem uhlíkových aerogelů, jako jsou monolity, kompozity, filmy a prášky, které mohou být poté použity pro výrobu elektrod. Elektrochemické studie na uhlíkových aerogelech ukázaly, že výsledná kapacita závisí spíše na podílu mezopórové specifické povrchové plochy než na celkové specifické povrchové ploše materiálu.[31]

1.9.3 Grafen

Grafen se ukazuje jako výjimečný materiál pro elektrody superkondenzátorů díky své vysoké elektrické vodivosti, velké povrchové ploše a chemické stabilitě. Grafen poskytuje specifickou povrchovou plochu až 2630 m²/g a může dosahovat kapacit až 550 F/g. Výhodou použití grafenu je také dobrá přístupnost elektrolytu k povrchu elektrody. V současné době se zkoumají různé metody přípravy různých typů grafenu, jako je chemická depozice z plynné fáze, metoda obloukového výboje, chemická exfoliace, interkalace grafitu a další elektrochemické a chemické metody. [25]

Pro aplikace vyžadující vysoký výkon, jako jsou elektrická vozidla, byly testovány proudové hustoty až 7,5 A/g, což umožnilo dosáhnout energetické hustoty 58,25 Wh/kg a výkonové hustoty 13,12 kW/kg. Výzkum dále ukázal, že nízkoteplotní exfoliace může poskytnout grafen s lepšími vlastnostmi pro ukládání energie, což naznačuje jeho možný potenciál v překonání tradičních uhlíkových materiálů.[25]

1.9.4 Uhlíkové nanotrubic

Elektrody z uhlíkatých nanotrubic byly vyvinuty díky jejich unikátním vlastnostem, jako jsou vysoká povrchová plocha, specifická vnitřní síť mezipórů, vynikající elektrická

vodivost, nízká objemová hustota, tepelná a chemická stabilita. Elektrody vykazují nižší odpor a vyšší výkon než elektrody z aktivovaného uhlíku, a to zejména díky snadnější a rychlejší difuzi iontů elektrolytu.[32]

Nanotrubice je možné používat také ve formě kompozitu v kombinaci s jinými materiály, jako je grafen, kovové oxidy nebo polymery. Kompozitní elektrody grafen/nanotrubice vykazují výborné elektrochemické vlastnosti s vysokou specifickou kapacitou a výkonem. Tento typ kompozitu navíc vytváří téměř ideální obdélníkovou tvar voltametrické křivky, což způsobuje dokonalé rozptýlení náboje na elektrodách.[32]

Obecně je možné uhlíkové nanotrubice rozdělit do dvou skupin na jednovrstvé a vícevrstvé nanotrubice. Uhlíkové nanotrubice se vyrábějí nejčastěji katalytickým rozkladem uhlovodíků.[32] Přestože dosahují vysokých hodnot elektrické vodivosti, jejich kapacita bývá pouze v rozmezí 20 až 80 F/g. [33]

1.9.5 Vodivé polymery

Vodivé polymery jsou považovány za perspektivní materiály pro pseudokondenzátory. Mezi hlavní vodivé polymery, které byly použity jako materiály elektrod, patří: polyanilin, polypyrrol, polythiofen. Tyto polymery jsou považovány za hlavní kandidáty, protože přichází s jedinečnými vlastnostmi, jako je dobrá elektrická vodivost, nízké náklady, flexibilita a snadná výroba. [34]

Polyanilin má předpoklady k dosažení nejlepších výsledků díky svým vlastnostem, jako je velká specifická kapacita, snadnost syntézy, flexibilita, nízké náklady a schopnosti dosáhnout vysokého stupně dopování. Mezi nevýhody patří jeho tendence k rychlé degradaci v důsledku opakovaného cyklování (nabíjení/vybíjení). Pro dosažení pozitivnějších výsledků bývá často kombinován s dalšími materiály, jako jsou uhlíkové materiály nebo oxidy kovů. Ačkoliv bylo provedeno dostatečné množství základního výzkumu a dosaženo kapacit o hodnotách 554 F/g a 606 F/g, tak stále nebyl využit jeho plný potenciál. Neustále převládá špatná cyklická stabilita a rychlá degradace, což způsobuje nutnost zavádění modifikací kompozitu s uhlíkovými materiály a oxidy kovů.[34]

Polypyrrol je dalším typem vodivého polymeru, který má mnoho výhod, jako je vysoký stupeň flexibility, snadný výrobní proces a relativně vysoká kapacita. Vykazuje také vysokou kapacitu na jednotku objemu. Mezi jeho nevýhody patří obtížnější proces dopování a relativně nízká specifická kapacita vztážená na hmotnost. V závislosti na použité povrchových úpravě bylo dosaženo hodnot specifické kapacity 261 F/g až 343 F/g.[34]

Polythiofen byl také použit jako elektrodový materiál v zařízení pro ukládání energie. Mezi jeho výhody patří dobrá flexibilita, slušná cyklická stabilita, jednoduchá syntéza a šetrnost k životnímu prostředí. Potýká se však také s negativními vlastnostmi, jako je nízká vodivost a nízká specifická kapacita. Různé průzkumy ukázaly výsledky dosažených maximálních kapacit v rozmezí od 252 F/g do 300 F/g.[34]

1.9.6 Oxidy kovů

Oxidy kovů přináší díky probíhajícím výzkumům dobré výsledky. Oxidy kovů disponují vyšší specifickou kapacitou, nízkým odporem, lepší chemickou stabilitou ve srovnání s vodivými polymery. Ve srovnání s uhlíkovými materiály navíc dosahují vyšší energetické hustoty. Mezi nejčastěji používané oxidy patří oxid nikelnatý (NiO), oxid manganičitý (MnO₂), oxid rutheničitý (RuO₂), oxid iridičitý (IrO₂), ZnO a další.[34]

Oxid Nikelnatý patří mezi vhodné elektrodové materiály díky své ekologické šetrnosti, snadné výrobě a nízkým nákladům. Pomocí elektrochemické syntézy může být hydroxid nikelnatý přeměněn na oxid nikelnatý. Touto metodou bylo dosaženo mimořádně vysoké specifické kapacity 1478 F/g.[25]

Oxid rutheničitý patří k nejvíce zkoumanému oxidu díky svým jedinečným vlastnostem. Mezi tyto jedinečné vlastnosti patří chemická stabilita, tepelná stabilita a samotné elektrochemické vlastnosti. Dále se vyznačuje dlouhou životností, vysokou vodivostí, vysokou specifickou kapacitou, širokým potenciálovým oknem a výjimečně vysokou měrnou kapacitou a velmi dobrými elektrochemickými redukčně-oxidačními vlastnostmi. Jeho hlavní nevýhodou je vysoká cena a toxicita. [34][25] v různých studiích byly zaznamenány hodnoty specifické kapacity v rozmezí od 546 F/g až po 1180 F/g, přičemž rozdíly vyplývaly zejména z odlišných metod výroby. [34]

Oxid manganičitý je dalším vhodným materiálem, který může být využit na výrobu elektrod. Mezi jeho výhody se řadí nízká cena, vysoká kapacita a šetrnost k životnímu prostředí. Jeho hlavní nevýhodou je nízká vodivost, která omezuje rychlost nabíjení/vybíjení, a tedy omezuje jeho využití v aplikacích s požadavky na vysoký výkon. Při tvorbě hybridních struktur v kombinaci nanoporézního zlata a nanokrystalického MnO₂ bylo dosaženo zvýšené vodivosti a specifické hodnoty kapacity 1145 F/g. Hybridní struktury tak činí velmi slibné materiály, které kombinují vysokou hustotu ukládané energie s možností dodávky vysokého výkonu. [3]

2. MOŽNOSTÍ MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ ULTRAKAPACITORŮ

Ultracapacity jsou zařízení určená ke skladování energie. U takovýchto zařízení je nutné se zabývat několika specifickými parametry. Mezi klíčové parametry je možné zařadit: kapacitu, vnitřní odpor, samovybíjení, uloženou energii, dodávaný výkon, životnost a cyklickou stabilitu. Z hlediska sledování degradace a celkového stavu ultracapacitoru jsou nejdůležitějšími ukazateli kapacita a vnitřní odpor. Aby bylo možné tyto parametry vyhodnotit, je nezbytné si představit metody, které umožňují jejich experimentální stanovení.

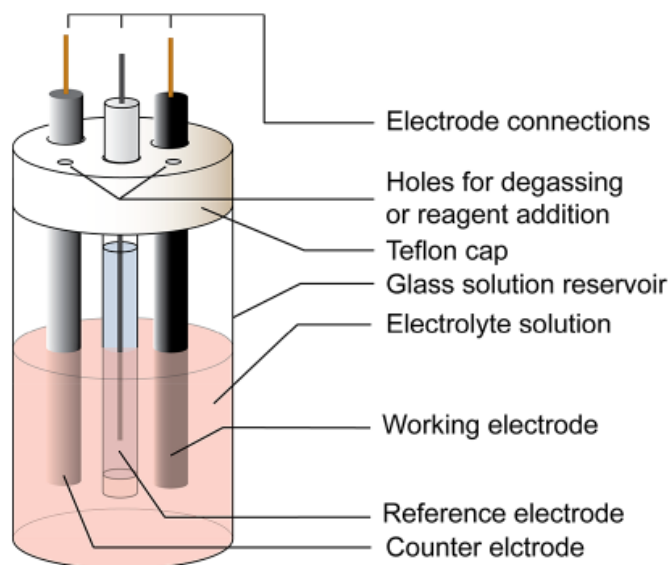
2.1 Cyklická voltametrie (CV)

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších všestranných elektrochemických technik. Je to užitečná metoda pro měření proudové odezvy redoxně aktivního roztoku a zaznamenávání této odezvy proudu v závislosti na změnách potenciálu. CV je charakteristická metoda elektrochemické analýzy. Jde o kombinaci principů potenciometrické a voltametrické metody. Potenciometrie je metoda měření elektrického potenciálu elektrochemického článku za statických podmínek (tj. bez průtoku proudu), zatímco voltametrie umožňuje měření proudu při řízené změně potenciálu mezi dvěma elektrodami.[36]

Je to užitečná metoda, pokud je nutné rychle získat informace o termodynamice redoxních procesů, energetických hladinách analytu nebo kinetice reakcí elektrického přenosu.[35] Kromě toho lze pomocí CV sledovat reverzibilitu elektrodových dějů, počet přenesených elektronů i případné následné chemické reakce vyvolané přenosem elektronu.[37]

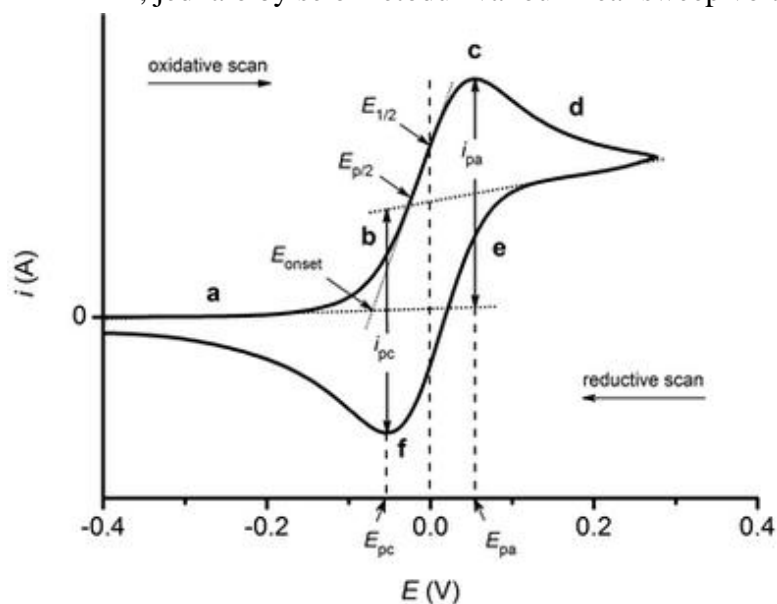
Měření se provádí v různých rychlostí snímání potenciálu (v jednotkách mV/s) za konstantní proudové hustoty. Derivací náboje Q vzhledem k potenciálu V je možné stanovit diferenční kapacitu C , která poskytuje relevantní informace o procesu.[36]

