

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra fyziky



Bakalářská práce

Studium možností akumulace energie pro PV systémy

Jiří Urban

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Urban

Zemědělské inženýrství

Inženýrství údržby

Název práce

Studium možností akumulace energie pro PV systémy

Název anglicky

Study of energy accumulation in PV systems

Cíle práce

Vytvoření rešerše o možnostech akumulace elektrické energie v ostrovních PV systémech. Diskuse možností akumulace a vlastní závěry ohledně začlenění obnovitelných zdrojů energie do energetického mixu.

Metodika

Rešerše různých způsobů akumulace energie a fyzikálních principů, na kterých pracují. Přehled vhodných možností použití v technické praxi a vlastní úvaha o jejich přednostech a nedostatcích.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

obnovitelné zdroje energie; fotovoltaika; baterie

Doporučené zdroje informací

Hallyday, D. a kol., Fyzika, VUTIUM, Brno, 2003

Libra, M., Poulek, V., Fotovoltaika, ILSA, Praha, 2010

LIBRA, M. – POULEK, V. Zdroje a využití energie. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN 978-80-213-1647-8.

M. Koehl, a kol., Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 95, (2011), 1638–1646

Poulek, V. a kol., Influence of increased temperature on energy production of roof integrated PV panels, Energy & Buildings, 166, (2018) 418–425

Poulek, V., Dang, M.Q., Libra, M., Beránek, V., Šafránková, J., PV Panel with Integrated Lithium Accumulators for BAPV Applications – One Year Thermal Evaluation. IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, 10, 1, pp.150-152, ISSN 2156-3403

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra fyziky

Elektronicky schváleno dne 12. 2. 2020

prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 14. 02. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Studium možností akumulace energie pro PV systémy" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.5.2021

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval zejména mému vedoucímu této bakalářské práce panu prof. Ing. Martinu Librovi, CSc. za konzultace v průběhu zpracování. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům při mém bakalářském studiu.

Studium možností akumulace energie pro PV systémy

Abstrakt

Se stále rostoucí spotřebou elektrické energie a omezeností fosilních paliv je akumulování energie velmi podstatnou činností. Pro efektivní akumulaci energie je nutné inovovat a vyvíjet nové akumulční technologie. Část obnovitelných zdrojů využívaných pro výrobu elektrické energie jsou silně závislé na počasí. Proto je nutné vhodně volit akumulční technologie, aby byly schopny reagovat na případné výkyvy způsobené proměnlivým počasím. V práci jsou dále shrnuty jednotlivé fyzikální principy a nejdůležitější parametry akumulčních zdrojů, a to zejména jejich cena, životnost a měrné energie. Dále je věnována pozornost jejich uplatnění v technické praxi.

Klíčová slova: obnovitelné zdroje energie; fotovoltaika; baterie; akumulátor; vodík; palivové články; superkondenzátor; přečerpávací vodní elektrárna; setrvačnick

Study of energy accumulation in PV systems

Abstract

With ever-increasing electricity consumption and limited fossil fuels, energy storage is a very important activity. For efficient energy storage, it is necessary to innovate and develop new storage technologies. Some of the renewable sources used for generating electricity are heavily dependent on the weather. Therefore, it is necessary to choose properly the storage technologies in order to be able to respond to any fluctuations caused by changing weather. The work also summarizes the individual physical principles and the most important parameters of storage resources, especially their price, lifetime cycle and specific energy. Furthermore, the attention is paid to their application in the technical practice.

Keywords: renewable energy sources; photovoltaics; battery; accumulator; hydrogen; fuel cells; supercapacitors; pumped-storage power plant; flywheel

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce a metodika	2
2.1	Cíl práce.....	2
2.2	Metodika	2
3	Získávání solární energie	3
3.1	Fotovoltaické články.....	4
3.2	Konstrukce PV systémů.....	6
3.3	Montážní provedení PV systémů.....	6
4	Akumulace elektrické energie z PV systémů	8
4.1	Elektrochemické akumulátory	8
4.1.1	Olověný akumulátor	9
4.1.2	Alkalické akumulátory	12
4.1.3	Lithiové akumulátory	14
4.1.4	Průtokové baterie.....	16
4.1.5	Na-S baterie	18
4.2	Superkondenzátory	19
4.2.1	Elektrické dvouvrstvé kondenzátory	20
4.2.2	Pseudokondenzátory.....	21
4.3	Supravodivé indukční akumulátory.....	21
4.4	Setrvačníky	23
4.4.1	Druhy setrvačnicků	24
4.5	Přečerpávací vodní elektrárny	25
4.5.1	Rozdělení přečerpávacích elektráren.....	26
4.5.2	Vlastnosti přečerpávacích elektráren.....	27
4.6	Stlačený vzduch - CAES.....	28
4.7	Tepelná akumulace (TES).....	29
4.8	Vodíkové hospodářství	30
4.8.1	Výroba vodíku	31
4.8.2	Palivové články	32
5	Porovnání dostupných technologií.....	35
6	Závěr práce	38

7	Seznam literatury	40
8	Seznam obrázků	47
9	Seznam tabulek	48
10	Seznam použitých veličin	49

1 Úvod

Obnovitelné zdroje budou v budoucnosti zaujímat stále větší část v oblasti získávání elektrické energie. Jednak z důvodu omezenosti neobnovitelných zdrojů, tak i z důvodu stále většího tlaku Evropské unie na snižování uhlíkové stopy.

PV systémy jako obnovitelný zdroj elektrické energie mají velkou nevýhodu a to, že zauímají obrovskou plochu v porovnání například s jadernými elektrárnami pro stejný výkon. Další nevýhodou je závislost na počasí (toto platí například i pro větrné elektrárny). Do jisté míry se dá plánovat kolik daný systém vyrobí energie. Nicméně v průběhu dne může dojít k neočekávaným okolnostem, zapříčiněným vlivem počasí, způsobující nedostatek vyráběné energie, který je nutný kompenzovat jinými zdroji. Druhý extrém, který může nastat, je nadbytek elektrické energie a ten je nutné akumulovat. Z tohoto důvodu je důležité zkoumání akumulačních technologií a jejich vývoj.

Tato práce v první řadě stručně seznámí s problematikou získávání energie ze slunečního záření, druhů fotovoltaických panelů a s možnými konstrukcemi PV systémů. Dále uvádí možnosti montážních provedení PV systémů, které dělíme na pevné a pohyblivé. Pozornost je věnována elektrochemickým akumulátorům. Oproti známým olověným, Ni-Cd, Ni-MH a lithiovým akumulátorům se část zaměřuje také na technologii průtokových baterií a akumulátorům využívající tekutý sodík a síru. V neposlední řadě se část práce zabývá vodíkovým hospodářstvím. Vyrobená energie z PV systémů může být použita pro výrobu vodíku. Je popsáno základní rozdělení způsobů získávání vodíku. Následně se část práce zaměřuje na problematiku zpětného využívání vodíku v palivových článcích pro získání elektrické energie.

V práci jsou porovnány dostupné technologie a jejich zařazení do technické praxe. Zvláštní pozornost u jednotlivých technologií je věnována fyzikálním principům a jejich vlastnostem (zejména životnosti, účinnosti a hustoty energie).

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je vytvoření rešerše technologií využívaných pro akumulaci elektrické energie v ostrovních PV systémech. Diskuse možností akumulace a vlastní závěry ohledně začlenění obnovitelných zdrojů energie do energetického mixu.

2.2 Metodika

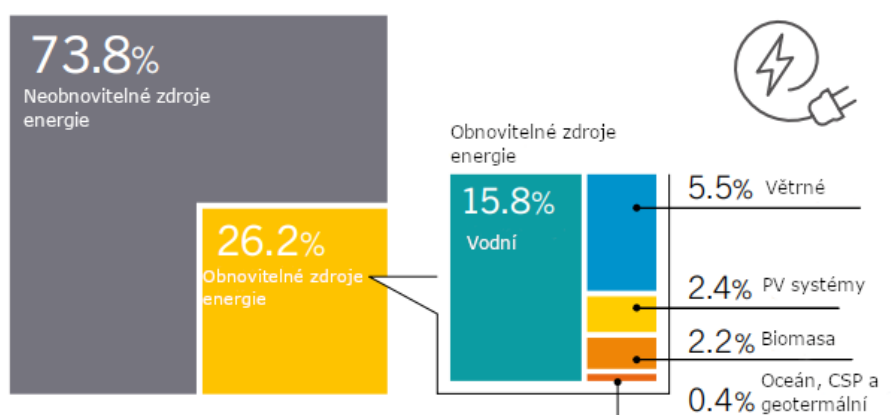
Tato bakalářská práce je zpracovaná jako rešerše vybraných druhů akumulace elektrické energie vhodné pro kombinaci s PV systémy. Získané informace jsou především z knižní literatury, odborných časopisů a internetových článků registrovaných ve vědeckých databázích ScienceDirect.com a Web of Science.

Práce se skládá ze 3 větších celků. První část uvádí základní informace o získávání elektrické energie ze slunečního záření. Druhá část se věnuje akumulaci získané energie. Tato část je zaměřena zejména na fyzikální podstaty akumulace a pozornost je věnována několika vybraným parametrům, a to zejména účinnosti, životnosti, ceně a hustotě energie. Veškeré informace o cenách akumulačních zdrojů získané z cizojazyčných zdrojů jsou převáděny dle kurzu ČNB (k datu 22.02.2021) a následně zaokrouhleny na celé koruny. Poslední část se věnuje porovnání dostupných technologií pro akumulaci elektrické energie. Zejména porovnání podstatných parametrů a následné zhodnocení jejich předností a nedostatků v technické praxi.

3 Získávání solární energie

Sluneční záření obsahuje velké množství energie, kterou je možné využívat i k výrobě elektrické energie. Pro tuto transformaci se využívají solární články zapojované do solárních panelů, z kterých se skládají solární elektrárny. Elektrická energie ze slunečního záření vykazuje rostoucí zastoupení v celkové oblasti získávání energie. Za tento vzrůst může jednak stále větší inovace v oblasti fotovoltaiky, ale zároveň stále větší důraz na životní prostředí a využívání obnovitelných zdrojů. Z celosvětové produkce elektrické energie se odhaduje, že zhruba 2,4 % pochází z PV systému. Celkově obnovitelné zdroje zastupují zhruba 26,2 % z celkové produkce elektrické energie viz obrázek 1 [1]. V České republice připadá na výrobu elektřiny fotovoltaikou zhruba 2,62 %. Toto odpovídá 2 285,9 GWh vyrobených fotovoltaikou z celkových 86 988,7 GWh elektrické energie (údaj k roku 2019) [2].

Obrázek 1 - Podíl obnovitelných zdrojů na celosvětové výrobě elektrické energie ke konci roku 2018

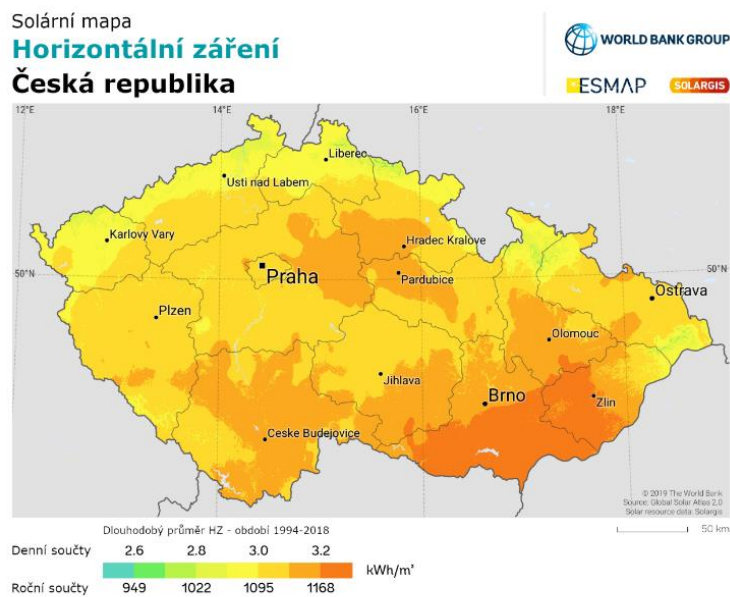


Zdroj: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf (upraveno autorem BP)

Limitujícími faktory fotovoltaiky je omezená životnost solárních panelů pohybující se kolem 20 – 30 let. Nízká účinnost solárních panelů dosahuje v laboratorních podmínkách lehce nad 30 %. V neposlední řadě množství vyrobené energie velmi závisí na intenzitě slunečního záření, které je velmi rozdílné v různých geografických polohách. Množství získatelné energie je popisováno tzv. solárními mapami (viz obrázek 2). Tyto mapy zobrazují průměrné hodnoty solární energie dopadající na plochu 1 m² pod určitým úhlem v jednotkách kWh·m⁻²·rok⁻¹. Z toho důvodu, že slunce v průběhu dne prostupuje přes oblohu, mění se velikost užitečné plochy solárního panelu. V takovém případě je vhodné použít systémy sledující pohyb slunce

pro zvýšení účinnosti [3]. Množství získané energie může kolísat v jednotlivých dnech na základě měnícího se počasí, oblačnosti, teplot apod. V neposlední řadě je nutné zmínit, že solární elektrárny jsou schopné převážné množství energie dodávat přes den. Proto je nutné vytvářet systémy, které jsou dostatečně výkonné a s dostatečnou možností akumulace nebo jinak schopné vypořádat se s nedostatkem elektrické energie v průběhu noci.

