

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Porovnání médií vhodných pro akumulaci energie**

**Jan Forgáč**

**2020/2021**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan FORGÁČ**  
Osobní číslo: **E18B0056P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Téma práce: **Porovnání médií vhodných pro akumulaci energie**  
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

### Zásady pro vypracování

1. Vytvořte přehled metod akumulace energie.
2. Uveďte příklady dnes používaných systémů na akumulaci energie v praxi.
3. Vytvořte přehled médií využívaných pro akumulaci energie a tato média popište.
4. Navrhněte kritéria hodnocení médií vhodných pro akumulaci energie.
5. Zdůvodněte kritéria a dle těchto kritérií doporučte vhodné médium pro konkrétní aplikaci dle výběru.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

1. The National Renewable Energy Laboratory (NREL) – <https://www.nrel.gov>.
2. The International Renewable Energy Agency (IRENA) – [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA\\_Electricity\\_Storage\\_Costs\\_2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf).
3. World Energy Council – [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/ESM\\_Final\\_Report\\_05-Nov-2019.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/ESM_Final_Report_05-Nov-2019.pdf).

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Anna Fořtová**  
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma:

*Porovnání médií vhodných pro akumulaci energie*

vypracoval samostatně pod odborným dohledem vedoucí bakalářské práce za použití pramenů uvedených v příložené bibliografii.

Plzeň dne .....

.....

podpis autora

## **Abstrakt**

Akumulace energie, a to jak elektrické tak energie jiného druhu je tématem kterému je v dnešní době věnována větší a větší pozornost. Důvodem jsou převážně obnovitelné zdroje energie (OZE), ale také zlepšení účinnosti dodávek elektrické energie a elektromobilita. Právě účelem této práce je nastínit některé způsoby akumulace energie, popsat některá média, která se v daných akumulátorech mohou vyskytovat a popsat jejich praktickou realizaci. Nadále pak určit porovnávací kritéria, která budou sloužit k porovnání dříve popsaných způsobů akumulace energie a jejich médií. Na závěr bude uvedeno jaké způsoby a média jsou nejvhodnější pro zvolené aplikace.

## **Klíčová slova**

Akumulace energie, obnovitelné zdroje energie, akumulární média, energie

## **Abstract**

The accumulation of energy, both electrical and other form, is a topic that is still receiving more and more attention nowadays. The reason is mainly renewable energy sources (RES), but also improving efficiency of electricity supply and electromobility. The purpose of this thesis is to outline some ways of energy accumulation, describe some media used in this systems, and describe their practical implementation. Criteria for comparison will then be determined, which will be used to compare the previously described methods of energy storage and their media. Finally, methods and media that are most suitable for the selected applications will be stated.

## **Keywords**

energy storage, renewable energy, accumulation media, energy

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkovat vedoucí této práce paní Ing. Anna Fořtová za její výpomoc a rady. Dále bych rád poděkovat svému středoškolskému učiteli elektrotechniky panu Ing. Miloslavu Hubáčkovi, který ve mě probudil zájem o elektrotechniku a motivoval mě ke studiu na vysoké škole.

# Obsah

1. Úvod.....	1
2. Metody akumulace energie.....	4
2.1. Kinetická energie.....	5
a) Princip.....	5
b) Druhy akumulčních prvků.....	6
c) Praktické řešení.....	10
2.2. Gravitační potenciální energie.....	11
a) Princip.....	11
b) Druhy akumulčních médií.....	12
c) Praktické řešení.....	14
2.3. Chemická energie.....	16
a) Princip.....	16
b) Druhy akumulčních médií a realizace.....	17
2.4. Tepelná energie.....	20
a) Princip.....	20
b) Druhy akumulčních médií.....	21
c) Praktické řešení.....	23
2.5. Tlaková potenciální energie.....	24
a) Princip.....	24
b) Druhy akumulčních médií.....	25
c) Praktické řešení.....	25
2.6. Energie elektromagnetického a elektrostatického pole.....	26
a) Princip.....	26
b) Praktické řešení.....	27
3. Stanovení kritérií hodnocení.....	28
3.1. Energetická kritéria.....	28
a) Objemové energetické kritérium.....	28
b) Hmotnostní energetické kritérium.....	29
c) Účinnost akumulátoru.....	30
d) Maximální výkon akumulátoru.....	30
e) Rychlost akumulátoru.....	30
3.2. Ekonomické kritérium.....	31
a) Cena.....	31
3.3. Ekologické kritérium.....	31
4. Aplikace kritérií.....	32
5. Doporučení médií pro vhodné aplikace.....	34
5.1. Aplikace v energetice.....	34
5.2. Aplikace v elektromobilech.....	37
6. Závěr.....	39
7. Seznam použitých zdrojů.....	41
8. Seznam obrázků.....	44
9. Seznam tabulek.....	45



---

# 1. Úvod

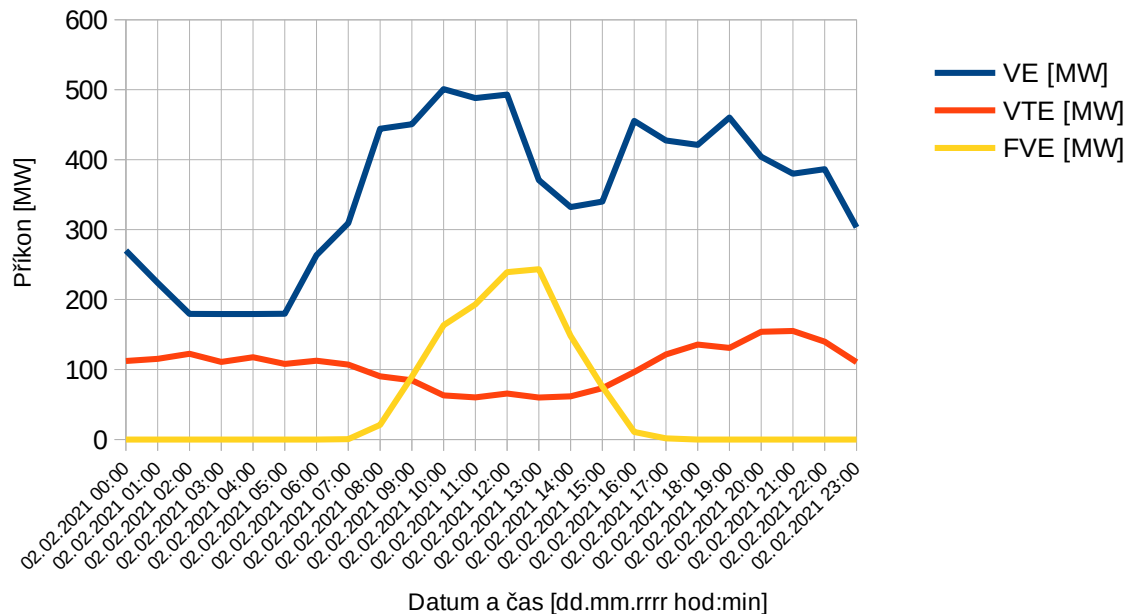
Akumulace energie je žhavým tématem dnešní doby. Dle pařížské dohody musí všechny státy evropské unie do roku 2030 snížit množství vyprodukovaných emisí o nejméně 40% [1]. Politika ochrany životního prostředí ČR, která má za úkol tohoto cíle dosáhnout, je následující [2]:

1. Zvýšením energetické účinnosti dosavadních spotřebičů. Zastaralé spotřebiče mají obecně nižší účinnost a tedy spotřebovávají zbytečně větší množství energie. Jejich náhradou lze tedy snížit celkovou spotřebu elektrické energie.
2. **Zvýšení účinnosti dosavadních zdrojů elektrické energie.** Zvýšením účinnosti používaných zdrojů lze některé více ekologicky náročné zdroje zcela odstavit. Nejvíce je kladen nárok na zvýšení účinnosti obnovitelných zdrojů energie.
3. **Náhradou neekologických zdrojů energie více ekologickými zdroji.** Hlavním záměrem tohoto bodu je zcela odstavit všechny zdroje využívající fosilní paliva (převážně uhelné elektrárny) a nahradit je obnovitelnými zdroji energie (OZE) nebo jinými nízko emisními zdroji elektrické energie, jako jadernými elektrárnami. Vzhledem k stále přetrvávajícímu odporu veřejnosti vůči jaderné energetice se ovšem OZE stávají preferovaným kandidátem.
4. **Snížení emisí tvořené dopravním průmyslem.** Lze docílit používáním biopaliv nebo náhradou klasického spalovacího motoru za motor elektrický.
5. Snížením tvorby metanu v zemědělském průmyslu. Lze docílit lepším složením krmiv pro chovný dobytek. Alternativou je také možné snížení celkového množství chovaného dobytka za předpokladu možného snížení spotřeby masa.

Pokud dle bodu 2. zvýšíme účinnost nízko emisních zdrojů elektrické energie, tak nám samozřejmě vzroste i množství vyrobené elektrické energie. Obdobně v bodě 3. dojde k náhradě vysoko emisních elektráren OZE. V obou případech dojde k celkovému zvýšení vyrobené elektrické energie pomocí OZE. Skoro všechny OZE jsou ovšem silně závislé na přírodních podmínkách, které my ovládat nemůžeme. Proto, aby bylo možné tyto zdroje provozovat efektivně po celý den je zapotřebí k těmto zdrojům připojit právě **akumulátory energie**.

Akumulátory pomáhají udržovat stálou dodávku elektrické energie i pokud je síť napájena nestabilními zdroji elektrické energie, jako právě OZE. Pokud by chtělo lidstvo dosáhnout

skleníkové neutrality za použití pouze OZE, tak bude zapotřebí investovat nemalé prostředky právě do akumulace energie.



Obrázek 1.1. Výroba některých druhů OZE v ČR dne 02.02.2021 [30]

Na obr. 1.1 je uveden diagram výroby některých zdrojů obnovitelné energie. VE jsou všechny vodní elektrárny vyjma přečerpávacích. VTE jsou větrné elektrárny a FTE jsou fotovoltaické elektrárny. Z těchto dat vyplývá, že uvedené OZE jsou silně závislé nejen na počasí, ale také na denní době.

Další motivací pro akumulaci energie jsou elektrárny pracující v základním zatížení. Jedná se o elektrárny, které se velmi obtížně regulují a nebo jejich vypnutí může odstavit elektrárnu na velmi dlouhou dobu. Mezi tyto elektrárny patří elektrárny jaderné, vodní průtočné, kondenzační a teplárny. Například u kondenzačních elektráren je nemožné jejich krátkodobé vypnutí. Pro jejich zpětné nahazení je zapotřebí znovu dostat kotel do provozních parametrů, což může dle velikosti kotle trvat i týdny. Protože tyto elektrárny fungují v podstatě non-stop, je nemožné zabránit situaci, kdy budou fungovat v době menší spotřeby elektrické energie oproti její výrobě. Použitím akumulátorů elektrické energie lze alespoň část této přebytečné energie zachovat a využít. Tato akumulovaná energie se vrací do sítě v takzvaných špičkách, nebo-li denních maximech spotřeby elektrické energie.

Dle bodu 4. lze snížit množství vyrobených emisí také náhradou dosavadních automobilů se spalovacím motorem za automobily s elektromotory. Všechna elektrická auta ovšem momentálně ke svému fungování potřebují baterie, který slouží jako jejich zdroj elektrické energie. Problémem oproti doposud popisovaným akumulátorům je, že tyto akumulátory musí být především kompaktní a bezpečné. Zároveň je důležité si uvědomit, že tyto automobily se také budou muset nabíjet. Pokud by všechny současně využívané automobily se spalovacími motory byly nahrazeny elektrickými automobily, tak by to elektrizační soustava v současném dimenzování nezvládla. Proto, aby byl tento bod tedy realizovatelný je zapotřebí nejdříve zvýšit celkové množství vyrobené elektrické energie. Také je zapotřebí, aby předchozí 2 body byly do určité míry splněny, tedy aby byla elektrická energie vyráběna za pomoci nízko emisních zdrojů. K napájení těchto automobilů by bylo zapotřebí velké množství energie. Pokud by zdroje této energie byli vysoko emisní, tak by mohly tyto zdroje ve finále tvořit více emisí než dosavadní spalovací automobily. Lidstvo by tedy udělalo, jak se říká, „jeden krok vpřed a dva kroky vzad“.

Tato práce se bude zabývat právě popisem některých způsobů akumulace energie, jejich praktickou realizací a následně jejich porovnáním a návrhem jejich vhodné aplikace.

**První kapitola** se bude zabývat právě možnými metodami akumulací energie a jejich fyzikálními principy. Dále budou popsány některé systémy, které tyto metody využívají.

**Druhá kapitola** se bude zabývat stanovením relevantních kritérií vhodných pro porovnání zmíněných druhů akumulátorů energie.

**Třetí kapitola** se bude zabývat aplikací kritérií stanovených v předchozí kapitole pro akumulátory popsané v kapitole.

**Čtvrtá kapitola** se bude zabývat finálním porovnáním akumulátorů energie stanovenými kritérii.

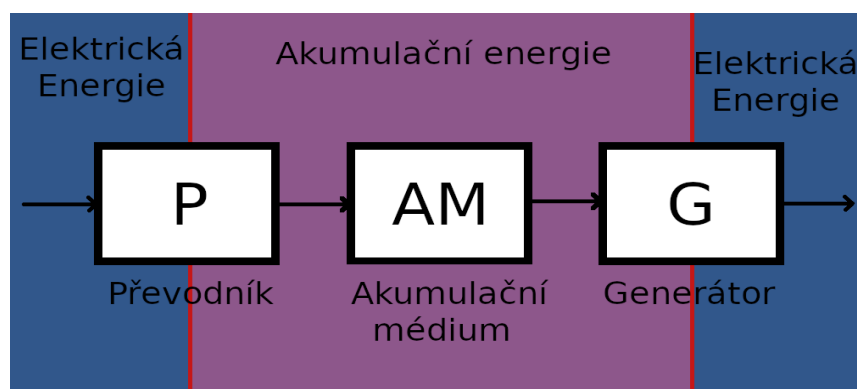
## 2. Seznam symbolů a zkratek

J.....	Joule
kg.....	Kilogram
t.....	Tuna
m.....	Metr
s.....	Sekunda
rad.....	Radián
Pa.....	Pascal
W.....	Watt
Wh.....	Watt hodina
V.....	Volt
°C.....	Stupeň Celsia
K.....	Kelvin
A.....	Ampér
F.....	Farad
H.....	Henry
€.....	Euro
PHS.....	Pumper Hydroelectric Storage = Přčerpávací vodní elektrárna
CAES.....	Compressed Air Energy Storage = Akumulátor na stlačený vzduch
TES.....	Thermal Energy Storage = Akumulátor termální energie
SMES.....	Superconducting Magnetic Energy Storage = Supravodivý akumulátor magnetické energie

### 3. Metody akumulace energie

Elektrická energie je ve větším množství nesnadno skladovatelná. Princip akumulace elektrické energie je proto založen na zákonu zachování energie. Tedy, že energie se nedá vytvořit a ani zničit. Dá se pouze přeměnit z jednoho druhu energie na jiný druh energie. V principu lze jakýkoliv druh energie přeměnit, ovšem v této práci se budeme dále zabývat pouze přeměnou elektrické energie. V akumulátorech **elektrické** energie se toho využívá následujícím způsobem:

1. Elektrická energie se přemění na jiný druh energie pomocí převodníku
2. Přeměněná energie je akumulována ve formě akumulární energie v akumulárním prvku a vyčkává na využití
3. Při požadavku na použití je akumulována energie přeměněna zpět na elektrickou energii pomocí generátoru



Obrázek 3.1. Schéma obecného akumulátoru pro elektrickou energii

Tato energie je akumulována do systému s konkrétní akumulární technologií. V teorii se dá k akumulaci využít jakýkoliv druh energie. V praxi se ovšem používají pouze některé druhy energie. Důvodem může být složitost technické realizace, ekonomická náročnost nebo i bezpečnost. Je také důležité zmínit, že ne všechny akumulátory energie obsahují převodník či generátor. Příkladem mohou být koncentrační solární elektrárny, kde je energie přímo ukládána ve formě tepla. Naopak jiné tepelné akumulátory nemají generátor a pouze akumulovanou energii používají k vytápění domácností.