Cyklická voltametrie používá tříelektrodový systém (viz obrázek.2.1) složený z pracovní elektrody (WE), referenční elektrody (RE) a pomocné elektrody – někdy také označované jako proti-elektroda (CE).[36]



Obrázek 2.1 Třielektrodotový systém používaný v cyklické voltametii [38]

Pro provedení cyklické voltametrie je třeba nejprve začít přidáním elektrolytického roztoku do elektrochemického článku spolu s referenčním roztokem a třemi elektrodami. Poté se pomocí potenciostatu lineárně mění potenciál mezi pracovní a referenční elektrodou. Jakmile potenciostat dosáhne předem nastavené hranice, začne se skenovat zpět opačným směrem. Během tohoto cyklu chemická látka buď ztrácí elektron (oxidace), nebo jej přijímá (redukce). Potenciostat tento proces typicky několikrát opakuje, přičemž při tom zaznamenává změny proudu mezi pracovní a protielektrodou. Výsledkem je charakteristický graf ve tvaru siluety kachny („duck shape“), známý jako cyklický voltammogram (viz. obrázek 2.2).[35] Pokud by docházelo k lineární změně E v čase pouze jedním směrem, jednalo by se o metodu zvanou linear sweep voltametii. [37]



Obrázek 2.2 Průběh cyklické voltametrie [35]

Popis koncentrace redoxních dějů, které se odehrávají na povrchu elektrody, lze vyjádřit pomocí Nernstovy rovnice.:

$$E_T = E^0 \cdot \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{C_{\text{red}}}{C_{\text{ox}}} \quad (2.1)$$

, kde E_T je reverzibilní potenciál článku při teplotě T , E^0 je reverzibilní napětí článku ve standardním stavu, F je Faradayova konstanta, R je plynová konstanta, C_{red} , C_{ox} jsou koncentrace redukované a oxidační formy analytu.[36]

Špičkový proud reverzibilní redoxní reakce je možné popsat Randlesovou – Ševčíkovou rovnicí. Samotná rovnice určuje vztah mezi koncentrací a špičkovým proudem. Tento vztah je dán rovnicí:

$$i_p = 2,69 \cdot 10^5 \cdot A \cdot C_0 \cdot n^{\frac{3}{2}} \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot v^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

kde i_p je špičkový proud (A), A je plocha elektrody (cm^2), D je difúzní koeficient (cm^2/s), C_0 je koncentrace látky ($\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$), v je rychlost skenování (V/s), n je počet elektronů. [36]

Je možné vyhodnotit specifickou kapacitu C_s , hustotu energie a hustotu výkonu vyrobených elektrod pomocí dat z CV křivky. Specifická kapacita (C , Fg^{-1}) vyrobených elektrod se vypočítá pomocí rovnice:

$$C_s = \int_{v^-}^{v^+} \frac{I dV}{m \cdot v \cdot (v^+ - v^-)} \quad (2.3)$$

kde: $\int_{v^-}^{v^+} I dV$ je plocha pod křivkou CV, $(v^+ - v^-)$ je šířka potenciálového okna, m je hmotnost aktivního materiálu na elektrodě (g), v je rychlost skenování (V/s). Zjednodušeně lze rovnici přepsat jako:

$$C_s = \frac{1}{2 \cdot m \cdot v \cdot \Delta V} \int_{V_0}^V I(V) dV \quad (2.4)$$

kde ΔV je rozsah potenciálového okna a $\int_{V_0}^V I(V) dV$ je plocha pod křivkou. [36]

Cyklická voltametrie nachází široké využití v oblasti přeměny a ukládání energie, zejména u lithiových baterií, superkondenzátorů, palivových článků a klasických kondenzátorů. Velký význam má v mnoha dalších oborech, jako je fotonika, biologie, neurověda, výzkumy zabývající se zkoumáním materiálů a v elektrotechnice. [36]

2.2 Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS)

Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS) je velmi komplexní metoda v elektroanalytické chemii. Jde o vysoce citlivou experimentální techniku. Pomocí této metody je možné zkoumat fyzikální a chemické vlastnosti zkoumaného objektu. Základ

této metody spočívá ve stanovení impedance, která poskytuje hlavní odezvu.

2.2.1 Teoretická základ impedance

Zjednodušeně by se dalo říct, že impedance charakterizuje vztah mezi proudem a napětím ve střídavých elektrických obvodech. Střídavé veličiny se vyznačují sinusovým průběhem a definovanou frekvencí. V elektrickém obvodu, který neobsahuje kapacitní ani induktivní prvky, by průběhy napětí a proudu měly mít stejný průběh a fázi. Přítomnost cívek a kondenzátorů však způsobuje fázový posun. Tento fázový posun představuje úhel, který vyjadřuje zpoždění mezi dvěma vlnami o stejné frekvenci. Základní vztah popisující danou veličinu je možné popsat:

$$Z = \frac{U}{I} \quad (2.5)$$

Proud I v rovnici (2.5) symbolizuje okamžitou hodnotu proudu:

$$I = I_0 \cdot \sin(\omega t + \phi_1) \quad (2.6)$$

Napětí U v rovnici (2.5) značí okamžitou hodnotu napětí, kterou lze vyjádřit rovnicí:

$$U = U_0 \cdot \sin(\omega t + \phi_2) \quad (2.7)$$

Hodnota impedance se udává komplexním číslem. Hodnota R (rezistence) symbolizuje reálnou složku a hodnota X složku imaginární. Samotná imaginární složka se také nazývá reaktance.

$$Z = R + jX \quad (2.8)$$

Absolutní hodnotu impedance (modul impedance) se určí z rovnice:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.9)$$

Fázový úhel (posun) mezi napětí a proudem se poté získá:

$$\phi = \arctg \frac{X}{R} \quad (2.10)$$

[39]

V případě že se v obvodu nachází čistě jen rezistor pak impedance je rovna reálné složce, jelikož rezistor nereaguje na změnu frekvence, takže zde nedochází k žádnému fázovému posuvu.[39]

Pokud se uvažuje hodnota impedance v případě ideální cívky, tak zde je tato hodnota rovna čistě jen imaginární složce, zároveň je nutné brát v úvahu závislost na frekvenci. Zde tedy dochází ke vzniku fázového posunu v rámci 90° , kdy se proud o daný fázový úhel zpožďuje za napětím. [39]

U ideálního kondenzátoru je tomu obdobně jako u cívky, také se bere v úvahu jen imaginární složka a závislost na frekvenci, akorát se liší velikostí fázového posunu. Zde

nabývá hodnoty -90° . V takovém případě tedy proud předbíhá napětí o 90° . [39] Detailnější popis vztahů komponent je možné vidět v tabulce 2.1.

2.2.2 Princip metody EIS

Technika EIS spočívá v přivedení malého stimulačního signálu (napětového nebo proudového), obvykle superponovaného na DC signál, do zkoumaného elektrochemického systému a následném měření výsledné odezvy (odpovídajícího proudu nebo napětí) v širokém rozsahu frekvencí. [40]

Během experimentu EIS aplikuje potenciostat na elektrochemický systém sinusový napětový (nebo proudový) signál, přičemž zaznamená a analyzuje výsledný proudový (nebo napětový) signál je zaznamenán a analyzován. Kompletní EIS experiment se skládá ze sekvence sinusových signálů. Amplituda každého sinusového signálu zůstává konstantní, ale frekvence vstupního signálu se mění. Pro každé vstupní napětí se poté měří odpovídající výstupní proud při dané frekvenci. Měření probíhá v širokém rozsahu frekvencí od několika MHz až po $10\mu\text{Hz}$. [41] [42]

Je velmi důležité, aby měření byla prováděna pomocí malého stimulačního signálu, který zajišťuje lineární vztah mezi přivedeným signálem a odezvou. Z každé naměřené odezvy je možné určit komplexní impedanci, přičemž dohromady pak utvoří impedanční spektrum, což je výsledkem měření. Většina dnes používaných analyzátorů dokáže během měření impedance zobrazit tzv. Lissajousovy obrazce v reálném čase. Tyto obrazce vznikají přivedením střídavého napětí na osu x a střídavého proudu na osu y v čase. V závislosti na velikosti přivedeného signálu a na fázovém posuvu mezi napětím a proudem vzniká typický oválný diagram. Vzhledem na velikost fázového rozdílu od 0° do 90° se diagram zobrazuje jako úhlopříčka nebo jako ovál. [41][43]

Obecně metoda EIS využívá tříelektrodový režim, který se skládá z pracovní elektrody (tvořené materiál vzorku), protielektrody (obvykle z grafitu nebo platiny) a referenční elektrody. I když se geometrie elektrod může lišit, obecné experimentální nastavení zůstává podobné postupu popsaném níže. [40]

Zpočátku se provede montáž tří elektrod do elektrodového držáku, kde se upevní. Následně se připraví elektrolytický roztok a přenese se do nádoby na vzorky. Nádoba na vzorek by proto měla být vyrobena z izolačního materiálu, jako je sklo nebo plast, který nebude rušit přenos elektronů během zkoušky. V poslední řadě se umístí držák na elektrody do nádoby na vzorek, tak aby část elektrody byla ponořena do roztoku. [40]

K připojení tří elektrod k analyzátoru frekvenční odezvy EIS se běžně používá čtyřvodičové zapojení. Pracovní vodič a vodič proti-elektrodě a slouží k přenosu proudu, zatímco pracovní snímací vodič a referenční vodič slouží ke snímání napětí. Pracovní vodič spolu s pracovním snímacím vodičem propojují odkrytý konec pracovní elektrody s analyzátozem. Referenční vodič je připojen k referenční elektrodě a třetí vodič je připojen k protielektrodě. Čtvrtý vodič se často používá k uzemnění systému během testování. Po připojení všech vodičů je systém EIS připraven k provedení zkoušky. [40]

Tato metoda se používá spíše v případě, kdy je cílem vyhodnotit vlastnosti konkrétního materiálu elektrody nebo elektrolytu. V případě že je potřebné analyzovat celý ultrakapacitor, postačuje často pouze dvouelektrodové uspořádání a příslušný analyzátor.

2.2.3 Způsob zobrazení dat

Velikost impedance je možné získat vydělením vstupního napětí měřeným proudem, nebo naopak, dělením měřeného napětí vstupním proudem. Jak již bylo zmíněno, impedance se skládá z imaginární a reálné složky. Na základě toho je možné získat fázový posun θ nebo absolutní hodnotu impedance. Pomocí těchto složek lze následně vytvořit různá grafická zobrazení, mezi nejčastěji používané patří tzv. Bodeův graf a Nyquistův graf.

Pokud je na graf vynesena velikost impedance $|Z|$ a fázový úhel θ jako funkce frekvence, tak se získá Bodeův graf. Frekvence je přitom vynášena v logaritmickém měřítku.[41]

Pro grafické zobrazení Nyquistova diagramu je nutné vynést na osu x reálnou složku impedance oproti imaginární složce, která se vynese na osu y. [41]

Existují i další způsoby, jak vyjádřit data EIS, například pomocí polárních souřadnic, kde je modul impedance $|Z|$ vynesena jako vektor vycházející z počátku soustavy souřadnic pod úhlem, který odpovídá fázového posunu. [41]

2.2.4 Elektrické ekvivalentní modely

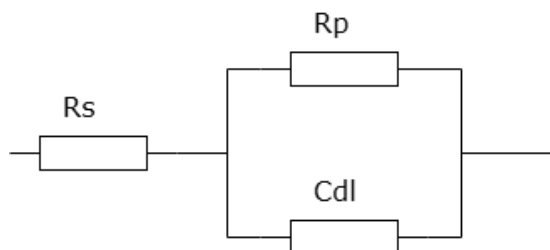
Elektrochemickou impedanční spektroskopii lze použít pro získání užitečných informací o složitých elektrochemických systémech. Jednotlivé části elektrochemického systému je možné modelovat ekvivalentním obvodem, který je složen ze známých obvodových elektrických prvků.[41] Tyto prvky nahrazují skutečné děje probíhající na fázovém rozhraní elektroda – elektrolyt.

