

České vysoké učení technické
V Praze



Fakulta dopravní

Ústav řídicí techniky a telematiky

Jindřich Sadil

ZÁSOBNÍKY ENERGIE PRO ELEKTROMOBILY

11.11.2010



Obsah prezentace

- Zásobníky energie pro elektromobily
 - Výkon, energie, dojezd
 - druhy zásobníků
 - parametry, porovnání
 - příklady použití
 - trendy



Výkon a energie

- Obecné vztahy pro výkon a energii

$$P = \frac{W}{t}, \quad P = \frac{\Delta W}{\Delta t}, \quad P = \frac{dW}{dt}$$

$$W = P \cdot t, \quad W = W(t_0) + P \cdot \Delta t, \quad W = W(t_0) + \int_{t_0}^t P \cdot dt$$

P ...výkon (kW)

W ...energie (kWh)

t ...čas (h)



Příklad rychlostního profilu

Příklad výpočtu elektromobilu Tazzari Zero

- Parametry výpočtu:
 - hmotnost 700 kg (542kg prázdný vůz + 2 osoby)
 - baterie Li-ion Fe 160Ah, 24x3.2V
 - výkon 15 kW



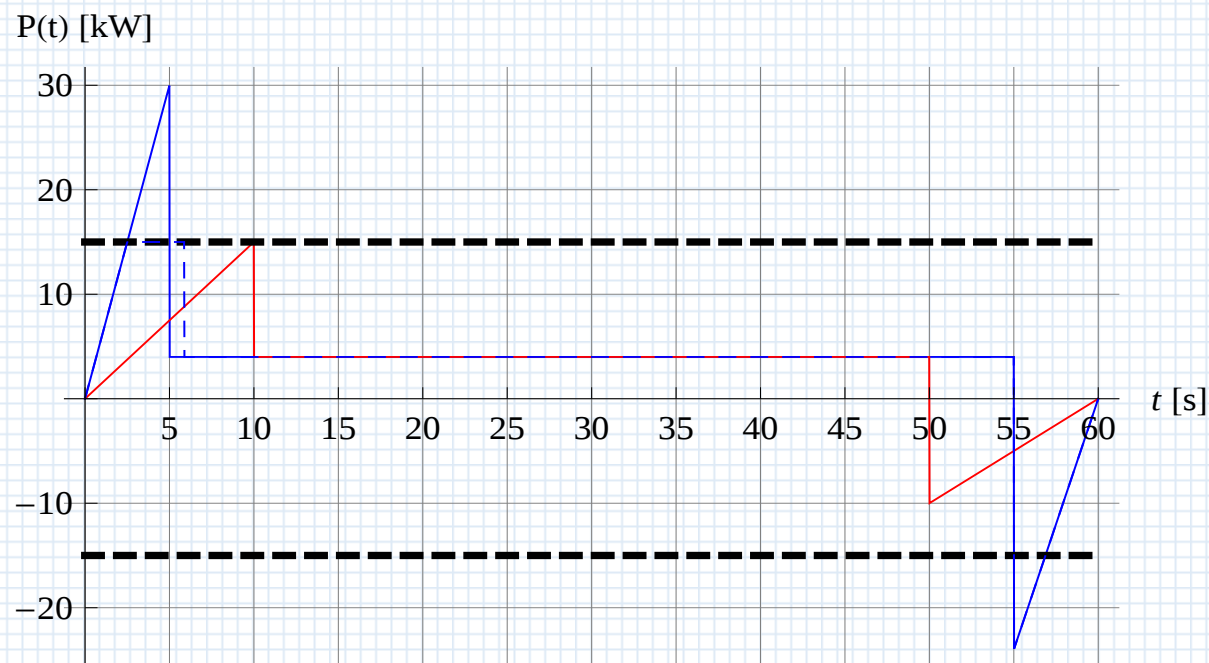
Ujetá vzdálenost 764 metrů

Ujetá vzdálenost 694 metrů



Odpovídající potřeba výkonu akumulátoru

$$P(t) = \frac{dW(t)}{dt} + P_{ztr}(t) = F(t) \cdot v(t) + P_{ztr}(t) = m \cdot a(t) \cdot v(t) + P_{ztr}(t)$$



Elektromobil je omezen svým maximálním výkonem 15 kW.

Čárkovaně uveden odebíraný výkon pro dosažení rychlosti 50 km/h s výkonem max. 15 kW. Tím se mírně změní i rychlostní profil a ujetá vzdálenost klesne ze 764 metrů na 761 metrů. Při brzdění není možné rekuperovat výkony nad 15 kW, takže se bude rekuperovat pouze 15 kW a zbytek se ubrzdí jinak (provozní brzdou).

Tento rychlostní profil nevyžaduje výkon větší než 15 kW, nic se nemění.



