



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE PRO ZDROJ S
NESTABILNÍ PRODUKČÍ**

ACCUMULATION OF ELECTRICITY FOR A SOURCE WITH UNSTABLE PRODUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Petrenec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Jan Petrevec
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Akumulace elektrické energie pro zdroj s nestabilní produkcí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je věnována problematice akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů s nestabilní produkcí. V rámci práce budou posouzeny možná řešení akumulace elektrické energie a jejich aktuální technické a ekonomické parametry. Vlastní návrh bude realizován pro vybranou výrobu elektrické energie využívající obnovitelné zdroje. Uvažována bude minimálně možnost akumulace do stlačeného vzduchu a elektrochemická akumulace.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracovat rešerši k problematice možností akumulace elektrické energie z OZE a aktuálních trendů v této oblasti.
2. Pro zadaný nestabilní zdroj elektrické energie provést alternativní návrhy akumulace elektrické energie (návrh bude zahrnovat minimálně akumulaci ve stlačeném vzduchu a elektrochemických akumulátorech).
3. Provést srovnání alternativních návrhů akumulace pro zadaný zdroj z předchozího bodu z hlediska efektivnosti, případně návratnosti.

Seznam doporučené literatury:

KALTSCHMITT, Martin, Nickolas J THEMELIS, Lucien Y BRONICKI, Lennart SÖDER a Luis A VEGA. Renewable energy systems. Volume 1. New York: Springer, 2013, xxvi, 664 stran : ilustrace (většinou barevné). ISBN 978-1-4614-5819-7.

CENEK, Miroslav. Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003, 248 s. : il. ; 21 cm. ISBN 80-86534-03-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi akumulace elektrické energie vyrobené obnovitelnými zdroji s nestabilní produkcí. Zadání stanovuje několik cílů. V rámci rešerše jsou na příkladech konkrétních zástupců podrobně představeny aktuální trendy v akumulaci, včetně jejich technických parametrů a ekonomických možností. Dále je pro účely jednotlivých návrhů systémů akumulace definován nestabilní zdroj elektrické energie – větrný park tří elektráren Multibrid 5000, společně s jeho parametry a detaily provozu. Jako první je realizován podrobný návrh pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu (A-CAES). Součástí je termodynamický výpočet stanovených komponent, jejich částečné technické řešení, finanční zhodnocení investice a určení teoretické doby návratnosti. Dále je proveden návrh pro akumulátory Tesla Powerpack, který obsahuje výpočet jednotlivých parametrů systému, finanční zhodnocení investice a vymezení teoretické doby návratnosti. Poslední část práce se věnuje srovnání a zhodnocení dosahovaných výsledků obou navržených způsobů akumulace elektrické energie. Na závěr je vybrán perspektivnější z nich a to A-CAES.

Klíčová slova

akumulace, obnovitelné zdroje, nestabilní produkce, elektrická energie, stlačený vzduch, A-CAES, baterie, akumulátory, Tesla Powerpack

ABSTRACT

This diploma thesis deals with possibilities of accumulation of electricity generated by renewable sources with unstable production. Several goals were set by an assignment of this thesis. Within a research, current trends of the accumulation are presented in detail on examples of specific representatives with their technical parameters and economic possibilities. Further, an unstable source of electricity – the wind farm of three power plants Multibrid 5000 with all its parameters and operational details is defined for purposes of individual designs of accumulation systems. Firstly, the detailed design of an advanced compressed air energy storage (A-CAES) is realized. It includes a thermodynamic calculation of chosen components, their partial technical solutions, a financial evaluation of investment and a determination of theoretical payback period. Furthermore, the design for accumulators Tesla Powerpack is realized. It contains a calculation of individual system parameters, a financial evaluation of investment and a determination of theoretical payback period. Last part of the thesis is dedicated to a comparison and an evaluation of the achieved results of both realized methods of the electricity accumulation. In the end, A-CAES is chosen as more perspective variation.