O některých druzích energie, které se využívají v akumulátorech se bude zabývat právě tato kapitola. Cílem této kapitoly bude popsat základní fyzikální princip daného akumulátoru, popsat některá možná akumulární média v něm užívaná a na závěr jeho praktickou realizaci.

### 3.1. Kinetická energie

#### a) Princip

Podle druhu pohybu lze rozdělit kinetickou energii na:

1. Kinetická energie lineárního pohybu:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.1.1)$$

kde:  $E_k$  kinetická energie (J)

$m$  je hmotnost tělesa (kg)

$v$  je rychlost ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

2. Kinetická energie rotačního pohybu:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (3.1.2)$$

kde:  $E_k$  kinetická energie (J)

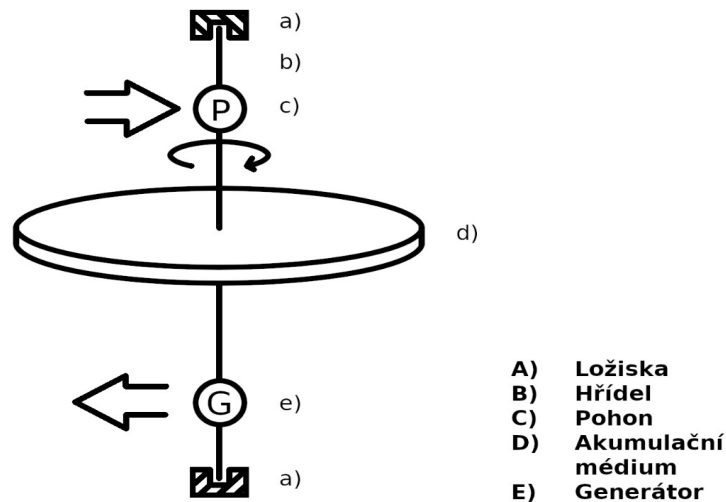
$J$  je moment setrvačnosti tělesa ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )

$\omega$  je úhlová rychlost ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )

U akumulátorů založených na akumulaci kinetické energie se využívá pouze rotační pohyb a proto nadále budeme hovořit pouze o kinetické energii získané ze vzorce (3.1.2).

Množství akumulované energie je tedy úměrné kvadrátu uhlové rychlosti. Provozní otáčky na které je akumulátor konstruován označme  $\omega_p$ . Maximální otáčky, které jsou dány pevností materiálu označme  $\omega_{\max}$ . Metodika akumulace kinetické energie je tedy následující:

1. Akumulátor je roztočen do provozních otáček  $\omega_p$ . Energie vynaložena na toto roztočení je přibližně rovna energii akumulované v akumulátoru  $E_k$ .
2. Akumulovaná energie je držena akumulacním prvku a čeká na využití. Tato energie je pomalu ztrácena. Ztráty jsou způsobeny třením v ložiscích a také třením samotného akumulátoru o okolní prostředí (vzduch).
3. Při požadavku na využití bude generátor přeměňovat kinetickou energii zpět na elektrickou. Tím se začne akumulátor pozvolna zpomalovat až do jeho úplného zastavení při  $E_k = 0$ .



Obrázek 3.1.1. Metoda akumulace kinetické energie rotačního tělesa

### b) Druhy akumuláčnických prvků

Analýzou vzorce (3.1.2) dojdeme k závěru, že množství akumulované energie je dáno momentem setrvačnosti  $J$  a kvadrátem uhlové rychlosti  $\omega$ .

Moment setrvačnosti  $J$  je dán obecným vztahem:

$$J = \int_V r^2 \rho dV \tag{3.1.3}$$

kde:  $J$  je moment setrvačnosti ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )

$r$  je kolmá vzdálenost od osy otáčení (m)

$V$  je objem tělesa ( $\text{m}^3$ )

$\rho$  je hustota tělesa ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Integrací kvadrátu kolmé vzdálenosti od osy otáčení přes objem tělesa získáme moment setrvačnosti. Pro jednoduchost zanedbáme hřídel, pohon a generátor a zaměříme se pouze na akumuláčnické médium, které je označeno v Obr 3. písmenem d). Budeme předpokládat válec o konstantní výšce  $h$ , konstantním poloměru  $r$  a o konstantním objemu  $\rho$ . Pokud budeme předpokládat konstantní hustotu tak lze vzorec (3.1.3) upravit do následujícího stavu:

$$J = \rho \cdot \int_V r^2 dV \tag{3.1.4}$$

Funkce objemu válce s parametrem poloměru je:

$$V(r) = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (3.1.5)$$

Totální diferenciál dV pak bude roven:

$$dV = \frac{\partial V(r)}{\partial r} dr = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \cdot dr \quad (3.1.6)$$

Dosazením dV do vzorce (2.1.4) získáme vztah:

$$J = \rho \cdot \int_0^r r^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \cdot dr = \rho \cdot \int_0^r 2 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot h \cdot dr \quad (3.1.7)$$

Budeme integrovat přes oblast 0 až r. Výsledným dosazením a řešením určitého integrálu dostaneme finální vzorec pro moment setrvačnosti válcového tělesa:

$$J = \rho \cdot \int_0^r 2 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot h \cdot dr = \rho \cdot \left[ \frac{\pi \cdot r^4 \cdot h}{2} \right]_0^r = \rho \cdot \left( \frac{\pi \cdot r^4 \cdot h}{2} - 0 \right) = \frac{\rho \cdot \pi \cdot r^4 \cdot h}{2} = \frac{m \cdot r^2}{2} \quad (3.1.8)$$

Dosazením vztahu (3.1.8) do vzorce (3.1.2) získáme konečný vztah pro množství akumulované energie

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot r^4 \cdot h}{2} \cdot \omega^2 = \frac{\rho \cdot \pi \cdot r^4 \cdot h}{4} \cdot \omega^2 = \frac{m \cdot r^2}{4} \cdot \omega^2 \quad (3.1.9)$$

Moment setrvačnosti je tedy úměrný výšce válce h, poloměru válce r, a hustotě  $\rho$ . Pokud budeme požadovat zvýšení energetické kapacity akumulátoru beze změny rozměrů, tak lze pouze změnit hustotu  $\rho$  a úhlovou rychlost  $\omega$ . Lze použít praktičtější vzorec, který udává velikost akumulované elektrické energie na jednotku hmotnosti. Opět předpokládáme konstantní hmotnost m.



$$e_m = \frac{E_k}{m} = \frac{\frac{m \cdot r^2}{4} \cdot \omega^2}{m} = \frac{r^2 \omega^2}{4} \quad (3.1.10)$$

kde:  $e_m$  je měrná kapacita akumulátoru při daném  $r$  a  $\omega$  na jednotku hmotnosti v  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Dále se užívá vztah (3.1.11) který udává měrnou elektrickou kapacitu z tvaru, pevnosti a hustoty materiálu prvku.

$$e_m = K \frac{\sigma}{\rho} \quad (3.1.11)$$

kde:  $e_m$  je měrná kapacita akumulátoru na jednotku hmotnosti ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$K$  je činitel tvaru (-)

$\sigma$  je maximální pevnost v tahu (Pa)

$\rho$  je hustota látky ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Ze vztahu (3.1.11) zjistíme, že měrná kapacita akumulátoru je přímo úměrná mechanické pevnosti a nepřímo úměrná hustotě. Nejlepším akumulačním prvkem tedy bude takový materiál, který bude mít co nejvyšší pevnost a co nejnižší hustotu. Těmto podmínkám nejlépe vyhovují uhlíkové kompozitní materiály.

Konstanta  $K$  ze vztahu (3.1.11) je bezrozměrné číslo představující tvar prvku.

Tabulka 3.1.1. Porovnání vlastností jednoho druhu uhlíkového kompozitu a slitiny titanu[1][4]

	Uhlíkový kompozit	Slitina titanu
Značící číslo	M46J-6000-50B	R56320
Pevnost $\sigma$ (MPa)	4200	620
Hustota $\rho$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 840	4 480
Výsledná kapacita $e_m$ ( $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	384	23





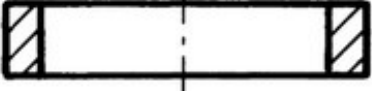


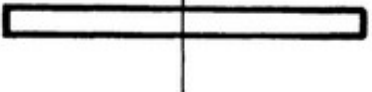

Výběrem příslušných hodnot z tab 3.1.1. a použitím správné hodnoty činitele tvaru  $K$  podle (Obr. 3.1.2) jsme mohli dosadit do vztahu (3.1.11) a vypočítat měrnou energetickou kapacitu  $e_m$ .

$$e_{\text{kompozit}} = K \frac{\sigma}{\rho} = 0.606 \cdot \frac{4200}{1840} = 1.383 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 384 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.1.12)$$

$$e_{\text{titan}} = K \frac{\sigma}{\rho} = 0.606 \cdot \frac{620}{4480} = 0.083 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 23 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.1.13)$$

Z výše uvedených výpočtu je patrné že kompozit uhlíku má  $\frac{e_{kompozit}}{e_{titan}} = 16.67$  krát větší měrnou energetickou kapacitu než slitina titanu.

TABLE 3.1. Shape factor  $K$  and velocity factor  $\xi$  for some disc, rim and bar flywheel shapes.

		K	$\xi$
constant stress disc (theoretical, $r_o \omega \rightarrow \infty$ )		1	$\infty$
constant stress disc (real)		0.7÷0.98	1.7÷3.0
conical disc		0.7÷0.95	1.7÷3.0
constant thickness disc		0.606	1.56
thin rim		0.5	1.0
constant stress bar (theoretical)		0.5	$\infty$
disc with rim		0.4÷0.5	1.0÷1.1
cylindrical bar		0.333	1.4
pierced constant thickness disc		0.303	1.1

Obrázek 3.1.2. Příklady různých tvarů setrvačnicku a jejich činitele tvaru  $K$  [32]

### c) Praktické řešení

#### Motorgenerátor [5]

Motorgenerátor slouží k pohonu rotoru akumulátoru a také k zpětné přeměně kinetické energie na energii elektrickou. Nejpoužívanější druhy motorgenerátorů pro setrvačnickové akumulátory jsou:

- **Synchronní stroj s permanentními magnety:** V porovnání se synchronním strojem s vinutým rotorem tento stroj nepotřebuje ke své funkci kroužky a kartáče. Tím se odstraní případné třecí ztráty v nich vznikající. Tento stroj má vysokou účinnost, nízké ztráty a vysokou kompaktnost.
- **Asynchronní stroj:** Používá bezkontaktní indukční vazbu mezi rotorem a statorem. Tím se snižují případné ztráty, které by kontaktní vazba přinášela. Výhodou těchto strojů je nízká pořizovací cena, vysoká spolehlivost a veliká robustnost. Hlavní využití tento stroj má ve vysoko výkonových aplikacích.
- **Bezkartáčový stejnosměrný stroj:** Konstrukčně je stroj velice podobný synchronnímu stroji s permanentními magnety. Tato varianta stejnosměrného stroje nepotřebuje ke svojí funkci komutátor. Rotor je tvořen permanentními magnety. Stator je napájen střídačem, který nahrazuje funkci komutátoru. Výhodou tohoto stroje je vysoká kompaktnost.
- **Spínaný reluktanční stroj:** Dokáže pracovat i v nepříznivém prostředí o vysokých teplotách

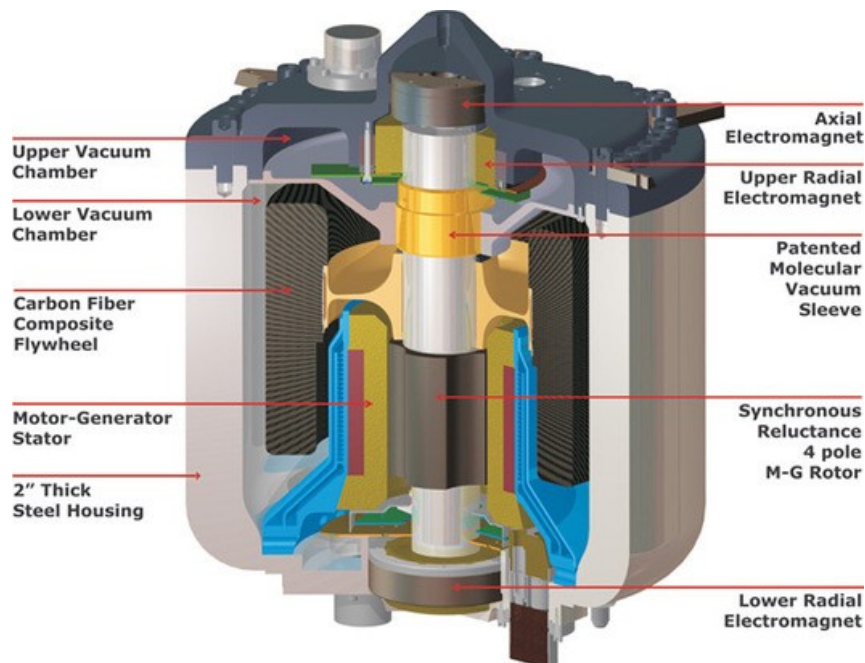
#### Ložiska [5]

Ložiska rotoru slouží k udržení rotoru ve správné ose otáčení a k jeho správnému otáčení. Bohužel v nich také vznikají největší ztráty z celého soustrojí. Tyto ztráty lze snížit použitím magnetických ložisek. Magnetická ložiska nepotřebují k držení rotoru přímý kontakt s povrchem statoru a tedy v nich ani nedochází k žádnému tření. Tyto ložiska se dělí do 3 kategorií:

- **Pasivní magnetické ložiska:** Jsou tvořena permanentními magnety. Kvůli jejich nestabilitě musí být ještě doplněny o další druh ložisek. Nevýhodou je také jejich nižší síla. Proto je nelze použít u velmi těžkých rotorů.
- **Aktivní magnetická ložiska:** Jsou tvořena elektromagnety. Mají dlouhou životnost, velkou sílu a možnost regulace. Nevýhodou jsou napájecí ztráty. Používají se u těžších rotorů.
- **Supravodivá magnetická ložiska:** Využívají efektu supravodivosti k získání maximální síly a minimálních ztrát. Vstupní náklady jsou ze tří zmíněných nejvyšší. Mají univerzální použití.

## Materiál setrvačnicku

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole 3.1.b tak nejmodernějším řešením je použití uhlíkových kompozitů. Tvar setrvačnicku musí být takový, aby činitel tvaru  $K$  byl co možná největší.



