

## ÚČINNOST RŮZNÝCH SYSTÉMŮ UKLÁDÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

*Veronika Šnajdrová, Tomáš Hlinčík, Karel Ciahotný*

*VŠCHT Praha, Ústav plyných a pevných paliv a ochrany ovzduší,  
Technická 5, 166 28 Praha 6, e-mail: snajdrov@vscht.cz*

*Příspěvek se zaměřuje na účinnosti jednotlivých systémů pro ukládání elektrické energie z obnovitelných zdrojů a jejich detailnější popis. Systémy pro akumulaci elektrické energie jsou důležitým faktorem pro zajištění stálých dodávek elektrické energie do elektrické sítě. V praxi se využívá mnoho systémů pro akumulaci elektrické energie. V tomto článku budou popsány nevyužívanější technologie.*

*Klíčová slova: obnovitelné zdroje energie, elektrická energie, akumulace elektrické energie*

Došlo 19. 05. 2017, přijato 19. 6. 2017

### 1. Úvod

Za účelem snižování závislosti na konvenčních zdrojích energie a snižování emisí oxidu uhličitého panuje v posledních letech snaha o rozvoj obnovitelných zdrojů energie (OZE). Mezi konvenční zdroje energie řadíme elektrárny na fosilní paliva a mezi obnovitelné zdroje energie řadíme například fotovoltaické, vodní nebo větrné elektrárny. Elektrická energie z obnovitelných zdrojů má velkou nevýhodu a tou je její nestabilní výroba, která závisí na aktuálním stavu počasí, a tedy ji nelze přesně predikovat, kromě vodních elektráren. V tomto případě může docházet buď k nedostatečné výrobě elektrické energie, nebo k její nadvýrobě [1]. Aby bylo možné alespoň částečně nahradit konvenční zdroje elektrické energie, je třeba zařadit do elektrické sítě systémy pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Další možností využití přebytečné elektrické energie v době její nadvýroby je její přeměna na energii chemickou. Výroba chemické energie z přebytečné elektrické energie je známa pod pojmem Power-to-Gas.

### 2. Koncept Power-to-Gas

Koncept Power-to-Gas spojuje rozvodnou elektrickou síť s plynovodní sítí tak, že přeměňuje nadbytečnou elektrickou energii na chemickou pomocí dvoufázového procesu. V první fázi jde o produkci vodíku pomocí elektrolýzy vody, kde může být vodík prvním konečným produktem v konceptu Power-to-Gas. Vodík může být uložen do tlakových lahví, nebo může být uložen spolu se zemním plynem v rámci infrastruktury zásobníků zemního plynu. Dále může být vodík například využit jako palivo pro pohon motorových vozidel. Nebo může být produkován vodík využit k reakci s oxidem uhličitým na methan. Tento plyn je označován jako syntetický nebo náhradní zemní plyn (SNG). SNG může být vtlakován do stávajících plynových rozvodů nebo plynových zásobníků, dále může být využíván jako motorové palivo pro vozidla na CNG (stlačený zemní plyn) nebo může být použit pro stávající plynárenská zařízení. Jednotlivé části konceptu Power-to-Gas jsou znázorněny na obr. 1. Celková světová skladovací kapacita zemního plynu je více

než 3 600 TWh [2] a celková světová výroba elektrické energie z větrné a solární energie byla v roce 2012 639 TWh [3].

