

Zdeněk Mašek¹, Stanislav Gregora², Jan Michl³, Karel Dvořák⁴

Superkapacitory v dopravní technice

Klíčová slova: *akumulace energie, akumulátor, superkapacitor, palivový článěk, elektrická trakce, alternativní pohon*

1. Úvod

Akumulace elektrické energie je jedním z doposud nedořešených technických problémů současné doby, kdy stále rostoucí nároky na její spotřebu jsou spojeny s velmi rychlým nárůstem její ceny. V neposlední řadě je to i otázka její „ekologické“ výroby, na kterou jsou vyvozovány tlaky z hlediska produkovaných emisí. Naskytá se tedy otázka snížení její spotřeby jak na straně maloodběratelů, tak na straně velkoodběratelů. K tomu vede několik řešení jako je konstrukce nových technologií s podstatně menší energetickou náročností a v druhém případě vydanou energii při rozběhu opět s určitou účinností získat zpět. K tomu je zapotřebí energetický akumulátor. Existují různé metody pro akumulaci energie, přes energii elektrického respektive magnetického pole nebo elektrochemickou metodou, kde tato tradiční metoda vychází z elektrochemické přeměny – akumulátorů. Problémem tohoto způsobu ukládání je malá objemová a hmotnostní energetická hustota a dlouhá doba chemického procesu, která brání okamžitému pojmoutí poměrně velkého množství energie. I přesto, že došlo v poslední době k výraznému zlepšení těchto parametrů (Ni-MH, Li-Ion, Li-Pol akumulátory), stále je zde nevyřešený problém předání velké energie v krátkém intervalu a nízká účinnost energetické přeměny. Existují i další metody pro ukládání, které ji například uloží ve formě kinetické energie (setrvačnick). Tyto metody již používaly před II. světovou válkou Švýcarské dráhy. U těchto metod dochází k uložení přes nutnou přeměnu energie z jedné formy do druhé, kde sehrává důležitou úlohu účinnost přeměny. Z tohoto hlediska splnit požadavek vysoké energetické kapacity a vysoké účinnosti splňuje teprve nový prvek, který byl vyvinutý díky novým dostupným technologiím – superkapacitor.

¹ Ing. Zdeněk Mašek, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, KEEZ, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, tel.: +420 466 036403, E-mail: zdenek.masek@upce.cz

² Doc. Ing. Stanislav Gregora, Ph.D., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, KEEZ, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, tel.: +420 466 036405, E-mail: stanislav.gregora@upce.cz

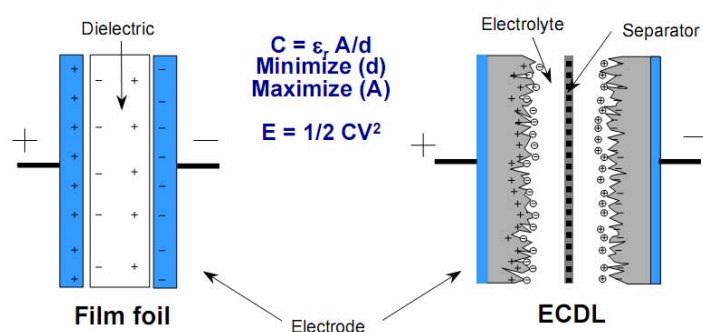
³ Ing. Jan Michl, doktorand, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, KEEZ, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, tel.: +420 466 036387, E-mail: jan.michl@upce.cz

⁴ Ing. Karel Dvořák, Univerzita Pardubice, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, KEEZ, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, tel.: +420 466 036440, E-mail: karel.dvorak@upce.cz

2. Superkapacitor

2.1. Princip funkce

Superkapacitor (superkondenzátor) představuje v principu elektrolytický kondenzátor vyrobený speciální technologií, která umožňuje dosažení obrovské kapacity řádu až stovek či tisíců Faradů. Tato technologie je založena na tzv. elektrochemické dvouvrstvě, proto se superkapacity označují také zkratkou EDLC (Electrochemic Double Layer Capacitor). Energie je v superkapacitoru uložena elektrostatičticky, stejně jako u klasického kondenzátoru. Funkci superkapacitoru lze vysledovat z Obr. 1. Po přivedení vnějšího napětí dochází k přesunu kladných iontů v elektrolytu směrem k záporné elektrodě a k přesunu záporných iontů ke kladné elektrodě.