Odpovídající odebíraný proud akumulátoru

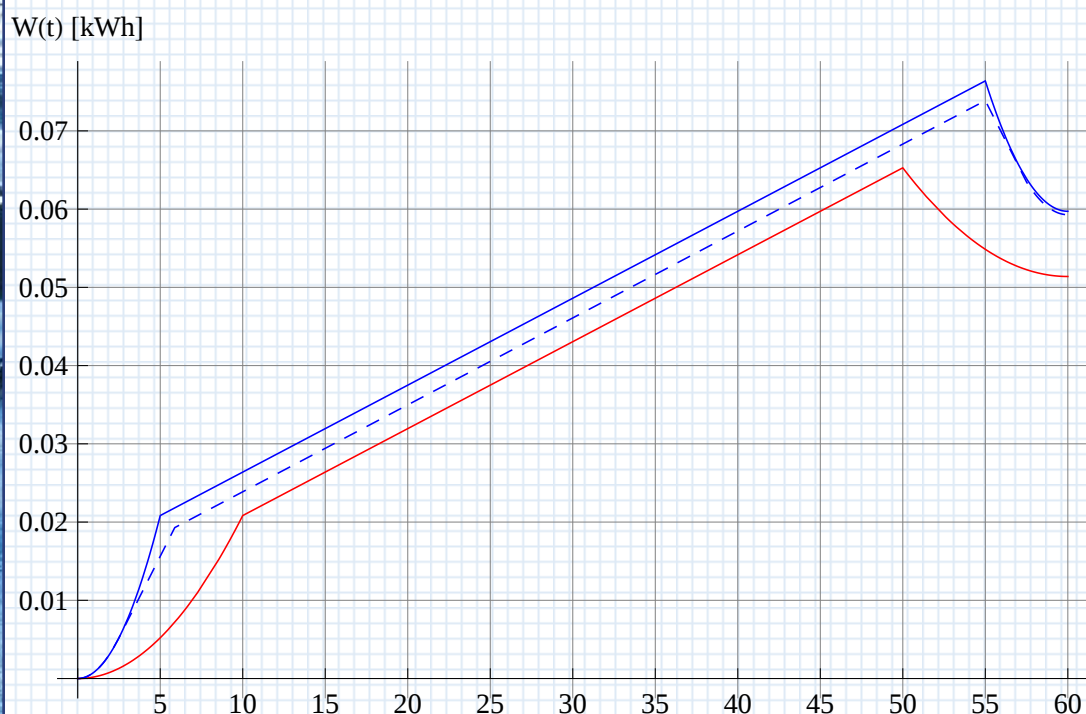
$$I(t) = \frac{P(t)}{U}$$



Záporné hodnoty proudu odpovídají dobíjení akumulátorů.



Celková spotřebovaná energie a dojezd



$$W(t) = W(0) + \int_0^t P \cdot dt$$

Celkem za akumulátor

- odebráno 0,077 kWh
- dodáno 0,018 kWh
- výsledně odebráno 0,059 kWh (pro ujetí 761 metrů)

Celkem za akumulátor

- odebráno 0,065 kWh
- dodáno 0,014 kWh
- výsledně odebráno 0,051 kWh (pro ujetí 694 metrů)

V baterii je možno celkem uložit $24 \times 3,2V \cdot 160Ah = 12,29 \text{ kWh}$ energie.

Spotřebu v tomto "režimu" lze určit jako $0,059kWh/0,761km = 0,0775 \text{ kWh/km}$

Spotřebu v tomto "režimu" lze určit jako $0,051kWh/0,694 \text{ km} = 0,0735 \text{ kWh/km}$

Dojezd v tomto "režimu" lze určit jako $12,29kWh/0,0775kWh \cdot km^{-1} = 159 \text{ km}$

Dojezd v tomto "režimu" lze určit jako $12,29kWh/0,0735kWh \cdot km^{-1} = 167 \text{ km}$



Zásobníky energie pro elektromobily

Sledované zásobníky

- Elektrochemický akumulátor - uvažovaný typ LiFePO_4 (lithium iontové akumulátory) čínského výrobce Thunder Sky o kapacitě 1000 Ah (označení výrobce TS-LFP1000AHA),
- superkap (též superkapacitor, superkondenzátor, ultrakapacitor) - uvažovaný superkap s kapacitou 63 F na napětí 125 V výrobce Maxwell technologies (označení výrobce BMOD 0063 P125 B24),
- setrvačnick - zatím neuvažován konkrétní typ. Použití setrvačnicků pro UPS, F1, NASA apod.
- palivový článek - uvažován obecně vodíkový palivový článek, který elektrolyzou vyrábí vodík, uskladní jej a potom z něj vyrábí elektřinu.



Zásobníky - elektrochemické akumulátory

Elektrochemický akumulátor:

- Elektrochemický akumulátor obecně:

$$W_{100\%} = U \cdot C$$

W ...energie 1 cyklu (Wh)

$$W_h = U \cdot C \cdot \frac{h}{100}$$

U ...napětí akumulátoru (V)

C ...kapacita akumulátoru (Ah)

$$I = x \cdot C$$

h ...hloubka vybití (%)

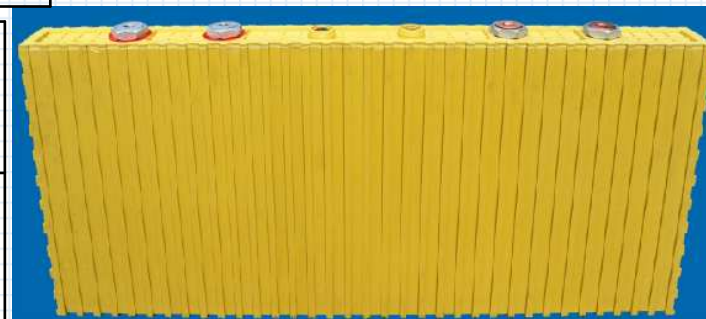
$$P = U \cdot I$$

x ...násobek kapacity (-)

- LiFePO_4 čínského výrobce Thunder Sky o kapacitě 1000 Ah.