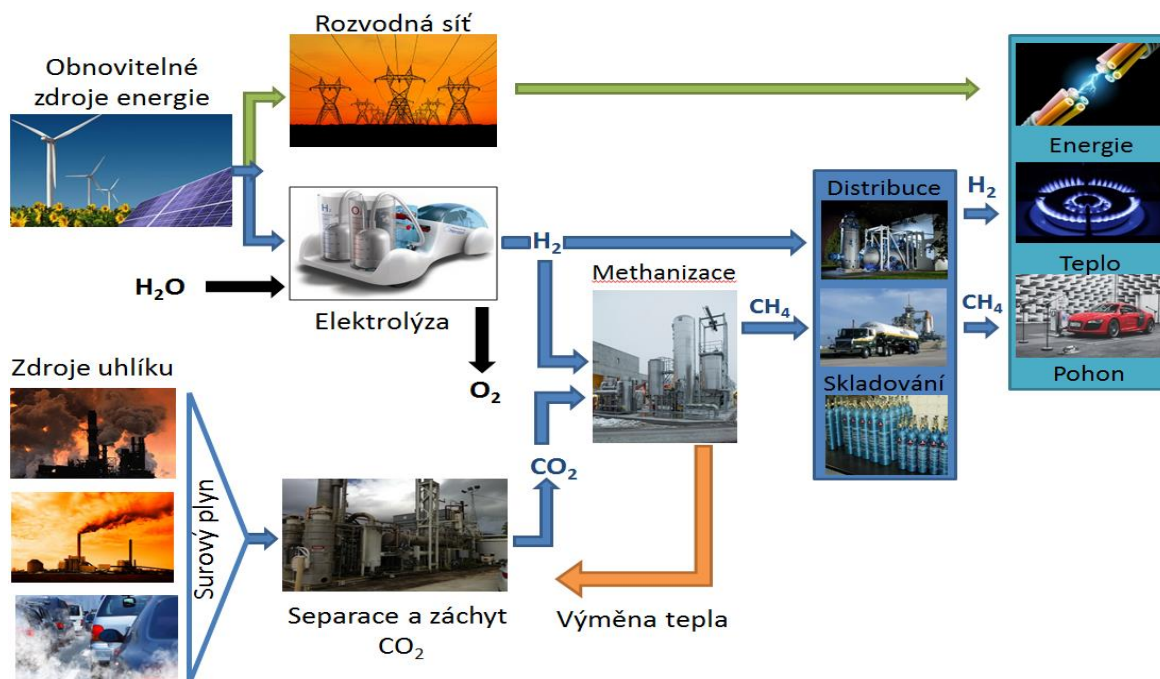
### 3. Technologie pro akumulaci elektrické energie

Akumulace elektrické energie je klíčovým aspektem nejen v konceptu Power-to-Gas, ale je důležitá i ve spojitosti s konvenčními zdroji energie. Nevýhodou konvenčních zdrojů elektrické energie, jako jsou elektrárny na fosilní paliva či jaderné elektrárny, je jejich nájezd na plný výkon, který se pohybuje v rozmezí od jednoho dne až po několik týdnů. Vzhledem k tomu, že elektrická síť musí být v neustálé rovnováze mezi výrobou a spotřebou elektrické energie, činí nestabilní výkon OZE výrazné obtíže při řízení elektrické přenosové soustavy. Při nedostatečné výrobě elektrické energie z OZE musí být odběrové špičky kryty najížděním záložních zdrojů a naopak při nadměrné výrobě elektrické energie musí být některé zdroje odstavovány. Zároveň při nadměrné výrobě hrozí přetížení přenosové soustavy a následné výpadky dodávek elektrické energie. Tyto problémy lze vyřešit zařazením systémů akumulace elektrické energie do elektrické rozvodné sítě [4].

Existuje mnoho způsobů akumulace elektrické energie, kde se vždy jedná o přeměnu elektrické energie na jinou formu energie a v případě potřeby znovu zpět na elektrickou energii. V praxi se využívá mnoho technologií pro akumulaci elektrické energie, mezi ně patří např. přečerpávací vodní elektrárny, technologie pro akumulaci stlačeným vzduchem, elektrochemické články, setrvačníky, superkondenzátory, supravodivý magnetický systém akumulace energie, a další.

#### 3.1. Přečerpávací vodní elektrárny (PVE)

V dnešní době význam PVE stoupá především díky obtížně předvídatelnému výkonu obnovitelných zdrojů energie, jež jsou zdrojem výrazných výkyvů na výrobní straně výkonové bilance elektrizační soustavy.



**Obr. 1** Schéma konceptu Power-to-Gas [3]

**Fig. 1** Schema of concept Power-to-Gas [3]

PVE dokáží díky velmi rychlému najetí elektrárny během 60 sekund tyto výkyvy spolehlivě vyrovnávat a dle velikosti nádrže jsou schopny pracovat v rozmezí 4 – 10 hodin.

Tato technologie využívá dvou zásobníků vody, které jsou umístěné v různých nadmořských výškách. Při ukládání energie je voda čerpána ze spodního do horního zásobníku. Naopak při výrobě energie je voda z horního zásobníku vypouštěna dolů přes turbínu, která vyrábí elektrickou energii. Jako zásobníky vody slouží nádrže, jezera nebo řeky v horských oblastech, případně může být spodní zásobník uložen v zemi. Jedná se o nejběžnější systém ukládání energie, který disponuje velkým výkonem a je zde možnost akumulace energie po dlouhou dobu. Účinnost PVE se pohybuje v rozmezí 50 – 85 %. Mezi nevýhody patří zejména zajištění vhodné lokality s dostatečným převýšením a prostorem pro obě nádrže. V České republice máme tři PVE, a to Štěchovice II, Dalešice a Dlouhé stráně [5].