Obr. 1 Struktura běžného kondenzátoru (vlevo) a superkondenzátoru (vpravo) [Zdroj: Maxwell]

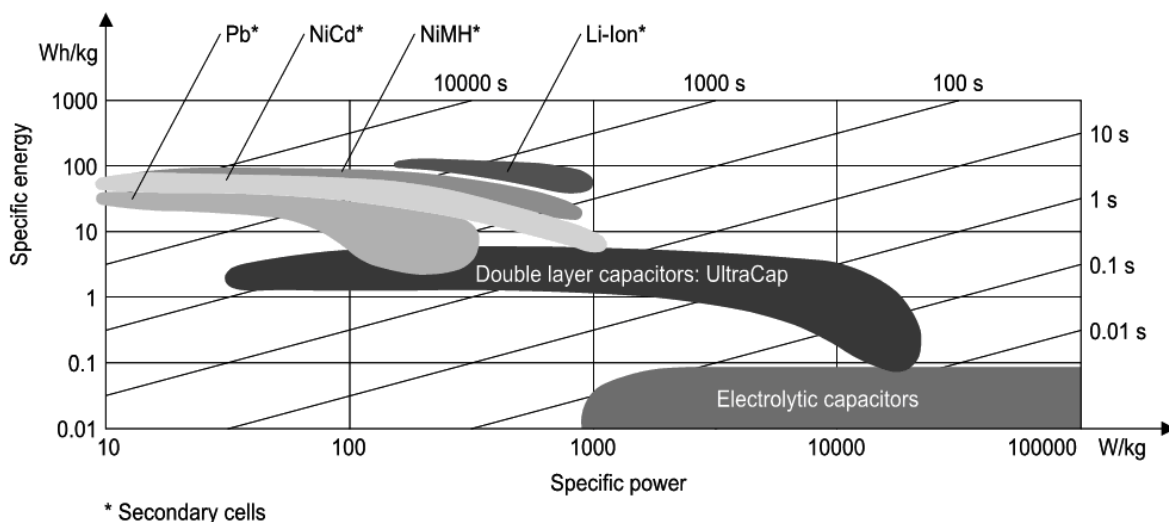
Jednu z nejdůležitějších komponent superkapacitoru představuje vrstva aktivního uhlíku, která je nanášena na vnitřní stranu hliníkových elektrod, které jsou tvořeny hliníkovou fólií. Aktivní uhlík ve formě prášku je tvořen velmi malými částicemi, které v celém objemu vytvářejí velice pórovitý povrch, jehož plocha je obrovská. Výrobci uvádí hodnotu až 2000 m² na jeden gram prášku. Aktivní uhlík je tvořen uhlíkovým aerogelem. Jde o pevný materiál s nízkou hustotou vzniklý nahrazením tekuté složky gelu vzduchem. Dalším používaným materiálem jsou uhlíkové polymery. Materiálem budoucnosti jsou uhlíkové nanotrubičky, které ještě podstatně zvyšují povrch částic. Elektrody kondenzátoru jsou odděleny separátorem (polypropylenová fólie) a jsou obklopeny elektrolytem, který je tekutý nebo ve formě gelu. Tloušťka dielektrika (el. dvouvrstvy) je velmi malá, řádově 10⁻¹⁰ m. Právě díky kombinaci obrovské plochy a velmi tenké dvouvrstvy se dosahuje velké schopnosti vázat náboj a tedy vysoké kapacity superkondenzátoru při malém sériovém odporu. Určitou nevýhodou, vzhledem k vlastnostem elektrolytu a možnému průrazu elektrické dvouvrstvy, je nízké provozní napětí, jehož hodnota se pohybuje v rozmezí 2,3 – 2,7 V v případě velmi používaného organického elektrolytu. Pro větší napětí je nutné řadit superkondenzátory do série, což ovšem vyžaduje použití ochranných balančních obvodů.