Rozměry (m)	m (kg)	Cena (tis. Kč)	U (V)	C (Ah)	Akumulovatelná energie max. (kWh)
0.375x 0.850x 0.071	33	30	3.5	1000	3.50

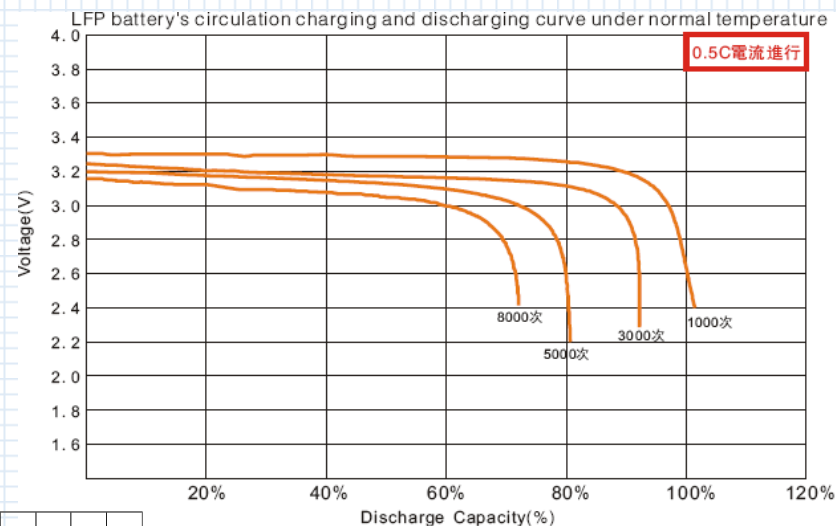
Akumulovatelná energie opt. (kWh)	Trvalý výkon (kW)	Proud nab./vyb. (A)	Čas pro nab./vyb. (min)
2.45	1.75	500 trvale 3000 max.	84.0



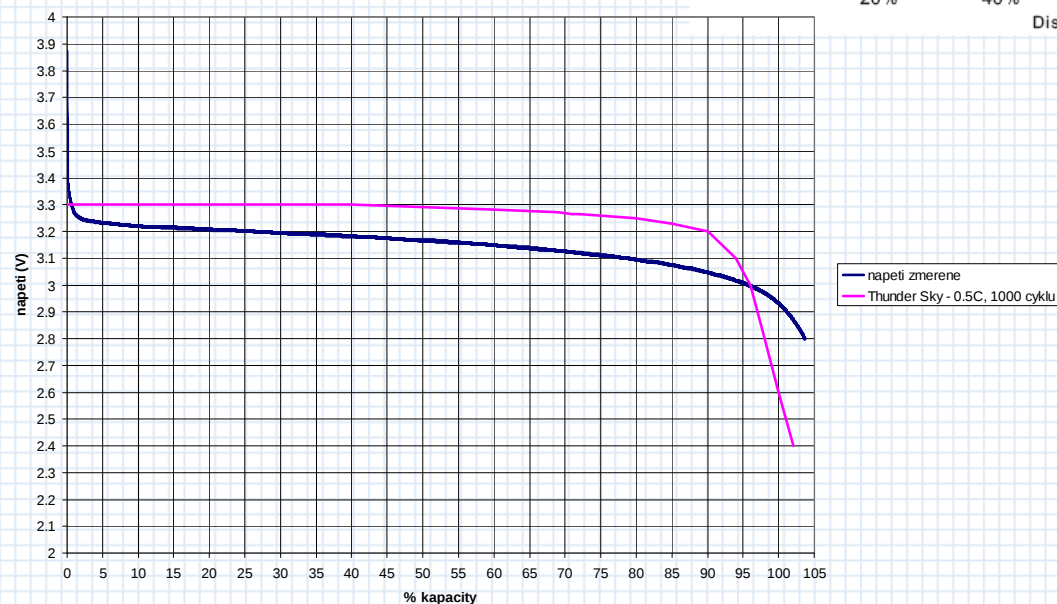
Zásobníky - elektrochemické akumulátory

Elektrochemické akumulátory

- Vybíjecí charakteristiky



Vybíjecí křivky - test kapacity



Zásobníky - superkapy

Superkap

- Superkap obecně

$$W = \frac{1}{2} C \left[U^2 - \left(\frac{U}{2} \right)^2 \right] = \frac{3}{8} C U^2$$

W...energie 1 cyklu (Ws)

C...kapacita (F)

U...plné napětí (V)

- BMOD 0063 P125 B24 výrobce Maxwell technologies, 125V, 63F.

Rozměry (m)	m (kg)	Cena (tis. Kč)	U (V)	C (F)	Akumulovatelná energie max. (kWh)
0.762x 0.425x 0.265	60	125	125	63	0.14

Akumulovatelná energie opt. (kWh)	Trvalý výkon (kW)	Trvalý proud (A)	Čas pro nab./vyb. (min)
0.10	6.88* 18.75	55* 150	0.9* 0.3

* bez použití nuceného chlazení



Zásobníky - setrvačníky

Setrvačnick (flywheel)

- Setrvačnick obecně:

$$W = \frac{1}{2} J \omega^2$$

W ...okamžitá akumulovaná energie (Ws)

P ...okamžitý výkon (W)

$$J = \int_m r^2 dm$$

J ...moment setrvačnosti ($kg.m^2$)

ω ...úhlová rychlost rotoru ($rad.s^{-1}$)

r ...vzdálenost elementu o hmotnosti m od osy rotace

$$P = M.\omega$$

M ...moment ($N.m$)

- Teoretické limity setrvačnicků

	Density [$kg.m^{-3}$]	Strength [$MN.m^{-2}$]	Theoretical maximum specific energy [$Wh.kg^{-1}$]
Steel (AISI 4340)	7800	1800	32
Alloy (AlMnMg)	2700	600	31
Titanium (TiAl6Zr5)	4500	1200	37
GFRP Glass fibre reinforced polymer (60 vol% E-glass)	2000	1600	111

- Specifické problémy:

