

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Využití superkapacitorů pro napájení elektrokola**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radim KOŘÍNEK**  
Osobní číslo: **E12B0110P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Využití superkapacitorů pro napájení elektrokola**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte literární rešerši na danou problematiku.
2. Porovnejte superkapacitory s ostatními zařízeními pro skladování energie.
3. Navrhněte systém pro využití superkapacitorů pro napájení jízdního elektrokola.
4. Proveďte srovnání napájení se superkapacitory s běžně používanými zdroji.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. YU, Aiping. Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery: fundamentals and applications. Boca Raton, FL: Taylor, 2013, p. cm. ISBN 978-143-9869-895.
2. CONWAY, B. Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications [online]. New York: Plenum Press, c1999, xxviii, 698 p. ISBN 03-064-5736-9.
3. internet

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Zigler  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014  
Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015

  
Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na princip funkce superkapacitoru stejně jako na materiály používané pro jejich výrobu. V práci jsou také porovnány superkapacitory s ostatní zařízení pro skladování elektrické energie.

Praktická část práce je zaměřena na systém jízdního elektrokola. Zde jsou vysvětleny hlavní komponenty elektrokola a je navržen systém využívající pro napájení superkapacitorovou baterii.

V závěru práce jsou shrnuty poznatky a je provedeno srovnání napájení superkapacitory s běžně používanými zdroji.

## **Klíčová slova**

Superkapacitor, aktivní uhlík, Li-ion baterie, setrvačníky, palivové články, elektrokolo, BLDC motor,

## **Abstract**

This bachelor thesis is aimed at the principle of the supercapacitor function and materials used for their manufacture. In the thesis there are also compared supercapacitors with other devices for storing electric energy.

The practical part of the thesis is aimed at the system of an electric bike. The author explains the key components of the electric bike and designs a system using a supercapacitor battery as power supply.

In the conclusion the author sums up his findings and compares supplying supercapacitors with normally used sources.

## **Key words**

Supercapacitor, active carbon, Li-ion battery, flywheel, fuel cell, electric bicycle, BLDC motor

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2015

Radim Kořínek

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>1 SUPERKAPACITORY .....</b>	<b>10</b>
1.1 HISTORIE .....	11
1.2 PRINCIP ČINNOSTI .....	11
1.3 SPOJOVÁNÍ SUPERKAPACITORŮ .....	12
1.4 NÁHRADNÍ SCHÉMA SUPERKAPACITORU.....	15
1.5 MATERIÁLY PRO SUPERKONDENZÁTORY .....	17
1.5.1 Uhlíkové saze .....	18
1.5.2 Uhlíkové tkaniny a vlákna.....	20
1.5.3 Uhlíkové nanotrubičky (CNT) .....	20
1.5.4 Uhlíkové aerogely .....	20
1.6 APLIKACE SUPERKAPACITORŮ V DOPRAVĚ.....	21
<b>2 OSTATNÍ ZAŘÍZENÍ PRO SKLADOVÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE .....</b>	<b>23</b>
2.1 ELEKTROCHEMICKÉ BATERIE .....	23
2.2 SETRVAČNÍKY .....	26
2.3 PALIVOVÉ ČLÁNKY .....	27
2.4 SPALOVACÍ MOTORY .....	29
2.5 TECHNICKÉ PARAMETRY SYSTÉMŮ.....	29
<b>3 SYSTÉM JÍZDNÍHO ELEKTROKOLA .....</b>	<b>31</b>
3.1 NÁVRH SYSTÉMU JÍZDNÍHO ELEKTROKOLA NAPÁJENÉHO SUPERKAPACITORY .....	34
3.2 BLDC MOTOR .....	34
3.2.1 Konstrukční prvky BLDC.....	36
3.2.2 Řízení BLDC motoru.....	37
3.2.3 Superkondenzátorová baterie .....	38
3.2.4 Řídící jednotka .....	38
3.2.5 Ovládání akcelerace a regenerativního brzdění a LCD panel se signalizací .....	40
3.2.6 Nabíjecí stanice.....	40
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>41</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>43</b>

## Seznam symbolů a zkratk

R.....	Rezistor
C.....	Kondenzátor, superkapacitor
U.....	Napětí [V]
i .....	Proud [A]
Q.....	Nábor [C]
CNT .....	Uhlíkové nanotrubičky
Li-ion .....	Lithium-iontové akumulátory
Li-pol .....	Lithium-polymerové akumulátory
Ni-Cd .....	Nikl-kadmiové akumulátory
NaS.....	Sodíko-sulfidový akumulátor
Li-pol .....	Lithium-polymerové baterie
Kč.....	Koruna česká
\$ .....	Americký dolar
PEMFC .....	Polymerní membrána
BLDC.....	Bezkartáčový stejnosměrný motor
SS.....	Stejnosemné



## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na vysvětlení principů funkce superkondenzátorů a ostatních systémů pro skladování elektrické energie. V práci jsou porovnány jednotlivé typy zařízení a jsou vysvětleny jejich výhody pro daný obor použití i jejich nevýhody. Zároveň je podrobně rozebrán vývoj superkapacitorů a přiblížena technologie pro jejich výrobu.

V praktické části práce je představen návrh systému jízdního elektrokola napájeného superkapacitory a porovnání jeho parametrů s elektrokoly využívající jako zdroj elektrické energie elektrochemický akumulátor. Využívání elektrokola jako dopravního prostředku funguje bez vytváření škodlivého oxidu uhličitého a je to tedy ekologicky šetrný způsob dopravy. Superkapacitory založené na uhlíku jsou, na rozdíl od baterií, v přírodě volně rozložitelné a ani technologie výroby nezpůsobuje oproti chemickým zdrojům téměř žádné znečištění prostředí. Toto téma je v současné době, kdy se za každou cenu snažíme najít nejefektivnější a nejekologičtější způsoby napájení elektromobilů, velice aktuální.

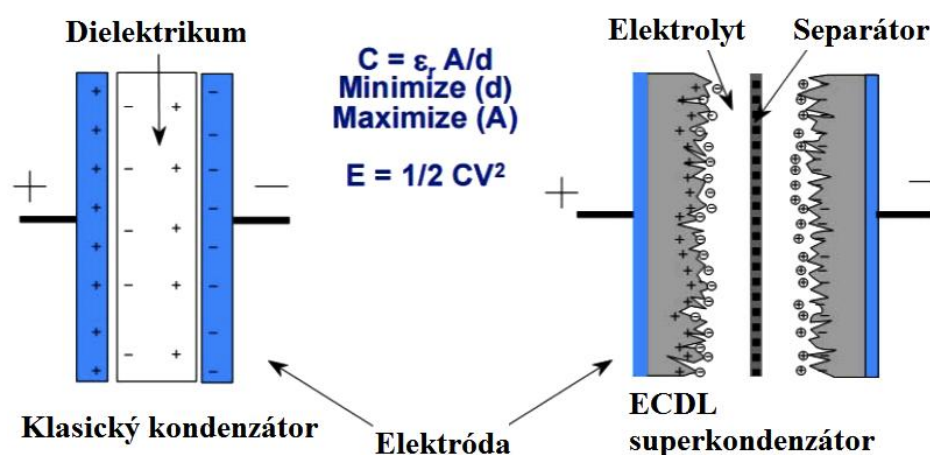
Text je rozdělen na tři části; první část se zabývá vysvětlením principu superkapacitoru, historie jeho vývoje a technologie využívaná pro jeho výrobu.

Druhá část obsahuje vysvětlení funkčních principů ostatních zařízení určených pro skladování elektrické energie a porovnání elektrických vlastností.

Ve třetí části je navržený systém jízdního elektrokola, využívající pro napájení svého elektromotoru právě superkapacitory.

# 1 Superkapacity

Superkapacity, či také superkondenzátory nebo ultrakapacity jsou novou generací kondenzátorů, které díky své konstrukci převyšují kapacitu běžných kapacitorů až na stovky i tisíce Faradů. Stejně jako u kondenzátorů tak i v případě superkapacitoru je velikost jeho kapacity přímo úměrná ploše elektrod, nepřímo úměrná jejich vzdálenosti a je závislá na vlastnostech použitého dielektrika. Existuje více typů materiálů elektrod s velkým měrným povrchem, které lze využít pro výrobu elektrod. U většiny komerčně dostupných superkapacitorů se jedná o aktivní uhlík, který je nanesen ve formě aerogelu na hliníkovou fólii.[1] Takto připravené elektrody jsou poté odděleny tenkým separátorem, který má schopnost propouštět ionty. Každá elektroda tvoří společně s vrstvou iontů v elektrolytu samostatný kapacitor, tento útvar se nazývá elektrická dvojvrstva. V odborné literatuře se můžeme setkat s názvem elektrochemický dvouvrstvý kondenzátor (EDLC – electrical double layer capacitor). Tento princip je znázorněn na Obr.1. Jelikož plocha uhlíkových elektrod je v řádů tisíců  $\text{m}^2/\text{cm}^3$  a průměr iontů je v řádech nm, pohybuje se kapacita superkondenzátorů v řádech tisíců farad a značně převyšuje kapacitu běžného kondenzátoru.[1]



Obr 1 Struktura běžného kondenzátoru (vlevo) a superkondenzátoru (vpravo)  
(převzato z [1])

## 1.1 Historie

Superkondenzátor byl vyvinut v Americe firmou General Electric v roce 1957.[2] Inženýři experimentovali se zařízením, jež obsahovalo porézní uhlíkové elektrody. Objevili, že náboj, uložený v uhlíkových pórech, vykazoval mimořádně vysokou hodnotu kapacity. V té době byl však mechanismus uložení náboje neznámý a vývojový tým zmíněné společnosti od výzkumné činnosti ustoupil. Až v roce 1966 společnost „Standard Oil of Ohio“ vynalezla moderní verzi takového zařízení, a to po náhodném znovuobjevení superkondenzátorového efektu při výzkumu palivového článku. Ani tato zmíněná společnost však nedokázala reálně zkonstruovat komerčně úspěšnou verzi kapacitoru a proto přistoupila k prodeji licence na použití technologie jiné společnosti. V srpnu roku 1978 NET Corporation představila a uvedla na trh výsledný komerční produkt s ochrannou známkou „Supercap<sup>TM</sup>“.[2] Tento nový produkt využíval principu uložení elektrického náboje v elektrické dvojvrstvě ve velmi velké povrchové oblasti uhlíku. Trh pomalu rostl, až do roku 1990 kdy objevy v oblasti nových materiálů umožnily zvýšení výkonu a stejně tak snížení výrobních nákladů. [2] V současné době se trh nadále dynamicky rozvíjí spolu s novými objevy v oblasti nanotechnologie.

## 1.2 Princip činnosti

Superkapacitor uchovává energii na velmi podobném principu jako klasický deskový kondenzátor, kde elektricky nevodivá vrstva navzájem odděluje elektrody, mezi kterými vzniká trvalé elektrické pole.[4] Jeho výsledná kapacita je závislá na vzdálenosti elektrod, použitém dielektriku a na ploše elektrod. Hlavní rozdíl je právě v ploše elektrod. Superkapacitor má elektrody z elektricky vodivého pórovitého uhlíku s velmi specifickou plochou nazývané „aktivní uhlíkové elektrody“. Tyto elektrody jsou od sebe odděleny separátorem z papíru, skelné tkaniny eventuálně polymeru a jsou umístěny v elektricky vodivé tekutině „elektrolytu“, který zaplní póry uhlíku.[4]

Princip uložení náboje v superkondenzátoru je elektrostatický. Jedná se o vytvoření elektrochemické dvojvrstvy po přiložení napětí na elektrody ponořené v elektrolytu. V nenabitém stavu jsou ionty (částice s nenulovým nábojem) v elektrolytu rozmístěny rovnoměrně. Po přiložení napětí se částice s kladným nábojem přesunou směrem k záporné elektrodě a částice záporně nabitě ke kladné elektrodě.[5] Tím dojde k vytvoření elektrochemické dvojvrstvy s navzájem inverzním rozložením náboje. Přiložené napětí je

omezeno disociačním napětím, tedy napětím, při jehož překročení dojde k průrazu elektrolytu. Při překročení tohoto napětí dochází v elektrolytu k chemickým reakcím, jež mají za následek vývin vzduchu, který může vést ke zničení superkapacitoru. Toto napětí je u vodných elektrolytů standardně okolo hodnoty 1,2 V a u elektrolytů na bázi organických rozpouštědel mezi 2 až 3 V.[4] Jak je ze samotného principu patrné, u superkapacitorů na rozdíl od baterií, dochází pouze k posunu iontů elektrolytu v elektrickém poli. Nedochozí zde k žádné látkové výměně jako je tomu u baterií a proto je životnost superkapacitorů udávána v milionech cyklů opakovaného nabíjení. [4]

- ***Pseudokapacitory***

Na rozdíl od ELDC využívají vratných chemických oxidačně-redukčních reakcí na povrchu elektrody. Princip uchování energie je podobný bateriím a elektrická energie je tedy uložena chemicky. Hlavním rozdílem je tedy použití materiálu na elektrody. První elektroda bývá často tvořena uhlíkovými sazemi a druhá vodivými polymery (polyanilin, polypyrol) a oxidy kovů ( $\text{MnO}_2$ ,  $\text{RuO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ). Pseudokapacitor je mezičlánkem mezi superkapacitorem a baterií a tím pádem přebírá výhody a nevýhody obou technologií. Během vybíjení a nabíjení dochází díky rozměrovým změnám elektrod ke stárnutí. V porovnání s ELDC mají pseudokapacitory nižší účinnost nabíjení a delší časovou odezvu, na druhou stranu vynikají velmi vysokou kapacitou. [20]

### **1.3 Spojování superkapacitorů**

Superkapacitory lze spojovat jak sériově tak paralelně. Pro dosažení vyššího napětí se články se spojují sériově. Toto zapojení však přináší nevýhodu ve zmenšení kapacity, kdy je výsledná kapacita menší než kapacita kteréhokoli z použitých superkapacitorů. Protože každý superkapacitor má malou toleranci kapacity a odporu, je nutné vybalancovat každý superkapacitor, aby nebyla překročena jeho jmenovitá hodnota napětí. Toho lze dosáhnout aktivním nebo pasivním balancováním.