2.2. Vlastnosti a použití v dopravní technice

Superkapacitor lze díky svým vlastnostem zařadit mezi akumulátor a běžný elektrolytický kondenzátor. V porovnání se standardním elektrolytickým kondenzátorem dosahuje vysoké energetické hustoty (jednotky Wh/kg) a v porovnání s akumulátory má vyšší výkonovou hustotu (jednotky až desítky kW/kg), ale stále ještě několikrát nižší energetickou hustotu. V Tab. 1 je uvedeno porovnání vybraných vlastností vybraných zásobníků el. energie.

	Olověný akumulátor	Superkapacitor	Elektrolytický kondenzátor
nabíjecí doba	1 až 6 h	0,3 až 30 s	10^{-3} až 10^{-6} s
vybíjecí doba	0,3 až 3 h	0,3 až 30 s	10^{-3} až 10^{-6} s
energetická hustota [Wh/kg]	10 až 100	1 až 10	< 0,1
výkonová hustota [W/kg]	< 1 000	< 10 000	< 100 000
počet cyklů	1 000	> 500 000	> 500 000
účinnost	0,7 až 0,85	0,85 až 0,98	> 0,95

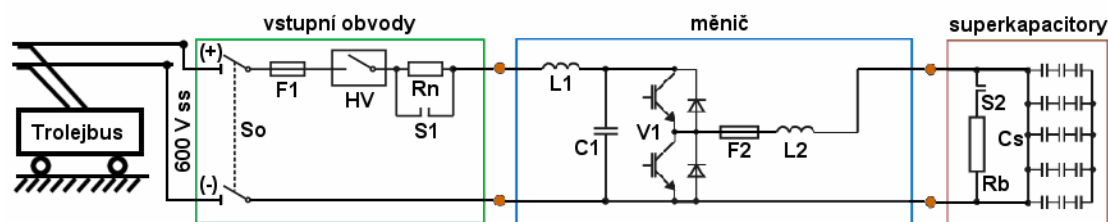
Tab. 1 Srovnání vlastností olověného akumulátoru, superkapacitoru a elektrolytického kondenzátoru [Zdroj: Maxwell]



Obr. 2 Porovnání různých zdrojů el. energie s ohledem na měrnou energii a výkon [Zdroj: Epcos]

Díky tomu, že superkapacitor ukládá energii na základě elektrostatického principu, je schopný tuto energii uložit i vydat podstatně rychleji než akumulátor, ve kterém probíhá elektrochemická přeměna. Také vnitřní odpor superkapacitoru je menší než vnitřní odpor akumulátoru. Vzhledem k těmto vlastnostem je superkapacitor vhodný pro krátkodobé uložení elektrické energie. Těchto nabízených vlastností je možno aplikačně využít právě v oblasti energetiky dopravy, kde dochází k předávání energie mezi vozidlem a vedením a v určitém okamžiku eventuelně k jejímu maření (elektrodynamické brzdění). Moderní vozidla elektrické trakce dokáží kinetickou energii při brzdění přeměnit zpět na energii elektrickou a vracet ji v dostatečné kvalitě zpět do trakční sítě. Proces rekuperace energie zpět do trakční sítě má však u vozidel stejnosměrného systému jednu důležitou podmínku a sice, že bude rekuperovaná energie ihned spotřebovávána v jiném vozidle nebo u střídavé trakce navracena zpět do rozvodné energetické sítě. Tato podmínka je často obtížně splnitelná a kinetická energie se musí mařit v brzdových odpornících či mechanických brzdách. Zde se tedy nabízí myšlenka akumulace rekuperované energie v okamžiku, kdy nemůže být spotřebována a k tomuto účelu je právě velmi vhodný superkapacitor. Myšlenka použití superkapacitorů