Obrázek 3.1.3. Reálný rozpoložení setrvačnickového akumulátoru[38]

## 3.2. Gravitační potenciální energie

### a) Princip

Vzorec pro výpočet gravitační potenciální energie:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (3.2.1)$$

kde:  $E_p$  je gravitační potenciální energie (J)

$m$  je hmotnost tělesa (kg)

$g$  je gravitační zrychlení ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

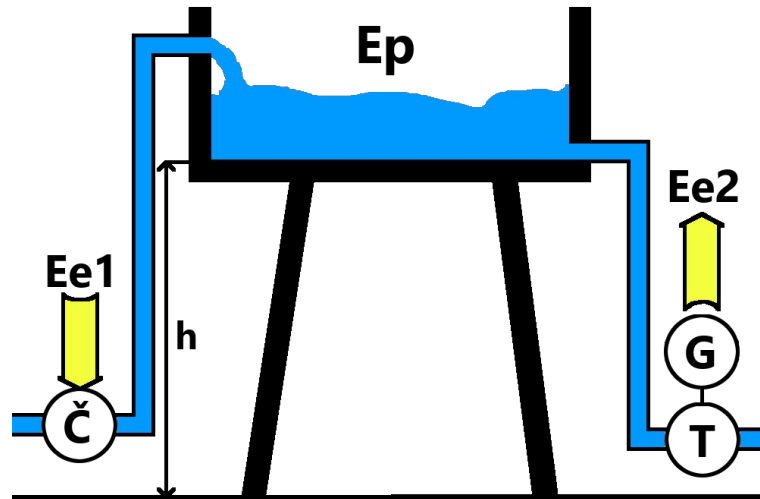
$h$  je výška nad povrchem (m)

Metodika by tedy vypadala následovně:

1. Pomocí elektrického motoru bude těleso o hmotnosti  $m$  vyzvednuto od povrchu o výšku  $h$ .
2. Toto těleso bude v místě  $h$  vyčkávat na využití.
3. Těleso bude z této výšky puštěno a tato energie bude pomocí dalšího elektrického stroje přeměně zpět na elektrickou energii.

Elektrickou energii vynaloženou na vyzvednutí média do výšky  $h$  označme  $E_{e1}$

Elektrickou energii získanou zpětnou přeměnou potenciální energie média z výšky  $h$  označíme  $E_{e2}$



Obrázek 3.2.1. Metoda akumulace potenciální gravitační energie

### b) Druhy akumuláčnických médií

Ze vzorce (3.2.1) vyplývá že kapacita akumulátoru tohoto typu je dána výškou spádu a celkovou možnou hmotností látky uložené ve výšce spádu. Tuto hmotnost můžeme jednoduše vypočítat vzorcem:

$$m = \rho \cdot V \quad (3.2.2)$$

kde:  $m$  je hmotnost tělesa (kg)

$\rho$  je hustota látky užitá k akumulaci ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$V$  je celkový objem látky, který lze uložit do výšky spádu ( $\text{m}^3$ )

Dosažením vztahu (3.2.2) do vzorce (3.2.1) získáme následující vztah, který nám stanovuje maximální možnou uloženou energii v akumulátoru.

$$E_{pmax} = \rho \cdot V \cdot g \cdot h \quad (3.2.3)$$

Objem látky  $V$  a výška spádu  $h$  je dána konstrukčním provedením akumulátoru. Gravitační zrychlení  $g$  budeme předpokládat konstantní. Jediná hodnota hustoty látky  $\rho$  je dána druhem akumulačního média.

Jako akumulační médium samotné lze využít jak kapalinu tak i látku pevnou. Ovšem použití pevné látky je momentálně obtížně realizovatelné. Z tohoto důvodu se používá pouze kapalina.

Použitím různých kapalin o různých hustotách lze tedy měnit i velikost akumulované energie. Nelze ovšem využít jakoukoliv kapalinu. Vybraná kapalina musí splňovat řadu kritérií.

1. Hustota nesmí být příliš velká: Se zvyšující se hustou logicky roste i hmotnost kapaliny. Při vypuštění kapaliny, která by byla příliš hmotná může tedy nastat poškození nebo i zničení turbíny. Také musíme docílit toho, aby čerpadlo bylo dostatečně silné pro vyzvednutí této kapaliny do výšky spádu.
2. Náročnost uskladnění: Kapalina musí mít parametry co nejvhodnější na to, aby bylo možné ji co nejdéle uchovat v naakumulovaném stavu. Pokud by kapalina měla příliš nízký bod varu, tak by docházelo k velikým ztrátám způsobeno jejím vypařováním. Docházelo by k pozvolnému snižování hmotnosti  $m$  a tedy i naakumulované energie  $E_p$  dle vztahu (3.2.1). Důležité je také aby kapalina neměla příliš vysoký bod tání. Pokud by kapalina přešla do tuhého skupenství tak by bylo nemožné jí využít k zpětné přeměně na elektrickou energii. Případně by bylo potřeba manipulovat s tlakem kapaliny, to by ovšem mělo značný vliv na celkovou cenu akumulátoru.
3. Nákladnost: Dalším důležitým parametrem je nákladnost na provoz akumulátoru s touto kapalinou. Podle bodu 1. nelze využít kapaliny příliš velkých hustot. Jediným reálným způsobem jak tedy zvýšit maximální kapacitu akumulátoru dle vztahu (3.2.3) je zvýšením objemu  $V$ . Tímto objemem  $V$  je myšlen maximální objem akumulátoru daný jeho konstrukcí, ale také množství kapaliny které bude zapotřebí pro jeho plné nabití.

Z těchto důvodů se jako akumulační médium pro akumulátory tohoto druhu využívá pouze voda.

Tabulka 3.2.1. Parametry vody za atmosférické tlaku

Hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	998
Teplota tání ( $^{\circ}\text{C}$ )	0
Teplota varu ( $^{\circ}\text{C}$ )	100

Voda má ideální hustotu, relativně vysoký bod varu a je snadno dostupná. Také má nulový enviromentální dopad, a tedy dovoluje stavět vodní akumulátory otevřené.

Dosažením průtoku  $Q$  do vztahu (3.2.3) získáme následující vztah

$$E_{pmax} = \rho \cdot Q \cdot t \cdot g \cdot h \quad (3.2.4)$$

$$P_m = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \quad (3.2.5)$$

Vynásobením celkové účinnosti soustrojí turbogenerátoru získáme vzorec pro elektrický výkon

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \cdot \eta_g \quad (3.2.6)$$

kde:  $P$  je elektrický výkon soustrojí turbogenerátoru (W)

$\rho$  je hustota látky užitá k akumulaci ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$Q$  je průtok vody turbínou ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$g$  je gravitační zrychlení ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

$h$  je výška nad povrchem (m)

$\eta_g$  je účinnost turbogenerátoru (-)

### c) Praktické řešení

Prakticky se řeší tyto akumulátory jako takzvané **přečerpávací vodní elektrárny (PVE, anglicky PHS)**. Elektrárna je tvořena dvěma nádržemi, horní a dolní. Tyto nádrže jsou propojeny spádovým potrubím. V tomto potrubí je umístěno soustrojí Francisovy turbíny, které lze použít jako klasickou turbínu tak i jako čerpadlo. Tato turbína je dále připojena na motorgenerátor. Provozní stav motorgenerátoru je dán stavem elektrárny.

Pokud bude elektrárna pracovat ve stavu spotřebiče (energie bude akumulována) , tak bude motorgenerátor pracovat jako motor a soustrojí bude pracovat jako čerpadlo. Ve stavu , kdy bude elektrárna pracovat jako zdroj (energie bude vracena do sítě) bude motorgenerátor pracovat jako generátor a soustrojí bude pracovat jako turbína.

Dosažením konstant do vzorce (3.2.6) dostaneme vzorec pro výkon jednoho soustrojí ve stavu zdroje elektrické energie

$$P_{PVE} = 998 \cdot Q \cdot 9.8 \cdot h \cdot \eta_g = 9780 \cdot Q \cdot h \cdot \eta_g \quad (3.2.7)$$

Následnou úpravou vzorce (3.2.7) získáme vztah pro výpočet množství čerpané vody čerpadly ve stavu akumulace energie

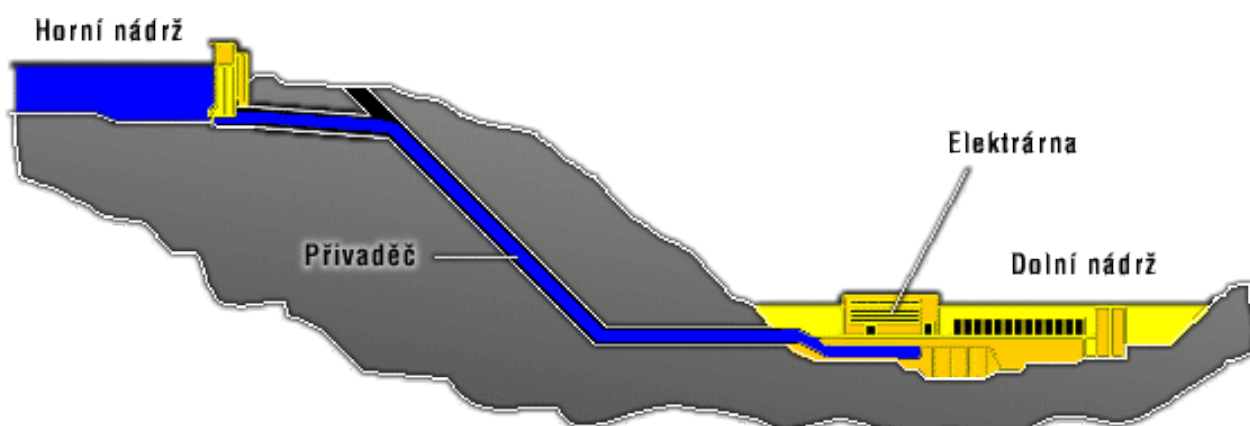
$$Q = \frac{P_M}{9780 \cdot h \cdot \eta_m} \quad (3.2.8)$$

kde:  $Q$  je čerpané množství vody turbínou ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$P_M$  je elektrický příkon soustrojí čerpadla (W)

$h$  je výška nad povrchem (m) (spád)

$\eta_m$  je účinnost turbogenerátoru (-)



Obrázek 3.2.2. Obecný příklad přečerpávací vodní elektrárny [34]



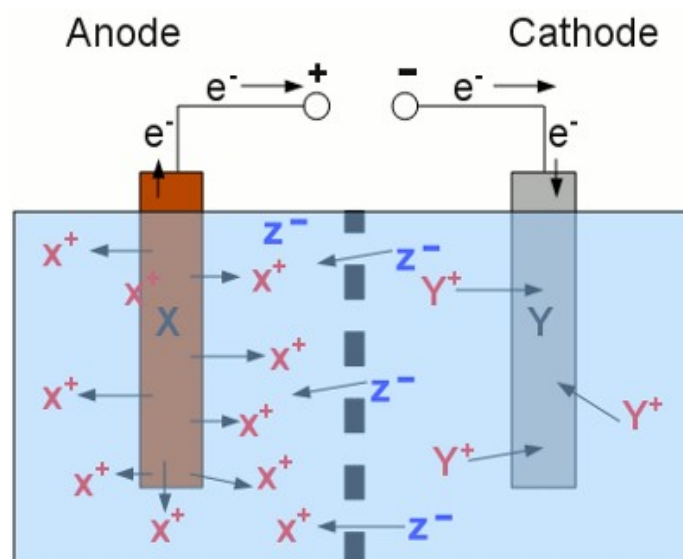
Obrázek 3.2.3. Přečerpávací elektrárna Dlouhé Stráně [35]



### 3.3. Chemická energie

#### a) Princip

Chemické akumulátory, neboli sekundární články fungují na principu ukládání elektrické energie přeměnou na energii chemickou. Obecně je galvanický článek tvořen dvěma poločlánky oddělenými polopropustnou membránou. Každý poločlánek se skládá z elektrody ponořené do svého vlastního roztoku. Při propojení elektrod dochází k průchodu proudu, který vzniká oxidací elektrody. Tento proud teče do katody, kde dochází k redukci elektrody, čímž vzniká pokovení. To má za následek postupné snižování hmotnosti anody a naopak zvyšování hmotnosti katody. Aby tento děj byl kontinuální, je zapotřebí dovolit vyrovnání nábojů obou elektrod. Pokud by to nebylo možné, tak by se roztok zcela nabíjel na příslušný náboj a nadále by nevznikalo elektromotorické napětí a netekl by tedy žádný proud. Soustava by se ustálila. Aby se tomu zabránilo, tak musí být vodivě propojeny oba roztoky tak, aby mezi nimi mohly téct ionty. Toho se docílí díky polopropustné membráně, která propouští pouze ionty molekul daného roztoku. Tímto způsobem funguje galvanický článek jako zdroj elektrické energie. Aby bylo možné ovšem mluvit o akumulátoru, tak musí být schopen se článek také nabíjet, tedy se chovat jako spotřebič. V případě, že tuto podmínku článek nespĺňuje, tak hovoříme o článku primárním. V opačném případě o článku sekundárním. Připojením vnějšího zdroje napětí, který bude mít záporný potenciál připojen na anodu (-) a kladný potenciál na katodu (+) dojde ke změně směru proudu. Tento proud bude redukovat anodu a oxidovat katodu. Začne tedy docházet k opačnému ději než byl popsán v minulém odstavci.



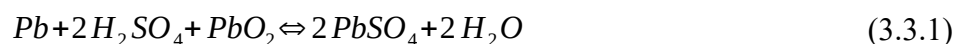
Obrázek 3.3.1. Sekundární článek [36]

## b) Druhy akumulačních médií a realizace

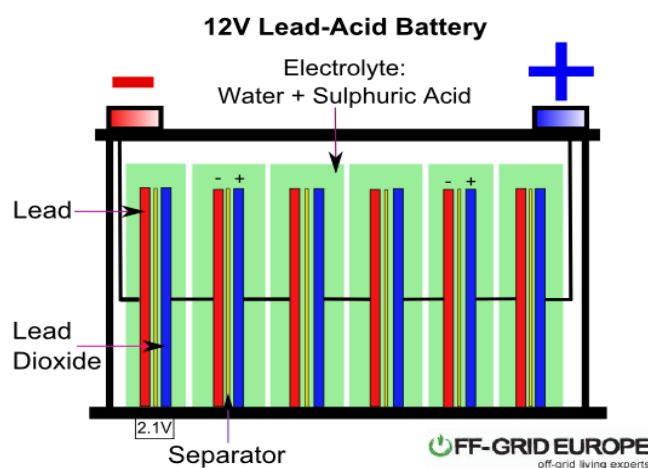
Tabulka 3.3.1. Porovnání některých používaných chemických akumulátorů [6]

Médium	Olovo	NI-Cd	Ni-MH	Li-ion		
				Kobalt	Mangan	Fosfát
Měrná kapacita (Wh·kg <sup>-1</sup> )	30-50	45-80	60-120	150-250	100-150	90-120
Počet cyklů nabíjení	200-300	1000	300-500	500-1000	500-1000	1000-2000
Samo vybíjení (%·měsíc <sup>-1</sup> )	5	20	30	5		
Napětí článku (V)	2	1.2	1.2	3.6	3.7	3.2
Efektivita (%)	~90	~70 pomalé ~90 rychlé		99		
Toxicita	vysoká	střední		nízká		

- Olověné akumulátory: Svoje hlavní uplatnění má v automobilovém průmyslu jako autobaterie. Jeho anoda je tvořena houbovitým olovem (Pb) a jeho katoda oxidem olova (PbO<sub>2</sub>). Jako elektrolyt se používá zředěná kyselina sírová (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Úplná chemická rovnice má následující tvar:

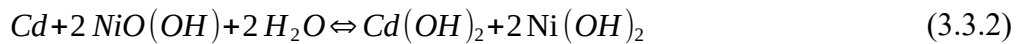


- Mezi jeho hlavní výhody patří nízká pořizovací cena a velká odolnost proti rázovým proudům. Hlavní nevýhodou je naopak jeho nízká životnost. Použitá kyselina sírová je vysoce nebezpečná pro životní prostředí. Proto jsou kladeny vysoké požadavky na ekologické zpracování vysloužilých olověných akumulátorů.

