INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Název projektu: **Automatizace výrobních procesů ve strojírenství a řemeslech**
Registrační číslo: **CZ.1.07/1.1.30/01.0038**
Příjemce: SPŠ strojnická a SOŠ profesora Švejcara Plzeň

Monitorovací indikátor: **06.43.10 Počet nově vytvořených/inovovaných produktů**

Akce: **Přednáška, KA 5** Číslo přednášky: **7**

Téma: **ZÁSOBNÍKY ENERGIE**
Lektor: **doc. Dr. Ing. Jiří Flajtingr**
Třída/y: **2ST, 3ST, 4ST, 4ME, 3ME, 3MS**
Datum konání: **22. 4. 2013**
Místo konání: **velká aula**
Čas: **2. a 3. vyučovací hodina (8.55-10.35)**

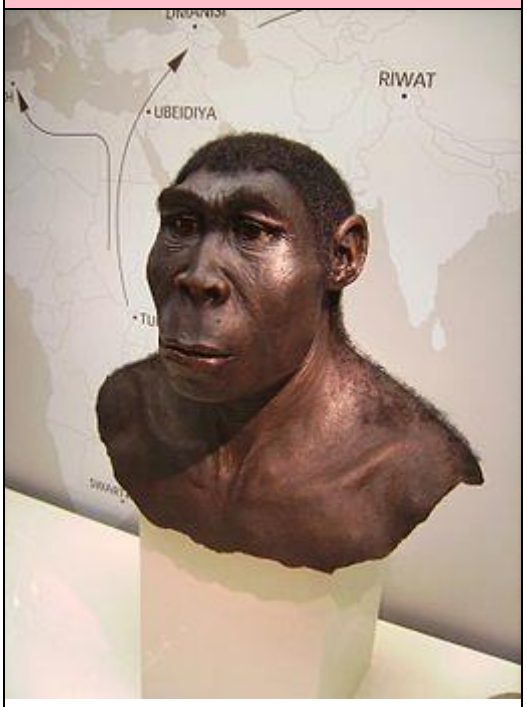
Zásobníky energie

Pokud se máme zabývat zásobníky energie, je nutné v první řadě vydefinovat, co budeme pod pojmem zásobníky energie rozumět. Mohli bychom je definovat jako: „Zařízení nebo objekty, v kterých je možné uchovávat energii“. Takováto definice ovšem zahrnuje de facto všechny objekty kolem nás, pokud aplikujeme slavný Einsteinův vzorec $E=mc^2$. Nebo by zahrnovaly i obyčejnou nádrž na palivo v dopravních prostředcích. Pro cíle přednášky bude vhodné vyloučit ze zásobníků energie některé druhy energií a omezit se pouze na některé. Potom by definice zásobníků energie mohla vypadat následovně: „Zásobníky energie jsou zařízení nebo objekty, které jsou schopny z okolního prostředí okamžitě přijímat energii a následně ji uvolnit pro potřeby jiných zařízení nebo objektů. Zásobníky energie jsou omezeny následujícími druhy energií: tepelná, potenciální, rotační kinetická a elektrická.“

Historicky první zásobníky energie

Je velmi pravděpodobné (autor této přednášky by si na to i vsadil), že ve smyslu výše uvedené definice zásobníky energie byly využívány již v dávné minulosti a to u tepelné energie. Od okamžiku, kdy pravěký člověk využíval pravěké ohniště, mohl například v kamení akumulovat určité množství tepelné energie. Tu pak mohl využít při spánku, pokud bylo chladné počasí nebo mrzlo. Podle dostupných pramenů nejstarší umělé ohniště bylo prokázáno u člověka vzpřímeného (Homo erectus) před 790 000 lety.

Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií a státním rozpočtem České republiky

Člověk vzpřímený
Stratigrafický výskyt: Před 1,9 až 0,1 miliony let

Rekonstrukce podoby člověka vzpřímeného

Zdroj: WIKIPEDIA

Podstatné technicko-ekonomické parametry zásobníků energie

Abychom lépe pochopili vlastnosti jednotlivých druhů zásobníků energie, jejich výhody a nevýhody, je nutné je charakterizovat podle určitých technicko-ekonomických parametrů. Jako podstatné, logické i snadno pochopitelné se ukázaly:

Měrná hustota energie s rozměrem [Wh/kg]

Ta nám říká, „kolik energie se „vejde“ do jednoho kilogramu toho kterého zásobníku.

Měrná hustota výkonu s rozměrem [kW/kg]

Ta nám říká, jaký výkon lze odebírat z jednoho kilogramu toho kterého zásobníku.

Životnost – rozměr je různý podle typu zásobníku

Bude vždy uvedena u jednotlivých typů zásobníku.