### 3.2. Akumulace do stlačeného vzduchu (CAES)

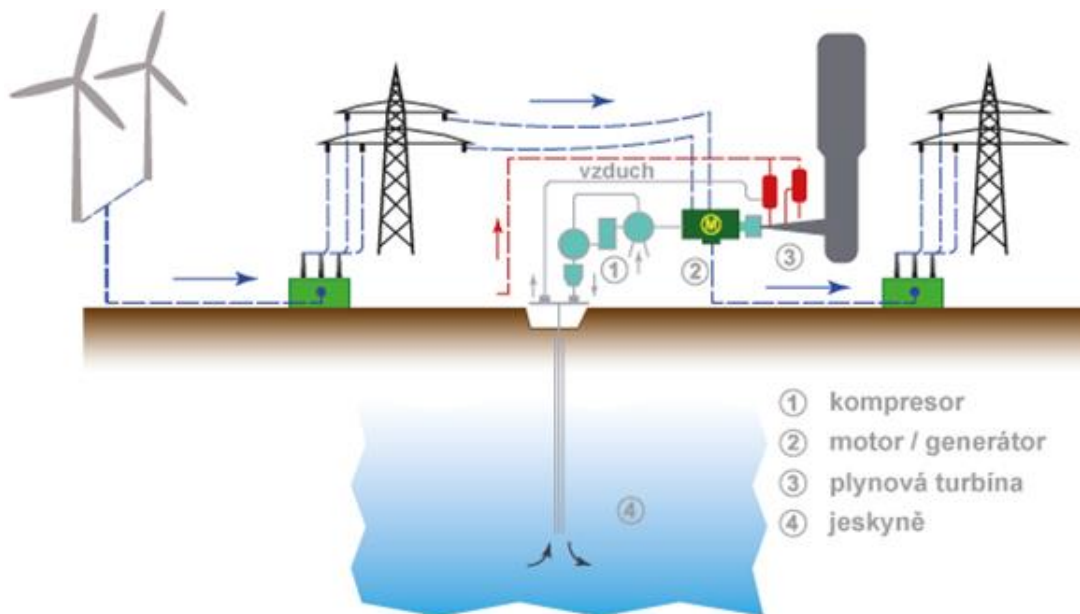
Tato technologie akumulace energie, která je založena na využití stlačeného vzduchu (CAES – Compressed Air Energy Storage), by se měla v budoucnu využívat především u větrných elektráren, které v současnosti dosahují největších výkonů z obnovitelných zdrojů energie.

Při akumulaci elektrické energie pomocí této technologie je vzduch stlačován kompresorem do zásobníku. Zpět je elektrická energie získávána expanzí vzduchu na

turbíně. Zásobníkem zde mohou být přírodní jeskyně, nebo uměle vytvořené kaverny. CAES může být použit pro akumulaci velkého množství elektrické energie. Účinnost CAES při zařazení systému akumulace tepelné energie, která vzniká při kompresi plynu a využití této energie k předehřevu plynu před expanzí, je přibližně 70 %. Nicméně v průmyslové praxi systémy CAES dosahují vlivem nízkých elektrických účinností (komprese a expanze) celkové účinnosti pod 35 %. Výhodou tohoto systému akumulace je vysoká doba skladování (více než jeden rok) a to hlavně z důvodu velmi malých ztrát vzduchu z kaveren. Hlavní nevýhodou je potřeba dostatečně velkých prostorů v podzemí, aby byla výstavba ekonomicky únosná [6]. Na obr. 2 je schématické znázornění technologie CAES [7].

### 3.3. Elektrochemické články

Jedná se o chemický princip akumulace energie, kdy je energie uchovávána v chemických vazbách elektrodového materiálu a dochází k vratným reakcím elektrodového materiálu s ionty z elektrolytu. Jejich výhodou je relativně nízká cena, možnost operativního využití a mnohonásobné opětovné nabíjení a vybíjení. Mezi hlavní nevýhody patří samovybíjení a malý poměr akumulované energie k hmotnosti či objemu akumulátoru. Do tohoto typu akumulace řadíme všechny akumulátory a superkondenzátory. Účinnost elektrochemických článků se pohybuje v rozmezí 75 – 95 %.