Obrázek 2 - Solární mapa České republiky za období 1994-2018



Zdroj: <https://globalsolaratlas.info/download/czech-republic> (upraveno autorem BP)

Zdá se, že z hlediska intenzity dopadajícího slunečního záření by bylo vhodné stavět solární elektrárny v rovníkových oblastech (dopadá zde 2x více sluneční energie v porovnání s Českou republikou [4]). Bohužel vysoká teplota v těchto oblastech má negativní vliv na účinnost solárních panelů, zároveň velmi často prašné prostředí s sebou nese riziko znečištění panelu a snížení celkové účinnosti. Proto mezi nejlepší oblast pro výstavbu solární elektrárny je oblast Tibetu, kde je nízká vlhkost vzduchu a rovněž nízká průměrná teplota při vysoké jasnosti [3].

3.1 Fotovoltaické články

Komerčně nejčastěji využívané fotovoltaické články jsou na bázi křemíku s napětím při zatížení 0,5 V a lze je rozdělit na monokrystalické, polykrystalické a amorfni. Pro výrobu

solárních panelů se jednotlivé články zapojují do série po 36 nebo 72 kusech s napětím naprázdno 18 V nebo 36 V [5].

Monokrystalické články se vyrábějí tažením zárodku krystalu z taveniny velmi čistého křemíku tzv. Czochralskiho metodou. Tento křemíkový monokrystal je následně rozřezán na tenké plátky a tyto se využívají dále pro výrobu solárního článku. Jedná se o poměrně energeticky i technologicky náročný proces, proto monokrystalické články bývají dražší než polykrystalické. Nižší cena u polykrystalických článků je dána poměrně jednoduchou výrobou. Výroba probíhá odléváním čistého křemíku do čtvercových nebo obdélníkových forem, což s sebou přináší úsporu použitého materiálu. Chladnutí materiálu způsobuje větší odpor na hranici krystalických zrn. Polykrystalické panely mají zejména nižší účinnost a nižší maximální proud. Poslední skupinou jsou fotovoltaické články vyráběné rozkladem sloučenin křemíku (nejčastěji silanu) v ochranné atmosféře vodíku. Takto získaný křemík je nanášen například na skleněné, plastové nebo polyamidové podložky. Oproti předchozím způsobům má takto nanesený křemík nepravidelnou strukturu a trpí nestabilitou způsobenou přítomností vodíku. Tyto faktory mají za následek, že časem dochází k poklesu výkonu a celkově nižší účinnosti fotovoltaických článků [5].

Účinnost v závislosti na druhu použitých fotovoltaických článků je zobrazena v tabulce 1.

Tabulka 1 - Účinnost křemíkových článků dle typu

Typ článku	Účinnost při sériové výrobě [%]	Účinnost laboratorních vzorků [%]
Monokrystalické [6]	20	30
Polykrystalické [5]	16	20
Amorfni [5]	7	13

Mimo komerčně využívané křemíkové fotovoltaické články se používají i články například na bázi GaAs, InP. Tyto články dosahují účinnosti kolem 25 % v případě sériové výroby. Tento fakt s sebou nese vyšší pořizovací cenu. Z těchto důvodů se nejčastěji využívají v oblasti kosmických aplikací. Toto náročné prostředí s sebou přináší jiná rizika, jako například odolnost vůči kosmickému záření [6].

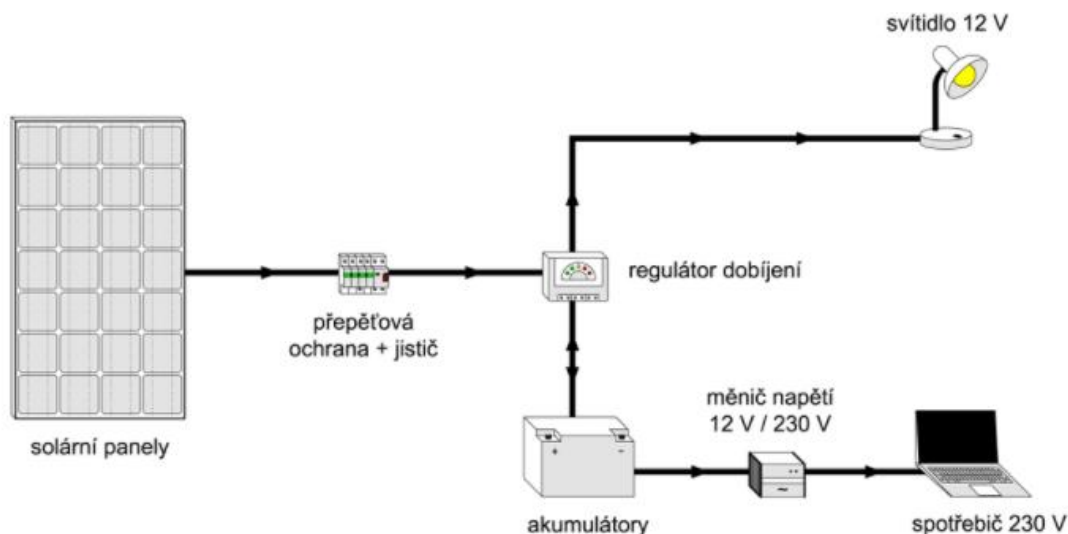
Snaha eliminovat velké množství energie a tím i CO₂ při výrobě křemíkových článků vede ke snaze využívat jiné druhy materiálů. Mezi tyto materiály patří například perovskit, jehož

výhodou je zejména flexibilita a levnější výroba. Nevýhodou perovskitu je poměrně obtížné zpracování oproti křemíkovým článkům. V současné době je aplikován způsob plazmatického nanášení, čímž je možné nanášet perovskit rychlostí až 12 metrů za minutu s předpokládanou cenou 5 Kč za 0,09 m² (v porovnání 53 Kč za 0,09 m²) [7].

3.2 Konstrukce PV systémů

PV systémy mohou být konstruovány dvěma odlišnými způsoby, a to buď sítové anebo ostrovní. Sítový systém je připojen na veřejnou rozvodnou síť, tudíž v případě nedostatku energie může potřebou energii čerpat ze sítě. Při přebytku elektrické energie je tato energie dodávána do veřejné sítě. Oproti tomu ostrovní systémy (viz obrázek 3) jsou závislé pouze na vyrobené energii a její akumulaci, která následně musí vystačit na provoz. Proto je nezbytně nutné při návrzích PV systémů více dbát na pokrytí veškerých odběrů. Ostrovní systém může napájet pouze jeden spotřebič, ale zároveň i větší oblast [3].

Obrázek 3 - Schéma ostrovního PV systému



Zdroj: <https://www.solarniexpert.cz/jak-funguje-ostrovní-off-grid-fotovoltaický-systém/>

3.3 Montážní provedení PV systémů

Solární panely jsou montovány jako pevné konstrukce či pohyblivé konstrukce. Pevné konstrukce mohou být umístěny na střechy či fasády domů. Dále se nabízí možnost pevné konstrukce a její umístění například na pozemek. Celá konstrukce se orientuje tak, aby sluneční

záření dopadalo v poledne kolmo na účinnou plochu panelu. Nevýhodou této konstrukce je, že během dne, kdy se slunce pohybuje po obloze, nemá dopadající záření na panel nulový úhel a tímto se snižuje množství vyráběné energie. Pohyblivé konstrukce jsou schopny sledovat slunce po obloze a tím dosáhnout kolmého dopadu slunečního záření na solární panel. Tyto pohyblivé systémy umožňují navýšení množství vyrobené energie až o 40 % a v České republice až o 30 % [3].

4 Akumulace elektrické energie z PV systémů

4.1 Elektrochemické akumulátory

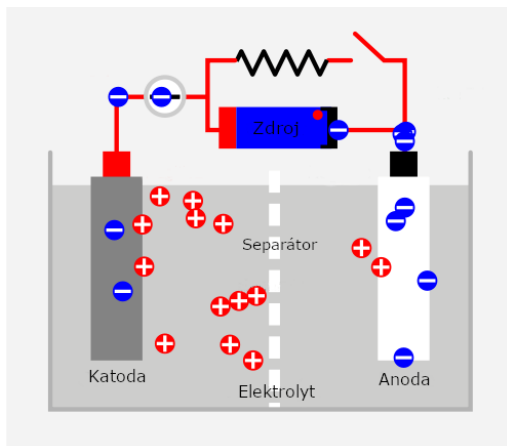
Elektrochemické akumulátory se skládají z tzv. sekundárních článků. Tyto články jsou schopné převádět reakční produkty zpět na původní reaktanty pomocí elektrického proudu, v takovém případě se jedná o znovu nabíjecí články [8]. Napětí sekundárních článku je nejčastěji 1,2 – 3,7 V [8], což znamená, že sériovým zapojením těchto článků vznikne baterie o požadovaném napětí akumulátoru.

Nejdůležitější části elektrochemického akumulátoru:

- Elektrody
 - Záporná elektroda
 - Kladná elektroda
- Elektrolyt
- Separátor

Záporná elektroda se stává anodou během procesu nabíjení a katodou během procesu vybíjení. Pokud bychom se podívali na proces vybíjení, tak zde reaktant oxiduje a během toho uvolňuje elektrony. Kladná elektroda se stává během procesu nabíjení katodou a během procesu vybíjení anodou. Během procesu vybíjení přijímá uvolněné elektrony a reaktant se redukuje [6]. Elektrolyt slouží v akumulátoru k přenosu elektrického proudu. Obsahuje pohyblivé ionty s kladným i záporným nábojem. Dle druhu akumulátoru se může nacházet jak ve formě kapalné, tak ve formě tuhé. Poslední a neméně důležitou částí je separátor, jehož hlavní funkcí je zajistit izolaci mezi elektrodami rozdílné polarity a zároveň musí být schopný propouštět ionty [8]. Schematicky je elektrochemický akumulátor zobrazen na obrázku 4.

Obrázek 4 - Obecné schéma elektrochemického akumulátoru



Zdroj: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry (upraveno autorem BP)

Různá kombinace použitých chemických látek pro výrobu elektrod a elektrolytu určují druh výsledný elektrochemického akumulátoru. Zároveň použití různých látek pro výrobu ovlivňuje výsledné vlastnosti akumulátorů, jeho vhodnou aplikaci a zároveň jeho životnost udávanou v počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů.

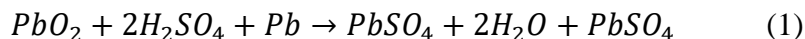
4.1.1 Olověný akumulátor

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších elektrochemických zdrojů, vyrábějící se o kapacitách až do 10 000 Ah. Toto je způsobené dobře zvládnutou technologií výroby, širokou oblastí použití a dlouhou dobou používání [8].

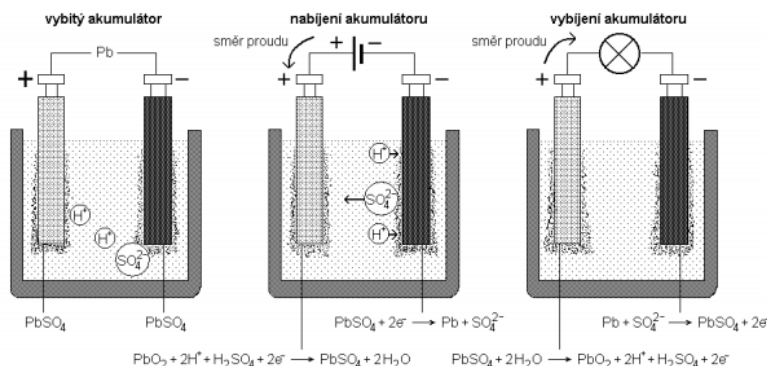
4.1.1.1 Princip olověného akumulátoru

Základním principem olověné baterie je reakce mezi olověnými elektrodami ponořenými v elektrolytu. Elektrolytem je nejčastěji zředěná kyselina sírová (H_2SO_4). Při procesu nabíjení vzniká kyselina sírová, což způsobuje houstnutí elektrolytu (zvyšuje se jeho hustota). Na katodě vzniká oxid olovičitý (PbO_2), zároveň se na anodě usazuje čisté olovo. Při opačném procesu (vybíjení) se spotřebovává kyselina sírová (klesá hustota elektrolytu) a na obou elektrodách vzniká síran olovnatý (PbSO_4) [8]. Jednotlivé procesy akumulátoru jsou zřetelně znázorněny na obrázku 5.

Celkovou chemickou reakci olověného akumulátoru lze vyjádřit chemickou rovnicí (1): směr zleva doprava probíhá proces vybíjení a při opačném směru nabíjení [6].



Obrázek 5 - Schéma olovněného akumulátoru



Zdroj: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>

4.1.1.2 Konstrukce olovných akumulátorů

Velmi podstatnou věcí je fakt, že kladné elektrody jsou více chemicky namáhány než záporné elektrody. Z tohoto důvodu jsou limitujícím prvkem v životnosti akumulátorů. Způsoby konstrukce a složení elektrod ovlivňují životnost akumulátoru. Elektrody mohou být odlévány z velmi čistého olova (99,99 %). Prováděním žebrování se zvýší celková aktivní plocha elektrod až 10krát. Vzhledem k tomu, že čisté olovo je velmi měkké, se v některých případech přidává menší množství legujících prvků, které zvyšují mechanickou pevnost a zlepšují elektrické vlastnosti. Mezi tyto legující prvky patří například vápník, antimon, selen a cín. Každý z legujících prvků má vliv na výsledné vlastnosti akumulátoru [8].