Cena [Kč/kg]

Zásobníky tepelné energie

Dnes je využívána především v zásobnících teplé vody. Bude užitečné si vždy uvést základní vztah pro každý druh energie. Pro tepelnou energii platí:

$Q = mc\Delta T$ [J]

Kde m je hmotnost systému, c je jeho měrná tepelná kapacita, ΔT je rozdíl počáteční teploty T_1 a koncové teploty T_2. Respektive platí :

$\Delta T = T_1 - T_2$ [˚C]

V následující tabulce jsou uvedeny podstatné technicko-ekonomické parametry tepelných zásobníků energie

Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií a státním rozpočtem České republiky

Měrná hustota energie [Wh/kg]	90
Měrná hustota výkonu [kW/kg]	4 - 10
Životnost [Počet let do výměny]	10 - 20
Cena [Kč/kg]	200

Zásobníky potenciální energie

Dnes je využívána především v přečerpávacích elektrárnách. Pro potenciální energii platí:

$E_p = mgh$ [J]

Kde m je hmotnost systému, g je tíhové zrychlení, h je kde je výška nad úrovní, pro kterou je potenciální energie nulová (zpravidla zemský povrch).

Jako příklad můžeme uvést přečerpávací elektrárnu Dlouhé Stráně s výkonem 650 MW.

Voda z horní nádrže umístěné ve výši 1350 m nad úrovní moře je vedená dvěma tlakovými přivaděči o

průměru 3,6 m a délce 1,5 km k turbínám. Obě reverzní soustrojí, každé o výkonu 325 MW, jsou umístěna v podzemní kaverně turbín o délce 87 m, šířce 25,5 m a výšce 50 m.

V následující tabulce jsou uvedeny podstatné přibližné technicko-ekonomické parametry zásobníku potenciální energie díla Dlouhé stráně:

Měrná hustota energie [Wh/kg]	1,2
Měrná hustota výkonu [kW/kg]	40
Životnost [Počet let do výměny]	50
Cena	Několik mld. Kč

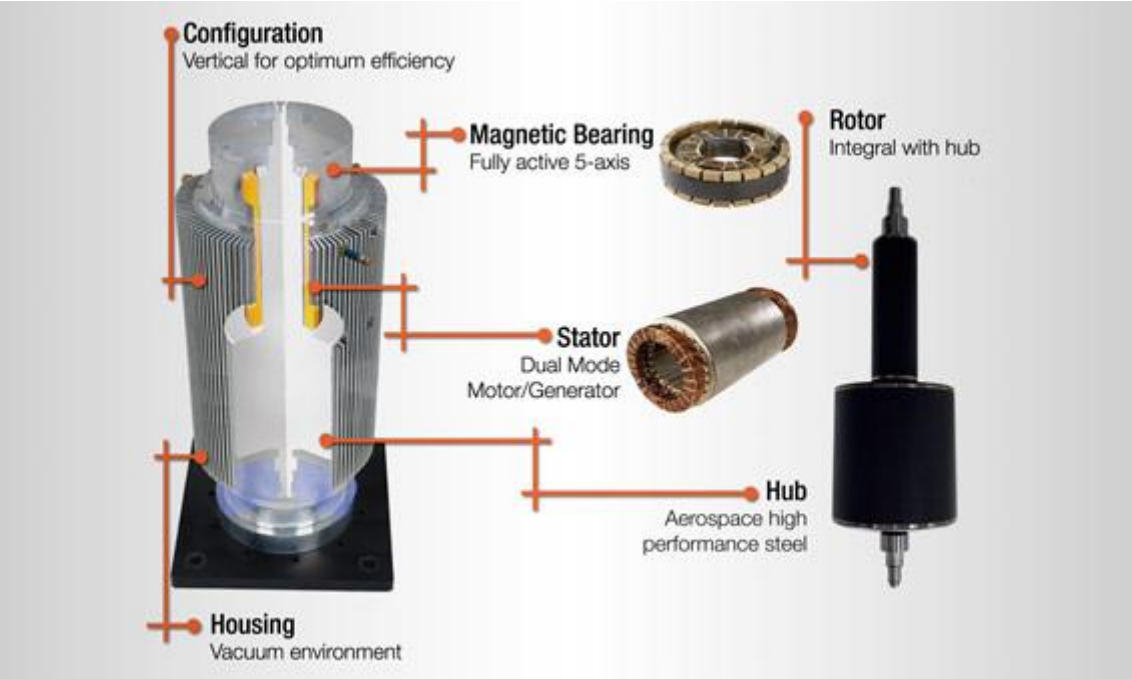
Zásobníky rotační kinetické energie

Jedná se o takzvané setrvačníky. Pro rotační kinetickou energii platí:

$E_r = \frac{1}{2} J \omega^2$ [J]

Kde J je moment setrvačnosti systému a ω je úhlová rychlost.

Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií a státním rozpočtem České republiky



- Vycon Energy (www.vyconenergy.com)

V následující tabulce jsou uvedeny podstatné technicko-ekonomické parametry zásobníku rotační energie:

Měrná hustota energie [Wh/kg]	30
Měrná hustota výkonu [kW/kg]	0,8
Životnost [Počet let do výměny]	20 - 30
Cena [Kč/kg]	Nepodařilo se zjistit

Zásobníky elektrické energie

A) Supravodivé zásobníky energie - SMES Superconducting Magnetic Energy Storage

Pro energii, která je akumulována v cívce a jíž protéká platí:

$E_l = \frac{1}{2} L I^2$ [J]

Kde L je indukčnost a I je proud, který jí protéká cívky. V souvislosti s jevem supravodivosti je možné indukčnosti v supravodivém stavu využívat jako zásobníky energie. Skutečnost, že elektrický odpor kovů při jejich ochlazování klesá, byla známa již v roce 1835 (M. Faraday). Po více než sedmdesáti letech, v roce 1911, učinil při pokusech o dosažení co nejnižších teplot nizozemský fyzik Heike Kamerlingh-Onnes nový, v tomto ohledu nečekaný objev: při ochlazení některých látek, zejména kovů, na velmi nízkou konkrétní teplotu (kritickou teplotu supravodiče Tk) jejich elektrický odpor zcela zmizí. Jev byl nazván supravodivost a látky s touto vlastností se nazývají supravodiče.

Objev byl učiněn v době, kdy se již zdálo, že věda o elektřině a magnetismu nemůže přinést žádná překvapení: H. Kamerlingh-Onnes objevil supravodivost u rtuti ochlazené pomocí kapalného helia na pouhých několik kelvinů (0 K = absolutní nula = –273,16 °C). V roce 1911 ještě netušil, že jev

supravodivosti bude vysvětlen až roku 1957. Teprve tehdy se objevila první uspokojivá teorie supravodivosti, tzv. teorie BCS1).

Dosáhnout velmi nízké teploty je však neobyčejně obtížné – v roce 1835 dosáhl M. Faraday ve své laboratoři pomocí směsi oxidu uhličitého s éterem ve vakuu teploty –110 °C. Až o padesát let později Polák K. S. Olszewski s využitím vypařování tekutého dusíku ve vakuu posunul tuto hranici na –225 °C.

H. Kemerlingh-Onnes dosáhl ve své moderní laboratoři na univerzitě v nizozemském Leydenu při studiu elektrických a magnetických jevů při velmi nízkých teplotách v období 1908 až 1911 snížením tlaku heliových par teploty –268,9 °C.

Podle hodnoty kritické teploty Tk se rozlišují nízkoteplotní (LTS – low temperature superconductor) a vysokoteplotní (HTS – high temperature superconductor) supravodiče.

Nízkoteplotní supravodiče vykazují supravodivost pod teplotou 4,2 K (teplota varu kapalného helia), vysokoteplotní jsou supravodivé při teplotách nad 77 K (teplota varu kapalného dusíku).

V roce 1986 však objevili Karl Allex Müller a Johannes George Bednorz supravodivost keramických materiálů za teplot vyšších než 30 K a vzápětí následoval objev supravodičů za teplot vyšších, než je teplota zkapalnění dusíku (77 K). Jev byl nazván vysokoteplotní supravodivost (HTS). Bylo jasné, že vznik supravodivosti při teplotách nad 77 K nevysvětlí ani samotná teorie BCS. Navíc bylo, vzhledem k levné přípravě kapalného dusíku, zřejmé, že do budoucna půjde o technologický průlom srovnatelný s objevem tranzistoru nebo laseru.

V roce 2004 se objevily první náznaky hlubšího pochopení mechanismu vysokoteplotní supravodivosti založeného na experimentech posledních let.

Nové keramické supravodiče

Keramické oxidové supravodiče, objevené v 80. letech minulého století, jsou na bázi soustav yttrium, barium, měď, kyslík (Y-Ba-Cu-O) nebo na bázi lanthan, baryum, měď, kyslík (La-Ba-Cu-O), popř. na bázi bismutu (Bi).

Technické označení těchto nových materiálů je YBCO 123, BSCO 2212 nebo krátce Bi 2212, popř. Bi 2223. Teploty, při nichž se skokem mění fyzikální vlastnosti těchto supravodičů, leží u Bi 2212 u 92 K (–181 °C), u Bi 2223 u 110 K (–163 °C). Například hodnota kritické indukce Bk u materiálu YBCO 123 je 5 T, u materiálu Bi 2223 je to pouze 1 T.