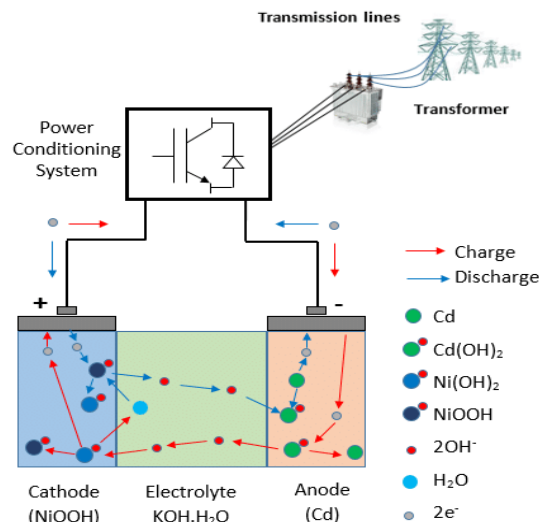


Obrázek 3.3.2. Olověný akumulátor jako autobaterie [37]

- Nikl-kadmiové akumulátory (Ni-Cd): Anoda je tvořena kadmíem Cd a katoda oxidem hydroxidu niklitého NiO(OH). Jako elektrolyt se používá zásaditý vodný roztok hydroxidu draselného KOH. Celková chemická reakce je:



Mezi hlavní výhody těchto akumulátorů patří vysoká rychlost nabíjení, dlouhá životnost a nízká poměrná cena vzhledem k počtu cyklů. Nevýhodou je toxicita kadmia. Všechny nikl-kadmiové akumulátory musí být tedy podobně jako olověné akumulátory ekologicky zpracovány. Další nevýhodou je vysoká samo vybíjení které může být až 20% za měsíc (viz tab 3.3.1)



Obrázek 3.3.3. Příklad Ni-Cd akumulátoru [11]

- Nikl-metal hydridový akumulátor (Ni-MH): Katoda je tvořena obdobně jako u Ni-Cd oxidem hydroxidu niklitého NiO(OH) a anoda je tvořena kovovým hydridem MH. Elektrolyt se používá stejně jako u Ni-Cd hydroxid draselný KOH. Celková chemická reakce je:

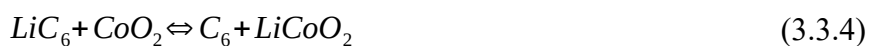


Přední výhodou oproti Ni-Cd je o 30-40% vyšší energetická kapacita. Oproti Ni-Cd také neobsahují toxické kadmium a jsou tedy ekologicky nezávadné. Nevýhodou je menší životnost a vyšší úroveň samo vybíjení.

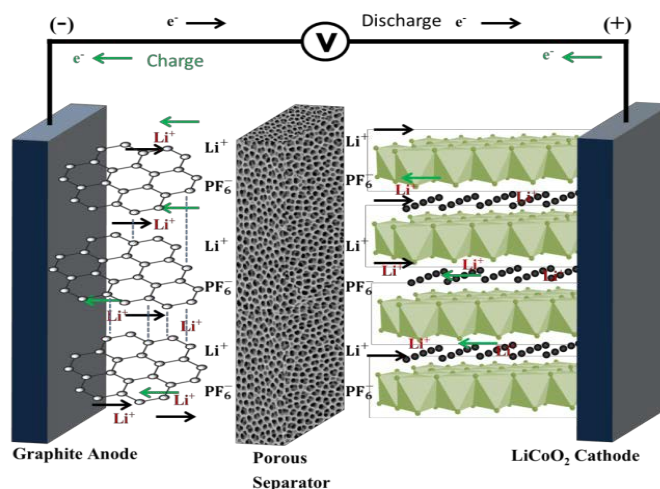
Tabulka 3.3.2. Materiály hydridů kovů MH Ni-MH akumulátorů [7]

A <sub>x</sub> B <sub>y</sub> třída	Materiál A	Materiál B	Kapacita (mA/g)	Poznámka
AB <sub>5</sub>	Mishmetal La Ce Ti	Ni Co Mg Al	300	Nejpoužívanější materiál pro Ni-MH
AB <sub>2</sub>	V Ti	Zr Ni (+ Cr,Co,Fe nebo Mn)	400	Základ více materiálových slitin pro některé akumulátory
AB	Zr Ti	Ni Fe Cr V		Používáno dříve
A <sub>2</sub> B	Mg Ti	Ni		

- Li-ion akumulátory: Materiál katody je oxid lithium-kov a anody uhlík (C). Elektrolytem je lithiová sůl v organickém rozpouštědle. Mezi kovy používanými na katodě patří kobalt, mangan a fosfát. Chemická rovnice pro Li-ion články který má anodu z oxidu lithium-kobalt:



Mezi zásadní výhody Li-ion patří jejich energetická kapacita a životnost. Vyznačují se nízkou úrovní samo vybíjení a vysokou efektivitou. Mezi hlavní nevýhody patří cena.

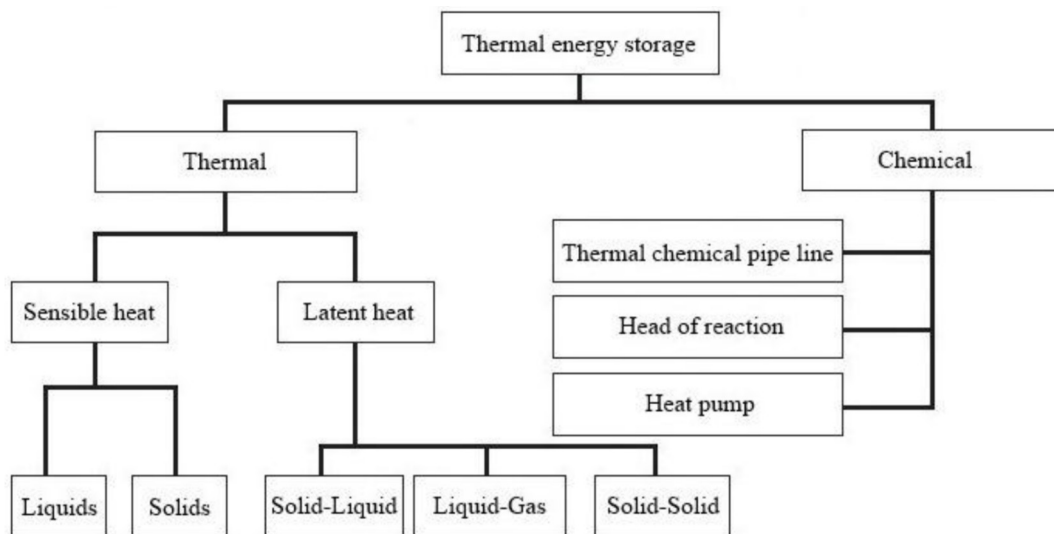


Obrázek 3.3.4. Li-ion články s kobaltovou katodou [33]

### 3.4. Tepelná energie

#### a) Princip

Tepelné akumulátory (zkratka TES – Thermal Electric Storage) pracují na principu ohřívání akumulčního média které poté přes výměník generuje zpětně elektrickou energii. K tomuto ohřevu se nevyužívá pouze elektrický ohřev, ale také sluneční ohřev či odpadní teplo. Principiálně se dají tepelné akumulátory rozdělit na množství druhů podle druhu akumulčního média.



Obrázek 3.4.1. Rozdělení tepelných akumulátorů[8]

Nadále budeme hovořit pouze o tepelných akumulátorech na principu citelného tepla (Sensible heat storage SHS) a latentního (skupenského) tepla (Latent Heat Storage LHS).

#### Citelné teplo SHS

Jedná se o teplo, které je přímo úměrné teplotě média. Odebíráním energie se bude médium ochlazovat a dodáváním naopak ohřívát beze změny fáze.

Množství energie získané/vložené do SHS beze změny fáze je dáno vztahem pro teplo

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} m \cdot c_p \cdot dT \quad (3.4.1)$$

kde:  $m$  je hmotnost akumulčního média v kg

$c_p$  je měrná tepelná kapacita ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$t_1$  je počáteční teplota (K)

$t_2$  je koncová teplota (K)

$Q$  je vynaložená tepelná energie (kJ)

Latentní teplo LHS

Latentní teplo je teplo, které mění skupenství média bez toho aby došlo ke změně teploty.

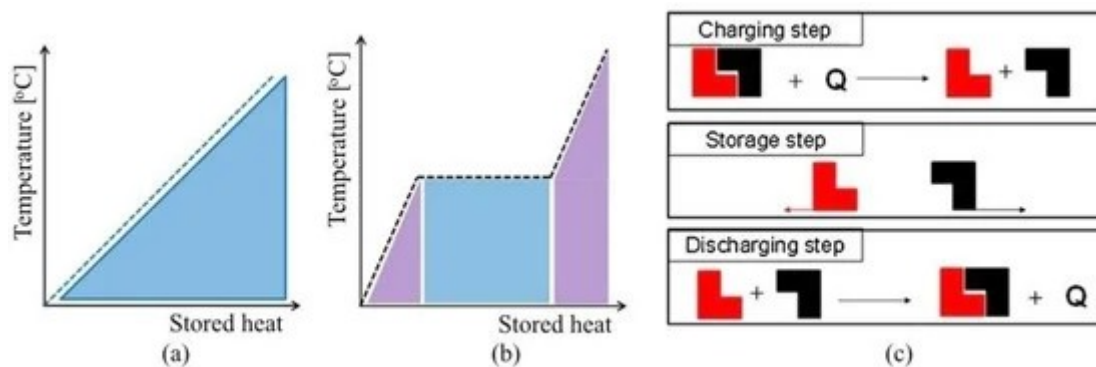
Množství energie získané/vložené do akumulačního média bez změny teploty je dáno vztahem

$$Q = m \cdot L \quad (3.4.2)$$

kde:  $m$  je hmotnost akumulačního média (kg)

$L$  je měrné latentní teplo ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$Q$  je vynaložena tepelná energie (kJ)



Obrázek 3.4.2. Principy tepelných akumulátorů [8]

a) Citelné teplo SHS

b) Latentní teplo LHS

c) Chemická reakce

## b) Druhy akumulačních médií

Podle principu ukládání energie lze rozlišit média na média pro systém SHS a pro systém LHS.

Systém SHS využívá jak tekutin jako voda nebo olej, tak také pevných látek jako betonu nebo žuly.

Hojně se dnes také využívají jako média sole, které mají výborné akumulační vlastnosti. Některé příklady těchto látek jsou uvedeny v tabulkách 3.4.1. a 3.4.2.

Tabulka 3.4.1. Média používaná pro systém SHS [8]

Médium	Druh tekutiny	Teplotní rozsah (°C)	Hustota (kg·m <sup>-3</sup> )	Měrná tepelná kapacita (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
Písek	-	20	1555	800
Kámen	-	20	2560	879
Beton	-	20	2240	880
Žula	-	20	2640	820
<b>Voda</b>	-	<b>0–100</b>	<b>1000</b>	<b>4190</b>
Calorie HT43	Olej	12–260	867	2200
Motorový olej	Olej	≤160	888	1880
Ethanol	Organická tekutina	≤78	790	2400
Propan	Organická tekutina	≤97	800	2500
Butan	Organická tekutina	≤118	809	2400
Isopentanol	Organická tekutina	≤148	831	2200
Oktan	Organická tekutina	≤126	704	2400

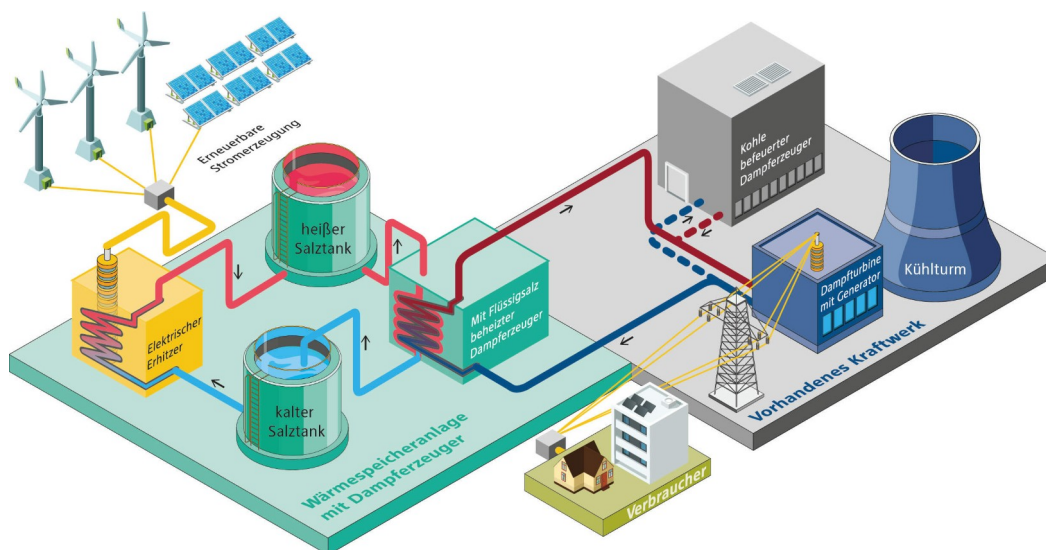
Do teploty 100 °C je v případě atmosférického tlaku nejlepším médiem voda, která má nejlepší vlastnosti a zároveň nejnižší cenu. Nad 100 °C se používají oleje, soli a tekuté kovy. Tyto příklady platí pouze za atmosférického tlaku. [8]

Tabulka 3.4.2. Příklady solí užívaných v systému SHS [9]

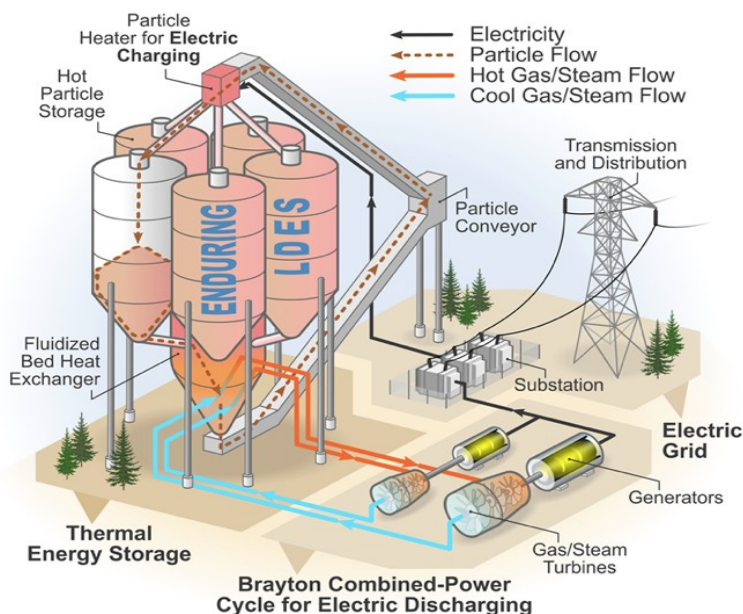
Teplonosné médium		Solar salt	Hitec®	Hitec XL	Voda
Složení [%]	NaNO <sub>3</sub>	60	40	7	-
	KNO <sub>3</sub>	40	53	45	-
	NaNO <sub>2</sub>	-	7	-	-
	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	48	-
Teplota tání (°C)		220	142	120	0
Hustota při 300 °C (kg·m <sup>-3</sup> )		1899	1640	1992	712.5
Viskozita při 300 °C (mPa·s)		3.26	3.16	6.37	0.086
Tepelná kapacita při 300 °C (kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )		1.46	1.56	1.45	5.75

**c) Praktické řešení**

V případě , že chceme aby akumulátor generoval elektrickou energii, tak je zapotřebí použít tepelný výměník. Tepelný výměník převede teplotu z jedné látky do druhé látky. Klasickým příkladem může být tepelný akumulátor se solným médiem který bude ve výměníku ohřívat vodu. Voda se ohřeje na páru, která je poté parní turbínou převedena na otáčky které pohání generátor. Jde tedy vidět, že praktické řešení tepelných akumulátorů je poměrně složité. Pokud to ovšem fyzické parametry povolují, tak lze výměník vynechat a lze rovnou použít médium pro pohánění turbíny.



