ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přehled technologií pro akumulaci energie

Jan Vojta

Plzeň 2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

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

Jméno a příjmení:	**Jan VOJTA**
Osobní číslo:	**E19B0031K**
Studijní program:	**B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce:	**Přehled technologií pro akumulaci energie**
Zadávající katedra:	**Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

Zpracujte přehled technologií pro akumulaci energie

1. Popište princip funkce jednotlivých technologií.
2. Popište jejich výhody a nevýhody.
3. Určete současnou úroveň připravenosti technologií.
4. Porovnejte jednotlivé technologie na základě stanovených parametrů.

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

Seznam doporučené literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:	**Ing. et Ing. Martin Vinš** Research and Innovation Centre for Electrical Engineering
Oponent bakalářské práce:	**Ing. Aleš Hromádka, Ph.D.** Research and Innovation Centre for Electrical Engineering
Datum zadání bakalářské práce:	**8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**26. května 2022**

Západočeská univerzita v Plzni * Fakulta elektrotechnická *

L.S.

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

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá možnostmi ukládání elektrické energie pro velká, síťová úložiště. V první části práce jsou popsány akumulační systémy, pomocí kterých je možné energii akumulovat. Pozornost je věnována především systémům využívaným velkými síťovými úložišti. Druhá část práce popisuje výhody a nevýhody jednotlivých akumulačních systémů. V poslední části práce jsou technologie porovnány z hlediska parametrů, vlivu na životní prostředí a jejich možného budoucího vývoje.

Klíčová slova

Akumulace energie, akumulátorové baterie, biomasa, elektrárna, obnovitelné zdroje, průtočné baterie, přečerpávací elektrárna, setrvačník, stlačený vzduch, superkondenzátory, syntetická paliva, tepelné systémy, vodík, zkapalněný vzduch

Abstract

The bachelor thesis deals with the possibilities of electrical energy storage for large, grid scale storage systems. In the first part of the thesis, energy storage systems are described. In particular, attention is paid to systems used by large mass storage systems. The second part of the thesis describes the advantages and disadvantages of each storage system. The last part of the thesis compares the technologies in terms of parameters, environmental impact and their possible future development.

Key words

Energy storage, Batteries, Biomass, Power plant, Renewables, Flow batteries, Pumped storage, Flywheel, Compressed air, Supercapacitors, Synthetic fuels, Thermal systems, Hydrogen, Liquefied air

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 28.4.2022 Jan Vojta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. et Ing. Martinovi Vinšovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Také bych mu rád poděkoval za trpělivost, kterou při dokončování mé práce měl.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 10

ÚVOD 11

1 TECHNOLOGIE AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE 12

1.1 MECHANICKÉ SYSTÉMY 12
1.1.1 Přečerpávací vodní elektrárny 12
1.1.1.1 Princip technologie 12
1.1.1.2 Uspořádání PHES a konstrukce 14
1.1.1.3 Technické parametry 16
1.1.2 Systémy pro akumulaci energie se setrvačníky 16
1.1.2.1 Princip technologie 16
1.1.2.2 Reálné instalace 17
1.1.2.3 Technické parametry 18
1.1.3 Systémy pro akumulaci energie se stlačeným vzduchem 18
1.1.3.1 Princip technologie 18
1.1.3.2 Reálné instalace a možné využití, účinnost 19
1.1.3.3 Technické parametry 21
1.1.4 Systémy pro akumulaci energie se zkapalněným vzduchem 22
1.1.4.1 Princip technologie 22
1.1.4.2 Reálná instalace 23
1.1.4.3 Technické parametry 23
1.2 CHEMICKÉ SYSTÉMY 24
1.2.1 Systémy pro akumulaci energie využívající vodík 24
1.2.1.1 Princip technologie a výroba vodíku 24
1.2.1.2 Zplyňování biomasy 26
1.2.1.3 Reálné instalace 28
1.2.1.4 Skladování, využití a případná úskalí vodíku 28
1.2.1.5 Technické parametry 31
1.2.2 Systémy pro akumulaci energie využívající syntetická paliva 31
1.2.2.1 Princip technologie 31
1.2.2.2 Využití a účinnost technologie 32
1.2.2.3 Technické parametry 32
1.3 ELEKTROCHEMICKÉ SYSTÉMY 33
1.3.1 Systémy pro akumulaci energie využívající akumulátorové baterie 33
1.3.1.1. Princip jednotlivých technologií 33
1.3.1.1.1 Pb-A 33
1.3.1.1.2 NiCd 33
1.3.1.1.3 Li-ion 33
1.3.1.1.4 NaS 34
1.3.1.2 Reálné instalace 35
1.3.1.3 Technické parametry 35
1.3.2 Systémy pro akumulaci energie využívající průtočné baterie 35
1.3.2.1 Technické parametry 37
1.4 ELEKTRICKÉ SYSTÉMY 38
1.4.1 Systémy pro akumulaci energie využívající superkondenzátory 38
1.4.2 Systémy pro akumulaci energie využívající supravodivé indukční akumulátory 38
1.4.3 Technické parametry 38
1.5 TEPELNÉ SYSTÉMY 39
1.5.1 Princip 39
1.5.2 Typy přeměny na teplo (P2H) 40
1.5.3 Možnosti skladování 41
1.5.4 Přeměny tepla na elektřinu (H2P) 41
1.5.5 Systém jako celek 42
1.5.6 Rozvíjené projekty, koncepce a reálné instalace 42
1.5.6.1 Elektrický ohřev, lože pevných materiálů a parní oběh 42
1.5.6.2 Elektrický ohřev, tekuté materiály a parní oběh 43
1.5.6.3 Reverzní a přímý oběh plynové turbíny, tekuté materiály v nádržích 44

1.5.6.4 Reverzní a přímý oběh s nadkritickým CO_2 45
1.5.6.5 Systémy s tepelným čerpadlem 46
1.5.6.6 Další možné principy skladování tepla 47
1.5.6.7 Technické parametry 48

2 VÝHODY A NEVÝHODY TECHNOLOGIÍ 49

2.1 PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY 49
2.2 SYSTÉMY PRO AKUMULACI ENERGIE SE SETRVAČNÍKY 49
2.3 SYSTÉMY PRO AKUMULACI ENERGIE SE STLAČENÝM VZDUCHEM 50
2.4 SYSTÉMY PRO AKUMULACI ENERGIE SE ZKAPALNĚNÝM VZDUCHEM 50
2.5 SYSTÉMY PRO AKUMULACI ENERGIE VYUŽÍVAJÍCÍ VODÍK 51
2.6 SYSTÉMY PRO AKUMULACI ENERGIE VYUŽÍVAJÍCÍ SYNTETICKÁ PALIVA 51
2.7 SYSTÉMY PRO AKUMULACI ENERGIE VYUŽÍVAJÍCÍ AKUMULÁTOROVÉ BATERIE 52
2.8 SYSTÉMY PRO AKUMULACI ENERGIE VYUŽÍVAJÍCÍ PRŮTOČNÉ BATERIE 52
2.9 SYSTÉMY PRO AKUMULACI ENERGIE VYUŽÍVAJÍCÍ SUPERKONDENZÁTORY 52
2.10 SYSTÉMY PRO AKUMULACI ENERGIE VYUŽÍVAJÍCÍ SUPRAVODIVÉ INDUKČNÍ AKUMULÁTORY 53
2.11 TEPELNÉ SYSTÉMY 53

3 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ 54

3.1 POROVNÁNÍ TECHNICKÝCH PARAMETRŮ 54
3.2 POROVNÁNÍ Z HLEDISKA CEN, VLIVU NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A PŘIPRAVENOSTI TECHNOLOGIE 59
3.3 PERSPEKTIVNÍ TECHNOLOGIE A JEJICH ODHAD BUDOUCÍHO VÝVOJE 60

ZÁVĚR 63

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ 1

SEZNAM OBRÁZKŮ 4

SEZNAM TABULEK 5

Seznam symbolů a zkratek

AEL ..... Alkalická nízkoteplotní elektrolýza

A-CAES ..... Adiabatic Compressed Air Energy Storage

AA-CAES ..... Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage

CAES ..... Compressed Air Energy Storage

CB ..... Carnotova baterie

CHEST ..... Compressed Heat Energy Storage

ETES ..... Electric Thermal Energy Storage

FESS ..... Flywheel Energy Storage System

GW ..... Gigawatt

I-CAES ..... Isothermal Compressed Air Energy Storage

kWh ..... Kilowatthodina

LAES ..... Liquid air energy storage

LH-TES ..... Latent-Heat Thermal Energy Storage

MWh ..... Megawatthodina

NaS ..... Sodíkovo-sírový akumulátor

Ni-Cd ..... Nikl-kadmiový akumulátor

Ni-Fe ..... Nikl-železný akumulátor

Pb-A ..... Olověný akumulátor

PCM ..... Skupenská změna materiálu

PEM ..... Elektrolýza s protonově selektivní membránou

PHES ..... Přečerpávací vodní elektrárna

PTES ..... Pumped Thermal Energy Storage

P2H2P ..... Power to Heat to Power

SH-TES ..... Sensible Heat Thermal Energy Storage

SMES ..... Supravodivý indukční akumulátor

SOEC ..... Elektrolyzér s keramickým elektrolytem

TCES ..... Thermochemical Energy Storage

VRFB ..... Vanadová redoxní průtoková baterie

Zn-Br ..... Zinko-bromidová baterie

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na možnosti uchovávání energie. Důvodů, proč uchovávat energii, je stále více, to ale není předmětem této práce. Hlavními požadavky na úložiště energie je reakční doba, efektivita uložení energie, a především také ekonomická stránka celé věci.

Celosvětově je nejvyužívanější akumulace pomocí přečerpávacích vodních elektráren, z hlediska instalovaného výkonu. S příchodem modernějších technologií na akumulaci elektrické energie se začínají rozšiřovat i jiné druhy akumulace, jako například akumulace do tepla, do mechanických setrvačníků nebo třeba do vodíku, kterému je předpovídána slibná budoucnost. Další možností uchování energie jsou baterie, které díky narůstající poptávce a pokročilejší technologii výroby klesají na ceně, k tomu také ve velkém přispívají elektromobily, na které je kladen obrovský důraz.

Text je rozdělen do tří částí; první se zabývá popisem jednotlivými technologiemi akumulace energie, druhá část se věnuje porovnání napříč všemi technologiemi a třetí, poslední část, se zabývá zhodnocením konkrétních možností, jak lze energii uchovávat.

1 Technologie akumulace elektrické energie

V první kapitole jsou popsány existující systémy akumulace energie. Existuje řada fyzikálních možností uchovávání energie, avšak u části z nich je v současné době značně obtížné jejich nasazení pro masové využití právě při akumulaci energie.

Základní rozdělení systémů pro akumulaci elektrické energie:

- Mechanické
- Chemické
- Elektrochemické
- Elektrické
- Tepelné [1]

1.1 Mechanické systémy

Systémy akumulace elektrické energie do mechanických systémů lze dělit na:

- Přečerpávací vodní elektrárna (PHS/PHES – Pumped Hydroelectric Energy Storage)
- Setrvačník (FESS – Flywheel Energy Storage Systems)
- Stlačený vzduch (CAES – Compressed Air Energy Storage)
- Zkapalněný vzduch (LAES – Liquid Air Energy Storage

1.1.1 Přečerpávací vodní elektrárny

1.1.1.1 Princip technologie

Přečerpávací vodní elektrárny (PHS/PHES) jsou jednou z nejzákladnějších a zároveň úplně nejpoužívanější možností uchovávání energie. Princip vodní elektrárny je relativně jednoduchý. Přečerpávací vodní elektrárna se skládá ze dvou nádrží, horní a dolní. Při akumulaci energie se elektrárna chová jako spotřebič a spotřebovává elektrickou energii na načerpání vody do horní nádrže. V momentě potřeby energie, se začíná voda z horní nádrže vypouštět přes turbínu, která roztáčí generátor, jenž vyrábí elektrickou energii.

Obr. 1 – *Přečerpávací elektrárna Dlouhé stráně [2]*

Účinnost současně využívaných přečerpávacích elektráren se pohybuje okolo 75 %, přičemž budoucí vývoj by ji dokázal teoreticky zlepšit pouze o pár jednotek procent. Největší úskalí PHES spočívá v jejích ztrátách, zejména v mechanických, tepelných, přenosem a v neposlední řadě ztrát hydraulických.

Výsledná účinnost je součinem ztrát všech účinností jednotlivých částí procesu. Při určování účinnosti PHES můžeme rozlišovat, zda se jedná o účinnost velkého nebo malého cyklu. Účinnost velkého cyklu uvažuje i ztráty vznikající přenosem elektrické energie od zdroje k čerpadlu při čerpadlovém provozu, a také ztráty vzniklé přenosem elektrické energie do místa spotřeby při provozu generátorickém. Účinnost malého cyklu je vztažena na stranu velmi vysokého napětí ke vstupnímu transformátoru. [2]

Celkový výkon samotné PHES (při zanedbání ztrát) bude odpovídat vztahu

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \qquad (1)$$

Kde:
P je teoretický výkon (W),
Q je průtok turbínou (m^3/s),
ρ je hustota vody (kg/m^3),
g je tíhové zrychlení (m/s^2),
H je střední spád (m).

Energetická kapacita přečerpávací elektrárny, taktéž při zanedbání ztrát, je vyjádřena následujícím vztahem

$$E = P \cdot t = V \cdot \rho \cdot g \cdot H \qquad (2)$$

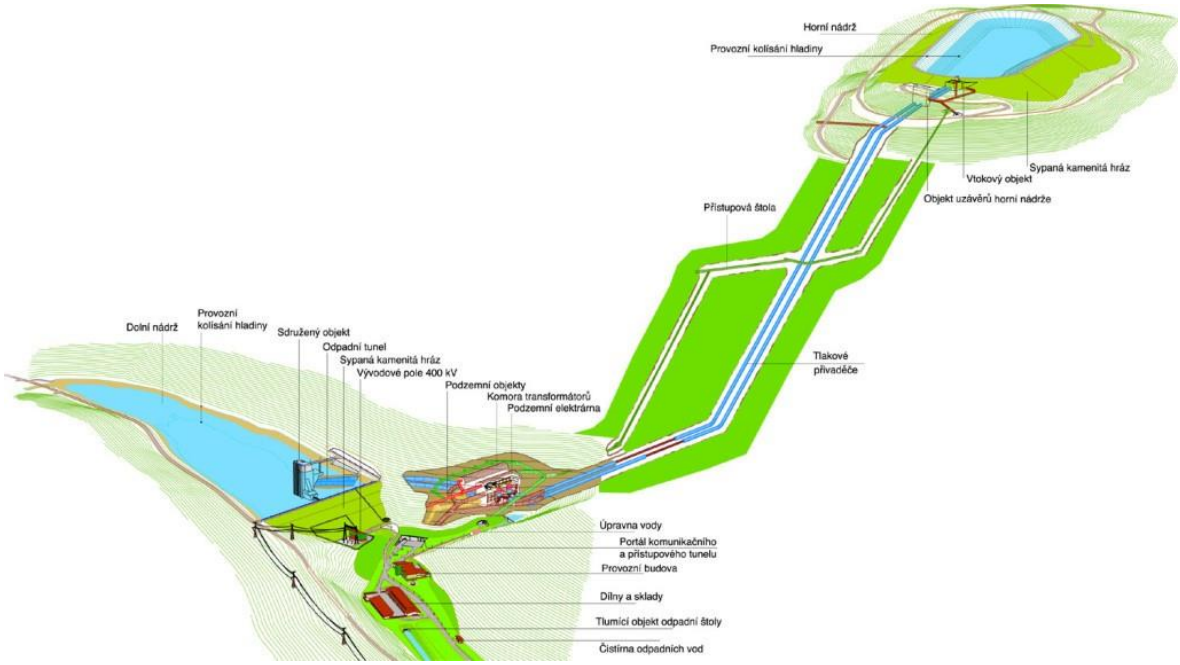
Kde:

E je teoretická energie vody ($J, W \cdot s$),

V je využitelný objem vody (m^3).

1.1.1.2 Uspořádání PHES a konstrukce

Při návrhu PHES je nutné uvažovat, jak zajistit potřebné akumulační prostory, aby bylo co nejvíce vytěženo z výškového rozdílu obou nádrží. Klade se důraz zejména na délku přivaděčů, které by měly být ideálně co nejkratší. Tento charakter je popsán pomocí parametru *H/L*, kde *H* je rozdíl hladin horní a dolní nádrže a *L* je zmiňovaná délka přivaděčů. Při výběru výsledné lokality je kladen důraz zejména na tento parametr. [2]



Obr. 2 - *Uspořádání přečerpávací vodní elektrárny [2]*

Vhodné nádrže můžou vzniknout buďto vyhloubením, přehrazením údolí, nebo vystavením obvodových hrází. Nádrž akumulační lze vybudovat nejen využitím vhodných údolí, ale také například zvýšením hráze přírodních jezer, takovéto nádrže můžeme nalézt například v horských oblastech.

Dle použitých materiálů jsou nádrže děleny na:

- zděné
- zemní
- z lomového zdiva
- hlinité
- balvanité
- betonové gravitační nebo klenbové

Přivaděče mezi oběma nádržemi mohou mít několik podob. Volí se podle geologických a topografických podmínek. Mohou být umístěné v podzemí ve formě tlakových šachet, vylámány ve skále, nebo v některých případech mohou být přivaděče vedené po povrchu jako ocelové tlakové potrubí. [2]

Jako další součást je nutné jmenovat stavební prvky elektrárny, jako je strojovna, transformovna a rozvodna. Transformovna a strojovna bývají většinou odděleny z důvodů bezpečnosti. Na stavbu strojovny má vliv zvolené horizontální nebo vertikální uspořádání soustrojí. V případně vyššího spádu je volena vertikální možnost, při menších spádech naopak horizontální.

Volba turbíny a také čerpadla je závislá na charakteru provozu PHES. Základní dělení je podle použité turbíny. Používají se turbíny přetlakové, které využívají kinetickou i potenciální energii vody, nejčastěji turbína Francisova, která je využívaná pro spád 50-800 m, případně turbína Kaplanova, pro spád 10-80 m. [2]

Druhou kategorií jsou turbíny rovnotlaké, které využívají pouze kinetickou energii. Hlavním zástupcem je turbína Peltonova, která dokáže pracovat se spádem až dvou kilometrů.