v napájení stejnosměrného systému (tramvaje, trolejbusy, kolejová žel. vozidla ss trakce) je znázorněna na Obr. 3. Uložená energie v superkapacitoru se dodá v okamžiku velkého odběru (rozjezdu).



Obr. 3 Použití superkapacitorů na trolejbusové lince MHD

V trolejbusové dopravě se nabízí dvě alternativy:

1. *Závislé vozidlo* s pevnými napájecími body na zastávkách, kde vozidlo s elektrickým pohonem naakumuluje potřebnou energii do superkondenzátoru (spojení na energetický zdroj buď inдукtivní cestou nebo kontaktním spojením) a prostřednictvím regulační výkonové elektroniky odčerpává energii z kondenzátoru.
2. *Polozávislé vozidlo* - jednalo by se o obsluhu koncových nezatrolejovaných úseků, kde z troleje si během jízdy vozidlo naakumuluje potřebnou energii na požadovaný akční rádius. Na naší katedře byl proveden energetický výpočet, který zde z kapacitních důvodů nelze uvést.

Další uplatnění nachází tento moderní akumulční prvek v oblasti osobních i nákladních silničních vozidel, kde mohutný rozvoj automobilní techniky používající k pohonu spalovacích motorů přináší vážné problémy s exhalacemi zejména ve velkých městských aglomeracích. V neposlední řadě je nutno se zamyslet i nad problematikou využití paliv, která se pro spalovací motory používají z neobnovitelných zdrojů. Tato situace vyžaduje podniknout výraznější kroky v oblasti uplatnění elektromobilů, které již nacházely uplatnění před více jak sto lety. A již tehdy se ukázalo, že největším problémem bránící masovému použití bude akumulace energie. Klasické akumulátorové systémy, ač v poslední době doznaly velkého zlepšení svých parametrů, nesplňují požadavky na ně kladené.

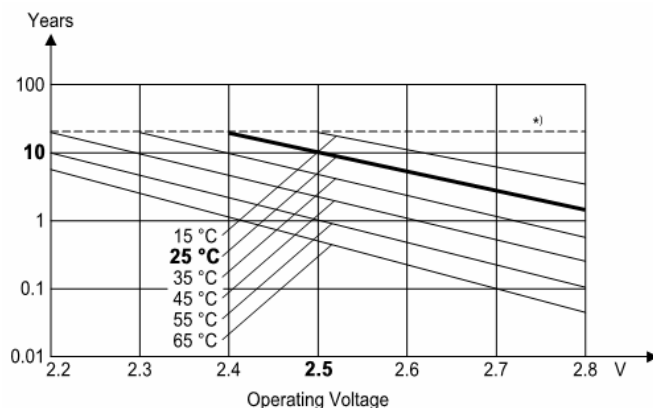
Vývoj v této oblasti se proto začal ubírat směrem hybridních pohonů. Ve srovnání se spalovacími motory, kde energetický obsah je uložen v palivu, je pro akumulátory negativem jejich velká objemová a nízká hmotnostní energetická hustota. Zde jasně doposud konkuruje spalovací motor, který pracuje u hybridního pohonu s optimalizovaným pracovním režimem. Ve fázi jízdy s nevyužitým výkonem, se ukládá energie do energetického zásobníku, kam se respektive ukládá i rekuperovaná energie při brzdění. Akumulovaná energie je zde pak využívána jen pro krytí zvýšených výkonových nároků při jízdách manévrech, jako je například předjíždění. Už i zde jsou kladeny vysoké nároky na akumulční prvek z hlediska dynamiky příjmu a výdeje energie a klasický akumulátor se jeví jako nedostatečně účinný, vlivem pomalé chemické přeměny elektrické energie na chemickou a obráceně. A zde nachází superkapacitor další možnost využití. Hybridní pohon je dnes aplikován jak na silničních vozidlech, tak může přicházet i v úvahu u vozidel nezávislé trakce s elektrickým přenosem výkonu. Nicméně tuto cestu přes hybridní pohony lze do budoucna pokládat za dočasnou, neboť vede k značné složitosti celého pohonu vzhledem k jeho vyšší hmotnosti a menší účinnosti a v neposlední řadě k možné vyšší poruchovosti. Hlavní světoví výrobci automobilní techniky z uvedených důvodů věnují proto maximální úsilí oblasti pohonných