Obrázek 3.4.3. Příklad TES využívající vysloužilou uhelnou elektrárnu[29]



Obrázek 3.4.4. Příklad moderního TES používající jako médium písek [31]



### 3.5. Tlaková potenciální energie

#### a) Princip

Princip akumulace elektrické energie pomocí tlakové potenciální energie vychází ze vztahu pro ideální plyn.

$$W = p \cdot V \quad (3.5.1)$$

kde:  $W$  je mechanická práce (J)

$p$  je tlak ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$V$  je objem plynu ( $\text{m}^3$ )

Dále platí rovnice pro ideální plyn

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.5.2)$$

kde:  $n$  je množství látky (mol)

$R$  je konstanta ideálního plynu ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

$T$  je teplota (K)

Úpravou dostaneme vztah

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \quad (3.5.3)$$

Hodnoty mechanické energie při změně objemu látky za stále teploty získáme ze vztahu

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV \quad (3.5.4)$$

Dosazením vztahu (3.5.3) do vztahu (3.5.4) získáme rovnici (3.5.5) kterou nadále upravíme do finální podoby

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \cdot dV = (n \cdot R \cdot T) \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} \cdot dV = (n \cdot R \cdot T) \cdot \ln V \Big|_{V_1}^{V_2} = n \cdot R \cdot T \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \quad (3.5.5)$$

Úpravou (3.5.5) převedeme pomocí vztahu (3.5.3) objem  $V$  na tlak  $p$

$$W_{12} = p_1 V_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = p_2 V_2 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (3.5.6)$$

Výsledná energie je tedy dána poměrem tlaků  $p_1, p_2$  dvou nádob o objemu  $V_1, V_2$ .

Zvýšením objemu nádob a zvýšením tlaku lze zvýšit i maximální množství akumulované energie.

### b) Druhy akumulačních médií

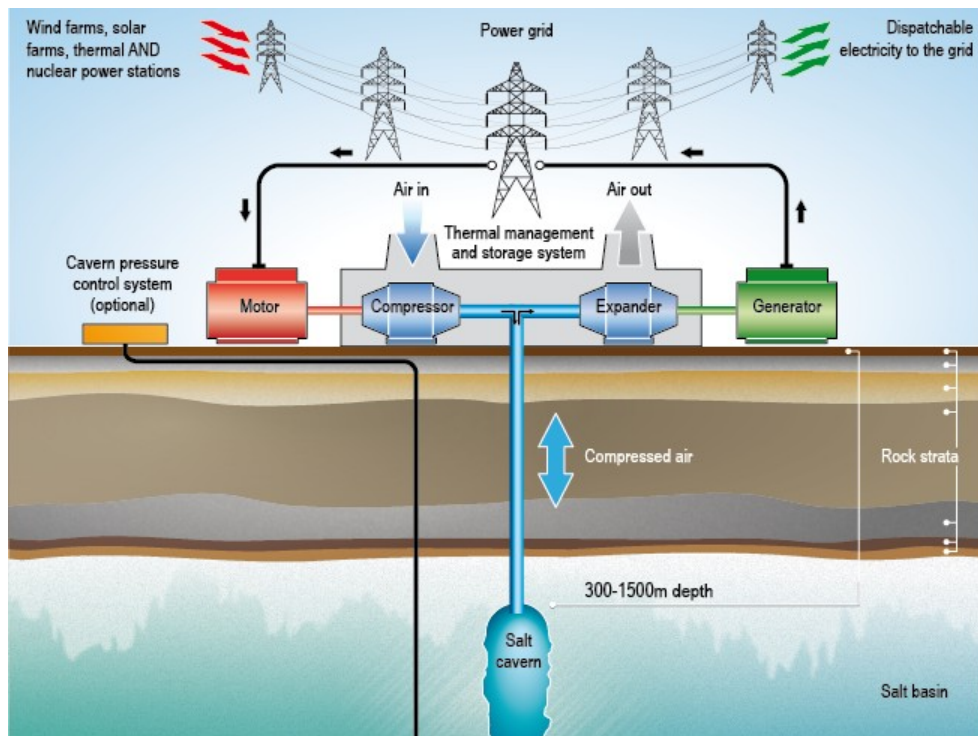
Jako médium pro tento druh akumulátoru se používá výhradně vzduch. Tlakové akumulátory mají nízkou energetickou hustotu a potřebují tedy velké množství akumulačního média. Použitím jiného média než levného vzduchu by pracoval akumulátor krajně neekonomicky.

### c) Praktické řešení

Zkráceně se těmto akumulátorům říká CAES (Compressed air energy storage). K přeměně elektrické energie na tlak slouží soustrojí motor-kompresor. K opačnému ději slouží soustrojí turbína-generátor. Při stlačení v kompresoru dochází k ohřevu vzduchu. Toto teplo je nežádoucí a pouze snižuje účinnost akumulace. Při dekompresi je naopak zapotřebí teplo dodat. Použitím systému, který bude toto odpadní teplo od kompresoru dovádět do turbíny lze zvýšit účinnost celkového procesu. Alternativou je i použití tlakových akumulátorů, které jsou upraveny tak, aby děj probíhal za konstantní teploty. Těmto akumulátorům se říká izotermické akumulátory na stlačený vzduch (anglicky I-CAES). Tyto akumulátory jsou momentálně ve vývoji a jejich předpokládaná účinnost by se měla pohybovat v rozmezí 70-80%. [10]

Nádobu na vzduch tlakového akumulátoru lze nadále realizovat dvěma způsoby:

- Použitím kovové nádoby: Nádoba musí být pevná aby vydržela sílu kterou bude plyn na nádobu působit.
- Použitím jeskyně: Jako nádoba na vzduch se použije buď přírodní jeskyně nebo uměle vytvořená jeskyně, která mohla vzniknout dolováním. Nejpreferovanější jsou solné jeskyně, které nereagují se vzduchem, mají malý únik tlaku a zvládnou relativně vysokou tlakovou deformaci.



Obrázek 3.5.1. Příklad tlakového akumulátoru [39]

### 3.6. Energie elektromagnetického a elektrostatického pole

#### a) Princip

Elektrickou energii lze uložit přímo ve formě magnetického nebo elektrostatického pole. K tomuto účelu slouží kondenzátory a cívky.

$$E_e = \frac{1}{2} C U^2 \quad (3.6.1)$$

kde:  $E_e$  je energie elektrostatického pole (J)

$C$  je kapacita kondenzátoru ve (F)

$U$  je elektrické napětí ve (V)

$$E_m = \frac{1}{2} L I^2 \quad (3.6.2)$$

kde:  $E_m$  je energie magnetického pole (J)

$L$  je vlastní indukčnost cívky (H)

$I$  je elektrický proudy (A)

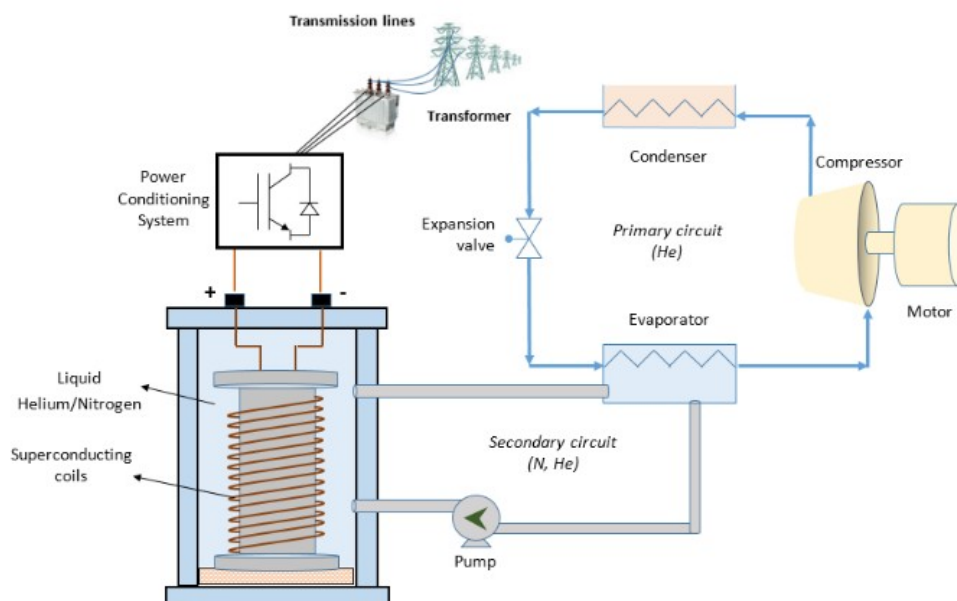
Kapacita kondenzátoru je dána plochou elektrod a jejich vzdáleností. Vlastní indukčnost cívky je dána prostorovým uspořádáním cívky a množstvím závitů.

## b) Praktické řešení

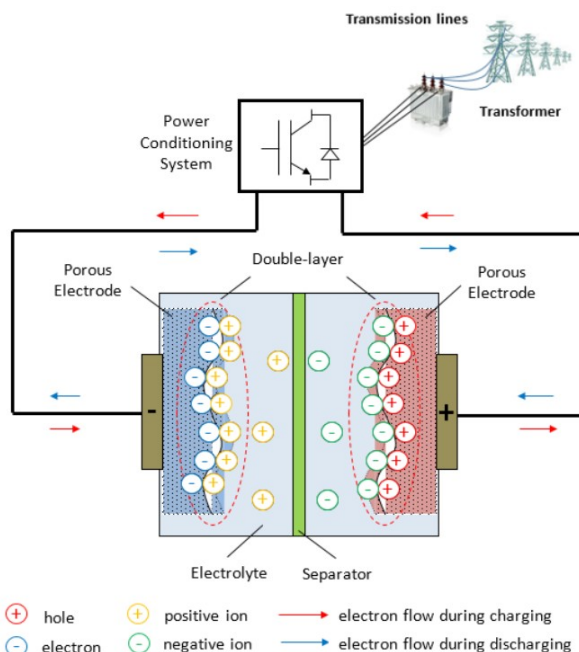
**Kondenzátory** konstruované za účelem akumulace velkého množství elektrické energie se nazývají superkapacitory. Ty jsou realizovány dvěma uhlíkovými elektrodami, mezi kterými jsou dvě vrstvy elektrolytu odděleného pomocí porézní membrány. V porovnání s normálními kondenzátory mají tyto kondenzátory značně vyšší kapacitu a tedy i vyšší energetickou hustotu. Maximální hodnota napětí se pohybuje od 1V do 3V v závislosti na použitém elektrolytu [11]. Jedinou nevýhodou je vysoká hodnota samo vybíjení kondenzátoru a nízká hustota energie.

V druhém případě se pro akumulaci energie používají **supravodivé cívky** (SMES). Materiál cívky se volí niob-titan (Nb-Ti), který má kritickou teplotu 10K [11]. Cívka se musí tedy chladit na přibližně  $-264\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při této teplotě ztratí cívka svůj činný odpor a může tedy uchovávat proud téměř bezztrátově. Výhodou oproti kondenzátorům je nižší velikost samovybíjení a vyšší účinnost. Ovšem také mají vyšší pořizovací cenu a vyšší cenu za údržbu kvůli chlazení.

Oba tyto druhy akumulátorů mají velice vysokou účinnost. Pohybuje se v rozmezí 95% (kondenzátor) až 98% (cívka) [11]. Mají také nejvyšší rychlost nabíjení/vybíjení. Nevýhodou obou těchto akumulátorů je nízká energetická hustota a vysoké samovybíjení.



Obrázek 3.6.1. Princip SMES [11]



Obrázek 3.6.2. Princip superkondenzátoru [11]

## 4. Stanovení kritérií hodnocení

V této kapitole budou určeny a následně popsány některá kritéria, které budou sloužit k hodnocení a porovnání dříve zmíněných akumulátorů energie.

### 4.1. Energetická kritéria

Tyto kritéria souvisí s celkovým využitím energie v daném akumulátoru.

#### a) Objemové energetické kritérium

Tímto kritériem se stanovuje velikost energetické kapacity akumulátoru na jednotku objemu.

$$E = \int_{V_{e1}}^{V_{e2}} \epsilon_V \cdot dV_e \tag{4.1.1}$$

kde: E je celková energetická kapacita akumulátoru (kJ,kWh)

$\epsilon_V$  je energetická kapacita akumulátoru na jednotku objemu ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$V_e$  je objem akumulacího média akumulátoru který se přímo podílí na ukládání energie ( $\text{m}^3$ )

Výše uvedený vztah nám říká jaké celkové množství energie bude moci akumulátor uložit s danou

energetickou kapacitou  $\varepsilon_V$  a objemem akumulačního média  $V_e$ . V případě, že je rozložení energetické hustoty v akumulačním médiu konstantní, tak lze vztah zjednodušit do tvaru (4.1.2)

$$E = \varepsilon_V \cdot V_e \quad (4.1.2)$$

Hodnota  $V_e$  nám pouze udává velikost objemu akumulačního média. Ovšem tato hodnota není rovna celkovému objemu akumulátoru. Ke správné funkci akumulátoru jsou zapotřebí i další součásti které se přímo nepodílí na akumulaci energie, ale jejich přítomnost je zapotřebí ke správné funkci akumulátoru. Příkladem můžou být ochranné kryty u chemických akumulátorů. Výsledný objem akumulátoru můžeme vypočítat tedy dle vztahu (4.1.3)

$$V = V_e + V_{ne} \quad (4.1.3)$$

kde:  $V$  je výsledný celkový objem akumulátoru ( $m^3$ )

$V_{ne}$  je objem akumulátoru který se nepodílí na ukládání energie ( $m^3$ )

Konstrukčním cílem každého akumulátoru by mělo být aby měl co nejvyšší možnou energetickou kapacitu  $E$  s co možná nejmenším objemem  $V$ . Toho se docílí právě zvýšením hodnoty  $\varepsilon_V$ .

Hodnota kterou budeme porovnávat akumulátory s ohledem na energetické kritérium bude měrná energetická kapacita akumulátoru na jednotku objemu  $\varepsilon_V$ .