V těchto oxidických materiálech, které pracují při teplotě tekutého dusíku (Tk = 77,35 K), elektrický proud protéká bez spádu napětí a udržuje se v supravodivém obvodu téměř libovolně dlouhou dobu – jeho intenzita se nezmenšuje, jeho energie se nepřeměňuje na Jouleovo teplo.

Objev uvedených keramických supravodičů byl významný také tím, že ve srovnání s materiály pracujícími při teplotě tekutého helia (Tk = 4,25 K) jsou náklady na jejich chlazení pouze 4 %.

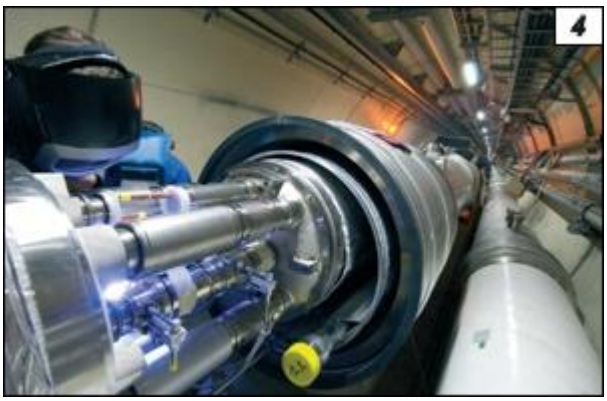
Nové keramické supravodiče jsou významné i další zásadní vlastností – ztrácejí supravodivé vlastnosti při překročení kritické hodnoty magnetické indukce Bk, popř. také kritické proudové hustoty jk.

Supravodivý stav se rovněž poruší působením silných magnetických polí a intenzivních elektrických proudů bez změny teploty – rezistivita materiálu se obnoví a znovu začne platit Ohmův zákon.

Vysokoteplotní supravodiče (HTS) lze využít v energetických zařízeních. Nejvýznačnější vlastností supravodivých materiálů je mimořádné zmenšení ztrát. Zatím největším problémem je však tyto látky „uchladit„ i pro dráty a pásky velkých délek; ale i to lze v poslední době řešit. Proto je reálná možnost vyrábět např. vinutí elektrických strojů – synchronních generátorů, magnetických akumulátorů, omezovačů proudu apod.

Co se týče materiálu Bi 2223, jsou dosud dosažené délky vodičů a proudové hustoty (při provozní teplotě 77 K) okolo 100 m a 25 kA/cm2. Tento materiál je tedy perspektivní pro přípravu supravodivých kabelů o délce až 1 km a pro výrobu transformátorů.

Na obrázku je zatím nejvýkonnější urychlovač částic LHC (Large Hadron Collider – velký urychlovač částic) na francouzsko-švýcarských hranicích v CERN (European Council for Nuclear Research, Evropská rada pro jaderný výzkum), má v průměru 8,6 km. Je to první reprezentant nové generace urychlovačů, jejichž podstatnou součástí jsou supravodivé magnety (chlazené kapalným heliem), potřebné pro dosažení potřebné intenzity magnetického pole.



V následující tabulce jsou uvedeny odhadnuté technicko-ekonomické parametry supravodivého zásobníku elektrické energie:

Měrná hustota energie [Wh/kg]	2 (hrubý odhad)

Měrná hustota výkonu [kW/kg]	10 (hrubý odhad)
Životnost [Počet let do výměny]	20
Cena [Kč/kg]	10000 (hrubý odhad)

B) Superkapacitory

Pro energii, která je akumulována v kondenzátoru s napětím U platí:

$E_c = \frac{1}{2} CU^2$ [J]

Kde C je kapacita superkapacitoru a U je napětí na něm.