- Odstředivá síla, bezpečnost (nádobu), gyroskopický efekt



Zásobníky - setrvačníky

Setrvačnick pro F1

- Karbonový rotor, vakuovaná komora, kontejnment, pevný převodový poměr
- Hmotnost 25 kg, objem 13 l.
- Otáčky 60.000 min⁻¹
- Výkon 60 kW (hustota výkonu 2400 W/kg)
- Uložitelná energie 0,11 kWh (hustota energie 4,5 Wh/kg)



Zásobníky -porovnání

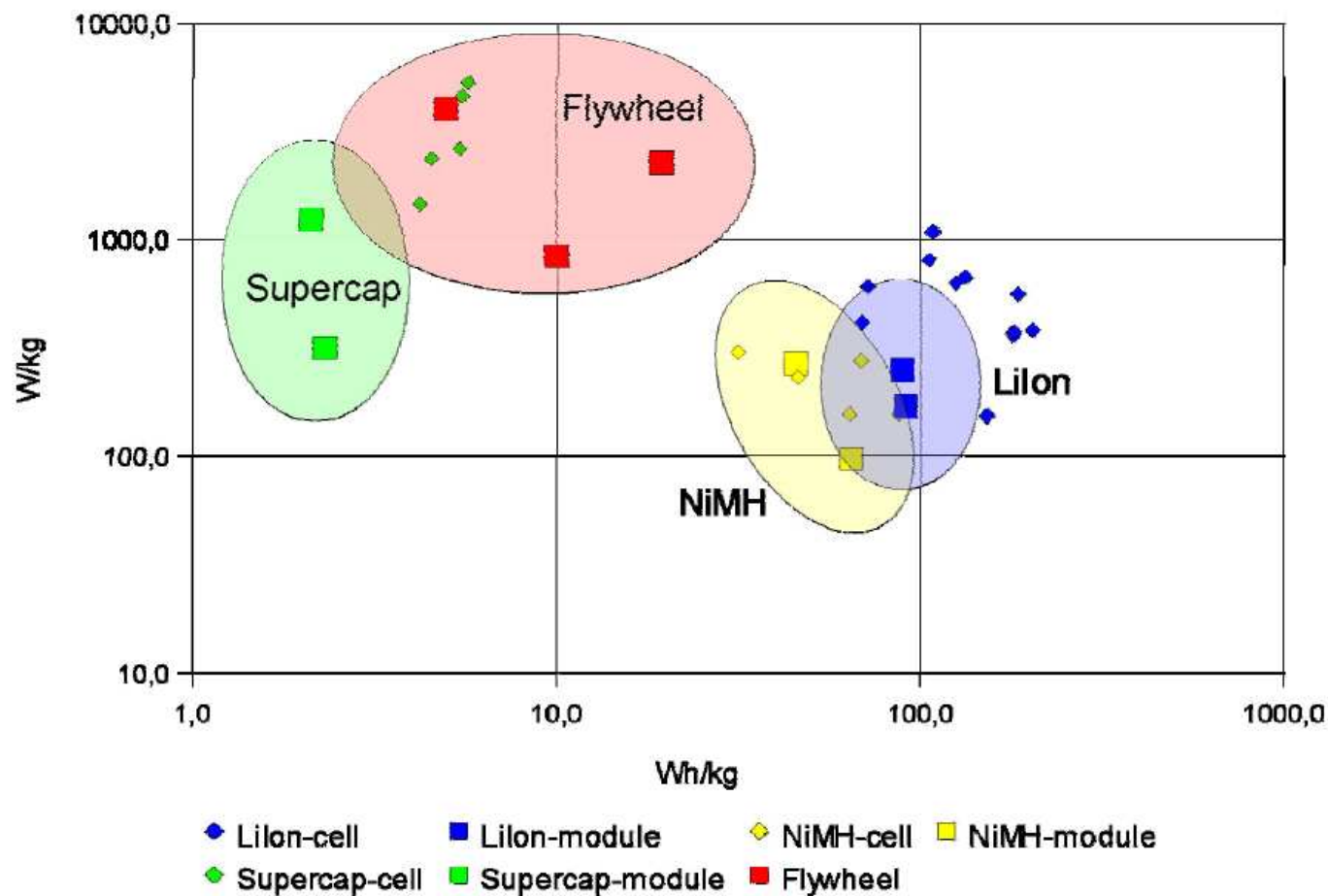
Sledované parametry pro porovnání zásobníků

- Hustota výkonu [kW/kg]
- Hmotnostní hustota energie [Wh/kg]
- Objemová hustota energie [Wh/l]
- Cena za kapacitu akumulčního systému [Kč/Wh]
- Počet cyklů akumulčního systému [-]
- Životnost akumulčního systému [roky]
- Účinnost akumulčního systému [%]



Zásobníky - porovnání

Porovnání zásobníků [Brasseur]



Zásobníky - porovnání

Porovnání zásobníků z hlediska výkonové hustoty

	Hustota výkonu [W/kg]
Setrvačníky	800-10.000 (2400)
Superkapacitory	250-1000 (344)
Vodíkový palivový článek	150
Akumulátory Li-ion	50-350 (53)

Porovnání zásobníků z hlediska hustoty energie

■ hmotnostní

	Hmotnostní hustota (opt.) energie [Wh/kg]
Vodíkový pal. čl. s karbonovou nádrží	1497
Vodíkový pal. čl. s ocelovou nádrží	333
Akumulátory Li-ion	60-200 (106)
Setrvačníky	3-15 (4,5)
Superkapacitory	2-5 (2)

■ objemová

	Objemová hustota (opt.) energie [Wh/l]
Vodíkový palivový článek	1030
Akumulátory Li-ion	150-400 (154)
Setrvačníky	5-25 (8,5)
Superkapacitory	1-4 (1,2)



Zásobníky - porovnání

Porovnání zásobníků z hlediska ceny

	Cena za kapacitu akumulčního systému [Kč/Wh]
Akumulátory Li-ion	9 (9)
Vodíkový palivový článěk	190
Superkapacitory	1250 (1250)

Porovnání zásobníků z hlediska životnosti

- životnost je závislá na režimu (hloubka vybíjení, velikost nabíjecích a vybíjecích proudů, ...)