### b) Hmotností energetické kritérium

Podobně jako v předchozím bodě, tímto kritérium se stanovuje velikost energetické kapacity akumulátoru. Rozdílem je, že nás nyní zajímá energetická kapacita vztažena na jednotku hmotnosti.

$$E = \int_{m_{e1}}^{m_{e2}} \varepsilon_m \cdot dm_e \quad (4.1.4)$$

kde:  $E$  je celková energetická kapacita akumulátoru (kJ)

$\varepsilon_m$  je energetická kapacita akumulátoru na jednotku hmotnosti ( $J \cdot kg^{-1}$ ,  $kWh \cdot t^{-1}$ )

$m_e$  je hmotnost akumulačního média akumulátoru který se přímo podílí na ukládání energie (kg)

V případě konstantní hodnoty  $\varepsilon_m$  lze upravit vztah (4.1.4) na vztah (4.1.5)

$$E = \varepsilon_m \cdot m_e \quad (4.1.5)$$

Pokud je  $\varepsilon_V$  a  $\varepsilon_m$  konstantní, tak lze převést jednu veličinu na druhou dle vztahu

$$\varepsilon_m \cdot \rho = \varepsilon_v \quad (4.1.6)$$

kde:  $\rho$  je hustota akumulčního média ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Důvodem zmínění tohoto kritéria je, že v některých aplikacích je pro nás více důležitá hmotnost akumulátoru než jeho objem. Bude pouze uvedeno u relevantních akumulátorů.

### c) Účinnost akumulátoru

Při akumulaci energie vždy dochází ke ztrátám. Tyto ztráty jsou většinou dány procesem přeměny energie. Celková účinnost akumulace elektrické energie a jejího zpětného vypuštění do sítě se dá vypočítat jako

$$\eta = \frac{E_2}{E_1} \quad (4.1.7)$$

kde:  $\eta$  je účinnost akumulátoru

$E_1$  je energie vložena do akumulátoru (kJ, kWh)

$E_2$  je energie získaná z akumulátoru (kJ, kWh)

Ideální je hodnota účinnosti 100%, tedy, že všechna vložená energie se po akumulaci získá zpět. To je v praxi nerealizovatelné a proto vždy bude potřeba k nabití akumulátoru třeba více energie než jakou dokáže uložit. Tato hodnota je velice důležitá hlavně u akumulátorů na velké množství energie, kde i malá změna účinnosti má velký vliv.

### d) Maximální výkon akumulátoru

Maximální výkon který dokáže akumulátor vracet zpět do sítě. Čím menší hodnotu výkonu bude akumulátor mít, tím hůře bude moci pokrývat dodávku elektrické energie. Udává se v kW výkonu který dokáže akumulátor dodat. Ideální je, aby tato hodnota byla co nejvyšší. S pomocí tohoto kritéria lze vypočítat dobu, kterou bude trvat vybití plně nabitého akumulátoru při plném zatížení

$$t_v = \frac{E}{P_m} \quad (4.1.8)$$

kde:  $t_v$  je doba vybití akumulátoru (s)

$E$  je energetická kapacita akumulátoru (kJ, kWh)

$P_m$  je maximální výkon akumulátoru (kW)

### e) Rychlost akumulátoru

Stanovuje jak rychle dokáže akumulátor reagovat na změnu zatížení. Dle druhu akumulátoru může přeměna akumulační energie na elektrickou energii trvat jisté časové období. Ideální je, aby tato doba byla nulová, tedy aby akumulátor přeměňoval jeden druh energie na jiný okamžitě. Záleží na aplikaci daného akumulátoru, zda je toto kritérium důležité či nikoliv.

Tato doba se nazývá doba odezvy  $t_0$  (s) a stanovuje po jak dlouho trvá splnění požadavku na dodání elektrické energie.

Dle tohoto kritéria lze rozdělit akumulátory dle odezvy do 3 skupin

1. Okamžitá:  $t_0 \leq 1$  s
2. Rychlá:  $1$  s  $< t_0 < 1$  min
3. Pomalá:  $t_0 \geq 1$  min

## 4.2. Ekonomické kritérium

### a) Cena

Cenové kritérium stanovuje cenu na jednotku energetické kapacity akumulátoru. Naším cílem je aby tato hodnota byla co možná nejmenší.

$$C = \lambda \cdot E \quad (4.2.1)$$

kde:  $E$  je celková energetická kapacita akumulátoru (kJ, kWh)

$\lambda$  je cena na jednotku energetické kapacity (€·kJ<sup>-1</sup>, €·kWh<sup>-1</sup>)

$C$  je celková cena akumulátoru

Hodnota  $\lambda$ , kterou budeme porovnávat akumulátory dle cenového kritéria je cena na jednotku energie  $\lambda$ . Tato hodnota je pouze orientační. Přesná cena je silně ovlivněna rokem výstavby akumulátoru. Cena starších akumulátorů je převážně vyšší kvůli použití méně efektivních technologií. Důležitým parametrem je také místo, kde je akumulátor vystavěn.



### 4.3. Ekologické kritérium

Stanovuje dopad využití daného akumulátoru na životní prostředí. Jak bylo zmíněno v úvodu této práce, aby akumulátory mohly fungovat opravdu ekologicky s OZE je zapotřebí, aby i ony samy byly co nejvíce ekologicky nezávadné.

Dle velikosti tohoto dopadu se dělí na:

1. Ekologický nezávadné: Akumulátor nemá žádný vliv na přírodní prostředí. Jedná se o ideální stav.
2. Mírný dopad na životní dopad: Akumulátor má pouze nízký dopad na životní prostředí.
3. Střední dopad na životní prostředí: Akumulátor má pouze minimální vliv na životní prostředí.
4. Nebezpečné pro životní prostředí: Akumulátor má extrémní vliv na životní prostředí.

## 5. Aplikace kritérií

Tabulka 5.1. Orientační hodnoty kinetických akumulátorů [12]

Měrná energetická kapacita $\varepsilon_v$ (kWh·m <sup>-3</sup> )	200
Účinnost $\eta$ (%)	90 - 95
Maximální výkon $P_m$ (MW)	0.250
Cena na jednotku energie $\lambda$ (€·kWh <sup>-1</sup> )	9 500
Ekologická závadnost	Nezávadné
Odezva	Okamžitá

Tabulka 5.2. Orientační hodnoty PHS [13]

Měrná energetická kapacita $\varepsilon_v$ (kWh·m <sup>-3</sup> )	2
Účinnost $\eta$ (%)	70 - 84
Maximální výkon $P_m$ (MW)	1000
Cena na jednotku energie $\lambda$ (€·kWh <sup>-1</sup> )	75
Ekologická závadnost	Nezávadné (a)
Odezva	Pomalá (b)

a) Pouze výstavba těchto akumulátorů má dopad na životní prostředí. Jejich provoz samotný už má

zanedbatelný vliv. Paradoxně jsou největším zdrojem znečištění turisté, kteří tyto elektrárny navštěvují [14]

b) Doba odezvy PHS se uvádí v rozmezí 240 – 500 sekund (4 - ~9 minut)

Tabulka 5.3. Orientační hodnoty chemických akumulátorů [13], [15], [16]

Typ	Olovo	NI-Cd	Ni-MH	Li-ion		
				Kobalt	Mangan	Fosfát
Měrná energetická kapacita $\epsilon_m$ (kWh·t <sup>-1</sup> )	30-50	45-80	60-120	150-250	100-150	90-120
Účinnost $\eta$ (%)	~90	~70 pomalé ~90 rychlé		99		
Maximální výkon $P_m$ (MW)	10	40		400		
Cena na jednotku energie $\lambda$ (€·kWh <sup>-1</sup> )	125	310		330		500
Ekologická závadnost	Nebezpečné	Střední		Nezávadné		
Odezva	Okamžitá (a)	Okamžitá (a)		Okamžitá (a)		

a) Doba odezvy je přibližně 1 sekunda [12]

Tabulka 5.4. Orientační hodnoty STES a PCM [17], [18]

Typ	SHS	LHS
Měrná energetická kapacita $\epsilon_v$ (kWh·m <sup>-3</sup> )	80 - 500	
Měrná energetická kapacita $\epsilon_m$ (kWh·t <sup>-1</sup> )	10 - 50	50-150
Účinnost $\eta$ (%)	50 - 90	75-90
Maximální výkon $P_m$ (MW)	0.1 - 300	
Cena na jednotku energie $\lambda$ (€·kWh <sup>-1</sup> )	0.1 - 10	10 - 50
Ekologická závadnost	Nezávadné	Nezávadné
Odezva	Pomalá	Pomalá

Tabulka 5.5. Orientační hodnoty systému CAES [13], [18], [19]

Měrná energetická kapacita $\epsilon_v$ (kWh·m <sup>-3</sup> )	2 - 6
Účinnost $\eta$ (%)	~60
Maximální výkon $P_m$ (MW)	300
Cena na jednotku energie $\lambda$ (€·kWh <sup>-1</sup> )	3 – 5 / 75 (a)
Ekologická závadnost	Mírná (b)
Odezva	Pomalá (c)

a) Cena je značně nižší pokud se nemusí tvořit umělá kaverna. Použití přírodní jeskyně nebo

podzemních prostor již vykopaných hornictvím je preferované.

b) Ke správné funkci akumulátoru je zapotřebí při dekompresi dodávat teplo. Toto teplo je v klasických CAES systémech získáváno spalováním zemního plynu. Spalováním vznikají emise CO<sub>2</sub> a metanu, a z toho důvodu je akumulátor zařazen jako mírně ekologicky závadný.

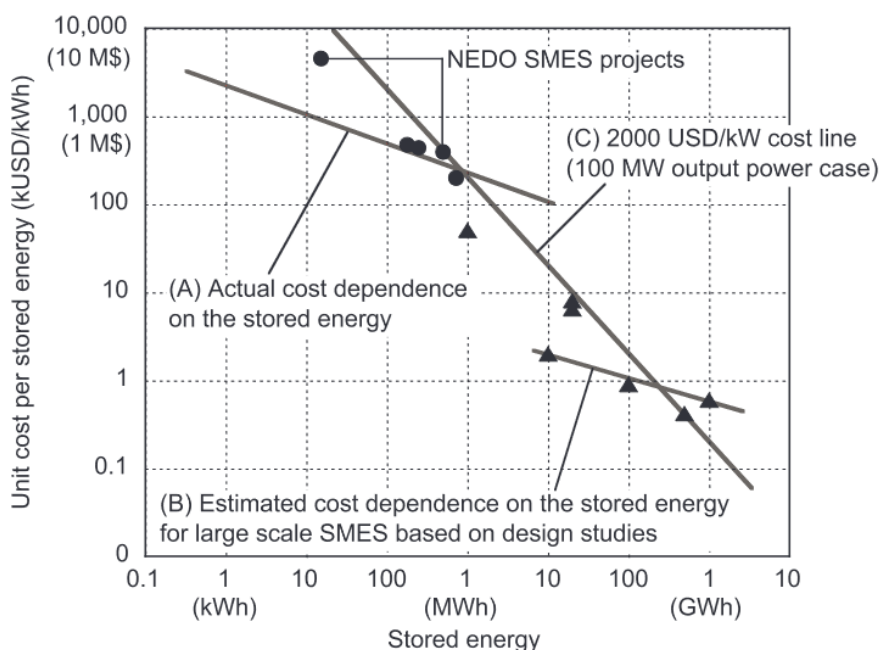
c) Rychlost náběhu CAES se uvádí 3 až 10 minut [12]

Tabulka 5.6. Orientační hodnoty přímých akumulátorů elektrické energie[20], [21]

Typ	Superkapacitor	SMES
Měrné energetická kapacita $\epsilon_m$ (kWh·t <sup>-1</sup> )	~ 30	~ 4·10 <sup>-3</sup>
Účinnost $\eta$ (%)	96 - 98	> 97
Maximální výkon $P_m$ (MW)	(a)	(a)
Cena na jednotku energie $\lambda$ (€·kWh <sup>-1</sup> )	62 000	80 000 – 4 200 000 (b)
Ekologická závadnost	Nezávadné	Nezávadné
Rychlost	Okamžitá	Okamžitá

a) Hodnota maximálního výkonu je přímo úměrná energetické kapacitě akumulátoru a tedy se nedá přímo udat. Dle studií by v budoucnu mohly mít supravodivé cívky maximální výkon až 10 - 100 MW. [15]

b) Cena je vysoce závislá na energetické kapacitě cívky. Přibližná hodnota se dá zjistit z grafu (Obrázek 20., křivka A a B)



Obrázek 5.1. Graf ceny SMES[20]

## 6. Doporučení médií pro vhodné aplikace

Tato kapitola se bude zabývat možnou aplikací těchto akumulátorů za určitých kritérií.

### 6.1. Aplikace v energetice

Bližší popis o důvodu této aplikace je uveden v úvodu této práce. Nejdůležitějšími kritérii pro tuto aplikaci jsou:

- **Cena za jednotku energie:** Tyto akumulátory musí akumulovat velké množství energie, aby bylo možné je efektivně použít v energetice. Z toho důvodu bude i výsledná cena vysoká. I malá změna ceny za jednotku energie může o hodně změnit výslednou celkovou cenu akumulátoru.
- **Maximální výkon:** Akumulátory v energetice musí do sítě vracet a také z ní přijímat velké výkony. Paralelním spojením akumulátorů jednoho druhu do skupiny lze docílit zvýšení tohoto výkonu. Tato metoda ovšem dále prodraží celkovou cenu a zároveň sníží celkovou energetickou hustotu (jelikož budou tyto akumulátory zabírat více místa).
- **Účinnost:** Jak bylo uvedeno v předchozím bodě, tyto akumulátory jsou stavěny na velké výkony a proto i malá změna účinnosti má velký vliv na výslednou provozní cenu.
- **Ekologická zavadnost:** Jelikož k akumulaci velkého množství energie je zapotřebí i velké množství akumulčního média, tak je třeba aby byl provoz akumulátoru co možná nejekologičtější.

K této aplikaci jsou tedy nejvhodnější následující druhy akumulčních technologií: Gravitační potenciální energie (PHS), Tlaková potenciální energie (CAES) a Tepelná energie (TES).

Tabulka 6.1.1. Porovnání médií pro aplikaci v energetice

Médium	PHS	CAES	TES
Měrná energetická kapacita $\varepsilon_v$ (kWh·m <sup>-3</sup> )	2	2 - 6	80 - 500
Účinnost $\eta$ (%)	70 - 84	~60	50 - 90
Maximální výkon $P_m$ (MW)	1000	300	0.1 - 300
Cena na jednotku energie $\lambda$ (€·kWh <sup>-1</sup> )	75	3 - 5 / 75	0.1 - 50
Ekologická zavadnost	Nezavadné	Mírná	Nezavadné

PHS má relativně nízkou cenu na jednotku energie a má vysokou účinnost. Zároveň je ekologicky nezávadná a má vysoký maximální výkon. Jedinou nevýhodou je pomalá odezva a velice nízká

energetická hustota. K pokrytí velkého množství energie je tedy zapotřebí velké množství vody. Největší elektrárnou tohoto druhu je *Bath County Pumped Storage Station* která se nachází v USA. Má výkon 3 GW a kapacitu 24 000 MWh. Její spád je 380 metrů. [22]

Největší PHS v České republice je elektrárna *Dlouhé stráně*, která má výkon 650 MW a kapacitu 3 243 MWh. [23]

CAES má naopak velice nízkou cenu za předpokladu použití přírodních jeskyní nebo již hornictvím vytěžených prostor. Oproti PHS má také mnohem vyšší energetickou hustotu. Nevýhodou je nižší účinnost a nižší maximální výkon. Je projektován CAES ve městě Rosamond, Californie, USA, který bude mít kapacitu 4 GWh a maximální výkon 500 MW [24]. Tento akumulátor bude využívat technologie A-CAES (Adiabatic Compressed Air Energy Storage). U těchto akumulátorů se využívá systému TES, který slouží k ukládání tepla vzniklého kompresí vzduchu. Toto teplo je poté použito při dekompresi. Tímto způsobem lze značně omezit množství potřebného zemního plynu na ohřev a nebo i ohřev tímto způsobem zcela vynechat. V obou případech dojde k značnému snížení množství emisí které tento akumulátor vyprodukuje.