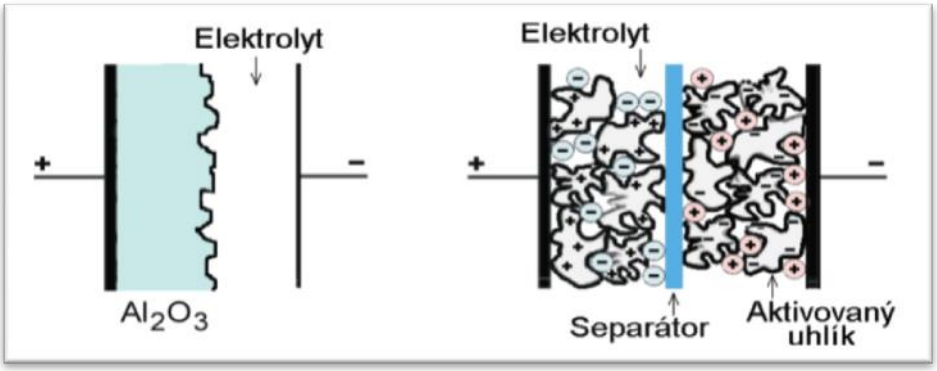
Superkapacitor je kondenzátor s mnohonásobně větší kapacitou než u běžných elektrolytických kondenzátorů, při zachování běžných vlastností kondenzátoru. Kapacita superkapacitorů je přímo úměrná ploše elektrod a nepřímo úměrná jejich vzdálenosti (vzdálenosti nábojů). Energie je v superkapacitoru uložena elektrostaticky, stejně jako u klasického kondenzátoru.

První experimenty s kondenzátorem majícím na elektrodách nanesen porézní uhlík byl prováděn v laboratořích General Eletric již v roce 1957. Výsledkem zkoumání byl nový kondenzátor s mimořádně vysokou hodnotou kapacity. Postupem času se superkapacitor zlepšoval díky vývoji nových materiálů a jeho výrobní cena postupně klesala až do dnešních hodnot.

Konstrukci superkapacitoru tvoří dvě elektrody z hliníkové folie, na níž jsou nanesena zrnka aktivního uhlíku. Tato zrnka uhlíkového prášku mají plochu až 2000 m^2 na 1 gram prášku. Elektrody jsou odděleny polypropylenovou folií a mezera mezi nimi je vyplněna elektrolytem. Díky malé vzdálenosti mezi zrnky uhlíku (řádu 10^{-10} m) a velké ploše zrnek vytváří superkapacitor kapacitu řádu faradů. Malá vzdálenost mezi uhlíkovými zrnky také omezuje provozní napětí na hodnotu cca. 2,5V a tím snižuje sériový odpor. Díky tomu lze do superkapacitoru dobře ukládat a rychle z něj dodávat elektrickou energii.

Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií a státním rozpočtem České republiky

Na tomto obrázku můžete vidět vlevo konstrukci obyčejného elektrolytického kondenzátoru s oxidem uhlíku a napravo můžete vidět superkapacitor tvořený dvěmi elektrodami, na nichž jsou nanesena zrnka uhlíku a oddělené jsou separátorem (polypropylenová folie).



Konstrukce běžného kondenzátoru (vlevo) a superkapacitoru (vpravo) [Zdroj: Maxwell]

Energie uložená v superkapacitorech je řádově 10x větší než v obyčejném elektrolytickém kondenzátoru. Malá hodnota vnitřního odporu superkapacitoru umožňuje rychlé vybití i nabití. Špičkový výkon dodaný superkapacitorem dosahuje hodnot řádu kW na 1 kg hmotnosti superkapacitoru.

V následující tabulce jsou uvedeny podstatné technicko-ekonomické parametry zásobníku energie se superkapacitory:

Měrná hustota energie [Wh/kg]	3
Měrná hustota výkonu [kW/kg]	10
Životnost [Počet cyklů nabití/vybití s poklesem kapacity o 20%]	1 000 000
Cena [Kč/kg]	1300

C) Baterie

Pro energii, která je akumulována v baterii s napětím U s dostatečnou přesností platí:

E_B = Ah.U/3600 [J]

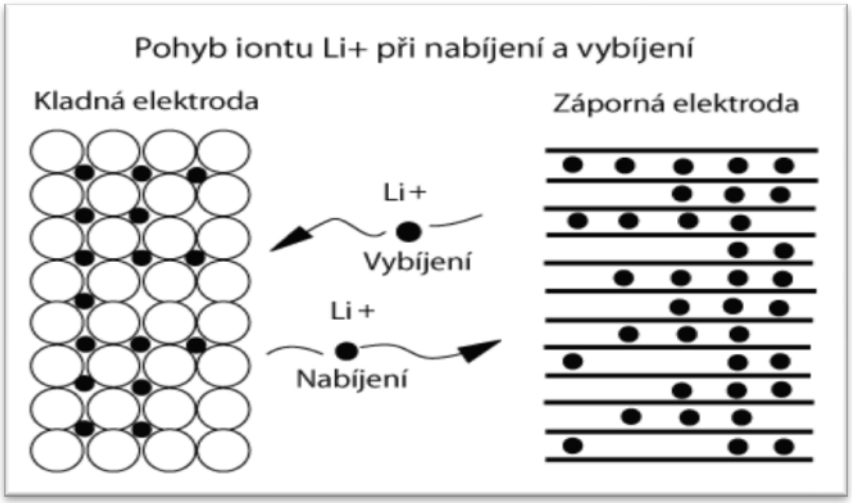
Kde Ah je kapacita baterie vyjádřená v Ampérhodinách a U je napětí na ní – u lithiových baterií můžeme předpokládat, že se napětí při vybíjení nemění, jinak bychom museli energii E_B integrovat v závislosti na čase a průběhu napětí.