- **Aktivní balancování**

V případě nutnosti připojuje komparátor vybíjecí odpor na svorky superkapacitoru, vyrovnává tím napětí na jednom, nebo dvěma sousedními prvky. Toto řešení je nutné použít v aplikacích, kde dochází k rychlému střídání nabíjecích a vybíjecích cyklů, např. pohon vozidla.[27]

- **Pasivní balancování**

Nejčastější způsob balancování, založený na použití rezistoru. Odporového vyvážení je dosaženo připojením rezistoru paralelně k superkapacitoru. Velikost tohoto odporu se určuje s požadavkem na rychlost vyrovnání napětí (tato doba se může pohybovat v řádech hodin či dnů) a je také závislá na svodovém proudu kapacitoru. Tento způsob se používá v aplikacích s nízkou dynamikou výměny elektrické energie. Nevýhodou tohoto řešení jsou zvýšené ztráty a snížená účinnost.[27]

Určení správného počtu superkapacitorů je závislé na konkrétní aplikaci. Každá aplikace má rozhodující faktory, kterými se musíme řídit. Patří mezi ně maximální i minimální napětí, velikost výkonu, velikost proudových nebo výkonových špiček a také teplota. Všechny tyto faktory je nutné zohlednit při návrhu modulu se superkapacitory.

Velikost výsledného napětí se řídí následujícím vztahem:(1)

$$U = U_1 + U_2 = Q \times \left( \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) = \frac{Q}{c} \quad (1)$$

Pro výslednou kapacitu baterie s počtem  $n$  superkapacitorů platí:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{c_k} \quad (2)$$

V paralelním zapojení se při stejném provozním napětí zvyšuje kapacita a spojením se vytváří superkapacitor s větší účinnou plochou. Pro výslednou kapacitu při paralelním spojení  $n$  superkondenzátorů platí:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{k=1}^n C_k \quad (3)$$

Jako u všech zdrojů velkých proudů, platí i u superkapacitorů dané zásady. Je nutné zajistit malý elektrický odpor všech vodivých spojení a dobrou mechanickou pevnost spojů, která odolá jak mechanickým otřesům, tak i tepelné roztažnosti. [5]

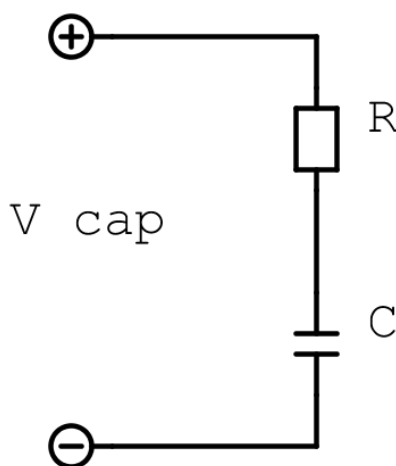
**Zásady, které je třeba dodržovat při spojování superkapacitorů[27]:**

- **Ošetření povrchu spojů**  
Jelikož oxidace má vliv na odpor spojů, měly by tyto spoje být ošetřeny elektrickou vodivou pastou
- **Nízký odpor spojů**  
Povrch spojovaných dílů musí být čistý a šroubové spoje dostatečně dotažené. Kontaktní plocha by měla být co největší
- **Plocha propojovacích vodičů**  
Plocha propojovacích vodičů musí být navržena na největší očekávané proudy s koeficientem bezpečnosti 1,5. Takto jsou spoje dimenzovány proti případnému zkratu.
- **Tepelná roztažnost**  
Musí být dodrženy zásady spojování dvou materiálů s různou tepelnou roztažností, aby nedocházelo k povolování spojů a následnému zvětšování elektrického odporu. S rostoucím ohřevem by docházelo ke zhoršení parametrů superkondenzátoru.
- **Elektrická izolace**  
Materiál a tloušťka přídavné izolace mezi superkondenzátory musí být navržena s ohledem na jejich pracovní napětí.
- **Galvanická koroze spojů**  
Aby nedocházelo ke korozi vlivem různých elektrochemických potenciálů obou materiálů, doporučuje se pro spojování superkapacitorů volit materiál s co nejmenší galvanickou aktivitou proti hliníku.
- **Mechanické namáhání**  
Aby se zabránilo poškození izolace, spoje i celá konstrukce musí být navržena tak, aby dokázala minimalizovat případné mechanické namáhání od různých nárazů a chvění.

## 1.4 Náhradní schéma superkapacitoru

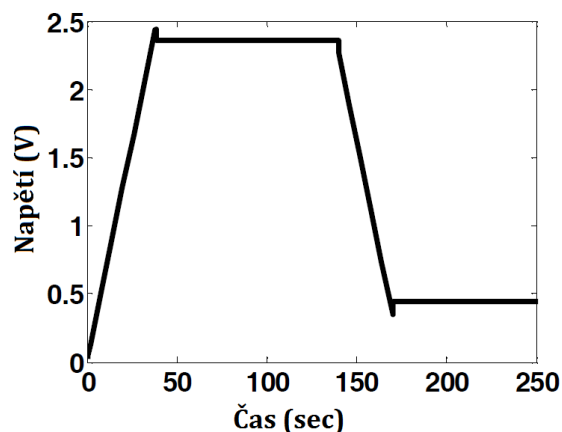
Jelikož i superkapacitory jsou elektrochemická zařízení, jejich náhradní model není možné naprosto přesně definovat. Aby bylo plně využito potenciálu superkapacitorů, je důležité při konstruování nebo vývoji jednotlivých produktů, znát veškeré jeho unikátní vlastnosti. V posledních letech začaly být superkapacitory široce využívány a bylo navrženo hned několik náhradních schémat. V literatuře se dají dohledat tři základní modelovací přístupy: matematický model, model elektrického obvodu a ostatní neelektrické modely. Každý z modelovacích přístupů má své výhody a nevýhody. Matematický model postupuje skrze komplikované výpočty a obsahuje velké množství parametrů, které musí být velmi přesně definovány. Navíc tento model obvykle nemá žádný vysloveně fyzikální význam, nejde ho tudíž zahrnout do schématu elektrického zapojení. Níže se tedy zaměříme pouze na základní elektrický model, který je v praxi nejčastěji používán.

Nejjednodušší náhradní schéma superkapacitoru obsahuje pouze jednu RC větev. Na *Obr.2* je jednoduchý model superkapacitoru. Tento obvod je složen z rezistoru  $R$ , obvykle nazývaného ekvivalentní sériový odpor, který představuje ohmické ztráty a kondenzátoru  $C$ , který simuluje kapacitu superkondenzátoru během nabíjení a vybíjení.[34]



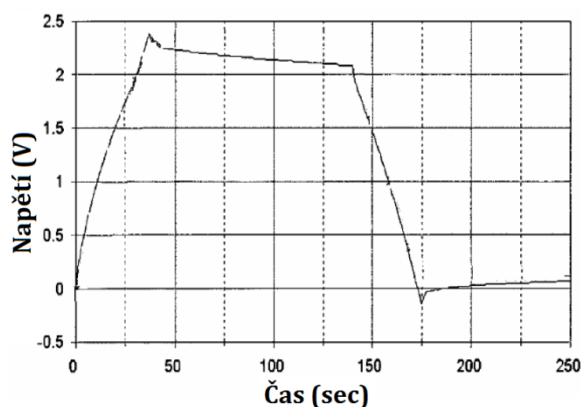
*Obr. 2 Jednoduchý model superkapacitoru (převzato z [34])*

*Obr.3* ukazuje výsledky simulace jednoduchého RC modelu. Nabíjecí i vybíjecí proud je na konstantních 30 A. Kapacita kondenzátoru je 470F s jmenovitým napětím 2,5 V. Ohmické ztráty představuje 2,5 m $\Omega$  náhradní odpor.



Obr. 3 Simulace průběhu napětí při nabíjení a vybíjení konstantním proudem (převzato z [34])

Na obr.4 je zobrazen výsledný průběh experimentálního měření napětí superkapacitoru. Jmenovité napětí superkapacitoru je 2,5 V. Nabíjecí a vybíjecí proud 30 A je během nabíjecího a vybíjecího procesu konstantní.



Obr. 4 Experimentální měření napětí superkondenzátoru při nabíjení a vybíjení konstantním proudem (převzato z [34])

Porovnáním výsledků simulace a experimentálního měření, je patrné že jednoduchý RC model má několik výhod i nevýhod. Zásadní výhodou je jednoduchost modelu, tudíž není problém ho zahrnout do elektrického schématu a provádět s ním přímé výpočty. Tento model však nedokáže zachytit nelineární nárůst a pokles napětí superkapacitoru a také změnu napětí po té, co dojde k přerušení nabíjení nebo vybíjení. Přesnější modely superkapacitoru lze rozdělit do tří základních tříd: model s paralelní RC větví, RC model přenosového vedení a RC model se sérioparalelní větví. Každá třída může být dále rozšířena tak, aby obsahovala oba lineární a navíc i oba nelineární prvky. Lineární model obsahuje konstantní rezistory a kondenzátory a zároveň obsahuje nelineární rezistor a kapacitor, které mohou být funkcí teplotní závislosti elektrolytu na svorkovém napětí.[34]



## 1.5 Materiály pro superkondenzátory

Základními požadavky na elektroodový materiál je co největší elektrická vodivost, velký a využitelný povrch, možnost difuze iontů strukturou, netoxičnost, chemická a tepelná stabilita, dlouhá životnost a velká kapacita. Ze všech známých materiálů je aktivní uhlík v jeho speciálních formách jediným, který splňuje všechny požadavky. Většina komerčních kondenzátorů typu EDLC tedy v současnosti používá především uhlíkové materiály. Díky nim superkondenzátory dosahují vysokých kapacit a vysokých hodnot měrných výkonů. Dále jsou podrobněji popsány nejčastěji používané materiály. Pro přesnější popis je potřeba použít detailnější náhradní modely.

- **Uhlíkové materiály**

Zájem o to, využívat uhlík jako elektroodový materiál vyplývá z jeho jedinečných chemických a fyzikálních vlastností, velký podíl hraje také nízká cena. Uhlík je materiál s vysokou vodivostí, měrným povrchem větším než  $2000\text{m}^2\text{g}^{-1}$ . [5] Uhlík má dobrou odolnost vůči korozi a je stálý i při vysokých teplotách. Právě vodivost a měrný povrch jsou podstatné vlastnosti při výrobě elektrod. Nyní už dokážeme vhodným technologickým postupem tyto vlastnosti upravovat a optimalizovat. Použité uhlíkové materiály ovlivňují způsob uchování elektrické energie a také použitý elektrolyt. [5]

Uhlíkové elektroodové materiály musí splňovat následující požadavky [5]:

- Vysoká měrná plocha
- Dobrá elektrická vodivost jednotlivých uhlíkových částic v řádech  $1000\text{m}^2/\text{g}$
- Dobrá smáčivost uhlíkových materiálů a přístupnost elektrolytu do pórů
- Vysoká čistota uhlíkového materiálu

Při dodržení všech požadavků dostaneme elektrody s velkým povrchem, malým elektrickým odporem a celým povrchem v kontaktu s elektrolytem.