Key words

accumulation, renewable sources, unstable production, electricity, compressed air, A-CAES, batteries, accumulators, Tesla Powerpack

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PETRENEC, Jan. *Akumulace elektrické energie pro zdroj s nestabilní produkcí* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124452>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Akumulace elektrické energie pro zdroj s nestabilní produkcí** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23. května 2020

Bc. Jan Petrevec

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych vyjádřil své upřímné poděkování vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a vstřícnost. Dále bych chtěl poděkovat mojí rodině a přítelkyni za podporu, kterou mi poskytují celý život.

podpis

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Možnosti akumulace elektrické energie	12
1.1 Elektrické baterie	12
1.1.1 Li-ion baterie	13
1.1.1.1 Baterie s katodou z LiFePO ₄	14
1.1.1.2 Li-ion baterie s anodou ze silikonu.....	16
1.1.1.3 Tesla Powerpack.....	17
1.1.2 Redoxní průtokové baterie.....	19
1.1.2.1 Vanadiové redoxní průtokové baterie (VRFB).....	19
1.1.2.2 Zinko-bromová průtoková baterie ZBM2.....	23
1.1.3 Slanovodní baterie	25
1.2 Srovnání jednotlivých elektrochemických akumulátorů	29
1.3 Superkondenzátory	30
1.3.1 Superkapacitory s pevným elektrolytem	30
1.4 Mechanické ukládání energie	32
1.4.1 Přečerpávací vodní elektrárny	32
1.4.2 Gravitační technologie akumulace – jeřáb a bloky (cihly).....	33
1.5 Pokročilá úložiště energie ve stlačeném vzduchu	36
1.6 Úložiště energie ve zkapalněném vzduchu.....	38
2 Specifikace nestabilního zdroje elektrické energie.....	41
3 Návrh systému akumulace ve stlačeném vzduchu.....	43
3.1 Kompresor	44
3.2 Výměník vzduch-termoolej 1	46
3.3 Zásobník stlačeného vzduchu – kaverna	50
3.4 Výměník vzduch-termoolej 2	52
3.5 Akumulační nádrž na termoolej	55
3.6 Spalovací komora	56
3.7 Plynová turbína.....	62
3.8 Generátor	64
3.9 Celková účinnost navrženého systému A-CAES	64
3.10 Shrnutí a náskres navrženého systému A-CAES	65
3.11 Ekonomické zhodnocení navrženého systému A-CAES.....	67
3.11.1 Investiční náklady navrženého systému A-CAES.....	67

3.11.2	Roční náklady na palivo pro provoz navrženého systému A-CAES	67
3.11.3	Cash flow navrženého systému A-CAES	68
3.12	Teoretická doba návratnosti navrženého systému A-CAES	69
4	Návrh akumulace v elektrochemických bateriích	70
4.1	Počet akumulátorů a parametry navrhovaného systému Tesla Powerpack	70
4.2	Investiční náklady navrženého systému Tesla Powerpack	71
4.3	Roční příjmy, náklady a zisky navrženého systému Tesla Powerpack.....	71
4.4	Teoretická doba návratnosti navrženého systému Tesla Powerpack.....	72
5	Srovnání navržených akumulačních systémů	73
	DISKUSE.....	75
	ZÁVĚR	76
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	78
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	89
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	97
	SEZNAM TABULEK.....	98

ÚVOD

Tato diplomová práce si klade za cíl posoudit možnosti jednotlivých metod akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů s nestabilní produkcí a provést konkrétní detailní návrhy jejich systémů. Zvolené téma spojuje dvě velmi diskutované části energetiky s širokou škálou aplikací jeho výsledků. První oblastí – akumulací elektrické energie rozumíme jednotlivé způsoby uchování elektrické energie, případně její přeměny na jinou formu energie a zase zpět. Tyto technologie se neustále zdokonalují a vyvíjejí, a právě tento trend se snaží práce zachytit.

Druhou zahrnutou oblastí jsou obnovitelné zdroje, jako například solární a větrné elektrárny. Jejich výkon je značně nestabilní, neboť je ovlivněn aktuálními klimatickými podmínkami. I přesto se však tyto technologie stále více používají. Trendem vývoje výroby elektrické energie v ČR i dalších částech Evropy je spíše omezovat stávající uhelné elektrárny, které při svém provozu produkují emise, a nahrazovat je těmito „zelenými zdroji energie“. S tím je však spojena problematika kolísajícího výkonu, kterou by mohla částečně vyřešit právě akumulace. V době vysoké produkce obnovitelných zdrojů by se provádělo ukládání elektrické energie a v případě potřeby by byla zpětně využívána.