systemů s alternativními zdroji s přímým elektrickým pohonem a tento vývoj směřuje k palivovým článkům.

2.3. Efektivita superkapacitoru a jeho životnost

Efektivita s jakou dochází k ukládání energie do superkapacitoru a efektivita jejího znovu využívání závisí podstatnou měrou na účinnosti přenosu výkonu mezi bodem odběru / zdrojem přebytečné energie a superkapacitorem. Především se jedná o účinnost zvyšovacího/snižovacího měniče, který je obvykle přítomen a ke kterému je připojen superkapacitor. Dále jsou to ohmické ztráty v přenosu el. energie. Účinnost samotného superkapacitoru je velmi vysoká (až 98 %). Účinností přenosu energie z/do superkapacitoru se zabývá např. práce [1].

Životnost superkapacitoru je v porovnání s akumulátory daleko vyšší. Výrobci uvádějí až 1 milion nabíjecích/vybíjecích cyklů, přičemž i po dosažení tohoto limitu je superkapacitor stále schopen funkce, ovšem se zhoršenými vlastnostmi (snížená kapacita, zvýšený vnitřní ekvivalentní sériový odpor ESR). Vlivem cyklického nabíjení a vybíjení se snižuje kapacita a zvyšuje ESR, konec životnosti je definován pro pokles jmenovité kapacity o 20 % nebo zvýšení ESR o 100 %. Dalším faktorem, který ovlivňuje kapacitu a ESR superkapacitoru, je teplota a provozní napětí. Udávaná životnost (až 10 let) platí pro teplotu superkapacitoru 25 °C, každým dalším zvýšením teploty o 10 °C se životnost snižuje na polovinu! Např. při trvalém provozu s teplotou 65 °C je životnost necelý 1 rok! Taktéž při provozu na napětí vyšším než jmenovitém dochází k rapidnímu snížení kapacity a tedy životnosti.



Obr. 4 Životnost superkapacitoru v závislosti na provozním napětí [Zdroj: Maxwell]

Při návrhu systému je nutné tyto faktory brát v úvahu, neboť budou podstatnou měrou ovlivňovat výslednou kapacitu superkapacitoru. Velkým kladem je nezávislost aktuální hodnoty kapacity na teplotě, což je nesporná výhoda oproti akumulátorům, které trpí výrazným poklesem kapacity při nízkých teplotách. Vnitřní odpor (ESR) se se snižující teplotou zvyšuje, což je dáno sníženou schopností přesunu iontů v elektrolytu.