Motorgenerátor je schopný pracovat jako generátor při generátorickém provozu i jako motor při čerpadlovém provozu. Je to synchronní stroj s vyniklými póly, tedy hydroalternátor. Nutnou součástí je také transformátor, který zajišťuje přeměnu napětí a proudu na výstupu zejména kvůli snížení ztrát přenosem. [3]

1.1.1.3 Technické parametry

Tabulka 1 – *Základní technické parametry* PHES [3]

Parametr	Hodnota
Výkon (MW)	10–5 000
Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)	0,5–1,5
Měrná hustota výkonu (W/l)	0,5–1,5
Čas vybíjení (hod)	1–24
Reakční doba	sekundy až minuty
Samovybíjení (%/den)	0
Životnost (cykly)	10 000–35 000
Účinnost (%)	65–87

1.1.2 Systémy pro akumulaci energie se setrvačníky

1.1.2.1 Princip technologie

Jednou z nejjednodušších možností je spojení co nejtěžšího setrvačníku (který bude hmotnostně únosný pro další komponenty) s hřídelí elektromotoru, který je poháněn elektrickým proudem, jehož energie bude akumulována. Při využití naakumulované energie v setrvačníku funguje motor jako generátor a vyrábí zpětně elektrickou energii. Setrvačníky lze rozdělit na nízkootáčkové a vysokootáčkové. Pro výrobu nízkootáčkových je využita ocel a klasická ložiska, což omezuje maximální frekvenci otáčení na několik tisíc otáček za minutu (maximum je zhruba 10 000 otáček za minut). Kapacita setrvačníku roste s kvadrátem frekvence otáčení. [4]

Vysokorychlostní setrvačníky se skládají z uhlíkových vláken, otáčejí se ve vakuu a jsou použita magnetická ložiska. To vše přispívá ke snížení ztrát. Takové vysokorychlostní setrvačníky mohou dosahovat rychlosti až 100 000 otáček za minut. [4]

Ukládání energie do setrvačníků se průmyslově využívá například pro rychlou a krátkodobou regulaci. Setrvačníky umožňují velmi rychle reagovat a velmi dobře držet potřebnou frekvenci sítě. Výhodné je tedy jejich využití zejména pro zařízení, která jsou náchylná na změny parametrů napájení. V krátkodobém horizontu jsou schopny dodávat až jednotky MW. Účinnost se pohybuje vysoko, zhruba nad 90 % (je uvažována účinnost bez

samovybíjení). Další jejich časté využití je v případě, kdy je potřeba po krátkou dobu dodávat velmi velký výkon, například u laserů. Velkou výhodou nízkorychlostních setrvačníků je jednoduchá údržba a dlouhá životnost. U vysokorychlostních setrvačníků je údržba složitější, zejména kvůli nutnosti vakuové komory.

V energetice by mohly setrvačníky pokrývat mikrovýpadky elektrické energie, například u přímých spotřebitelů s citlivými přístroji a výrobními zařízeními. Mohly by tak pokrývat několikasekundové výpadky, které by pomohly proti potenciálnímu odstavení a zastavení provozu některých strojů, u kterých je vysoká priorita, aby nenastal jejich výpadek. [4]

Setrvačníky mohou mít i další využití, například při provozu běžných vozů, kdy při brždění vzniká kinetická energie, kterou je možné akumulovat a poté znovu využít na následný rozjezd. Obdobným principem dokážou pracovat u hybridních a elektromobilů, kde by mohla setrvačníková baterie sloužit pro krátkou akumulaci energie a opětovnou pomoc při rozjezdech.

1.1.2.2 Reálné instalace

V současnosti se využívají systémy například s výkonem 2 kW a kapacitou 6 kWh. Systémy, kde je potřeba vyšší výkon a kapacita, se skládají z více menších jednotek. Ty poté dosahují potřebného výkonu a dokážou pokrýt dodávku po dobu desítek minut. Jedná se tedy o spíše krátkodobou možnost akumulace. [30]

Jedním z největších současných setrvačníkových úložišť je setrvačníková farma u města Stephentown ve Spojených státech amerických. Jedná se o farmu sloužící ke stabilizaci frekvence v síti, v oblasti New Yorku. Celkový výkon je 20 kW. [30]

Jedním z nejnovějších a nejzajímavějších projektů využívajících setrvačníky, spouští společnost Škoda auto spolu s izraelským startupem Chakratec. Nová technologie bude zachycovat zátěžové špičky v síti a bude tak umožňovat provoz ultrarychlé nabíječky i v odlehlých místech, kde není dostatečně silná síť. Úložiště má přibližně stejnou velikost jako přepravní kontejner. První taková instalace se nachází v Praze, v areálu PVA EXPO Letňany, na které se podílela firma Pražská energetika (PRE). Úložiště spolu s rychlonabíjecí stanicí pro elektromobily dosahuje nabíjecího výkonu až 100 kW. Počítá se

s dalším rozšiřování této technologie zejména do míst vysoké koncentrace elektromobilů. [5]

1.1.2.3 Technické parametry

Tabulka 2 – *Základní technické parametry FESS [4]*

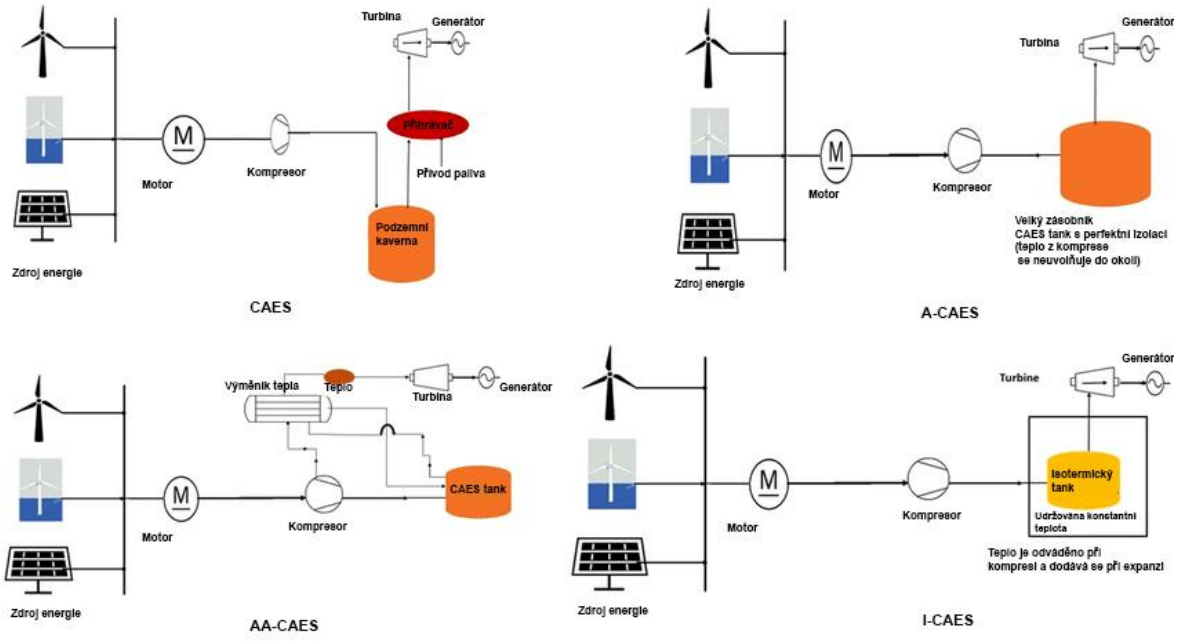
Parametr	Nízkorychlostní	Vysokorychlostní
Výkon (MW)	0,1–20	0,1–20
Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)	20–80	80—200
Měrná hustota výkonu (W/l)	200—500	1500—2000
Čas vybíjení	milisekundy-15 minut	milisekundy-15 minut
Reakční doba	milisekundy až sekundy	milisekundy až sekundy
Samovybíjení (%/den)	100	100
Životnost (cykly)	20 000–10 000 000	20 000–10 000 000
Účinnost (%)	90–95	90–95

1.1.3 Systémy pro akumulaci energie se stlačeným vzduchem

1.1.3.1 Princip technologie

Akumulace elektrické energie do stlačeného vzduchu, zkráceně CAES (z angličtiny Compressed Air Energy Storage), funguje na podobném principu jako přečerpávací vodní elektrárna. Místo čerpání vody do nádrží je naháněno velké množství stlačeného vzduchu do zásobníků. Zásobníky mohou být různé, například umělé nádrže, balony, ale také jeskyně, které musí být dobře utěsněné. Může jít například o přírodně vytvořené jeskyně nebo důlní šachty po skončení těžby surovin. [6]

Kompresor, který je poháněn elektromotorem, se chová jako spotřebič při akumulování energie – respektive při stlačování vzduchu. Naopak když je poptávka po elektrické energii, vzduch se začne zahřívat, následně se nechá expandovat a roztáčí turbínu, která vyrábí elektrickou energii. Druhou variantou může být systém, skládající se ze dvou oběhů, které sdílí pouze tepelnou energii. První oběh je tvořený standardní spalovací turbínou, vyrábějící elektrickou energii. Druhý oběh zajišťuje kompresi, akumulaci a zpracování tlakového energie stlačeného vzduchu. Oba oběhy mezi sebou sdílí pouze tepelnou energii, kterou si předávají v regeneračním výměníku.



Obr. 3 - *Rozdělení CAES [6]*

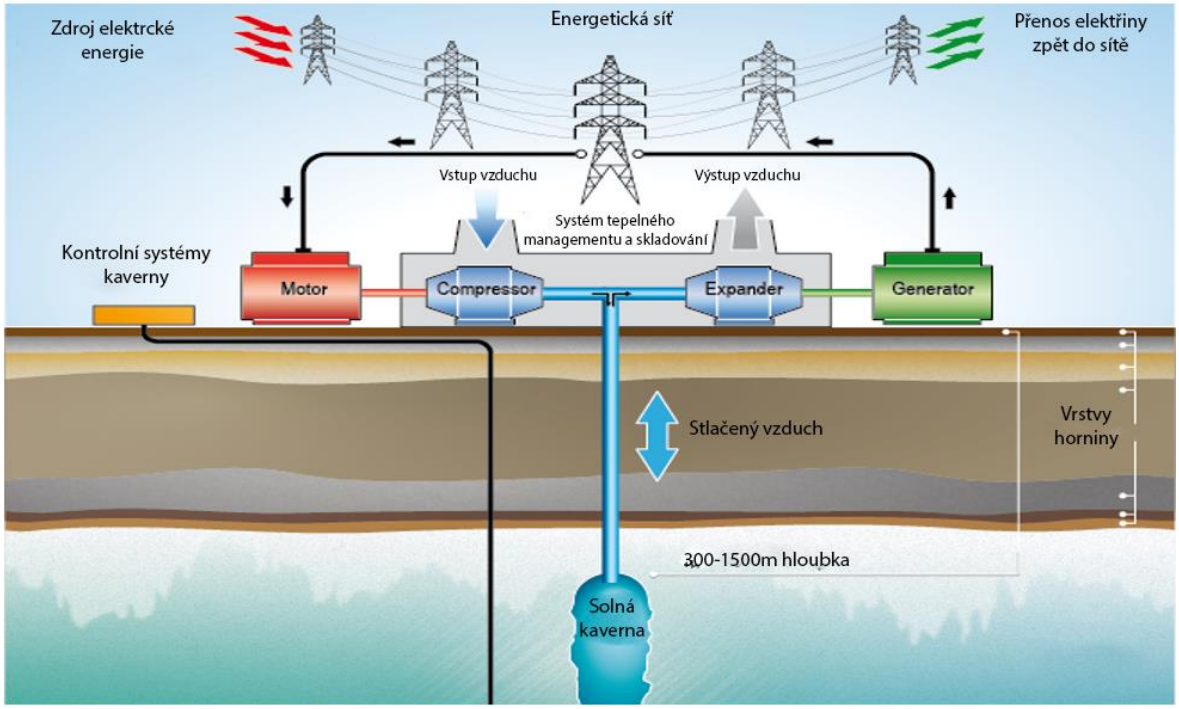
Další možností je izotermická elektrárna na stlačený vzduch (I-CAES). Princip spočívá v tom, že se vytvoří takové podmínky, aby plyn při stlačování i dekompresi neměnil svoji teplotu – tedy aby děj probíhal izotermicky. Možností, jak toho docílit, je například rozprašování kapiček v kompresním pístu během stlačování vzduchu. Velké množství kapiček má velký celkový povrch a má dobrou tepelnou kapacitu. Po kompresi se voda ze systému odebere a uschová. Tato možnost je ve vývoji a testování, její teoretická účinnost se může pohybovat okolo 70-80 %. [6]

Mezi další možné způsoby patří uchování vzduchu v pružných vacích pod hladinou moře, které se dokážou nafouknout a poté vyfouknout, tento způsob skladování lze použít i pro skladování vodíku. Vzduch by si zachovával konstantní tlak. Turbína by se roztáčela vzduchem při vyfukování vaku, což si lze vzdálené představit jako nafukování a vyfukování balonku. I tato technologie je ve stádiu výzkumu.

1.1.3.2 Reálné instalace a možné využití, účinnost

Jedno z prvních takových zařízení bylo vybudováno v německém Huntorfu už v roce 1974. Jako nádrže jsou využívány dvě bývalé solné jeskyně v hloubce zhruba 600-800 metrů, které mají celkový objem 150 000 m^3. Tlak v jeskyni se pohybuje mezi 5 až 7,5 MPa. Naplnění jeskyní stlačeným vzduchem trvá zhruba osm hodin. Kapacita systému

je přibližně 145 MWh. Lze tak efektivně pracovat s vykrytím denních špiček. Účinnost této technologie je zhruba 42 %. [6]

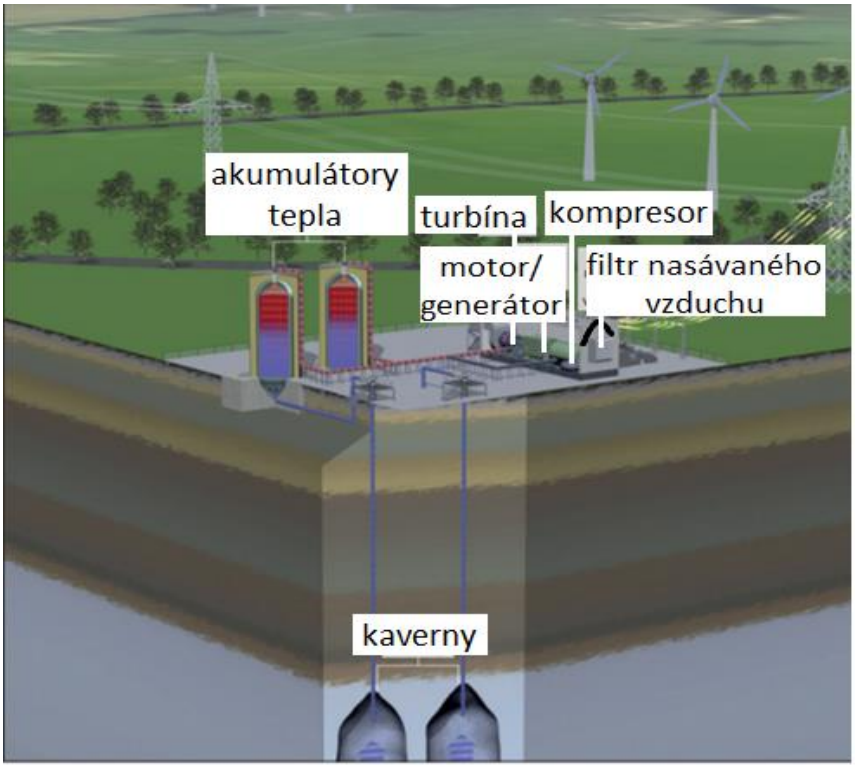


Obr. 4 - *Schéma CAES [6]*

Při stlačování vzduchu vzniká odpadní teplo, které je možné dále využívat. U výše zmiňované instalace Huntforf se odpadní teplo nevyužívá a vypouští se volně do atmosféry, proto je účinnost systému nižší. Účinnější i ekologičtější tedy je, když se dokáže odpadní teplo využít. Prvním úložištěm, kde je alespoň částečně využito odpadní teplo, je elektrárna McIntosh ve státě Alabama v USA, kde jsou jako nádrže využity solné jeskyně o objemu 538 000 m^3. Při plných nádržích je kapacita zhruba 2860 MWh. Stlačený vzduch je využíván při návratu na povrch ke spalování zemního plynu ve spalovacích komorách. Vzniklý spalovací plyn je poté expandován ve dvoustupňové plynové turbíně, která roztáčí generátor a vyrábí elektřinu. Tlak se pohybuje okolo 4,5–7,6 MPa. Snížila se tak potřeba energie na ohřev plynu zhruba o 27 %. Celková účinnost se zvedla na zhruba 54 %.