### 1.5.1 Uhlíkové saze

První skupinou uhlíkových materiálů jsou aktivované uhlíkové saze. Jejich výroba probíhá spalováním organických látek bohatých na kyslík v inertní atmosféře. Základními materiály jsou ropné produkty, uhlí a dřevo. Saze jsou tvořeny malými částicemi sférického tvaru. Z mikroskopického hlediska se jedná o neuspořádanou grafenovou strukturu. Makroskopicky jde o amorfni materiál[5]. Teprve aktivací uhlíkových sazí je dosaženo velkého povrchu. Povrch aktivních uhlíkových sazí se pohybuje v hodnotách  $<10$  až  $1500\text{m}^2/\text{g}$  v závislosti na porositě částic, které je dosahováno právě aktivací[8].

- **Aktivace uhlíku**

Jednou z vlastností, díky kterým je uhlík vhodný pro výrobu elektrod, je jeho velký měrný povrch, avšak k dosažení optimálních vlastností je potřeba surový uhlík upravit a vytvořit tak aktivní uhlík. V procesu aktivace uhlíku jde o to, vyčistit dutinové póry od neuspořádaných uhlíkových zbytků (dehtu) které vyplňují póry.[4] Aktivace tyto dutiny otevírá a zároveň umožňuje vytvoření dalších. Podmínky aktivace (teplota, čas a plynné prostředí) umožňují řídit výslednou pórovitost, velikost průduchů a celkovou povahu vnitřního rozložení. Existují dva hlavní způsoby aktivace uhlíku a to tepelná nebo chemická. [4]

**Tepelná aktivace** způsobuje přeměnu dřevěného uhlí řízeným spalováním v přítomnosti oksyločených plynů, jako jsou pára, vzduch nebo oxid uhličitý v rozsahu  $700$  až  $1000^\circ\text{C}$ . Během procesu spalování oksyločená atmosféra výrazně zvyšuje množství pórů a tím i měrný povrch materiálu. Úroveň spalování je závislá na celkové délce aktivace.[5] Vysokého stupně aktivace lze dosáhnout nárůstem spalování, tato dodatečná aktivita se však může projevit na celkové pevnosti materiálu, celkové hustotě a velikosti dutin.[5]

**Chemická aktivace** se provádí za teplot mezi  $400$  až  $700^\circ\text{C}$  a zahrnuje vysoušení určitých chemických látek, jako jsou hydroxid draselný, kyselina fosforečná nebo chlorid zinečnatý. Po této proceduře je třeba provést po-aktivační proces, aby se odstranily zbytkové reagující složky stejně jako anorganické zbytky. [5]

- **Porozita uhlíku**

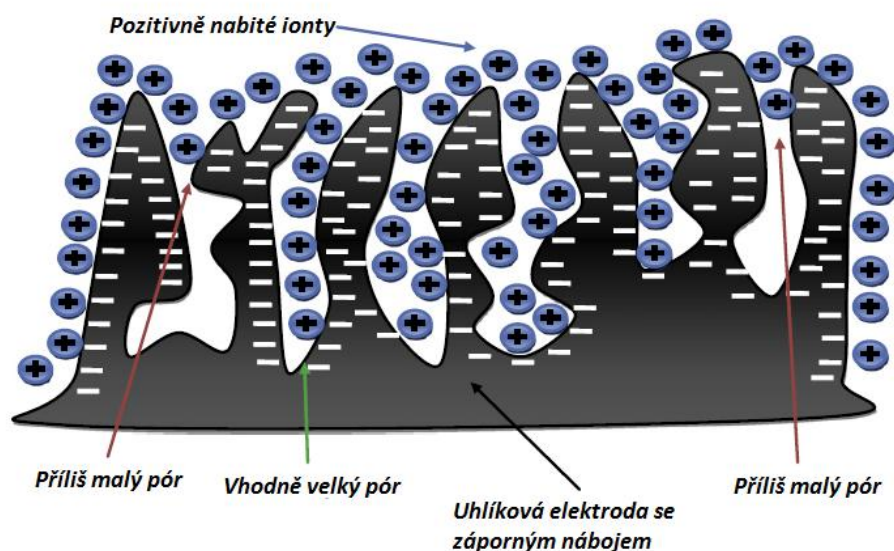
Porézní látkou je pevná látka s póry, které mají větší hloubku než šířku. Porozita se definuje jako poměr objemu pórů na celkový objem pevného materiálu. Pórovité uhlíky se vyznačují velkým měrným povrchem v rozsahu od 500 do 3000m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>. [7] Právě z porozity vyplývá tento měrný povrch. Firma IU/AC (International Union of Pure and Applied Chemistry) klasifikuje póry do třech tříd:

- **Mikropóry (průměr menší než 2nm)**
- **Mezopóry (průměr mezi 2 až 50nm)**
- **Makropóry (průměry větší než 50nm)**

Mikropóry mají díky své velké objemové hustotě hlavní zastoupení v celkovém měrném povrchu aktivního uhlíku. [5] Průměr pórů na molekulární úrovni hraje důležitou roli absorpčně založených procesech. Aktivní uhlíky s velkým zastoupením mikropórů mají vynikající absorpci.

Mezopóry obdobně přispívají k celkové velikosti měrného povrchu a jejich větší velikost zároveň zlepšuje schopnost absorbentu poskytovat širší přenos pórů pro difúzi. [5]

Makropóry celkově příliš nepřispívají k celkovému měrnému povrchu a jejich hlavní funkcí je přenos uvnitř uhlíku. [5]



Obr. 5 Znárodnění elektrodového materiálu s různou velikostí pórů (převzato z [12])

### 1.5.2 Uhlíkové tkaniny a vlákna

Dalším typem materiálu jsou aktivní uhlíkové tkaniny a vlákna. Tento druh materiálu už nepotřebuje pojivo a může být použit přímo jako elektrodový materiál. Jeho výhodou je velká konduktivita (200–1000 S/cm). Vyrábí se z vláken celulózy či bavlny nebo z polyakrylonitrilu. Jelikož je jejich výroba nákladná a co do plochy se vyrovnají aktivním uhlíkovým sazím, vlákna a tkaniny se pro použití v superkondenzátorech příliš neuplatňují. [9],[10],[11]

### 1.5.3 Uhlíkové nanotrubicice (CNT)

Uhlíkové nanotrubicice jsou tvořeny grafenovou vrstvou srolovanou do tvaru dutého válce a jejich průměr může být od 1 do 10 nm a délka řádově desítky mikrometrů až jednotky milimetrů. [5] Stejně jako u tuhy a fullerenů, atomy uhlíku tvoří v grafenu šestiúhelníkovou síť. Kromě jedностěnných trubic existují také víceštěnné, které jsou tvořeny několika pevně a těsně do sebe vsunutými nanotrubicemi. [5]

CNT se vyrábějí katalytickým rozkladem nejjednodušších uhlovodíků, mezi největší přednosti patří jejich velký měrný povrch a dobrá elektrická vodivost. I přes tyto vlastnosti se však kapacita elektrody tvořené nanotrubicemi pohybuje pouze od 15 F/g do 80 F/g při povrchu elektrody od 120 do 200 m<sup>2</sup>/g. Jako důvod se udávají extrémní hydrofobní vlastnosti CNT. [5]

CNT jsou jedním z mechanicky nejpevnějších materiálů, jejich vysoká pevnost, tuhost a pružnost jim definuje ideální mechanické vlastnosti, které se zúročí při výrobě nanokompozitních materiálů pro široké spektrum použití v letectví, kosmickém průmyslu nebo medicíně.[12]

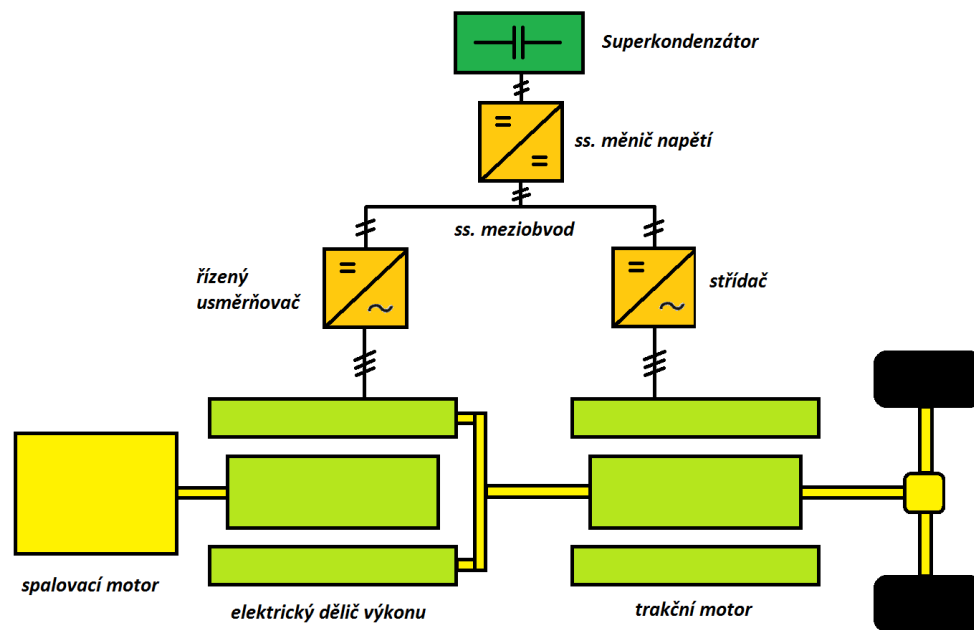
### 1.5.4 Uhlíkové aerogely

Uhlíkový aerogel je unikátní materiál s nízkou hustotou, který vzniká z normálního gelu náhradou kapalné složky vzduchem. Jedná se o monolitickou 3-D porézní síť složenou z nanočástic. Aerogely mají kontrolovatelnou strukturu pórů od 2 do 50 nm a specifickou plochu od 400 do 1000m<sup>2</sup>. [5] Takto nízká plocha je způsobena vzájemně propojenou pórovitou strukturou. Uhlíkové aerogely se připravují ztuhnutím koloidní suspenze, například z formaldehydu a dihydroxyfelonu. V odborné literatuře se hovoří o kapacitě v rozmezí 50 až 100 F/g[5]. V současných moderních superkapacitorech z aerogelu, jsou elektrody vyráběny z

netkaného papíru z uhlíkových vláken a pokryté aerogelem. Papír, jako kompozitní materiál poskytuje strukturální integritu a aerogel poskytuje požadovaný povrch. Kapacita takových superkondenzátorů může být až v řádech tisíců Faradů.

## 1.6 Aplikace superkapacitorů v dopravě

Poptávka po čisté energii se neustále zvyšuje, obzvláště v oblasti dopravy. Jelikož není vždy možné snížit počet vozidel na silnicích, je nutné alespoň omezit jejich emise. Je tedy velmi důležitý vývoj nových technologií pro výrobu hybridních a elektrických vozidel. Současné trendy v této oblasti nasvědčují, že problém bezpečného a dostatečně velkého zásobníku energie pro pohon vozidel není stále vyřešen a vývoj jde směrem k použití hybridních pohonů.[13] Hybridní pohony představují kombinaci klasického spalovacího motoru s optimalizovaným pracovním režimem a přídavného elektrického pohonu použitelného pro jízdu v městském prostředí. Baterie, které představují zásobník elektrické energie, jsou neustále dobíjeny přebytky spalovacího motoru a elektřina je využívána pouze pro krytí zvýšených výkonových nároků při jízdách manévrech, jako je např. předjíždění nebo akcelerace. Zásobník lze ale využít také pro akumulaci elektrické energie při rekuperačním brzdění či při jízdě z kopce, kdy se akumuluje potenciální energie vozidla. [13] Právě pro tyto účely je však potřeba vysoká dynamika příjmu i výdeje energie zásobníku. V těchto případech už nelze efektivně uplatnit klasické chemické akumulátory, protože vlivem konverze elektrické energie na chemickou a zpět nedokáží přijímat a dodávat dostatečně velký výkon. Dalším problémem je životnost elektrochemických baterií udávaná na maximálně stovky cyklů. Jako perspektivní řešení v této oblasti se jeví využití superkapacitorů, které představují nový konstrukční prvek zásobníku elektrické energie, schopný rychle naakumulovat a zpětně vydat poměrně velké množství energie bez nadměrných ztrát a to až po milion cyklů.[13] I když využití baterie superkapacitorů jako samostatného zdroje energie se díky malé měrné kapacitě nejeví jako nejvhodnější, přesto se s touto technologií experimentuje. Řešením by mohl být malý dopravní prostředek, schopný cestovat systémem dobíjecích stanic, kde by dobití trvalo maximálně několik sekund.