Otázka řešení dvou výše zmíněných okruhů a z jejich kombinace vyplývající značně velký přínos v české i světové energetice, byl pro osobu autora natolik zajímavý, že bylo toto téma vypsáno a vybráno.

První část diplomové práce se věnuje rešerši jednotlivých způsobů akumulace elektrické energie a jejich aktuálním vývojovým trendům. Jsou vysvětleny dané technologie a popsány jejich dosahované technické parametry i ekonomické možnosti na příkladech konkrétních zástupců. Vzhledem k zadání je součástí tohoto oddílu také zhodnocení, srovnání a výběr nejvhodnějšího elektrochemického akumulátoru pro posouzení možnosti použití v kombinaci s obnovitelnými zdroji.

V druhé části je provedeno představení zvoleného nestabilního zdroje elektrické energie větrné elektrárny Multibrid 5000. Pro účely jednotlivých, dále v práci navrhovaných, systémů jsou také blíže specifikovány parametry a detaily provozu větrného parku tvořeného třemi zmíněnými elektrárnami, z kterých bude prováděna akumulace.

Další část se zaměřuje na podrobný návrh systému pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu (A-CAES). Jsou stanoveny jeho jednotlivé komponenty, pro které je proveden termodynamický výpočet a částečné technické řešení. Na závěr je určena zpětná účinnost systému, cash flow a teoretická doba návratnosti investice.

Čtvrtá část se zabývá konkrétním návrhem systému baterií Teska Powerpack, které byly vybrány jako nejvhodnější elektrochemické akumulátory. Součástí je výpočet jednotlivých parametrů systému, cash flow a teoretické doby návratnosti investice.

V poslední části práce je provedeno srovnání a zhodnocení dosahovaných výsledků obou výše zmíněných navržených systémů pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů s nestabilní produkcí. Je vybrán perspektivnější z nich a to A-CEAS.

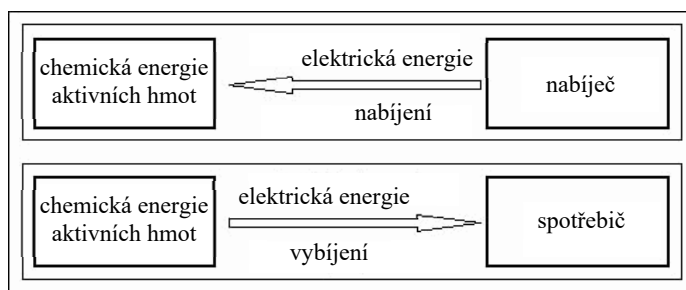
1 Možnosti akumulace elektrické energie

Hlavní myšlenkou akumulace elektrické energie je v době jejího přebytku provádět uskladňování a v době jejího nedostatku ji zpětně využívat. Většinou jde o přeměnu elektrické energie na její jinou podobu, jako například potenciální, kinetickou nebo chemickou energii, případně teplo a poté opětovnou přeměnu zase zpět na energii elektrickou. V první části této diplomové práce budou podrobně probrány jednotlivé možnosti akumulace a jejich aktuální trendy vývoje.

1.1 Elektrické baterie

Prvním probíraným způsobem akumulace jsou elektrické (elektrochemické [1]) baterie. Aby bylo možné lépe pochopit pojem elektrická baterie, je potřeba jako první definovat pojem galvanický článek. Jde o chemický zdroj energie, který se skládá ze dvou elektrod (katody a anody) a iontově vodivého elektrolytu. Všechny tři zmíněné části jsou umístěny ve vhodné nádobě. Mezi elektrodami a elektrolytem dochází k chemickým reakcím, při nichž vzniká na elektrodách rozdíl potenciálu, který je zdrojem elektromotorického napětí. Na anodě probíhá oxidace a na katodě probíhá redukce. Elektrody jsou z pravidla odděleny porézním separátorem, aby nedošlo ke zkratu elektronově vodivých částí elektrod.