**Obr. 2** Uspořádání technologie CAES [7]  
**Fig. 2** Arrangement of technology CAES [7]

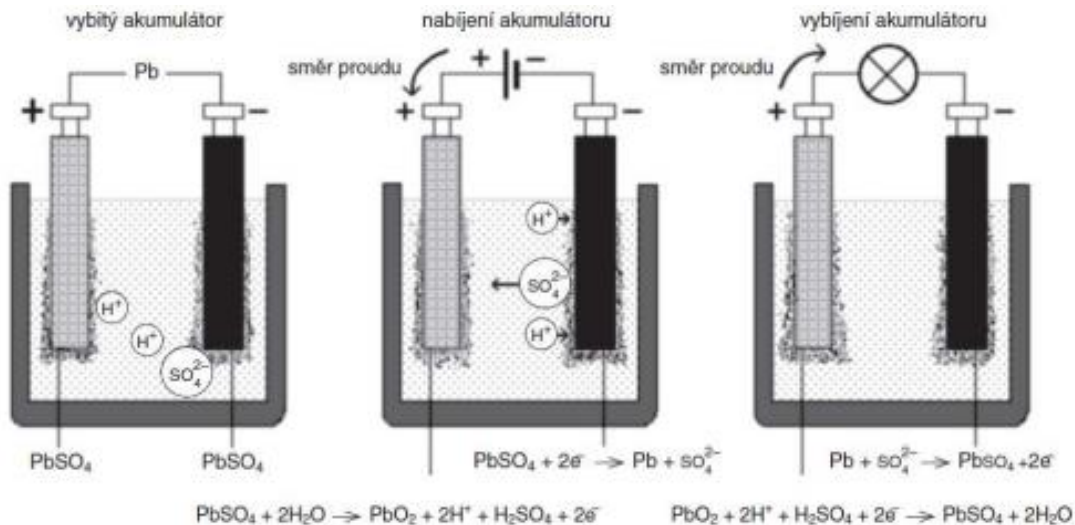
3.3.1 Olověné akumulátory

Patří mezi nejstarší, neznámější a nejvíce rozšířené akumulátory. Nejběžněji využívané olověné akumulátory jsou sestavené sériově do baterie, kde se napětí jednoho akumulátoru pohybuje v rozmezí 1,1 – 2,5 V. Elektrolytem je zde zředěná kyselina sírová, která v roztoku disociuje na kladné vodíkové ionty a záporné síranové ionty. Schéma vybíjení a nabíjení olověného akumulátoru je znázorněno na obr. 3 [8].

Olověné akumulátory vynikají zejména svojí odolností vůči nízkým teplotám, bezpečností a cenou. Velkou nevýhodou těchto akumulátorů je jejich ekologická zátěž [9].

3.3.2 Ni-Cd akumulátory

Mezi výhody těchto akumulátorů patří jejich malé samovybíjení a odolnost proti zvýšeným teplotám. Životnost je více než 500 cyklů nabití - vybití při 80 % DOD (Depth of Discharge – hloubka vybití). U velkých systémů pro akumulaci energie je životnost 20 let s předpokladem 15 % DOD. Tento typ baterií má velkou měrnou energii, ta se pohybuje okolo 50 Wh.kg<sup>-1</sup> [10]. Nevýhodou je jejich pořizovací cena, která je v porovnání s Pb akumulátory cca 6 krát vyšší. Největším problémem u těchto baterií je cadmium, které je vysoce nebezpečné a karcinogenní. Z tohoto důvodu se opouští od výroby zmíněného typu baterií.



**Obr. 3** Schéma olověného akumulátoru [8]  
**Fig. 3** Schema of lead accumulator [8]

### 3.3.3 Li-ion akumulátory

Tyto akumulátory vynikají především svou malou velikostí, malou hmotností, mají relativně vysoké napětí 3,7 V a velkou měrnou energii, která se pohybuje okolo  $140 \text{ Wh.kg}^{-1}$ . Jejich nedostatkem je vysoká cena a ztráta akumulací kapacity při hlubokém vybíjení, které se projevuje snižováním životnosti baterie [9].