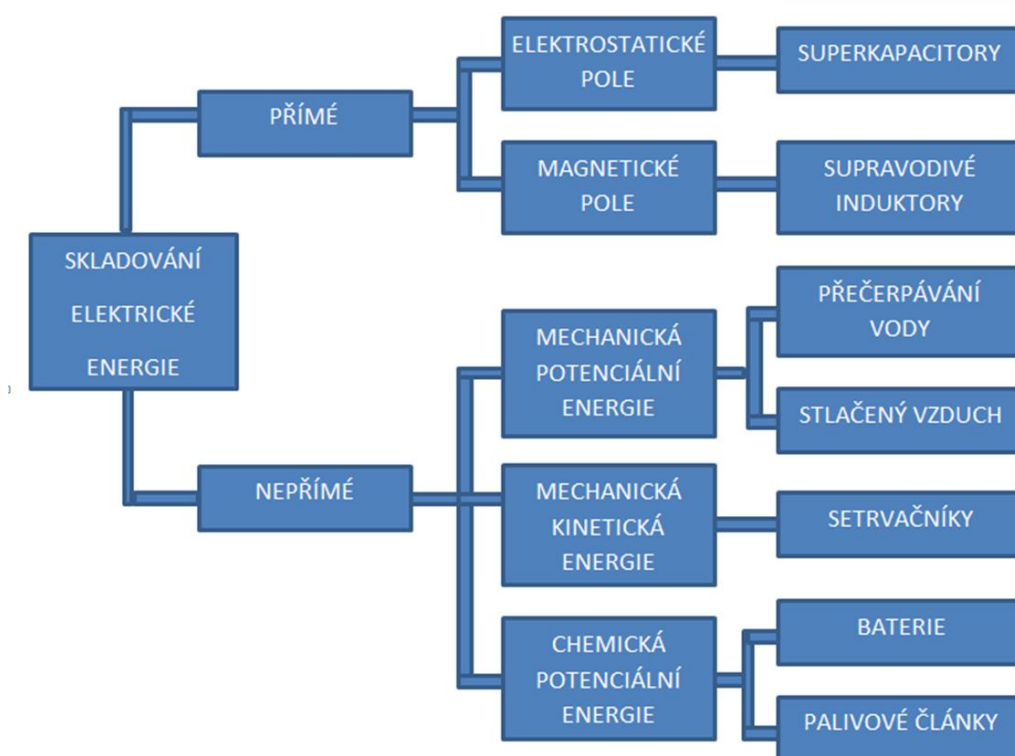


Obr. 6 Blokové schéma hybridního vozu s rekuperačním obvodem obsahujícím superkondenzátor (přejato z [13])

Se zajímavým řešením přišli v Číně. V roce 2006 začal v Šanghaji jezdit nový autobus Ultracap Bus firmy Sinautec, který používá svých 5,9 kWh energie ukrých v superkapacitorech, jako jediný zdroj energie. Autobus měří 12m a má dojezd cca 6 km s klimatizací, nebo 10 km bez klimatizace. Superkapacity jsou nabíjeny v nácestných zastávkách po dobu 30 sekund poté 5 minut v konečných stanicích pomocí střešního sběrače ze 600V/200A nabíjecích stanic.[14]

## 2 Ostatní zařízení pro skladování elektrické energie

Elektrickou energii lze skladovat buď přímo, formou elektromagnetického pole v induktorech či kapacitorech, nebo nepřímo převedením na formu jinou. Energie existuje v mnoha podobách, jako jsou mechanická, tepelná, nukleární, gravitační energie, elektromagnetické záření nebo potenciální energie. Převážná většina systémů pro ukládání energie využívá právě principu převedení elektrické energie na jinou formu, která může být uskladněna a v případě potřeby konvertována zpět. Aplikace těchto systémů sahá od baterií kapesních přístrojů, přes dopravní prostředky až po záložní zdroje. Na Obr. 7 jsou znázorněny nejpoužívanější systémy pro skladování elektrické energie.



Obr. 7 Nejpoužívanější technologie pro skladování elektrické energie (převzato z [17])

### 2.1 Elektrochemické baterie

Akumulátory neboli sekundární články jsou nejstarším úložištěm, které ukládá elektřinu do formy chemické energie. Baterie zahrnuje jeden nebo více elektrochemických buněk a každá buňka se skládá z tekutého, gelového nebo tuhého elektrolytu společně s kladnou elektrodou (anodou) a zápornou elektrodou (katodou). Během vybíjení nastává na obou elektrodách elektrochemická reakce, která dá vzniku elektrického proudu vnějším obvodem. Tato reakce je vratná a umožňuje, aby byly baterie znovu nabity připojením vnějšího napětí

na elektrody. Obvykle mívají baterie velmi malé klidové ztráty a velkou energetickou účinnost (60-95%). [15]

V mnoha ohledech se baterie jeví jako ideální pro ukládání elektrické energie, ale i když se jedná o ekologicky nezávadný zdroj energie, obsahují baterie některé velmi toxické látky a proto je jejich likvidace potenciálně nebezpečím pro životní prostředí. [16] Různých typů baterií, lišících se konstrukcí a použitými materiály je celá řada. Dále jsou srovnány některé základní typy baterií.

- ***Olověné akumulátory***

Olověné baterie byly vynalezeny v roce 1859, jedná se o nejstarší a nejvíce rozšířené elektrochemické akumulátory. Elektrody v olověných akumulátorech jsou na bázi olova a jako elektrolyt 37% kyselina sírová. Olověné akumulátory jsou levné a mají poměrně dobrou účinnost (70-90%), nicméně mají krátkou životnost a omezený počet nabíjecích cyklů (500-1000). Vzhledem k vysoké hustotě olova mají také malou měrnou kapacitu (30 – 50 Wh/kg) [16]. Pokud bychom v našem případě chtěli použít olověný akumulátor jako úložiště elektrické energie pro elektrokolo, narazili bychom na zásadní problém. Velká materiálová hustota olova má za následek velkou hmotnost baterií, takže například olověný akumulátor s napětím 12 V a kapacitou 20 Ah váží až 18,36 kg. Taková hmotnost mnohdy předčí hmotnost konstrukce samotného kola, a proto se tento typ baterií používá například pro pohon elektrických vozíků. V porovnání se superkapacitorem však olověná baterie vítězí co do velikosti měrné energie.

- ***Lithium-iontový (Li-ion) akumulátor***

V tomto případě je katoda tvořena z lithiového oxidu kovu a anoda z uhlíku s vrstvenou strukturou. Elektrolyt je složen z lithiové soli rozpuštěné v organických uhličitanech. Li-ion baterie byla poprvé představena v 60. letech minulého století, když firma Bell Labs vyvinula funkční uhlíkovou anodu. V roce 1990 byly vyrobeny první komerční lithiové baterie. Li-ion baterie jsou nejrozšířenějším typem akumulátorů v přenosných zařízeních. To je dáno hlavně jejich velkou měrnou kapacitou (až 200 Wh/kg), životností 10 000 cyklů a téměř 100% účinností. Širšímu využití ve větších aplikacích však stále brání vysoká cena užitých materiálů i celkového technologického postupu výroby. Novým typem podobné baterie je Lithium-železo-fosfátový (LiFePO<sub>4</sub>) akumulátor, který je zajímavý především nižšími výrobními náklady. [17],[18] Stejně jako u olověných baterií, i Li-ion akumulátory mají v porovnání se superkapacitorem markantně větší měrnou energii. Právě tyto baterie jsou nejčastěji používány pro konvenční sestavy elektrokol. Velká měrná energie na



kilogram umožňuje vyrobit poměrně malý a lehký článek, se kterým dokáží nejmodernější kola zdolat i hranici sta kilometrů.

- ***Lithium-polymerový (Li-Pol) akumulátor***

Tyto poměrně nové elektrochemické články byly vyvinuty z Lithium-iontových článků. Výhodou těchto článků je malá hmotnost, vysoká kapacita, velká výkonnost a velmi malé samovybití. Díky svým vlastnostem se stále více prosazují, jsou neustále vyvíjeny, přičemž je zvyšována jejich kapacita a výkonnost. Nevýhodou těchto článků je nutnost používání elektronické ochrany jednotlivých článků při nabíjení a vybíjení. Při jejich nabíjení nesmí být překročeny výrobcem stanovené hodnoty, v opačném případě by došlo k poškození. Měrná kapacita je obdobná jako u Li-ion akumulátorů. Li-pol článek je při této kapacitě přibližně o 10 – 15 % lehčí, ale o 10 až 20 % objemnější. [19]

### **Další typy akumulátorů:**

- ***Nikl-kadmiové (NiCd) akumulátory***

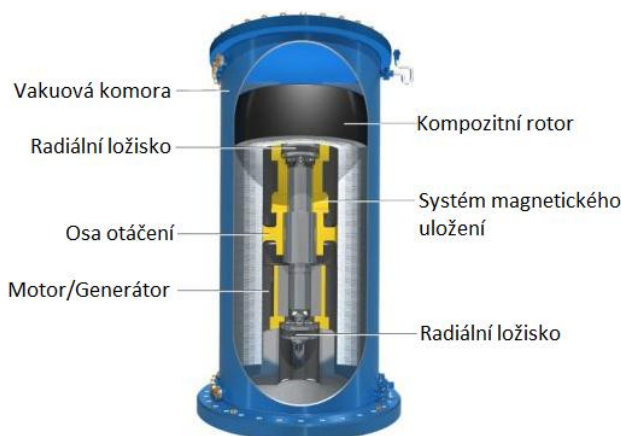
Nikl-kadmiové baterie se se po boku olověných článků řadí k těm nejstarším (~100let) a nejpobulárnějším. Baterie se skládá z kladné elektrody což je deska z hydroxidu nikelnatého, záporné z hydroxidu kademnatého, separátoru a alkalického elektrolytu. NiCd baterie se obvykle ukládají do kovového pouzdra s těsnícím víkem a bezpečnostním ventilem. Pláty kladné a záporné elektrody jsou od sebe vzájemně odizolovány separátorem a jsou zatočeny do spirály uvnitř pouzdra. Měrná kapacita se pohybuje mezi 50-75 Wh/kg. Životnost těchto článků se pohybuje kolem 2000-2500 cyklů. Nevýhoda NiCd článků tkví také ve vysoké toxicitě kadmia a s ní spojené náročnosti recyklace těchto článků.[16] Vzhledem náročnému výrobnímu procesu je výhodnější použít olověné akumulátory. V 90. letech minulého století se objevil Nikl-metal hydridový (NiMH) akumulátor, kde je toxický materiál katody nahrazen slitinou kovu a zároveň má i lepší vlastnosti oproti NiCd článkům.[17]

- ***Sodíkovo-sulfidový (NaS) akumulátor***

Tento typ akumulátoru má elektrody z tekutého sodíku a tekuté síry oddělených pevným separátorem z beta oxid hlinité keramiky. NaS baterie mají typicky životnost kolem 2500 cyklů. Jejich měrná kapacita 150 – 230 W/kg je poměrně vysoká avšak na úkor udržování vysoké provozní teploty 300 až 350 °C, čímž je omezeno i praktické využití tohoto článku.[16] Tyto baterie jsou využívány například v Japonsku pro uskladnění přebytečné energie větrných elektráren. Účinnost se pohybuje mezi 75 – 90%. [18]

## 2.2 Setrvačníky

Setrvačnick je historicky nejstarším mechanickým akumulátorem energie. Energie v setrvačnicku je uchována v momentu točící se masy. Ve století páry pomáhal setrvačnick svou kinetickou energií překonávat mrtvé body mechanismu parních strojů. Dnes je setrvačnick samozřejmou součástí vyrovnávající chod všech druhů pístových spalovacích motorů. Energií na úkor svých otáček dokáže odevzdat se zpožděním pouhých zlomků sekundy. Nejjednodušším způsobem jak akumulovat elektrický výkon do setrvačnicku je upevnění a roztočení setrvačnicku na hřídeli elektromotoru, poháněného elektrickým proudem. Při odběru energie se elektromotor chová jako dynamo či alternátor a akumulovanou energii vrací. Již před čtyřiceti lety zavedlo švýcarsko na zkoušku elektrické gyrobusy. Tyto přestavěné trolejbusy, disponovali jeden a půl tunovým setrvačnickem na hřídeli elektrického motoru umístěným pod podlahou. Po zastavení ve stanici, gyrobus vysunul sběrače k napájecímu stožáru, kde proud ze sítě během jedné a půl minuty dokázal urychlit setrvačnick do vyšších otáček a naakumulovat tak asi 10kW energie. Tato energie stačila na dvou kilometrovou jízdu do další napájecí stanice. Kvůli gyrokopickému momentu, ovlivňujícímu dynamiku a stabilitu jízdy, se však ani lehčí typy vysokootáčkových gyrokopů neuplatnily. Změna osy rotace při nájedzu do zatáček způsobovala komplikace s ovládáním vozidla. [30]