	Životnost akumulčního systému [roky]
Superkapacitory	10 (? - závislé na režimu)
Vodíkový palivový článěk	6
Akumulátory Li-ion	4 (? - závislé na režimu)



Zásobníky - porovnání

Porovnání zásobníků z hlediska počtu cyklů

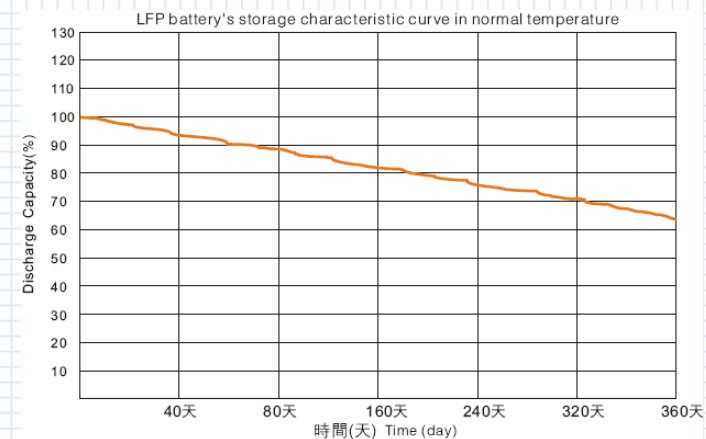
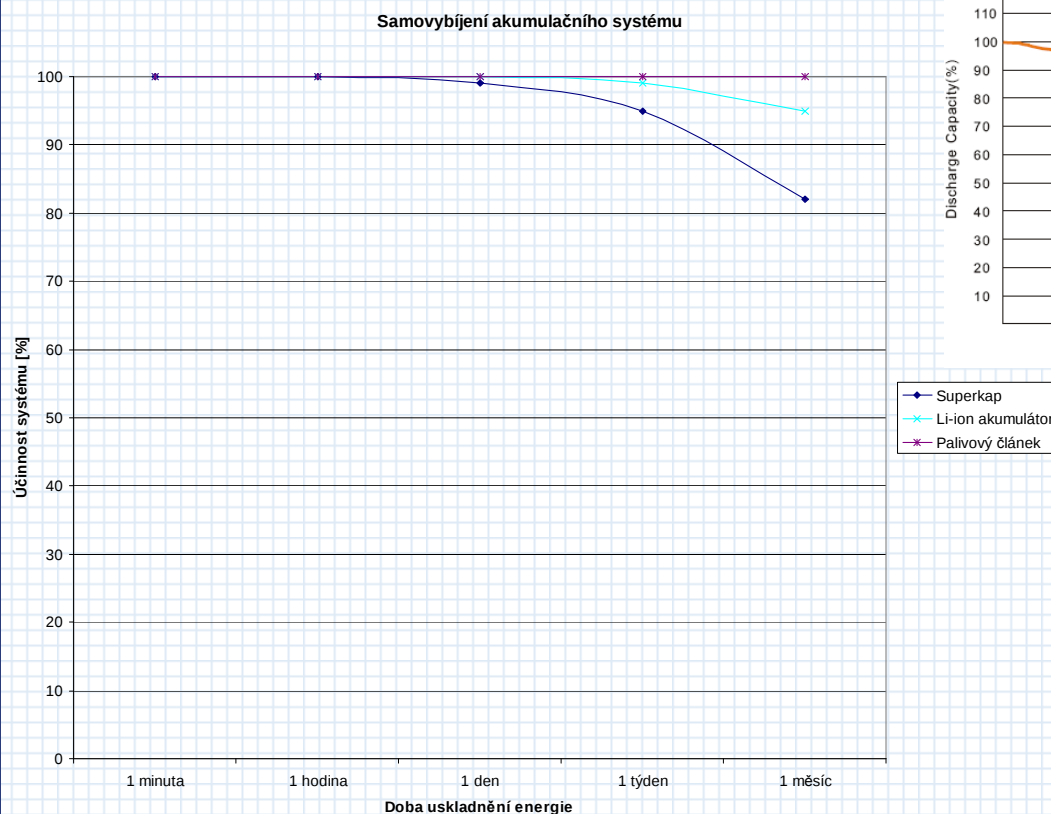
- počet cyklů Li-ion závisí na hloubce vybíjení (menší hloubka vybíjení znamená vyšší možný počet cyklů)

	Počet cyklů akumulčního systému [-]
Superkapacitory	500000 - 1000000 (1000000)
Akumulátory Li-ion	1500 - 8000 (> 5000)
Vodíkový palivový článek	1000 - 5000