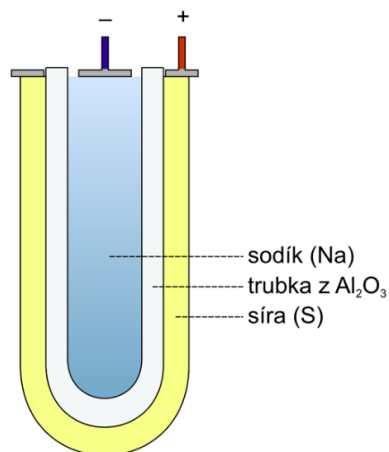
### 3.3.4 NaS akumulátory

Tento typ akumulátoru má nejlepší vlastnosti pro energetiku, jelikož má velkou měrnou energii ( $150 \text{ Wh.kg}^{-1}$ ) a dosahuje účinnosti kolem 90 %. Životnost těchto akumulátorů se odhaduje na cca 15 let i přes velký počet cyklů nabíjení – vybíjení [11].

Hlavní nevýhodou NaS akumulátoru je pracovní teplota, která se pohybuje kolem  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při této teplotě jsou sodík i síra v kapalném stavu. Tento typ akumulátoru je nainstalován v akumuláčnické stanici v Presidio USA, která je při výpadku elektřiny schopna dodávat 4 MW po dobu 8 hodin. Další zařízení o výkonu 1 MW a s kapacitou 7,2 MWh je nainstalováno například v Japonsku, kde vyrovnává zatížení sítě a zlepšuje tak její stabilitu [12]. Schéma NaS akumulátoru je znázorněno na obr. 4 [13].

### 3.3.5 Zn-Br akumulátory

Na rozdíl od ostatních akumulátorů má tento typ akumulátoru oddělené elektrolyty, v nichž je akumulována energie. Během nabíjení je čerpán roztok bromidu zinečnatého do prostoru mezi elektrodami. Na kladné elektrodě dochází k vylučování kapalného brómu, který je spolu s přísadami pro zlepšení jeho rozpustnosti čerpán do druhé nádrže.

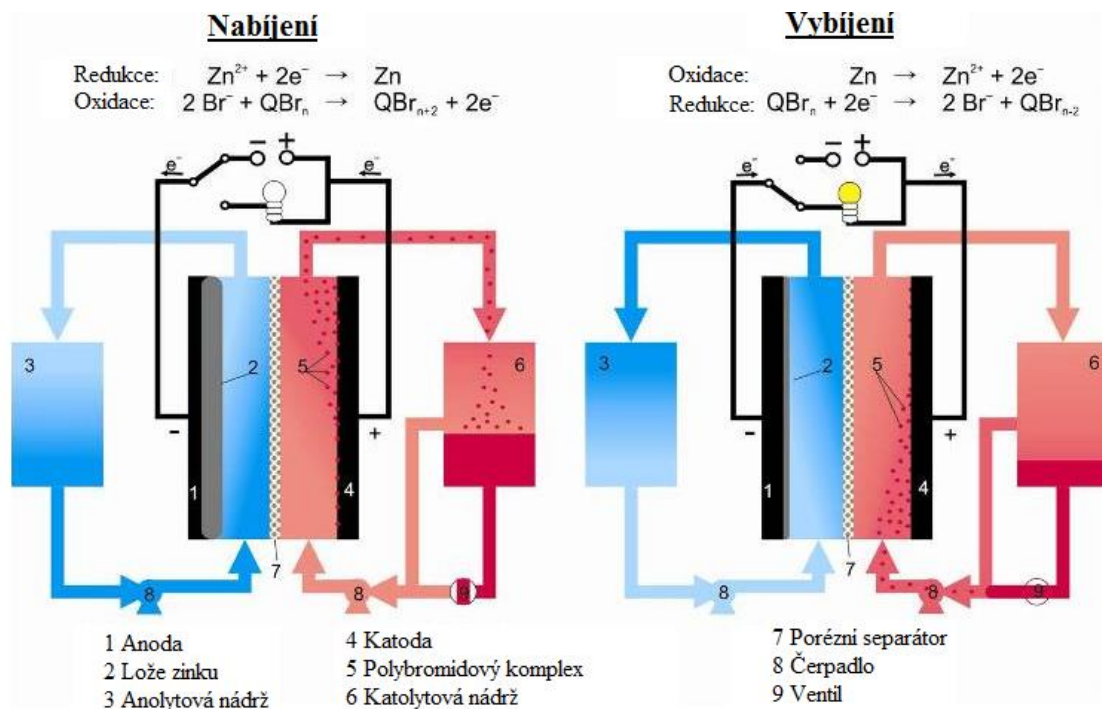


Obr. 4 Schéma NaS akumulátoru [13]