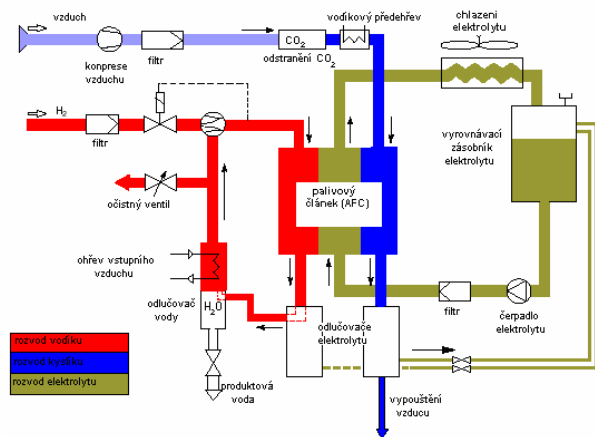
V praxi je nutné jednotlivé superkapacity sério-paralelně spojovat do tzv. kondenzátorových baterií z důvodu velmi nízkého napětí jednoho superkapacitoru (cca 2,5 V). Díky tolerancím ve výrobě mají kapacitory stejného typu různé parametry (C, ESR, samovybíjecí proud). Jejich sériové spojení tak přináší problém nestejného rozložení napětí na jednotlivých elementech. Řešením je použití pasivních nebo aktivních balančních obvodů. Pasivní řešení spočívá v trvalém připojení odporu paralelně ke svorkám superkapacitoru. Velikost tohoto odporu závisí na svodovém proudu kapacitoru a na požadované rychlosti vyrovnání napětí (tato doba se může pohybovat v řádech hodin či dnů). Tento způsob se používá v aplikacích s nízkou dynamikou výměny el. energie, např.

u záložních zdrojů. Nevýhodou tohoto řešení jsou zvýšené ztráty a snížená účinnost. Druhou možností je použití aktivního balančního obvodu, který dle aktuální situace vyrovnává napětí na jednom nebo mezi dvěma sousedními prvky (jedná se o komparátor s přesnou referencí, který v případě nutnosti připojuje vybíjecí odpor na svorky kapacitoru). Toto řešení je nutné použít v aplikacích, kde dochází k rychlému střídání nabíjecích a vybíjecích cyklů, např. pohon vozidla.

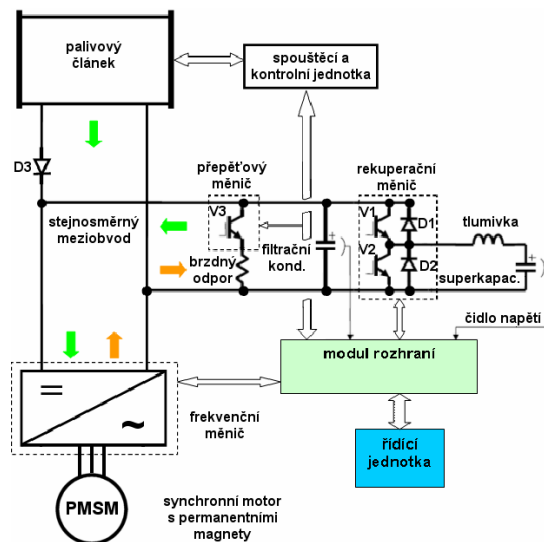
Světoví výrobci superkapacitorů (např. Siemens, Maxwell, Epcos) nabízejí různé typy superkapacitorových baterií (modulů). Jako příklad uveďme např. modul od firmy Epcos s kapacitou 220 F / 56 V (odpovídá „kapacitě“ 3,3 Ah). Tento modul je složen z 24 superkapacitorů 5000 F / 2,5 V s aktivním vyrovnáváním napětí. Celková hmotnost modulu je 30 kg, měrná výkonová hustota činí 1,6 kW/kg, měrná energetická hustota 3 Wh/kg, vnitřní odpor 8 mΩ.