Obr. 8 Průřez moderním setrvačnickovým akumulátorem

Pokud bychom uvažovali použít setrvačnick jako zdroj energie pro napájení elektrokola, pravděpodobně by nebylo dosaženo příliš dobré účinnosti. Zajímavým se zdá řešení, při kterém se nevyužívá elektromotoru, ale přímo momentu setrvačnicku pro pohon bicyklu. Setrvačnick, umístěný v prostoru rámu, by mohl fungovat na principu brzdne

rekuperace. Při jízdě z kopce by se jednoduchým přepínacím mechanismem dala přeměrovat energie přímo do setrvačnicku, který by se roztočil a následně by dokázal ještě po několik desítek metrů fungovat jako podpůrný zdroj dopředného pohybu. Praktickou realizací se zabývali Indičtí vědci, kteří tvrdí, že přeměna energie funguje s účinností až 70%. [40]



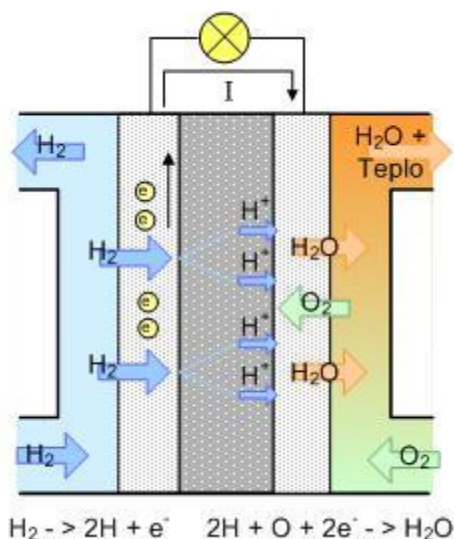
Obr. 9 Znáznornění bicyklu se setrvačnickem (převzato z [40])

### 2.3 Palivové články

Palivový článek je zařízení, které při elektrochemické reakci přeměňuje chemickou energii kontinuálně přiváděného paliva s oxidačním činidlem na elektrickou energii. Celý systém využívající skladování vodíku pro výrobu elektrické energie se skládá ze tří částí, elektrolyzátoru pro výrobu vodíku, palivového článku pro výrobu elektrické energie z vodíku a kyslíku, který získává z okolního vzduchu a nádrže pro skladování vodíku. [17] V současné době je vyvíjeno pět typů palivových článků lišících se především chemickým složením elektrolytu, provozními teplotami a možným palivem. Nejrozšířenější jsou palivové články s polymerní membránou (PEMFC), s téměř 90 % podílem na trhu. Mezi další rozšířené typy patří články pro přímou reakci metanolu (DMFC), palivové články s kyselinou fosforečnou (SOFC), palivové články s tavenými uhlíčitany (MCFC) a palivové články s alkalickým elektrolytem (AFC). Zatímco nízkoteplotní palivové články spalují s kyslíkem vodík nebo metanol, vysokoteplotní články mohou spalovat i některá konvenční uhlovodíková paliva. Nízkoteplotní články jsou dominantně používány v mobilních aplikacích k výrobě elektrické energie, vysokoteplotní články naopak převládají v kombinované výrobě tepla a elektrické energie v aplikacích stacionárních. [31]

Na Obr. 10 je znázorněn princip oxidačně redukčních reakcí palivového článku s polymerní membránou (PEMFC). Jako elektrolyt slouží inontoměničová polymerní membrána (většinou na bázi fluorovaných polymerů), který je výborným protonovým vodičem. Vzhledem k tomu, že jedinou kapalinou v tomto typu palivového článku je voda, jsou minimalizovány problémy s korozi. V zásadě tyto články tvoří dvě elektrody, oddělené

elektrolytem nebo tenkou membránou sloužící pro přenos iontů. K anodě se přivádí vodík, který zde oxiduje na ionty ( $H^+$ ) a ke katodě je přiváděn kyslík, který zde redukuje na anionty ( $O^{2-}$ ), ty reagují s ionty vodíku a přeměňují se na vodu ( $H_2O$ ). Jedná se tedy o velmi čistý způsob skladování energie. Operační teplota je omezena použitým polymerem, většinou je nižší než  $120\text{ }^\circ\text{C}$ . Jako katalyzátor se využívá především platina, popřípadě slitina platiny a rhodia. Reálná účinnost těchto článků však dosahuje pouze 35-50% v závislosti na zatížení. [31]



Obr. 10 Princip palivového článku PEMFC (přejato z [31])

Palivové články se vyrábí v různých velikostech a provedeních s výkony od 5 W, u těch nejmenších jednotek, do 400 kW u těch největších. V posledních letech se neustále rozmáhá využití palivových článků v dopravě. V roce 2014 nechala jihokorejská automobilka Hyundai společně s Londýnskou radnicí vybudovat v Londýně systém čerpacích stanic na vodík pro několik prvních desítek vozidel taxi na vodíkový pohon. Automobilka Hyundai vyrobila první sérii vozů ix35 Fuel Cell, který má srovnatelné jízdní parametry s klasickým automobilem s pístovým spalovacím motorem, avšak do ovzduší nevypouští nic jiného než čistou vodní páru.[32]

Jako zajímavé se zdá řešení Australských vývojářů, kterým se podařilo sestavit elektrokolo, využívající jako zdroj energie pro pohon právě vodíkový palivový článek (Hy-cycle). Toto kolo je údajně schopné ujet 125 km a to na jediný vyměnitelný vodíkový zásobník za 2 \$. Nádoba s kapalným vodíkem váží asi 2,5 kg a je připevněna k rámu kola a dá se vyměnit v čase 30 sekund. Kromě toho je k rámu připevněna i Li-ion baterie, která je palivovým článkem neustále dobývána. Udávaná rychlost elektrokola je 35km/hod.

## 2.4 Spalovací motory

Spalovací motor je mechanický tepelný stroj, který spálením paliva přeměňuje jeho chemickou energii na energii tepelnou a mechanickou energii působením na píst, lopatky turbíny, nebo s využitím reakční síly.[33] Motor vykonává mechanickou práci a jako takový slouží coby pohon jiných strojních nebo elektrických zařízení. Spalovací motory všech typů našly největší uplatnění především v dopravních mobilních prostředcích všech druhů. Mechanickou energii, kterou představuje točící se kliková hřídel spalovacího motoru, lze snadno přeměnit na elektrickou, pomocí elektrického točivého stroje – generátoru. Jde tedy vlastně o nepřímou přeměnu chemické energie paliva skrze mechanickou energii klikového hřídele na energii elektrickou. Účinnost takovéto přeměny se snižuje se třením v ložiscích a o vzduch, ale především spalovacím procesem, kdy je velká spousta chemické energie přeměněna na tepelnou a dále nevyužívána. Na mechanickou práci je ve spalovacích dieslových a benzinových motorech přeměněno kolem 25 % chemické energie paliva. Přepřňované motory s turbokompresorem poháněným výfukovými plyny (turbo) mají účinnost kolem 35 %.[33]

- ***Motorgenerátory***

Motorgenerátor se spalovacím motorem je soustrojí složené ze spalovacího motoru a generátoru, obvykle se souosými hřídeli, které slouží k výrobě elektrické energie. Zařízení se používá jako zdroj elektrické energie v místech, kde není k dispozici rozvodná síť, jako špičkový zdroj, nebo jako záložní zdroj pro zajištění nepřetržité dodávky elektrické energie. Může být konstruován jako stacionární, nebo jako mobilní. Na trhu je dostupné nepřeberné množství agregátů a to jak benzinových tak i dieslových nebo plynových. Výkony agregátů se pohybují v rozsahu od jednotek kVA u malých mobilních do jednotek MVA u záložních dieselagregátů, sloužících jako záložní zdroje nemocnic nebo datových serverů všude tam, kde by výpadek elektrického proudu mohl způsobit škody na zdraví nebo majetku.

## 2.5 Technické parametry systémů

Každý zde zmiňovaný systém má určité výhody a omezení. Při volbě zařízení do konkrétní aplikace se musí brát v potaz, jaké parametry by měl systém mít. V tabulce níže jsou uvedeny a popsány důležité parametry, určující základní vlastnosti systémů využívaných pro napájení elektokol.

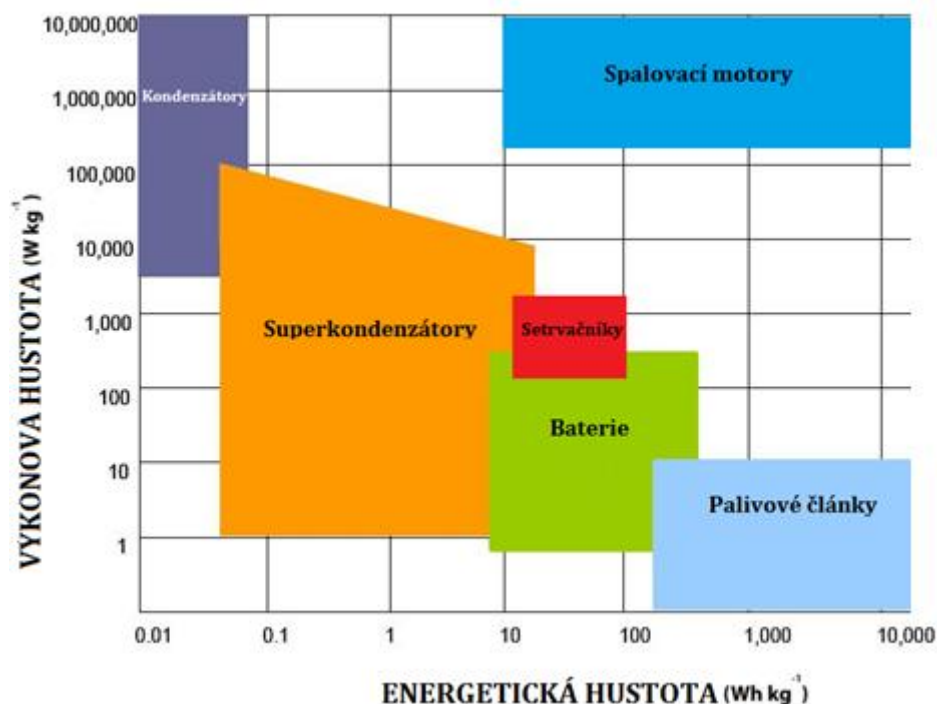
Tab.1 Základní vlastnosti systémů pro napájení jízdních elektrokol [17],[44]

Parametr	Jednotka	popis
Operační napětí	V	Systémy jízdních elektrokol se navrhují na napětí 36 nebo 48 V podle použitého elektromotoru.
Nominální kapacita	Ah, Wh	Udává, kolik energie dokáže zařízení pojmout na jedno vybití.
Měrná kapacita a výkon	Wh/kg, W/kg, Wh/m <sup>3</sup> , W/m <sup>3</sup>	Udává energetickou a výkonovou hustotu zařízení vztaženou na hmotnost nebo objem.
Maximální vybíjecí proud	A	Maximální proud, který dokáže zdroj vydat.
Maximální průběžný vybíjecí proud	A	Maximální doporučený proud, který dokáže zdroj vydat, aby nedocházelo k jeho přetěžování.
Standardní nabíjecí proud	A	Doporučený nabíjecí proud.
Maximální nabíjecí proud	A	Maximální velikost nabíjecího proudu, taková aby nedocházelo k přetěžování článku.
Doba nabíjení při standardním nabíjecím proudu	s, min, hod	Důležitý parametr, který se liší podle každé baterie.
Rozsah teplot při nabíjení	°C	Některé typy baterií nejsou určeny pro nabíjení při teplotách nižších než 0°C
Rozsah teplot při vybíjení	°C	Provozní teplota baterií elektrokol.
Hmotnost baterie	g, kg	Důležitý parametr, který je rozhodující pro váhu celého elektrokola.
Rozměry	mm	Parametr určující rozměr baterií, rozhodující pro systém jejich uložení na kolo.
Počet cyklů a životnost	cykly, roky	Udává, jak dlouho může být zařízení v provozu, počet nabíjecích a vybíjecích cyklů se obvykle udává do doby, než klesne kapacita pod 80%.
Samovybíjení	%/den	Míra s jakou se postupem času ztrácí uskladněná energie.
Cena	Kč, \$	Cena baterie se odvíjí od jejího technologického principu i celkové kapacity.

Pro srovnání měrné kapacity a měrného výkonu stojí za to uvést takzvaný Ragoneho diagram. Tento diagram se většinou používá pro porovnání parametrů mobilních systémů (baterie pro malou elektroniku, elektromobily nebo jiná přenosná zařízení), zde jsou však pro názornost zahrnuty i spalovací motory. V tab. 2 jsou srovnány některé základní vlastnosti různých zařízení a mimo jiné i pořizovací cena.