4.1.1.3 Druhy olovných akumulátorů

Olovněné akumulátory rozdělujeme do několika skupin dle formy použitého elektrolytu [8]:

- Akumulátory se zaplavenými elektrodami
- Akumulátory VRLA
 - Akumulátory AGM
 - Akumulátory gelové

Akumulátor se zaplavenými elektrodami je charakteristický elektrolytem v kapalné formě, do něhož musí být celé elektrody ponořené, jinak by docházelo k poškození akumulátoru.

Nevýhodou těchto akumulátorů je, že v případě nepoužívání trpí samovybíjením a tím se mohou nenávratně poškodit vznikáním krystalů síranu olovnatého [8].

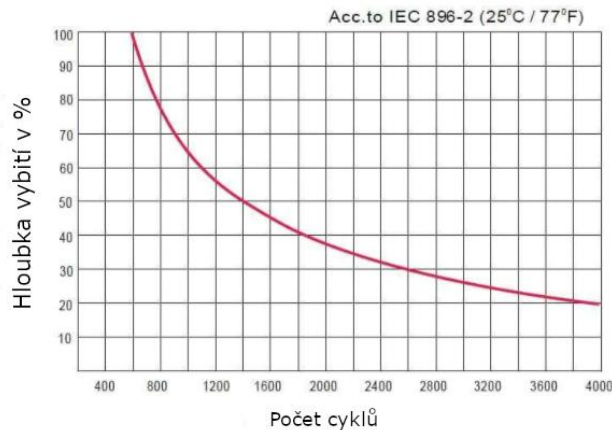
Akumulátory VRLA jsou známé jako takzvané rekombinační. Dále je rozdělujeme na akumulátory AGM, kdy je elektrolyt nasáknutý v separátoru ze skleněných mikrovláken. Mezi jeho přednosti patří možnost zatěžování velkými proudy. Druhou skupinou rekombinačních akumulátorů jsou tzv. akumulátory gelové. V těchto akumulátorech je elektrolyt v gelové formě (vázan v tixotropním gelu SiO_2). Obě skupiny rekombinačních akumulátorů je možné provozovat v jakékoliv poloze. Vyznačují se větší životností než akumulátory se zaplavenými elektrodami [8].

4.1.1.4 Vlastnosti olověných akumulátorů

Účinnost olovněného akumulátoru se pohybuje mezi 65 až 85 %, přičemž je ovlivněna různými faktory jako je např. okolní teplota a velikost vybíjecího proudu. Tyto faktory mohou mít i negativní vliv na celkovou životnost baterie. Se vzrůstající teplotou lehce roste kapacita baterie, ale zároveň se zkracuje její životnost, a to velmi výrazně. Naopak nízká teplota razantně snižuje kapacitu akumulátoru a neumožňuje jeho úplné nabití. Při velkém zatěžování akumulátoru více vzniká síran olovnatý (PbSO_4), který zanáší elektrody a zamezuje využití celé plochy elektrod. Následkem je velké snížení kapacity akumulátoru, v extrémních případech by mohlo dojít až ke zkratování elektrod a následně úplnému zničení akumulátoru [8].

Životnost akumulátoru je nejvíce ovlivněna hloubkou vybití, čím větší je úroveň vybití, tím kratší bude životnost akumulátoru. Obvykle se životnost pohybuje kolem 200 – 1 000 cyklů při 100 % vybití [9]. U speciálních gelových akumulátorů používaných pro akumulaci energie z PV systému se dostaneme i na tisíce nabíjecích/vybíjecích cyklů viz obrázek 6.

Obrázek 6 - Životnost gelové baterie vyjádřená hloubkou vybití v závislosti na počtu cyklů



Zdroj: <https://www.canbat.com/guide-agm-batteries-gel-batteries/> (upraveno autorem BP)

Standartní olověné akumulátory dosahují objemové energetické hustoty pohybující se kolem 80 – 90 Wh/dm³ a hmotnostní hustoty energie 35 – 40 W/kg [10]. Existuje i druh olověného akumulátoru dosahující hodnot až 120 – 130 Wh/dm³ a 55 – 60 Wh/kg [10]. Mají nízké pořizovací náklady 3 209 – 4 279 Kč/kWh [10] a tento druh akumulátoru je snadno dostupný. Mezi nevýhody patří zejména citlivost na vysoké a nízké teploty, neschopnost odolávat hlubokému vybíjení. Hluboké vybíjení může vést k nevratné sulfataci¹, což může způsobit trhání elektrod [8].

4.1.2 Alkalické akumulátory

Tato skupina akumulátorů se vyznačuje použitím alkalických kovů pro výrobu elektrolytu, a to nejčastěji hydroxidu draselného (KOH). Dle použitého materiálu na výrobu elektrod můžeme alkalické akumulátory dále rozdělit na nikl-kadmiové (Ni-Cd), nikl-metal hydridové (Ni-MH), stříbro-zinkové (Ag-Zn) a další [8].

4.1.2.1 Nikl-kadmiový akumulátor (Ni-Cd)

Aktivním materiálem elektrod akumulátoru, jehož elektrolytem je nejčastěji hydroxid draselný (KOH), je v případě kladné elektrody hydroxid nikelnatý a záporné elektrody hydroxid kademnatý [11].

¹ Nevratná sulfatace – vznikají velké krystaly síranu olovnatého, které nelze odstranit nabíjením, protože jsou elektricky nevodivé [8].

Chemická reakce probíhající v akumulátoru je popsána následující rovnicí (2) [11].



Reakce probíhající zleva doprava představuje nabíjení, v jehož průběhu se na kladné elektrodě hydroxid nikelnatý mění na nikloxihydroxid a hydroxid kademnatý na kadmium. V případě přebíjení začíná docházet k rozkladu elektrolytu. Během tohoto procesu vzniká na záporné elektrodě vodík a na kladné elektrodě kyslík [11]. Při obráceném směru reakce je akumulátor vybíjen.

Účinnost je v rozmezí mezi 70 % až 85 % [12]. Životnost se pohybuje do 1 500 cyklů vybití a nabití při 100 % vybití celkové kapacity akumulátoru [9]. Objemová energetická hustota je kolem hodnot 150 Wh/dm³, přičemž hmotnostní hustota energie se pohybuje v intervalu 50 – 70 Wh/kg s pořizovacími náklady dosahující 21 394 Kč/kWh [13].

Ni-Cd akumulátory jsou schopné dodávat vysoké proudy (5 - 10 násobek jmenovité kapacity), špičkový proud po dobu 0,3 sekundy do hodnot až 130 násobku jmenovité kapacity akumulátoru. Mezi jejich výhody dále patří zejména vysoká spolehlivost, mechanická a klimatická odolnost (rozsah pracovních teplot v rozmezí -40 až + 60 °C). Tyto výhody nacházejí uplatnění zejména v oblasti zdravotnického, vojenského a kosmického průmyslu [11]. Jejich nevýhody představují nižší jmenovité napětí článků 1,2 V [8] oproti olověným akumulátorům. Další nevýhodou je náročnější recyklace karcinogenního kadmia [8]. V neposlední řadě NiCd akumulátory trpí paměťovým efektem².

4.1.2.2 Nikl-metal hydridový akumulátor (Ni-MH)

Vývoj byl uskutečněn z důvodu nahrazení nikl-kadmiových baterií obsahující karcinogenní kadmium. Uplatnění našel převážně při rozvoji mobilních telefonů, dále pak v hobby akumulátorovém nářadí. [11].

Elektrolytem těchto akumulátorů je nejčastěji hydroxid draselný. Kladná elektroda má stejné aktivní složky jako Ni-Cd akumulátory a záporná elektroda obsahuje aktivní látku se

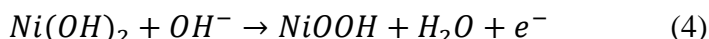
² Paměťový efekt - opakované vybíjení na stejnou úroveň kapacity s následkem změny krystalové struktury záporné elektrody. Vyskytující se pouze u akumulátorů s kadmiovou zápornou elektrodou [11].

schopností uvolňovat vodík [11]. Mezi tyto látky patří nejčastěji nikl, kobalt a kovy vzácných zemin (zejména cer, neodym, lanthan a praseodym) [14].

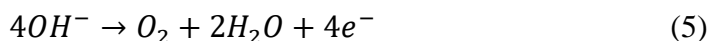
Chemické reakce probíhající v Ni-MH akumulátoru jsou popsány rovnicemi [11]: Na záporné elektrodě probíhá chemická reakce, při které se uvolňuje vodík (3)



na kladné elektrodě probíhá chemická reakce (4)



během přebíjení probíhá chemická reakce uvolňující kyslík na kladné elektrodě (5)



Chemické reakce (3) a (4) probíhající zleva doprava popisují jev nabíjení a v případě obráceného směru popisují jev vybíjení.

Účinnost baterie se pohybuje až do 92 %, a je ovlivněna zejména úrovní nabití a vybíjecím proudem [15]. Životnost se pohybuje v intervalu 180 – 2 000 cyklů při úplném vybíjení [9]. Baterie mají objemovou energetickou hustotu 170 – 420 Wh/dm³ a hmotnostní energetickou hustotu 70 – 100 Wh/kg [13], přičemž jejich pořizovací náklady se pohybují od 19 255 do 74 879 Kč/kWh [9].

Výhodou Ni-MH akumulátorů je zejména větší kapacita při stejné velikosti v porovnání s Ni-Cd akumulátory. Zároveň bylo nahrazeno škodlivé kadmium, což s sebou přináší menší zátěž pro životní prostředí. Nevýhody představuje hlavně větší vnitřní impedance, proto nejsou vhodné pro systémy s extrémně vysokými vybíjecími proudy. Jejich samovybíjení je větší než u Ni-Cd akumulátorů [11].

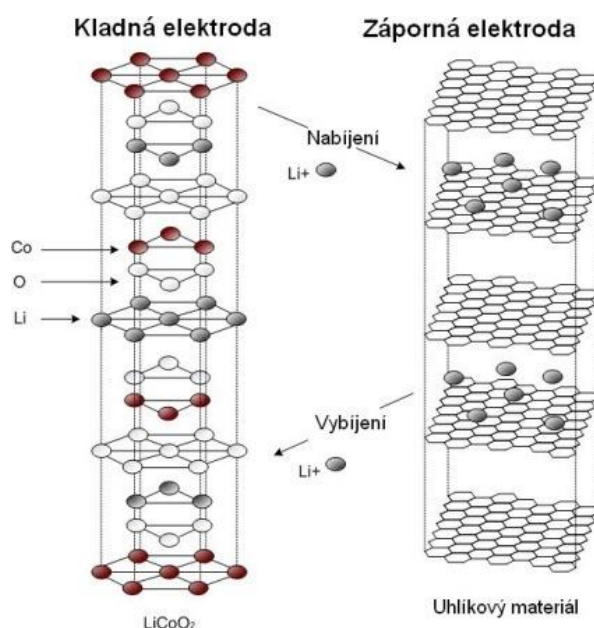
4.1.3 Lithiové akumulátory

Většinu dříve používaných akumulátorů typu Ni-Cd a NI-MH nahrazují akumulátory lithiové. Kapacita těchto akumulátorů se pohybuje řádově mezi mAh až stovky Ah.

4.1.3.1 Princip lithiových akumulátorů

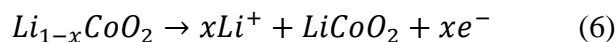
Elektrolyt je nejčastěji bezvodný a jedná se například o LiPF_6 sůl rozpuštěnou v organickém rozpouštědle [16]. Pro zápornou elektrodu se používají uhlíkové materiály nebo $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Prvním nejvíce rozšířeným materiálem pro výrobu kladné elektrody byl LiCoO_2 , dalšími materiály vhodnými pro výrobu jsou například LiMn_2O_4 nebo LiNiO_2 [17]. Během procesu vybíjení a nabíjení dochází k přechodu iontů lithia Li^+ mezi kladnou a zápornou elektrodou a naopak. Princip je schematicky zobrazen na obrázku 7.

Obrázek 7 - Schéma lithiového akumulátoru Li-on

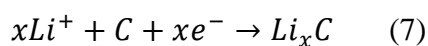


Zdroj: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/13612-lithiove-akumulatory>

Chemický proces probíhající na kladné elektrodě dle rovnice (6) ve směru zleva doprava proces vybíjení v opačném případě proces nabíjení [8].



Reakce probíhající na záporné elektrodě viz rovnice (7) ve směru zleva doprava proces vybíjení v opačném případě proces nabíjení [8].



4.1.3.2 Vlastnosti lithiových akumulátorů

Výhodou těchto akumulátorů je větší napětí na 1 článek baterie. V případě lithium-iontových baterií se hodnota napětí pohybuje kolem 3,7 V/článek [17]. To představuje potřebu menšího počtu článků v sérii na výslednou hodnotu napětí akumulátoru.