Aby bylo možné sestavit takový ekvivalentní obvod, dochází většinou ke kombinaci více elementů. Obvody se tedy sestavují z jejich sériových a paralelních zapojení. Některé prvky je možné ztotožnit s reálnými prvky z elektrotechnické praxe, ale vyskytují se zde prvky, které jsou specifické pouze pro elektrochemii. Typickými reálnými prvky jsou rezistory, kondenzátory či cívky. Mezi elektrochemické prvky se typicky zařazují Warburgova či Gerischerova impedance, člen konstantního fázového posunu nebo tzv. tangenciální člen. Společně poté utváří ekvivalentní obvod, který popisuje celkové chování systému a ovlivňuje průběh měřeného proudu. Zároveň je možné provést matematický popis chování systému pomocí impedancí prvků z tabulky 2.1. Výsledkem měření je tedy ekvivalentní obvod s přiřazenými parametry (odporu roztoku, elektrická dvojitá vrstva atd.). [42]

Tabulka 2.1 Prvky ekvivalentního obvodu [42]

Ekvivalentní prvek	Impedance
R, odpor	R
L, induktance	$j\omega L$
C, kapacitance	$1/j\omega C$
Q, konstantní fázový posun	$1/Y_0(j\omega)^n$
W, Warburgova impedance	$1/Y_0\sqrt{j\omega}$
O, tangenciální člen	$\tanh(B\sqrt{j\omega}) / Y_0\sqrt{j\omega}$
G Gerisherova impedance	$1/Y_0\sqrt{(k_a + j\omega)}$

Nejběžnějším analogovým modelem obvodu je zjednodušený Randlesův článek, který představuje ekvivalentní obvod mezi elektrolytem a elektrodou pro jeden elektrochemický článek.[40] [41]



Obrázek 2.3 Randlesův obvod

V tomto ekvivalentním obvodu symbolizuje R_s odpor elektrolytu, R_p polarizační odpor a C_{dl} charakterizuje kapacitu elektrické dvojvrstvy. Polarizační odpor představuje omezení přenosu náboje na rozhraní mezi elektrodou a elektrolytem. R_s vzniká při průchodu proudu elektrolytem, ionty v něm působí jako překážky, které brání toku elektronů.[40] [41]

Zjednodušené součásti systému EIS umožňují komplexní pochopení toho, jak jednotlivé součásti vzájemně ovlivňují chemické a elektrické vlastnosti systému. Přestože Randlesův model nedokáže přesně popsat všechny elektrochemické systémy, slouží jako výchozí model pro složitější systémy.[40]

2.2.5 Aplikace a význam

Koroze: Elektrochemická impedanční spektroskopie se používá k hodnocení účinnosti ochranných povlaků, které slouží k ochraně proti korozi. Pomocí této metody je možné generovat důležitá data týkající se rychlosti koroze, polarizačního odporu a kapacity.[44]

Výzkum baterií: Měření impedance může hrát zásadní roli při monitorování degradace baterie během provozu, protože je schopna poskytnout informace o odporu přenosu náboje související se SEI vrstvou, odporu elektrolytu a difúzním koeficientu

vložených částic. Pomocí metody EIS lze optimalizovat a sledovat cyklovatelnost, tak i účinnost baterie.[44]

Fotovoltaika: Měření pomocí EIS při různých hodnotách stejnosměrného napětí umožňuje generovat Mott-Schottkyho grafy, z nichž lze odvodit klíčové charakteristiky polovodičových materiálů.[44]

Výzkum palivových článků: V oblasti palivových článků a elektrokatalýzy lze EIS použít k nalezení nejvhodnějších materiálů (katalyzátorů), u nichž probíhá palivová reakce. Kromě toho lze pomocí této metody při nízkých frekvencích zkoumat i vše, co souvisí s přenosem hmoty, jako jaký je nejlepší parciální tlak pro určitou operaci.[44]

Biologie: Ačkoliv se EIS přednostně využívá ve výzkumu koroze a baterií, její uplatnění se čím dál více rozšiřuje i do oblastí biologie a medicíny. Zde našla uplatnění ve studiu tkání a různých výzkumů protilátek. [44]

Největší síla elektrochemické impedanční spektroskopie je v její schopnosti zkoumat elektrochemické procesy v různých časových měřítcích. EIS je schopna zkoumat elektrochemické procesy, které mohou probíhat ve stejnou dobu, ale v různých časových měřítcích. Například nabíjení elektrochemické dvojvrstvy probíhá v rámci mikrosekund, ale k difúzi dochází obvykle v rámci milisekund.[41]

2.3 Měření kapacity při nabíjení konstantním proudem

Kapacita přímo souvisí s ukládáním náboje dle vztahu $C=Q/U$. Kapacitu lze rovněž získat metodou nabíjení konstantním proudem. Ta je založena na nabíjení ultrakapacitoru od počáteční minimální hodnoty napětí až po dosažení maximální hodnoty napětí za použití stálého zdroje proudu je možné měřit dobu nabíjení. Na základě těchto dat je poté možné počítat kapacitu podle vzorce:

$$C = \frac{t \cdot I}{U_{\text{finální}} - U_{\text{počáteční}}} \quad (2.11)$$

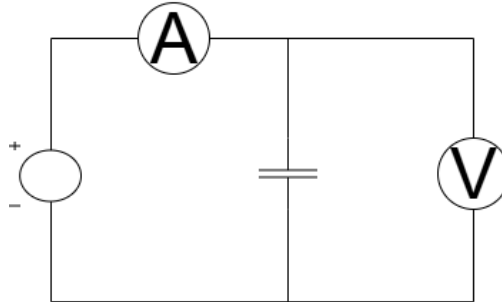
kde C je kapacita ve Faradech, čas t je v sekundách, proud I v ampérech a počáteční napětí $U_{\text{počáteční}}$ a finální napětí $U_{\text{finální}}$ ve voltech.[3]

Je dobré si pro upřesnění uvést příklad, pokud by nabití kondenzátoru z 8 V DC na 12 V DC pomocí konstantního proudu o 9 ampér trvalo 185 sekund, pak bude výpočet kapacity roven: [3]

$$C = \frac{185 \cdot 9}{12 - 8} = 416,25 \text{ F} \quad (2.12)$$

Pro tento typ měření se použije jednoduché schéma zapojení, jak znázorněno na obrázku 2.4. Tato metoda měření je výhodná z hlediska nenáročnosti potřeby specifického vybavení na měření v laboratoři. Jak je možné vidět, ke změření kapacity je zapotřebí pouze voltmetr, ampérmetr, stejnosměrný zdroj a měřený ultrakapacitor. Jedná se o

běžnější a jednodušší metodu ve srovnání se složitějšími komplexními metodami jako je cyklická voltametrie nebo elektrochemická impedanční spektroskopie.



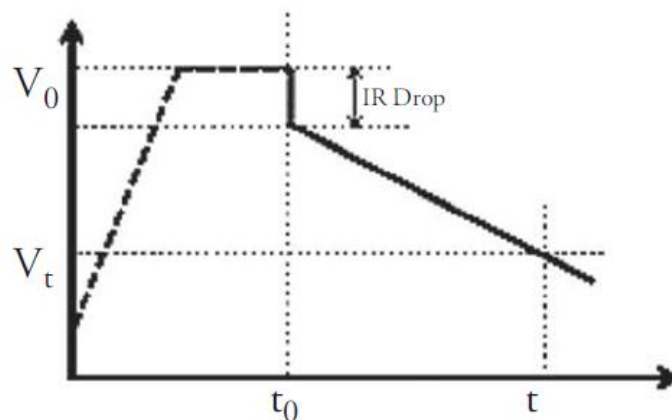
Obrázek 2.4 Schéma zapojení měření kapacity při nabíjení konstantním proudem

2.4 Měření ESR pomocí metody pulzního zatížení

Tato metoda měření ekvivalentního sériového odporu (ESR) spočívá v krátkodobém zatížení ultrakapacitoru. Během tohoto procesu se v obvodu generuje krátký proudový impulz o předem známé velikosti, který závisí na aplikovaném zatížení. Při měření se zaznamenává pokles napětí na ultrakapacitoru a proud procházející obvodem. Je klíčové, aby proudový impulz byl dostatečně krátký a strmý, což minimalizuje vliv parazitních jevů. Zároveň však musí být impulz dostatečně dlouhý, aby bylo možné rozlišit úbytek napětí způsobený ESR od následného vybíjení ultrakapacitoru. Pokles napětí na ESR se projevuje jako skoková změna v napětí na ultrakapacitoru. Tuto skokovou změnu je možné vidět pro ilustraci na obrázku 2.5. Zde je tento pokles veden jako „IR Drop“. Následně je možné jednoduše dopočítat ekvivalentní sériový odpor ze vztahu:

$$ESR = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (2.13)$$

, kde ΔU symbolizuje velikost skokové změny napětí a ΔI značí velikost procházející proudu v obvodu.



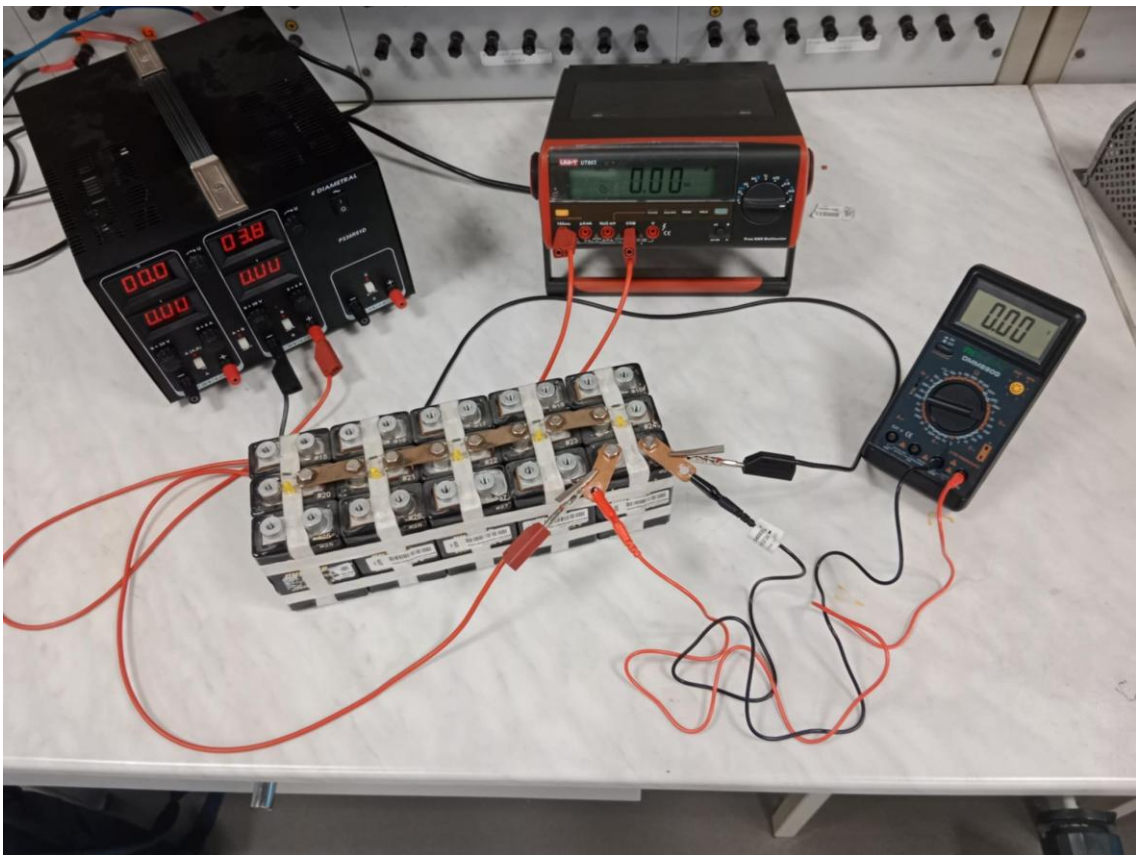
Obrázek 2.5 ESR, vybíjecí profil ultrakapacitoru [3]

3. PŘÍPRAVA MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ

Pro měření kapacity a ekvivalentního sériového odporu byly zvoleny tyto dvě metody: metoda měření pomocí pulzního zatížení a metoda měření při nabíjení konstantním proudem.