Tab.2 Porovnání vybraných parametrů (tabulka převzata z ref. [17], některé hodnoty jsou aktualizované)

systém	jmenovitý výkon	doba vybití	účinnost [%]	samovybíjení za den	životnost	pořizovací cena [\$/kWh]
Superkapacity	0-300 kW	Milisekundy-hodiny	~95	20 - 40 %	100 000+ cyklů	300-2000
Setrvačnický	0-20 MW	Sekundy-hodiny	~85	50%	~15 let	1000-5000
Palivové články	0-50 MW	Sekundy-dny	~35	Téměř nulové	10 000+ cyklů	10000
Olověné akumulátory	0-20 MW	Sekundy-hodiny	~90	0,1-0,3 %	500-1000 cyklů	200-400
Li-ion	0-100 kW	Minuty-hodiny	~95	0,1-0,3 %	1000+ cyklů	600-2500
NiCd	0-40 MW 50 kW-8	Sekundy-hodiny	~95	0,2-0,6 %	~2500 cyklů	800-1500
Nas	MW	Sekundy-hodiny	~90	~20 %	~2500 cyklů	300-500
Li-pol	0-100	Minuty-hodiny	~95	0,1-0,2 %	2000+ cyklů	1000-2500



Obr. 11 Ragoneho diagram (převzato ze [17])

### 3 SYSTÉM JÍZDNÍHO ELEKTROKOLA

Kolo, jako dopravní prostředek, je, vždy bylo a vždy bude velmi univerzální a proto výhodné. Díky své obratnosti umožňuje svému majiteli zdolávat automobilem, či městskou hromadnou dopravou, neprůjezdné ulice. Pro spoustu, zejména starších lidí, je ale velkým problémem fyzická námaha při šlapání. Najdou se však také lidé, kterým jejich fyzický stav ani neumožní šlapání a právě pro všechny, kterým tento fakt brání v použití klasického kola, se naskytá možnost použití přídatného elektropohonu. Elektrický pohon je téměř bezhlučný, neznečišťuje životní prostředí a navíc má nízkou spotřebu a vysokou účinnost. Pro řízení tohoto kola, uživatel nepotřebuje řidičské oprávnění, což může být také velkou výhodou. Kolo s přídatným elektropohonem zajistí uživateli rychlou a pohodlnou dopravu bez větší námahy, která je navíc téměř zadarmo.

Elektrokolo si nelze představovat jako jakousi slabší babetu. Má blíže k normálnímu kolu než mopedu a také z hlediska zákona se bere stejně jako normální jízdní kolo. V praxi to znamená, že výkon motoru nesmí přesáhnout 1 kW a jeho práce je limitována rychlostí 25 km/h, při dosažení této rychlosti se elektromotor vypíná. Oproti obyčejnému kolu má elektrokolo navíc samotný elektromotor a baterii, která se dá vyjmout a nabít v klasické

zásuvce. Dále má snímač detekující šlapání a centrální displej, pomocí kterého můžeme nastavit mód motoru. Téměř každé elektrokolo umožňuje tři jízdní módy – asistované šlapání, akcelerace a samozřejmě také jízdu bez motoru. Nejvíce využívaným jízdním módem je tzv. asistované šlapání, které spočívá v tom, že je motor zapnutý pouze když jezdec šlape do pedálů. Při zapnutém módu akcelerace nemusíte šlapat vůbec a pracuje pouze motor. Při vybití baterie nezbyvá nic jiného, než šlapat bez pomoci motoru jako na klasickém kole (o dost těžším).

- **Městské elektrokolo**

Městské elektrokolo je určeno především do městského prostředí. Patří sem kola klasické velikosti a vzhledu i třeba dosti extravagantní modely. Za podkategorii městských kol můžeme považovat i tzv. skládačky, které mají tu výhodu, že se po složení dají snadno převážet - například v městské hromadné dopravě. Vzhledem k tomu, že elektrokola byla původně zamýšlena jako alternativní městský dopravní prostředek, je jich na trhu největší množství.



Obr. 12 Příklad konstrukce městského elektrokola s motorem ve středové ose pedálů [22]

- **Horské elektrokolo**

Tato kategorie kol je určena především do těžšího terénu, kde se ocení robustnější stavba rámu a šířka pláštěů. S ohledem na náročnější podmínky (např. vlhkost), by měly být veškeré komponenty z kvalitního a odolného materiálu. Horských elektokol je na trhu nejméně.





Obr. 13 Příklad konstrukce horského elektrokola s motorem umístěným ve středu předního kola [23]

- **Trekové elektrokolo**

Vzhledově i svým účelem stojí někde mezi městskými a horskými elektrokoly. Svou stavbou rámu a vybavením jsou předurčena k vyjížděním po zpevněných lesních nebo polních cestách, ale dobře poslouží i na silnici. Tato kola jsou nejvhodnější na dlouhé vyjížděky do přírody a tomu by měla odpovídat také dojezdová vzdálenost baterie.



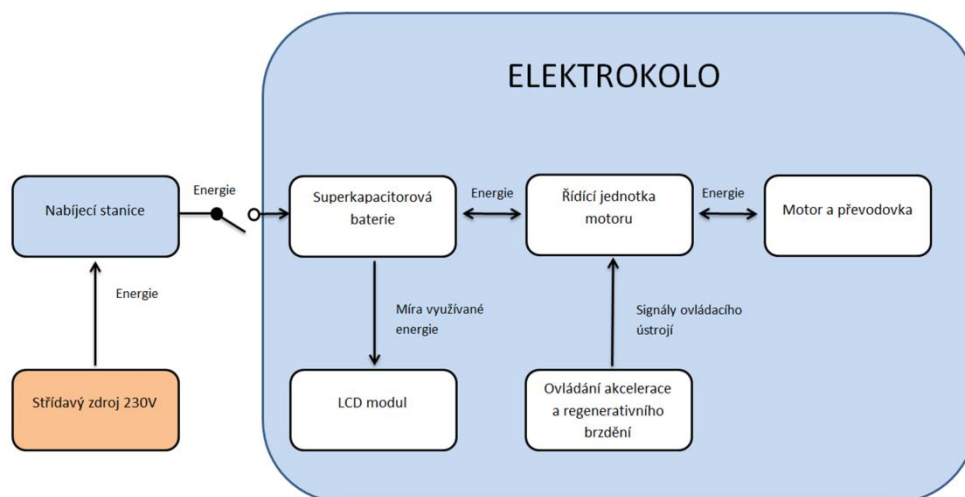
Obr. 14 Příklad konstrukce trekového elektrokola s motorem umístěným v ose zadního kola [24]

- **Motor elektrokola**

Nejdůležitější část elektrokola – elektromotor bývá umístěný ve středu pedálového pohonu, anebo v náboji předního nebo zadního kola. Výkon motoru se pohybuje od 250 do 750W je závislý na napájecím napětí. Existuje mnoho typů elektromotorů, jejichž cena je závislá především na použitém materiálu a odolnosti proti vodě. Nejčastějšími typy jsou bezkartáčový stejnosměrný motor, který přenáší kroutící moment přímo na hnané kolo a motor s planetovou převodovkou.

### 3.1 Návrh systému jízdního elektrokola napájeného superkapacitorem

V této části práce je proveden návrh možné realizace elektrokola napájeného pouze ze superkapacitorové baterie. Hlavním kritériem pro návrh je krátká doba nabíjení superkapacitorové baterie v nabíjecí stanici a možnost rekuperačního brzdění. Na Obr.3.4 je znázorněno blokové schéma navrženého systému. V následující části práce jsou popsány jednotlivé komponenty jízdního elektrokola.



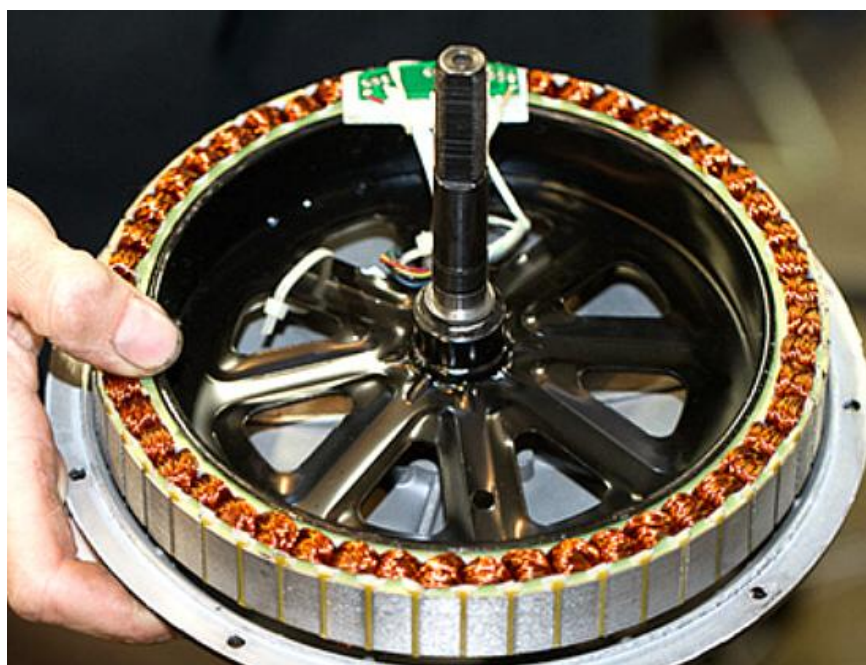
Obr. 15 Blokové schéma elektrokola s napájením ze superkapacitorové baterie

### 3.2 BLDC motor

Bezkartáčový stejnosměrný motor patří mezi synchronní motory. To znamená, že magnetické pole, které generuje stator a magnetické pole, generované rotací magnetů jsou na stejné frekvenci. Bezkartáčový SS motor se skládá z permanentních magnetů zabudovaných na rotoru a ze statorového vinutí. V případě elektrokola je osa statorem a je uchycena do vidlice kola (viz. Obr.16, Obr.17). Všechna elektronika a vinutí je pak součástí této statické části. U BLDC motoru se tedy elektromagnety nepohybují. Místo toho rotují permanentní

magnety a vinutí rotoru je statické. Jak už vyplývá z názvu, tyto motory nevyužívají pro komutaci kartáče, ale místo mechanického řešení jsou komutovány elektronicky. Díky tomuto konstrukčnímu řešení nedochází k opotřebování motorů, motory se nezahřívají, dosahují vyšší spolehlivosti než SS motory a jsou prakticky bezúdržbové.[25] Obvykle se k řízení bezkartáčových motorů využívá třífázový střídač. BLDC motory jsou napájeny spínaným zdrojem napětí na statorová vinutí motoru výkonovým zařízením, spínací frekvence je získána z pozice rotoru. Tvar fázového proudu je typicky obdélníkového tvaru. Pozice se určuje pomocí tří Hallových sond umístěných po 120° do vinutí statoru a komutace je založena na těchto pulzech. Konfigurace BLDC může na jednofázové, dvoufázové nebo třífázové konfiguraci. Jako motor pro elektrokolo se typicky využívají nejoblíbenější třífázové motory. BLDC motory mají mnoho výhod oproti kartáčovým nebo indukčním motorům. Některé z nich jsou[25]:

- provoz bez rušení
- vysoká dynamická reakce
- vysoká účinnost
- lepší charakteristika točivého momentu k rychlosti
- dlouhá životnost
- vyšší rozsah rychlosti



Obr. 16 Stator BLDC motoru, který se staticky připevní na vidlici jízdního kola [25]

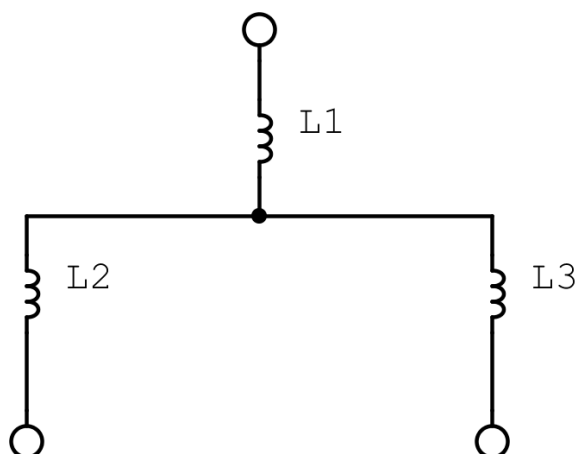


Obr. 17 Stator BLDC motoru s elektromagnety zasazený do rotoru s permanentními magnety [25]

### 3.2.1 Konstrukční prvky BLDC

- *Stator*

Základem třífázového BLDC motoru jsou tři statorová vinutí. Počet vinutí je u většiny motorů replikován tak, aby bylo dosaženo menšího zvlnění momentu. Vinutí se zpravidla zapojuje do hvězdy tak, aby byl zajištěn přístup k nulovému bodu N a aby bylo možné měřit indukované střídavé napětí.