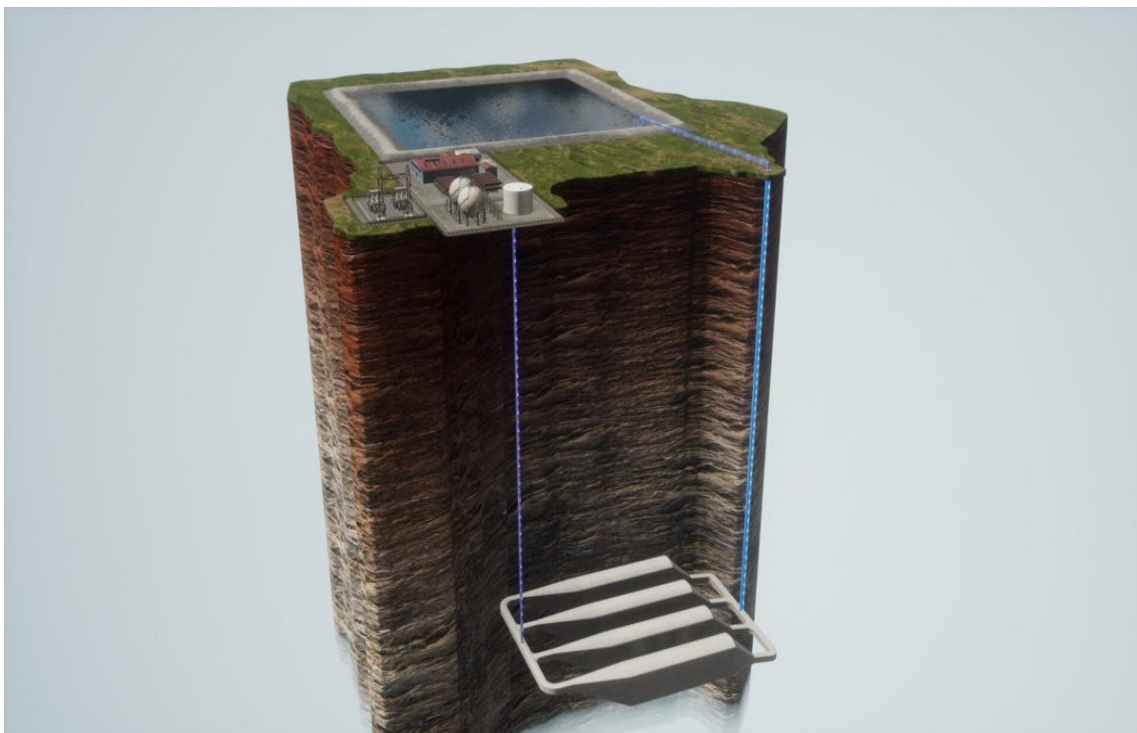
TES má ze všech porovnávaných nejvyšší energetickou kapacitu. Je také relativně levný a je ekologicky nezávadný. Jeho hlavní nevýhodou je vyšší úroveň samovybíjení v porovnání s PHS a CAES. CAES a PHS se mohou udržet nabitě v řádech měsíců. U TES je tato doba v řádech dní [15]. Výjimkou je STES (Seasonal thermal energy storage), který je konstruován , tak aby se udržel nabitý až po dobu několika měsíců. To má ovšem za následek zvýšení celkové ceny. TES se nejvíce používají v oblastech s nedostatkem vody. V těchto oblastech se budují takzvané koncentrační solární elektrárny. Ty pracují na principu ohřevu akumulárního média pomocí slunečních paprsků. Elektrárna je například tvořena množstvím zrcadel namířených na věž ,ve které se nachází teplotonosná látka. Toto koncentrované záření ohřívá tuto látku. Tato energie je poté přeměněna pomocí tepelného výměníku a generátoru na elektrickou energii. Největší elektrárnou tohoto druhu je elektrárna *Noor* v Maroku. Má výkon 510 MW. V poslední fázi výstavby bude schopná ukládat energii až po dobu 8 hodin. [25]

TES má také zásadní roli jako solární kolektor. Solární kolektor je zařízení které pomocí slunečního záření ohřívá boiler, kterým se vytápí domácnost. Zvýšením užívání tohoto zařízení lze snížit spotřebu energie v zimních měsících, která slouží vytápění domácností.

To jaký z těchto 3 akumulátorů bude použit je určeno tím kde je třeba ho vybudovat. V místech s lehce dostupnou vodou a dobrým místem spádu lze postavit PHS. V místech s dostupnými podzemními kavernami či vytěženými doly lze postavit CAES. V případě, že ani jedna z těchto možností není splněna, tak lze použít TES. Nejlepší volbou je samozřejmě vhodná kombinace obou těchto médií v energetické síti pro maximalizaci celkové energetické kapacity.

Dále se v energetice využívají SMES. Ty mají za úkol zlepšovat kvalitu dodávky elektrické energie. Oproti CAES a PHS mají velmi vysoké maximální výkony a také téměř nulovou dobu odezvy. Pokud bude k síti připojen spotřebič o vysokém výkonu, tak dojde k velice krátkému přetížení sítě (k takzvané špičce). Tyto akumulátory mají za cíl tuto špičku zredukovat nebo zcela odstranit.

Obdobné využití jako SMES mají i setrvačníky. Ty mají větší dobu odezvy, ovšem jsou značně levnější. Své využití také najdou ve větrných elektrárnách kde by se využívali akumulátory energie. Jejich použití zvýší právě kvalitu generované elektřiny těmito elektrárnami. [26]



Obrázek 6.1.1. Koncept A-CAES akumulátoru [40]



Obrázek 6.1.2. Solární elektrárna Noor [42]

## 6.2. Aplikace v elektromobilech

Pro tuto aplikaci nás nejvíce zajímají následující kritéria

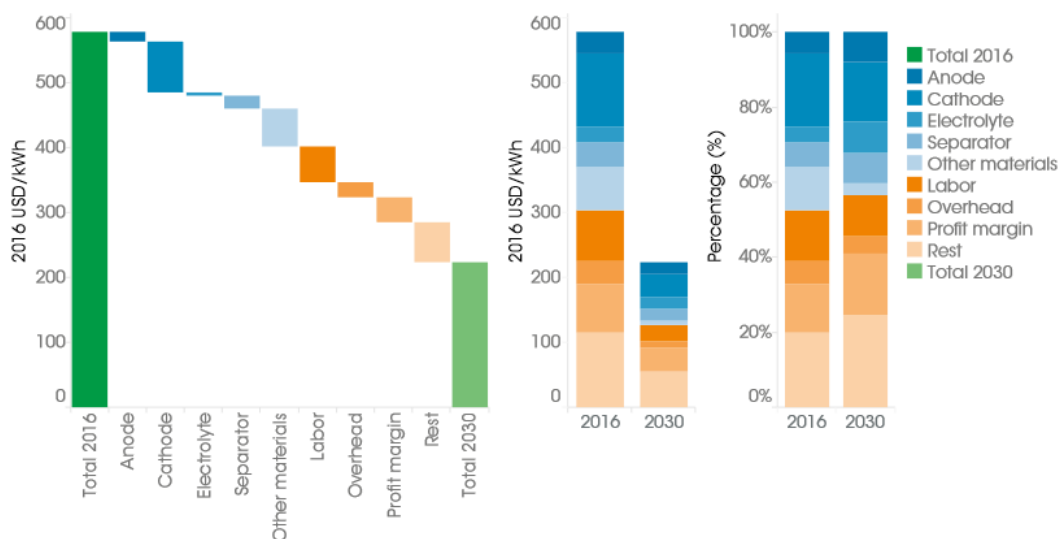
- **Měrná energetická kapacita:** Velikost akumulátoru je omezena a proto musí být jeho energetická hustota nejvyšší, aby i při malé velikosti měl vysokou kapacitu. U této aplikace také klademe nárok na hmotnost akumulátoru. Hmotnost akumulátoru by měla být co nejnižší, aby měl co nejmenší vliv na výslednou hmotnost elektromobilu.
- **Maximální výkon:** Maximální výkon nás v tomto případě nezajímá z pohledu toho jaký výkon dokáže akumulátor vybit, ale naopak jakým maximálním výkonem lze akumulátor nabíjet. Čím větším výkonem budeme moct akumulátor nabíjet, tak tím rychleji se nabije do plné kapacity. Doba nabíjení je jeden z aspektů který hraje důležitou roli v tom, proč jsou stále spalovací automobily populárnější než elektromobily.
- **Cena za jednotku energie:** Aby mohly elektromobily nahradit dosavadní spalovací automobily, je zapotřebí aby jejich cena byla s nimi srovnatelná. Cena akumulátoru tvoří velkou část celkové ceny elektromobilu, a proto je důležité aby i tento akumulátor byl co možná nejlevnější.
- **Ekologická zavadnost:** Momentálně se na zemi nachází přes 1 miliardu automobilů. Z toho pouhých 10 miliónů jsou elektromobily. Pokud našim cílem bude všechny tyto automobily nahradit elektromobily, tak bude důležité aby jejich tvorba byla co nejekologičtější. Akumulátory tvoří důležitou část elektromobilu, a proto musí být i jim kladeny vysoké ekologické nároky.

Momentálně lze hovořit pouze o jednom možném kandidátu a to Chemické zdroje energie.

Tabulka 6.2.1. Porovnání médií pro aplikaci v elektromobilitě

Typ	Chemické akumulátory energie					
	Olovo	NI-Cd	Ni-MH	Li-ion		
Kobalt				Mangan	Fosfát	
Měrná energetická kapacita $\epsilon_m$ (kWh·t <sup>-1</sup> )	30-50	45-80	60-120	150-250	100-150	90-120
Maximální výkon $P_m$ (MW)	10	40		400		
Cena na jednotku energie $\lambda$ (€·kWh <sup>-1</sup> )	125	310		330		500
Ekologická závadnost	Nebezpečné	Střední		Nezávadné		

Z těchto hodnot jde vidět, že uvedeným kritériím nejlépe odpovídají Li-ion akumulátory. Jedinou jejich nevýhodou je vysoká cena. Ta se má ovšem podle řady studií snižovat, a v roce 2030 se může snížit až na 30% [13].



Obrázek 6.2.1. Předpokládaný vývoj ceny lithium-fosfátové baterie na rok 2030 [13]

V této aplikaci se také předpokládá využití setrvačnicků, neboli kinetických akumulátorů, jakožto akumulčních prvků. Svě využití by našli v nabíjeních stanicích, kde by značně snížily dobu nabíjení elektromobilů. Tyto setrvačnický by se v době jejich nevyužívání nabíjely. Při připojení elektromobilu by tuto naakumulovanou energii začali rychle vybíjet, a to značně vyšším výkonem než který by byla elektrická síť schopná dodat. Tímto způsobem lze snížit dobu nabíjení elektromobilu až na pouhou hodinu.



Použití klasické domácí nabíjecí stanice by toto nabíjení trvalo až 13 hodin a použitím speciální nabíjecí stanice bez tohoto setrvačnicku přibližně 4 hodiny. [27]

Dále v tomto odvětví najdou uplatnění i superkapacitor. Mohou být využívány jako akumulátory pro energii vzniklou při rekuperaci vozidla. Toho se využívá nejen v automobilech, ale také ve vlacích, trolejbusích, tramvajích, jeřábech a dalších velkých strojů s vysoko výkonovými elektrickými pohony. Výhodou superkapacitoru je jeho vysoká nabíjecí/vybíjecí rychlost a také velký maximální výkon, který je většinou větší než hlavní napájecí akumulátor daného stroje. Jelikož superkapacitor má vysokou úroveň samo vybíjení, tak slouží pouze jako přídatný akumulátor, který pouze zlepšuje celkovou účinnost stroje. Alternativně se používá k rekuperaci také dříve zmíněný setrvačnick nebo hlavní akumulátor pokud to jeho parametry dovolí (většinou se jedná o chemické akumulátory, jako lithium-titanové články). [28]

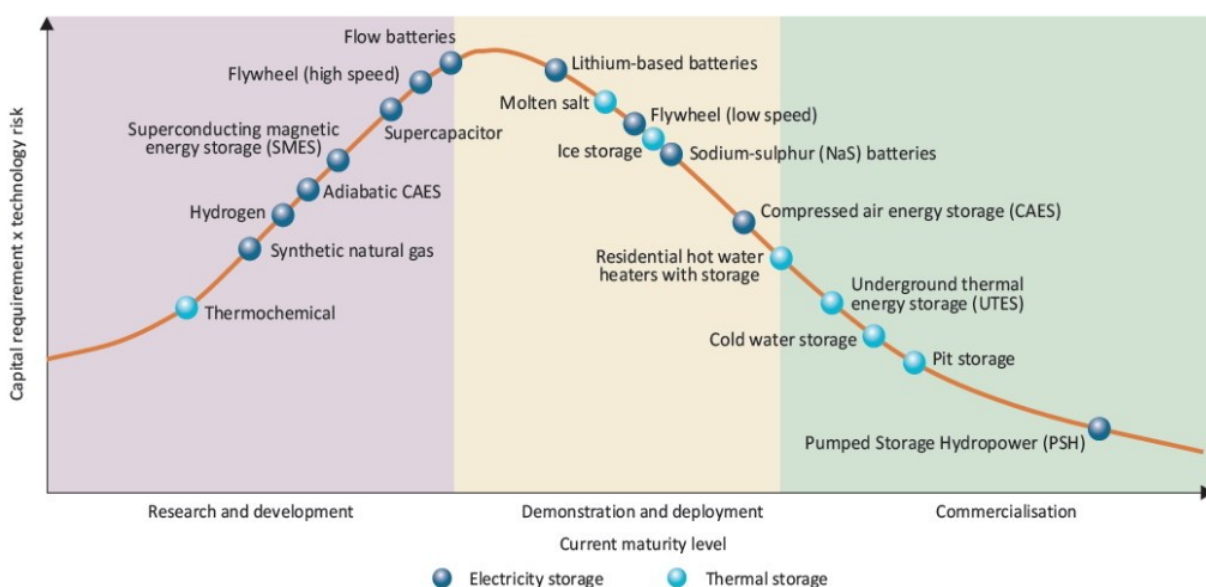
## 7. Závěr

Cílem této práce bylo popsat způsoby akumulace energie, jejich praktické řešení, média v těchto řešeních používaná a následně jejich porovnání. Jak bylo uvedeno v úvodu této práce, tak své zásadní uplatnění najdou akumulátory v kombinaci s OZE a s elektromobily. Technologie na akumulaci energie a její vývoj bude tedy hrát zásadní roli pro dosažení uhlíkové neutrality lidstva. Akumulátory energie ovšem nejsou přímým řešením těchto problémů, avšak jsou k jejich řešení potřebné či velice důležité. OZE řeší tento problém náhradou vysoko emisních elektráren, tedy třeba náhradou uhelných elektráren pomocí vodních, solárních, větrných či geotermálních elektráren. Bez použití akumulátorů, by ovšem nastávaly problémy s dodávkou elektrické energie způsobeno náhodností některých těchto zdrojů. Akumulátory tedy budou v tomto ohledu hrát zásadní roli. U elektromobily řeší otázku uhlíkové neutrality elektromotor, který nahrazuje klasický spalovací motor. Pokud ovšem nechceme, aby tento elektromobil musel být po celou dobu jízdy připojen k elektrické síti, tak bude zapotřebí akumulátor energie. I v tomto případě bude tedy hrát akumulace energie zásadní roli.