Rozlišujeme dva typy galvanických článků. Prvním z nich jsou takzvané primární články, které ihned po sestavení dodávají elektrickou energii a nelze je znovu nabíjet. Druhým typem jsou články sekundární neboli akumulátory. Ty je potřeba nejprve nabít, tedy uložit elektrickou energii v podobě chemické energie na elektrodách. Teprve potom slouží akumulátory jako zdroje energie. Při jejich vybíjení dochází k opětovné přeměně chemické energie aktivních hmot elektrod na energii elektrickou. Zpravidla je můžeme vícekrát nabíjet a vybíjet. Předchozí dva odstavce této kapitoly byly zpracovány s využitím zdrojů [2–7].



Obr. 1 Schéma sekundárního galvanického článku/akumulátoru [2]

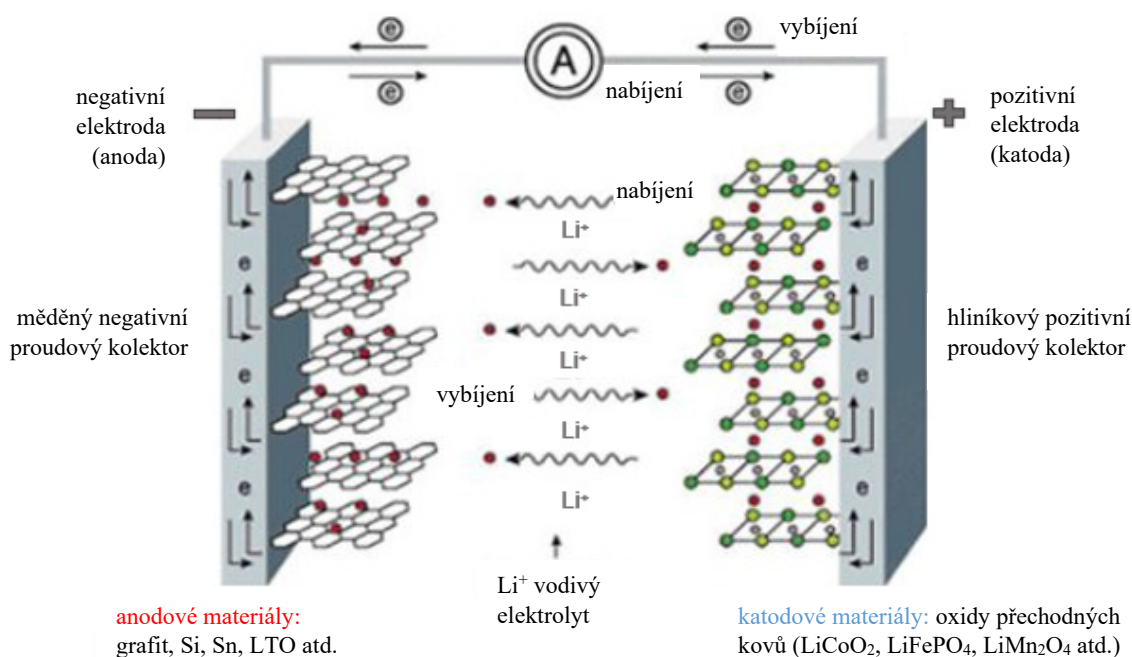
Pojem elektrická/akumulátorová baterie reprezentuje zapojení jednoho a více galvanických článků v sérii (případně paralelně nebo sérioparalelně), vybavených nezbytnými prvky pro použití [4, 8]. Baterie by měla na svém obalu obsahovat příslušnou etiketu s popisem výrobku [4, 8]. Tato práce se bude nadále zabývat pouze oblastí akumulátorových baterií, tedy těch složených ze sekundárních galvanických článků.

Způsob akumulace elektrické energie do baterií je v dnešní době velmi rozšířený. Najdeme je například v mobilních telefonech, hračkách, holicích strojcích, televizních ovladačích a jiných spotřebičích, ale také v automobilech nebo záložních zdrojích UPS a dalších. Akumulace v bateriích představuje jeden z nejstarších způsobů ukládání elektrické energie a její vývoj neustále pokračuje [9–11]. O důležitosti těchto technologií svědčí také Nobelova cena za chemii udělená v roce 2019 třem vědcům za novodobé (z anglického „modern-day“) lithium-ion baterie [11].