3.1 Měřicí pracoviště sloužící k vyhodnocení kapacity

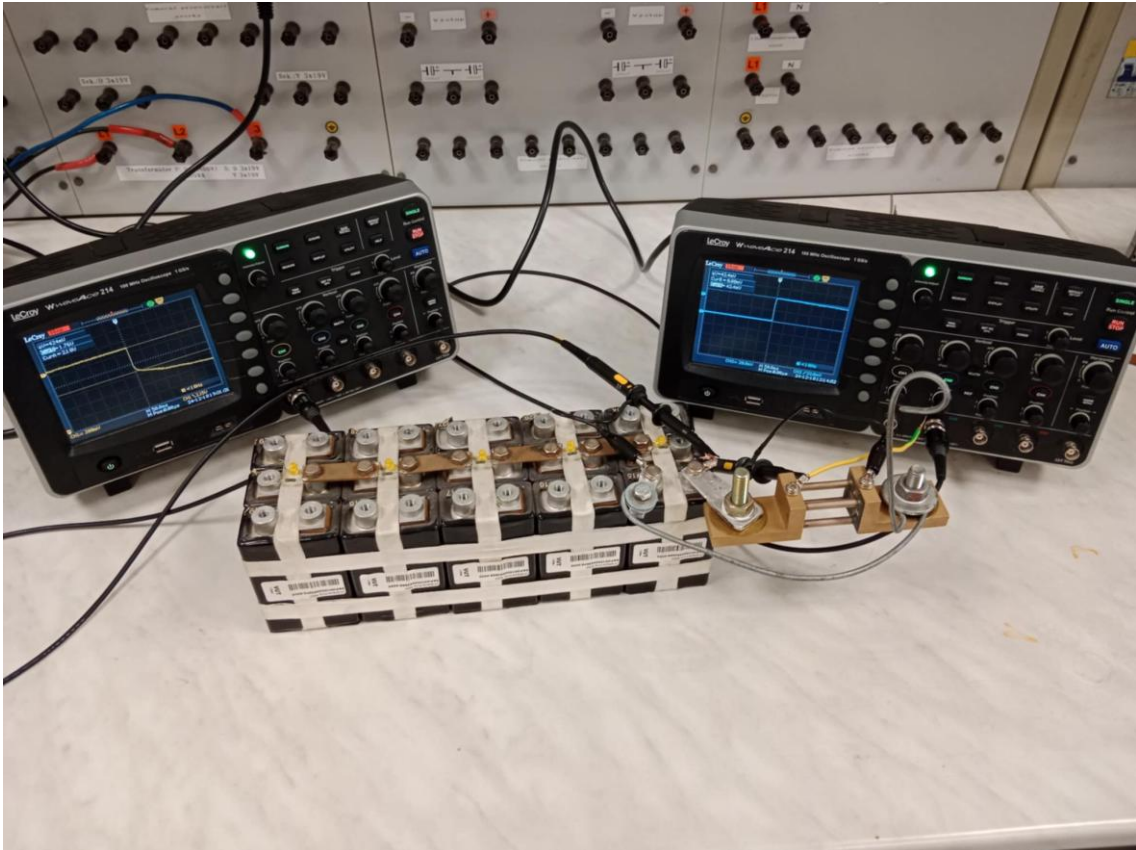
K měření potřebných parametrů k vyhodnocení velikosti kapacity byla zvolena metoda, kdy je ultrakapacitor nabíjen konstantním proudem. V průběhu toho měření je ultrakapacitor připojen na zdroj konstantního proudu viz. obrázek 3.1. Během měření se následně sleduje nárůst napětí na ultrakapacitoru pomocí voltmetru. Zároveň se zaznamenávají časové okamžiky, kdy bylo dosaženo konkrétních hodnot napětí. Pomocí ampérmetru se kontroluje, aby velikost nabíjecího proudu byla konstantní. Ultrakapacitory byly nabíjeny konstantním proudem o velikosti 3,5A. Jedná se o jednoduchou, nenáročnou metodu, kterou lze provést prakticky v jakékoliv laboratoři.



Obrázek 3.1 Pracoviště určené k měření parametrů potřebných k vyhodnocení kapacity ultrakapacitoru.

3.2 Měřicí pracoviště sloužící k vyhodnocení ESR

K měření potřebných parametrů k vyhodnocení velikosti ekvivalentního sériového odporu byla zvolena metoda pulzního zatížení. Zpočátku dojde k nabití ultrakapacitoru. Poté následně dojde ke krátkodobému zatížení obvodu. V průběhu toho zatížení se pomocí osciloskopů snímá pokles napětí na ultrakapacitoru a nárůst napětí na bočníku, aby bylo možné vyhodnotit velikost procházející proudu obvodem. Následně je možné vyhodnotit ESR, jak bylo detailněji popsáno v kapitole 2.4.



Obrázek 3.2 Pracoviště určené k měření parametrů potřebných k vyhodnocení ESR ultrakapacitoru.

4. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ

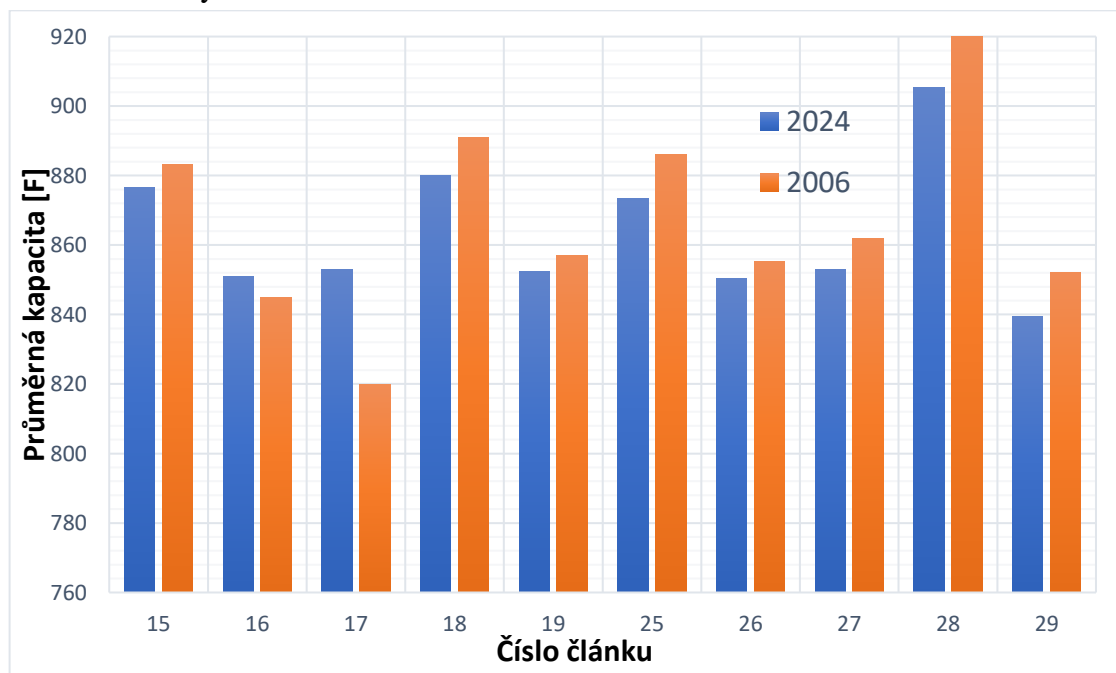
V této části bylo provedeno testování 10 článků a vyhodnocení jejich stavu. Jednalo se o ultrakapacitory EPCOS B49300-G1605-Q. Tyto články byly využívány ve struktuře pohonu elektrického skútru, přičemž jejich cílem bylo omezování špiček proudu odebíraného z akumulátorové baterie a možnost rekuperace energie, kterou dodával měnič pohonu při elektrodynamickém brždění. Samotná výroba těchto ultrakapacitorů od firmy EPCOS byla podle předešlé práce ukončena v roce 2006.[45]

Tabulka 4.1 Parametry článků EPCOS B49300-G1605-Q [45]

Jmenovité napětí U_R [V]	2,3
Jmenovitá kapacita C_R [F]	600
Jmenovitý proud I_C [A]	300
Uložená energie (při U_R) E [J]	1587
Max. sériový odpor ESR_{max} [m Ω]	3,4

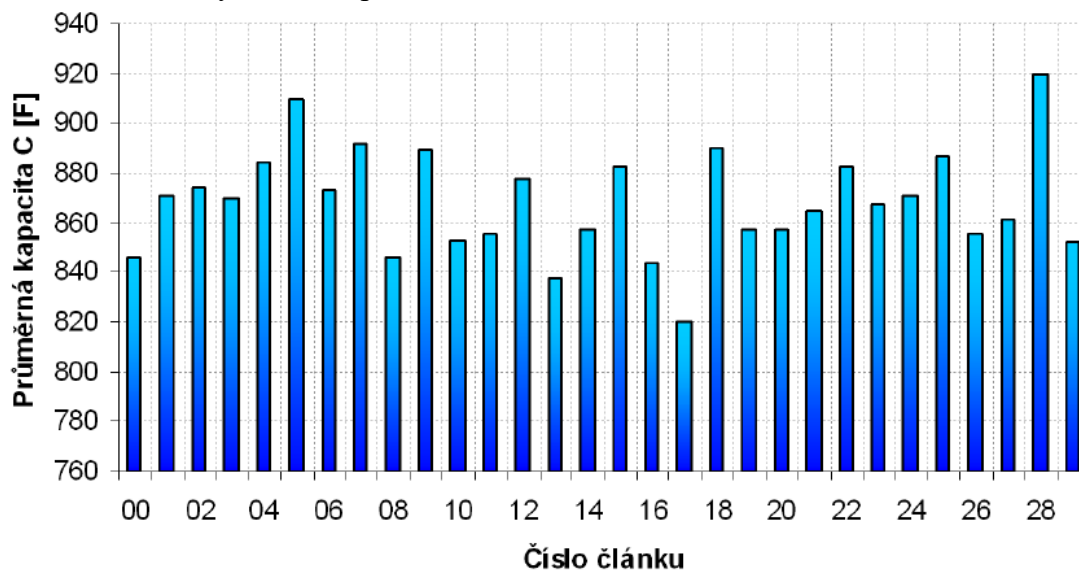
4.1 Vyhodnocení stavu kapacity

Z grafického porovnání (graf 4.1) je zřejmé, že u většiny ultrakapacitorů došlo k mírnému poklesu kapacity. Tento pokles může být způsoben degradací elektrod v průběhu času, kdy se elektrodám snižuje jejich efektivní povrch. Dalším možnou příčinou může být rozklad elektrolytu nebo mechanické stárnutí.



Obrázek 4.1 Porovnání průměrné kapacity článků pro napětí (1÷2) V

Zhodnocení stavu ultrakapacitorů z hlediska kapacity je výrazně ovlivněno počátečním stavem, ze kterého je měření prováděno. V tomto případě bylo měření provedeno u článků, které byly dlouhodobě skladovány ve vybitém stavu. Pro možnost srovnání s předešlými výsledky byly hodnoty čerpány z grafu 4.2, který zobrazuje měření provedené na nových ultrakapacitorech.



Obrázek 4.2 Průměrná kapacita článků pro napětí (1÷2) V převzato z:[45]

4.2 Vyhodnocení stavu ESR

Jak je možné vidět v tabulce 4.2, hodnota ESR se pohybuje v rozmezí 1,84 mΩ (články č.25 a 26) do 2,06 mΩ. (článek 29). Tyto naměřené hodnoty jsou výrazně nižší než hodnota maximálního ESR, která je uváděna výrobcem o velikosti 3,4 mΩ. Jeví se tedy tak, že ultrakapacitory jsou stále v poměrně dobrém stavu z hlediska velikosti vnitřního odporu. Lze tedy předpokládat, že tyto články nebyly vystavovány teplotám vyšším než provozním, protože takové podmínky by vedly k urychlení degradace článků a výraznějšímu nárůstu vnitřního odporu. Zároveň lze předpokládat, že nedocházelo ani k vystavování článků přepětovým stavům či nadměrnému špičkovému proudovému zatížení.

