



# Moderní způsoby uchovávání elektrické energie

doc. Ing. Vít Bršlica, CSc.  
Katedra elektrotechniky K217, FVT  
Univerzita obrany v Brně

11. 10. 2016





## Osobní profil:

- 1964-67 SVŠ Metodova, Bratislava
- 1967-72 EF SVŠT, Elektrické stroje a přístroje (akad. Cigánek)  
– DP: (Magnetické bezdotykové nosné systémy)
- 1972-75 BEZ Bratislava, VVZ Transformátory (prof. Šimkovic)
- 1975-95 VŠD(S) Žilina, FSET  
KTEES – prof. Gerát  
1984 – KDP: (**Straty z železe v IM při neharm. napájení**)  
KETE – prof. Solík
- 1995-04 VA Brno, FLaPVO  
prof. Kurka,  
2000 – Habilitace: (**Elektromagnet. retardér pro těžká vozidla**)
- 2004-16 UO v Brně  
2011 – důchod... 😊 😊 😊 😊 😊
- 2011-16 ÚNMZ, TNK97 Elektroenergetika,  
subkomise Větrné elektrárny,





## Typický silnoproud – ani Elektrochemie, ani Technologie – proč UKLÁDÁNÍ EE?

- VŠDS – spolupráce s EVÚ Nová Dubnica,  
RD (LD) ČSD, ŽOS
- VA + UNOB – mobilní zdroje EE  
ELCENTRÁLY TQG (Tactical Quiet Generator)  
DIESEL – jednotné palivo  
VSCF podoba s D-E přenosem v LOKO  
POWERPEAKS  
AKU nebo  
SuperCap?

- **COST PROJEKTY:**

542	SuperCaps	2004 – 2009
1004	Energy Storage	2010 – 2015





## Aplikace SC

- Startování LOKO Brašov (RO)
- Rekuperace METRO Moskva  
TRAM Paříž
- KERS – pro HEV, PHEV, BEV,
- Zastávkové dobíjení MHD
- Jeřáby a výtahy Amsterdam
- Čeká se na průlomovou technologii  
snad GRAFEN? či NANOTECHNOLOGIE...





## Skladování EE

- **EE nelze uložit - základní poučka ENERGETIKY**  
odběrové diagramy - denní  
- týdenní  
- roční

rozsáhlé sítě...

- KONVERZE ENERGIE

- CENA
- ÚČINNOST
- ŽIVOTNOST -ROKY
- ÚNIK ENERGIE -CYKLY

dlouhodobé

uložení

- EKOLOGIE - RECYKLOVATELNOST
- jedovatost





## Skladování EE

- ELMAG POLE
  - SMES Superconducting Magnetic Energy Storage
  - EEStore – R. D. WEIR (Texas)  $\epsilon_r = 29\ 000$
  - Rolf EISENRING (CH) **12MJ/kg**
- Elektrochemie
  - AKUMULÁTORY
  - **SUPERKAPACITORY**
  - vodík a PALIVOVÉ ČLÁNKY
- Elektromechanika
  - SETRVAČNÍK (Kinetická)
  - PVE (Potenciální)
  - PNEUMATICKÁ
  - TEPELNÁ





# Hustota energie:

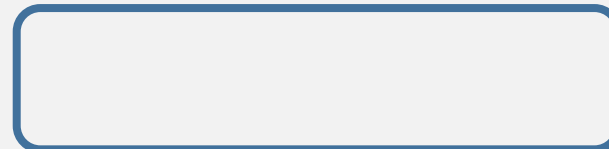
Materiál (technologie)	druh energie	energetická hustota [MJ/kg]	obvyklé praktické využití
Uran, Plutonium	Nuclear	20000	elektrárny
stlačený vodík	Chemical	143	palivové články
benzín	Chemical	47,2	automobilové motory
nafta	Chemical	45,4	automobilové motory
<a href="#">LPG</a>	Chemical	46	automobilové motory
baterie Lithium-vzduch	Electrochemical	9	přenosná zařízení s malým odběrem
Lithium-ion	Electrochemical	0,72	notebooky, telefony
Nickel-metal hydride	Electrochemical	0,288	spotřební elektronika
Superkondenzátor	Electrical	0,1	vyrovnávání zatížení, <a href="#">rekuperace</a>
olověný akumulátor	Electrochemical	0,1	startovací baterie





- Hustota – **ENERGIE a VÝKONU**

parametr	akumulátor	klasický kondenzátor	superkapacitor
hustota energie	100 Wh / kg	0.2 Wh / kg	10 Wh / kg
měrný výkon	1 kW / kg	500 kW / kg	10 kW / kg
doba nabíjení (vybití)	5 h	0.001 s	10 s
životnost	1000 cyklů	1 000 000 cyklů	1 000 000 cyklů







## SuperKapacitor Doublelayer

technologie z 198x z SSSR (vojenská, tajná)

výkonové špičky radar...