Následující kapitoly se budou zabývat jednotlivými druhy akumulátorů, z nichž následně bude vybrán nejperspektivnější zástupce pro návrh systému elektrochemických akumulátorů pro ukládání elektrické energie z nestabilního zdroje.

1.1.1 Li-ion baterie

Prvním probíraným zástupcem této skupiny možností akumulace elektrické energie jsou Li-ion baterie. Princip fungování je stejný jako výše popsáný v kapitole 1.1 *Elektrické baterie* [12]. Jeden sekundární galvanický článek je tvořen dvěma elektrodami, elektrolytem a separátorem [12]. V závislosti na použitém materiálu elektrod a zvolených chemikáliích pro elektrolyty získáme různé druhy Li-ion baterií a jim odpovídající parametry [13]. Dle [14] se nejčastěji jako materiál pro katodu používají oxidy nebo fosfáty lithia a anodu tvoří grafit, křemík nebo například lithiové oxidy titanu.



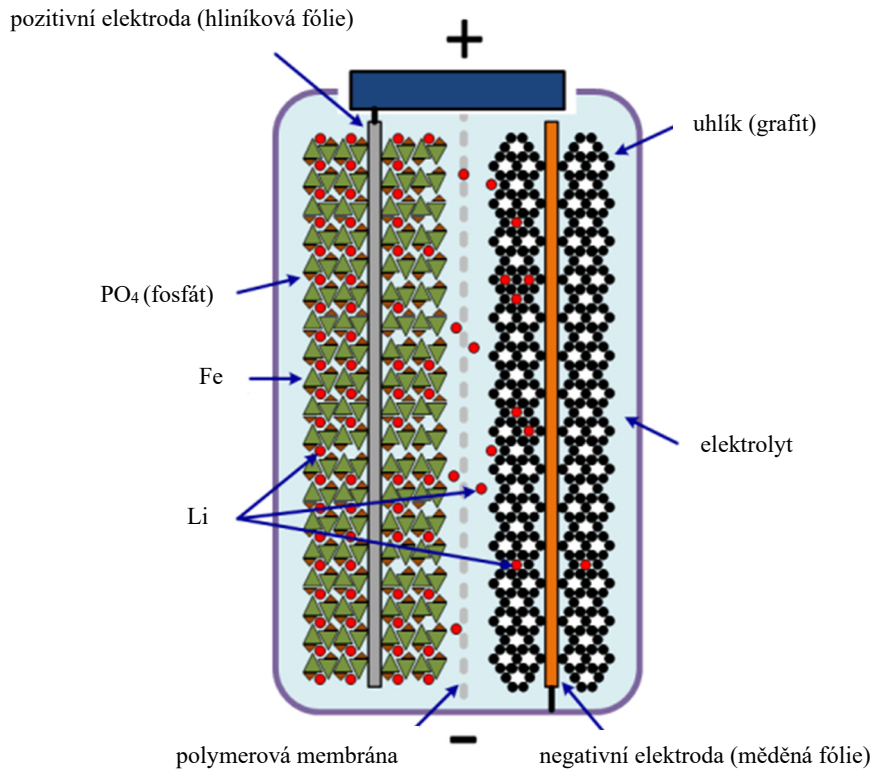
Obr. 2 Schéma sekundárního článku Li-ion baterie – upraveno z [15]

Jedním z potenciálních problémů výroby nových Li-ion baterií může být nedostatek lithia, a s tím spojená jeho vysoká cena [16, 17]. Stávající zásoby tohoto kovu se s rozmachem elektrických vozidel a růstem poptávky po nových bateriích rychleji vyčerpávají [17]. Zdroj [18] uvádí možné řešení této situace. Již v dnešní době jsme schopni pomocí 2krokového procesu, využívajícího mechanického a hydrometalurgického systému, získat z Li-ion baterií 80–100 % materiálu zpět jako sekundární zdroj pro výrobu nových baterií [18]. Tento fakt by mohl do budoucna problém nedostatku stavebního materiálu částečně vyřešit, avšak je stále nutné vytvořit dobré systémy recyklace Li-ion baterií a aplikovat zmíněný 2krokový proces, abychom se vyhnuli situaci, kdy nebudeme mít dostatek lithia (případně také kobaltu) pro stavbu nových baterií [18].