Výraznější změna v účinnosti je u instalací, kde se získané přebytečné teplo uchová apoté se využije při adiabatické dekompresi. U adiabatického CAES chybí spalovací turbína, naopak je obohacen o dříve zmíněný systém akumulace tepelné energie, která vzniká při kompresi vzduchu. Tato technologie je označována jako AA CAES (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage) a značně ovlivňuje celkovou účinnost procesu, která může

dosahovat přes 70 %. Příklad této technologie je instalace od německé firmy RWE s názvem ADELE. Ten disponuje akumulační kapacitou 1 GWh a výkonem 200 MW. [7]



Obr. 5 - *Projekt ADELE [7]*

1.1.3.3 Technické parametry

Tabulka 3 – *Základní technické parametry CAES [6], [7]*

Parametr	CAES	A-CAES	I-CAES
Výkon (MW)	5–1 000	1-100	1-10
Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)	3–12	3–12	3–12
Měrná hustota výkonu (W/l)	0,5–2	0,5–2	0,5–2
Čas vybíjení (hod)	1–24	1–24	1–12
Reakční doba (min)	1–15 min	1–15 min	1–15 min
Samovybíjení (%/den)	0	0	0
Životnost (cykly)	8 000–17 000	30 let	15 000
Účinnost (%)	42-54	70-71	80

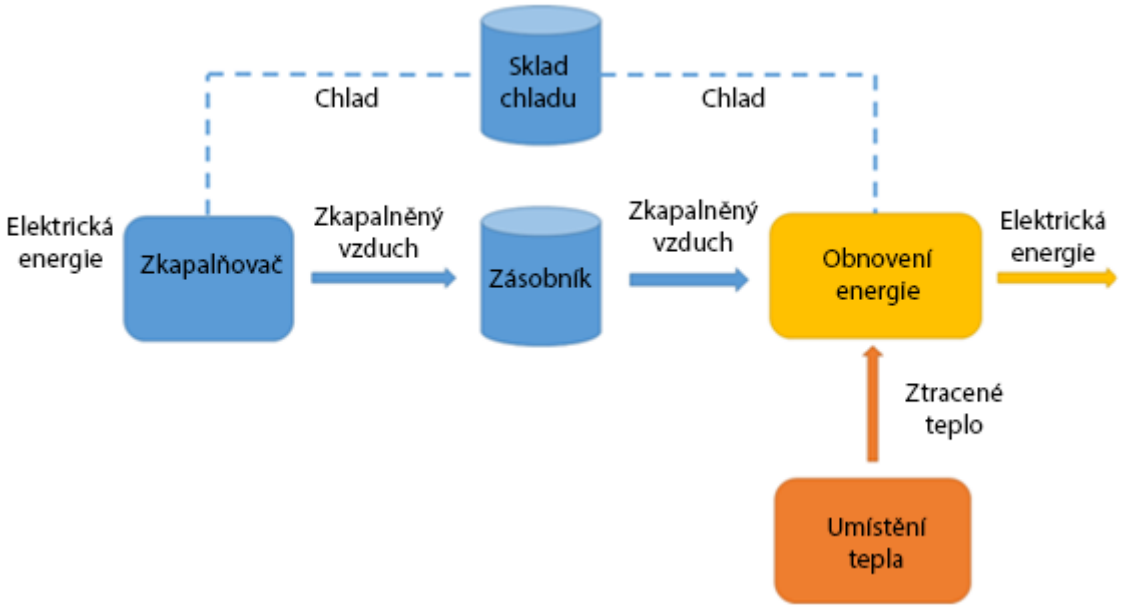
1.1.4 Systémy pro akumulaci energie se zkapalněným vzduchem

1.1.4.1 Princip technologie

Elektrická energie je využita pro stlačení a ochlazení vzduchu na teplotu -196 °C, při které dojde ke zkapalnění. Po zkapalnění se vzduch uchovává v nádržích, kde je připraven k opětovnému použití na výrobu elektrické energie. [6]

Technologie zkapalnění vzduchu je podobná technologii se stlačeným vzduchem. Nejčastěji jsou využívané pro dlouhodobější uchování elektrické energie. Mohou dodávat výkon až ve stovkách MW. Celý proces se dělí na tři fáze: [6]

1. **Fáze 1 –** Zkapalňovač, do kterého se pod tlakem vžene vzduch, přičemž průchodem tryskou klesne tlak a ochladí se a následně stejným ochlazeným vzduchem ochladí nový stlačený vzduch, který opět expanduje a proces se opakuje, dokud se vzduch nestane kapalným, čerpá pomocí elektrické energie vzduch z okolí, čistí jej a poté jej ochladí na teploty pod 0 °C, dokud vzduch nezkapalní. Ze 700 litrů okolního vzduchu se získá 1 litr kapalného.
2. **Chemické –** Kapalný vzduch je skladován v izolované nádrži při nízkém tlaku – funguje jako zásobník energie, jedná se o podobné nádrže, které jsou využívány při skladování kapalného dusíku nebo kyslíku. Taková nádrž dokáže teoreticky uschovat až několik GWh energie.
3. **Elektrochemické –** Poslední fází je zpětná přeměna zkapalněného vzduchu zpět na elektrickou energii. Toho je docíleno tak, že je kapalný vzduch nasáván z nádrže, je nadále oteplován a tím znovu zplyňován a jde do parní turbíny, která pohání generátor.



Obr. 6 - *LAES schéma [6]*

1.1.4.2 Reálná instalace

Technologie zkapalněného vzduchu nabízí odpadní chlad, který by mohl zvýšit celkovou účinnosti systému. Koncept LAES s využitím odpadního chladu představila společnost CryoHub, která představila sklad chlazených potravin v belgickém Lommelu, spolu se společností Frigologix, která je specialistou na chladicí řetězce. Principem tohoto konceptu je využití odpadního chladu na ochlazování prostor skladovacího zařízení s potravinami. [8]

1.1.4.3 Technické parametry

Tabulka 4 – *Základní technické parametry LAES [6], [8]*

Parametr	Hodnota
Výkon (MW)	15–400
Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)	80–120
Měrná hustota výkonu (W/l)	100–230
Čas vybíjení (hodiny)	1–24
Reakční doba	minuty až hodiny
Samovybíjení (%/den)	0
Životnost (cykly)	7 000–17 000
Účinnost (%)	55–62

1.2 Chemické systémy

Mezi hlavní dva zástupce chemických systémů k akumulaci energie patří:

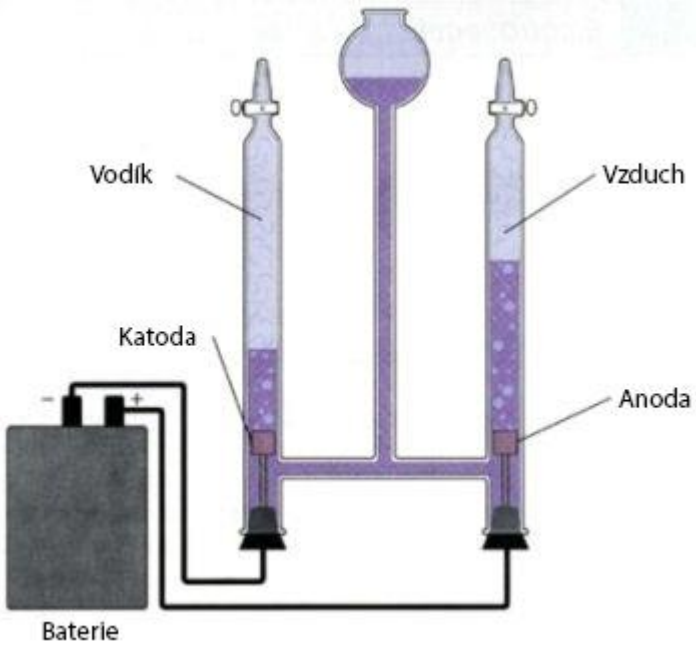
- Vodík
- Syntetická paliva

1.2.1 Systémy pro akumulaci energie využívající vodík

1.2.1.1 Princip technologie a výroba vodíku

Jedná se o nejhojnější prvek ve vesmíru, avšak v pozemských podmínkách není tak snadné jej získat. V současnosti se vodík vyrábí zejména z fosilních paliv, kdy nejčastějším případem je reforming (štěpení) zemního plynu, parciální ropná frakce a zplyňování uhlí. Je nutné si uvědomit, že při výše zmíněných výrobních procesech se uvolňuje také nežádoucí oxid uhličitý a zároveň všechny procesy stojí energii a je tedy energeticky výhodnější použít fosilní paliva rovnou k přeměně na energii. [9]

Daleko zajímavější metodou výroby vodíku je elektrolýza (neboli rozklad) vody, která dokáže využít elektrickou energii, naakumulovat ji do vodíku, který je možno v případě potřeby opět převést na elektrickou energii. Výhoda této metody výroby vodíku je ta, že vedlejším produktem tohoto procesu je pouze čistý kyslík a teplo. Při elektrolýze vody je využit stejnosměrný proud, který prochází vodou s příměsí pro zvýšení vodivosti od jedné elektrody ke druhé. Při průchodu štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem. Kladný vodíkový iont reaguje na katodě, kde se uvolňuje vodíkový plyn, který je zachycován a skladován. Na anodě se uvolňuje kyslík. Celý procesor elektrolýzy může probíhat při pokojové teplotě a je k němu potřeba pouze elektrický proud a voda s příměsí. Účinnost této technologie pyrolýzy se pohybuje zhruba v rozmezí 50-60 %. U výroby jsou uváděny jednosměrné účinnosti elektrolyzérů. Výstupem je kyslík a velmi čistý vodík. Na výrobu 1 kg vodíku elektrolýzou se spotřebuje 60 kWh elektrické energie a 9 l vody. [10]



Obr. 7 - *Elektrolýza vody [11]*

Průmyslová elektrolýza je dělena na dva hlavní typy – nízkoteplotní a vysokoteplotní. Elektrolýza alkalická nízkoteplotní (AEL) s kapalným bazickým elektrolytem je poměrně finančně nenáročná a robustní. Jedná se o nejstarší technologii s nejvyšší úrovní připravenosti (TRL 9). Jejími nevýhodami jsou nižší účinnost a flexibilita. Vyšší účinnosti se dosahuje u elektrolýzy kyselné s polymerním membránovým elektrolytem. Její nevýhoda ovšem spočívá v nutnosti využití drahých platinových kovů, které jsou použité jako elektrokatalyzátory, a polymerních elektrolytů, které jsou na bázi fluorové chemie, to dohromady vede k velmi vysoké ceně. Elektrolyt je u alkalické elektrolýzy tvořen roztokem KOH, popř. NaOH, o koncentraci 20-40 hm.% a zajišťuje transport OH^- iontů mezi elektrodami. Elektrody jsou z perforovaných kovů – slitinami s vysokým obsahem niklu, ocelí nebo katalytickým kovem. Obě elektrody jsou odděleny přepážkou, která odděluje vodík od kyslíku. AEL je komerčně zralá technologie a zároveň relativně levná, v průmyslu je poměrně hojně využívána. [11]

Nízkoteplotní elektrolyzér s protonově selektivní membránou (PEM) je poměrně jednoduchá technologie s dobrými dynamickými vlastnostmi. Základem je pevný elektrolyt, tedy polymerní membrána, která odděluje elektrody a zabezpečuje přenos H^+ iontů mezi elektrodami. Elektrochemické reakce probíhají ve vrstvě plynově difuzních elektrod, které jsou z porézních uhlíkových materiálů. Katalyzátor je z nanočástic platiny na uhlíkovém nosiči. Hlavní nevýhodou je vysoká cena z důvodu využití drahých kovů. Druhou

nevýhodou je náročnost na kvalitu vodíku. Účinnost PEM elektrolýzy se pohybuje okolo 67–82 %. Vývoj PEM se zaměřuje především na zvýšení životnosti a snížení obsahu drahých kovů. [11]

Vysokoteplotní elektrolýza se odehrává za mnohem vyšší teploty, je tedy potřeba teplo nějakým způsobem dodat. Lze toho docílit dvěma způsoby – část tepelné energie je dodána pomocí elektřiny a zbylá část přímo v podobě tepla. Tímto je zvýšena celková účinnost procesu. Proces probíhá ve vysokoteplotním elektrolyzéru, jehož provozní teploty se pohybují mezi 700–1 000 °C. Při takové teplotě je celý průběh elektrodových reakcí velmi rychlý a snižuje celkové ztráty, proto má elektrotepelný proces vyšší celkovou účinnost. Tepelná energie při rozkladu vody částečně nahrazuje elektrickou, kdy do vysokoteplotního elektrolyzéru vstupuje voda ve formě páry ve směsi s vodíkem a tu přivádí na porézní katodu, kde se produkuje další vodík. Elektrolyzér využívá pevný keramický elektrolyt (SOEC - Solid oxide electrolyzer cell), který slouží k transportu O^{2-} iontů. Je nutné zmínit, že veškeré metody vysokoteplotní elektrolýzy jsou prozatím ve stádiu výzkumu a dalších zkušebních provozů. [11]

Účinnost průmyslových technologií elektrolýzy se v dnešní době pohybuje okolo 70 %, pokročilejší a náročnější metody se dokážou dostat až k 90 %. Nutné je však podotknout, že konečná účinnost se musí vztahovat i k tomu, jak se s vodíkem naloží a jak účinný bude jeho proces využití.

1.2.1.2 Zplyňování biomasy

Jedním z nejvíc uhlíkově neutrálních způsobů výroby vodíku je zplyňování biomasy. Zplyňování biomasy je pokročilá technologie (mezi technologiemi zplyňování), při které se využívá řízeného procesu zahrnujícího teplo, páru a kyslík k přeměně biomasy na vodík a další produkty bez potřeby spalování. [12]

Biomasa je obnovitelný zdroj, který nejčastěji zahrnuje zbytky zemědělských plodin (například sláma nebo kukuřičné klasy), zbytky dřevin z lesů, trávu, nebo některé stromy jako je vrba, ale také organický komunální odpad a živočišný odpad. Všechny tyto suroviny zle využít pro zplyňování biomasy. Zplyňování biomasy je proces, při kterém jsou přeměňovány organické nebo fosilní uhlíkaté materiály při vysokých teplotách (většinou přes 700 °C) bez spalování a s kontrolovaným množstvím kyslíku nebo páry na oxid

uhelnatý a vodík. Oxid uhelnatý poté reaguje s vodou a tvoří oxid uhličitý a vodík za pomoci reakce voda-plyn. Vodík z tohoto plynu lze oddělit pomocí absorbéru nebo pomocí speciální membrány. Zjednodušený příklad reakce je popsaný ve vzorci (3). Jelikož při reakci vzniká více prvků, které není při zjednodušeném popisu reakce nutné zahrnovat do rovnic, je ve vzorci uvedeno „a další“.

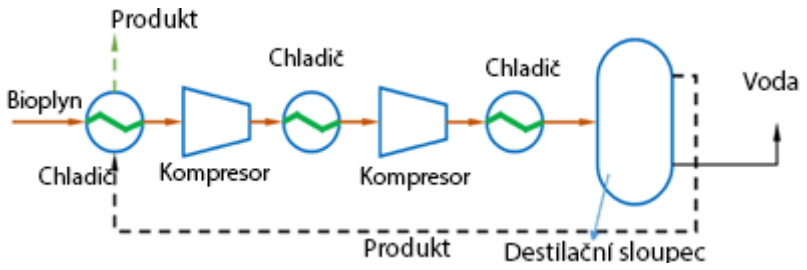
$$C_6H_{12}O_6 + O_2 + H_2O \rightarrow CO + CO_2 + H_2(+ \text{další}) \qquad (3)$$

Výše uvedená reakce využívá glukózu jako náhražku za celulózu. Skutečná biomasa má velmi proměnlivé složení, přičemž jednou z hlavních složek je celulóza. Reakci voda-plyn můžeme vidět ve vzorci (4). [12]

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2(+\text{malé množství tepla}) \qquad (4)$$

Tento způsob výroby vodíku je využíván, protože je biomasa dostupným zdrojem. Například v USA je k dispozici více biomasy, než kolik je požadováno pro potřeby potravin a krmiv. Nejnovější výzkumy ukazují, že se zlepšováním zemědělských postupů a šlechtěním rostlin by mohla být k dispozici ročně až 1 miliarda tun biomasy dostupná pro energetické využití. Dalším důvodem, proč dává výroba vodíku z biomasy smysl, jsou nízké emise skleníkových plynů. Biomasa vlastně „recykluje“ oxid uhličitý. Rostliny při svém životě spotřebovávají oxid uhličitý jako součást svého přirozeného procesu růstu, což kompenzuje vypuštěné emise oxidu uhličitého při samotném procesu zplyňování biomasy. [12], [32]

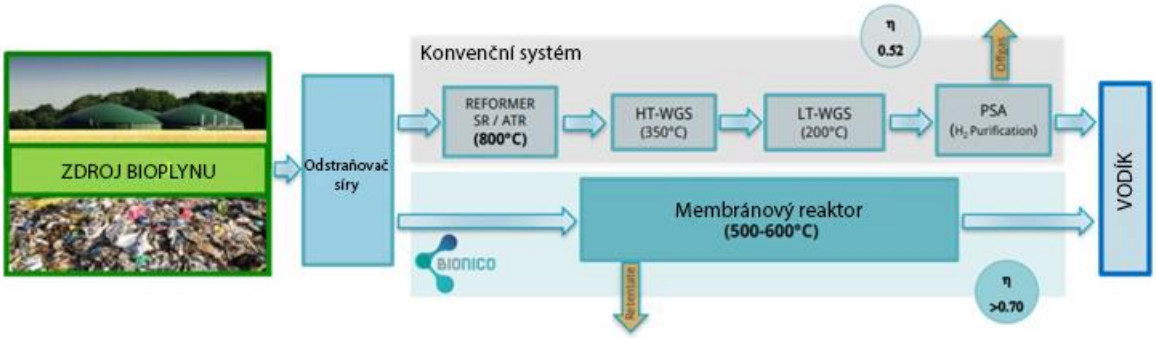
Celá technologie zplyňování biomasy je ve vývoji a čelí zejména výzvám, jak celý proces zefektivnit a zlevnit. Hlavními procesy, kde by se daly snížit celkové náklady, jsou náhrady kryogenního procesu (tedy separace bioplynu při nízkých teplotách a vysokém tlaku, přičemž je zapotřebí kompresoru, turbíny a výměníku tepla), při kterých se v současné době odděluje kyslík od vzduchu, jsou vyvíjeny nové membránové technologie pro lepší oddělení a čistění vodíku a celkové zintenzivnění procesu a eliminace celkového počtu nutných kroků. [12]



Obr. 8 – *Kryogenní separace*

1.2.1.3 Reálné instalace

Přeměnou biomasy na vodík se zabývá projekt BIONICO. Očekávaná výnosnost vodíku je zhruba 100 kg denně. Zařízení využívá technologii membránových reaktorů, které integrují v jednom zařízení výrobu i následnou separaci vodíku v jediném kroku. To výrazně ovlivnilo celkovou účinnost výroby vodíku, která se pohybuje okolo 72 %, reakce probíhá v rozmezí teplot 500-550 °C. Membrány na bázi palladia fungují jako filtry, kterými prochází pouze vodík. Je tedy možné zachytávat pouze čistý vodík. [13]



Obr. 9 - *Schéma výroby vodíku z biomasy, projekt BIONICO [13]*

1.2.1.4 Skladování, využití a případná úskalí vodíku

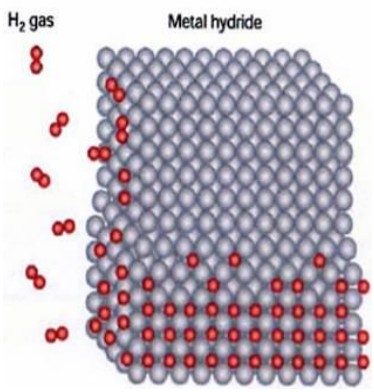
Vyprodukovaný vodík je možné dále široce využívat, ať už pro zpětnou přeměnu na elektrickou energii, tak třeba jako palivo pro vozidla na vodík, u kterých se jedná prozatím o testovací provoz, avšak jsou již komerčně prodávány. Provoz a výroba vozidel na vodík je v současnosti velmi nákladná. [9]