Obr. 18 Elektronická konfigurace statoru

- *Rotor*

Rotor BLDC motoru obsahuje sudý počet permanentních magnetů. Během posledních let došlo k velmi významnému posunu ve vývoji permanentních magnetů. V současnosti se u BLDC motorů široce využívají vysoce výkonné NdFeB (neodymové) magnety s účinností až 87%. Počet magnetů rotoru ovlivňuje velikost kroku a zvlnění točivého momentu motoru. S vyšším počtem magnetických pólů se zmenšuje velikost kroku, snižuje zvlnění momentu a zároveň výrazně zvyšuje krouticí moment motoru při nižších otáčkách (jízda do kopce). Výrobce elektrokol v Přemyslově ulici v Plzi uvádí, že počet pólových dvojic pro 250W

BLDC motor je 20 a pro 1000W motor dokonce 46, takže po obvodu statoru BLDC motoru používaných v elektrokolech může být i přes 90 elektromagnetů.[36]

### 3.2.2 Řízení BLDC motoru

- **Fázová komutace**

Komutace je nejdůležitější funkcí všech SS motorů. Běžné SS motory využívají pro komutaci komutační kartáče. Ty fungují jako poziční senzory i spínače zároveň. Mechanický komutátor má jisté nevýhody a to byl hlavní důvod vývoje BLDC motoru. BLDC motor je poháněn napěťovými tahy spojenými s danou pozicí rotoru. Typicky, je bezkartáčový motor třífázový a je řízen třífázovým střídačem, nazývaným šesti kroková komutace.[35]

V každém komutačním kroku jsou spínány dvě fáze. Jedna fáze např. A, je vždy připojena ke kladnému potenciálu napájecího napětí, druhá fáze např. B, k zápornému potenciálu. V tomto případě protéká proud motorem do fáze A a vytéká fází B. Tento stav se jednoduše označuje jako AB a podobně potom i všechny ostatní stavy AC, BC, BA, CA, CB

Ve správný okamžik dojde k přepnutí ze stavu AB do AC, takže proud nyní vytéká fází C. Rotor má snahu se dostat do polohy, kdy směr jeho vektoru magnetické indukce bude totožný se směrem magnetického toku statoru, takže tato komutace je pro něj impulsem pro vykonání pohybu. Při komutaci do dalších stavů je situace totožná. Stále se opakující spínání AB -> AC -> BC -> BA -> CA -> CB -> ... tak vytváří točivé magnetické pole, které unáší rotor. [35]

- **Hallovy sondy**

Hallův senzor je součástka, která detekuje nebo měří magnetické pole. Pracuje na principu Hallova jevu. V našem případě je použit Hallův senzor, který se může na výstupu nacházet jen ve dvou stavech, existují však i senzory které dokáží měřit spojitě a jejich výstupní napětí je úměrné hodnotě magnetické indukce.[26] Ovládání BLDC motoru zajišťuje třífázový střídač. Pro správnou komutační sekvenci řízení je potřeba znát polohu rotoru a k tomu se využívá právě Hallových sond. Sondy jsou zabudovány ve statoru a kdykoliv magnetický pól rotoru proběhne poblíž sondy, získáme signál o nízké nebo vysoké napěťové úrovni, který indikuje S nebo J magnetický pól. Kombinací tří signálů Hallových sond vzájemně posunutých od 120° lze určit přesný sled sekvencí. Je velice dbáno na přesnost uložení Hallových sond, neboť každá nesouosost s ohledem na magnety rotoru bude vytvářet chybu v určení polohy rotoru.

- **Regulace výkonu**

Výkon motoru, rychlost otáčení a točivý moment jsou úzce spjaté parametry, které lze ovlivnit změnou napájecího napětí. Regulace celého systému se tak redukuje na regulaci napětí zdroje. Vzhledem k tomu, že celé buzení má pulsní charakter, je vhodné implementovat změnu řídicího napětí přímo do procesu řízení pomocí PWM (pulsně šířková modulace).

### 3.2.3 Superkondenzátorová baterie

Pro dosažení dostatečně velkého napětí, takového aby bylo možné ho řídicím obvodem snižovat a zvyšovat v rámci požadavků elektromotoru bylo zvoleno použití sérioparalelní kombinace 54 superkapacitorů. Paralelním spojením tří větví, každé o 18 superkapacitorech s kapacitou 350 F a napětím 2,7 V, dostaneme baterii o napětí 78 V a kapacitě 58,36 F. Každý z kapacitorů má cenu 12,44 \$ tedy 300 Kč. Cena celé baterie by tak byla 16 200 Kč. Srovnání moderní Li-ion baterie a baterie složené ze superkapacitorů je provedeno v *Tab. 3*.

*Tab. 3 Porovnání superkapacitorové baterie s Li-ion baterií určenou pro elektrokolo[44]*

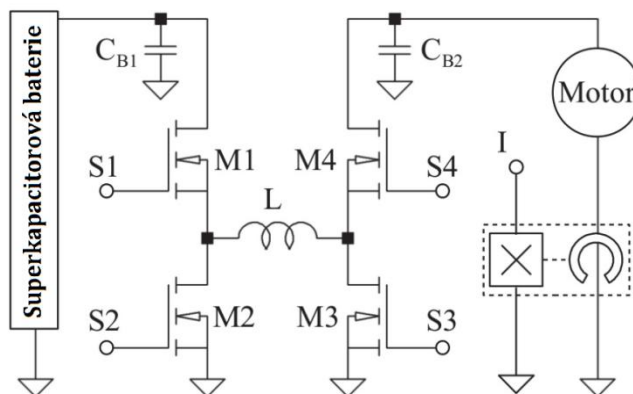
Operační napětí	48 V	48 V
Nominální kapacita	20,3 Ah (974 Wh)	18,9 Wh (58,36 F)
Maximální vybíjecí proud	60 A	840 A
Maximální průběžný vybíjecí proud	30 A	170 A
Standartní nabíjecí proud	3 A	35 A
Maximální nabíjecí proud	5 A	170 A
Doba nabíjení při standardním nabíjecím proudu	7 hodin	~80 s
Rozsah teplot při nabíjení	0 - 45 °C	-40 - 70 °C
Rozsah teplot při vybíjení	-10 - 50 °C	-40 - 70 °C
Hmotnost baterie	6400 g	3240 g
Rozměry	380x150x85 mm	300x100x123 mm
Životnost	500 cyklů	500 000 cyklů

### 3.2.4 Řídící jednotka

Požadavkem na řídicí jednotku elektrokola s možností rekuperačního brzdění je možnost práce ve dvou kvadrantech. Hlavní částí rekuperačního systému je výkonový rekuperační obvod, sestávající z měniče napětí a superkapacitorové baterie. Vhodným řízením měniče lze obousměrně přenášet elektrickou energii mezi stejnosměrným meziobvodem a superkapacitory. Rekuperační obvod umožňuje akumulovat brzdovou energii a následně ji opět využít.



Požadovaný měnič by měl být schopen vhodným řízením kontrolovat hodnotu napětí. Jako nejvhodnější se jeví použití tzv. Buck-Boost kaskády popsané v [41]. Tento DC-DC převodník umožňuje jízdu v samostatných režimech za pomoci jediného spínače. Zároveň umožňuje spojitě měnit hodnotu napětí prostřednictvím PWM jak je popsáno v [42].



Obr. 19 schéma zapojení obousměrné rekuperační řídicí jednotky (převzato z [42])

- **Rekuperační brzda**

Rekuperační brzdění není ve světě elektrokol ničím novým. Využití rekuperace v konvenčních elektrokolech se však neseťkalo s velkým úspěchem. Prodejce elektrokol v Plzni v Přemyslově ulici, tvrdí, že hlavním problémem proč se elektrokola s rekuperací neujala je jejich nízká životnost. Využíváním rekuperace v kombinaci s Li-ion bateriemi totiž zasahuje do jejich standartních cyklů vybíjení/nabíjení a tím, že se baterie nabijí mnohem častěji, klesá její životnost.

V případě baterie ze superkapacitorů však problém se životností odpadá. Superkapacitor má mnohem větší životnost než Li-ion baterie a tedy je pro rekuperaci přímo vhodný. Podle testu výzkumníků z univerzity v Johannesburgu dokáže kolo s podobným technologickým řešením rekuperovat na 1000 m dráze s 50 m spádem 6,8 kJ energie z původní potenciální energie 17 kJ, to znamená, že efektivita rekuperace za těchto podmínek je 40%. Ztráty se podle nich projevují především ve tření a v odporu vzduchu na jezdce při jízdě z kopce.[42] To ale stále znamená, že pokud by měla být jejich superkapacitorová baterie plně nabita, museli by na kole ujet až dvanáctkrát větší vzdálenost.

### 3.2.5 Ovládání akcelerace a regenerativního brzdění a LCD panel se signalizací

Realizace ovládání akcelérátoru by mohla být provedena otočnou páčkou nasunutou na vroubkovanou trubku řídítek, podobně jako je tomu u motocyklu. Potenciometr zabudovaný do páky by fungoval jako aktuátor spojitého signálu řídicí jednotce. Ta by v závislosti na požadavku jezdce upravila rychlost spínání jednotlivých elektromagnetů statoru BLDC motoru a měnila tak točivé magnetické pole. Výsledkem by byla akcelerace elektrokola. Pootočení páky by mělo být omezeno dorazem a po uvolnění dlaně by se měla páka vrátit do původní pozice.

Pro ovládání regenerativní brzdy bylo opět vhodné použití potenciometru jako aktuátoru. Jako řešení si lze představit brzdnu páčku s analogovým vývodem do řídicí jednotky. Po stisknutí by došlo k vyhodnocení v řídicí jednotce, která by se přepnula do režimu regenerativního brzdění a umožnila tak tok energie opačným směrem, tedy do superkapacitorové baterie.

Pro přehled by bylo vhodné nainstalovat na řídítka elektrokola také LCD panel se signalizací aktuálního stavu baterie, režimu elektropohonu a například dojezdové vzdálenosti. Zároveň by tento panel měl obsahovat přepínač pro nastavení jízdního režimu. Tři polohy přepínače by představovaly:

1. Mód jízdy bez přídavného pohonu
2. Mód podpory při šlapání
3. Režim přímého pohonu

### 3.2.6 Nabíjecí stanice

Nabíjení superkapacitorové baterie se standartním nabíjecím proudem 35 A nelze provádět přímým připojením do elektrické AC sítě. Baterie by se měla nabíjet SS proudem se stabilním napětím 48 V. Ideálním řešením by bylo vytvoření sítě dobíjecích stanic v místech, kde by se elektrokola používala. Stanice by byla vybavena AC/DC převodníkem. Podle výpočtu by se měla být naše baterie schopna plně nabít za cca. 80 s.

$$i(t) = C \frac{du}{dt} \Rightarrow t = \frac{u \times C}{i} = \frac{48 \times 56,36}{35} = 77,3 \text{ [s]} \quad (4)$$



## ZÁVĚR

Vysvětlením funkčního principu superkapacitorů a prozkoumáním materiálů pro jejich výrobu, kterým se věnovala první kapitola, byl představen ideální prvek pro rychlé a efektivní uložení elektrické energie. Následné porovnání s ostatními systémy pro uskladnění elektrické energie ukazuje, jaké má superkapacitor výhody a nevýhody. Jako jasné výhody lze vyzdvihnout životnost, velmi krátké nabíjecí časy, extrémní provozní teploty a nízké výrobní náklady. Tím, že superkapacitor ukládá elektrickou energii přímo a nemusí ji nijak transformovat, dokáže energii také velice rychle uvolnit, což dokazuje maximální impulsivní proud v řádech stovek ampér. Mezi nevýhody v porovnání s akumulátory potom patří malá měrná energetická kapacita a nízké provozní napětí.

V druhé části práce byl představen návrh jízdního elektrokola, napájeného ze superkapacitorové baterie. Navržené kolo disponuje třemi jízdními režimy a rekuperační brzdou, která dokáže v kombinaci s řídicí jednotkou a BLDC motorem zpětně vyrábět elektrickou energii a ukládat ji do baterie. Podle zkušeností je minimální spotřeba při úsporné jízdě s pedálovou asistencí asi 5 Wh na jeden kilometr.[43] Jmenovitá kapacita naší baterie složené z 54 superkapacitorů je 18.9 Wh. Jednoduchým přepočtem zjistíme, že teoretický maximální dojezd našeho kola by mohl být cca. 4 km. Výzkumníci z univerzity v Johannesburgu změřili dojezd podobného elektrokola na 1 km v režimu přímého pohonu. Doba nabití naprosto vyčerpané baterie na 100% se podle výpočtu blíží 80 sekundám.

Pokud bychom uvažovali chod takového elektrokola v praxi, nabízí se možnost využití systému bike sharing. Bike sharing je systém sdílení jízdních kol, kde je např. po městě strategicky rozmístěno několik desítek až stovek půjčoven nebo automatických stanic s jízdními koly, které si lze v jednom stanovišti vypůjčit a ve druhém vrátit. Představa implementace našeho kola se superkapacitorovou baterií by byla taková, že jednotlivá stanoviště by byla vybavena nabíjecí stanicí, ve které by bylo možné kolo v řádu několika jednotek či desítek sekund dobít a pokračovat dále v cestě.