Tabulka 4.2 Tabulka naměřených hodnot s vyhodnoceným ESR

Číslo článku	ΔU [mV]	$U_{\text{bočník}}$ [mV]	ΔI [A]	ESR[mΩ]
15	424	42,4	212	2,00
16	456	45,6	228	2,00
17	464	48	240	1,93
18	448	44	220	2,04
19	432	46,4	232	1,86
25	456	49,6	248	1,84
26	448	48,8	244	1,84
27	496	48,8	244	2,03
28	488	48,8	244	2,00
29	420	40,8	204	2,06

Zpočátku byla dopočtena velikost proudu v obvodu, kdy je známa hodnota na bočník 300 A/60mV. Pro příklad bude uveden výpočet k článku č.19. Pomocí osciloskopu byla odečtena hodnota napětí na bočníku, jak je možné vidět na obrázku 4.4 a také hodnota poklesu napětí na ultrakapacitoru (viz. obrázek 4.3).

$$\Delta I = \frac{300A}{60 \cdot 10^{-3}} \cdot 46,4 \cdot 10^{-3} = 232 \text{ A} \quad (4.1)$$

Následně je již možné dopočítat hodnotu vnitřního odporu (ESR):

$$ESR = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{432 \cdot 10^{-3}}{232} = 1,86 \text{ m}\Omega \quad (4.2)$$

Stejný proces byl proveden u všech deseti testovaných ultrakapacitorů.



Obrázek 4.3 Příklad odečtené hodnoty poklesu napětí na článku č.19.



Obrázek 4.4 Nárůst napětí na bočníku v obvodu článku č.19.

5. NÁVRH KONDENZÁTOROVÉ BATERIE

V této kapitole je proveden návrh šesti různých kondenzátorových baterií, které jsou navrženy na základě specifických požadavků, jako je napětí, výkon a čas dodávky energie. Pro každý požadavek je provedena kombinace dvou různých typů ultrakapacitorů.

5.1 Kondenzátorová baterie č.1

Pro návrh první kondenzátorové baterie byly zvoleny ultrakapacity typu 600 F/2,7V a 3000 F/2,7V. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Parametry použitých článků pro první návrh uložště

Parametry	Jednotka	Eaton XL60-2R7308W-R	Eaton XV3585-2R7607-R
Jmenovité napětí	V	2,7	2,7
Kapacita	F	3000	600
Energie článku	Wh	3,04	0,61
Počáteční ESR	mΩ	0,23	2,6
Maximální trvalý proud	A	143	33
Maximální špičkový proud	A	2400	320
Rozměr (průměr × délka)	mm	60,3 × 138	35 × 87,5
Hmotnost	g	525	108
Specifická energie	Wh/kg	5,79	5,65
Teplotní rozsah	°C	-40 až +65	-40 až +65
Cena	CZK	2001	773

Uložště má být schopno:

- dodat výkon 20kW
- po dobu 1 s
- maximální stanové napětí 48 V

Následně bude nastíněn proces samotného návrh, přičemž ostatní návrhy budou provedeny obdobným postupem.

1) Výpočet požadované energie

Bude se vycházet z obecného vzorce pro výpočet energie:

$$E = P \cdot t \quad (5.1)$$

Je požadované, aby toto uložště bylo schopno dodávat po dobu 1s výkon o velikost 20 kW. V závislosti na tom se provede dosazení:

$$E_{\text{požadovaná}} = 20\,000 \cdot 1 = 20\,000 \text{ J} = 20 \text{ kJ} \quad (5.2)$$

2) Proveďte se zvolení pracovního napětového rozsahu uložičtř

$$U_{max} = 48 \text{ V}$$

$$U_{min} = 32 \text{ V}$$

tento pracovní rozsah byl zvolen z důvodu zpomalení a snížení degradace uložičtř v čase. Zároveň napomáhá ke snížení vybíjecích proudů, vyšší účinnosti a nižšímu vlivu vnitřního odporu ESR. Uvažuje se, že uložičtř bude vždy následně připojeno k měničt.

3) Stanovení minimální potřebné kapacity uložičtř

Při tomto výpočtu se vychází ze vztahu pro výpočtu energie uložčené v kondenzátoru:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_{max}^2 - U_{min}^2) \quad (5.3)$$

po úpravě pro kapacitu:

$$C = \frac{2 \cdot E}{(U_{max}^2 - U_{min}^2)} = \frac{2 \cdot 20\,000}{48^2 - 32^2} = 31,25 \text{ F} \quad (5.4)$$

toto je hodnota minimální potřebné kapacity.

4) Výpočet vybíjecích proudů

Minimální proud:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{20000}{48} = 417 \text{ A} \quad (5.5)$$

Maximální proud:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{20000}{32} = 625 \text{ A} \quad (5.6)$$

4) Zvolí se typ článku a provede se konfigurace:

Na základě požadovaného napětí 48 V se provede výpočet článků v sérii:

$$n_s = \frac{U_{max}}{U_{čláknku}} = \frac{48}{2,7} = 17,8 \Rightarrow 18 \text{ článků} \quad (5.7)$$

počet článku bude pro oba typy ultrakapacitorů totožný, jelikož disponují stejným jmenovitým napětím.

Kapacita jedné sériové větve:

$$C_{série} = \frac{C_{čláknku}}{n_s} \quad (5.8)$$

Dosažení:

$$C_{série} = \frac{3000}{18} = 166,7 \text{ F} \quad (5.9)$$

reálná hodnota kapacity uložičtř je tedy 166,7V, tedy víc, než 5x více než je potřebné.

V případě použití článku 600 F:

$$C_{série} = \frac{600}{18} = 33,33 \text{ F} \quad (5.10)$$

Z důvodu vysokých vybíjecích proudů a omezení jednotlivých článků 600F/2,7V z hlediska špičkového proudu (320A článek), je nutné provést přidání jedné paralelní větve, díky tomu se proud rozdělí do dvou větví. Zároveň tím dojde k navýšení celkové kapacity.

$$C_{\text{celková}} = C_{\text{série}} \cdot n_p = 33,33 \cdot 2 = 66,67 \text{ F} \quad (5.11)$$

V daném případě se proud rozloží do dvou paralelních větví, což umožní generovat maximální výsledný proud z uložení o velikosti 640 A. Tím je zajištěn proudový požadavek v celém rozsahu pracovního napětí.

5) Ověření využitelné energie

3000 F/2,7V:

$$E = \frac{1}{2} \cdot 166,7 \cdot (48^2 - 32^2) = 106,7 \text{ kJ} \quad (5.12)$$

to znamená, že požadovaných 20 kJ bez problému zvládne dodat.
600 F/2,7V:

$$E = \frac{1}{2} \cdot 66,7 \cdot (48^2 - 32^2) = 42,67 \text{ kJ} \quad (5.13)$$

z čehož se ukazuje, že ten požadavek dostatečně splní.

6) ESR packu

Výpočet ESR pro článek 3000 F, 0,23 mΩ:

$$R_{\text{ESR, celkem}} = 18 \cdot 0,23 \text{ m}\Omega = 4,1 \text{ m}\Omega \quad (5.14)$$

uvažuje se pouze jedna větev.

Výpočet ESR pro článek 600 F, 2,6 mΩ:

$$R_{\text{serie}} = 18 \cdot 2,6 \text{ m}\Omega = 46,8 \text{ m}\Omega \quad (5.15)$$

je nutné ale uvažovat dvě paralelní větve, celkový ESR tedy bude:

$$R_{\text{ESR celkem}} = \frac{46,8}{2} = 23,4 \text{ m}\Omega \quad (5.16)$$

7) Výpočet hmotnosti

Obecný vztah pro výpočet hmotnosti:

$$m_{\text{packu}} = n \cdot m_{\text{článků}} \cdot k_m \quad (5.17)$$

kde $k_m = 1,2$ představuje činitel hmotnosti, který zohledňuje různé propojky, kabeláž, montážní materiál, izolace a celkově konstrukční prvky.

Výpočet hmotnost packu v případě použití článků 3000 F/2,7V:

$$m_{\text{packu}} = 18 \cdot 0,525 \cdot 1,2 = 11,34 \text{ kg} \quad (5.18)$$

Výpočet hmotnost packu v případě použití článků 600 F/2,7V:

$$m_{packu} = 36 \cdot 0,108 \cdot 1,2 = 4,67 \text{ kg} \quad (5.19)$$

8) Výpočet objemu

Objem jednoho článku:

$$V_{článku} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h \quad (5.20)$$

Objem celého packu:

$$V_{packu} = V_{článku} \cdot n \cdot k_v \quad (5.21)$$

kde $k_v = 1,5$ představuje číselný koeficient plnění objemu, který zohledňuje to, že válcovité články nebudou dokonale vyplňovat prostor.

3000F články:

- výška: 138 mm
- průměr: 60,3 mm

Výpočet objemu jednoho článku:

$$V_{článku} = \pi \cdot \left(\frac{0,0603}{2}\right)^2 \cdot 0,138 = 3,94 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 0,394 \text{ l} \quad (5.22)$$

Výpočet celého packu:

$$V_{packu} = 0,394 \cdot 18 \cdot 1,5 = 10,6 \text{ l} \quad (5.23)$$

600F články:

- výška: 87,5 mm
- průměr: 35 mm

Výpočet objemu jednoho článku:

$$V_{článku} = \pi \cdot \left(\frac{0,035}{2}\right)^2 \cdot 0,0875 = 8,42 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 0,0842 \text{ l} \quad (5.24)$$

Výpočet celého packu:

$$V_{packu} = 0,08428 \cdot 36 \cdot 1,5 = 4,5 \text{ l} \quad (5.25)$$

Obě navržené uložistě jsou schopny plnit energetický požadavek. Varianta s články 3000F však disponuje až o 413 % více energie, než je potřebné, poskytuje téměř dvojnásobek využitelné energie ve srovnání s články 600 F, a to při menším počtu článků. Zároveň umožňuje generovat velmi vysoké špičkové proudy až 2400 A, což by v této konkrétní aplikaci vedlo k jejich značnému nevyužití a předimenzování.

Na druhou stranu, díky menšímu počtu článků je tato varianta konstrukčně jednodušší, disponuje nižším vnitřním odporem a články jsou tam méně namáhány, což napomáhá k prodloužení životnosti. Způsobuje také ale větší konstrukční objem (10,6l

oproti 4,5 l), vyšší hmotnost (11,34kg oproti 4,67kg) a vyšší cenu (36 018 Kč oproti 27 828 Kč).

Z těchto důvodů je dobré zhodnotit míru předimenzování v závislosti na specifické konkrétní aplikaci. Z hlediska komplexního shrnutí je varianta s články 600 F plně dostatečná, nabízí levnější řešení s nižším objemem a hmotností. Vzniklé ztráty a oteplení způsobené vyšším vnitřním odporem je možné zanedbat, neboť se předpokládá, že půjde pouze o občasné jednosekundové zatížení. Detailní porovnání je uvedené v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2 Technické parametry uložště č.1

Parametry	Jednotka	600 F/2,7V	3000 F/2,7V
Počet článků v sérii	-	18	18
Počet větví paralelně	-	2	1
Celkový počet článků	-	36	18
Napětí max.	V	48	48
Napětí min.	V	32	32
Potřebná kapacita	F	31,25	31,25
Kapacita jedné série	F	33,33	166,67
Výsledná kapacita	F	66,67	166,67
Využitelná energie	kJ	42,67	106,67
Požadavek	kJ	20	20
Rezerva energie	%	113,3	433,3
Celkový ESR	mΩ	23,4	4,1
Výstupní proud při 48 V	A	417	417
Výstupní proud při 32 V	A	625	625
Max.špičkový proud uložště	A	640	2400
Hmotnost uložště	kg	4,67	11,34
Objem uložště	l	4,5	10,6
Cena packu	CZK	27828	36018

5.2 Kondenzátorová baterie č.2

Uložště má být schopno:

- dodat výkon 40kW
- po dobu 1 s
- maximální stanovené napětí 48 V

Obě navržená uložště jsou schopna splnit energetický požadavek. Na uložště byly použity stejné typy článků jako v uložšti č. 1, konkrétně tedy Eaton XL60-2R7308W-R (600 F/2,7V) a Eaton XV3585-2R7607-R (3000 F/2,7V).