Vodík lze používat jako klasické palivo ve stávajících spotřebičích, které byly navrženy pro jiná paliva, záleží zejména na koncentraci s CNG, která se aktuálně ve většině zemí pohybuje okolo 2 %, nejvyšší povolenou hodnotu má Německo – 10 %. Na toto využití

vodíku běží průmyslové pilotní provozy. Vodík lze dále využít pomocí palivových článků, které využívají elektrochemickou reakci pro přímou přeměnu energie ukryté ve vodíku na elektřinu bez spalování. Probíhá reakce mezi vodíkem a kyslíkem za pomoci elektrolytu. Účinnost takových palivových článků se pohybuje mezi 40-80 %. Další možností je využít vodík jako palivo pro spalovací motor. Zde se účinnost pohybuje podobně jako u klasických benzínových motorů – nevýhoda je oproti palivovým článkům vznik emisí NOx při následném spalování, které závisí na bohatosti směsi vodíku, zejména na přebytečném množství kyslíku, který při vysokých teplotách reaguje s okolními plyny – dusíkem. Využití vodíku v palivových článcích je totiž bez emisí. [9]

Druhým možným problémem je zacházení s vodíkem, jelikož je silně hořlavý a při kombinaci se vzduchem – kyslíkem se z něj i při nízké koncentraci (4 až 95 % objemu vodíku v kyslíku, 4 až 77 % objemu vodíku ve vzduchu) stává velmi výbušná směs. Je tedy nutné s ním nakládat velmi zodpovědně a opatrně. V ideálním případě ho pečlivě oddělit od okolního prostředí. [29]

Vodík vyžaduje velmi pečlivou skladovací, dopravní a čerpací infrastrukturu. Znatelným problémem je v současné době jeho skladování a distribuce. Jedná se o plyn, který je velmi lehký a jehož molekuly jsou extrémně malé, tudíž dokáže proniknout řadou materiálů. Zásobníky určené na vodík musí být větší než třeba ty, které se využívají na zemní plyn. První možností je skladování vodíku v tlakových lahvích s velkým tlakem zhruba 350-700 bar. Může se jednat například o lahve z nízkouhlíkové oceli bez svarů. Další možností je skladování vodíku v kapalné formě, při kterém je potřeba dosáhnout velmi nízké teploty - při normálním tlaku vodík zkapalní při -253 °C. Vodík je poté uchován ve dvoustěnné nádobě, která má mezi jednotlivými vrstvami vakuum. Poslední možností skladování vodíku je uskladnění v metahydriodové nádrži, kde je vodík absorbován do kovových struktur. Skladování do hydridů kovu je velmi perspektivní metoda. Může jít například o intersticiální hydridy kovů, aktivované prášky bohaté na hořčík či komplexní hydridy lehkých kovů. S řadou kovů vytváří vodík intersticiální sloučeniny, což znamená, že kladně nabité protony vodíku obsadí vhodné intersticiální polohy v krystalové mříži, přičemž elektrony vodíku jsou jako vnější elektrony kovových prvků a přispívají do kovové vazby. [9]



Obr. 10 – *Skladování vodíku do hydridů kovů*

Možnosti, jak přepravovat vodík, jsou čtyři základní [9] – cisternou ve stlačené nádobě, izolovanou kryo cisternou v hluboce podchlazeném stavu, potrubím, které se vyplatí až při vysokých objemech přenosu a poslední možností je přimíchávání vodíku v omezeném množství k zemnímu plynu a následná přeprava pomocí standardního plynovodu.

Nejperspektivnější technologií transportu vodíku je přimíchávání se zemním plynem. To lze provozovat pomocí stávajícího vedení pro transport zemního plynu. Následně lze vodík se zemním plynem využít dohromady, případně pomocí membránové technologie oddělit zemní plyn a vodík tak, aby mohly být použity separátně. Membrána využívá tenkou vrstvu uhlíku, který je na porézních keramických podkladech. Jelikož molekuly metanu jsou větší než molekuly vodíku, které se dostávají pryč ve formě plynu. Na konci toho procesu je vodík s 80 % čistotou, následně po filtrování je čistota zhruba 90 %. [9], [28]

1.2.1.5 Technické parametry

Tabulka 5 – *Základní technické parametry elektrolyzérů vodíku [9], [11], [12]*

Parametr	Nízkoteplotní	Vysokoteplotní	PEM
Výkon (MW)	0,01–100	0,01—1 000	0,01—500
Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)	500—3 000	500—3 000	500—3 000
Měrná hustota výkonu (W/l)	0,2–20	0,2–20	0,2–20
Čas vybíjení (hod)	hodiny až týdny	hodiny až týdny	hodiny až týdny
Reakční doba	-	-	-
Samovybíjení (%/den)	téměř nulové	téměř nulové	téměř nulové
Životnost (roky)	20–30 let	5—15 let	10—15 let
Účinnost (%)	30—50	60—80	67—82

Využití vodíku je možné například v palivových článcích, které lze využít jako alternativu ke spalovacímu motoru, například u automobilů. Účinnosti palivových článků se pohybuje okolo 50 %. Další možností je spalování vodíku za účelem výroby elektrické energie, nebo tepla, kde může účinnost dosahovat až 60 %. Celková účinnost cyklu, tedy od výroby ke zpětné přeměně na elektrickou energii se pohybuje mezi 18-46 %.

1.2.2 Systémy pro akumulaci energie využívající syntetická paliva

1.2.2.1 Princip technologie

Pro získání syntetického metanu – ekvivalentu zemního plynu, je potřeba dostatku elektřiny (v ideálním případě obnovitelné elektřiny, kterou nelze napřímo využít), vodíku, který je získán elektrolýzou vody, případně z biomasy a jako poslední dostatek uhlíku. [9]

Výše zmíněným procesem je získávána poslední potřebná složka – uhlík. Nejčastěji využívaným principem je tzv. Sabatierova reakce, která se používá pro výrobu syntetického metanu – zemního plynu. Vodík při ní reaguje s oxidem uhličitým za vzniku metanu, vody a tepla. Tento proces probíhá při teplotách 300-400 °C a při zvýšeném tlaku za účasti niklového, hliníkového nebo rutheniového katalyzátoru k výrobě metanu a vody. Proces lze popsat jako reakci, která je popsána ve vzorci (5). Je nutné dodat, že k zahájení reakce je potřeba dodat počáteční energii. [9]

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O + \text{energie} \quad (5)$$

1.2.2.2 Využití a účinnost technologie

Elektrickou energii je možno z vodíku vyrábět pomocí palivových článků nebo ze syntetických paliv pomocí využití parního cyklu. Účinnost systémů akumulace pomocí syntetických paliv se pohybuje okolo 25–50 %, která se odvozuje od způsobu výroby paliva, jeho uskladnění a opětovné výroby elektrické energie. Z toho si lze vyvodit závěr, že při účinnosti zhruba 30 % se ztratilo při akumulaci cca 70 % vložené energie. Tedy výsledná spotřeba elektrické energie je třikrát taková, než kdyby byla elektřina spotřebována napřímo. U tohoto příkladu je nutné podotknout, že technologie výroby a spotřeby je stále ve vývoji a má prostory pro zlepšení. Celková účinnost se bude zvedat spíš pozvolna, vzhledem k množství potřebných procesů při celé výrobě, skladování, převozu a následné spotřebě. [9]

1.2.2.3 Technické parametry

Tabulka 6 – *Základní technické parametry syntetických paliv [9]*

Parametr	Hodnota
Výkon (MW)	100—1 000
Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)	2 000—7 200
Měrná hustota výkonu (W/l)	0,2–2
Čas vybíjení (hod)	-
Reakční doba	minuty
Samovybíjení (%/den)	téměř nulové
Životnost (roky)	25—35
Účinnost (%)	25–50

1.3 Elektrochemické systémy

Skladování elektrické energie do elektrochemických systémů se dělí na dva základní druhy:

- Akumulátorové baterie
- Průtočné baterie

1.3.1 Systémy pro akumulaci energie využívající akumulátorové baterie

Princip ukládání energie do baterií je prostý. Procházející proud akumulátorem vyvolá vratné chemické změny, které se projeví rozdílným potenciálem na elektrodách. Z elektrod se dá na úkor těchto změn následně čerpat elektrická energie zpět. Největší úskalí ukládání energie do baterií je jejich kapacita, pořizovací náklady, ale hlavně životnost a případná výroba a recyklace baterií. [6]

1.3.1.1 Princip jednotlivých technologií

1.3.1.1.1 Pb-A

Mezi nejstarší aktuálně používané baterie patří baterie olověné (Pb-A), stále se jedná o jeden z nejspolehlivějších a zároveň jeden z levnějších zdrojů energie. Olověné baterie mají hustotu energie 25-40 Wh/kg. Články jsou vyrobeny z olova a z oxidu olovnatého. Jako elektrolyt je použita kyselina sírová. Největším omezením Pb-A baterií je jejich hmotnost, kvůli množství použitých materiálů. [6]

1.3.1.1.2 NiCd

Články NiCd jsou spolehlivé, nepotřebují náročnou řídicí elektroniku a mají dlouhou životnost. Energetická hustota NiCd baterie je 40-60 kWh/m^3. V současnosti baterie NiCd nahrazujeme akumulátory nikl-metalhydridovými (NiMH), které mají hustotu energie 120 kWh/m^3 a lithium-iontovými (Li-Ion), které mají hustotu akumulované energie oproti NiMH až trojnásobnou.

1.3.1.1.3 Li-ion

U lithium-iontových baterií existuje celá řada typů s využitím různých chemických reakcí. Lithiové baterie neobsahují kovové lithium, jelikož ionty lithia jsou implementovány do struktury z jiných materiálů. Katoda je tvořena oxidy kovů nebo fosfáty s lithiem, anoda

je z grafitu nebo ze sloučeniny oxidu lithného a oxidu titaničitého. Mezi nejčastěji používané katody patří $LiCoO_2$, $LiNiO_2$, $LiNiCoO_2$, $LiFePO_4$, $LiMn_2O_4$ nebo $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$. Elektrolyt může být například z lithiové soli v organickém rozpouštědle. Jednotlivé lithiové články jsou poté skládány do bateriových multi-packů, které jsou schopné dodat potřebné napětí. Nutná je u těchto baterií řídící elektronika, která se stará o správný chod baterie, neméně důležitá je také ochrana baterie proti úplnému vybití. Lithium-iontové baterie fungují na principu pohybu lithiových iontů mezi kladnými a zápornými elektrodami. Během nabíjení se lithiové ionty přemisťují z kladné elektrody do záporné prostřednictvím elektrolytu. Když se baterie vybíjí, lithiové ionty se pohybují v opačném směru. Grafitové elektrody mají poměrně velkou kapacitu, zhruba 200 mAh/g, a vysoké napětí. V současné době je výzkum zaměřen na baterie s grafitovými náhražkami, které by dosahovaly kapacity až 300 mAh/g. [6]

Li-ion baterie jsou v porovnání s ostatními akumulátory jedny z nejlevnějších, avšak oproti ostatním akumulačním systémům jsou aktuálně relativně drahé, což omezuje jejich rozsáhlejší využití v distribučních sítích. Jejich možným úskalím je náchylnost na úplné vybití nebo na přebití, bateriím nevyhovuje stav dlouhodobého plného nabití, ani nízkého nabití pod zhruba 20 %. Při přebíjení dochází k nárůstu teploty. Li-ion baterie však hrají důležitou roli u nástupu elektromobilů, kde jsou hojně využívány, především díky dlouhé životnosti, vysoké rychlosti nabíjení a poměrně dobrému vlivu na životní prostředí a bezpečnosti provozu. [6]

1.3.1.1.4 NaS

Další technologií jsou baterie sodíko-sírové (NaS), jejichž zvláštností je jejich provozní teplota, která se pohybuje mezi 270–350 °C a také fakt, že se elektrody nacházejí v kapalném skupenství a elektrolyt ve skupenstvím pevném. Sodíkové baterie mohou být nebezpečné, jelikož obsahují nebezpečné látky, jako například kovový sodík, který je hořlavý, pokud by se dostal do kontaktu s vodou, jsou však snadno recyklovatelné a nejsou toxické. Proto je nutné sodíkové baterie konstruovat jako hermeticky uzavřené, v pouzdru z dvoustěnné nerezové oceli. Každý článek je obklopen pískem. Pozitivní stránky těchto akumulátorů jsou zejména v hustotě akumulované energie. NaS baterie dosahují teoretické hodnoty okolo 800 Wh/kg. Jelikož se při takto vysokých teplotách zvyšují náklady na provoz a údržbu, ale také přináší velké bezpečností riziko kvůli roztaveným elektrodám, které mají

nižší bod tání, než je optimální teplota provozu baterie – to tedy omezuje širší využití těchto baterií, a proto je hustota uvedena jako teoretická. Vysoký je také počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, který se pohybuje okolo 4 500 cyklů a jejich životnost by měla být kolem 15 let. [6]

1.3.1.2 Reálné instalace

NiCd články své využití našly v prvních větších úložištích elektrické energie, například u systému BESS firmy GVEA, který byl dokončen již v roce 2003. Úložiště nabízí kapacitu 6,75 MWh. Další menší instalací je v Nizozemských Antilách, kde se nachází úložiště s výkonem 3 MW s dobou jmenovitého výkonu dvou minut. Pomáhá při regulaci solárních a větrných zdrojů a umožňuje tak překonat dobu při výpadku a najetí záložního zdroje. NaS akumulátory jsou využívané pro síťová úložiště zejména v Japonsku, kde dosahuje jejich celkový instalovaný výkon zhruba 300 MW. [6]

1.3.1.3 Technické parametry

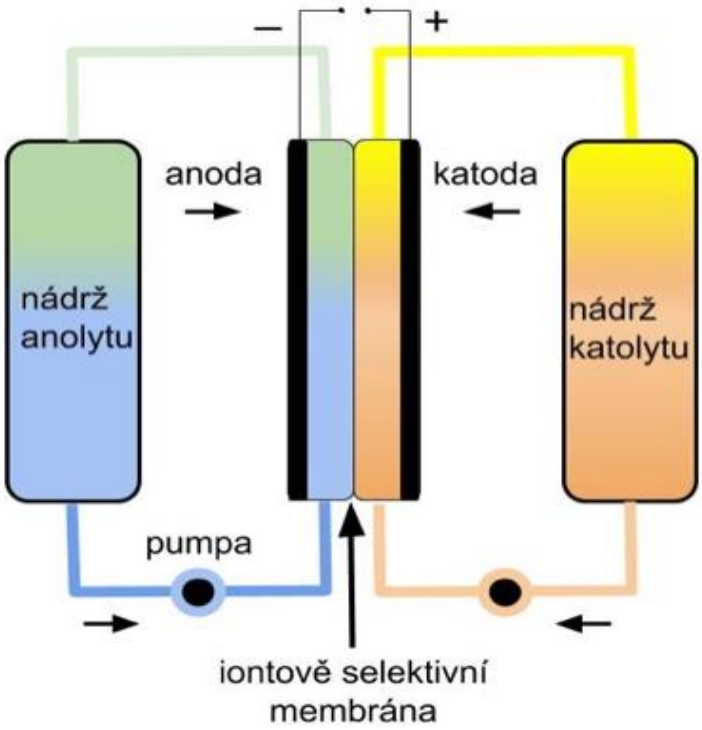
Tabulka 7 – *Základní technické parametry akumulátorových baterií [6]*

Kategorie	Ni-Cd	Na-S	Li-ion	Pb-A
Výkon (MW)	0–0,5	0,5—35	0–100	0–40
Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)	60–150	150–250	200–500	50–90
Měrná hustota výkonu (W/l)	150–300	150–230	500–2 000	10–400
Čas vybíjení (hod)	sekundy – hodiny	sekundy – hodiny	minuty – hodiny	sekundy – hodiny
Reakční doba	milisekundy – sekundy	milisekundy – sekundy	20ms – sekundy	5–10 ms
Samovybíjení (%/den)	10–20	20	0,03–0,3	0,1–1
Životnost (cykly)	20 000—25 000	4 000—25 000	1 000–10 000	500–1 300
Účinnost (%)	60–85	75—90	85–97	70—85

1.3.2 Systémy pro akumulaci energie využívající průtočné baterie

Průtočné baterie jsou elektrochemická zařízení pro ukládání elektrické energie, která mají vzájemně oddělený katodový a anodový elektrolyt, který je napuštěn v nádržích (rezervoárech). V případě, kdy je potřeba dodávat elektrický proud, je vháněn elektrolyt do

příslušných segmentů elektrochemických článků, separovaných od sebe membránou, která zabraňuje promíchání obou roztoků, ale přesto umožňuje výměnu určitých iontů mezi anodovým a katodovým prostorem. Průtočné baterie jsou rozděleny na dva typy – redoxní a hybridní. U redoxní průtočné baterie je v elektrolytu veškerá elektro aktivní látka (tj. látka, která je schopna elektrochemické přeměny – oxidace nebo redukce) rozpuštěná, na rozdíl tomu u hybridních je jeden nebo více prvků nerozpuštěných. Mezi nejperspektivnější průtočné baterie patří vanadová redoxní baterie (VRFB), Zinko-bromidová (Zn-Br) a Bromido-sodíková (PSB) baterie. [14]



Obr. 11 - *Schéma průtočné baterie [14]*

Během procesu nabíjení anoda odebírá elektrony, které se uvolnily při oxidaci, a katoda pak v uzavřeném obvodu tyto přenesené elektrony využije k redukčnímu ději, reakci lze vidět na vzorci (6). Samotné elektrody zůstávají netknuté. Samotné chemické změny se odehrávají pouze u aktivních látek přítomných v kapalném roztoku. Elektrolyt poté putuje zpět do rezervoáru a čeká na regeneraci v opačném procesu. U obou nádrží musí být pumpa, která elektrolyt vhání do samotné baterie. Velikost rezervoáru udává kapacitu baterie. [14]

$$\text{Anoda: } V^{2+} \leftrightarrow V^{3+} + e^{-} \qquad (6a)$$

$$\text{Katoda: } VO_2^+ + 2H^+ + e^- \leftrightarrow VO^{2+} + H_2O \quad (6b)$$

$$\text{Celková reakce: } V^{2+} + VO_2^+ + 2H^+ \leftrightarrow VO^{2+} + V^{3+} + H_2O \quad (6c)$$

Průtočné baterie mohou být konstruované jak pro malé výkony, tak výkony ve stovkách MW. Jejich celková účinnost se pohybuje okolo 60-85 %. Výrobci se chlubí zejména dlouhou životností, která se pochybuje okolo 10 000-20 000 cyklů, která závisí zejména na životnosti membrány, kterou však není příliš těžké vyměnit... Také z hlediska ekologického jsou přívětivější, jelikož se snáze recyklují. Téměř 100 % aktivního materiálu lze znovu přepracovat a opět využívat. Mezi slabé stránky se řadí zejména nízká energetická hustota, která v současné době pohybuje okolo 20 Wh na litr elektrolytu [5]. Tu by však mohla pokořit baterie vanadová, u které se podařilo zlepšit rozpustnost solí vanadu v elektrolytu a dosahuje tak hodnot výrazně lepších – až 35 Wh na litr. Toto upravené složení také zlepšilo operační teplotu. Mezi další slibné technologie patří dříve zmiňovaná Zinko-bromidová baterie, která dosahuje až 60 Wh na litr elektrolytu, která však nabízí pouze zlomek počtu cyklů, oproti bateriím vanadovým. [15]

1.3.2.1 Technické parametry

Tabulka 8 – *Základní technické parametry průtočných baterií [6], [14], [15]*

Parametr	VRFB	Zn-Br
Výkon (MW)	0,02–30	0,05—30
Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)	16–33	30—60
Měrná hustota výkonu (W/l)	0,5–2	1-4
Čas vybíjení (hod)	minuty – hodiny	minuty – hodiny
Reakční doba	sekundy	sekundy
Samovybíjení (%/den)	téměř nulové	téměř nulové
Životnost (cykly)	100 000—120 000	1 800—2 000
Účinnost (%)	65—85	65—80

1.4 Elektrické systémy

1.4.1 Systémy pro akumulaci energie využívající superkondenzátory

Superkondenzátory, na rozdíl od elektrochemické reakce, ukládají energii pomocí statického náboje. Oproti klasickým Li-ion bateriím mají mnohem rychlejší dobu nabíjení a výrazně delší životnost. Jejich hlavní nevýhodou je ale velice nízká energetická hustota, dokážou tedy pojmou zlomek energie oproti bateriím. Superkondenzátory mají relativně velké samovybíjení, zhruba 5-15 % nabité energie denně. Hodí se tedy zejména na krátkodobé a vysokovýkonné potřeby pokrytí energií. [16]

1.4.2 Systémy pro akumulaci energie využívající supravodivé indukční akumulátory

Supravodivý magnetický indukční akumulátor (SMES) je v podstatně cívka vyrobená ze supravodivého materiálu. Principem je akumulace elektrické energie do magnetického pole, založená na průtoku stejnosměrného proudu cívkou.