Vysoké C díky obrovskému povrchu elektrod = **GRAFIT**

ELLYT nepřenáší IONTY jen POLARIZACE

VODNÍ  $U \leq 0,8V$

vodík + kyslík TLAKOVÁ NÁDOBA

BEZVODNÝ ORGANICKÝ ACETONITRYL  $U \leq 3,8V$

montáž bez vzdušné vlhkosti

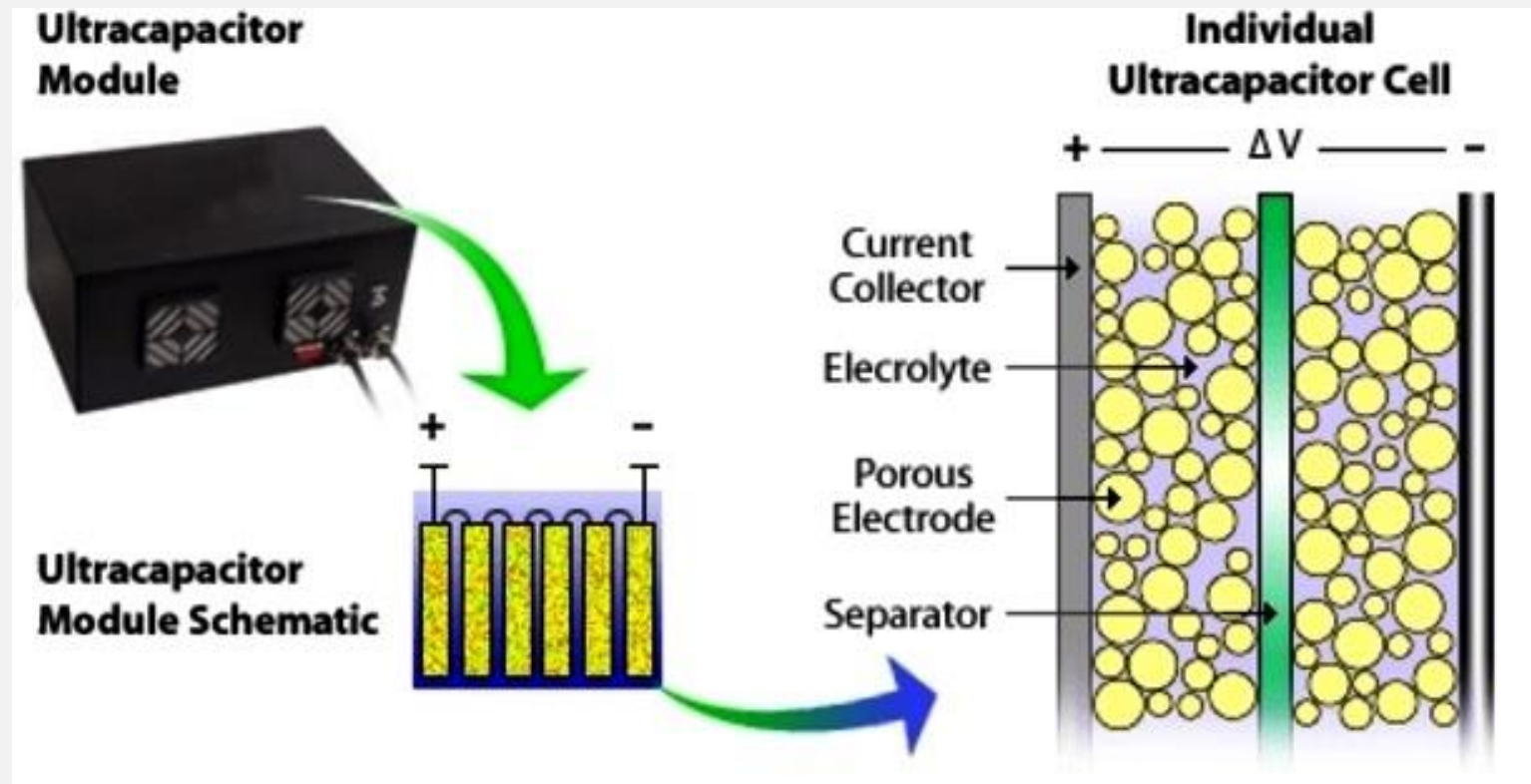
jedovaté spodiny

hořlavé





- *Obr: Princip superkapacitoru*





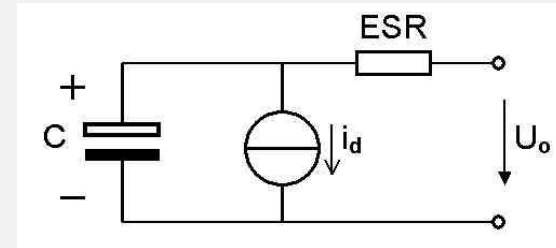
# SuperKapacitor

# Doublelayer

# DLSC

$$C = \frac{1}{2} C_{\text{elektrody}}$$

Výkon KAPACITORU:



$I_k$  – NEMÁ SMYSL  
VŠECHNO TEPLU UVNITŘ

$R_z = ESR$

50% účinnost

$I_k/2$

$P_{max}$

$R_z = ESR$

Příklad:

1000F, 3V

450Ws

325Ws

5W, - 1minuta, 5s





## Baterie – superkapacitor

Oproti standardním akumulátorům, ukládajícím elektrickou energii chemickou cestou, uchovávají superkapacitory **přímo elektrický náboj**.

Díky tomu má baterie životnost extrémně vysoký počet nabíjecích cyklů i při hlubokém vybití (**až 1.000.000 cyklů**), což předpokládá životnost v systému více než 250 let (po mnoho generací).

Zároveň je baterie schopna **rychlého nabití i vybití celé své kapacity** (řádově i 1000 x rychleji, než LiFeYPO akumulátor).

U článků dochází k poměrně velkému samovybití (cca za 90 dní pokles na 80%), což však s ohledem na permanentní zapojení v systému nemá významný reálný dopad.