Varianta využívající články o kapacitě 3000 F disponuje větší výkonovou rezervou. Zároveň dosahuje nižšího vnitřního odporu (4,1mΩ) a umožňují generovat špičkový proud až 2400 A, což ji činí vhodnější pro aplikace s impulzním zatížením a požadavkem

na minimální oteplení. Díky malému počtu článků z nich tvoří jednodušší konstrukční řešení.

Naopak u varianty č.1 bylo z důvodu proudového požadavku nutné provést zapojení čtyř paralelních větví (celkem 72 článků), což konstrukci výrazně komplikuje. Hlavním omezením je proudová zatížitelnost jednotlivých článků. Kdyby byly články schopny generovat vyšší špičkový proud, stačilo by použití pouze dvou paralelních větví pro splnění energetického požadavku. Výsledná kapacita této varianty je 133,33F s využitelnou energií 85,33 kJ, což je nižší než v případě varianty č 2, avšak stále disponuje dostatečnou rezervou. Tato varianta vykazuje vyšší vnitřní odpor (11,7 mΩ) a nižší špičkový proud (1280 A), ale pro danou aplikaci to je stále dostatečné. Disponuje nižší hmotností a téměř srovnatelným objemem. Přestože se jedná o levnější články, je celková cena packu značně vyšší (55 656Kč), což je dáno větším počtem použitých článků.

Z hlediska komplexního hodnocení lze říct, že varianta č.2 s články 3000 F je výhodnější, díky nižšímu vnitřnímu odporu, vyššímu špičkovému proudu, jednodušší konstrukci a nižší ceně, která hraje klíčovou roli. Hlavní nevýhodou je malé předdimenzování, které však zaručí velkou spolehlivost. Varianta s články 600 F by mohla být vhodná pro změnu v aplikacích, kde je kladen důraz na prostor a nižší hmotnost, i když za cenu vyšší složitosti a nižší účinnosti. Vzhledem krátkodobého zatížení (1 s) je možné ztráty na vyšším ESR považovat za přeci jen zanedbatelné.

Tabulka 5.3 Technické parametry uložště č.2

Parametry	Jednotka	Varianta 1-600 F/2,7V	Varianta 2-3000 F/2,7V
Počet článků v sérii	-	18	18
Počet větví paralelně	-	4	1
Celkový počet článků	-	72	18
Napětí max.	V	48	48
Napětí min.	V	32	32
Potřebná kapacita	F	62,50	62,50
Kapacita jedné série	F	33,33	166,67
Výsledná kapacita	F	133,33	166,67
Využitelná energie	kJ	85,33	106,67
Požadavek	kJ	40	40
Rezerva energie	%	113,3	166,7
Celkový ESR	mΩ	11,7	4,1
Výstupní proud při 48 V	A	833	833
Výstupní proud při 32 V	A	1250	1250
Max.špičkový proud uložště	A	1280	2400
Hmotnost uložště	kg	9,33	11,34
Objem uložště	l	9,1	10,6
Cena packu	CZK	55656	36018

5.3 Kondenzátorová baterie č.3

Uložiště má být schopno:

- dodat výkon 40kW
- po dobu 3 s
- maximální stanovené napětí 48 V

Tabulka 5.4 Technické parametry uložště č.3

Parametry	Jednotka	Varianta 1- 1500 F/2,85V	Varianta 2- 3400 F/2,85V
Počet článků v sérii	-	17	17
Počet větví paralelně	-	2	1
Celkový počet článků	-	34	17
Napětí max.	V	48	48
Napětí min.	V	30	30
Potřebná kapacita	F	170,94	170,94
Kapacita jedné série	F	88,24	200,00
Výsledná kapacita	F	176,47	200,00
Využitelná energie	kJ	123,88	140,40
Požadavek	kJ	120	120
Rezerva energie	%	3,2	17,0
Celkový ESR	mΩ	3,3	3,9
Výstupní proud při 48 V	A	833	833
Výstupní proud při 30 V	A	1333,3	1333,3
Max.špičkový proud uložště (1s)	A	2710	2700
Hmotnost uložště	kg	13,46	10,71
Objem uložště	l	13,5	10,0
Cena článku	CZK	732	2618
Cena packu	CZK	24888	44506

Obě navržené varianty ultrakapacitorového uložště jsou schopny dodat požadovanou energii o velikosti 120kJ během 3 sekund. Původně byl uvažován rozsah napětí 48- 32V ten byl upraven na rozsah 48–30 V. Tato úprava byla provedena hlavně z důvodu vhodnější optimalizace počtu článků v návrhu. Tento širší pracovní rozsah umožnil dosáhnout požadovanou energii s menší kapacitou, což umožnilo použití menšího počtu paralelních větví a tím se tak zjednodušilo celé zapojení. Zároveň došlo ke zvýšení proudového zatížení, což hraje v tomto případě důležitou roli, jelikož je nutné dodávat poměrně vysoký proud po dobu až tří sekund. Výrobce udává zpravidla maximální špičkový proud pro trvání zatížení po dobu jedné sekundy, a proto je potřeba počítat s dostatečnou rezervou. V těchto návrhách se požadované proudy během pulzního zatížení nachází výrazně pod mezí maximálního špičkového proudu. Provozní zatížení je tak z hlediska proudu bezpečné a nepředstavuje riziko přetížení.

Z hlediska energetické rezervy je výhodnější varianta s články 3400 F/2,85V, která má dostatečnou rezervu i v případě že by se počítalo s budoucí mírnou degradací. Díky menšímu počtu článků tvoří skladnější návrh a lehčí (10,71kg vs. 13,46kg), což má přímý vliv na složitost konstrukce uložistiště.

Na druhou stranu návrh se dvěma větvemi článků 1500 F/2,85V vykazuje o něco nižší vnitřní odpor (3,3mΩ vs 3,9mΩ), což by při delším provozu vedlo k nižším ztrátám a menšímu tepelnému namáhání. Jeho významnou výhodou je celková nižší cena uložistiště.

Z technického hlediska je tedy varianta s články 3400 F vzhledem ke svému skladnějšímu řešení, menší hmotnosti, energetické rezervě a prostorovou náročnosti výhodnější. Naproti tomu varianta s články 1500 F je výhodnější v případě, kdy hraje důležitou roli hlavně ekonomická stránka, což zrovna v daném případě je poměrně značný rozdíl.

Tabulka 5.5 Parametry použitých článků pro třetí návrh uložistiště

Parametry	Jednotka	Eaton XL60-2R9348W-R	SPSCAP CDCL1500C0-002R85WLZ
Jmenovité napětí	V	2,85	2,85
Kapacita	F	3400	1500
Energie článku	Wh	3,8	1,69
Počáteční ESR	mΩ	0,23	0,39
Maximální trvalý proud	A	143	93
Maximální špičkový proud	A	2700	1355
Rozměr (průměr × délka)	mm	Ø60,3 × 138	Ø60,8 × 91,4
Hmotnost	g	525	330
Specifická energie	Wh/kg	7,2	5,1
Teplotní rozsah	°C	-40 až +65	-40 až +65
Tepelná kapacita	J/°C	-	377
Cena	CZK	2618	732

5.4 Kondenzátorová baterie č.4

Uložiště má být schopno:

- dodat výkon 40kW
- po dobu 6 s
- maximální stanovené napětí 48 V

Tabulka 5.6 Technické parametry uložště č.4

Parametry	Jednotka	Varianta 1- 1500 F/2,85V	Varianta 2- 3400 F/2,85V
Počet článků v sérii	-	17	17
Počet větví paralelně	-	5	2
Celkový počet článků	-	85	34
Napětí max.	V	48	48
Napětí min.	V	30	30
Potřebná kapacita	F	341,88	341,88
Kapacita jedné série	F	88,24	200,00
Výsledná kapacita	F	441,18	400,00
Využitelná energie	kJ	309,71	280,80
Požadavek	kJ	240	240
Rezerva energie	%	29,0	17,0
Celkový ESR	mΩ	1,33	1,96
Výstupní proud při 48 V	A	833	833
Výstupní proud 30 V	A	1333,3	1333,3
Max.špičkový proud uložště (1s)	A	6775	5400
Hmotnost uložště	kg	33,66	21,42
Objem uložště	l	33,8	20,1
Cena packu	CZK	62220	89012

Obě navržené uložště splňují požadované parametry. K jejich návrhu byly použity stejné typy článků jako v uložšti č.3, tedy šlo o články SPSCAP CDCL1500C0-002R85WLZ (1500 F / 2,85 V) a Eaton XL60-2R9346-R (3400 F / 2,85 V). Parametry použitých ultrakapacitorů jsou uvedené v tabulce 5.5.

Varianta s články 1500 F disponuje vyšší využitelnou energií a zároveň vyšší energetickou rezervou (29 % vs 17 %). Díky pěti paralelním větvím je schopna odolat vyššímu proudovému zatížení, a to při nižším vnitřním odporu (1,33mΩ). To z ní činí vhodnou možnost pro aplikace s dynamickým zatížením. Nevýhodu tvoří poměrně vyšší hmotnost (33,66kg) a objem uložště. Celková cena je o dost nižší ve srovnání s druhou variantou (62 220Kč oproti 89 012Kč).

Naopak varianta s články 3400 F disponuje nižší využitelnou energií. Na druhou stranu nabízí jednodušší konstrukci, nižší hmotnost (21,42 kg) a šetrnost z hlediska prostorových nároků (20,1l).

Z hlediska komplexního zhodnocení je varianta s články 1500 F vhodnější pro aplikace vyššími nároky na výkon. Naopak varianta s články 3400 F představuje konstrukčně efektivnější řešení s požadavky na nižší hmotnost a lepší skladnost.

V tomto případě byla zároveň provedena kontrola oteplení jednotlivých článků, jelikož jsou vystavovány delšímu proudovému zatížení (6s) ve srovnání s předešlými návrhy. Výpočet uvedený níže ukázal, že se jedná doopravdy o krátký časový úsek, který má na oteplení jen minimální vliv. Dojde k nárůstu teploty pouze o 0,29 až 0,68 °C. Problematicke oteplení by se bylo nutné více věnovat spíše v případech, kdy by se uvažovalo časté vystavování cyklickému zatížení s velkým počtem opakovaných cyklů.

Zde je příklad postupu výpočtu pro stanovení oteplení článků v ultrakapacitorovém packu během krátkodobého zatížení (během 6 sekund):

Stanovíme ztrátový výkon

Obecný vztah pro výpočet ztrátového výkonu:

$$P_{ztráty} = \left(\frac{I_{max} - I_{min}}{2} \right)^2 \cdot R_{ESR, celkem} \quad (5.26)$$

Výpočet ztrát pro uložistiště s články 1500 F:

$$P_{ztráty} = \left(\frac{1333,3 - 833}{2} \right)^2 \cdot 0,00133 = 1,56 \text{ kW} \quad (5.27)$$

, přičemž z důvodu zjednodušení se uvažovala průměrná hodnotu proudu.

Výpočet ztrátového výkonu s články 3400 F:

$$P_{ztráty} = \left(\frac{1333,3 - 833}{2} \right)^2 \cdot 0,00196 = 2,29 \text{ kW} \quad (5.28)$$

Stanovení tepelné kapacity packu

Tepelná kapacita packu:

$$C_{th, celková} = C_{th} \cdot n \quad (5.29)$$

, kde C_{th} je tepelná kapacita jednoho článku a n nám značí celkový počet článků.

Tepelná kapacita packu 1500 F:

$$C_{th, celková} = 377 \cdot 85 = 30,045 \text{ kJ/}^\circ\text{C} \quad (5.30)$$

Tepelná kapacita jednoho článku 3400 F:

$$C_{th, 3400F} = C_{th, 1500F} \cdot \frac{m_{3400F}}{m_{1500F}} = 377 \cdot \frac{0,525}{0,33} = 599,8 \text{ J/}^\circ\text{C} \quad (5.31)$$

V tomto případě, kdy nebyla známa informace od výrobce ohledně tepelné kapacity článku 3400F, bylo nutné ji stanovit zjednodušeným výpočtem. Ten vycházel z tepelné kapacity článku 1500F a poměru hmotností obou článků, díky čemuž se získá hrubý odhad tepelné kapacity článku 3400F.