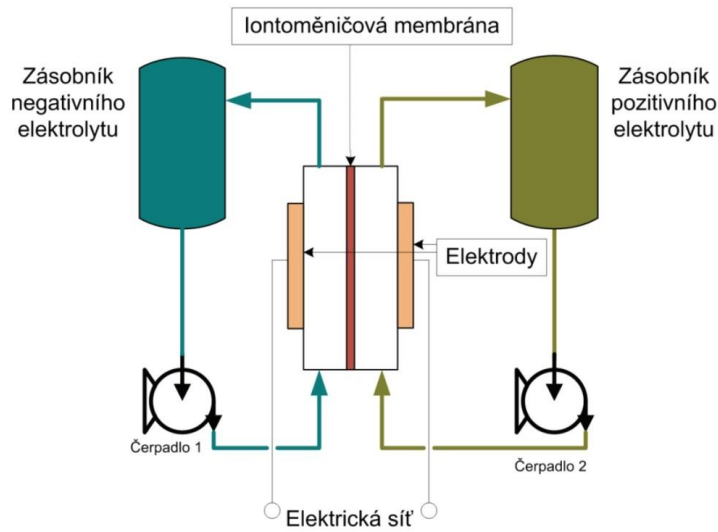
Mezi hlavní nevýhody patří reakce lithia na vzduchu (zejména s vlhkostí). Je třeba dbát zvýšené opatrnosti v případě práce s lithiovými akumulátory, zejména aby nedošlo k poškození pláště. Při protržení pláště dochází k rychlé přeměně energie na teplo a vzniku požáru.

Účinnost lithiových baterií je větší než 95 %, přičemž hmotnostní hustota energie se pohybuje kolem hodnoty 200 Wh/kg [18]. Objemová energetická hustota v případě LiCoO_2 se pohybuje v hodnotách 600 Wh/dm³ [19]. Vysoká životnost se pohybuje v rozmezí 1 000–10 000 cyklů při vybití 100% celkové kapacity [9]. Při porovnání s předcházejícími druhy akumulátorů vychází lithiové velmi dobře a dokážou pojmout velké množství energie při malé vlastní hmotnosti a velikosti. Dobré energetické vlastnosti akumulátorů jsou bohužel vykoupeny vysokou pořizovací cenou 25 673 CZK/kWh [18].

4.1.4 Průtokové baterie

Pracují na stejném principu jako konvenční elektrochemické akumulátory, avšak liší se zejména konstrukcí viz obrázek 8. Energie je akumulována v roztocích elektrolytu rozdělených membránou průchozí pro ionty. Elektrolyt je uložen v externích nádržích, z nichž je pak čerpán čerpadly do článků reaktoru. Zde dochází k přeměně chemické energie na elektrickou. Známé druhy průtokových baterií jsou vanadium redoxní (VBR), zinko-bromidová a polysulfidová bromová [20].

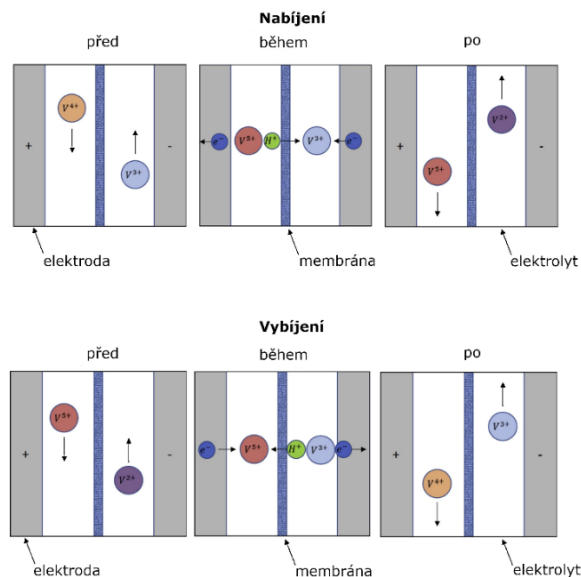
Obrázek 8 - Schéma průtokové baterie



Zdroj: <https://oenergetice.cz/domains/oenergetice.cz/wp-content/uploads/2015/03/Bez-n%C3%A1zvu1.jpg>

V případě průtokových baterií typu VBR se používají elektrolyty stejného druhu, čímž se redukuje ztráta kapacity v případě křížové kontaminace elektrolytů. Jako elektrolyty se nejčastěji využívají V_2O_5 a $VOSO_4$ generující napětí 1,26 V. Experimentovalo se i s chloridem vanaditým (VCl_3), ale byl vyloučen z důvodu vznikání plynného chlóru [21]. Princip baterie je znázorněn na obrázku 9.

Obrázek 9 - Průběh procesu vybíjení a nabíjení průtokové baterie VBR



Zdroj: https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2352152X19302798-gr2_lrg.jpg (upraveno autorem BP)

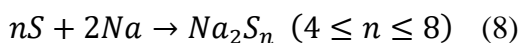
Jedním z kritických součástí průtokových baterií je membrána. Velmi ovlivňuje účinnost a životnost průtokové baterie. Jak již bylo zmíněno, její hlavní funkcí je vodivost (iontů) a zároveň chemická stabilita. Vše závisí na tloušťce membrány a velikosti jejich pórů. S menší tloušťkou membrány klesá odpor pro ionty a usnadňuje se jejich průchod, zároveň ale klesá mechanická pevnost, což může mít za následek protržení [21].

4.1.4.1 Vlastnosti průtokových baterií

Hlavními výhodami je velmi vysoká životnost (VBR až 12 000 [9]) oproti jiným druhům baterií, způsobená zejména tím, že elektrolyt nepodléhá degradačním procesům. Elektrody chemicky nereagují během nabíjení a vybíjení. Současně je možné v případě problému jednotlivé komponenty vyměnit již během životnosti a tím tuto životnost prodloužit. Vzhledem k tomu, že je energie uložena v elektrolytu, tak se kapacita těchto baterií dá rozšířit zvětšením těchto nádrží. Zároveň je samovybíjení velmi nízké, a to z důvodu skladování kladného a záporného elektrolytu zvlášť. Proto nedochází k chemickým reakcím v době, kdy nemá. Mezi nevýhody patří zejména nízká hmotnostní hustota energie pohybující se kolem hodnot 15 – 25 Wh/kg a objemová hustota energie 20 – 33 Wh/dm³ [21]. Další nevýhodou je nutnost většího prostoru pro nádrže elektrolytu. Nehodí se příliš pro malé aplikace a uplatnění najde zejména u větších stacionárních systémů. Účinnost se pohybuje kolem 70 – 85 % dle druhu použité technologie [22][23]. Náklady se pohybují průměrně kolem 12 121 Kč/kWh [24].

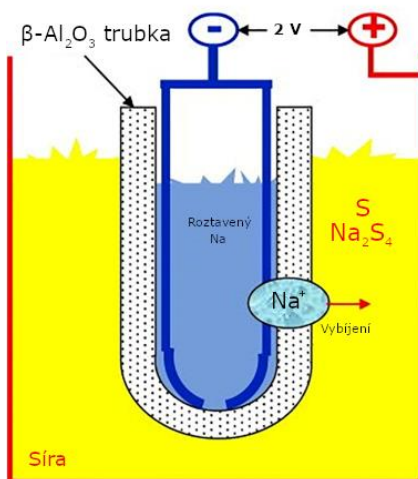
4.1.5 Na-S baterie

Baterie pod označením Na-S pracují na principu elektrochemické reakce mezi tekutým sodíkem a sírou. Jsou provozovány při teplotách 300 – 350 °C. Stejně jako konvenční baterie se skládá z anody, katody, elektrolytu a separátoru. Negativní elektrodu zde představuje tekutý sodík a pozitivní elektrodou je zde tekutá síra. Elektrolytem jsou materiály na bázi keramiky v pevném skupenství. Nejčastěji se používá β -oxid hlinitý (β -Al₂O₃). Elektrolyt funguje jako membrána mezi katodou a anodou. Propouští během vybíjení Na⁺ vznikající na záporné elektrodě, kde poté tyto ionty reagují na kladné elektrodě a vzniká Na₂S_n viz chemická reakce (8). Současně je β -Al₂O₃ špatný vodič elektronů, což značně eliminuje samovybíjení [25].



Na-S články jsou nejčastěji válcovitého tvaru a celý tento článek je uložen v ocelovém pouzdře vyrobeném nejčastěji z chromu nebo molybdenu viz obrázek 10. Vzhledem k tomu, že provoz při vysokých teplotách je náročný, tak se v posledních letech experimentuje s vývojem Na-S baterií schopných pracovat při pokojové teplotě [25].

Obrázek 10 - Schéma sodíkové baterie (Na-S)



Zdroj: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0167273817306501-gr1.jpg> (upraveno autorem BP)

4.1.5.1 Vlastnosti Na-S baterie

Výhodou je, že sodík je snadno dostupný po celém světě a je levnější oproti lithiu pro výrobu lithiových baterií. Účinnost se pohybuje kolem 75 % a životnost dosahuje 4000 cyklů [10]. Na-S baterie pracující při teplotách 350 °C mají hmotnostní hustotou energie 150 – 240 Wh/kg při pořizovací ceně 6 418 – 10 697 Kč/kWh [9]. Oproti tomu baterie pracující při pokojové teplotě nabízí velmi vysokou teoretickou energetickou hustotu dosahující 1230 Wh/kg. Tato hodnota je v současné době pouze teoretická. Zároveň je nutné zmínit, že v případě poškození elektrolytu (pevný β -Al₂O₃) a následnému styku katody a anody může dojít k požáru a v extrémních případech k explozi [25].

4.2 Superkondenzátory

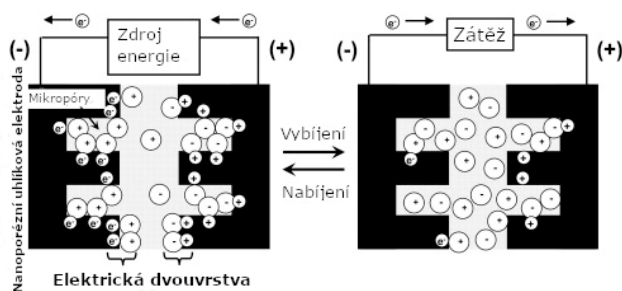
Superkondenzátory nebo-li ultrakapacitory nachází v posledních letech stále větší uplatnění vedle standartních baterií. Hlavním důvodem jsou stále větší kapacity, kterých dosahují (v dnešní době řádově tisíce Farad), velký rozsah provozních teplot (-40 °C až +65 °C),

rychlé nabíjení a velmi vysoké vybíjecí proudy, které jsou schopny dodat (až stovky ampér) [26].

4.2.1 Elektrické dvouvrstvé kondenzátory

Elektrické dvouvrstvé kondenzátory (EDLC) je jedna ze skupin superkondenzátorů skládajících se ze dvou elektrod, separátoru a elektrolytu, nejčastěji propylenkarbonát, dimethyl-karbonát, případně diethyl-karbonát [26]. V případě, že je superkondenzátor nabíjen, tak uvnitř něj dochází k přesunu kationtů obsažených v elektrolytu směrem k negativní elektrodě, přičemž anionty se přesouvají směrem k pozitivní elektrodě. V průběhu tohoto procesu se elektrony přesouvají vnější částí obvodu mezi negativní elektrodou směrem k pozitivní elektrodě. Během procesu vybíjení se tyto ionty přitahují a uvolňují zpět do elektrolytu viz obrázek 11 [27].

Obrázek 11 - Nabíjení a vybíjení superkondenzátoru EDLC



Zdroj: <https://ars.els-cdn.com/content/image> (upraveno autorem BP)

Kapacita kondenzátorů se vypočítá dle rovnice (9). Z této rovnice je patrné, že kapacita kondenzátoru je závislá na ploše elektrod [28]. Z tohoto důvodu se pro výrobu elektrod superkondenzátoru využívají různé druhy porézních uhlíků, například amorfni uhlík. Tento druh uhlíku obsahuje velké množství mikropórů zvyšující účinnou plochu kondenzátoru (velikost mikropórů je menší než 2 nm), přičemž měrná povrchová plocha je větší než $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ [29].

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{D}, \quad (9)$$

kde C kapacita kondenzátoru [F],
 ε_0 permitivita vakua [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$],
 ε_r relativní permitivita [-],

A plocha elektrod [m^2],

D vzdálenost mezi elektrody [m].

Celkovou energii uloženou v kondenzátoru lze popsat rovnicí (10), ze které je patrné, že energie je přímo úměrná celkové kapacitě kondenzátoru [28]. Mezi kladné stránky patří životnost těchto kondenzátorů dosahující bezmála 1 000 000 cyklů. Avšak je vykoupena hmotnostní hustotou energie 3-5 Wh/kg při ceně bezmála 213 940 Kč/kWh a napětí 2,7 V na článek [26]. Účinnost kondenzátoru se pohybuje kolem 95 % a měrnou objemovou energii 7 – 10 Wh/dm³ [28].

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (10)$$

kde E energie kondenzátoru [J],

C kapacita kondenzátoru [F],

U napětí kondenzátoru [V].

4.2.2 Pseudokondenzátory

Druhou skupinou jsou takzvané pseudokondenzátory neboli Faradayův superkondenzátor skládající se také z dvou elektrod a elektrolytu. Pro výrobu elektrod se používají materiály jako například oxid rutheničitý (RuO_2) nebo oxid mangančitý (MnO_2), případně polymery (např. polypyrrol) [27]. Pracují na principu přijímání a vydávání iontů, přičemž probíhá mezi elektrodou a elektrolytem redukčně oxidační chemická reakce, při které si předávají náboj [26].