Supravodivost je stav, kdy materiál ztratí elektrický odpor, respektive se z něj stane dokonalý vodič. Toho lze docílit například extrémním ochlazením vodivého materiálu, například ponořením materiálu do tekutého hélia.

1.4.3 Technické parametry

Tabulka 9 – *Základní technické parametry superkondenzátorů a SMES [6], [16]*

Parametr	Superkondenzátory	SMES
Výkon (MW)	0,1—10	0,1—10
Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)	2,5–15	0,2—6
Měrná hustota výkonu (W/l)	500–5 000	1 000—4 000
Čas vybíjení (hod)	milisekundy až hodiny	milisekundy—30 minut
Reakční doba	8 milisekundy	<100 milisekund
Samovybíjení (%/den)	5—15	1—15
Životnost (cykly)	10 000–100 000	10 000–150 000
Účinnost (%)	90–98	95—98

1.5 Tepelné systémy

Systémy akumulace elektrické energie v podobě tepla mají vysoký potenciál v blízké budoucnosti změnit energetický trh, zejména díky relativně nízké ceně a dlouhé životnosti. Tato zařízení, která akumulují teplo, jsou známá pod následujícími zkratkami:

ETES (Electric Thermal Energy Storage)

Jsou systémy, které lze nabíjet elektrickou energií, nebo přímo teplem.

PTES (Pumped Thermal Energy Storage)

Jsou systémy, které fungují tak, že pomocí velkého tepelného čerpadla přeměňují elektřinu na teplo a zpět.

P2H2P (Power to Heat to Power)

Jsou systémy, které využívají elektřinu na výrobu tepla pomocí kotlů.

CHEST (Compressed Heat Energy Storage)

Jsou systémy, který funguje na principu střednětеplotního konvenčního Rankinova cyklu v kombinaci se zásobníkem latentního tepla.

Hlavním pojmem pro popis tepelných akumulačních systémů pro nás bude Carnotova baterie (CB). Tento pojem označuje technologie pro ukládání elektrické energie do tepla a zpětné převedení na elektrickou energii.

1.5.1 Princip

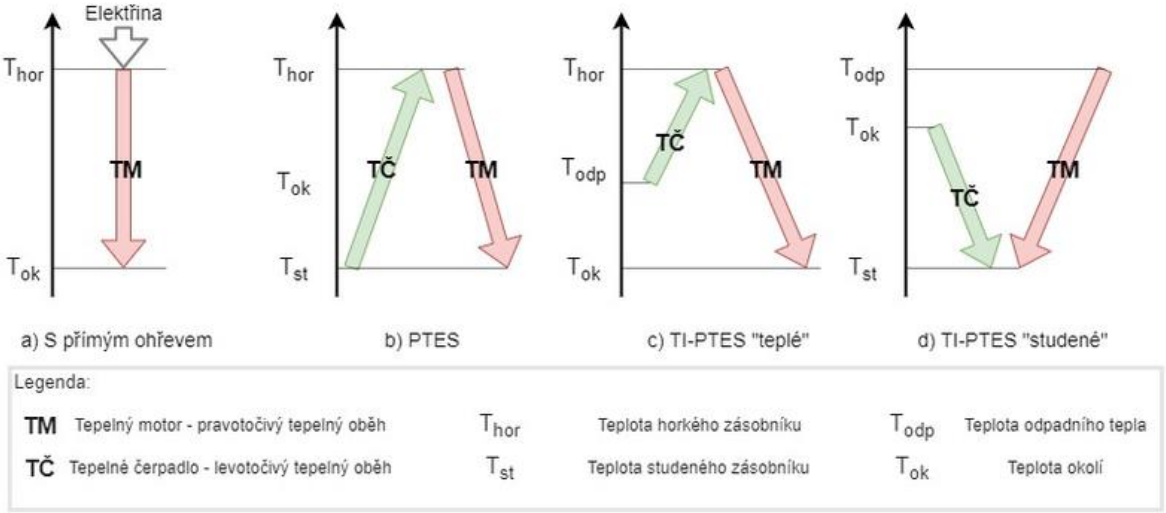
Celý princip fungování Carnotových baterií má tři základní cykly – nabíjení, akumulace a vybíjení. Princip fungování lze vidět na Obr. 12.

Obr. 12 - *Princip fungování Carnotových baterií [17]*

Zaprvé je nutné elektrickou energii přeměnit na teplo, toto teplo následně efektivně skladovat do doby, kdy bude potřeba teplo zpětně přeměnit na elektrickou energii. Účinnost procesu je definována jako poměr získané elektrické energie ze systému k elektrické energii dodané při nabíjení, označuje se jako *roundtrip efficiency* neboli elektrická vratná účinnost celého reverzního procesu. Existují i systémy, kde je využíváno produkované teplo či chlad, v takovém případě je energetická účinnost definována výpočtem veškeré využité energie

1.5.2 Typy přeměny na teplo (P2H)

Další rozdělení Carnotových baterií je podle toho, jak se mění energie na teplo. Prvním druhem jsou systémy s přímým ohřevem (buďto odporovým nebo indukčním) na Obr. 13 bod a), a dále na systémy s levotočivými tepelnými oběhy (zařízení, které spotřebovává elektrickou energii, odebírání okolní teplo a přeměňuje ho na vyšší teplotní hladinu – tepelná čerpadla, chladicí zařízení), v tomto případě konkrétně tepelná čerpadla.



Obr. 13 - *Rozdělení systémů dle typu přeměny [17]*

Tyto systémy jsou nazývané *Pumped Thermal Electricity Storage* (PTES). Systémy s tepelnými čerpadly se dále dělí na samostatné PTHS bez další tepelné integrace, bod b), které pracují pouze s vnější elektrickou energií. Další kategorií jsou takzvané integrované TI-PTES, které využívají odpadní teplo, většinou z průmyslových provozů. Podle způsobu

využití odpadního tepla je lze dále rozdělit na teplé, které odpadní teplo převádí na vyšší teplotní úroveň, bod c), nebo studené, které skladují chlad, jenž byl vytvořený chladicím oběhem, který zvyšuje teplotní rozdíl a tím zároveň i účinnost, bod d). [17]

1.5.3 Možnosti skladování

Carnotovy baterie lze dělit podle způsobu možnosti skladování na akumulaci citelného (teplo, které způsobuje změnu teploty objektu) nebo latentního tepla (teplo potřebné pro změnu skupenství), případně využití tepelně-chemických vazeb – termochemické, nebo fyzikální vazby – sorpce, adsorpce a absorpce. Využívání chemických a fyzikálních vazeb není v současnosti příliš rozšířené, jelikož se jedná o technologie, které nejsou dostatečně vyvinuty a jsou tedy ve stádiu výzkumu. [17]

Teplo lze uchovávat v materiálech v pevném skupenství, například keramické lože, štěrk nebo třeba monolity z oceli či betonu. Možné je také skladování v kapalinách – organických (oleje, nemrznoucí kapaliny) nebo anorganických (soli, voda, kovy). V současné době jsou u vysokoteplotních aplikací nejrozšířenější například roztoky soli, které jsou využívány například u koncentrovaných solárních elektráren. [18]

Latentní teplo se skladuje s vysokou energetickou hustotou pomocí takzvané PCM (Phase Change Materials), respektive pomocí materiálů, u kterých dochází za dané teploty ke změně skupenství. Nejčastěji se využívá přeměna mezi pevným a kapalným skupenstvím. Možná je také varianta PCM technologie, při které je skladován zkapalněný plyn při nízkých teplotách, tedy například s přechodem plyn – kapalina. Pro fázovou přeměnu materiálu je důležité, aby byla tepelná vodivost co nejnižší. [17]

1.5.4 Přeměny tepla na elektřinu (H2P)

Využívané jsou klasické cykly známé z elektráren (Rankinův cyklus se změnou skupenství – parní oběh tepelných elektráren) anebo Braytonův pro plynové oběhy. V teoretické rovině lze uvažovat i s cykly Kalina, Stirling či kombinace Braytonova cyklu s Rankinovým (paroplyn). Nutné je však zmínit, že cykly Kalina a Stirling jsou ve stádiu výzkumu. [19]

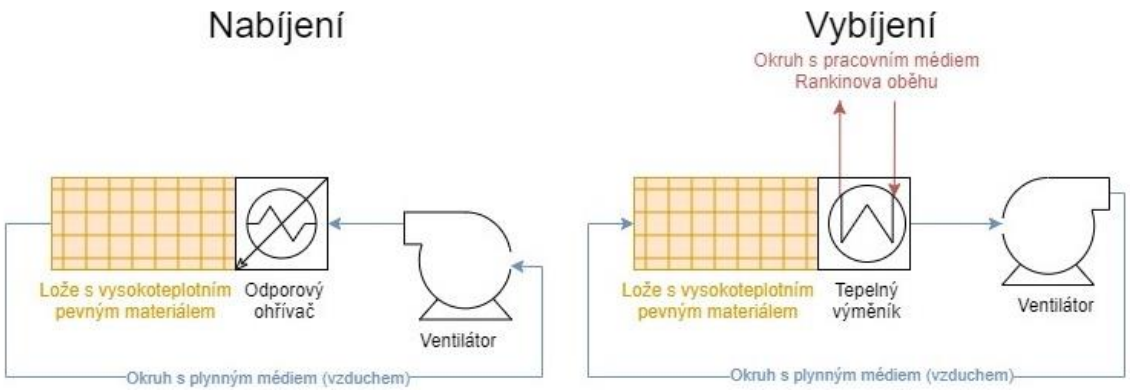
1.5.5 Systém jako celek

Spojením všech fází, tedy P2H (elektřiny na teplo), skladováním a následným procesem H2P (teplo na elektřinu) vznikne systém pro skladování elektrické energie, tedy Carnotova baterie. Může jít například o využití Braytonova oběhu plynové turbíny s rekuperací, která využívá například vzduch nebo argon. V průběhu nabíjení funguje turbína reverzně, jako tepelné čerpadlo, aby bylo dosaženo maximálního teplotního rozdílu mezi studenými zásobníky s nemrznoucí kapalinou a na druhé, teplé straně zásobníky s roztavenou solí. Teplotní spád je využit v režimu vybíjení k pohánění oběhu plynové turbíny a produkci elektřiny. Tato technologie je popsána detailněji níže. [19]

1.5.6 Rozvíjené projekty, koncepce a reálné instalace

1.5.6.1 Elektrický ohřev, lože pevných materiálů a parní oběh

Elektrická energie ohřívá pomocí odporového ohřevu vzduch. Ohřátý vzduch je tlačen ventilátorem do zásobníku, který je naplněný štěrkem, ten je zahříván na teplotu zhruba 500-600 °C. Ohřev může probíhat přímo skrze spirálový odporový ohřívač, který se nachází před ložíí se štěrkem, nebo může být využit tepelný výměník, kterým prochází vzduch (nebo jiné teplonosné médium). Důležité je, aby použitá hornina byla teplotně stabilní ve spektru, které bude využíváno, aby byla odolná proti mechanickému namáhání, měla vysokou tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost a nízkou pórovitost. Tyto požadavky plní například magmatické horniny nebo horniny z nich metamorfované – tedy přeměněné vlivem vysokých teplot, tlaku nebo chemického prostředí (například čedič, křemenec, gabro, rohovec, graniolit a jiné). Nutná je také dobrá izolace zásobníku, aby teplo vydrželo uloženo a s minimálními ztrátami po dobu několika dnů či týdnů. Tento princip je schematicky popsán na Obr. 14. Zpětná výroba elektřiny probíhá pomocí Rankinova oběhu – konvenčního tepelného oběhu (používaný např. v uhelných elektrárnách.) [19]

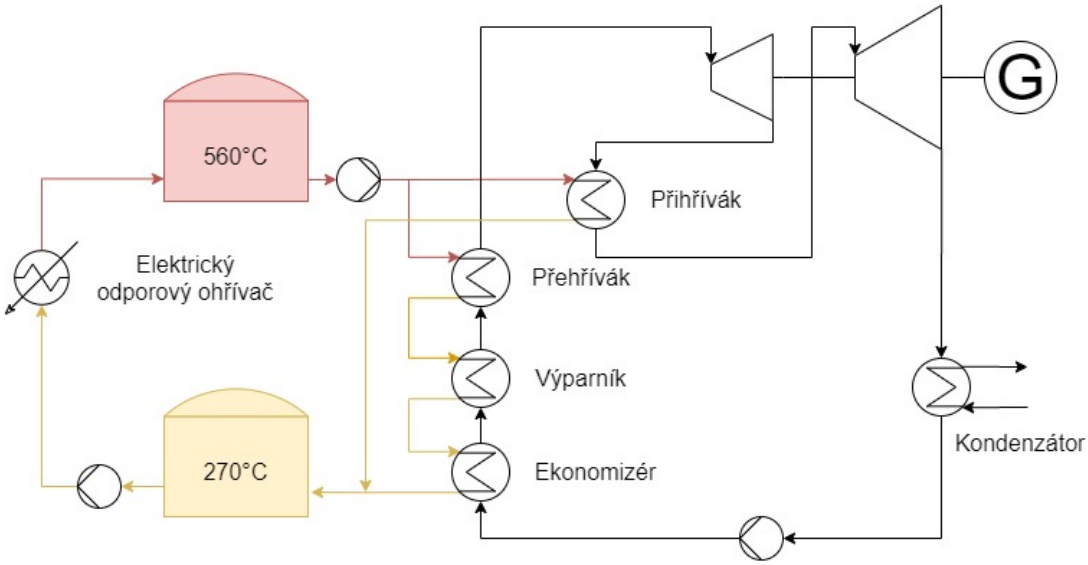


Obr. 14 - *Schéma skladování tepla – štěrkové lože [19]*

Tímto konceptem se zabývá společnost Siemens Gamesa, který je součástí koncernu Siemens a zabývá se obnovitelnými zdroji. Vývojem ETES se zabývají od roku 2011. Jeden současně největší a nejzajímavější exemplář stojí v německém Hamburku. Tento pilotní projekt byl uveden do provozu v roce 2019. Úložiště disponuje zásobníkem na více než 1000 tun horniny, která poskytuje tepelnou akumulační kapacitu 130 MWh elektrické energie při jmenovité akumulační teplotě 750 °C. Teplo se zpětně přeměňuje na elektrickou energii pomocí páry. Generátor dokáže vyrobit elektrickou energii o výkonu asi 1,5 MW. Celková účinnost systému by se měla pohybovat okolo 50 %. [20]

1.5.6.2 Elektrický ohřev, tekuté materiály a parní oběh

Tento koncept je spojený s přestavěním uhelných elektráren a spojení s koncentrovanými solárními elektrárnami (CSP), někdy také nazývané solárně-termální elektrárny, zejména v oblastech Afriky, střední Ameriky a Austrálie. Druhou možnou variantou je odporový ohřev. Tato přestavba by měla znamenat náhradu klasického kotle na tuhá paliva za dva zásobníky, ve kterých bude skladována roztavená sůl. Jeden zásobník bude nabitý teplý, zhruba o teplotě 560 °C a druhý vybitý studený, o teplotě 270 °C. Roztavená sůl ze studeného zásobníku se čerpá do teplého zásobníku, zatímco je ohřívána elektrickým odporovým ohřívačem (případně pomocí CSP), který využívá levnou elektrickou energii ze sítě – ideálně přímo z obnovitelných zdrojů. Když je potřeba zpětně vyrobit elektrickou energii, tak se čerpá sůl z teplého zásobníku přes výměníky tepla, které produkují páru, která pohání turbíny. Celý princip fungování je popsán na Obr. 15. Jedná se vlastně o přestavěnou uhelnou elektrárnu na Carnotovu baterii, jak již bylo zmíněno v prvních řádcích odstavce. [19]



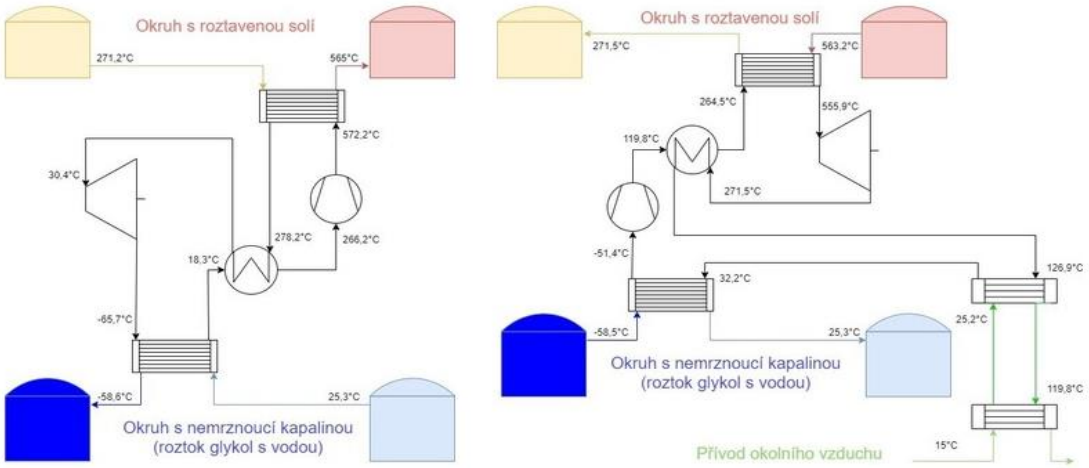
Obr. 15 - *Schéma skladování tepla – roztavená sůl [19]*

Výhoda této technologie je, že není nutné celou infrastrukturu budovat od začátku, jelikož bude možné využít stávajících tepelných elektráren, které budou přestavěny. [19]

1.5.6.3 Reverzní a přímý oběh plynové turbíny, tekuté materiály v nádržích

Principem této technologie je reverzní oběh plynové turbíny (Braytonův oběh) s rekuperací. Jako pracovní médium je využíván vzduch. V momentě, když se systém nabíjí, funguje v režimu tepelného čerpadla, kdy je využívána elektrická energie k ohřevu odebraného tepla a jeho následného převedení na vyšší teplotu. Teplo je dále předáváno do dvou okruhů. První je studený okruh, kde je použita nemrznoucí kapalina, která proudí mezi dvěma zásobníky o teplotách 20 °C a -65 °C. V teplém okruhu je roztavená sůl a dva zásobníky o teplotách 290 °C a 565 °C.