Baterie nemá paměťový efekt a lze je tedy dobíjet v každém stupni vybití.

Ačkoli je pořizovací cena baterie v současnosti řádově **dvojnásobná** k ceně LiFeYPO akumulátorů, s ohledem na dobu životnosti je nejlevnější.

*Když budoucnost je teď...*





# SuperKapacitory:





# SuperKapacitory:



Superkapacitory od Maxwell Technologies. Kredit: Maxwell Technologies, Inc.







# EE - Výkon a Energie

$$dE = u(t) i(t) dt$$

$$P = u(t) i(t)$$

Náboj:  $dQ = i(t) dt$

Mg tok:  $d\Phi = u(t) dt$

$$dE = u(t) dQ$$

$$dE = Ni(t) d\Phi$$

$$E = \frac{1}{2} E \times D S = \frac{1}{2} E D V$$

$$E = \frac{1}{2} H \times B S = \frac{1}{2} H B V$$

$$dQ = C du$$

$$d\Phi = L di$$

$$C = \varepsilon (S/x)$$

$$L = \mu (S/x)$$

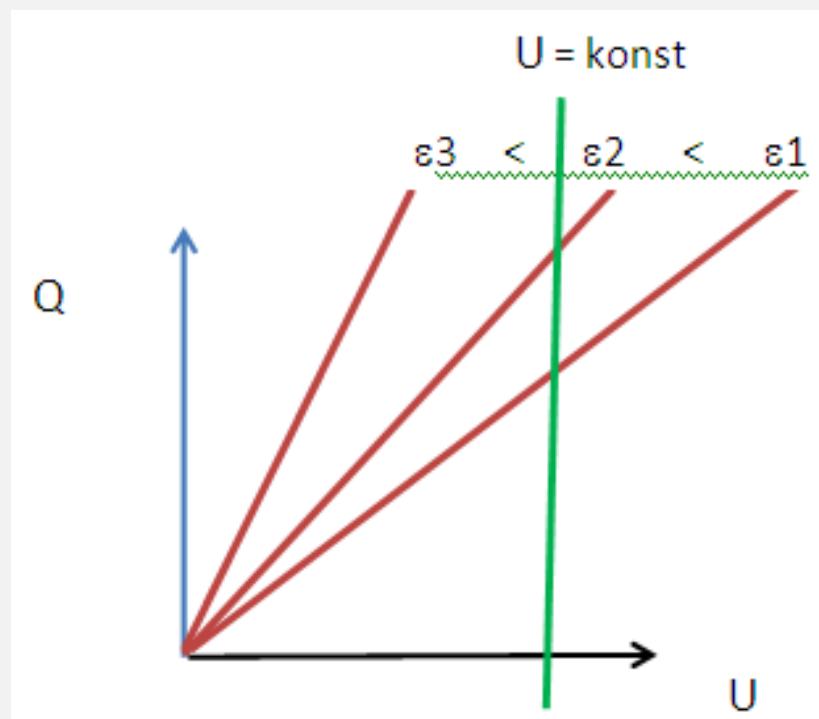
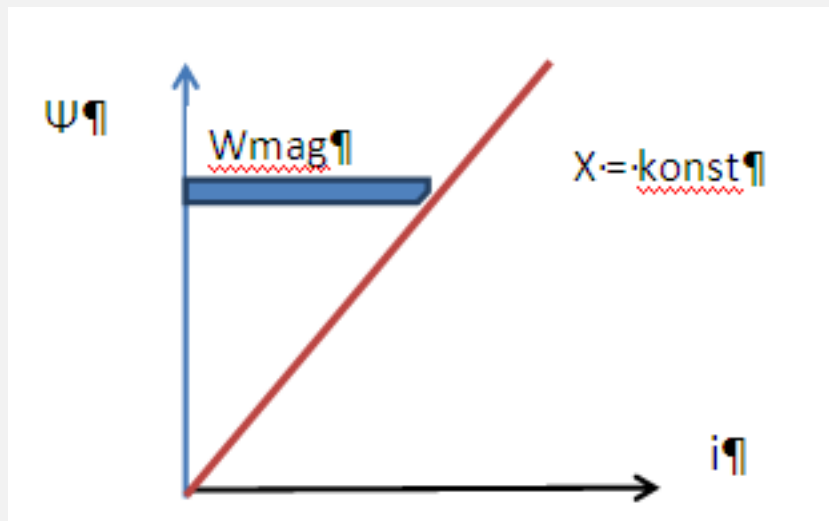
$$E = \frac{1}{2} L i^2$$