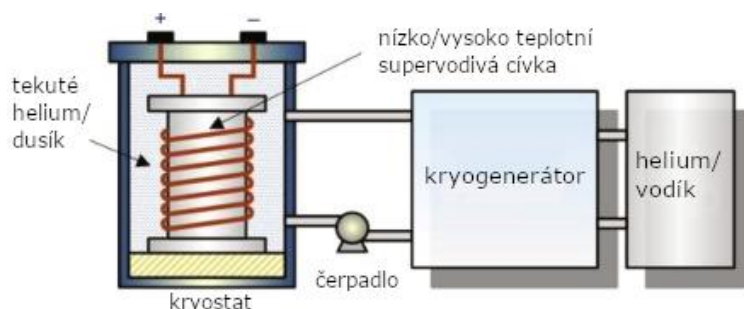
Pseudokondenzátory mají napětí mezi 2,3 – 2,8 V na článek, řádově nižší životnost pohybující se kolem 100 000 cyklů. Tato nižší životnost je způsobena probíhajícími reakcemi degradující materiály pseudokondenzátoru. Dosahují specifické energie 10 Wh·kg⁻¹ při stejné ceně jako EDLC kondenzátory [26].

4.3 Supravodivé indukční akumulátory

Supravodivé indukční akumulátory známe pod zkratkou SMES (z ang. Superconducting Magnetic Energy Storage), které jsou schopny ukládat energii do magnetického pole cívky. Magnetické pole je vytvořeno průchodem stejnosměrného proudu cívkou supravodivého materiálu chlazeného na velmi nízkou teplotu pro dosažení nulového odporu, který by

způsoboval odporové ztráty viz obrázek 12 [30]. Supravodivé cívky jsou obvykle vyrobeny z NbTi s kritickou teplotou kolem 9,2 K [31]. NbTi je nejvíce efektivní, pokud pracuje při teplotě 4,4 K, potom snese proudovou hustotu až do 2000 A/mm² při magnetické indukci 5 T [32].

Obrázek 12 - Schéma supravodivého indukčního akumulátoru



Zdroj: <https://ars.els-cdn.com/content/image/> (upraveno autorem BP)

Jak bylo zmíněno velmi důležitou částí je chlazení pod kritickou teplotu materiálu cívky. Pro chlazení NbTi se používá tekuté hélium s teplotou 4,5 K. V případě supravodivého akumulátoru provozovaného při vyšších teplotách se používá tekutý dusík s teplotou 77 K, který je levnější než zmíněné tekuté hélium [32].

Energie akumulovaná do cívky je popsána rovnicí (11) [33]:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2, \quad (11)$$

kde W energie cívky [J],
 L indukčnost cívky [H],
 I proud protékající cívkou [A].

Systém SMES se používá pro jmenovité výkony mezi 0,1 – 10 MW (s nejčastější kapacitou 10 – 30 kWh [12]), s objemovou energetickou hustotou 0,2 – 5 Wh/dm³ [32] a hmotnostní hustotou energie 0,5 – 5 Wh/kg [24]. Životnost je 20 – 30 let [32] a zvládnou až 100 000 cyklů vybití a nabití [24]. Hlavními výhodami systému SMES je zejména vysoká účinnost pohybující se kolem 90 – 97 %. Mají velmi rychlou odezvu pohybující se řádově mezi desítkami ms, avšak energii jsou schopny dodávat pouze v ms až v jednotkách sekund [32]. Mezi další nevýhody patří zejména potřeba velkého množství energie pro udržení

supravodivých cívek při nízké teplotě. Další nevýhodou jsou vysoké vstupní náklady pohybující se mezi 213 940 – 1 540 368 Kč/kWh [34]. Zároveň trpí poměrně velkým samovybíjením a to zhruba 10 – 15 % za den [31].

Mezi první SMES systémy byla jednotka s kapacitou 30 MJ (8,33 kWh) a výkonem 10 MW umožňující uvolnit 10 MJ během 333 ms. V dnešní době se používají jednotky s kapacitou 3 MJ odpovídající 0,833 kWh využívající se nejčastěji pro stabilizaci výkyvů sítě [12].

4.4 Setrvačníky

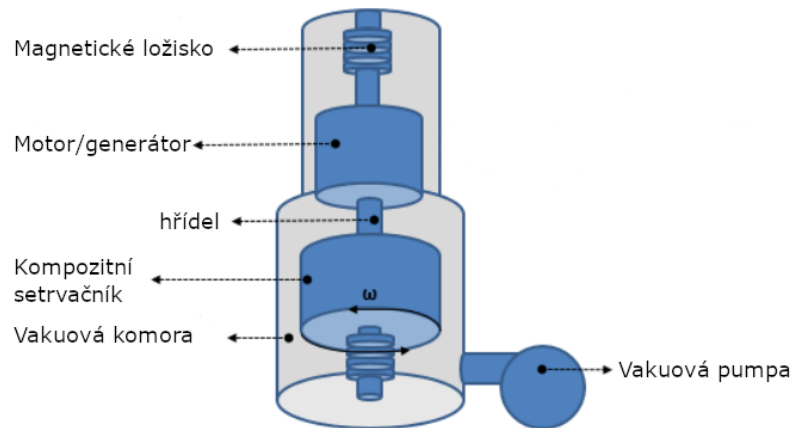
Setrvačnick je stroj sloužící k ukládání mechanické kinetické energie. Tuto energii zachycují jako moment setrvačnosti v rotující hmotě otáčející se i několik desítek tisíc otáček za minutu [30]. Množství uložené energie lze vyjádřit rovnicí (12) [35].

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2, \quad (12)$$

kde E energie setrvačnicku [J],
 I moment setrvačnosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],
 ω úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$].

Setrvačnick je sestava setrvačnickového kola spojeného hřídelí s motorgenerátorem. K zajištění otáčivého pohybu jsou konce hřídele uloženy v ložiskách, a to nejčastěji magnetických. Schéma setrvačnicku je blíže zobrazeno na obrázku 13. Velmi často je prostor setrvačnicku tvořen vakuem, aby došlo k co největšímu snížení tření, které by při vysokých otáčkách mělo velký vliv na účinnost [36]. Motorgenerátor tvoří podstatnou část systému. V případě dostatku energie (nabíjení) funguje jako motor roztáčející setrvačnickové kolo na požadovanou rychlost. V opačném případě při vybíjení je tato hmota brzděna generátorem vyrábějící elektrický proud.

Obrázek 13 - Schéma vysokootáčkového setrvačnicku



Zdroj: <https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-flywheel> (upraveno autorem BP)

Dle rovnice 12 je zřejmé, že množství uložené energie závisí na úhlové rychlosti resp. na otáčkách setrvačnickového kola. Z toho důvodu se vyvíjejí setrvačnický jejichž rychlost je větší než 50 000 ot/min [30].

4.4.1 Druhy setrvačnicků

Setrvačnický rozdělujeme do dvou skupin – nízko rychlostní a vysoko rychlostní. Nízko rychlostní setrvačnický mají rychlost otáčení do 6000 ot/min, přičemž pro jejich konstrukci se používají běžně dostupná ložiska a kolo setrvačnický je vyrobeno z oceli. Naproti tomu u vysoko rychlostních setrvačnicků dosahujících rychlosti otáčení i více než 50 000 ot/min je nutné použít kompozitní materiály pro jejich nízkou hustotu a vysokou pevnost. Je nezbytné použít magnetická ložiska namísto běžně dostupných a vytvoření vakua. Dle rovnice 12 je patrné, že vysokorychlostní setrvačnický budou schopné uschovat větší množství energie, avšak za vyšší cenu použitých materiálů [37].

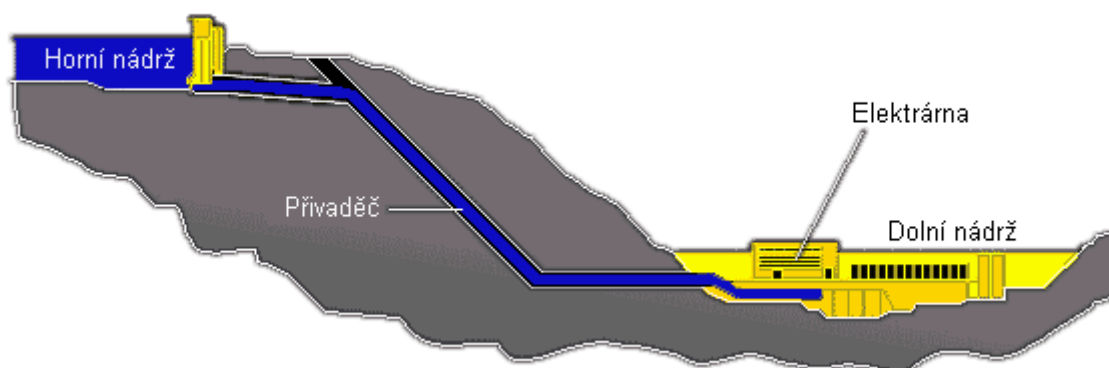
Nízko otáčkový setrvačnický dosahuje hmotnostní hustoty energie cca 5Wh/kg. Vysoko rychlostní setrvačnický dosahují hmotnostní energetické hustoty i přes 100 Wh/kg. Tento nárůst je způsoben jednak vyššími otáčkami, ale zároveň také tím, že kompozitní materiály dosahují podstatně menší hustoty nežli ocel. Toto se promítne do hustoty energie [37]. Zároveň setrvačnický disponují účinností kolem 90 – 95 % s životností 20 000 – 100 000 cyklů. Velkou nevýhodou představuje samovybíjení dosahující 100 % za den (nejčastěji se průměrné

samovybíjení pohybuje kolem 20 % za hodinu [37]), které je způsobeno třením. Pořizovací náklady se průměrně pohybují kolem 124 350 Kč/kWh [24].

4.5 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) jsou jeden z druhů vodních elektráren sloužící k akumulaci energie. Jsou schopny akumulovat velké množství energie řádově jednotky až desítky GWh [38]. Tento druh akumulace je relativně komplikovaný z hlediska výstavby, jelikož je potřeba určité geologické rozložení krajiny. Tato elektrárna se skládá ze dvou nádrží. Jedna nádrž je umístěna výše než druhá nádrž, aby vznikl potřebný spád viz obrázek 14. Jsou spojeny potrubím a u spodní nádrže se nachází strojovna s reverzní turbínou (Francisova turbína), případně provedení Peltonova turbína a čerpadlo [39].

Obrázek 14 - Princip přečerpávací elektrárny



Zdroj: <https://www.senat.cz/doc2html/897604188/index.html>

Fungují na principu využití potenciální gravitační energie vody vznikající spádem. V případě akumulace motorgenerátor pracující v režimu motoru přečerpává vodu ze spodní nádrže do horní nádrže, čímž se vodě udělí potenciální gravitační energie a motor spotřebovává přebytečnou energii v síti. Pokud je nutné uloženou energii získat zpět, pouští se voda z horní nádrže na turbínu, která je spojena s motorgenerátorem pracujícím v režimu generátoru a elektrickou energii dodává zpět do sítě [39].

Výkon dodávaný elektrárnou je popsán rovnicí (13), z níž je patrná závislost výkonu na průtoku Q a spádu H [39].

$$P = Q \cdot H \cdot \eta \cdot g \cdot \rho, \quad (13)$$

kde Q průtok turbínou [m^3/s],
 H spád, rozdíl mezi hladinami nádrží [m],
 ρ hustota vody [kg/m^3],
 η hydraulická účinnost turbíny [-].

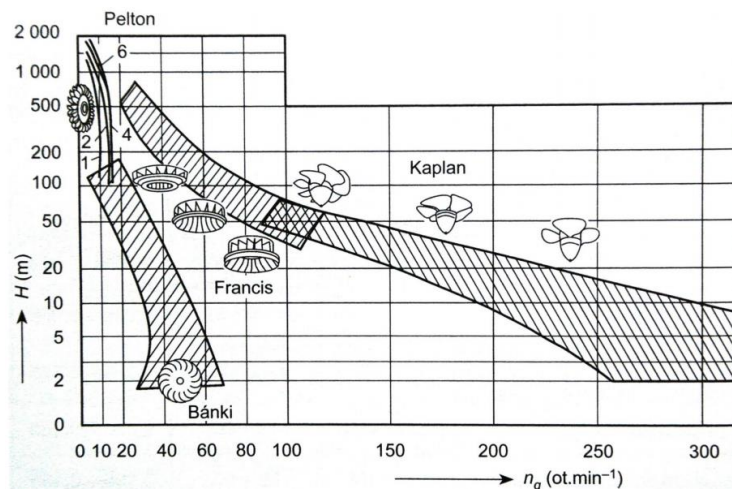
4.5.1 Rozdělení přečerpávacích elektráren

Vodní elektrárny bychom mohli rozdělit dle různých kritérií. V případě PVE je vhodné zmínit rozdělení dle využívaného spádu [40]:

- Nízkotlaké se spádem do 20 m
- Středotlaké pro spády od 20 do 100 m
- Vysokotlaké pro spády od 100 m

Dle principu, na kterém PVE pracují je zřejmé, že se nejčastěji jedná o vysokotlaké vodní elektrárny. Dle konkrétní velikosti spádu je nutné volit vhodnou turbínu dle obrázku 15. Z tohoto obrázku je zřejmé, že Francisova turbína je vhodná pro spády až do cca 800 m. V PVE využívající ještě větší spády, se používají Peltonovy turbíny vhodné pro spády až 2000 m. Vzhledem k oblasti použití a schopnosti reverzibility jsou často používány právě Francisovy turbíny.