Dosadíme:

$$C_{\text{th,celková}} = 599,8 \cdot 34 = 20,392 \text{ kJ/}^{\circ}\text{C} \quad (5.32)$$

Výpočet ztrátového tepla

$$E_{\text{ztrátová}} = P_{\text{ztráty}} \cdot t \quad (5.33)$$

Výpočet ztrátové energie 1500 F:

$$E_{\text{ztrátová}} = 1560 \cdot 6 = 9,34 \text{ kJ} \quad (5.34)$$

Výpočet ztrátové energie 3400 F:

$$E_{\text{ztrátová}} = 2290 \cdot 6 = 13,77 \text{ kJ} \quad (5.35)$$

Oteplení

Obecný vztah pro výpočet oteplení ultrakapacitorů:

$$T = \frac{E_{\text{ztrátová}}}{C_{\text{th,celková}}} \quad (5.36)$$

Oteplení článku 1500 F:

$$\Delta T = \frac{9,34}{30,045} = 0,29 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.37)$$

Oteplení článku 1500 F:

$$\Delta T = \frac{13,77}{20,392} = 0,68 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.38)$$

5.5 Kondenzátorová baterie č.5

Uložiště má být schopno:

- dodat výkon 20kW
- po dobu 3 s
- maximální stanovené napětí 48 V

Tabulka 5.7 Technické parametry uložště č.5

Parametry	Jednotka	Varianta 1- 600F F/2,7V	Varianta 2- 1200 F/2,7V
Počet článků v sérii	-	18	18
Počet větví paralelně	-	4	2
Celkový počet článků	-	72	36
Napětí max.	V	48	48
Napětí min.	V	34	34
Potřebná kapacita	F	104,53	104,53
Kapacita jedné série	F	33,33	66,67
Výsledná kapacita	F	133,33	133,33
Využitelná energie	kJ	76,53	76,53
Požadavek	kJ	60	60
Rezerva energie	%	27,6	27,6
Celkový ESR	mΩ	11,7	4,5
Výstupní proud při 48 V	A	417	417
Výstupní proud při 34 V	A	588,2	588,2
Max.špičkový proud uložště (1s)	A	1280	1910
Hmotnost uložště	kg	9,33	13,61
Objem uložště	l	9,1	11,4
Cena článku	CZK	773	905
Cena packu	CZK	55656	32580

Obě navržené varianty splňují energetický požadavek a jsou schopny dodávat výkonu o velikost 40kW po dobu tří sekund v napěťovém rozsahu 48-34 V. Obě varianty disponují výslednou kapacitou 133,33F a využitelnou energií 76,53kJ. Varianty se ale liší z hlediska technického provedení, hlediska nákladů a provozních parametrů

Varianta s články 1200F/2,7V je výhodnější z hlediska konstrukční jednoduchosti i elektrických parametrů. Vyžaduje pouze polovinu článků (36 oproti 72), díky čemuž se snižuje složitost sestavení, balancování i riziko nerovnoměrného zatížení větví. Zároveň je v této variantě nižší celkový ekvivalentní sériový odpor (ESR) - pouze 4,5mΩ a je možné dosáhnout vyšších výstupních proudů (až 1910 A), což zní činí vhodnější řešení i pro krátkodobé impulzní zatížení trvající 3 sekundy, jelikož je zde dostatečná rezerva vůči maximálnímu špičkovému proudu. Významnou roli hraje také jeho výrazně nižší cena, je přibližně o 23 000 Kč levnější, což je samo o sobě dáno příznivou cenou jednoho článku.

Nevýhodou této varianty je její vyšší hmotnost (13,61 kg oproti 9,33 kg) a větší objem uložení (11,4 vs 9,1 l). Rozdíly však nejsou takové, aby to mělo dramatický dopad.

Tabulka 5.8 Parametry použitých článků pro pátý návrh uložení

Parametry	Jednotka	Samwha DH5U128W60074TH	Eaton XV3585- 2R7607-R
Jmenovité napětí	V	2,7	2,7
Kapacita	F	1200	600
Energie článku	Wh	1,2	0,6
Počáteční ESR	mΩ	0,5	2,6
Maximální trvalý proud	A	63	33
Maximální špičkový proud	A	955	320
Rozměr (průměr × délka)	mm	Ø60,4 × 74	Ø35 × 87,5
Hmotnost	g	315	108
Specifická energie	Wh/kg	3,86	5,55
Teplotní rozsah	°C	-40 až +65	-40 až +65
Cena	CZK	904	732

5.6 Kondenzátorová baterie č.6

Uložení má být schopno:

- dodat výkon 20kW
- po dobu 6 s
- maximální stanovené napětí 48 V

Obě varianty ultrakapacitorových uložení splňují energetické požadavky na minimální dodávku 120kJ v rámci daného napěťového rozsahu 48–30 V. K návrhu byly použity totožné články jako v případě uložení č. 5 (viz. tabulka 5.8). Jednalo se tedy o články 600F/2,7V a 1200F/2,7V zapojených do sérií po 18 kusech.

Obě varianty mají stejnou výslednou kapacitu (200F) i využitelnou energii (140,40kJ) a zároveň disponují 17% energetickou rezervou. Hlavní rozdíly tvoří počet článků, proudová zatížitelnost, rozměr a cena balení.

Varianta s články 600F vyžaduje šest paralelních větví k dosažení požadované kapacity, což činí její konstrukci složitější. Disponuje vyšším vnitřním odporem (7,8 mΩ), což by při častém cyklování způsobovalo větší ztráty a zvyšovalo oteplení. Maximální špičkový proud je 1920A, což je nižší hodnota oproti variantě 2. Výhodou této varianty je nižší hmotnost (14,00kg) a lepší skladnost (13,6l). Nevýhodou je však značně vyšší celková cena (86 484 Kč), což je způsobeno velkým počtem potřebných článků.

Varianta s články 1200F vyžaduje pouze tři paralelní větve, dohromady tedy 54 článků, což z ní dělá konstrukčně jednodušší řešení. Dosahuje nižšího vnitřního odporu (3mΩ), což by vedlo k nižším ztrátám a oteplení v případě častého cyklování. Zároveň dokáže dodat vyšší špičkový proud až o velikosti 2865A. Nevýhodou je vyšší

hmotnost a větší objem. Naopak výhodou je celková cena článků, která je činí pouze 48 816 Kč.

Obě varianty byly prověřeny z hlediska výpočtu oteplení při 6sekundovém pulzu, přičemž došlo pouze k malému nárůstu teploty do 1 °C.

Z komplexního zhodnocení je varianta s články 1200F výhodnější. Disponuje lepšími elektrickým vlastnostmi, jednodušší konstrukcí a značně nižší pořizovací cenou.

Tabulka 5.9 Technické parametry uložště č.6

Parametry	Jednotka	Varianta 1- 600F F/2,7V	Varianta 2- 1200 F/2,7V
Počet článků v sérii	-	18	18
Počet větví paralelně	-	6	3
Celkový počet článků	-	108	54
Napětí max.	V	48	48
Napětí min.	V	30	30
Potřebná kapacita	F	170,94	170,94
Kapacita jedné série	F	33,33	66,67
Výsledná kapacita	F	200,00	200,00
Využitelná energie	kJ	140,40	140,40
Požadavek	kJ	120	120
Rezerva energie	%	17,0	17,0
Celkový ESR	mΩ	7,80	3,00
Výstupní proud při 48 V	A	417	417
Výstupní proud při 34 V	A	666,7	666,7
Max.špičkový proud uložště (1s)	A	1920	2865
Hmotnost uložště	kg	14,00	20,41
Objem uložště	l	13,6	17,2
Cena článku	CZK	773	904
Cena packu	CZK	83484	48816

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá problematikou ultrakapacitorů, jejich vlastnostmi a možnostmi jejich použití. V teoretické části byly popsány principy uchování elektrické energie pomocí elektrické dvojvrstvy a vratné chemické reakce. Byly představeny jednotlivé typy ultrakapacitorů jako jsou EDLC, pseudokondenzátory a hybridní kondenzátory. Součástí bylo také představení klíčových parametrů, které ovlivňují jejich životnost, jako jsou provozní napětí, teplota, proudové zatížení a chemická čistota použitých materiálů. Pozornost byla věnována také problematice spojené se sériovým zapojováním článků a metodám jejich aktivního a pasivního vyvažování. V rámci rešerše byl také proveden průzkum nejčastěji používaných materiálů elektrod. Ten zahrnoval materiály na bázi uhlíku, vodivých polymerů a oxidů kovů. Práce také dodává pohled na možné aplikace od zálohovacích systémů, spotřební elektroniky, přes obnovitelné zdroje, dopravu, až po možnosti využití v jeřábovém systému.

V praktické části byla provedena příprava měřicího pracoviště umožňující měření klíčových parametrů ultrakapacitorů, specificky ekvivalentního sériového odporu a kapacity. Byly zvoleny dvě metody. Měření kapacity bylo provedeno metodou při nabíjení konstantním proudem a odporu pomocí pulzního zatížení. Tyto metody byly použity na předložené vzorky deseti ultrakapacitorů typu EPCOS B49300-G1605-Q ke stanovení jejich míry degradace. Výsledky měření ukázaly, že většina článků vykazovala pouze velmi mírný pokles kapacity. Z hlediska vnitřního odporu nedošlo k žádné významné změně. Články se tedy stále nachází dostatečně pod hranicí maximální hodnoty ESR udávané výrobcem. Tedy z hlediska obou parametrů lze říci, že u článků nedošlo ani po 18 letech k žádné výrazné změně a bylo by možné je nadále bezpečně užívat. Tento stav nasvědčuje předpokladu, že články byly provozovány ve vhodném pracovním napěťovém rozsahu. V původní aplikaci pracovaly v rozmezí od 1 V do 2 V, což znamená, že nedocházelo ani k jejich celému vybíjení, ani přepětí, kdy by byly vystaveny vyššímu napětí, než pro které byly určeny. Zároveň nebyly vystavovány špičkovému proudovému zatížení a následně byly skladovány za poměrně vhodných teplotních podmínek, které by jinak měly značný vliv na degradaci.

Součástí práce byl proveden návrh několika variant kondenzátorových baterií, které byly optimalizovány pro různé výkonnostní požadavky. Byly použity články o velikost kapacit od 600F až po 3400F. V případě porovnání jednotlivých návrhů se ukázalo, že volba samotného typu článku výrazně ovlivní vlastnosti uložistiště, jako je vnitřní odpor (ESR), výstupní proud, objem, hmotnost či cenu. Články s vyšší kapacitou (3000F, 3400F) nabízí jednodušší zapojení, malé ESR a vysokou proudovou zatížitelnost, avšak za cenu vyšší hmotnosti a objemu. Na rozdíl články s menšími kapacitami (600F, 1200F) doručují kompaktnější rozměry, nízkou hmotnost, ale je poté nutné aplikovat větší počet článků a díky tomu je konstrukce složitější. Z hlediska praktické aplikace je nutné zvážit výběr optimální varianty na konkrétních požadavcích dané aplikace.

LITERATURA

- [1] Superkondenzátor - princip, vlastnosti, použití. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2006 [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006122601>
- [2] *Superkondenzátory*. Online. Tzbinfo. 2009. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/6710-superkondenzatory>. [cit. 2024-03-11].
- [3] *Ultracapacitors : future of energy storage*. McGraw Hill Education (India), 2014. ISBN 9789383286713 / 9383286717.
- [4] Jak funguje superkapacitor? *Tzbinfo* [online]. 2018 [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16916-jak-funguje-superkapacitor>
- [5] Ultracapacitors. *ElektronicsTutorials* [online]. [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/ultracapacitors.html>
- [6] S. C. Smith and P. K. Sen, "Ultracapacitors and energy storage: Applications in electrical power system," 2008 40th North American Power Symposium, Calgary, AB, Canada, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAPS.2008.5307299. keywords: {Supercapacitors;Energy storage;Power systems;Hybrid power systems;Large-scale systems;Transportation;Hybrid electric vehicles;Flywheels;Power quality;Power electronics;Energy storage;power qualitydistributed resources;supercapacitor;ultracapacitor;electrochemical capacitor and renewable energy },
- [7] *The Power of Supercapacitor Revealed!*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.bisinfotech.com/the-power-of-supercapacitor-revealed/>. [cit. 2024-03-17].
- [8] *Supercapacitors* [online]. 2022 [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/how-supercapacitors-work.html>
- [9] TECATE GROUP. *Ultracapacitor Technical Guide* [online]. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: https://www.tecategroup.com/downloads/Ultracap_Tech/Ultracapacitor%20Technical%20Guide.pdf
- [10] PAMETÉ, Emmanuel; KÖPS, Lukas; KRETH, Fabian Alexander; POHLMANN, Sebastian; VARZI, Alberto et al. The Many Deaths of Supercapacitors: Degradation, Aging, and Performance Fading. Online. *Advanced energy materials*. 2023, roč. 13, č. 29. ISSN 1614-6832. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/aenm.202301008>. [cit. 2024-03-20].
- [11] SHARMA, Pawan a BHATTI, T.S. A review on electrochemical double-layer capacitors. Online. *Energy conversion and management*. 2010, roč. 51, č. 12, s. 2901-2912. ISSN 0196-8904. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.031>. [cit. 2024-04-03].
- [12] *Renewable & sustainable energy reviews*. Amsterdam: Elsevier. ISSN 1364-0321.
- [13] *Evaluation of Active Balancing Circuits for Supercapacitors*. Online. 2022. Dostupné z: <https://passive-components.eu/evaluation-of-active-balancing-circuits-for-supercapacitors/>. [cit. 2025-04-01].