$$E = \frac{1}{2} C u^2$$





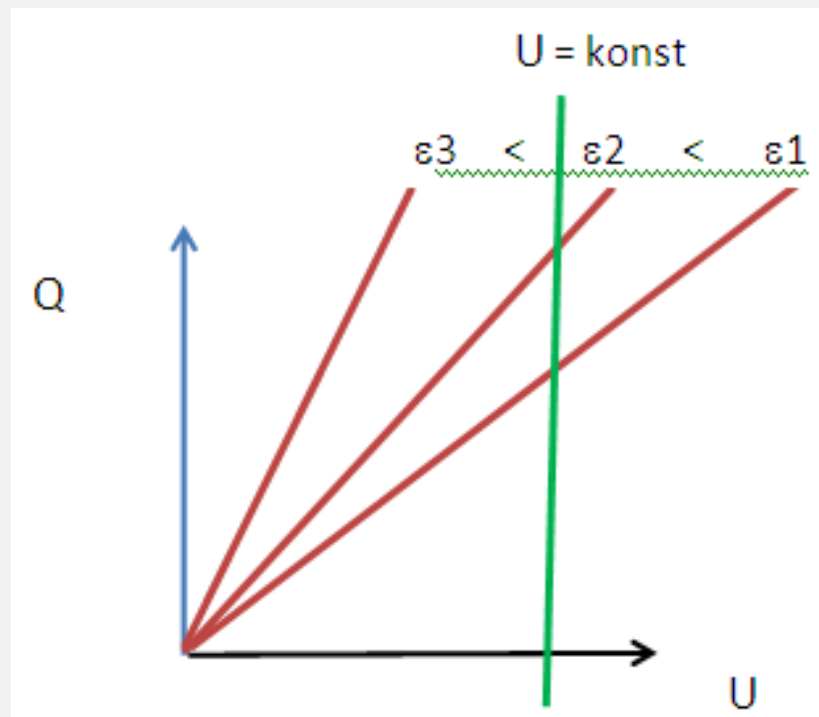
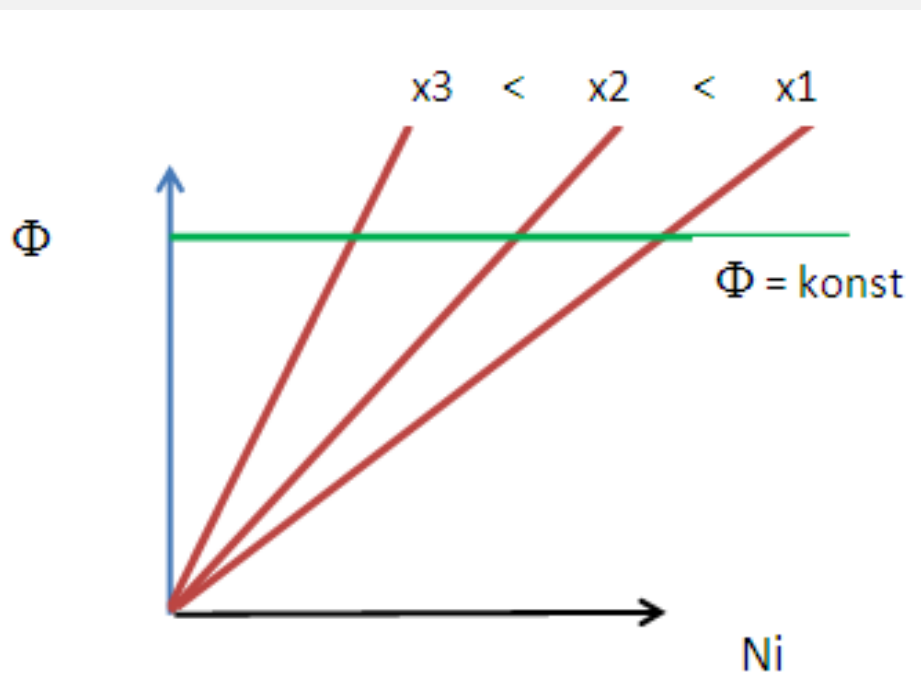
# L, C







# L, C





L, C

závislost  $E(\text{V/m})$  na tloušťce izolace ???

$$\frac{1}{2} \varepsilon E E$$

		E V/m	J/m <sup>3</sup>	Wh/m <sup>3</sup>	Wh/litr
Air	10kV/cm	10e6	10		
PE	100V/um	10e8	100k	30	0,03
	10V/nm	10e10	1G	300k	300





## EESTOR

- We have previously discussed a secretive Texas company called EEStor, who are reported to be working on a new type of **ultracapacitor** that can hold 10x the energy in 1/10th the weight of typical batteries, at a fraction of the cost.
- They have an agreement to produce caps for Zenn electric cars but to date have not shown any prototypes. This has led some to suspect EEStor as not having the technology they report.
- 
- <http://gm-volt.com/2008/01/10/lockheed-martin-signs-agreement-with-eestor/>





## Lockheed Martin Signs Agreement with EESor

January 10th, 2008 | Posted in: [Battery](#), [Competitors](#), [Research](#)