Zásobníky - porovnání

Porovnání zásobníků z hlediska samovybíjení



Zásobníky - porovnání

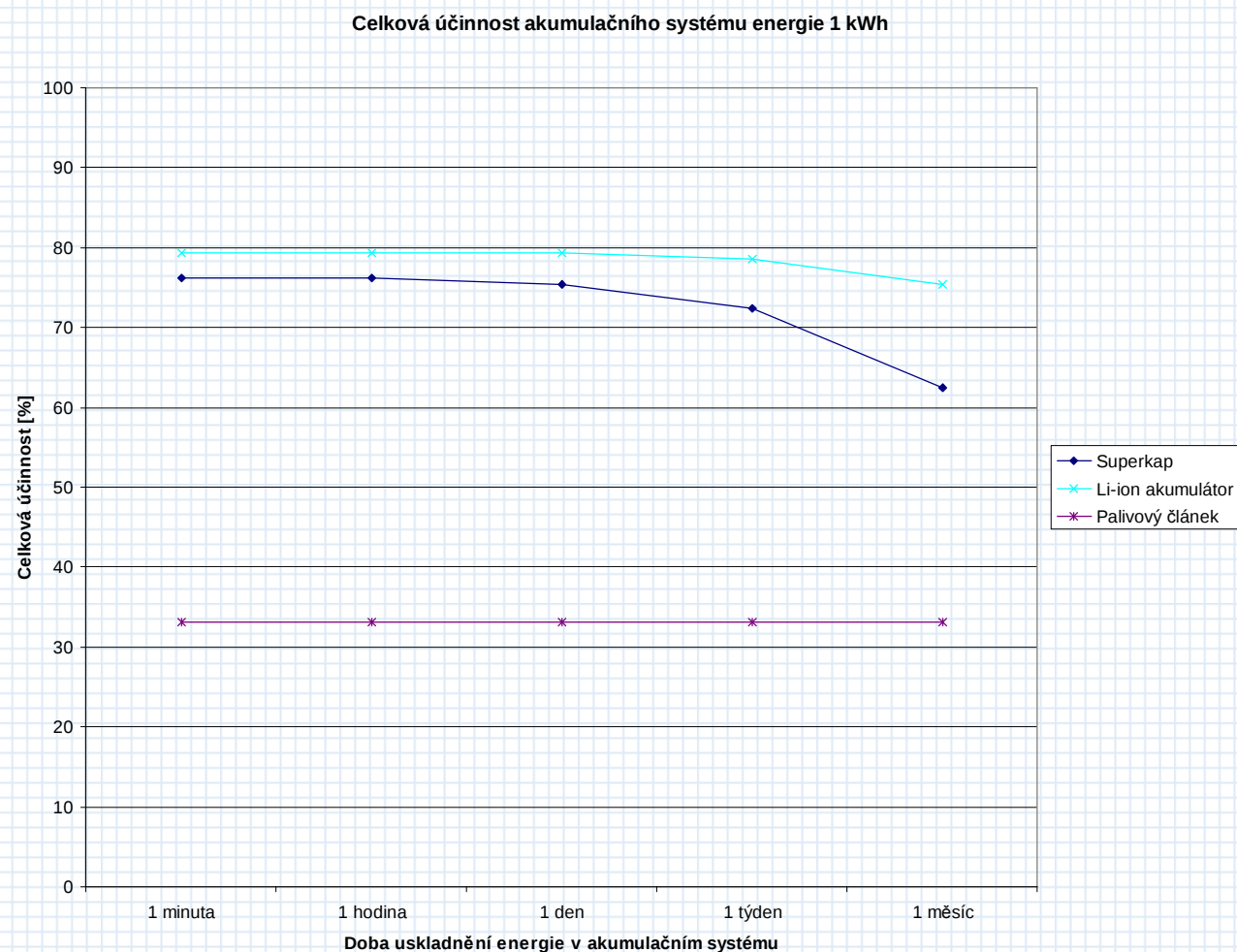
Porovnání zásobníků z hlediska celkové účinnosti

- Usměrnění elektřiny - vstupní elektřina je střídavá (ze sítě, ze střídavého motoru při rekuperaci, z generátoru), elektřina pro nabíjení akumulátorů je stejnosměrná.
- Nabíjení - přeměna stejnosměrné elektrické energie na energii uloženou v akumulátoru
- Samovybíjení - samovolná ztráta energie akumulačního systému, aniž by byla odebírána užitečná energie (naprázdno).
- Vybití - přeměna energie uložené v akumulátoru na stejnosměrnou elektrickou energii
- Rozstřídání elektřiny - elektřina z akumulátorů je stejnosměrná, elektřina pro napájení motorů je střídavá.