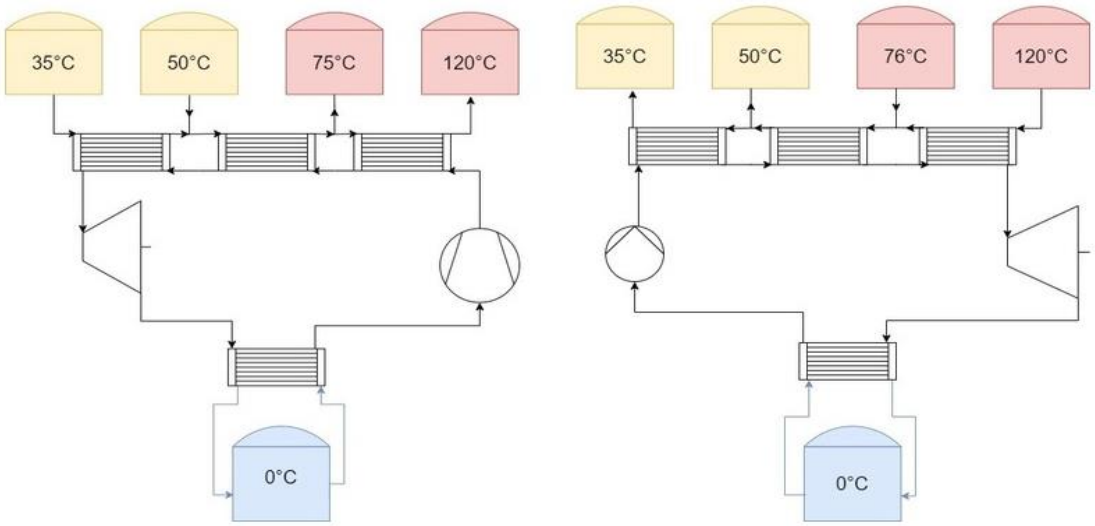
Při potřebě využití tepelné energie na vytvoření elektrické energie, je využíváno teplotního spádu mezi dvojicemi zásobníků, na základě rozdílů teplot v obou zásobnících je roztáčena turbína, která vyrábí elektrickou energii. Na Obr. 16 lze vidět celý proces popsaný. Je z něj zřejmé, že při vybíjení je využit v průběhu tepelného cyklu i odvod tepla do okolí za pomoci dvojice tepelných výměníků, aby byla srovnána bilance mezi spotřebou tepla a chladu, které se získají při nabíjení. Nabíjení je popsáno v levé části obrázku a vybíjení v pravé. [21]



Obr. 16 - *Schéma reverzního a přímého oběhu (Malta Inc.) [18]*

1.5.6.4 Reverzní a přímý oběh s nadkritickým CO_2

Podobně jako u předchozího případu je elektrická energie využita k pohonu kompresoru, který stlačuje CO_2 v oběhu tepelného čerpadla s teplotou na výtlaku 120 °C. Stlačené CO_2 proudí do tepelných výměníků, kde ohřívá vodu mezi třemi atmosférickými nádržemi, které jsou naplněné vodou o teplotách 38, 50 a 76 °C a jedním tlakovým zásobníkem o teplotě 120 °C. Sestava výměníků má za úkol kopírovat teplotní profil chladnoucího CO_2 teplotním profilem proudící vody. Stejnými teplotami je zajištěna vysoká účinnost systému. Ochlazené a stlačené CO_2 poté proudí přes specifický expandér (jedná se o kombinaci vodní turbíny v nadkritické/kapalné fázi a následného škrcení do mokré páry). Tam sníží svoji teplotu a tlak, čímž se stane z velké části kapalným. Oxid uhličitý se dále v tepelném výměníku vypařuje a předává chlad studenému zásobníku s nemrznoucí směsí. Při vybíjení se využívá teplotního spádu mezi úložištěm tepla a chladu. Kapalné CO_2 je v čerpadle stlačeno na nadkritický tlak. Dále je průchodem přes tepelné výměníky ohříváno akumulovanou teplou vodou. Dále oxid uhličitý expanduje v turbíně, která následně vyrábí elektrickou energii. Uložený chlad následně slouží ke kondenzaci CO_2. Tento princip je vyobrazen na Obr. 17, v levé části se nachází okruh nabíjení, vpravo vybíjení. [19]



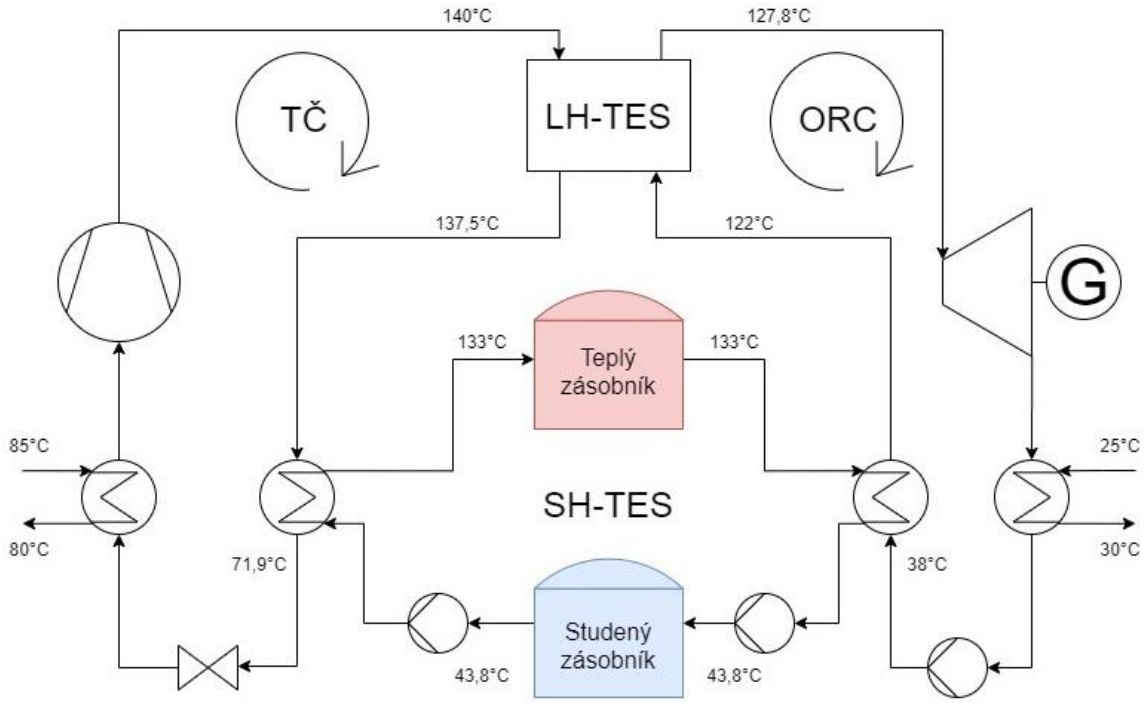
Obr. 17 - *Schéma oběhu s CO_2 (MAN+ABB) [19]*

Tímto principem se zabývá společnost MAN Energy Solutions společně s ABB. Popsaný princip využívají ve svém konceptu, který by měl dosahovat vyšší účinnosti než dříve zmíněné technologie v dané kategorii. Využívá stlačeného CO_2. Jeho výhodou má být také snadné přizpůsobení konkrétní aplikaci a šetrnost k životnímu prostředí, zároveň by měl dosahovat účinnost mezi 50-55 %. [22]

1.5.6.5 Systémy s tepelným čerpadlem

U oběhu s tepelným čerpadlem je využíváno odpadní teplo, pracovnímu médiu je v režimu nabíjení pomocí tepelného čerpadla zvyšována teplota řádově na 80-160 °C, které je následně uloženo. V režimu vybíjení je využito organického Rankinova cyklu (ORC), pomocí kterého je teplo převedeno na elektrickou energii. Na Obr. 17 lze vidět celé schéma systému s tepelným čerpadlem. Tepelné čerpadlo během nabíjení odebírá teplo ze vstupního tepelného zdroje (odpadní teplo), pracovní médium je následně stlačeno, čímž je získáván větší tlak a vyšší teplota. Toto teplo se uskladněno v zásobníku latentního tepla LH-TES a následně putuje do zásobníku SH-TES. LH-TES používá eutektickou směs dusičnanů KNO_3 a $NiNO_3$ ke skladování latentního tepla tání, ta poskytuje relativně velké skupenské teplo skupenské přeměny. Systém pro skladování citelného tepla se skládá ze dvou zásobníků – studeného a teplého, přičemž skladovacím médiem je voda. Při nabíjení je ze studeného zásobníku čerpána voda, která je ohřívána v teplém výměníku za LH-TES. Pracovním médium je poté expandováno na nižší tlak a ochlazeno. Poté jde do výparníku.

Vybíjení probíhá pomocí ORC. Médium je stlačeno pomocí čerpadla, předehřeje se v SH-TES zásobníku a následně prochází skrze výparník zabudovaný do LH-TES. Organické páry poté expandují v turbíně a zkondenzují při odvádění tepla. [19]



Obr. 18 - *Schéma oběhu s tepelném čerpadlem [19]*

Prvním projektem založeném na této technologii je CHESTER (Compressed Heat Energy Storage for Energy from Renewable Sources). Na tomto projektu se podílí několik společností a univerzit (např. Tecnalia, Dlr a další). Cílem projektu je vybudovat standardní řešení pro koncept kombinací vysokoteplotního skladování tepelné energie a Rankinova cyklu. Celková účinnost je závislá na účinnosti použitého tepelného čerpadla, tepelných ztrátách, účinnosti ORC cyklu a dalších ztrátách. [26]

1.5.6.6 Další možné principy skladování tepla

Jelikož je problematika skladování elektrické energii pomocí tepla aktuálně řešeným tématem, objevuje se stále více a více pilotních projektů, které za sebou ještě nemají dostatečný výzkum a jsou stále ve fázi vývoje. [19]

Skladování citelného tepla v betonových ložích zkoumá společnost EnergyNest z Norska, která se zaměřuje na vývoj svého produktu HEATCRETE®. Jedná se o přizpůsobitelné úložiště tepla. Hlavní jednotka pro úložiště tepla je konstruována z lodního

kontejneru, který je naplněný 63 kusy betonových válců. Každým tímto válcem prochází 4 trubičky, kterými proudí médium, které přenáší teplo. Výhoda je zejména v modularitě, jelikož je možné více takových kontejnerů spojit dohromady a poté je důkladně izolovat od okolí. Projekt se nyní nachází v komerční fázi a navazuje tak na svůj první pilotní projekt z roku 2015, kdy byly instalovány baterie s celkovou kapacitou 1 MWh. 19. října 2020 firma předala svojí první komerční termální baterii. [24]

Dalším vyvíjeným konceptem je možnost přímé přeměny tepla na elektrickou energii. Jde řádově o stovky až tisíce °C. Materiál ohřátý na tuto teplotu bude rozžhavený a bude intenzivně zářit – bude vydávat infrazáření (elektromagnetické záření s vlnovou délkou větší než viditelné světlo, ale také menší, než mikrovlnné záření). Elektrickou energii bude tedy možné vyrobit pomocí termo-fotovoltaických článků a termionických článků. Příkladem může být projekt Amadeus. Systém uchovává energii ve formě latentního tepla při teplotách nad 1000 °C a dokáže ji převést zpět na elektrickou energii pomocí fototermických článků. Klíčovými vlastnostmi je velká hustota elektrické energie (více než 1 kWh/litr) a nízké náklady na uloženou kapacitu energie.

1.5.6.7 Technické parametry

Tabulka 10 – *Základní technické parametry skladování v tepelné energii [19], [24], [26]*

Parametr	SH-TES	LH-TES	TCES	PCM
Výkon (MW)	0,001—10	0,001—300	0,01—1	až 50
Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)	10—120	150—250	200—250	140—200
Měrná hustota výkonu (W/l)	10—50	50—150	120—250	-
Čas vybíjení (hod)	dny až měsíce	hodiny až dny	hodiny až měsíce	hodiny
Reakční doba	minuty	minuty	minuty	minuty
Samovybíjení (%/den)	0,5	0,5—1	-	0
Životnost (roky)	10—20	20—40	-	-
Účinnost (%)	50—90	75—90	75—100	70—75

Pozn. - Jedná se o dílčí parametry, které jsou u sofistikovaných řešení kombinované.

2 Výhody a nevýhody technologií

V této kapitole jsou jmenovány výhody a nevýhody jednotlivých dříve zmíněných technologií.

2.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Mezi hlavní výhody přečerpávací elektrárny patří minimální znečištění životního prostředí při provozu. Vyžadují minimální obsluhu a lze je ovládat na dálku, v případě potřeby jimi lze pokrývat špičkové odběry, jelikož dokážou zahájit výrobu elektrické energie během několika sekund.

Nevýhodou přečerpávacích elektráren je v jistém smyslu již zmíněné životní prostředí, jelikož je nutné vyhledat lokalitu s vhodnými geologickými podmínkami a provést značnou úpravu terénu pro vybudování nádrží a celé infrastruktury elektrárny. Doba výstavby je poměrně dlouhá a návratnost celého systému také.

PHES je aktuálně nejvyužívanější technologií pro skladování elektrické energie na světě. Aktuálně funkčních úložišť je okolo 92,6 % s celkovým výkonem 171,03 GW ze všech úložišť energie po celém světě. Jedná se o nejvíce vyvinutou technologii v tomto odvětví. [25]

2.2 Systémy pro akumulaci energie se setrvačníky

Výhodami systémů úložišť energie využívajících setrvačníky je jednoduchá údržba, dlouhá životnost celého systému a vliv na životní prostředí, který je minimální. Jsou vyrobeny ze snadno recyklovatelných materiálů.

Nevýhodou může být potenciální riziko poškození systému, když je setrvačník roztočen vyšší rychlostí, než kterou by mohl zvládnout. Další nevýhodou v současnosti jsou ztráty třením (zejména u nízkootačkových setrvačníků), jelikož je celková účinnost setrvačníku závislá na tření ložisek, které je odbouráno u vysokootáčkových setrvačníků, které ložiska nemají. Tyto problémy řeší systémy uložené ve vakuu, které jsou však ale náročnější na údržbu, zejména kvůli nutnosti vakuové komory a taktéž její údržby.

Setrvačníky se hodí převážně pro akumulaci energie na krátkou dobu, jelikož podléhají velkým samovybíjením. Naopak mají velmi rychlou reakční dobu, nejsou závislé na teplotních změnách a dokážou poskytovat velký výkon. Nejlepší současné využití setrvačníků je pro zlepšování kvality elektrické energie v elektrizační soustavě, například regulace frekvence a napětí, případně jako záložní zdroj (například jako stabilizátor při kolísání výroby větrné elektrárny). [25]

2.3 Systémy pro akumulaci energie se stlačeným vzduchem

Výhodou úložišť se stlačeným vzduchem je především velké množství skladované energie za relativně nízké náklady. Další výhodou je také relativně rychlá reakční doba v řádech pár minut. Jednoduchá je také jejich regulace zpětné přeměny na elektrickou energii.

Nevýhodou je nutný vhodný výběr lokality. Pro ukládání stlačeného vzduchu jsou využívány například staré opuštěné kaverny. Nevýhodou jsou také mírné ztráty při kompresi a dekompresi vzduchu a určité nutné množství přidaného tepla.

Systémy se stlačeným vzduchem patří mezi instalace s největší kapacitou skladování energie, výkonově od 5 do 300 MW, hned za PHES. Nabízí dlouhou dobu vybíjení (závislou na zásobníku) a nízké kapitálové náklady. Hlavním požadavkem na CAES je implementace technologie do vhodných geografických podmínek.

2.4 Systémy pro akumulaci energie se zkapalněným vzduchem

Systémy se zkapalněným vzduchem vynikají svojí vysokou hustotou akumulované energie a schopností integrace, jelikož nejsou geograficky omezovány. Je možné využívat jejich odpadní teplo, resp. chlad, a tím zvyšovat celkovou účinnost systému.

Hlavní nevýhodou je v současné době účinnost, která nedosahuje vysokých hodnot bez využití odpadního chladu. Ta by se však do budoucna měla zlepšovat, zejména kvůli integraci zařízení, která dokážou využívat odpadní chlad. [27]

2.5 Systémy pro akumulaci energie využívající vodík

Hlavní výhodou alkalické elektrolýzy vody (AEL) je její cena, tudíž je v průmyslu relativně hojně využívána. Její úroveň připravenosti je 9, tedy je již komerčně zralá. Naopak nevýhodou je nižší čistota vodíku, energetická náročnost a horší odezva na požadavek zvýšení výkonu.

Nízkoteplotní elektrolyzéry s protonově selektivní membránou (PEM) jsou jednoduché a mají rychlou reakční dobu. Z důvodů využívání drahých kovů jsou dražší.

Vysokoteplotní elektrolýza je nejnovější technologie s nižší úrovní připravenosti – 5. Výhodou této technologie je využití tepelné energie, která bývá obvykle levnější než energie elektrická, zároveň je nutné udržovat vyšší provozní teplotu. Dále technologie nevyžaduje použití drahých materiálů. Nevýhoda je prozatímní nízká životnost a vysoká cena.