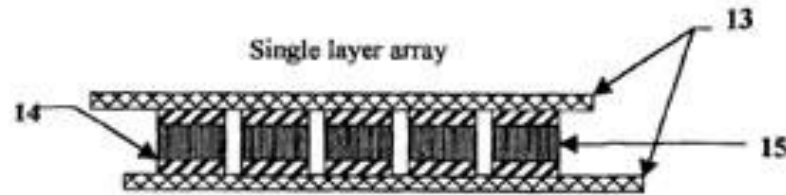


Figure 3

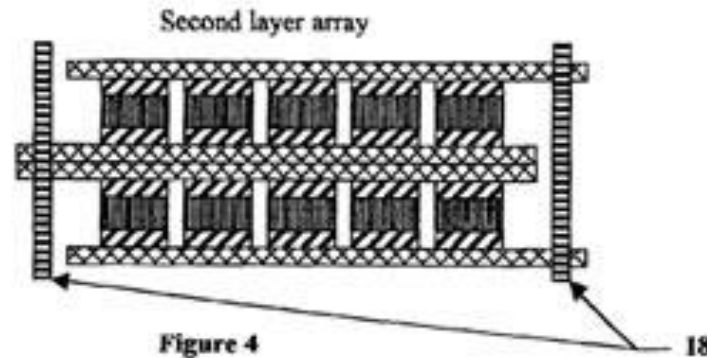
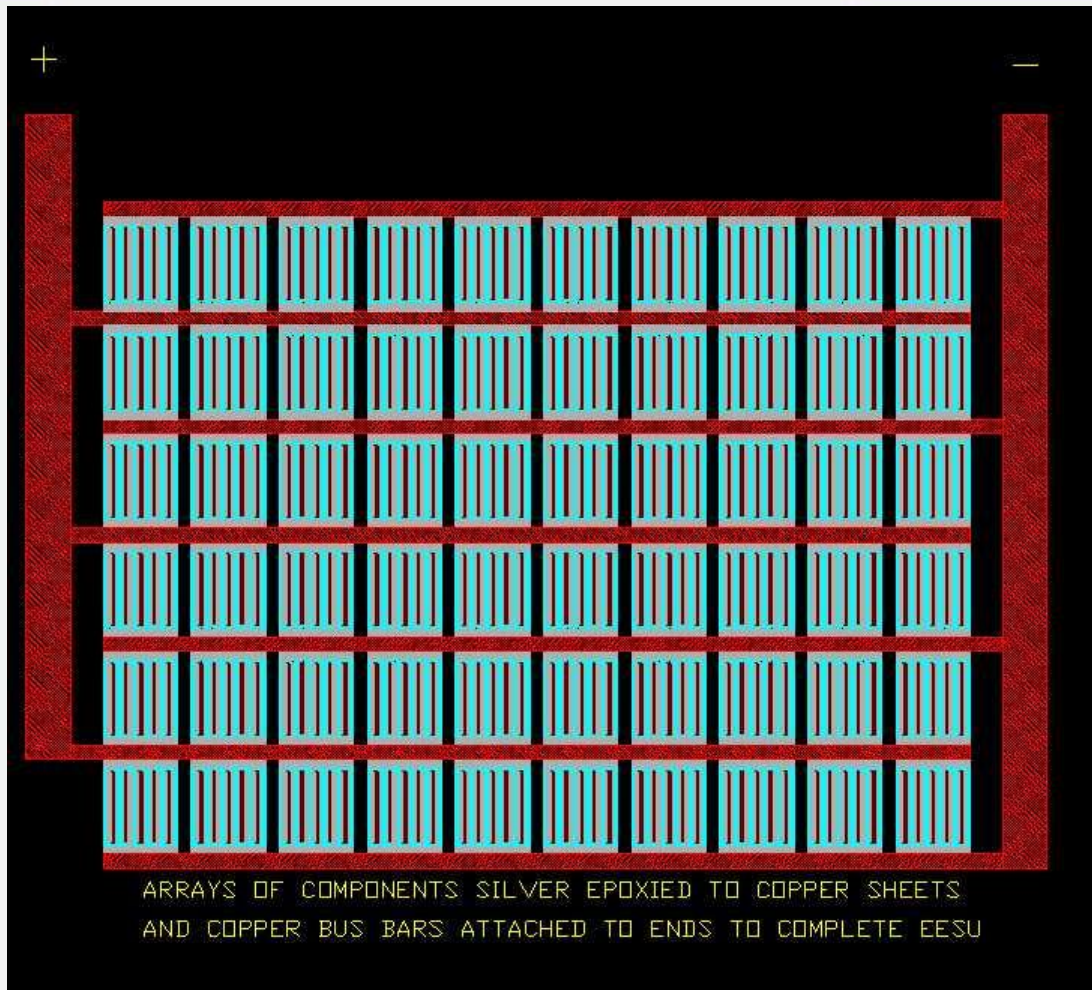


Figure 4



EESore





Dielectric	k	$E_{BR}$ [MV/m]	$e_E$ [J/cm <sup>3</sup> ]	
TiO <sub>2</sub>	110	175	15	
Fluor polymers	10	675	24	
PP/BaTiO <sub>3</sub>	2,2 – 6,1	200 – 900	2 – 9	
Glass Ceramic	600	70	5	
PP/Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,2	850	14	
<b>PET/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/BaTiO<sub>3</sub></b>	<b>22 500</b>	<b>557</b>	<b>2 000</b>	

## NANOTECHNOLOGIE A BARIUM TITANÁT





## EESTOR – diskuse

EEStor věří, že relativní permitivita 15476 a izolační odpor 10,7 mega ohmů tohoto počátečního nového materiál testovací vrstvy představuje zásadní průlom v EEStor, Inc nových dielektrických materiálů.

Pro srovnání, 0,22 micro farad 100 V kondenzátoru vyrobené EPCOS má objem 0,216 cm<sup>3</sup> nebo 214 krát větší než je kapacitance ekvivalentní EEStor.

Kapacita je přímo úměrná skladované energii, a ta vysoká kapacita také značí schopnost EEStor, Inc potenciálně vyšší než jeho cíl uchovávání energie.

- 





## EESTOR – diskuse...

*Myšlenkový experiment.*

Představme si, že bych mohl magicky pohnout vnější elektron každého atomu až 1 eV (elektron volt) a podržet jej tam.

Pak pro jeden mol atomů bych měl množství eV rovno Avogadru, což je asi  $10^4$  krát počet elektronů v Coulombu. Takže máme  $10^4$  C/mol náboj při zvýšení 1 eV.