Ze všech uvedených metodik akumulace energie je patrné, že každá má trochu jiné využití. Neexistuje tedy univerzální akumulátor energie, který by se měl takové vlastnosti, které by mu dovozovali jeho využití ve všech aplikacích. K dosažení uhlíkové neutrality, tak bude zapotřebí vhodná kombinace všech druhů akumulace energie.

- **CAES, PHS, TES** – Jsou vhodně aplikovatelné v energetice jako akumulátory velkého množství energie. Jejich vývoj bude hrát zásadní roli v používání s OZE. Také zlepšují využití elektrické energie generované elektrárnami v základním zatížení. V místech s vysokou slunečností a nízkým dostatkem vody se využívají koncentrované solární elektrárny, které kombinují funkci elektrárny a TES.
- **SMES** – V energetice se užívají k vyhlazení výkonových špiček. Tím zlepšují kvalitu dodávky elektrické energie.
- **Li-ion akumulátory** – Jejich zásadní uplatnění bude v elektromobilech jako zdroj elektrické energie. Jejich další zásadní využití je v elektronice.
- **Setrvačnický** – Své uplatnění najdou v energetice a v elektromobilitě. Lze je použít, podobně jako SMES, ke zlepšení kvality dodávky elektrické energie. Také se předpokládá jejich využití ve větrných elektrárnách. Další uplatnění najdou jako pomocné zařízení pro rychlé nabíjení elektromobilů.
- **Superkapacitory** – Jsou převážně užívány v elektrické trakci jako akumulátor rekuperované energie.

Každý z uvedených způsobů akumulace je v různém stádiu vývoje. Technologie jako PHS už je používána po řadu desetiletí. Dá se tedy předpokládat, že k zásadním vědeckým průlomům pro tuto technologii nedojde. U mladších technologií, jako SMES či superkapacitory, může po dalším vývoji dojít k zásadnímu zlepšení parametrů uvedených v tabulce 5.6



Obrázek 7.1. Vývoj dosavadních způsobů akumulace energie [41]

## 8. Seznam použitých zdrojů

- [1] M. ČR, „Pařížská dohoda“, *http://*, bře. 07, 2016. [https://www.mzp.cz/cz/parizska\\_dohoda](https://www.mzp.cz/cz/parizska_dohoda) (viděno dub. 15, 2021).
- [2] „Shrnutí POK.pdf“. Viděno: dub. 15, 2021. [Online]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news\\_tz090507pok/\\$FILE/Shrnut%C3%AD%20POK.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_tz090507pok/$FILE/Shrnut%C3%AD%20POK.pdf)
- [3] T. LLC, „Woven And Combo - CHOMARAT 200T M46J 6K 50B“. [https://www.900gpa.com/en/product/fabric/WovenCombo\\_00073AC4D9?u=metric](https://www.900gpa.com/en/product/fabric/WovenCombo_00073AC4D9?u=metric) (viděno bře. 04, 2021).
- [4] „TITANIUM ALLOY GUIDE.pdf“. Viděno: bře. 04, 2021. [Online]. Dostupné z: <https://www.spacematdb.com/spacemat/manudatasheets/TITANIUM%20ALLOY%20GUIDE.pdf>
- [5] S. M. Mousavi G, F. Faraji, A. Majazi, a K. Al-Haddad, „A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, roč. 67, s. 477–490, led. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.060.
- [6] „Secondary (Rechargeable) Batteries – Battery University“. [https://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries) (viděno bře. 12, 2021).
- [7] „Introduction to NiMH Battery Technology“. [https://www.cobasys.com/pdf/tutorial/InsideNimhBattery/inside\\_nimh\\_battery\\_technology.html](https://www.cobasys.com/pdf/tutorial/InsideNimhBattery/inside_nimh_battery_technology.html) (viděno bře. 13, 2021).
- [8] I. Sarbu a C. Sebarchievici, „A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage“, *Sustainability*, roč. 10, č. 1, Art. č. 1, led. 2018, doi: 10.3390/su10010191.
- [9] „Průmyslové ukládání tepelné energie – do tekutých solí | allforpower.cz“. <https://allforpower.cz/zajimavosti/prumyslove-ukladani-tepelne-energie-do-tekutych-soli-36> (viděno bře. 20, 2021).
- [10] „Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie“, *oEnergetice.cz*. <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie/> (viděno bře. 25, 2021).
- [11] P. Nikolaidis a A. Poullikkas, „Journal of Power Technologies 97 (3) (2017) 220-245 A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability“, lis. 2017.
- [12] K. Mongird *et al.*, „Energy Storage Technology and Cost Characterization Report“, PNNL-28866, 1573487, čvc. 2019. doi: 10.2172/1573487.
- [13] „Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030“, s. 132, 2030.
- [14] P. Sláčala, „Environmentální aspekty vodních elektráren v České republice“, s. 70.
- [15] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, a Y. Ding, „Progress in electrical energy storage system: A critical review“, *Prog. Nat. Sci.*, roč. 19, č. 3, s. 291–312, bře. 2009, doi: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.
- [16] „World’s largest lithium-based energy storage system storing 1,200 MWh of power now online in California“, *Solar Power World*, led. 06, 2021. <https://www.solarpowerworldonline.com/2021/01/worlds-largest-lithium-based-energy-storage-system-storing-1200-mwh-of-power-now-online-in-california/> (viděno dub. 30, 2021).
- [17] „E17IR ThEnergy Stor\_AH\_Jan2013\_final\_GSOK.pdf“. Viděno: dub. 29, 2021. [Online]. Dostupné z: [https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E17IR%20ThEnergy%20Stor\\_AH\\_Jan2013\\_final\\_GSOK.pdf](https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E17IR%20ThEnergy%20Stor_AH_Jan2013_final_GSOK.pdf)
- [18] J. Wang *et al.*, „Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development“, *Energies*, roč. 10, č. 7, Art. č. 7, čvc. 2017, doi: 10.3390/en10070991.

- [19] H. Ibrahim, A. Ilinca, a J. Perron, „Energy storage systems—Characteristics and comparisons", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, roč. 12, č. 5, s. 1221–1250, čer. 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.01.023.
- [20] S. Nomura, T. Shintomi, S. Akita, T. Nitta, R. Shimada, a S. Meguro, „Technical and Cost Evaluation on SMES for Electric Power Compensation", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, roč. 20, č. 3, s. 1373–1378, čer. 2010, doi: 10.1109/TASC.2009.2039745.
- [21] Janardhanan. R. Rani, R. Thangavel, S.-I. Oh, Y. S. Lee, a J.-H. Jang, „An Ultra-High-Energy Density Supercapacitor; Fabrication Based on Thiol-functionalized Graphene Oxide Scrolls", *Nanomaterials*, roč. 9, č. 2, led. 2019, doi: 10.3390/nano9020148.
- [22] „Bath County Pumped Storage Station", *Wikipedia*. čer. 27, 2020. Viděno: kvě. 15, 2021. [Online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bath\\_County\\_Pumped\\_Storage\\_Station&oldid=964824571](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bath_County_Pumped_Storage_Station&oldid=964824571)
- [23] „Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně", *Wikipedie*. led. 28, 2021. Viděno: kvě. 15, 2021. [Online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C5%99e%C4%8Derp%C3%A1vac%C3%AD\\_vodn%C3%AD\\_elektr%C3%A1rna\\_Dlouh%C3%A9\\_str%C3%A1n%C4%9B&oldid=19411005](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C5%99e%C4%8Derp%C3%A1vac%C3%AD_vodn%C3%AD_elektr%C3%A1rna_Dlouh%C3%A9_str%C3%A1n%C4%9B&oldid=19411005)
- [24] „Rosamond A-CAES Project – Hydrostor". <https://www.hydrostor.ca/rosamond/> (viděno kvě. 16, 2021).
- [25] „Ouarzazate Solar Power Station", *Wikipedia*. dub. 24, 2021. Viděno: kvě. 15, 2021. [Online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ouarzazate\\_Solar\\_Power\\_Station&oldid=1019552365](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ouarzazate_Solar_Power_Station&oldid=1019552365)
- [26] A. Tomczewski, „Operation of a Wind Turbine-Flywheel Energy Storage System under Conditions of Stochastic Change of Wind Energy", *Sci. World J.*, roč. 2014, s. e643769, srp. 2014, doi: 10.1155/2014/643769.
- [27] „Electricity stored in a flywheel", *ŠKODA Storyboard*, dub. 09, 2020. <https://www.skoda-storyboard.com/en/innovation-and-technology/electricity-stored-in-a-flywheel/> (viděno kvě. 03, 2021).
- [28] „Superkapacitory a jejich použití jako vyrovnávacího zdroje napětí v lokální energetické síti průmyslu i jinde". [http://www.smartcityvpraxi.cz/zajimave\\_projekty\\_280.php](http://www.smartcityvpraxi.cz/zajimave_projekty_280.php) (viděno kvě. 25, 2021).
- [29] „Coal-fired power plant to be converted into heat storage facility | en:former". <https://www.en-former.com/en/coal-fired-power-plant-as-large-heat-storage-facility/> (viděno bře. 23, 2021).
- [30] „ČEPS, a.s." <https://www.ceps.cz/cs/data#Generation> (viděno úno. 03, 2021).
- [31] J. Santamarta, „NREL Awarded \$2.8 Million to Develop a Long-Duration Thermal Energy Storage Technology", *HELIOSCSP*. <https://helioscsp.com/nrel-awarded-2-8-million-to-develop-a-long-duration-thermal-energy-storage-technology/> (viděno bře. 23, 2021).
- [32] G. Genta, *Kinetic Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [33] „Exploding Hoverboards Explained", *ECS*. <https://www.electrochem.org/exploding-hoverboards-explained/> (viděno bře. 14, 2021).
- [34] „Energyweb", 2006. <https://www.energyweb.cz/web/index.php> (viděno bře. 06, 2021).
- [35] „Věda a technika v pozadí Činnost přečerpávací elektrárny | Eduportál Techmania". <http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/663> (viděno bře. 06, 2021).
- [36] „Secondary batteries - HomoFaciens". [https://www.homofaciens.de/technics-electrochemistry-rechargeable-cells\\_en.htm](https://www.homofaciens.de/technics-electrochemistry-rechargeable-cells_en.htm) (viděno bře. 12, 2021).
- [37] „What is a Lead-Acid battery?" <https://www.off-grid-europe.com/info/lead-acid-battery/> (viděno bře. 12, 2021).

- [38] M. Krack, M. Secanell, a P. Mertiny, „Rotor Design for High-Speed Flywheel Energy Storage Systems", 2011. doi: 10.5772/18359.
- [39] „Compressed air energy storage (CAES)", *Oil Free Air*, úno. 16, 2018. <https://www.oilfree-air.eu/compressed-air-energy-storage-caes/> (viděno bř. 25, 2021).
- [40] J. C. jcox@bakersfield.com, „Compressed-air energy storage project proposed in eastern Kern", *The Bakersfield Californian*. [https://www.bakersfield.com/news/compressed-air-energy-storage-project-proposed-in-eastern-kern/article\\_6f158d10-a933-11eb-ba7b-bbeb70eef846.html](https://www.bakersfield.com/news/compressed-air-energy-storage-project-proposed-in-eastern-kern/article_6f158d10-a933-11eb-ba7b-bbeb70eef846.html) (viděno kvě. 16, 2021).
- [41] „Technologický plán akumulace energie (elektrické a tepelné)", *oEnergetice.cz*, kvě. 06, 2017. <https://oenergetice.cz/elektrina/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/> (viděno kvě. 16, 2021).
- [42] „Noor solar power in Morocco", *ECOHZ*. <https://www.ecohz.com/renewable-energy-solutions/powerplants/noor-solar-power-in-morocco/> (viděno kvě. 15, 2021).

## 9. Seznam obrázků

### Tabulka obrázků

Obrázek 1.1. Výroba některých druhů OZE v ČR dne 02.02.2021 [30].....	2
Obrázek 3.1. Schéma obecného akumulátoru pro elektrickou energii.....	5
Obrázek 3.1.1. Metoda akumulace kinetické energie rotačního tělesa.....	7
Obrázek 3.1.2. Příklady různých tvarů setrvačnicku a jejich činitele tvaru K [32].....	10
Obrázek 3.1.3. Reálný rozpoložení setrvačnickového akumulátoru[38].....	12
Obrázek 3.2.1. Metoda akumulace potenciální gravitační energie.....	13
Obrázek 3.2.2. Obecný příklad přečerpávací vodní elektrárny [34].....	16
Obrázek 3.2.3. Přečerpávací elektrárna Dlouhé Stráně [35].....	16
Obrázek 3.3.1. Sekundární článek [36].....	17
Obrázek 3.3.2. Olověný akumulátor jako autobaterie [37].....	18
Obrázek 3.3.3. Příklad Ni-Cd akumulátoru [11].....	19
Obrázek 3.3.4. Li-ion článek s kobaltovou katodou[33].....	20
Obrázek 3.4.1. Rozdělení tepelných akumulátorů[8].....	21
Obrázek 3.4.2. Principy tepelných akumulátorů [8].....	22
Obrázek 3.4.3. Příklad TES využívající vysloužilou uhelnou elektrárnu[29].....	24
Obrázek 3.4.4. Příklad moderního TES používající jako médium písek [31].....	24
Obrázek 3.5.1. Příklad tlakového akumulátoru [39].....	27
Obrázek 3.6.1. Princip SMES [11].....	28
Obrázek 3.6.2. Princip superkondenzátoru [11].....	29
Obrázek 5.1. Graf ceny SMES[20].....	35
Obrázek 6.1.1. Koncept A-CAES akumulátoru [40].....	38
Obrázek 6.1.2. Solární elektrárna Noor [42].....	39
Obrázek 6.2.1. Předpokládaný vývoj ceny lithium-fosfátové baterie na rok 2030 [13].....	40
Obrázek 7.1. Vývoj dosavadních způsobů akumulace energie [41].....	42

## 10. Seznam tabulek

### Seznam tabulek

Tabulka 3.1.1. Porovnání vlastností jednoho druhu uhlíkového kompozitu a slitiny titanu[1][4].....	9
Tabulka 3.2.1. Parametry vody za atmosférické tlaku.....	14
Tabulka 3.3.1. Porovnání některých používaných chemických akumulátorů [6].....	18
Tabulka 3.3.2. Materiály hydridů kovů MH Ni-MH akumulátorů [7].....	20
Tabulka 3.4.1. Média používaná pro systém SHS [8].....	23
Tabulka 3.4.2. Příklady solí užívaných v systému SHS [9].....	23
Tabulka 5.1. Orientační hodnoty kinetických akumulátorů [12].....	33
Tabulka 5.2. Orientační hodnoty PHS [13].....	33
Tabulka 5.3. Orientační hodnoty chemických akumulátorů [13], [15], [16].....	34
Tabulka 5.4. Orientační hodnoty STES a PCM [17], [18].....	34
Tabulka 5.5. Orientační hodnoty systému CAES [13], [18], [19].....	34
Tabulka 5.6. Orientační hodnoty přímých akumulátorů elektrické energie[20], [21].....	35
Tabulka 6.1.1. Porovnání médií pro aplikaci v energetice.....	36
Tabulka 6.2.1. Porovnání médií pro aplikaci v elektromobilitě.....	40