Obrázek 15 - Oblasti použití jednotlivých druhů turbín



Zdroj: <https://www.soje.cz/storage/user-76/module-349/vodni-turbiny-15501545730php6cpldt.pdf>

4.5.2 Vlastnosti přečerpávacích elektráren

Účinnost PVE se pohybuje mezi 70 – 85 % [39], počet cyklů 20 000 – 50 000 [24] a hmotní hustotou energie 0,5 – 1,5 Wh/kg [24]. Mezi hlavní výhody patří dosažení dlouhé životnosti (50-100 let), odezvou řádově mezi desítkami vteřin až několik minut [38]. Během vybíjení jsou schopny dodat obrovské množství energie. Odpadá starost s ekologickou likvidací jako tomu je například u elektrochemických akumulátorů. Jedná se o poměrně rozsáhlé dílo zasahující do krajiny a v neposlední řadě složitější rozšíření kapacity. Při pořizovacích nákladech 1 557 – 3 893 CZK/kWh představují poměrně zajímavý akumulační zdroj [41].

Je zřejmé, že PVE je velmi atraktivní způsob akumulace energie. Momentálně se mezi země s největší instalovanou kapacitou PVE řadí Čína s 32 GW, Japonsko s 28,3 GW, USA 22,6 GW a Norsko 20 GW. Největší přečerpávací elektrárnou na světě je v současné době Bath Country v USA dosahující výkonu 3 GW [42]. V České republice je největší PVE Dlouhé stráně se spádem 510,7 m, s instalovaným výkonem 2x325 MW zajištěným 2 Francisovými turbínami, které jsou největšími reverzními turbínami v Evropě [39].

Mimo obvyklou akumulaci energie například v PV systémech se PVE využívají k vyrovnávání denního diagramu zatížení přenosové soustavy. V době, kdy spotřeba energie není tak velká jako dostupná energie v soustavě, tak přečerpávací elektrárny začnou akumulovat přebytečnou energii, která je zpět do soustavy dodána v době špičkového zatížení [43].

4.6 Stlačený vzduch - CAES

CAES (z ang. Compressed Air Energy Storage) je systém akumulace pracující na podobném principu jako vodní přečerpávací elektrárny. Přebytková energie se využívá na vysokotlaké stlačování vzduchu kompresorem (až na tlak pohybující se kolem 75 barů [44]). V případě nedostatku energie se vysokotlaký vzduch pouští na plynovou turbínu připojenou ke generátoru produkující elektrickou energii viz obrázek 16. Nejlepší možností akumulace stlačeného vzduchu je využití existujících geologických objektů jako jsou například solné jeskyně, vytěžené skalní jeskyně zemního plynu, případně umělé podzemní vzduchotěsné zásobníky [42].

Obrázek 16 - Schématické znázornění akumulace do stlačeného vzduchu



Zdroj: https://www.pge.com/en_US/about-pge/environment (upraveno autorem BP)

Stlačováním vzduchu zvyšujeme tlak, zároveň se zvyšuje i jeho teplota. Toto teplo je nutné odvádět, jinak bychom snižovali kapacitu uloženého vzduchu. Zároveň je potřeba při expanzi teplo do oběhu přivádět, čímž zvyšujeme účinnost [42].

Rozdělujeme několik druhů stlačování vzduchu dle probíhajících termodynamických procesů. Jedním z nich je tzv. D-CAES systém nevyužívající vzniklé teplo při kompresi. Toto teplo je uvolňováno pouze do atmosféry (případně částečně využívá odpadní teplo). Hlavním

zdrojem tepla k ohřevu vzduchu je spalovací komora například na zemní plyn čímž se dostáváme na účinnost kolem 42 – 54 %. Dalším druhem jsou adiabatické systémy označované jako A-CAES zachycující vznikající teplo při kompresi, které je možné v případě expanze znovu dodávat. Výhoda těchto systémů spočívá v tom, že odpadá nutnost používání spalovacích komor. Další výhodou je zvýšená účinnost k hodnotám kolem 70 %. Poslední skupinou jsou izotermické systémy s označením I-CAES. Tento druh je teprve ve fázi vývoje s předpokládanou účinností kolem 80 % [31].

Tento způsob je vhodný jako alternativa k přečerpávacím vodním elektrárnám na místech, kde by PVE nebylo jednoduché postavit. Stejně jako u PVE se předpokládá geologické rozložení terénu, avšak častěji se budují na místech s přírodními prostory k akumulaci (již zmíněné solné jeskyně apod.). Dle velikosti akumulčních zásobníků, výkonu a průtoku kompresoru jsou schopny se nabít řádově mezi několika hodinami až několika dny. Následně jsou schopny začít dodávat energii zpět do soustavy od minuty až do 15 minut dle druhu stlačování vzduchu a vydrží hodiny i dny dle instalované kapacity. Jejich objemová hustota energie se pohybuje mezi 1-25 kWh/m³ [44] a hmotnostní hustota energie 30 – 60 Wh/kg [24]. Mají velmi dlouhou životnost dosahující až 40 let (až 13 000 cyklů [24]) a malé samovybíjení způsobené velkou těsností podzemních jeskyní [45]. Pořizovací náklady se průměrně pohybují v rozmezí 2 388 - 6 826 Kč/kWh dle použité technologie [24].

Dosud se používají systémy dosahující výkonu od jednotek až po stovky MW. Mezi nejznámější patří Huntorf v Německu s výkonem 290 MW (po inovaci využívající solné jeskyně o objemu 270 000 m³ při nákladech 10 269 Kč/kW). Mezi druhou nejznámější patří McIntosh v USA o výkonu 110 MW, taktéž využívající solnou jeskyni o objemu 532 000 m³ [45].

4.7 Tepelná akumulace (TES)

Jedním ze způsobů akumulace energie se nabízí tepelná akumulace. Tento způsob akumulace je založen na principu ohřívání média, kdy může proběhnout i změna skupenství látky. Záleží na druhu použité technologie.

Rozdělujeme 3 základní druhy tepelné akumulace. Prvním z nich je systém využívající citelné teplo. Množství uložené energie je popsáno rovnicí (14), z níž je patrné, že jedním

z faktorů množství uložené energie je specifická tepelná kapacita definovaná použitým médiem. Pro tuto aplikaci se používá například voda, topné oleje a roztavené soli, případně různé druhy štěrků a písků [46].

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (14)$$

kde m hmotnost média [kg],
 c_p měrná tepelná kapacita [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ΔT rozdíl teplot před a po ohřátí média [K].

Dalším druhem jsou systémy využívající latentní teplo, při kterém dochází k fázové přeměně (změně skupenství). Pro tento způsob jsou vhodná organická média, jako například parafíny, alkoholy, glykoly a estery a neorganická, zejména soli, kovy a jejich slitiny [46].

Poslední druhem je využívání chemického tepla pracující na principu reverzibilních reakcí schopné absorbovat a následně uvolňovat teplo. Pracují s teplotami kolem 200 – 400 °C. Materiály využívající se v těchto systémech jsou například síran hořečnatý, hydroxid hořečnatý, uhličitan železitý a jiné. Tento systém akumulace je zatím ve fázi laboratorního testování. Dosahuje největší hustoty tepelné energie a nízkými tepelnými ztrátami [46].

Zatím tepelné systémy dosahují malé účinnosti, a to zejména v případě, kdy se používají pro PV systémy a je zde nutné nejdříve elektrickou energii využít na napájení topných systémů. Lepší způsob je využít solární systémy CSP (konzentované sluneční záření) pracující na principu směřování slunečné energie do absorberu. V těchto elektrárnách je vytvářena vodní pára, která přechází rovnou na parní turbínu připojenou ke generátoru. Nejznámějším systémem CSP byla fototermická elektrárna „Solar One“ věžového typu s maximálním výkonem 10 MWp. Dnes je již nahrazena 3 většími fototermickými elektrárnami o celkovém výkonu 354 MWp [6].

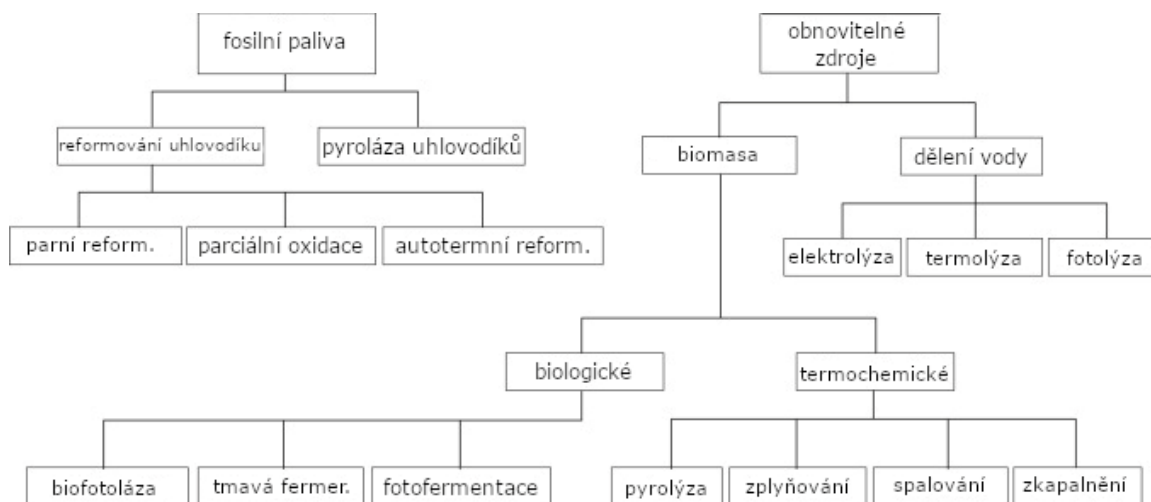
4.8 Vodíkové hospodářství

Vodíkové hospodářství je způsob akumulace elektrické energie vyráběním vodíku. Při potřebě zpětného získání energie je vodík použit jako palivo pro pístové motory, plynové turbíny nebo vodíkové palivové články [12]. Vodíkové hospodářství bylo dlouhou dobu velmi využíváno pro akumulaci přebytečné energie zejména z jaderných elektráren [6].

4.8.1 Výroba vodíku

Pro výrobu vodíku lze využít jednu z 13 metod popsanych v obrázku 17. Tyto metody lze rozdělit do dvou velkých skupin. Jedna z nich pracuje s fosilními palivy (např. zemní plyn, uhlí a ropa), které jsou zpracovávány na principech reformování a pyrolýzy. Druhá skupina pracuje s obnovitelnými zdroji využívajícími procesy dělení vody (např. elektrolýzou), termochemické a biologické principy [47].

Obrázek 17 - Přehled metod výroby vodíku



Zdroj: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032116305366-gr1.jpg> (upraveno autorem BP)

V případě výroby plynného vodíku elektrolýzou vody se spotřebuje cca 38 kWh (účinnost elektrolýzéry 90 %), následně je k výrobě kapalného vodíku třeba energie 10 kWh. Perspektivita využití vodíku spočívá v jeho velké výhřevnosti v porovnání s ostatními palivy shrnuto v tabulce 2. Mezi jeho další výhody patří, že při spalování nevznikají žádné oxidy uhlíku ani síry, případně jiných karcinogenních látek, jako je tomu u spalování konvenčních paliv. Vzniká pouze vodní pára s malým množstvím oxidu dusíku. Zároveň je nutné zmínit i nevýhody vodíku. Největší nevýhodou je fakt, že vodík je velmi výbušný, mající nízkou hustotu, což s sebou přináší nevýhodu v případě skladování. V neposlední řadě plynný vodík snáze difunduje do kovů (nastává křehnutí oceli). Všechny zmíněné nevýhody na sebe kladou důraz především na použité materiály pro skladování a používání vodíku [6]. Pokud shrneme kombinaci vysoké výhřevnosti a velmi ekologické spalování, na což je v posledních letech kladen velký důraz jak ze stran Evropské unie, tak zároveň ostatních států, dá se hovořit o palivu „budoucnosti“.

Tabulka 2 - Výhřevnost jednotlivých druhů paliv

druh paliva	výhřevnost [MJ/kg]
lignit jihomoravský	10
hnědé uhlí sokolovské	14
tvrdé dřevo	16
hnědé uhlí severočeské	16
svítiplyn	19
černé uhlí kladenské	23
koks otopový	27-30
černé uhlí ostravské	28
měrné palivo	29
čistý uhlík	33
benzín	43
methan	50
vodík	96
jaderné palivo pro štěpnou reakci ${}^{235}_{92}\text{U}$	$3,9 \cdot 10^6$
jaderná fúze ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T}$	$3,4 \cdot 10^8$
anihilace hmoty	$9,0 \cdot 10^{10}$

Zdroj: LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7. s. 87*

4.8.2 Palivové články

Jak již bylo zmíněno jedním z využití vodíku je jeho použití v palivových člancích. Tyto články pracují na principu elektrochemické přeměny, tudíž přeměňují chemickou energii na elektrickou [6]. Jejich hlavními částmi jsou elektrody a elektrolyt. Rozdělujeme několik druhů palivových článků závislých na elektrochemických reakcích.