Mezi nevýhody lze zařadit požadavky na bezpečnou manipulaci, jelikož vodík při kontaktu se vzduchem tvoří výbušnou směs. S tímto problémem se také váže nákladná přeprava vodíku, což by mohlo vyřešit přimíchávání k zemnímu plynu a následná přeprava pomocí plynovodu. Samotné skladování vodíku je velmi náročné, jelikož je nutné jeho stlačení, které je energeticky náročné. Na skladovací nádoby jsou kladeny velké požadavky na absolutní těsnost, odolnost vůči přetlaku a destrukci.

K využití vodíku jsou využívány nejčastěji palivové články, které jsou však poměrně drahé a jejich účinnost není nejlepší. Dále lze vodík spalovat například se zemním plynem, avšak to znamená určité přestavění spalovacího zařízení, které může být také poměrně nákladné.

2.6 Systémy pro akumulaci energie využívající syntetická paliva

Syntetická paliva dokáží nahradit zemní plyn. Ten lze vyrobit ze syntetického metanu s využitím energie, ideálně obnovitelné. Syntetická paliva je možné využít nejenom k výrobě elektrické energie, ale také například pro provoz dopravních prostředků jako jsou auta, letadla nebo vlaky. Výhodou je také jeho snadná přeprava pomocí stávající infrastruktury plynovodů. Tato technologie je poměrně nová a zatím tedy nedosahuje příliš velké účinnosti.

2.7 Systémy pro akumulaci energie využívající akumulátorové baterie

Mezi hlavní výhody bateriových systémů patří možnost výroby různých rozměrů a tvarů dle požadavku, relativně nízká hodnota samovybíjení (zejména Li-ion baterie), jejich přenosnost a variabilita. Li-ion baterie mají relativně malý dopad na životní prostředí, podobně jako baterie NaS, které jsou netoxické a recyklovatelné. Taktéž nemají žádný paměťový efekt a můžou pokaždé fungovat stejně.

Nevýhodou bateriových systémů může být vliv na životní prostředí, zejména u technologií Ni-Cd, kvůli chemickým látkám, které se mohou dostat do okolí, například při havárii. Nevýhodou je také jejich závislost na okolní teplotě, jelikož nepracují při vysokých nebo naopak nízkých teplotách spolehlivě a rychleji se vybíjí. Bateriím nevyhovuje stav podbití ani plného nabití. Například pro Li-ion baterie je tedy nutné je udržovat v ideálním stavu zhruba okolo 20-80 %. [6]

2.8 Systémy pro akumulaci energie využívající průtočné baterie

Výhodou průtočných baterií oproti bateriím akumulátorovým je výrazně delší životnost a bezpečnost – bez možnosti vzniku požáru při zkratu systému. Další výhodou může být také snadná škálovatelnost systému podle poptávky po výkonu.

Nevýhodou je nižší hustota energie. Podobně jako u akumulátorových baterií jsou využívány nebezpečné látky jako elektrolyt, který je na bázi kyselin.

2.9 Systémy pro akumulaci energie využívající superkondenzátory

Hlavní výhoda superkondenzátorů spočívá v jejich dlouhé životnosti, vysoké cyklické účinnosti a mají velkou objemovou hustotu výkonu. Reakční doba superkondenzátorů je velmi rychlá. Netrpí na podbití jako například baterie a nemají speciální požadavky na prostředí, ve kterém jsou provozovány.

Naopak nevýhodou je poměrně velké samovybíjení a vysoké investiční náklady. Kromě toho mají superkondenzátory velmi krátkou dobu vybíjení a nízkou objemovou hustotu energie, proto se tedy hodí na krátkodobé skladování energie.

2.10 Systémy pro akumulaci energie využívající supravodivé indukční akumulátory

Výhodou této technologie je velmi rychlá reakční doba a vysoká účinnost. Ztráty jsou malé a předpokládá se, že by se daly snížit až pod 1 %. Výhodou je velmi rychlá doba nabíjení, avšak doba vybíjení je taktéž hodně krátká. Celková účinnost systému se pohybuje okolo 95 %. Nevýhodou je nutnost udržování teploty podle daného typu materiálu a jeho teploty nutné pro dosažení supravodivosti.

2.11 Tepelné systémy

Výhoda tepelných systémů spočívá v možnosti využití stávajících tepelných elektráren a tepláren k vyrábění elektrické energie při snížené potřebě tepla, což vede k lepšímu využití kogeneračních zdrojů tepla a elektřiny. Cílem toho je snížení emisí CO_2 v porovnání se systémy, které vyrábějí elektrickou energii a teplo odděleně. Další výhodou je možnost spojení se solárními elektrárnami, které dokáží dodávat tepelnou energii a využít tak bezemisní ohřev.

V případě systému využívajícího citelné teplo (změna teploty média uchovávající teplo) je zapotřebí velký objem skladovacích kapacit ve srovnání se systémy využívajícími tepla nebo chladu latentního (teplo ze skupenské přeměny).

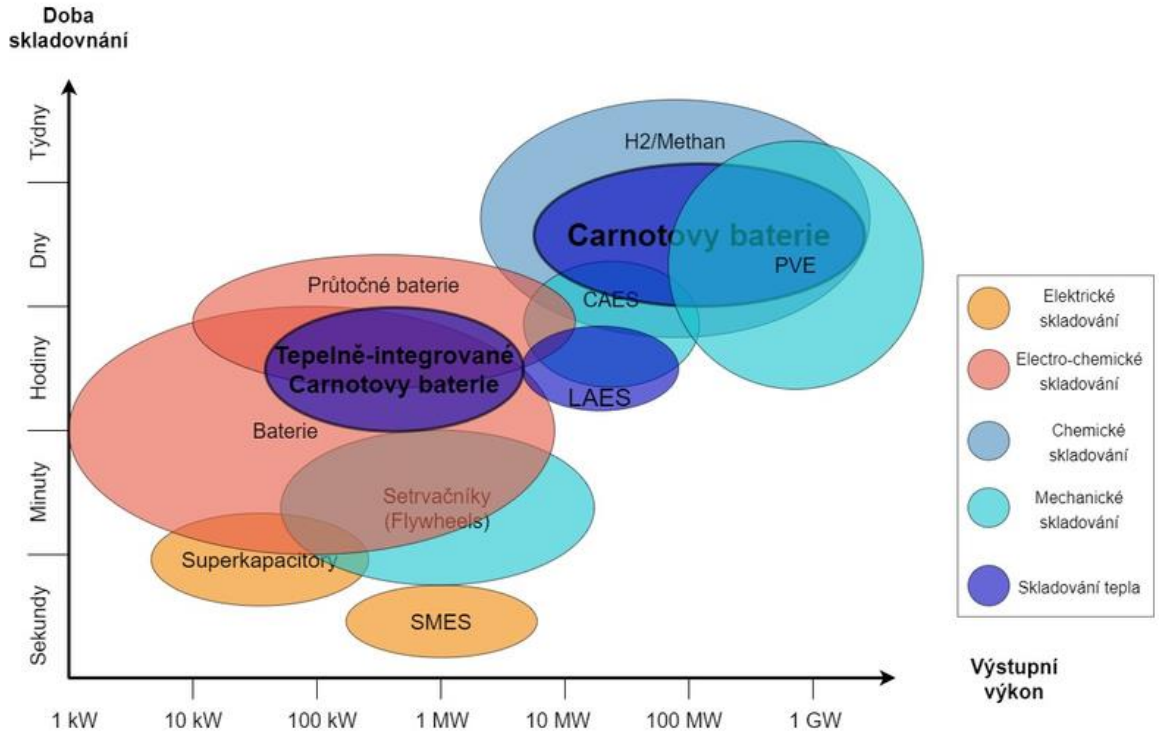
Jedná se o způsob uchování elektrické energie, který nevyžaduje příliš velké investice v porovnání s ostatními možnosti uchovávání energie. Výhodou také je, že teplo lze poměrně snadno přeměnit na energii, například pomocí turbíny. Další výhodou je také nízké zatěžování životního prostředí.

Mezi nevýhody lze zmínit nutnost využívání materiálů, které dokáží teplo rychle přijímat a vydat. Obecně se jedná o materiály a sloučeniny, které mohou vyžadovat ochranné obaly, aby nedošlo k poškození životního prostředí. Mezi další nevýhody patří značná velikost zásobníků, aby dokázaly uchovat velké množství naakumulovaného tepla, což zvyšuje jejich cenu.

3 Porovnání technologií

3.1 Porovnání technických parametrů

Na Obr. 19 lze vidět porovnání jednotlivých technologií z hlediska doby skladování elektrické energie v závislosti na výstupním výkonu. Z grafu lze vyčíst, že mezi technologie, které dokáží skladovat elektrickou energii nejkratší dobu, patří supravodivé indukční akumulátory (SMES) a superkondenzátory. Za nimi hned navazují systémy se setrvačníky, baterie, průtočné baterie až k systémům s vodíkem a Carnotovým bateriím. Ty patří spolu s vodíkem a přečerpávací elektrárnou k nejlepším systémům na uchovávání elektrické energie z hlediska samovybíjení, které je téměř nulové.



Obr. 19 - *Diagram technologií skladování elektrické energie [19]*

Následující Tabulka 11, popisuje technické parametry uvedených technologií, kterých by mohly v ideálním případě dosahovat. Lze z ní vyčíst údaje jako výkon, reakční dobu výroby elektrické energie, nebo například životnost a výslednou účinnost.

Tabulka 11 – *Porovnání technických parametrů*

	Výkon (MW)	**Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)**	**Měrná hustota výkonu (W/l)**	**Čas vybíjení (hod)**	**Reakční doba**	**Samovybíjení (%/den)**	**Životnost (cykly/roky)**	**Účinnost (%)**
PHES	10–5 000	0,5–1,5	0,5–1,5	1–24h	s–min	0	10 000–35 000 cyklů	65–87
FESS	0,1–20	20–80	nízkorych. 200—500 vysokorych. 1 500—2 000	ms–15min	ms–s	100	20 000–10 000 000 cyklů	90–95
CAES	5—1 000	3—12	0,5—2	1—24h	1—15min	0	8 000—17 000	42—54
A-CAES	1—100	3—12	0,5—2	1—24h	1—15min	0	30 let	70—71
I-CAES	1—10	3—12	0,5—2	1–12h	1—15min	0	15 000 cyklů	80
LAES	15–400	80–120	100–230	1–24h	min–h	0	7 000–17 000 cyklů	55–62
Akumulace do vodíku (nízkoteplotní)	0,01–100	500—3 000	0,2–20	2 hodiny–týden	s–min	téměř nulové	20–30 let	62–82
Akumulace do vodíku (vysokoteplotní)	0,01–1 000	500—3 000	0,2–20	2 hodiny–týden	s–min	téměř nulové	5–15 let	90–95
Syntetická paliva	100—1 000	2 000—7 200	0,2–2	2 hodiny–týden	s–min	téměř nulové	25—30 let	25–50
Ni-Cd	0–0,5	60–150	150–300	s–h	ms–s	10–20	20 000—25 000 cyklů	60—85

	Výkon (MW)	**Objemová hustota akumulované energie (Wh/l)**	**Měrná hustota výkonu (W/l)**	**Čas vybíjení (hod)**	**Reakční doba**	**Samovybíjení (%/den)**	**Životnost (cykly/roky)**	**Účinnost (%)**
Na-S	0,05–35	150–250	150–230	s–h	ms –s	20	4 000—25 000 cyklů	75—90
Li-ion	0–100	200–500	500–2 000	min–h	20ms–s	0,03–0,3	1 000–10 000 cyklů	85–97
Pb-A	0–40	50–90	10–400	s–h	5–10ms	0,1–1	500–1 300 cyklů	75–85
VRFB	0,2–30	16–33	0,5–2	s–h	s	téměř nulové	100 000—120 000 cyklů	65–85
Zn-Br	0,05—30	30—60	1—4	min-h	s	téměř nulové	1 800—2 000 cyklů	65—80
Superkondenzátory	0,1—10	2,5–15	500–5 000	ms–h	8ms	5—15	10 000–100 000 cyklů	90–98
SMES	0,1—10	0,2–6	1 000–4 000	ms–30min	<100ms	1–15	10 000—150 000 cyklů	95–98
SH-TES	0,001—10	10—120	10—50	dny-měsíce	min	0,5	10—20 let	50—90
LH-TES	0,001—300	150—250	50—150	2 hodiny-týden	min	0,5—1	20—40	75—90
TCES	0,01—1	200—250	120—250	2 hodiny-měsíce	min	-	-	75—100
PCM	až 50	140—200	-	h	min	0	-	70—75

Poznámka: Měrná výroba energie a měrný výkon jsou vztaženy k výstupu. Respektive jsou vztaženy k dosažitelným hodnotám v poměru k objemu hmoty. Hodnota výkonu udává možný potenciál technologie. [6], [4], [18], [22], [25]

Z tabulky je patrné, že nejvyšší možný dodaný výkon nabízí PHES, naopak nejnižší hodnoty dosahují baterie, superkondenzátory nebo supravodivé cívky. Nejvyšší objemovou hustotu akumulované energie nabízí syntetický zemní plyn nebo vodík. Naopak nejnižší měrnou výrobu energie nabízí PHES a superkondenzátory. Nejvyšší měrnou hustota výkonu mají setrvačníky a supravodivé cívky, nejnižší vodík, syntetická paliva a PHES. Nejdelší dobu vybíjení poskytuje vodík a syntetická paliva, které dokáží dodávat energii až v řádech týdnů, PHES a stlačený vzduch v řádech hodin a superkondenzátory, setrvačníky a supravodivé cívky v řádech milisekund, sekund až minut, což vychází z jejich fyzikální podstaty. Nejlepší reakční dobu mají baterie, které dokáží dodávat energii téměř okamžitě. Na opačném konci je stlačený vzduch a PHES, kde se musí daná látka, resp. voda, dostat k lopatkám turbíny, která následně roztáčí generátor.

Výhodou stlačeného vzduchu a PHES je jejich samovybíjení – dokud neteče voda z horní nádrže, tak by při správné těsnosti neměla žádná ubývat (kromě letních měsíců, kdy může nastat problém s odpařováním vody z nádrží) – samovybíjení je tedy u stlačeného vzduchu nulové a u PHES po většinu roku také, s výjimkou letních horkých dní. Nejrychlejší samovybíjení mají setrvačníky, kde může dosahovat denní hodnota vybíjení až 100 %. Nejdelší životnost nabízejí PHES, a naopak nejkratší baterie, zejména Ni-Cd.

Tabulka 12 popisuje technologie z hlediska aktuální připravenosti na komerční využití (TRL – Technology Readiness Levels). Parametr TRL může nabývat hodnot od 1 (základní idea, definován princip) do 11 (dosažena úroveň plné komercializace, předvídatelný růst). Dále tabulka uvádí potřebné kapitálové náklady u konkrétních technologií, respektive cenu za jednotku výkonu a energie. Z hlediska ceny výkonu vychází nejlépe superkondenzátory a akumulace tepla. Naopak nejlevnější kilowatthodina akumulované energie pochází z přečerpávacích vodních elektráren a z akumulátorů stlačeného vzduchu. Cena kilowatthodiny energie je důležitá zejména kvůli výstavbě „grid-scale energy storage“ – tedy síťových úložišť elektrické energie, která jsou využívány zejména kvůli větší integraci obnovitelných zdrojů elektrické energie. Na životní prostředí působí z uvedených technologií nejvyšší zátěž baterie, jelikož obsahují toxické chemické složky, a také přečerpávací elektrárny, které znamenají velký zásah do krajiny. Ty však při samotném provozu velkou hrozbou nejsou. Přečerpávací elektrárny jsou zároveň nejvyspělejší technologií, dle žebříčku TRL jim náleží hodnota 11, tedy velmi vyspělá technologie s možnou predikcí růstu – tedy účinnosti. Ta je omezena hlavně mechanickými ztrátami a

také s optimalizací provozu při nižším zatížení. Celkové zvyšování účinnost PHES je tedy velmi náročné a bude možné pouze s vylepšením různých mechanických částí, například zmenšení tření.