V současnosti jsou k dispozici různé technologie baterií (olověné, niklkadmiové Ni-Cd, niklmetalhydridové NiMH) , nicméně v současnosti se jako velmi perspektivní jeví akumulátory lithiové.

První experimenty s lithiovými články prováděl americký chemik G.N. Lewis již v roce 1912. Návrh proběhl roku 1960, poté byla baterie vyvíjena hlavně v Bellových laboratořích. První lithiové články, tehdy ještě nenabíjecí, byly komerčně dostupné až v roce 1970. V osmdesátých letech následoval vývoj nabíjitelných článků, byl však neúspěšný, neboť články byly nebezpečné a snadno při nabíjení explodovaly. První akumulátory Li-Ion začala prodávat firma Sony až v roce 1991. Lithiové baterie se v dnešní době objevují jak v malých spotřebičích jako jsou například mobilní telefony, tak v dopravních prostředcích. S jistotou lze říci, že téměř všichni automobiloví výrobci pracují na vývoji baterií a dá se předpokládat, že technologie baterií půjde v nejbližších letech velmi rychlým tempem kupředu.

Lithiová baterie je převážně tvořena zápornou elektrodou vyrobenou z uhlíku, kladnou elektrodou, která je vyrobena z kovového oxidu a elektrolytem z lithiové soli v organickém rozpouštědle. Díky své

vysoké hustotě energie na kilogram hmoty a vyšší životnosti v cyklech oproti jiným bateriím tato technologie pronikla i do hromadné dopravy jako zásobník energie. Princip lithiové baterie je v pohybu iontů mezi elektrodami. Při nabíjení se ionty pohybují od kladné elektrody k záporné a při vybíjení naopak, což je vidět nanásledujícím obrázku.



Jedna z důležitých hodnot akumulátoru je počet cyklů vybití a nabití, která se pohybuje okolo 1500 až 10 000 cykly. Tyto akumulátory se dále nesmí vybíjet pod určité napětí a nebo přebíjet, protože by mohlo dojít k narušení struktur aktivních materiálů a tím i k snížení výkonu nebo zničení článku. Proto v obalu bývá mikročip s potřebnými senzory, který zabraňuje přehřátí a roztržení v případě přebíjení článku. Akumulátor může pracovat v rozmezí teplot od -40 až do +60 a překročení těchto hodnot může způsobit snížení výkonu ale i zničení článku. Samovybíjení je velmi malé 5 až 10 % za měsíc.

V následující tabulce jsou uvedeny podstatné technicko-ekonomické parametry s lithiovými bateriemi:

Měrná hustota energie [Wh/kg]	100
Měrná hustota výkonu [kW/kg]	1

Životnost [Počet cyklů nabití/vybití s poklesem kapacity o 20%]	1 500 – 10 000
Cena [Kč/kg]	2 000

Porovnání setrvačníků, superkondenzátorů a baterií

Setrvačníky

Výhody	Nevýhody
vysoká spolehlivost • bez údržby, servis po 20 - 30 letech • „nekonečná“ životnost • nízké náklady na instalaci • velký teplotní rozsah • rychlé nabíjení/vybíjení • nízká hmotnost, objem • bez chlazení • bez poklesu kapacity se stářím • snadno dostupné informace o množství akumulované energie • šetrný k životnímu prostředí • implementační nezáludnost = klasická soustava měnič-motor = zkušenosti • slušná hustota energie • velká hustota výkonu • existující výrobci (CCM, apod.)	• rotující hmota • vibrace => ošetření • havárie = nebezpečné rotující těleso => kotvení • síly vyplývající z rotačního pohybu (gyroskopický efekt) => riziko vlivu na jízdní vlastnosti • ložiska, zřejmě speciální, nákladné • nepříliš rozšířené řešení – omezený počet výrobců • chybějící zkušenosti • umístění (střecha, vnitřek, jiné?) • rychlá ztráta energie (2-5%/min.) • složitější měnič a řízení

Superkondenzátory

Výhody	Nevýhody
• „rychlé“ nabíjení/vybíjení • velká hustota výkonu • statické řešení – bez vlivu na jízdní vlastnosti • existující, zavedení výrobci (Maxwell)	• rychlé samovybíjení • velké nároky na prostor • velké hmotnostní nároky • značně omezený počet výrobců • pokles kapacity se stářím

Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií a státním rozpočtem České republiky

• zkušenosti ve světě • jednoduchý měnič i jeho řízení • snadná dimenzovatelnost skládáním bloků	• nutnost chlazení => údržba • rozvažování napětí • životnost citlivá ke změnám napětí • teplotní závislosti • nepřesná informace o množství akumulované energie

Baterie

Výhody	Nevýhody
• velmi malé/nulové samovybíjení • silně rozšířený prvek => důvěra zákazníka • velká škála renomovaných výrobců • statické řešení – bez vlivu na jízdní vlastnosti • zkušenosti ve světě • jednoduchý měnič i jeho řízení • velká hustota energie • snadná dimenzovatelnost skládáním bloků	• malá hustota výkonu • ekologicky rizikové řešení – toxické materiály • rizika při havárii • velmi omezená životnost – limitovaný počet cyklů! • pokles kapacity se stářím • nutnost chlazení • vyšší roční náklady na údržbu [10] • životnost citlivá k velikosti proudu • životnost citlivá k hloubce vybíjení =>

Použití zásobníků energie v produktech „Škodovky“

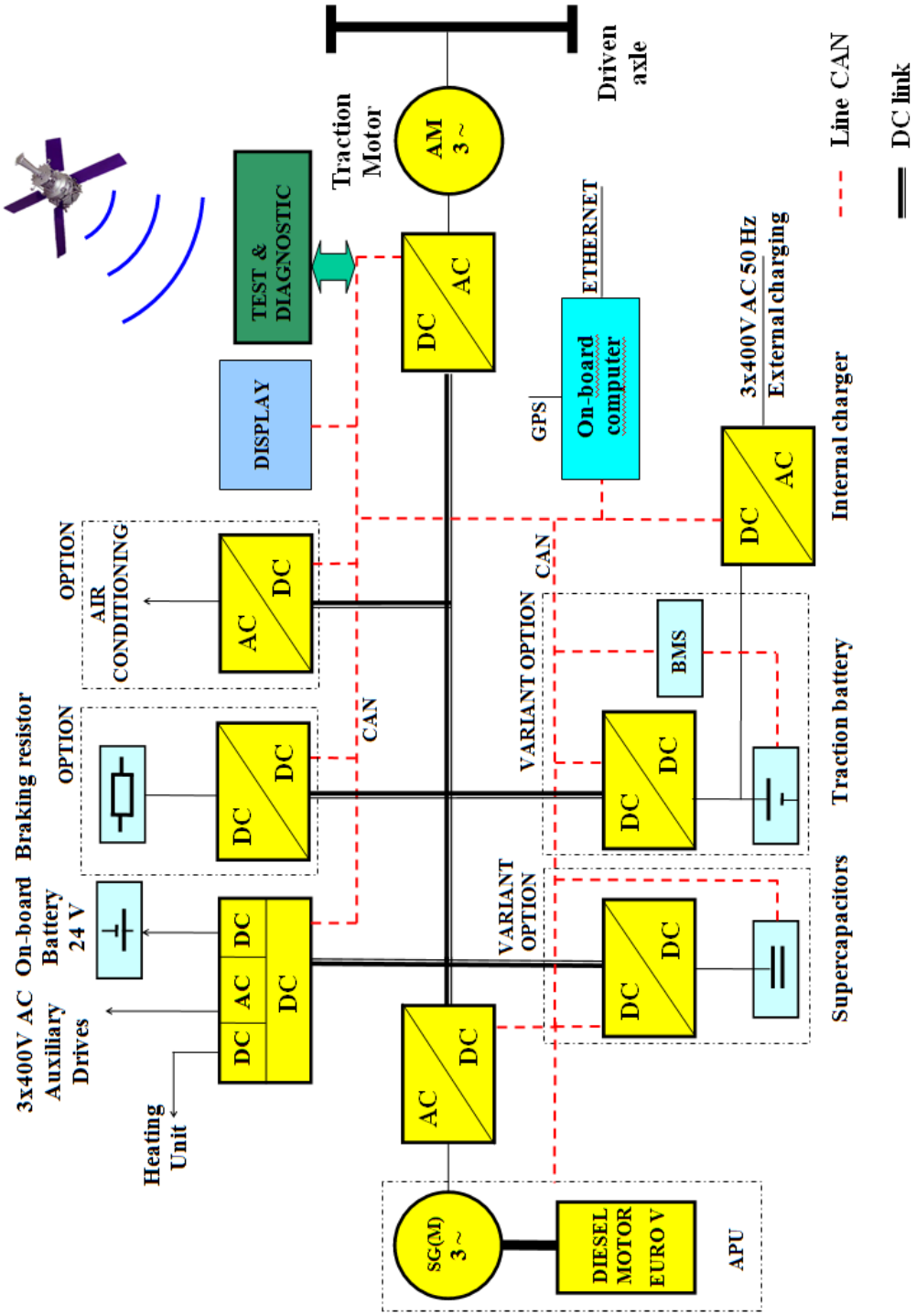
Prvním produktem, který byl vybaven zásobníky energie, byl bus s vodíkovými palivovými články. Ten je nasazen v provozu v Neratovicích a je vybaven superkapacitory a lithiovými bateriemi. Na vyšší technické a technologické úrovni je sériový hybridní bus s typovým označením Škoda H12 – viz. foto na další stránce, který je taktéž vybaven superkapacitory a lithiovými bateriemi.

Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií a státním rozpočtem České republiky

Na dalším obrázku je znázorněno blokové schéma trakční elektrovýzbroje. Jako primární zdroj energie je použit dieselgenerátor, který přeměňuje energii uloženou v naftě na elektrickou energii. Na rozdíl od paralelního hybridního vozidla je tedy výkon od zdroje na „kola“ přenášen elektricky.

Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií a státním rozpočtem České republiky

Název projektu: **Automatizace výrobních procesů ve strojírenství a řemeslech**
Registrační číslo: **CZ.1.07/1.1.30/01.0038**
Příjemce: SPŠ strojnická a SOŠ profesora Švejcara Plzeň

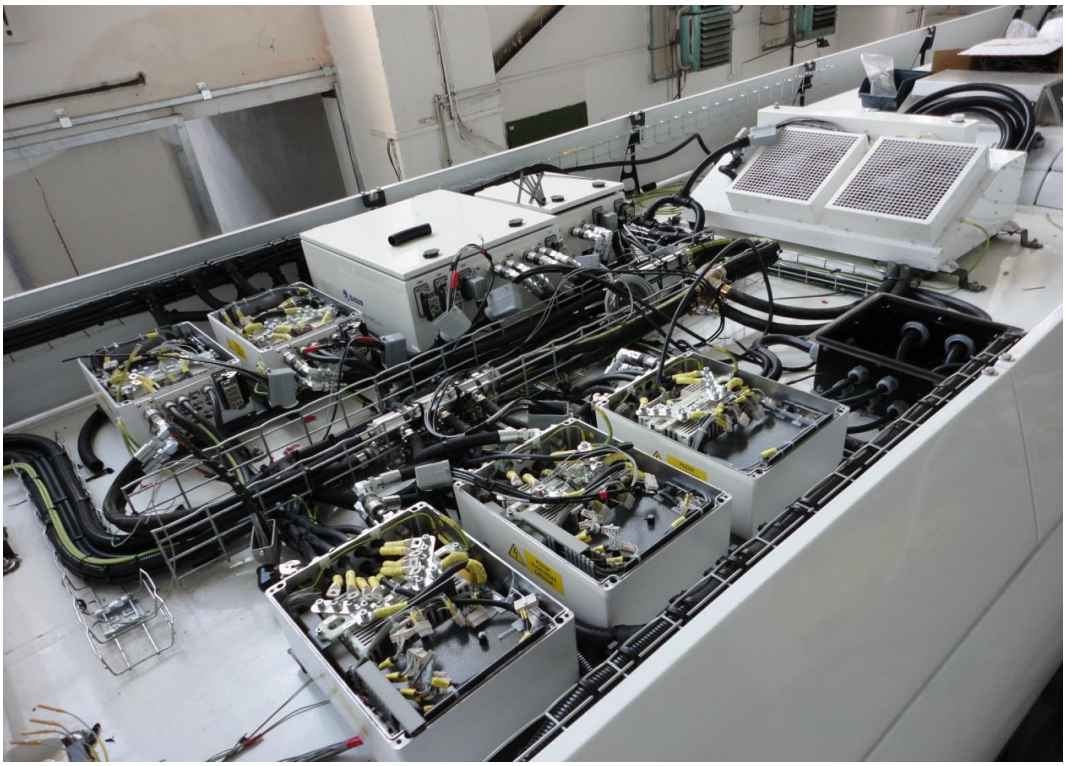


Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií a státním rozpočtem České republiky

SUPERKAPACITORY

Výrobce:	Maxwell
Typ	HTM 125V
Počet modulů	3
Celková kapacita	21 F
Nominální napětí	375 V

TRAKČNÍ BATERIE

Výrobce	Valence
Typ	Li-Ion UEV-18XP
Počet modulů	18
Celková kapacita	69 Ah
Nominální napětí	345,6 V

Na dalším obrázku je střecha hybridního busu s elektrovýzbrojí.