Jako další možná praktická aplikace se jeví instalace superkapacitorové baterie na konvenční elektrokolo a vytvoření jakéhosi hybridu. U takového kola by šlo především o využití rekuperace při brzdění a čerpání energie ze superkapacitorů pro úsporu energie z Li-ion článků.

Pokud jde o nabíjení superkapacitoru z jiného zdroje než je nabíjecí stanice disponující proudem až 35 A, vyvstává také možnost použití slabšího AC/DC převodníku, který by bylo možné připojit do standardní AC 230V zásuvky. Toto zařízení by nebylo nikterak veliké a dalo by se nainstalovat přímo na rám kola společně s napájecí šňůrou. Zpravidla mají zásuvkové obvody jištění na 16 A a podle toho by se také odvíjel maximální nabíjecí proud této jednotky. Nabíjecí doba by v tomto případě měla být v řádu několika minut.

Superkapacitory jsou poměrně mladými součástkami a jejich vývoj v budoucích letech přinese další možnosti využití. S vývojem nových materiálů bude stoupat i jejich energetická kapacita.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MAHER, Bobby. 2005. New Energy storage options and how they stack up. *Embedded: cracking the code to systems development* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.embedded.com/design/power-management-design/4011556/New-Energy-storage-options-and-how-they-stack-up>
- [2] J. R. MILLER, S.M. BUTLER. Capacitor energy storage for stationary-power application. Battcon International Stationary Battery conference, 2010. Dostupné z WWW: < <http://www.battcon.com/PapersFinal2004/MillerPaper2004.pdf> >
- [4] V. PAVELKA. Rekuperační systém se superkondenzátorem. ČVUT v Praze, 2010. Dostupné z WWW: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap4\\_RSSS.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap4_RSSS.pdf)
- [5] PANDOLFO, A.G. a A.F. HOLLENKAMP. 2006. Carbon properties and their role in supercapacitors. *Journal of Power Sources* [online]. **157**(1): 11-27 [cit. 2015-05-09]. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.02.065. ISSN 03787753. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775306003442>
- [6] DATSYUK, V., M. KALYVA, K. PAPAGELIS, J. PARTHENIOS, D. TISIS, A. SIOKOU, I. KALLITSIS a C. GALIOTIS. 2008. Chemical oxidation of multiwalled carbon nanotubes. *Carbon* [online]. **46**(6): 833-840 [cit. 2015-05-09]. DOI: 10.1016/j.carbon.2008.02.012. ISSN 00086223. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008622308000717>
- [7] FRACKOWIAK, Elzbieta a François BÉGUIN. 2001. Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors. *Carbon* [online]. **39**(6): 937-950 [cit. 2015-05-09]. DOI: 10.1016/S0008-6223(00)00183-4. ISSN 00086223. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008622300001834>
- [8] BECK, F., M. DOLATA, E. GRIVEI a N. PROBST. 2001. Electrochemical supercapacitors based on industrial carbon blacks in aqueous H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Journal of Applied Electrochemistry* [online]. **31**(8): 845-853 [cit. 2015-05-09]. DOI: 10.1023/A:1017529920916. ISSN 0021891x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1017529920916>
- [9] SIMON, Patrice a Andrew BURKE. 2008. Nanostructured Carbons: Double-Layer Capacitance and More. *The Electrochemical Society Interface* [online]. : 38-43 [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: [http://www.electrochem.org/dl/Interface/spr/spr08/spr08\\_p38-43.pdf](http://www.electrochem.org/dl/Interface/spr/spr08/spr08_p38-43.pdf)
- [10] INAGAKI, Michio, Hidetaka KONNO a Osamu TANAIKE. 2010. Carbon materials for electrochemical capacitors. *Journal of Power Sources* [online]. **195**(24): 7880-7903 [cit. 2015-05-09]. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2010.06.036. ISSN 03787753. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775310010219>

- [11] ZHANG, Yong, Hui FENG, Xingbing WU, Lizhen WANG, Aiqin ZHANG, Tongchi XIA, Huichao DONG, Xiaofeng LI a Linsen ZHANG. 2009. Progress of electrochemical capacitor electrode materials: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. **34**(11): 4889-4899 [cit. 2015-05-09]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.04.005. ISSN 03603199. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319909004984>
- [12] LI, Xin a Bingqing WEI. 2013. Supercapacitors based on nanostructured carbon. *Nano Energy* [online]. **2**(2): 159-173 [cit. 2015-05-11]. DOI: 10.1016/j.nanoen.2012.09.008. ISSN 22112855. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211285512001826>
- [13] MINDL, Pavel. Superkapacitor pro hybridní pohon vozidla. *ČVUT Praha: Elektrotechnická fakulta* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap5\\_Plzen.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap5_Plzen.pdf)
- [14] SLAVÍK, Ing. Jakub. 2013. E-mobilita v MHD: Situace a vývojové trendy v elektrických autobusech pro městskou dopravu. *Proelektrotechniky.cz* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/pdf/Studie1.pdf>
- [15] CHEN, Haisheng, Thang Ngoc CONG, Wei YANG, Chunqing TAN, Yongliang LI a Yulong DING. 2009. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science* [online]. **19**(3): 291-312 [cit. 2015-05-13]. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014. ISSN 10020071. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S100200710800381X>
- [16] CHEN, Haisheng, Thang Ngoc CONG, Wei YANG, Chunqing TAN, Yongliang LI a Yulong DING. 2009. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science* [online]. **19**(3): 291-312 [cit. 2015-05-13]. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014. ISSN 10020071. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S100200710800381X>
- [17] ZIGLER, Martin. 2015. Systémy pro skladování elektrické energie. *Československý časopis pro fyziku* [tištěná forma]. **2015**(65): 1-13 [cit. 2015-05-13]. ISSN 1804-8536. Dostupné z: <http://ccf.fzu.cz>
- [18] Využití baterií NAS: Přesun japonských technologií v rámci GIS pro budování kapacit. 2010. *NGK prezentace firmy* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: [http://japatech.zelenausporam.cz/gallery/0/31-7\\_vyuziti\\_baterii\\_nas\\_na\\_bazi\\_sodiku\\_a\\_siry\\_naoki\\_hirai.pdf](http://japatech.zelenausporam.cz/gallery/0/31-7_vyuziti_baterii_nas_na_bazi_sodiku_a_siry_naoki_hirai.pdf)
- [19] Lithium-polymerový akumulátor. *Wikipedie otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-polymerový\\_akumulátor](http://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-polymerový_akumulátor)
- [20] DVOŘÁK, Petr. Superkondenzátory. *TZB - info: Obnovitelná energie a úspory energie* [online]. 2010 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6710-superkondenzatory>

- [21] SEDLAKOVA, Vlasta, Josef SIKULA, Jiri MAJZNER, Petr SEDLAK, Tomas KUPAROWITZ, Brandon BUERGLER a Petr VASINA. Supercapacitor equivalent electrical circuit model based on charges redistribution by diffusion. *Journal of Power Sources* [online]. 2015, **286**: 58-65 [cit. 2015-05-19]. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.03.122. ISSN 03787753. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775315005467>
- [22] KETTLER Berlin. *Ivelo.cz* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.ivelo.cz/koloroku/2013/113-kettler-berlin-royal-e/>
- [23] Horské kolo Apache Everest. *Bikecontrol.cz: elektrokola* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.bikecontrol.cz/eshop/detail/11276-horske-elektrokolo-apache-everest.html>
- [24] APACHE ELBRUS E5. *Akumo.cz* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.akumo.cz/apache-elbrus-e5-elektrokolo>
- [25] Konstrukce BLDC. *Evbike.cz* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.evbike.cz/Motor-EV-Bike/>
- [26] Hallova sonda. *Profi ElektriKa* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://elektriKa.cz/data/clanky/clanek.2006-04-01.2480110481>
- [27] JENÍČEK, Jan. *Použití superkapacitorů ve vozidlech MHD: Spojování superkapacitprů* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/13941/Diplomova%20prace\\_Jenicek.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/13941/Diplomova%20prace_Jenicek.pdf?sequence=1)
- [28] IBRAHIM, H, A ILINCA a J PERRON. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2008, **12**(5): 1221-1250 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/j.rser.2007.01.023. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032107000238>
- [29] GARDINER, G. *Composite flywheels: Finally picking up speed?* [online]. [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/blog/post/composite-flywheels-finally-picking-up-speed>
- [30] TŮMA, Jan. *Encyklopedie energetiky: Elektrická doprava* [online]. [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/pro-pedagogy/materialy-pro-vyuku/tiskoviny/24.html>
- [31] DLOUHÝ, Petr a Luďěk JANÍK. Palivové články. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/410-palivove-clanky>
- [32] PEŠKA, Robert. Zakopejte baterie, palivové články jsou zde. *Hw.cz* [online]. [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://generator.citace.com/dok/aPJcnHzGo4u1PMNU>

- [33] Spalovací motor. *Wikipedia.org* [online]. [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Spalovací\\_motor](http://cs.wikipedia.org/wiki/Spalovací_motor)
- [34] SHI, Lisheng a M. L. CROW. Comparison of ultracapacitor electric circuit models. *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century* [online]. 2008, : 213-234 [cit. 2015-05-31]. DOI: 10.1049/pbpo059e\_ch7. Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4596576](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4596576)
- [35] PROKOP, Libor a Leoš CHALUPKA. 3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x: Design of 3-Phase BLDC Motor Control Application Based on the Software Development Kit. *Freescall Semiconductor: Application Note* [online]. 2005, (11): 54 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: [http://www.freescall.com/files/dsp/doc/app\\_note/AN1914.pdf](http://www.freescall.com/files/dsp/doc/app_note/AN1914.pdf)
- [36] LOŽEK, Miroslav, Pavel ZAHRADNÍK a Jan HAVLIK. *Regulace BLDC pohonů pro asistivní technologie*[online]. : 4 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://amber.feld.cvut.cz/bmeg/wp-content/uploads/2012/03/Lozek-TBMI-2011.pdf>
- [37] HOLMBERG, Sunshine, Alexandra PEREBIKOVSKY, Lawrence KULINSKY a Marc MADOU. 3-D Micro and Nano Technologies for Improvements in Electrochemical Power Devices. *Micromachines* [online]. 2014,5(2): 171-203 [cit. 2015-06-01]. DOI: 10.3390/mi5020171. ISSN 2072-666x. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-666X/5/2/171/>
- [38] ČEŘOVSKÝ, Zdeněk a Vladěk PAVELKA. PODMÍNKY PRO VYBÍJENÍ SUPERKONDENZÁTORŮ POUŽITÝCH V HYBRIDNÍCH ELEKTRICKÝCH VOZIDLECH. *XXVIII.poh.konference Plzeň* [online]. : 1-6 [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap2\\_PPVS.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap2_PPVS.pdf)
- [39] TECHNOLOGIES, Maxwell. *Datasheet BC ultracapacitors: BCAP0350* [online]. [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: [http://www.mouser.com/ds/2/257/Maxwell\\_BCseries\\_DS\\_1017105-4-341252.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/257/Maxwell_BCseries_DS_1017105-4-341252.pdf)
- [40] MENON, Sreevalsan S., SOORAJ, Sanjaj MOHAN, Reno DISNEY a Skumaran SUNEETH. DESIGN AND ANALYSIS OF KINETIC ENERGY RECOVERY SYSTEM IN BICYCLES. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* [online]. : 1-9 [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: [http://www.ijirset.com/upload/august/42\\_DESIGN.pdf](http://www.ijirset.com/upload/august/42_DESIGN.pdf)
- [41] CARICCHI, F, F CRESCIMBINI, Giulii CAPPONI a L SOLERO. Study of Bi-Directional Buck Boost converter Topologies for Application in Electrical Vehicle Motor Drives. *University of Rome, department of electrical engineering* [online]. : 1-7 [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=647705&tag=1>

- [42] MALAN, Keagan, Michael COUTLAKIS a James BRAID. Design and development of a prototype super-capacitor powered electric bicycle. *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)* [online]. IEEE, 2014, : 1434-1439 [cit. 2015-06-04]. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850611. ISBN 978-1-4799-2449-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6850611>
- [43] Dojezd elektrokola. *Svetelektokol.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: <http://svet-elektrokola.cz/dojezd-elektrokola/>
- [44] Akumulátor Li-ion Samsung 48 V: komponenty na e-bike. *E-pohon.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: <http://www.e-pohon.cz/e-pohon/eshop/4-1-Komponenty-na-e-bike/2-2-Li-ion-a-LiFePO4-akumulatory/5/517-Akumulator-Li-ion-Samsung-48V-23-2Ah-Alu-box>