Tabulka 12 – *Technology Readiness Levels – Úroveň připravenosti technologie [26]*

TRL	**Popis hodnocení**	**Ukázkové technologie**
1	Úvodní myšlenka: byly definovány základní principy	Baterie pro elektrická vozidla Li-Air (TRL 1-2)
2	Formulace aplikace: byla formulována koncepce a aplikace řešení	Multivalentní iontové baterie pro elektrická vozidla
3	Koncept vyžaduje ověření: řešení musí být prototypováno a aplikováno	Termochemické skladování tepla
4	Prvotní prototyp: prototyp osvědčený v testovacích podmínkách	Aktivní akumulace latentního tepla Baterie pro elektrická vozidla Li-S
5	Pokročilý prototyp: komponenty osvědčené v podmínkách, ve kterých mají být nasazeny	Polovodičové baterie + Li-metal pro elektrická vozidla
6	Konečný prototyp: prototyp osvědčený za podmínek, ve kterých byl vyvinut	Materiálů pro skupenskou změnu
7	Předkomerční ukázka: prototyp pracuje v očekávaných podmínkách	Vysokoteplotní latentní skladování tepla (TRL 5-7)
8	První komerční prototyp: komerční demonstrace, plné nasazení v konečných podmínkách	Skladování energie ve stlačeném vzduchu (A-CAES, I-CAES) (TRL 7-8)
9	Komerční provoz v určeném prostředí: řešení je komerčně dostupné, vyžaduje evoluční zlepšení, aby zůstalo konkurenceschopné	Setrvačníky Li-Ion baterie Průtočné baterie
10	Potřebná integrace: řešení je komerční a konkurenceschopné, ale vyžaduje další integrační úsilí	Skladování energie ve stlačeném vzduchu (CAES)
11	Komerčně vyspělá: předvídatelný růst	Přečerpávací vodní elektrárna (PHES)

3.2 Porovnání z hlediska cen, vlivu na životní prostředí a připravenosti technologie

Tabulka 13 – *Připravenost technologií a kapitálové náklady [6], [22], [25]*

	Připravenost technologie	Připravenost technologie (TRL)	Kapitálové náklady		Vliv na životní prostředí
			Cena výkonu $/kW	Cena energie $/kWh	
PHES	velmi vyspělá, komerčně produkována	11	500—4 300	1–290	vysoký/ střední
FESS	vyspělá, příprava pro komerční využití	9	250—380	200–15 000	velmi malý
CAES	osvědčená, příprava pro komerční využití	10	400–1 600	1–270	střední/ malý
A-CAES	komerční demonstrace	8	700—1 000	40—80	střední/ malý
I-CAES	předkomerční ukázka	7	500—1 000	10—100	střední/ malý
LAES	osvědčená, příprava pro komerční využití	9	800—1 800	200—450	střední/ malý
Akumulace do vodíku (nízkoteplotní)	osvědčená, příprava pro komerční využití	7	2 793—3 488	279—349	malý
Akumulace do vodíku (vysokoteplotní)	vyvinutý prototyp, příprava pro pilotní komerční využití	5	nezjištěno	nezjištěno	malý
Syntetická paliva	vyspělá, příprava pro komerční využití	7	500—3 000	2—15	střední
Ni-Cd	Velmi vyspělá, komerčně produkována	9	500—1 500	330—3 500	vysoký
Na-S	osvědčená, příprava pro komerční využití	9	380—3 200	150—900	vysoký
Li-ion	osvědčená, příprava pro komerční využití	9	900—4 300	300—4 000	střední/ malý
Pb-A	Velmi vyspělá, komerčně produkována	9	1 600—2 000	200–450	vysoký
VRFB	osvědčená, příprava pro komerční využití	9	600–1 500	150—1 000	střední/ malý

	Připravenost technologie	Připravenost technologie (TRL)	Cena výkonu $/kW	Cena energie $/kWh	Vliv na životní prostředí
Zn-BR	vyspělá, příprava pro komerční využití	7	700—2 500	150—1 000	střední/ malý
Superkonden-zátory	osvědčená, příprava pro komerční využití	6	100—360	300—2 000	velmi malý
SMES	osvědčená, příprava pro komerční využití	6	200—350	1 000—10 000	malý
SH-TES	vyvinutý prototyp, příprava pro pilotní komerční využití	5	3 400—4 500	0,1—10	velmi malý
LH-TES	vyspělá, příprava pro komerční využití	7	6 000—15 000	10—50	malý
TCES	dobře vyvinutá, příprava pro komerční využití	7	1 000—3 000	8—100	malý
PCM	osvědčená, příprava pro komerční využití	9	1 000—3 800	16—220	malý

3.3 Perspektivní technologie a jejich odhad budoucího vývoje

Přečerpávací elektrárny jsou téměř na konci možného vylepšování. Technologie je již plně vyvinuta a kupředu jí může pomoci například snížení mechanických ztrát nebo optimalizace provozu při nižším zatížení. Perspektivnější metodou je pro síťová úložiště stlačený vzduch, u kterého je ovšem nutné také najít vhodné geografické podmínky, případně vystavět velké nádrže na stlačený vzduch. Ideální je kombinace s akumulátorem tepelné energie, který akumuluje teplo při stlačování vzduchu. Teplo je pak využíváno při expanzi vzduchu, kdy je nutné vzduch přihřívat před vstupem do turbíny. Velký potenciál pro ukládání velkého množství energie by mohl mít vodík spolu se syntetickými palivy, který se dá relativně dobře skladovat beze ztrát. Tyto metody jsou však stále ve fázi výzkumu a hledání optimálních variant, které by umožnily ekonomické a efektivní vyrábění a skladování vodíku, resp. syntetických paliv. Hlavním úskalím těchto metod je následné využití a přeprava. Proces přeměny vodíku na elektrickou energii nemá příliš dobrou účinnost, a tak je nutné i toto téma řešit, aby celkový cyklus dosahoval lepší účinnosti. Dopravu by mohlo vyřešit míchání se zemním plynem a následná přeprava plynovody. [3], [6]

Další perspektivní technologií, která by se mohla stát do budoucna rozšířenější, jsou systémy se setrvačníky. Setrvačníky mají velkou účinnost (až 95 %), nabízí dlouhou životnost, neničí životní prostředí a jsou velmi spolehlivé. Jejich největší úskalí spočívá v mechanických ztrátách. Ty se však do budoucna budou minimalizovat například kvůli využití magnetických a vakuových ložisek, stále však budou podstatně vyšší než například ztráty u baterií. Setrvačníky se hodí zejména na optimalizaci sítě, jelikož nedisponují velkou skladovací kapacitou. [4], [6]

Průtočné baterie patří mezi jeden z perspektivnějších typů akumulátorů, zejména kvůli možné dostupné kapacitě. Od akumulátorových baterií se liší zejména konstrukcí. Skládá se ze dvou nádrží, které jsou naplněny elektrolytem. Energie je uschována v těchto nádržích ve formě rozpuštěných elektroaktivních prvků. Průtočné baterie mají oproti bateriím akumulátorovým daleko delší životnost a nedochází u nich k téměř žádnému samovybíjení, stejně jako u klasických baterií. Navýšení jejich kapacity je velice snadné, jelikož závisí pouze na velikost nádrží a na koncentraci elektrolytů. Průtočným bateriím je předpovídána slibná budoucnost, pakliže bude vyřešen problém s hustotou akumulované energie. [6]

U klasických baterií je nejrozšířenějším typem baterie lithium-iontová, která je dnes nejvyužívanějším typem akumulátoru. Akumulátory musí mít mechanicky odolné a bezpečné pouzdro, jelikož samotný článek po náchylný na vnější vlivy – například ohnutí, nárazy a podobně. Ještě o něco vyšší hustotu akumulované energie nabízí baterie lithium-polymerová, která ovšem není tak mechanicky odolná a je u ní tedy vyšší bezpečnostní riziko. Největší úskalí dnešních akumulátorů jsou ztráty nabíjecího cyklu. S rychlým nástupem elektromobilů se však jejich ceny snižují, jelikož je po nich vyšší poptávka. Do budoucna lze počítat se snížením investičních nákladů a nárůstem kapacity. [4]

Velmi rychlý nástup mají superkondenzátory, které nabízejí velmi vysokou účinnost a téměř neomezenou životnost. Jejich nabíjení probíhá velmi rychle. Bohužel mají malou hustotu akumulované energie a jsou velmi drahé, jejich samovybíjení je také vysoké. Jsou vhodnější pro krátkodobější akumulaci menšího množství energie. Nově se začínají využívat nanomateriály, které by mohly vylepšit jejich parametry. Podobně jsou na tom supravodivé indukční akumulátory, které fungují na základě supravodivosti – materiál se chová jako ideální vodič bez elektrického odporu. Obdobně jako u superkondenzátorů jsou velmi drahé

a současně jimi lze akumulovat pouze malé množství energie. Do budoucna se však počítá s projekty ve stovkách MWh. [4], [6]

Mezi nejperspektivnější metody skladování elektrické energie patří tepelné systémy. Akumulace do tepla je v současnosti možná do citelného nebo skupenského tepla. Ukládání do citelného tepla probíhá bez fázové přeměny, tedy že je přímo zvyšována teplota materiálu, ve kterém je teplo uchovávané. Médium na uchovávání tepla může být tekuté nebo pevné. Různé materiály nabízí různé možnosti uchování tepla, například vodu lze ohřívat nebo ochlazovat pouze do určitých teplot, aby nezměnila své skupenství. Naopak například štěrk můžeme oteplovat na daleko vyšší teplotu. Metoda citelného tepla je současně nejrozšířenější, je levná a prostá. Nevýhody však spočívají v poměrně velkých ztrátách, které vznikají únikem tepla do okolí. Další nevýhodou jsou rozměry úložiště na dané médium. [18], [19], [20]

Akumulace skupenského tepla nabízí oproti technologii skladování citelného tepla značné výhody. Hlavní výhodou je, že teplonosné materiál má stále stejnou teplotu. Při změně na plyn, nebo pevnou látku, může klesat tepelná vodivost při nabíjení nebo vybíjení. Je to dáno právě skupenským teplem těchto materiálů. Materiály, do kterých se skupenské teplo skladuje, jsou buďto anorganické – například hydráty solí nebo kovy, nebo organické – parafíny, oleje, tuky. Cena materiálů je vyšší než u předchozí technologie. [18], [19], [20]

Závěr

V úvodu této rešeršní práce bylo obecně uvedeno téma akumulace elektrické energie, z jakého důvodu rostou požadavky na akumulaci energie, jaká jsou hlavní úskalí a jaký má akumulace energie význam. V první kapitole byly popsány možné metody pro akumulaci elektrické energie, v dané kategorii úložišť. Popsány byly metody jak vyspělé, komerčně realizované, tak i metody méně vyvinuté a perspektivní, které mají potenciál budoucího růstu. U každé metody akumulace elektrické energie byl popsán její princip, možné využití, technické parametry a případné aktuálně stojící instalace, případně prototypy u metod, které nejsou komerčně realizovány.

V druhé kapitole byly uvedené technologie akumulace elektrické energie porovnány. Porovnání bylo provedeno z hlediska technických parametrů, kterých by daná technologie mohla v ideálním případě dosahovat. Dále byly porovnávány technologie z hlediska vlivu na životní prostředí, kapitálových nákladů a také úrovně připravenosti dané technologie (TRL).

V poslední kapitole byl u jednotlivých technologií proveden souhrn jejich výhod a nevýhod. Dále byl predikován možný růst a potenciál jednotlivých technologií, na základě dostupných informací a dat. Technologií pro akumulaci energie existuje celá řada. Jednou z nejperspektivnějších bude pravděpodobně právě akumulace do tepla, která by mohla spolu s vodíkem v příštích letech představovat největší zastoupení v síťových úložištích energie.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] Everything you need to know about energy storage systems. *Nesfircroft.com* [online]. Poslední změna 16.10.2019 [cit. 2021-2-27]. Dostupné z: https://www.nesfircroft.com/blog/2019/10/everything-you-need-to-know-about-energy-storage-systems

[2] Přečerpávací elektrárna – uspořádání a princip. *Oenergetice.cz* [online]. 03.03.2015 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/typy-elektraren/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2

[3] Pumped hydro storage plants. *Springer.com* [online]. Poslední změna 18.07.2020 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-020-02505-0

[4] A review of energy storage types, applications and recent developments. *Sciencedirect.com* [online]. Poslední změna 07.11.2019 [cit. 2021-2-27]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19306012

[5] ŠKODA AUTO, PRE a Chakratec přiváží do Prahy jedinečnou technologii pro nabíjení elektromobilů. *Skoda-storyboard.com* [online]. Poslední změna 14.11.2020 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-zpravy-archiv/skoda-auto-pre-a-chakratec-privazi-do-prahy-jedinecnou-technologii-pro-nabijeni-elektromobilu/

[6] AVAILABLE AND FUTURE METHODS OF ENERGY STORAGE. *Panda.org* [online]. Poslední změna 01.01.2020 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/wwf_poland___available_and_future_methods_of_energy_storage.pdf

[7] ADELE – ADIABATIC COMPRESSED-AIR ENERGY STORAGE FOR ELECTRICITY SUPPLY. *Rwe.com* [online]. Poslední změna neznáma [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: https://rwe.com/web/cms/mediablob/en/391748/data/364260/1/rwe-power-ag/innovations/Brochure-ADELE.pdf

[8] Liquid Air Could Store Renewable Energy and Reduce Emissions. *Ieee.org* [online]. Poslední změna 19.09.2019 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/renewables/liquid-air-could-store-renewable-energy-and-cut-food-industry-emissions

[9] Syntetická paliva – power to gas, power to liquid: výroba a účinnost. *Tzb-info.cz* [online]. Poslední změna 26.05.2020 [cit. 2021-2-27]. Dostupné z: https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/20711-synteticka-paliva-power-to-gas-power-to-liquid-vyroba-a-ucinnost

[10] Výroba vodíku. *Devinn.cz* [online]. Poslední změna 05.08.2019 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: https://www.devinn.cz/vyroba-vodiku/

[11] SOUČASNÝ STAV A VYUŽITÍ VODÍKOVÝCH TECHNOLOGIÍ. *Chemicke-listy.cz* [online]. Poslední změna 05.10.2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: http://w.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3770/3693

[12] Hydrogen Production: Biomass Gasification. *Energy.com* [online]. Poslední změna 26.05.2020 [cit. 2021-2-27]. Dostupné z https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-gasification

[13] BIONICO: A pilot plant for turning biomass directly into hydrogen. *Bionicoproject.eu* [online]. Poslední změna 13.11.2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: http://www.bionicoproject.eu/

[14] Průtokové baterie před prahem singularity: část 1. *Hybrid.cz* [online]. Poslední změna 09.04.2019 [cit. 2021-2-27]. Dostupné z: http://www.hybrid.cz/prutokove-baterie-pred-prahem-singularity-cast-1

[15] Průtokové baterie před prahem singularity: část 2. *Hybrid.cz* [online]. Poslední změna 10.04.2019 [cit. 2021-2-27]. Dostupné z: http://www.hybrid.cz/prutokove-baterie-pred-prahem-singularity-cast-2

[16] A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials. *Sciencedirect.com* [online]. Poslední změna 31.07.2020 [cit. 2021-2-27]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120317920

[17] Thermal energy storage using absorption cycle and system: A comprehensive review. *Sciencedirect.com* [online]. 25.01.2020 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420300182#s0010

[18] Concentrated Solar Power (CSP). *Brunel.net* [online]. Poslední změna 04.02.2021 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: https://www.brunel.net/en/blog/renewable-energy/concentrated-solar-power

[19] Skladování elektřiny prostřednictvím tepla aneb Carnotovy baterie 2. díl – projekty a technologie ve světě a v ČR. *Tzb-info.cz* [online]. Poslední změna 14.01.2021 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21727-skladovani-elektriny-prostrednictvim-tepla-aneb-carnotovy-baterie-2-dil-projekty-a-technologie-ve-svete-a-v-cr

[20] Electric Thermal Energy Storage. *Siemensgamesa.com* [online]. Poslední změna 02.12.2020 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/hybrid-and-storage/thermal-energy-storage-with-etes

[21] Malta Pumped Heat Electricity Storage (PHES) for Coal Exit and Energy Transition from Fossil to Renewable Energies. *Welcome-manager.de* [online]. Poslední změna 16.09.2020 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: https://iwcb2020.welcome-manager.de/archiv/web/userfiles/iwcb2020/Downloads/Presentations/IWCB20_VI_3_MaltaPHESCoal_BOLLINGER.pdf

[22] A tale of fire and ice. *Man-es.com* [online]. Poslední změna neznáma [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: https://www.man-es.com/discover/a-tale-of-fire-and-ice

[23] CHESTER – COMPRESSED HEAT ENERGY STORAGE FOR ENERGY FROM RENEWABLE SOURCES – Quality Assurance Plan. *Chester-project.eu* [online]. Poslední změna 23.03.2021 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: https://www.chester-project.eu/wp-content/uploads/2018/07/CHESTER_D1.1_Quality-Assurance-Plan_v3.0.pdf

[24] The official handover of our first commercial Thermal Battery. *Energy-nest.com* [online]. 19.10.2020 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: https://energy-nest.com/the-official-handover-of-our-first-commercial-thermal-battery/

[25] A Review of Energy Storage Technologies' Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration. *Mdpi.com* [online]. Poslední změna 15.12.2020 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10511/pdf

[26] A Look at the Status of Five Energy Storage Technologies. *Eesi.org* [online]. Poslední změna 25.08.2020 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: https://www.eesi.org/articles/view/a-look-at-the-status-of-five-energy-storage-technologies

[27] Recent Trends on Liquid Air Energy Storage: A Bibliometric Analysis. *Researchagte.com* [online]. Poslední změna 16.04.2020 [cit. 2021-5-19]. Dostupné

z: https://www.researchgate.net/publication/311496280_Liquid_air_energy_storage_Potential_and_challenges_of_hybrid_power_plants

[28] Němečtí vědci vytvořili unikátní technologii pro transport vodíku. *Energozrouti.cz* [online]. Poslední změna 04.04.2021 [cit. 2021-11-19]. Dostupné z https://energozrouti.cz/z/nemecti-vedci-maji-unikatni-technologii-pro-transport-vodiku

[29] VODÍK. *Energozrouti.cz* [online]. Poslední změna nezjištěna. [cit. 2022-02-06]. Dostupné z https://www.krizport.cz/ohrozeni/nebezpecne-latky-v-jmk/vodik

[30] Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie. *Oenergetice.cz* [online]. Poslední změna 11.09.2018. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie

[31] Various configuration of CAES syste, *Researchgate.net* [online]. Poslední změna 01.06.2018. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z https://www.researchgate.net/figure/Various-configurations-of-CAES-system-a-Diabatic-storage-system-Heat-of-compression-is_fig1_326129759

[32] More Than One Billion Tons of Sustainable Biomass Could Be In Our Future, *Researchgate.net* [online]. Poslední změna 15.06.2016. [cit. 2022-04-02]. Dostupné z https://www.eesi.org/articles/view/more-than-one-billion-tons-of-sustainable-biomass-could-be-in-our-future

Seznam obrázků

Obr. 1 – Přečerpávací elektrárna Dlouhé stráně 12
Obr. 2 - Uspořádání přečerpávací vodní elektrárny 13
Obr. 3 - Rozdělení CAES 18
Obr. 4 - Schéma CAES 19
Obr. 5 - Projekt ADELE 20
Obr. 6 - LAES schéma 22
Obr. 7 - Elektrolýza vody 24
Obr. 8 – Kryogenní separace 27
Obr. 9 - Schéma výroby vodíku z biomasy 27
Obr. 10 – Skladování vodíku do hydridů kovů 29
Obr. 11 - Schéma průtočné baterie 35
Obr. 12 - Princip fungování Carnotových baterií 38
Obr. 13 - Rozdělení systémů dle typu přeměny 39
Obr. 14 - Schéma skladování tepla – štěrkové lože 41
Obr. 15 - Schéma skladování tepla – roztavená sůl 42
Obr. 16 - Schéma reverzního a přímého oběhu 43
Obr. 17 - Schéma oběhu s CO2 (MAN+ABB) 44
Obr. 18 - Schéma oběhu s tepelném čerpadlem 45
Obr. 19 - Diagram technologií skladování elektrické energie 53

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Základní technické parametry PHES 16
Tabulka 2 – Základní technické parametry FESS 18
Tabulka 3 – Základní technické parametry CAES 21
Tabulka 4 – Základní technické parametry LAES 23
Tabulka 5 – Základní technické parametry elektrolyzérů vodíku 31
Tabulka 6 – Základní technické parametry syntetických paliv 32
Tabulka 7 – Základní technické parametry akumulátorových baterií 35
Tabulka 8 – Základní technické parametry průtočných baterií 37
Tabulka 9 – Základní technické parametry superkondenzátorů a SMES 38
Tabulka 10 – Základní technické parametry skladování v tepelné energii 48
Tabulka 11 – Porovnání technických parametrů 55
Tabulka 12 – Technology Readiness Levels – Připravenost technologie 59
Tabulka 13 – Připravenost technologií a kapitálové náklady 60