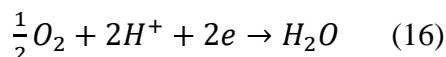
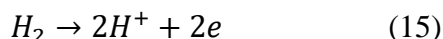
4.8.2.1 PEM palivový článek

Jedním z druhů je tzv. PEM palivový článek (z ang. Proton Exchange Membrane) používající polymerní membránu průchozí pro protony. Nejčastěji se používá pod komerčním názvem Nafion, což je polymer na bázi teflonu. Tato membrána je pokryta z obou stran katalyzátory na bázi platiny.

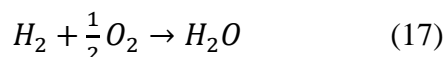
Funguje na principu přenosu protonů mezi anodou a katodou skrze polymerní membránu. Molekula vodíku se rozštěpí na anodě (na platinovém katalyzátoru) na dva protony vodíku a dva elektrony. Protony prochází skrz membránu a elektrony zůstávají na anodě. Tím, že protony projdou na katodu, vznikne rozdíl potenciálů mezi anodou a katodou. Následně se začnou

elektrony z anody přesouvat přes vnější elektrický obvod. Na katodě se sloučí protony vodíku a elektrony a vznikne vodík, který reaguje s kyslíkem ze vzduchu za vzniku vody. [48].

Oxidaci vodíku na anodě lze popsat chemickou reakcí (15) a chemickou reakcí probíhající na katodě lze popsat chemickou rovnicí (16) [49]



celková chemická reakce probíhající v palivovém článku typu PEM lze popsat rovnicí (17) [49]

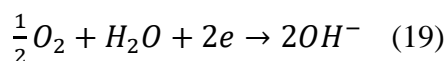
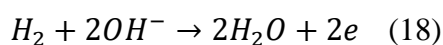


V palivových článcích typu PEM je provozní teplota v rozmezí 60 – 180 °C, dosahující účinnosti 40 – 60 % závislé na konstrukci. Mezi jeho přednosti patří zejména vysoká hmotnostní hustota energie 100 – 10 000 Wh/kg [24] a výkonová hustota 6,5kW/m³ [49]. Snadná a bezpečná manipulace, rychlý čas spuštění. Mezi nevýhody lze zařadit zejména velké pořizovací náklady [49]. Tyto náklady se průměrně pohybují kolem 84 172 Kč/kW a pořizovací náklady přepočtené na kWh se průměrně pohybují 14 016 Kč/kWh. Součástí těchto nákladů je i elektrolýza pro výrobu vodíku [24]. V současné době mají PEM články životnost průměrně kolem 2500 h (některé zdroje uvádí až 20 000 cyklů [24]), což je naprosto nedostatečné pro větší stacionární systémy [50].

4.8.2.2 AFC palivový článek

Dalším druhem je alkalický palivový článek známý pod zkratkou AFC používané zejména v oblasti kosmonautiky. Využívají elektrolyt na bázi vody zejména hydroxid draselný (KOH) zadržovaný v azbestové matici [51].

Chemickou reakci probíhající na katodě lze popsat rovnicí (18) a chemickou rovnicí probíhající na anodě (19) [49].



Palivové články pracují při teplotách 65 až 220 °C závislé na koncentraci elektrolytu [51]. Dosahují účinnosti do 70 %. Nevýhodou je zejména citlivost elektrolytu na přítomnost CO₂. V případě přítomnosti dojde k reakci CO₂ a KOH za vzniku K₂CO₃ doprovázené velmi rychlou degradací výkonu palivového článku. Proto jsou AFC velmi náročné na čistotu kyslíku a vodíku [52].

4.8.2.3 Palivové články s tuhými oxidy (SOFC)

Palivové články s tuhými oxidy známé pod označením SOFC nejčastěji využívající CaTiO₃ (Perovskit) pro katodu a pro výrobu anody kombinaci NiO, Y₂O₃ a ZrO. Provozní teploty těchto palivových článků jsou poměrně velké v porovnání s ostatními druhy, dosahují hodnot kolem 800 – 1 000 °C. Takto vysoké teploty s sebou přináší značné komplikace z hlediska roztažnosti materiálů, čímž v krajních případech hrozí i zničení akumulátoru. Z tohoto důvodu se v posledních letech snaží snížit provozní teplotu směrem k nižším hodnotám pohybujících se kolem 600 °C i menší [53] [54]. SOFC dosahují výkonové hustoty mezi 1,5 až 1,9 kW/m³ [54].

5 Porovnání dostupných technologií

Ideální akumulční technologie by měla mít co největší životnost při co největší účinnosti, zároveň dosahovat co největší měrné energie při co nejmenší ceně. Bohužel takováto ideální akumulční technologie neexistuje, a proto je nutné při výběru provádět různé kompromisy v jednotlivých parametrech.

Při použití ostrovních PV systémů je důležité předem vědět, zdali konkrétní systém obsahuje pouze jeden spotřebič či bude zásobovat větší oblast, a tudíž více spotřebičů. Další důležitou věcí je znát požadované množství akumulované energie a tím i celkovou spotřebu. Podle požadovaných parametrů je možné správně navrhnout celkovou kapacitu a druh použité akumulční technologie. Pokud bychom navrhli malou kapacitu nebo nevhodný systém, mohlo by docházet k nedostatku elektrické energie v okamžicích, kdy jí potřebujeme. V návrhu správné kapacity akumulátorů je nutné zohlednit i návrh konkrétního PV systému, který musí v dané lokaci při předpokládaném slunečním záření vyrobit dostatek elektrické energie.

V tabulce 3 jsou shrnuty jednotlivé druhy technologií používaných pro akumulaci energie v oblasti fotovoltaiky. Z této tabulky je zřejmé, že technologie, které dosahují velké životnosti a zároveň velké účinnosti jsou podstatně dražší než ostatní technologie. Technologie, které mají vysokou objemovou hustotu energie budou zabírat méně místa pro akumulaci stejného množství energie než jiné. Z toho vyplývá, že budou kladeny menší nároky na skladovací prostory.

Tabulka 3 - Shrnutí důležitých parametrů akumulčních technologií

Název technologie	Životnost	Účinnost	Hmotnostní hustota energie	Objemová hustota energie	Cena
	Počet cyklů	%	Wh/kg	Wh/dm ³	Kč
Olověné akumulátory	200 – 1 000	65 – 85	35 – 60	80 – 130	3 209 – 4279
Ni-Cd akumulátory	1500	70 – 85	50 – 70	150	21 394
Ni-MH akumulátory	180 – 2 000	92	170 – 420	70 – 100	19 255 – 74 879
Lithiové akumulátory	1 000 – 10 000	95	200	600	25 673
Průtokové baterie	12 000	70 – 85	15 – 25	20 – 33	12 121
Na-S baterie	4 000	75	150 – 240	-	6 418 – 10 697
Superkondenzátory	100 000 – 1 000 000	95	3 – 10	7 – 10	213 940
Indukční akumulátory	100 000	90 – 97	0,5 – 5	0,2 – 5	213 940 – 1 540 368
Setrvačníky	20 000 – 100 000	90 – 95	5 – 100	-	124 350
Přečerpávací elektrárny	20 000 – 50 000	70 – 85	0,5 – 1,5	-	1 557 – 3 893
Stlačený vzduch	13 000	42 – 54	30 – 60	1 – 25	2 388 – 6 826
Palivové články	20 000	40 – 60	100 – 10 000	-	14 016

Pro větší stacionární systémy se nabízí možnost využití olověných akumulátorů představující levnou a snadno dostupnou technologii s nízkou hustotou energií. V případě delšího nepoužívání nebo zatěžování velkými proudy hrozí sulfatace. Lithiové akumulátory mají velmi vysoké hustoty energie. Z toho vyplývá, že pro skladování stejného množství energie stačí menší prostor. Pro systémy zásobující větší oblast je vhodné vybudování přečerpávací elektrárny, případně akumulace do stlačeného vzduchu (ekonomicky nevýhodné pro malé systémy). Pro vybudování těchto technologií je nutné rozložení krajiny, jelikož není možné vybudovat tak rozsáhlé dílo jako je přečerpávací elektrárna v každé oblasti. U stlačeného vzduchu se nabízí akumulace do solných jeskyní, případně vybudování nadzemních či

podzemních zásobníků. Při zásobování větších oblastí je možné doplnění o systémy indukčních akumulátorů/superkapacitorů sloužící ke stabilizaci frekvence.

Kosmické aplikace patří do další skupiny využívající solární energii. Zde jsou kladeny velké požadavky na akumulční technologie, a to zejména z hlediska bezpečnosti akumulátorů. Proto se z elektrochemických akumulátorů pro aplikaci nejvíce hodí Ni-Cd akumulátory, zejména z důvodu vysoké mechanické odolnosti a velkému rozsahu pracovních teplot. Další možností je použití setrvačníků, jelikož mají vysokou životnost v počtu cyklů a jsou schopny velmi rychle dodat energii. Zároveň se nabízí možnost využití setrvačného účinku k stabilizaci.

V oblasti elektromobility se v současné době používají lithiové baterie. První velký problém nastává zejména v případě nehod a následného hašení těchto baterií. Druhý velký problém nastává při delších cestách s dojezdem elektro vozů. Doba dobití elektromobilu je oproti dotankování nádrže spalovacích motorů nezanedbatelně dlouhá. Proto se nabízí možnost vhodné kombinace lithiových baterií a palivových článků vyrábějící elektrickou energii z vodíku.

6 Závěr práce

Cílem této práce bylo zhodnotit dostupné akumulční technologie. Z důvodu stále dominantnějšího postavení obnovitelných zdrojů v oblasti energetiky je nutné zkoumání těchto technologií. Práce byla zaměřena na fyzikální principy jednotlivých akumulčních technologií. Dále byly zkoumány jejich vlastnosti a vhodnost použití.

Práce byla zaměřena na několik skupin akumulčních technologií. První velkou skupinou jsou elektrochemické akumulátory, které jsou jedny z nejdostupnějších akumulčních zdrojů vůbec. Samozřejmě i mezi nimi jsou technologie dražší, a to zejména lithiové akumulátory. Konkrétně lithiové akumulátory mají oproti jiným druhům velmi vysokou objemovou hustotu energie, proto nachází uplatnění v elektromobilitě, mobilních telefonech aj.

Superkondenzátory a indukční akumulátory představují velmi drahé zdroje akumulčních technologií. Tyto akumulátory s sebou přináší výhodu, a to zejména jejich rychlou odezvu v případě výpadku hlavních zdrojů v síti. Jejich vysoká životnost a schopnost pracovat jako rychlý záložní zdroj energie s sebou přináší uplatnění například v kosmických aplikacích.

Přečerpávací elektrárny se nabízí jako velmi vhodný zdroj schopný pojmout obrovské množství energie a tím pádem zásobovat i větší ostrovní systémy. Jejich předností je také cena. Bohužel tento akumulční zdroj není možné vystavět v každé oblasti a z toho důvodu jeho použití je značně limitující.

Obecně předpokládám, že současné technologie získávání elektrické energie z obnovitelných zdrojů nedokážou v dostatečné míře nahradit stávající neobnovitelné zdroje energie. Proto bude nezbytně nutné technologie obnovitelných zdrojů stále vyvíjet. Je možné, že spíše dojde k nahrazení uhelných elektráren například fúzními elektrárnami a tím pádem ke snížení uhlíkové stopy. Například u palivových článků očekávám, že doplní ve větší míře současné elektromobily a jejich lithiové baterie. Kombinace rozšiřující se elektromobility a snahy většího zastoupení obnovitelných zdrojů v oblasti energetiky se sebou moc nekoresponduje. Elektromobilita bez palivových článků nebude mít nejspíš budoucnost, neboť nepřipadá v úvahu, aby lidé, kteří přijedou domů z práce, dávali přes noc nabít auto. Nerovnoměrně by to zatěžovalo síť v době, kdy například PV systémy nebudou do sítě schopny dodávat energii. Nemluvě o nemožnosti nabíjet tyto vozy třeba v panelových sídlištích. Zdali

se tato technologie dále v oblasti automobilového průmyslu udrží nebo jí nahradí jiný bateriový zdroj se v následujících letech prokáže. Vodík používaný v palivových článcích je zajímavý především svojí vysokou výhřevností oproti jiným druhům paliv. Dále s sebou přináší výhody zejména tím, že při spalování nedochází ke vzniku jedovatých zplodin. Mezi další přednosti zároveň patří možnost jeho výroby „zelenou“ cestou, a to z obnovitelných zdrojů, například elektrolýzou vody. Takže existuje možnost vybudování ostrovních PV systémů na výrobu vodíku.

V současné době existuje již více druhů akumulčních zdrojů. Každý z nich má jiné přednosti a jiné vlastnosti, a to ovlivňuje jejich následné použití. Je zřejmé, že vhodnou kombinací vícero druhů se dá vytvořit systém pro akumulaci vyhovující ve všech potřebných směrech.