Předpokládám, že pro energii platí  $U = QV$   
( $Q = 10^4$  C/mol ,  $V = 1$  volt )

dává  $10^4$  joulů / mol = **2,8 kWh / mol** .

To dá horní mez energie, které mohou být uloženy v každém atomové systému.

Napětí může být vyšší (13,6 eV ionizujícího vodíku), ale 1 eV je rozumné.

Molární hmotnost BaTiO<sub>3</sub> = 0,233 kg / mol , takže náš myšlenkový experiment by dal ~ **12 kWh / kg BaTiO<sub>3</sub>**.







## EESTOR – diskuse

- 
- Aby se rovnala Tesla Model S baterii, řekněme 80 kWh bylo by potřeba pouze ~ **7 kg BaTiO<sub>3</sub>**.  
Opět je to jen umělý myšlenkový experiment , ale dává to dobrý pocit, pro horní mez , které lze očekávat, pro každý systém skladování energie založený na atomech .  
Opět toto číslo může být sníženo faktorem 10
- Rolf Eisenring (CH):





# Quantum Battery Concept

## Energy and Power Consumption and Design Comparison

Chevy Trail Blazer  
1960 kg  
390 HP  
~ 75 kW eff.



- > All 4 wheels with SMBRL for drive and braking (recuperation)  
4 x 25 kW 180 VDC ~ 600 Nm
- > All 4 wheels steering
- > Linear motors for suspension and shockabsorbing, spring back-up
- > Mech. brake only for emergency and parking

### Gasoline:

Consumption	14 l/100km
	16.6 mpg
	12 kg/100km
Energy Content	47 MJ/kg fuel
Consumption	156 kWh
Motor efficiency	25 %
Driving speed	100 km/h
Power required	39.2 kW
Tank	110 l
Endurance	7.8 hrs
Fuel loss	negl.

### Quantum Battery EV:

Power required	39.2 kW
Motor Efficiency	88 %
(SM, brushless)	
Effect. Motor Power	44.5 kW
Battery Capacity	350 kWh
Endurance	7.8 hrs
Recuperation 5 %	17.5 kWh
Sun cells (guess)	
8 m <sup>2</sup> /4 hrs	25 kWh
	≈ 2/3 hr drive
Battery loss	6 %/month