- [14] Ing. Jiří Libich, Ph.D. *Superkondenzátor vs. baterie: parametry a použití*. Online. Tzbinfo. 2020. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21462-superkondenzator-vs-baterie-parametry-a-pouziti>. [cit. 2024-04-06].
- [15] *EEPOWER* [online]. [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://eepower.com/capacitor-guide/types/supercapacitor/#>
- [16] ZORPETTE, G. Super charged - ultracapacitors. Online. *IEEE spectrum*. 2005, roč. 42, č. 1, s. 32-37. ISSN 0018-9235. Dostupné z: [https://doi.org/10.1109/MSPEC.2005.1377872\(410\)](https://doi.org/10.1109/MSPEC.2005.1377872(410)). [cit. 2025-03-21].
- [17] *A Comprehensive Guide On Ultracapacitor Applications*. Online. Dostupné z: <https://ultrafastcap.com/resources/article-1/a-comprehensive-guide-on-ultracapacitor-applications>. [cit. 2024-04-09].
- [18] KERMANI, Mostafa; PARISE, Giuseppe; CHAVDARIAN, Ben a MARTIRANO, Luigi. Ultracapacitors for Port Crane Applications: Sizing and Techno-Economic Analysis. Online. *Energies (Basel)*. 2020, roč. 13, č. 8, s. 2091. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en13082091>. [cit. 2025-03-19].
- [19] *Unikátní akumulátor: Ve Škodě se instaloval první ultrakapacitor jako efektivní řešení proti výpadkům dodávek elektřiny z distribuční sítě*. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/unikatni-akumulator-ve-skode-se-instaloval-prvni-ultrakapacitor-jako-efektivni-reseni-proti-vypadkum-dodavek-elektriny-z-distribucni-site/>. [cit. 2024-04-09].
- [20] GUERRA, Maria (ed.). *What's the Difference Between Batteries & Supercapacitors?* Online. 2023. Dostupné z: <https://www.batterytechonline.com/components/what-s-the-difference-between-batteries-supercapacitors->. [cit. 2024-04-15].
- [21] *The major differences between supercapacitors and batteries*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.eaton.com/cz/cs-cz/products/electronic-components.html?wtredirect=www.eaton.com/electronics>. [cit. 2024-04-15].
- [22] *Supercapacitor vs Battery - Comparison and Case Study*. Online. 2019. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/tutorial/supercapacitor-vs-battery-comparison-and-case-study>. [cit. 2024-04-15].
- [23] *Supercapacitors vs. Batteries: What's the Difference?* [online]. 2022 [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.howtogeek.com/786195/supercapacitors-vs-batteries-whats-the-difference/>
- [24] SCHWEBER, Bill. *Hybrid Supercapacitors: An Introduction*. Online. Powerelectronicsnews. 2021. Dostupné z: <https://www.powerelectronicsnews.com/looking-at-hybrid-supercapacitors/>. [cit. 2024-06-04].
- [25] IRO, Zaharaddeen S.; SUBRAMANI, C. a DASH, S.S. A Brief Review on Electrode Materials for Supercapacitor. Online. *International journal of electrochemical science*. 2016, roč. 11, č. 12, s. 10628-10643. ISSN 1452-3981. Dostupné z: <https://doi.org/10.20964/2016.12.50>. [cit. 2024-05-01].

- [26] Ahmed Afif, Sheikh MH Rahman, Atia Tasfiah Azad, Juliana Zaini, Md Aminul Islan, Abul Kalam Azad,. *Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage – A review, Journal of Energy Storage*,. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19302610>. [cit. 2024-04-21].
- [27] HE, Xiyue a ZHANG, Xuelai. A comprehensive review of supercapacitors: Properties, electrodes, electrolytes and thermal management systems based on phase change materials. Online. *Journal of energy storage*. 2022, roč. 56, s. 106023. ISSN 2352-152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106023>. [cit. 2024-04-21].
- [28] *Supercapacitors BCAP3400P285K04 2.85V 3400F Electric Double Layer Capacitors EDLC Ultracapacitors BOM Super capacitor*. Online. In: Alibaba.com. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/Supercapacitors-BCAP3400P285K04-2-85V-3400F-Electric_1600949541431.html. [cit. 2025-03-23].
- [29] *What are Different types of Ultracapacitors?* Online. 2024. Dostupné z: <https://www.capacitorconnect.com/what-are-different-types-of-ultracapacitors/>. [cit. 2025-04-24].
- [30] 11 - Supercapacitors: a review on electrode materials and models based on conjugated polymers. In: *Conjugated Polymers for Next-Generation Applications*. Volume 2. Woodhead Publishing, 2022, s. 335-365. ISBN 9780128240946.
- [31] PANDOLFO, A.G. a HOLLENKAMP, A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors. Online. *Journal of power sources*. 2006, roč. 157, č. 1, s. 11-27. ISSN 0378-7753. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.02.065>. [cit. 2024-05-01].
- [32] FOROUZANDEH, Parnia; KUMARAVEL, Vignesh a PILLAI, Suresh C. Electrode Materials for Supercapacitors: A Review of Recent Advances. Online. *Catalysts*. 2020, roč. 10, č. 9, s. 969. ISSN 2073-4344. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/catal10090969>. [cit. 2024-05-01].
- [33] DVOŘÁK, Petr. *Materiály pro superkondenzátory*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [34] PHOR, Lakshita; KUMAR, Ashok a CHAHAL, Surjeet. Electrode materials for supercapacitors: A comprehensive review of advancements and performance. Online. *Journal of energy storage*. 2024, roč. 84. ISSN 2352-152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110698>. [cit. 2024-06-03].
- [35] *Cyclic Voltammetry Basic Principles and Theory*. Online. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/cyclic-voltammetry>. [cit. 2024-10-27].
- [36] SHARMA, Swati a CHAND, Prakash. Supercapacitor and electrochemical techniques: A brief review. Online. *Results in Chemistry*. 2023, roč. 5, s. 100885. ISSN 2211-7156. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100885>. [cit. 2024-10-27].

- [37] UNIVERZITA PARDUBICE FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ ÚSTAV ORGANICKÉ CHEMIE A TECHNOLOGIE. *CYKLICKÁ VOLTAMETRIE V KOSTCE*. Online. Dostupné z: https://bures.upce.cz/OOS%20slides/mk_CV.pdf. [cit. 2024-10-28].
- [38] ELGRISHI, Noémie; ROUNTREE, Kelley J; MCCARTHY, Brian D; ROUNTREE, Eric S; EISENHART, Thomas T et al. A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry. Online. *Journal of chemical education*. 2018, roč. 95, č. 2, s. 197-206. ISSN 0021-9584. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>. [cit. 2024-10-28].
- [39] *Impedance – jak ji vypočítáme a proč je důležitá?* Online. 2024. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/57276/impedance-jak-ji-vypocitame-a-proc-je-dulezita/>. [cit. 2025-01-09].
- [40] LAZANAS, Alexandros Ch a PRODRONIDIS, Mamas I. Electrochemical Impedance Spectroscopy – A Tutorial. Online. *ACS measurement science au*. 2023, roč. 3, č. 3, s. 162-193. ISSN 2694-250X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>. [cit. 2024-11-09].
- [41] PINE RESEARCH. *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Basics*. Online. 2023. Dostupné z: <https://pineresearch.com/shop/kb/theory/eis-theory/eis-basics/>. [cit. 2024-11-09].
- [42] TATARKOVIČ, Michael; BRONCOVÁ, Gabriela a KRONĎÁK, Martin. *ELEKTROIMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE A JEJÍ VYUŽITÍ V CHEMICKÉ ANALÝZE*. Online. *Chemické listy*. 2012. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_11_1067-1074.pdf. [cit. 2024-11-12].
- [43] *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. Online. Dostupné z: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Insulators/Electrochemical_Impedance_Spectroscopy](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Insulators/Electrochemical_Impedance_Spectroscopy).
- [44] *What is Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)? Electrochemistry Basics Series*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.biologic.net/topics/what-is-eis/>. [cit. 2024-11-09].
- [45] KALINA, Emil. *Aplikace ultrakapacitorů v dopravních systémech*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008.
- [46] TATARKOVIČ, Michael; BRONCOVÁ, Gabriela a KRONĎÁK, Martin. *ELEKTROIMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE A JEJÍ VYUŽITÍ V CHEMICKÉ ANALÝZE*. Online. *Chemické listy*. 2012. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_11_1067-1074.pdf. [cit. 2024-11-12].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
EDLC	Elektric Double Layer Capacitor
NEC	Nippon Electric Company
ESR	Ekvivalentní sériový odpor
SoC	Stav nabití (z anglického State of charge)
li-ion	Lithium iontový akumulátor
PWM	Pulsně šířková modulace
IoT	Internet of Things
UPS	Zdroj nepřerušovaného napájení (z anglického Uninterruptible Power Supply/Source)
NiO	oxid nikelnatý
MnO ₂	oxid mangančitý
RuO ₂	oxid rutheničitý
IrO ₂	oxid iridičitý
ZnO	oxid zinečnatý
EIS	Elektrochemická impedanční spektroskopie
SEI	Solid Electrolyte Interphase

Symboly:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
C	kapacita	(F)
ε	permitivita	(-)
S	plocha	(m ²)
d	šířka	(m)
E	energie	(J)
Q	náboj	(C)
T	perioda	(s)
z	střída	(-)
t_z	doba sepnutí	(s)
t	teplota	(°C)
Z	impedance	(Ω)
L	indukčnost	(H)
$U_{počáteční}$	napětí na konci nabíjení ultrakapacitoru	(V)
$U_{počáteční}$	napětí na počátku nabíjení ultrakapacitoru	(V)

ESR	<i>vnitřní odpor</i>	(Ω)
ΔU	pokles napětí na ultrakapacitoru	(V)
ΔI	proud v obvodu při impulsu	(A)
U_R	jmenovité napětí ultrakapacitoru	(V)
C_R	jmenovitá kapacita ultrakapacitoru	(F)
I_C	jmenovitý proud ultrakapacitoru	(A)
E	uložená energie v ultrakapacitoru	(J)
ESR_{max}	Max. sériový odpor ultrakapacitoru	(Ω)
$U_{bočník}$	napětí na bočníku	(V)
U_{max}	maximální napětí uložistě	(V)
U_{min}	spodní hranice napětí uložistě	(V)
n_s	počet ultrakapacitorů v sérii	$(-)$
$C_{série}$	kapacita jedné sériově větve	(F)
$C_{celková}$	výsledná kapacita uložistě	(F)
$R_{ESR,celkem}$	celkový vnitřní odpor uložistě	(Ω)
$m_{článků}$	hmotnost jednoho článku	(kg)
m_{packu}	celková hmotnost uložistě	(kg)
k_m	činitel hmotnosti	$(-)$
$V_{článku}$	objem jednoho článku	(l)
V_{packu}	celkový objem uložistě	(l)
k_v	činitel plnění objemu	$(-)$
d	průměr ultrakapacitoru	(m)
h	výška ultrakapacitoru	(m)