7 Seznam literatury

- [1] REN21. *Renewables 2019 Global Status Report* [online]. Paris: REN21 Secretariat, 2019 [cit. 2021-02-22]. ISBN 978-3-9818911-7-1. Dostupné z: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf
- [2] Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR 2019. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Rocni_zprava_provoz_ES_2019.pdf/debe8a88-e780-4c44-8336-a0b7bbd189bc
- [3] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Zdroje a využití energie*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN 978-80-213-1647-8.
- [4] Global Solar Atlas. *Global Solar atlas* [online]. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://globalsolaratlas.info/map>
- [5] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika, elektřina ze slunce*. Brno: ERA, 2007. 21. století. ISBN 978-80-7366-100-7.
- [6] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7.
- [7] Stanford scientists invent ultrafast way to manufacture perovskite solar modules. *Stanford University* [online]. 2020 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://news.stanford.edu/2020/11/25/scientists-invent-ultrafast-way-make-solar-modules-greener/>
- [8] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-865-3403-0.
- [9] VEGA-GARITA, Victor, Ali HANIF, Nishant NARAYAN, Laura RAMIREZ-ELIZONDO a Pavol BAUER. Selecting a suitable battery technology for the photovoltaic battery integrated module. *Journal of Energy Storage*. 2019, **438**. ISSN 0378-7753. 227011. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2019.227011

- [10] J. MAY, Geoffrey, Alistair DAVIDSON a Boris MONAHOV. Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*. 2018, **15**, 145-157. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2017.11.008
- [11] MAREK, Jiří a Luděk STEHLÍK. *Hermetické akumulátory v praxi*. Praha: IN-EL, 2004. Elektro (IN-EL). ISBN 80-862-3034-1.
- [12] BREEZE, Paul. *Power System Energy Storage Technologies*. Academic Press, 2018. ISBN 978-0-12-812902-9.
- [13] Chemical Energy Storage. REVANKAR, Shripad T. *Storage and Hybridization of Nuclear Energy*. Academic Press, 2019, s. 177-227. ISBN 978-0-12-813975-2.
- [14] Pratima Meshram, Abhilash, Banshi Dhar Pandey, 2019, Advanced Review on Extraction of Nickel from Primary and Secondary Sources. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 40(3), 157-193, ISSN 0882-7508, Dostupné z: doi:10.1080/08827508.2018.1514300.
- [15] Wenhua H. Zhu, Ying Zhu, Zenda Davis, Bruce J. Tatarchuk, 2013, Energy efficiency and capacity retention of Ni–MH batteries for storage applications. *Applied Energy*, 106, 307-313, Dostupné z: doi:[10.1016/j.apenergy.2012.12.025](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.025)
- [16] LI, Qi, Juner CHEN, Lei FAN, Xueqian KONG a Yingying LU. Progress in electrolytes for rechargeable Li-based batteries and beyond. *Green Energy & Environment*. 2016, **1**(1), 18-42. ISSN 2468-0257. Dostupné z: doi:10.1016/j.gee.2016.04.006
- [17] NITTA, Naoki, Feixiang WU, Jung TAE LEE a Gleb YUSHIN. Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*. 2015, **18**(5), 252-264. ISSN 1369-7021. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2014.10.040
- [18] BEAUDIN, Marc, Hamidreza ZAREIPOUR, Anthony SCHELLENBERG a William ROSEHART. Energy Storage for Mitigating the Variability of Renewable Electricity Sources. PENGWEI, Du a Lu NING. *Energy Storage for Smart Grids*. Academic Press, 2014, s. 1-33. ISBN 978-0-12-410491-4. Dostupné z: doi:10.1016/C2012-0-06954-2

- [19] CHEN, Long, Xiulin FAN, Enyuan HU, et al. Achieving High Energy Density through Increasing the Output Voltage: A Highly Reversible 5.3 V Battery. *Chem.* 2019, **5**(4), 896-912. ISSN 2451-9294. Dostupné z: doi:10.1016/j.chempr.2019.02.003
- [25-20] WILLIAMSON, Sheldon S., Pablo A. CASSANI, Srdjan LUKIC a Benjamin BLUNIER, RASHID, Muhammad H., ed. Energy Storage. *Alternative Energy in Power Electronics*. Butterworth-Heinemann, 2014, s. 267-315. ISBN 978-0-12-416714-8. Dostupné z: doi:10.1016/C2012-0-07333-4
- [21] LOURENSSEN, Kyle, James WILLIAMS, Faraz AHMADPOUR, Ryan CLEMMER a Syeda TASNIM. Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*. 2019, **25**. ISSN 2352-152X. 100844. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2019.100844
- [22] Applications of batteries for grid-scale energy storage. MENICTAS, Chris, Maria SKYLLAS-KAZACOS a Tuti Mariana LIM. *Advances in Batteries for Medium and Large-Scale Energy Storage*. Woodhead Publishing, s. 587-607. ISBN 978-1-78242-013-2. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-78242-013-2.00017-0
- [23] DOETSCH, Christian a Astrid POHLIG. The Use of Flow Batteries in Storing Electricity for National Grids. M. LETCHER, Trevor, ed. *Future Energy*. 3rd ed. Elsevier, 2020, s. 263-277. ISBN 978-0-08-102886-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102886-5.00013-X
- [24] ZAKERI, Bahnam a Sanna SYRI. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, **42**, 569-596. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.10.011
- [25] KUMAR, Deepak, Satish KUMAR RAJOURIA, Suman B. KUHAR a D.K. KANCHAN. Progress and prospects of sodium-sulfur batteries: A review. *Solid State Ionics*. 2017, **312**, 8-16. ISSN 0167-2738. Dostupné z: doi:10.1016/j.ssi.2017.10.004
- [26] LIBICH, Jiří, Josef MÁCA, Jiří VONDRÁK, Ondřej ČECH a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. Supercapacitors: Properties and applications. *Journal of Energy Storage*. 2018, **17**, 224-227. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2018.03.012

- [27] LI, Chunyang, Xiang LIU, Yusong ZHU, Yuping WU a Teunis VAN REE. Metal oxides in supercapacitors. WU, Yuping. *Metal Oxides in Energy Technologies*. Elsevier, 2018, s. 169-203. ISBN 978-0-12-811167-3. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-811167-3.00007-9
- [28] AFIF, Ahmed, Sheikh MH RAHMAN, Atia TASFIAH AZAD, Juliana ZAINI, Md Aminul ISLAN a Abul KALAM AZAD. Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage – A review. *Journal of Energy Storage*. 2019, 25. ISSN 2352-152X. 100852. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2019.100852
- [29] Application of Carbon Materials Derived from Fluorocarbons in an Electrochemical Capacitor. NAKAJIMA, Tsuyoshi a Henri GROULT. *Advanced Fluoride-Based Materials for Energy Conversion*. Elsevier, 2015, s. 415-430. ISBN 978-0-12-800679-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-800679-5.00017-8
- [30] WAGNER, Léonard. Overview of Energy Storage Technologies. M. LETCHER, Trevor, ed. *Future Energy*. 2nd ed. Elsevier Science, 2014, s. 613-631. ISBN 978-0-08-099424-6. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-099424-6.00027-2
- [31] RAJAB KHALILPOUR, Kaveh. Single and Polystorage Technologies for Renewable-Based Hybrid Energy Systems. RAJAB KHALILPOUR, Kaveh. *Polygeneration with Polystorage for Chemical and Energy Hubs*. Academic Press, 2019, s. 77-131. ISBN 978-0-12-813306-4. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-813306-4.00004-5
- [32] KUMAR, Nishant. Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) System [online]. 2015. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/261204920_Superconducting_Magnetic_Energy_Storage_SMES_System
- [33] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Akumulace elektrické energie. *Elektro*. FCC Public, 2011, (2), 6-10. ISSN 1210-0889. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>
- [34] ZAYED AL SHAQSI, Ahmed, Kamaruzzaman SOPIAN a Amer AL-HINAI. Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Reports*. 2020, 6, 288-306. ISSN 2352-4847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egy.2020.07.028

- [35] MAHMOUD, Montaser, Mohamad RAMADAN, Abdul-Ghani OLABI, Keith PULLEN a Sumsun NAHER. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications. *Energy Conversion and Management*. 2020, 210. ISSN 0196-8904. 112670. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2020.112670
- [36] Microgrid and distributed generation. FUSHENG, Li, Li RUIHENG a Zhou FENGQUAN. *Microgrid Technology and Engineering Application*. Academic Press, 2016, s. 29-46. ISBN 978-0-12-803598-6.
- [37] Flywheel energy storage technologies for wind energy systems. KALDELLIS, J.K. *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems*,. Woodhead Publishing, 2010, s. 366-392. ISBN 978-1-84569-527-9.
- [38] GUITTET, Mélanie, Massimiliano CAPEZZALI, Ludovic GAUDARD, Franco ROMERIO, François VUILLE a François AVELLAN. Study of the drivers and asset management of pumped-storage power plants historical and geographical perspective. *Energy*. 2016, 111, 560-579. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2016.04.052
- [39] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010, s. 196-202. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [440] Vodní dílo. ULRYCH, Emil. *Aplikovaná hydromechanika I: (základy hydroenergetiky)*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2007, s. 4-11. ISBN 978-80-213-1609-6.
- [41] JAVED, Muhammad Shahzad, Tao MA, Jakub JURASZ a Muhammad Yasir AMIN. Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives. *Renewable Energy*. 2020, s. 176-192. 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2019.11.157
- [42] Storing electrical energy. M. LETCHER, Trevor. *Managing Global Warming*. Academic Press, 2019, s. 365-377. ISBN 978-0-12-814104-5.
- [43] ČEPS, a.s. [online]. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/data>

- [44] BUDT, Marcus, Daniel WOLF a Jinyue YAN. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. *Applied Energy*. 2016, 170, 250-268. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2016.02.108
- [45] VENKATARAMANI, Gayathri, Prasanna PARANKUSAM, Velraj RAMALINGAM a Jihong WANG. A review on compressed air energy storage – A pathway for smart grid and polygeneration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, 62, 895-907. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.05.002
- [46] ALVA, Guruprasad, Yaxue LIN a Guiyin FANG. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*. 2018, 144, 341-378. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.12.037
- [47] NIKOLAIDIS, Pavlos a Andreas POULLIKKAS. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 67, 597-611. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.09.044
- [48] ALASWAD, A., A. PALUMBO, M. DASSISTI a A. G. OLABI. *Fuel Cell Technologies, Applications, and State of the Art. A Reference Guide. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier, 2016. ISBN 978-0-12-803581-8. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.04009-1
- [49] Types of fuels. DINCER, Ibrahim a Osamah SIDDIQUI. *Ammonia Fuel Cells*. Elsevier, 2020, s. 33-76. ISBN 978-0-12-822825-8.
- [50] SUTHARSSAN, Thamo, Diogo MONTALVAO, Yong KANG CHEN, Wen-Chung WANG, Claudia PISAC a Hakim ELEMARA. A review on prognostics and health monitoring of proton exchange membrane fuel cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 75, 440-450. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.11.009
- [51] SALEHIMALEH, Mohammad. *Fuel Cells*. B. GHAREHPETIAN, G. a S. MOHAMMAD MOUSAVI AGAH. *Distributed Generation Systems*. Butterworth-Heinemann, 2017, s. 221-300. ISBN 978-0-12-804208-3.

[52] Industrial Process Heat, Chemistry Applications, and Solar Dryers. A. KALOGIROU, Soteris, ed. Solar Energy Engineering. 2nd ed. Academic Press, 2014, s. 397-429. ISBN 978-0-12-397270-5.

[53] Clean Energy. BENSEBAA, Farid. Interface Science and Technology. 2013, s. 279-383. ISBN 978-0-12-369550-5.

[54] PIJOLAT, C. Screen-printing for the fabrication of solid oxide fuel cells (SOFC). PRUDENZIATI, Maria a Jacob HORMADALY, ed. Printed Films. Woodhead Publishing, 2012, s. 469-495. ISBN 978-1-84-569988-8.

8 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Podíl obnovitelných zdrojů na celosvětové výrobě elektrické energie ke konci roku 2018.....	3
Obrázek 2 - Solární mapa České republiky za období 1994-2018.....	4
Obrázek 3 - Schéma ostrovního PV systému	6
Obrázek 4 - Obecné schéma elektrochemického akumulátoru	9
Obrázek 5 - Schéma olovněného akumulátoru.....	10
Obrázek 6 - Životnost gelové baterie vyjádřená hloubkou vybití v závislosti na počtu cyklů. 12	
Obrázek 7 - Schéma lithiového akumulátoru Li-on	15
Obrázek 8 - Schéma průtokové baterie.....	17
Obrázek 9 - Průběh procesu vybíjení a nabíjení průtokové baterie VBR	17
Obrázek 10 - Schéma sodíkové baterie (Na-S)	19
Obrázek 11 - Nabíjení a vybíjení superkondenzátoru EDLC.....	20
Obrázek 12 - Schéma supravodivého indukčního akumulátoru.....	22
Obrázek 13 - Schéma vysokootáčkového setrvačnicku	24
Obrázek 14 - Princip přečerpávací elektrárny	25
Obrázek 15 - Oblasti použití jednotlivých druhů turbín.....	27
Obrázek 16 - Schématické znázornění akumulace do stlačeného vzduchu.....	28
Obrázek 17 - Přehled metod výroby vodíku.....	31

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Účinnost křemíkových článků dle typu	5
Tabulka 2 - Výhřevnost jednotlivých druhů paliv	32
Tabulka 3 - Shrnutí důležitých parametrů akumulčních technologií.....	36

10 Seznam použitých veličin

Název	Značka
Energie	W, E
Hmotnost	m
Hustota	ρ
Indukčnost	L
Kapacita	C
Měrná tepelná kapacita	c_p
Moment setrvačnosti	I
Napětí	U
Permitivita vakua	ε_0
Plocha	A
Proud	I
Průtok	Q
Relativní permitivita	ε_r
Rozdíl teplot	ΔT
Spád	H
Účinnost	η
Úhlová rychlost	ω
Vzdálenost	D