Zásobníky - porovnání

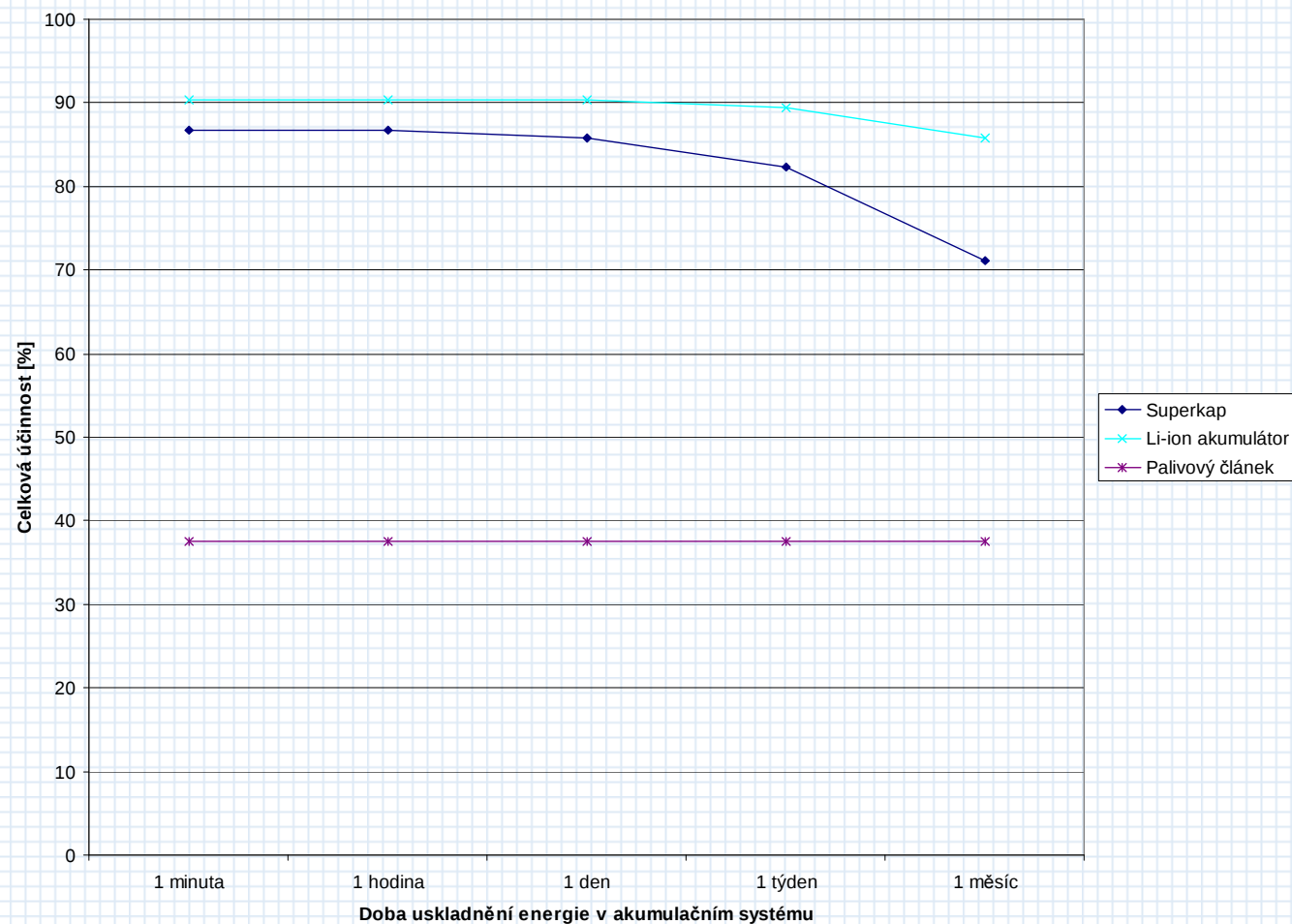
Porovnání zásobníků z hlediska celkové účinnosti



Zásobníky - porovnání

Porovnání zásobníků z hlediska celkové účinnosti

Celková účinnost akumulačního systému energie 100 kWh



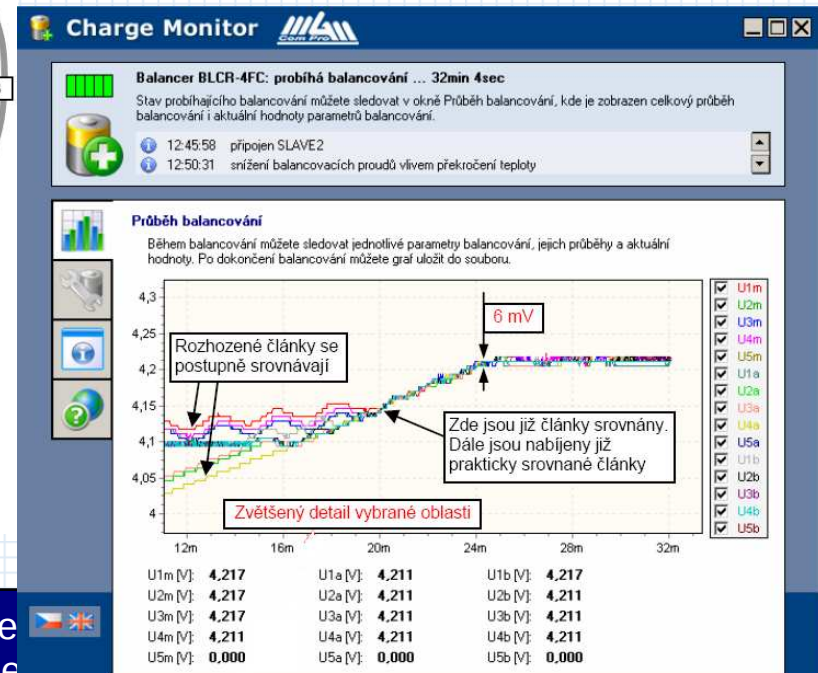
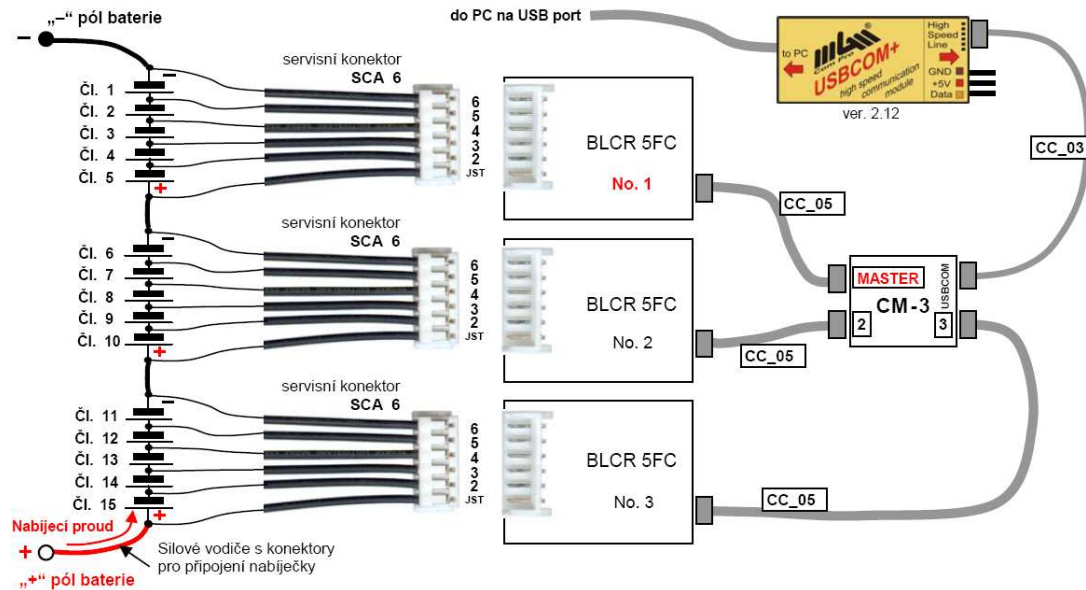
Specifické problémy zásobníků