Fig. 4 Schema of NaS accumulator [13]

Na záporné elektrodě se vylučuje kovový zinek. Při vybíjení je roztok čerpán z druhé nádrže do první, kde na elektrodách reaguje s kovovým zinkem. Zde vzniká bromid zinečnatý a elektrický proud [14]. Schéma Zn-Br akumulátoru je znázorněno na obr. 5 [15].

Napětí na jednom článku je přibližně 1,7 V. Velkou výhodou těchto akumulátorů je jejich možnost úplného vybití bez poškození s velkým počtem cyklů. Nevýhodou tohoto typu akumulátoru je jeho energetická hustota, která není příliš vysoká. Zmíněnou nevýhodu ostatně převažuje jeho nízká pořizovací cena [14].



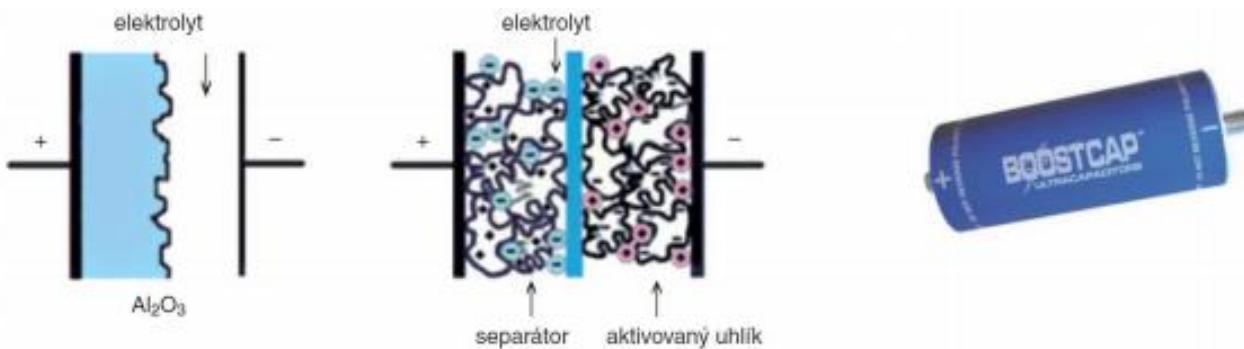
Obr. 5 Schéma Zn-Br akumulátoru [15]

Fig. 5 Schema of Zn-Br accumulator [15]

### 3.4. Superkondenzátor

Princip superkondenzátoru je obdobný jako u elektrochemických článků s tím rozdílem, že u tohoto akumulátoru není elektrický náboj uchovávan chemicky, ale fyzikálně, tedy elektrostatickou silou na povrchu elektrod. Elektrody jsou vyrobeny ze speciálního materiálu, který vyniká velkou plošnou hustotou. Jedná se práškový

uhlík, který je nanesený na hliníkové fólii. Prostor elektrod je vyplněn tekutým elektrolytem a elektrody jsou od sebe odděleny polypropylenovou fólií. Napětí jednoho článku se pohybuje okolo 2,5 V. U tohoto zařízení je možné akumulovat energii s vyšším napětím, a to sériovým zapojením článků. Velkou výhodou je vysoká účinnost akumulace - až 95 %. Nevýhodou je poměrně vysoká cena [16]. Schéma superkondenzátoru je znázorněno na obr. 6 [17].