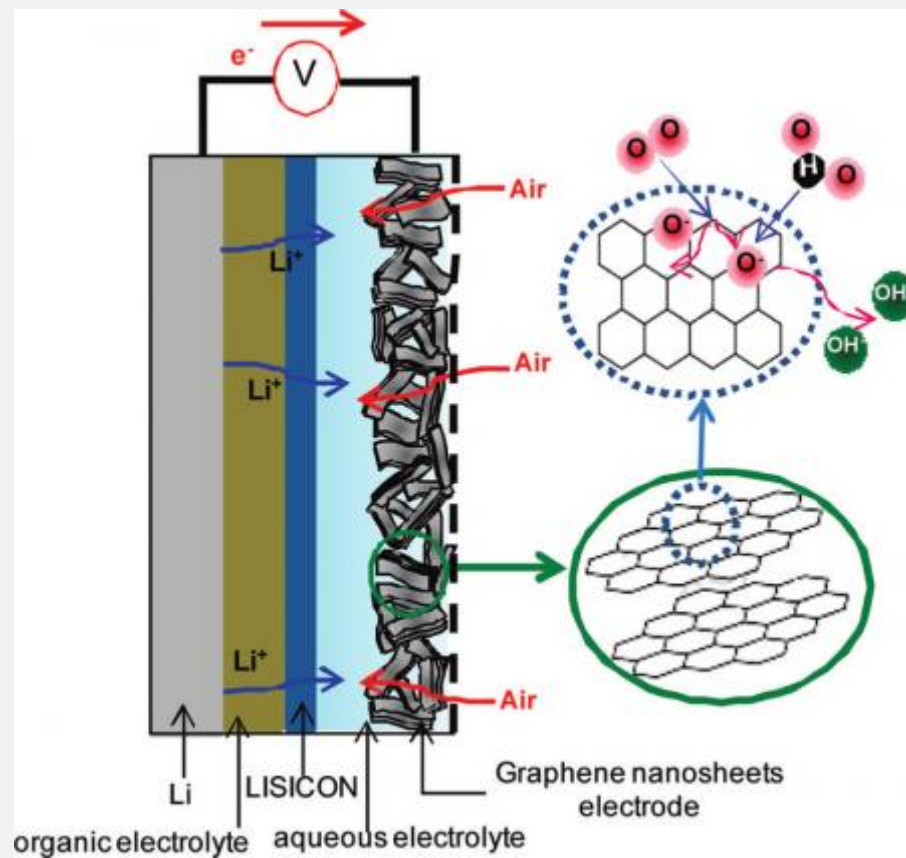


**Děkuji za pozornost,  
přeji Vám trpělivost a  
„štěstí“ ve Vaší práci...**

**krásný den!**



# Li – air battery



Obr. Řešení elektrody s grafenem



# Lithium

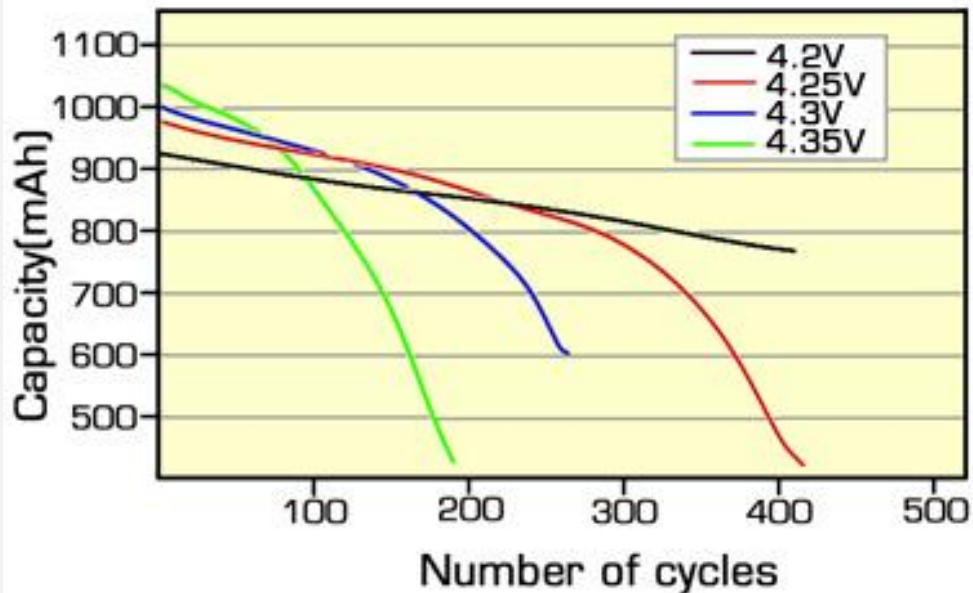
A lithium-titanate battery is a modified lithium-ion battery that uses lithium-titanate nanocrystals on the surface of its [anode](#) instead of [carbon](#). This gives the anode a surface area of about **100 square meters per gram, compared with 3 square meters per gram for carbon**, allowing electrons to enter and leave the anode quickly. This makes fast recharging possible and provides high currents when needed







LiFePO4		
	40 Ah	200
	TS LFP 40AHA	TS LFP 200AHA
	1,6kg	6,9kg
MMxMMxMM	190x48x48	361x256x56
U <sub>MAX</sub>	4,25V	4,25V
U <sub>MIN</sub>	2,5V	2,5V
Discharge	3CA	2CA
Impulse discharge	10CA	10CA
Charge	0,3CA	0,3CA
Temperature	-25 +75 °C	-25 +75 °C
Storage	250 °C	200 °C
Self-Dis	3%Monthly	3%Monthly
Cycle life (80%DOD)	3000	3000
Cycle life (70%DOD)	4000	4000
Price USD	80	400



Temperature	40% charge level (recommended storage charge level)	100% charge level (typical user charge level)
0°C	98% after 1 year	94% after 1 year
25°C	96% after 1 year	80% after 1 year
40°C	85% after 1 year	65% after 1 year
60°C	75% after 1 year	60% after 3 months





## ODKAZY:

[http://www.odbornecasopisy.cz/  
seminare-konference](http://www.odbornecasopisy.cz/seminare-konference)

[http://www.odbornecasopisy.cz/  
seminare-konference/energie-  
pro-budoucnost-xviii--74](http://www.odbornecasopisy.cz/seminare-konference/energie-pro-budoucnost-xviii--74)

## Energie pro budoucnost XVII



**Kvalita a management energií**

16. března 2016 • 9:30 –13:30 • BVV sál P-4

**AMPER** 2016 součást doprovodného programu  
24. ročníku veletrhu AMPER 2016



**Místo:** Výstaviště Brno sál P4

(součást doprovodného programu veletrhu AMPER)

**Termín:** 16. 3. 2016 9:30 až 13:30 (prezence od 9:00 h)

**Pořadatel:** FCC PUBLIC s.r.o., Pod Vodárenskou věží 4, Praha 8

**Odborný garant:** prof. Ing. Jiří Tůma, CSc., FEL ČVUT

**Organizační garant:** Ing. Emil Širůček, FCC PUBLIC s.r.o.



### Zahájení

Ing. Jiří Holoubek, prezident Elektrotechnické asociace ČR



### Úvodní slovo

prof. Ing. Jiří Tůma, DrSc., ČVUT FEL





## Semináře a konference

### Proběhlé semináře nebo konference

#### Energie pro budoucnost

**Energetická efektivita v průmyslové sféře pro růst podniku**  
(MSV Brno 2016)



**Progressivní řešení energetické hospodárnosti v budovách pro bydlení a ve sféře služeb**  
(Mezinárodní stavební veletrh Brno 2016)

**Management a skladování energií**  
(24. AMPER Brno 2016)

**Energetická efektivita v průmyslové sféře pro růst podniku**  
(57. MSV Brno 2015)

**Progressivní řešení energetické hospodárnosti budov a provozoven služeb**  
(Mezinárodní stavební veletrh IBF Brno 2015)