- Volba systémového napětí
 - do cca 50 V
 - + bezpečné malé napětí, jednodušší výkonové prvky
 - vyšší nároky na průřez, větší ztráty, nízké výkony
 - nad cca 50 V
 - + možnost vyšších výkonů, nižší nároky na průřez
 - nebezpečné dotykové napětí, větší složitost balanceru



Specifické problémy zásobníků

- Balancery pro Li-Ion/Lipol akumulátory
 - Vyrovnání parametrů jednotlivých článků zapojených v sérii.
 - nabíjecí a vybíjecí proudy
 - napětí na článku
 - Možnost odpojení vadných článků



Příklady použití zásobníků ve vozidlech

- Elektrochemické akumulátory
 - Elektromobil Tazzari Zero
 - LiFePO₄ (Thunder Sky) 3,2V, 160 Ah, 24 akumulátorů v sérii
 - maximální energie 1 cyklu 12,29 kWh
 - maximální výkon 15 kW (tj. proud 1,22xC)



Příklady použití zásobníků ve vozidlech

- Elektrochemické akumulátory
 - Elektrobus BredaMenarinibus M 200 E ZEUS (linka č. 292 DPP Praha)
 - Li-pol 3,7 V, 200 Ah, 78 akumulátorů v sérii
 - maximální energie 1 cyklu 57,6 kWh



Příklady použití zásobníků ve vozidlech

- Superkapy, palivové články
 - TriHyBus - vodíkový autobus Neratovice - nejde o elektromobil, vodík není vyráběn ve vozidle elektrolýzou, ale je dodáván v čerpací stanici jako palivo.
 - Vodíkový palivový článek má výkon 60 kWe
 - Jako zásobník energie slouží superkapy (1,2 kWh, 200 kW) a baterie Li-ion (10 kWh, 40 kW).



Zásobníky energie pro elektromobily

Očekávané trendy ve výrobě zásobníků energie

- Li-ion akumulátory:
 - vývoj elektrod v oblasti materiálů přidávaným k lithiu s ohledem na aplikaci pro zvýšení výkonu nebo kapacity
 - použití nanotechnologií, které by mohly zásadně zvýšit rychlost sběru proudu elektrodami a tedy i výkon.
- Superkapy:
 - Ministerstvo energetiky USA má za střednědobý cíl parametry superkapů 5 Wh/kg a 500 W/kg.
 - Společnost Maxwell se kromě výroby superkapů zabývá také vývojem a přináší postupně na trh vyšší hodnoty napětí a kapacity superkapů.
- Vodíkové palivové články:
 - Jak uvádí [Abbot], z pohledu trvale udržitelného rozvoje je vhodným zásobníkem energie vodíkový palivový článek i přes nízkou účinnost přeměny elektřiny ve vodík a zpět. Nutnou podmínkou by však bylo vyrábět elektřinu trvale udržitelným způsobem. Jako takový způsob autor uvádí parní turbogenerátory poháněné zářivým tokem Slunce usměrněným pomocí parabolických zrcadel. V současné době se zdá, že lithium dočasně předběhne vodík, který jako dominantní přijde ke slovu až za desítky let.



Motory pro elektromobily

Odkazy

1. Abbot D.: Keeping the Energy Debate Clean: How Do We Supply the World's Energy Needs?, Proc. of IEEE, Vol. 98, No. 1, p. 42-66, January 2010
2. Brasseur G.: An Overview of Electrical Energy Storage Systems for Automotive Applications, A3PS Conference, Vienna, 16.10.2009.
3. Ehsani M., Gao Y., Emadi A.: Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory and Design, 2nd edition, CRC Press, 2010.
4. Hořčík J.: Baterie která se dobije za minutu - nový objev z MIT, 12.8.2009, server www.hybrid.cz
5. Sýkora P. et al.: Elektrobus v pravidelném provozu u Dopravního podniku Hlavního města Prahy, konference Elektromobilita v silniční dopravě 21. století, ČVUT FD, 2010.
6. Votruba Z. et al.: Předpokládané trendy rozvoje elektrických a jiných alternativních pohonů v osobních automobilech, Výzkumná zpráva ČVUT, FD, K 620 č. LSS 374b/2009
7. <http://www.thunder-sky.com/> (12.3.2010) - stránky výrobce Li-ion akumulátorů
8. <http://www.maxwell.com/> (12.3.2010) - stránky výrobce superkapů
9. <http://mgm-compro.cz/> (1.4.2010) - výrobce balancérů
10. [sdhttp://www.itpower.co.uk/investire/pdfs/flywheelrep.pdf](http://www.itpower.co.uk/investire/pdfs/flywheelrep.pdf) (8.11.2010) - zpráva výzkumného projektu o setrvačnicích z r. 2003.
11. <http://www.flybridsystems.com/F1System.html>
12. <http://www.h2bus.cz/>
13. <http://www.proton-motor.de/hybridsystems.html>



Děkuji za Vaši pozornost!

Ing. Jindřich Sadil, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta dopravní
sadil@fd.cvut.cz