Dle [19] se Li-ion baterie s LiFePO₄ používají v kombinaci se solárními panely a zdroj [20] uvádí jejich aplikaci s větrnou elektrárnou. Je tedy zřejmě možné využít LiFePO₄ baterie pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů, což koresponduje se zadáním této diplomové práce, a proto se bude následující kapitola zabývat jejich bližší charakteristikou.

1.1.1.1 Baterie s katodou z LiFePO₄

Dle [21] jde o druh akumulátorů, které používají z 90 % jako katodový materiál LiFePO₄. Jako elektrolyt slouží ethylenkarbonát-dimethylkarbonát (EC-DMC) a LiClO₄. Anodu tvoří grafit nebo tvrdý uhlík s interkalovaným kovovým lithiem. Následující obrázek 3 naznačuje princip a konstrukci sekundárního článku LiFePO₄ baterie.



Obr. 3 Schéma sekundárního článku LiFePO₄ baterie – upraveno z [132]

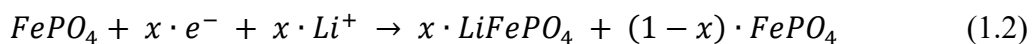
Nabíjení a vybíjení

Základní princip fungování LiFePO₄ baterií je naznačen rovnicemi 1.1 a 1.2 uvedenými níže [22]. Při vybíjení se lithiové ionty extrahují z anody a přechází přes separátor na stranu katody [23, 24]. V případě nabíjení je trasa těchto iontů opačná, z katody na anodu [23, 24].

Chemická rovnice nabíjení [22]:

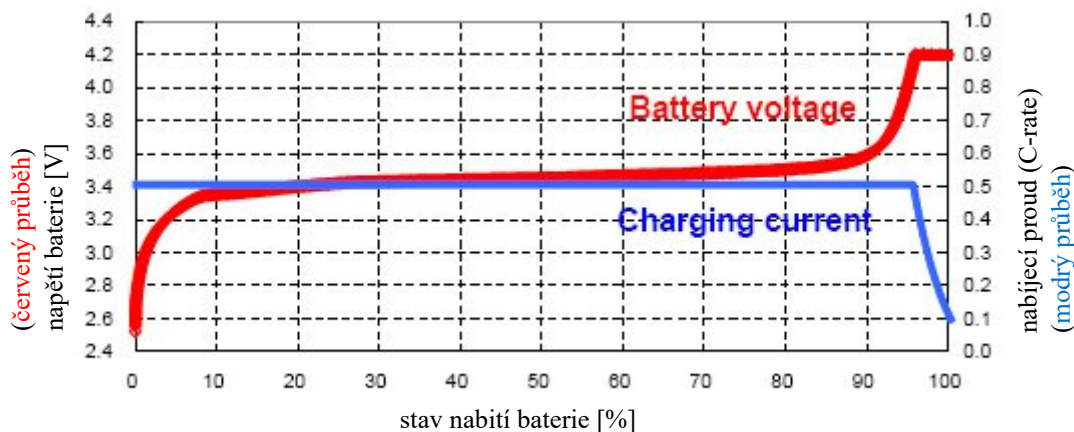


Chemická rovnice vybíjení [22]:



Nabíjení LiFePO₄ baterií probíhá ve dvou krocích. V první části probíhá při konstantním proudu, dokud se nedosáhne přibližně 60 % SoC (úroveň nabití baterie = z anglického „state of charge“ [25]) vzhledem k její kapacitě. Tento proces trvá přibližně 1 h. V druhé části dojde k zvýšení nabíjecího napětí na efektivní limit 3,65 V v každém jednom článku baterie. Nabíjí se při konstantní hodnotě napětí a nabíjecí proud asymptoticky klesá. Druhá část trvá přibližně 2 h. Celkový odhadovaný čas nabití tohoto typu baterií je cca 3 h. Odstavec zpracován z [26].