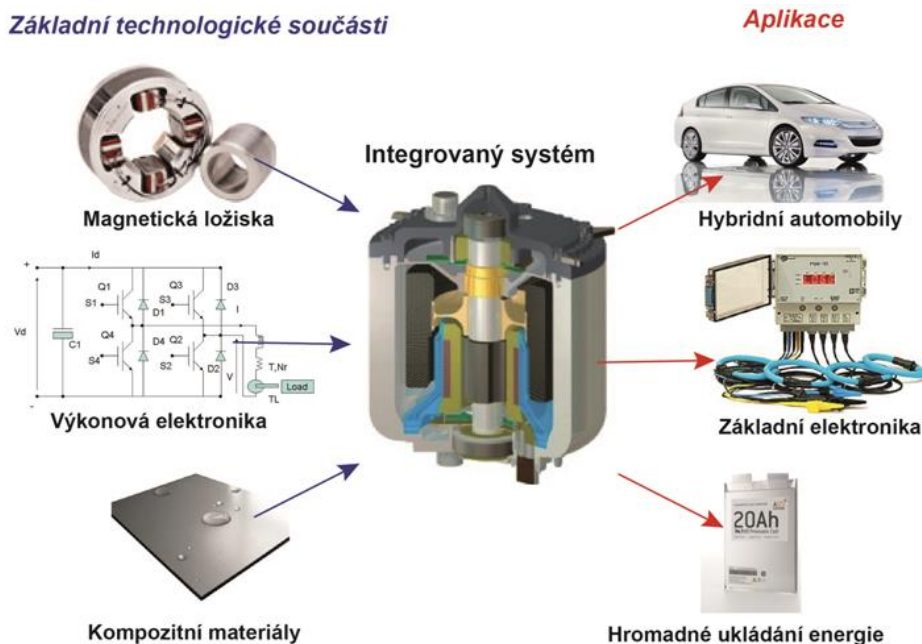


**Obr. 6** Schéma vnitřního uspořádání a modul superkondenzátoru [17]  
**Fig. 6** Schema of internal arrangement and modul of supercapacitor [17]

### 3.5. Setrvačníky

Setrvačníky fungují na principu uchování kinetické energie. Kinetická energie se získává pomocí elektrického příkonu, kterým se roztáčí rotor. Při ukládání elektrické energie je setrvačnick zrychlován elektrickým motorem. Elektrická energie je zpět získávána z generátoru, který je poháněn setrvačnickem. Moderní setrvačnick jsou

vyráběny z uhlíkových kompozitů, které jsou lehké a rotor tak dosáhne větší rychlosti. Setrvačnick dělíme na dva typy. První pracuje při otáčkách do 8 000 min<sup>-1</sup>. Druhý typ setrvačnick je podstatně lehčí a pracuje při otáčkách až 100 000 min<sup>-1</sup>. Setrvačnick se vyznačují vysokým výkonem, nízkou energií a velmi krátkou náběhovou prodlevou. Účinnost se pohybuje v rozmezí 90 – 95 %. Na obr. 7 je znázorněno využití setrvačnick [18].



**Obr. 7** Využití setrvačnicku [18]  
**Fig. 7** Use of flywheel [18]

### 3.6. Supravodivé prstence

Jedná se o akumulaci energie do magnetického pole, kde se nejprve musí střídavý proud z rozvodné sítě přeměnit na stejnosměrný proud a následně je přiváděn do supravodivé cívky. Cívka musí být zkonstruována ze supravodivého materiálu, který je odolný pro velké proudy a musí být tepelně izolována [19]. Při čerpání energie z cívky je proces opačný, kdy stejnosměrný proud z cívky je přes výkonový střídač převeden do sítě. Hlavní výhodou je možnost ve velmi rychlém čase přecházet ze stavu akumulace do stavu čerpání naakumulované energie. Účinnost tohoto zařízení se pohybuje okolo 95 %.

### 4. Závěr

Aby bylo možné konvenční zdroje elektrické energie nahrazovat obnovitelnými zdroji energie, je třeba do sítě zařadit systémy pro akumulaci elektrické energie. Nevýhodou konvenčních zdrojů elektrické energie, jako jsou elektrárny na fosilní paliva či jaderné elektrárny, je jejich dlouhý nájezd na plný výkon, který se pohybuje v rozmezí dnů až týdnů. Tato nevýhoda může mít za následek výpadky dodávek elektrické energie. Řešením této situace je akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie. V současné době existuje mnoho způsobů akumulace elektrické energie. V praxi se nejčastěji využívají přečerpávací vodní elektrárny, technologie pro akumulaci stlačeného vzduchu, elektrochemické články, setrvačníky, superkondenzátory či supravodivé prstence. V tab. 1 jsou znázorněny jednotlivé technologie s jejich účinnostmi [20]. Z tabulky vyplývá, že nejvyšší účinnost akumulace elektrické energie mají superkondenzátory a supravodivé prstence. Lze předpokládat, že se v budoucnu budou tyto technologie dále zdokonalovat.