**Transport a management energií**  
(Energie pro budoucnost XIV - 24. AMPER Brno 2015)

**Efektivní nakládání s energiemi v průmyslové výrobě**  
(56. MSV Brno 2014)

**Progressivní řešení energetické hospodárnosti budov a provozoven služeb**  
(IBF Brno 2014)

**Transport energie - současné priority**  
(Energie pro budoucnost XI - 22. veletrh AMPER 2014)

**Efektivní výroba a využití energie**  
(Energie pro budoucnost X - 55. MSV Brno 2013)

**Doprava elektrické energie od výroby ke spotřebě**  
(Energie pro budoucnost IX - 21. Amper 2013)

**Efektivní nakládání s energiemi v průmyslové výrobě**  
(Energie pro budoucnost VIII 54. MSV Brno 2012)

**Způsoby efektivního využití energie v budovách a komplexech budov**  
(Energie pro budoucnost VII - IBF Brno 2012)

#### Perspektivy e-mobility



**Perspektivy e-mobility VIII**  
(24. AMPER Brno 2016)

**Perspektivy e-mobility VII**  
Podmienky a predpoklady ďalšieho rozvoja e-mobility (21. EloSys Trenčín 2015)

**Perspektivy e-mobility VI**  
Směry a trendy vývoje vozidel s alternativními zdroji pro pohon (24. Amper Brno 2015)

**Perspektivy e-mobility V**  
(20. EloSys Trečín 2014)

**Perspektivy e-mobility IV**  
Směry a trendy v elektromobilitě na počátku roku 2014 (22. AMPER Brno 2014)

**Vývoj v technických a ekonomických základech elektromobility**  
(EloSys Trenčín 2013)

**Vývoj a trendy v technických a ekonomických základech elektromobility**  
(21. Amper Brno 2013)

**Elektromobilita pro každého**  
(20. Amper Brno 2012)

#### Perspektivy bydlení



**Komunikace - další dimenze bydlení**  
(ÚTIA AV ČR - Praha, listopad 2015)

**Bezpečnost a pohodlí v každém věku**  
(IBF Brno 2014)

**Bezpečnost, komfort, úspory**  
(Pragoalarm/Pragosmart 2013)

**Technická zařízení budov a bytů**  
(IBF/SHK Brno 2013)

**Člověk v chytrém domě**  
(ÚTIA AV ČR - Praha, listopad 2012)

**Předpoklady nasazení chytrých technologií**  
(IBF/SHK Brno 2012)







<http://www.freeenergy4u.cz/reseni/baterie/>

## Baterie složená z Pb akumulátorů trakčních, zaplavených

Tato baterie má menší životnost, počet nabíjecích **cyklů je 600 až 1500**, což předpokládá životnost v systému 4 – 8 let. Hluboké vybíjení výrazně zkracuje životnost. Využitelnost kapacity baterie je 80%.

FreeLIVING single má v základu baterii o kapacitě min. 12 kWh.

Family má v základu baterii o kapacitě min. 16 kWh







- hybridní posunovací lokomotiva řady TEM35



Prototypová lokomotiva TEM35-001 se představuje na fotografii z oficiální a mediální prezentace nových prototypů Transmašholdingu, která proběhla dne 1. 3. 2013 v areálu litevského VLRD ve Vilniusu (foto Robertas Šalčiunas).







- Lokomotiva je vybavena dvěma zdroji energie: motorgenerátorem německé společnosti Zeppelin Power Systems se spalovacím motorem značky Caterpillar a superkapacitorem. Lokomotiva TEM9H přitom využívá odlišnou technologii, kde se k ukládání elektrické energie využívá sada velkokapacitních LiFePO baterií a kondenzátory slouží pouze pro spouštění spalovacího motoru (tuto aplikaci kondenzátorů lze rovněž nalézt na lokomotivách TEM18DM z BMZ Brjansk)
- Superkapacitor slouží ke krátkodobému navýšení elektrické energie pro trakci nad rámec výkonu dodávaného motorgenerátorem zejména v méně ekonomických a méně ekologických režimech práce spalovacího motoru. Toto řešení zároveň umožňuje použití úspornějšího a menšího motorgenerátoru a snižuje potřebu jeho využití.
- Výrobce superkapacitoru je **ruská** společnost Elton.
- <http://spz.logout.cz/vozidla/tem35/tem35.php>





- V září byla s vítězem otevřeného výběrového řízení Škodou Electric podepsána smlouva na dodávku 12 kusů trolejbusů typu Škoda 26 Tr Solaris a Škoda 27 Tr Solaris. Vozidla budou ze 40 % hrazena z evropského fondu pro regionální rozvoj Moravskoslezska.



- Celková cena za dodávku činí 144 750 000 Kč bez DPH. Na nákup 6 kusů 12metrových a 4 kusů 18metrových vozidel jsou již finance schváleny
- Nově budou vozidla vybavena sestavou superkapacitních kondenzátorů s **0,42 KWh** vložené energie u 12metrových a **0,54 KWh** u 18metrových vozidel.





- *Nízkopodlažní kloubový trolejbus typu Škoda 27 Tr Solaris. Na fotografii ostravský vůz (ev. č. 3804).*



Matěj Kaloč (2013)





- Protože superkapacitor ukládá získanou energii na základě elektrostatického principu a jeho vnitřní odpor je nízký, je schopen tuto energii uložit a vydat rychleji než běžný olovený akumulátor.
- Těchto nabízených vlastností se právě využívá při použití elektrodynamického brzdění, kdy se soustavy superkapacitorů nabíjí, a tuto energii plně využijí při rozjezdu vozidla.  
Superkapacitory umístěné na vozidle spolu s měničem také slouží v případě požadavku řidiče na dojezd při objízdě trase, dopravní nehodě nebo dojezdu do depa.  
Superkapacitory se automaticky během jízdy, či staničení, nabíjejí na maximální hladinu a trolejbus je připravený na autonomní provoz bez závislosti na trakci.
- V takovémto režimu je vozidlo schopno ujet až 300 metrů.