Dle [26] u typu LiFePO₄ baterií lze také použít tzv. rychlé nucené nabíjení, kdy se v jednom kroku baterie nabíjí buď při konstantním proudu na 95 % úroveň nabití baterie nebo případně pomocí konstantního proudu a konstantního napětí na úroveň nabití baterie 100 %. Lze tak zkrátit dobu nabíjení na cca 2 h [26].



Obr. 4 Graf nabíjení LiFePO₄ baterie – upraveno z [26]

Výhody:

- nízká výrobní cena (dostupnost železa) [21]
- netoxické a šetrné k životnímu prostředí [21, 27]
- neobsahují kovy vzácných zemin [27]
- lepší tepelná a chemická stabilita než ostatní Li-ion baterie [27]
- bezpečné – odolné proti tepelným únikům [28]
- schopnost dodávat téměř konstantní napětí 3,2 V po celou dobu vybití [27]
- schopnost dodávat vysoký proud při špičkových odběrech [28]
- vysoká specifická kapacita 170 Ah·kg⁻¹ [21]
- schopnost rychlého nabíjení [29]
- nízká údržba [27]
- možnost využít 100 % kapacity baterie (100% DOD = hloubka vybití z anglického „Depth of Discharge“) bez dlouhodobých následků [30, 31]
- nemají paměťový efekt (je možné nabíjet za každého stavu vybití baterie) [32]
- prakticky nemají samovybíjecí efekt [32]

Nevýhody:

- nízký výkon při nízkých teplotách (řádově -40 °C až -20 °C) [33]
- nelze použít pro malá přenosná zařízení [27]
- nižší energetická kapacita než ostatní Li-ion (např. LiCoO₂) baterie [28]
- trpí efektem stárnutí (cykly nabití/vybití způsobují snížení kapacity baterie) [34]
- rezervy lithia jsou odhadovány cca na 15115000 t v roce 2019 [35]

Zdroj [36] uvádí, že jsou nabízeny LiFePO₄ baterie v několika různých provedeních pro různé hodnoty kapacity v Ah. Byl vybrán jeden konkrétní typ – Winston článek Lithium Yttrium – LiFePO₄/LiFeYPO₄ akumulátor 3,2 V, 700 Ah, u kterého jsou garantovány následující parametry popsané v tabulce 1 na další stránce [32].

Tab. 1 Parametry Winston článku Lithium Yttrium [32, 37]

jmenovité napětí na prázdko	3,2 V
kapacita	2102 Wh; 700 Ah
minimální pracovní napětí	2,8 V
maximální pracovní napětí	3,8 V
doporučený vybíjecí proud	<350 A
maximální vybíjecí proud	<2100 A
špičkový vybíjecí proud	14000 A po dobu 5 sekund
doporučený nabíjecí proud	<350 A
maximální nabíjecí proud	<2100 A s tepelnou kontrolou akumulátoru
maximální nabíjecí napětí	4,25 V
minimální pracovní teplota	-45 °C
maximální pracovní teplota	85 °C
životnost	víc jak 2000 (až 8000) cyklů nabití/vybití
rozměry (délka, výška, šířka)	627 mm, 306 mm, 67 mm
hmotnost	21,6 kg
cena	31128 Kč včetně DPH

Vzhledem k úplnosti dostupných informací bude tento zástupce zařazen do výběru nejvhodnějšího akumulátoru pro použití v kombinaci s obnovitelnými zdroji v kapitole 1.2 Srovnání jednotlivých elektrochemických akumulátorů.