**Tab. 1** Účinnosti jednotlivých akumulačních systémů

**Tab. 1** Efficiency of individual storage systems

Systém	Účinnost akumulace elektrické energie[%]
Přečerpávací vodní elektrárny (PVE)	50 – 85
Stlačený vzduch (CAES)	27 – 70
Elektrochemické články	75 – 95
Superkondenzátory	95
Setrvačníky	90 – 95
Supravodivé prstence	95
Power-to-Gas: vodík*	20 – 35
Power-to-Gas: methan*	15 – 20

\* elektřina → plyn → elektřina + teplo (plynová turbína)

### Poděkování

Práce byla realizována s finanční podporou poskytnutou TAČR (projekt TH02020767 Methanizace oxidu uhličitého v bioplynu) a IGA VŠCHT (A2\_FT0P\_2017\_027). Autoři příspěvku děkují TAČR a IGA VŠCHT za finanční prostředky poskytnuté na řešení projektu.

### Literatura

1. <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Vsechna-data/Stranky/odhad-vyroby-obnovitelnych-zdroju.aspx> (staženo 19. prosince 2016)
2. Wallbrecht J.: International Gas Union Tirenium 2003-2006-Working Committee 2: Underground Gas Storage, Amsterdam, 2006.
3. Jentsch M., Trost T., Sterner M.: Optimal use of Power-to-Gas energy storage systems in an 85 % renewable energy scenario; Energy Procedia 46, 2014, 254-261.
4. Schaaf T., Grünig J., Schuster M.R., Rothenfluh T., Orth A.: Methanation of CO<sub>2</sub>-storage of renewable energy in a gas distribution system; Energy, Sustainability and Society 4, 2014.
5. <http://oenergetice.cz> (staženo 7. února 2017)
6. [www.tretipol.cz](http://www.tretipol.cz) (staženo 6. prosince 2016)
7. <http://oze.tzb-info.cz> (staženo 8. února 2017)
8. <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf> (staženo 3. března 2017)
9. Bruce P.G., Freunberger S.A., Hardwick L.J., Tarascon J.M.: Li-O<sub>2</sub> and Li-S batteries with high energy storage, Nature Materials 11, 2011, 19-29.
10. Skowroński J.M., Osińska M.: Chemical leaching nickel from spent nickel-cadmium batteries; Przemysl Chemiczny 87, 2008, 48-51.
11. Ferreira H.L., Garde R., Fulli G., Kling W., Lopes J.P.: Characterisation of electrical energy storage technologies; Energy 53, 2013, 288-298.
12. Subburaj A.S., Pushpakaran B.N., Bayne S.B.: Overview of grid connected renewable energy based battery projects in USA; Renewable and Sustainable Energy Reviews 45, 2015, 219-234.
13. [www.nazeleno.cz](http://www.nazeleno.cz) (staženo 13. února 2017)
14. Jeon J.D., Yang H.S., Shim J., Kim H.S., Yang J.H.: Dual function of quaternary ammonium in Zn/Br redox flow battery: Capturing the bromine and lowering the charge transfer resistance; Electrochimica Acta 127, 2014, 397-402.
15. [innovationflow.blogspot.cz](http://innovationflow.blogspot.cz) (staženo 13. února 2017)
16. Miller J.R., Simon P.: Fundamentals of electrochemical capacitor design and operation; Interface 17, 2008, 31-32.
17. Mareš J., Libra M., Poulek V.: Akumulace elektrické energie; Elektro 2, 2011, 6-10.
18. Casey T.: Oil-Free Magnetic „Lubrication“ Dives New Flywheel Energy Storage Systems; Clean Technica, 2010.
19. Gurtovoi V.L., Nikulov A.V.: Energy of magnetic moment of superconducting current in magnetic field; Physica C: Superconductivity and its Applications 516, 2015, 50-54.
20. Fraunhofer – Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes, 2011, 18.

### Summary

*Veronika Šnajdrová, Tomáš Hlinčík, Karel Cíahotný  
University of Chemistry and Technology, Prague, Technická 5, 166 28 Praha 6, snajdrov@vscht.cz*

#### ***Efficiency of systems for storage of electricity from renewable sources***

This article focuses on the principles and efficiency of individual storage systems for electricity produced from renewable sources. Electricity storage systems are important means of ensuring constant electricity supply to the power grid. A variety of electricity accumulation systems are used in practical applications. In this work the most commonly used technologies are described.