3. Palivový článek

Palivový článek představuje primární generátor elektrické energie, přeměňující chemickou energii běžných paliv přímo na elektrickou, bez rotačních částí a především bez exhalací s relativně s velkou účinností (60 % a vyšší). Z historického pohledu není palivový článek ničím novým. Už v r. 1894 podal první teoreticky zdůvodněný návrh W. Ostwald, který navazoval na vodíko – kyslíkový článek W.R. Groveho (1839). Tato myšlenka se stává aktuální teprve v současné době, kdy je možno ji technicky plně zrealizovat. Na naší Dopravní fakultě Jana Pernera se rovněž snažíme touto problematikou zabývat. Připravili jsme projekt malého osobního vozidla pro nějž byl vypracován návrh pohonu s palivovým článkem. Cílem bylo vypracovat postup energetických výpočtů pro výkonové dimenzování palivového článku a zásobníku energie. Prioritním úkolem pak bylo provést rozbor energetických požadavků elektromobilu v různých jízdních režimech. Vytvořit metodu pro stanovení potřebné výkonové rezervy palivového článku a kapacity superkapacitoru. Na účinnost tohoto systému bude mít vliv ta skutečnost, že z hlediska účinnosti lze čerpat energii do polovičního napětí, což vyžaduje vysoké proudy a s tím spojené Joulovy ztráty. Na Obr. 5 je znázorněna funkce palivového nízkoteplotního článku (alkalický palivový článek AFC) s ukládáním energie do superkapacitoru a zpětným „vybíjením“ této energie do napájecího obvodu elektrického pohonu, který tvoří frekvenční měnič a synchronní motor s permanentními magnety (Obr. 6).



Obr. 5 Alkalický palivový článek (AFC)



Obr. 6 Blokové schéma pohonu

4. Závěr

Vzhledem k uvedeným přednostem superkapacitoru (vysoká účinnost až 98 %, pohotovost, malý vnitřní odpor a relativně vysoká životnost) se nabízí široké pole aplikačního využití. Vedle uvedených dopravních aplikací je možno jej využít jako dočasný zdroj energie v době mezi výpadkem hlavního zdroje a náběhem záložního zdroje (např. diesel agregát). Dále jako zařízení pro řízení kvality el. energie, jako zdroj energie u nízkopříkonových přístrojů (hodinky, kapesní MP3 přehrávače, svítilny) apod.

Na závěr shrňme vlastnosti superkapacitoru.

Výhody:

- Vysoký měrný výkon v porovnání s akumulátory (jednotky kW/kg),
- Nízký vnitřní odpor (jednotky mΩ),
- Vysoký počet pracovních cyklů (až 1 000 000),
- Vysoká účinnost (až 98 %),
- Vysoká rychlost nabíjení a vybíjení (řádově sekundy).

Nevýhody:

- Nízká měrná energie v porovnání s akumulátory (jednotky Wh/kg) – cca 5x až 10x nižší než u olověných akumulátorů,
- Nízké provozní napětí na článek – nutnost sériového spojení superkapacitorů a použití obvodů pro vyrovnávání napětí,
- Změna napětí v závislosti na úrovni nabití (to je naopak určitá výhoda spočívající ve snadnosti stanovení zbývající akumulované energie v kapacitoru),
- Poměrně vysoké samovybíjení v porovnání s akumulátory.

Literatura

- [1] MINDL, Pavel, ČEŘOVSKÝ, Zdeněk. Hybrid drive with super-capacitor energy storage. *FISITA 2004 World Automotive Congress*. Barcelona, 23 – 27 May, 2004.
- [2] RUFER, A., HOTELLIER, D., BARRADE, P. A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volume 19, Issue 2, April 2004. Page(s): 629 – 636. ISSN 0885-8977.
- [3] ELSTNER, Vlastislav. Akumulace rekuperované energie v dopravě. In *Sborník EPVE Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Brno : VUT Brno, 2004. s. 43-48. ISBN 80-214-3052-4.
- [4] Webové stránky a firemní literatura firmy EPCOS (www.epcos.com).
- [5] Webové stránky a firemní literatura firmy Maxwell (www.maxwell.com).

Praha, duben 2008

Lektorské posudky: 1. Ing. Vladimír Verzich, Ph.D.
vedoucí projektant AŽD Praha
2. Prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.
Dopravní fakulta Jana Pernera
Univerzita Pardubice