1.1.1.2 Li-ion baterie s anodou ze silikonu

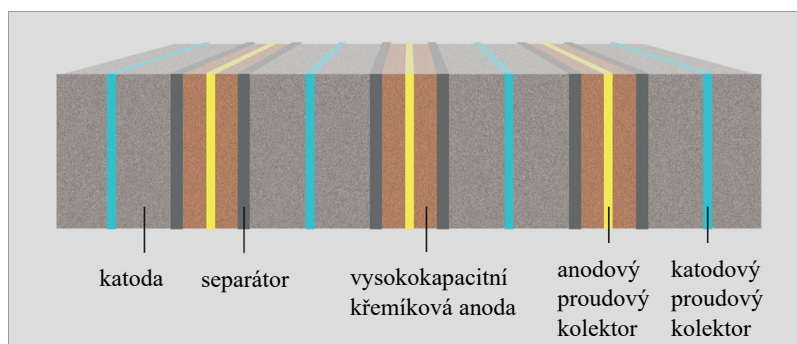
Jak bylo výše uvedeno, nabíjení Li-ion článků funguje na principu, že jednotlivé ionty lithia přechází z katody (pozitivní elektrody) na anodu (zápornou elektrodu). Během vybíjení se naopak ionty lithia pohybují z anody na katodu. Z toho lze vyvodit, že pokud chceme co nejvíce nabít takový sekundární článek, musíme uložit co největší množství lithia na anodu. U Li-ion baterií použitých například v mobilních telefonech, noteboocích nebo elektrických autech je anoda tvořena z uhlíku a lithia ve formě LiC_6 . Zdroj [38] uvádí, že se vědci snaží nahradit stávající materiály anody pomocí silikonu, kdy je lithium navázáno ve formě $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$. V případě anody ze silikonu připadá na čtyři atomy křemíku patnáct navázaných atomů lithia. Prakticky to znamená, že menší množství materiálu anody může pojmout mnohem větší množství lithia, a tak několikanásobně zvýšit kapacitu baterií. Silikon však při nabíjení zvětší svůj objem asi o 300 % a při vybíjení se opět smrští na objem původní. Opakované nabíjení a vybíjení potom způsobí, že se anoda rozpadá, zvětšuje svou plochu, která pak chemicky reaguje s elektrolytem a v konečném důsledku poškozuje baterii.

Problém se částečně podařilo překonat například u Li-ion baterií společnosti Tesla, která v roce 2016 odhalila informaci, že jejich anody potažené uhlíkem obsahují křemík kombinovaný s oxidem křemičitým, avšak množství použitého křemíku bylo minimální. Bateriím Tesla se bude více věnovat následující kapitola 1.1.1.3 Tesla Powerpack.

Zdroj [38] uvádí, že v roce 2019 by kalifornská společnost Sila Nanotechnologies chtěla do stávající výroby baterií zahrnout své tzv. „drop-in“ řešení anod obohacených o silikon, které by problém zvětšení objemu křemíku při nabíjení mělo vyřešit. Anodový materiál je složen z částic obsahující křemík uvnitř porézního skeletu (z anglického „porous scaffolding“), který umožňuje expanzi a smršťování křemíku tak, aby nedošlo ke kontaktu

s elektrolytem. Toto řešení zvýší kapacitu stávajících Li-ion baterií až o 40 % či více v závislosti na aplikaci, s tím že vydrží fungovat 400–1000 cyklů. Dalším pozitivním vylepším by mělo být ztenčení anody o 67 %, což by mohlo až 9krát urychlit nabíjení. Díky tomuto řešení by měly být baterie také bezpečnější. Předchozí odstavce v této kapitole *1.1.1.2 Li-ion baterie s anodou ze silikonu* byly zpracovány s využitím informací z [38].

Jiný přístup výroby křemíkových anod zvolila společnost Enovix, která předchází expanzi křemíků v anodovém zásobníku při nabíjení pomocí vysokého tlaku. Jejich anoda je vyrobena pouze z křemíku a oxidů křemíku. Enovix využívá 3D buněčnou architekturu, která prokládá jednotlivé svíslé komponenty bateriového článku (katodu, vysokokapacitní křemíkovou anodu, odlučovač a proudové kolektory viz obrázek 5 níže) do ploché struktury pomocí procesu Enovix Direct Assembly, který přímo zarovná laserem řezané elektrody a oddělovací listy pro vysokorychlostní sestavování. Společnost uvádí, že jejich řešení by mělo zlepšit baterie o 30–70 % v závislosti na aplikaci. Odstavec zpracován z [38, 39].



Obr. 5 Struktura nabíjecí baterie od Enovix – upraveno z [39]

Po rozsáhlé rešerši, s využitím různých vyhledávacích prostředků a volbou různých klíčových slov, se však bohužel nepodařilo nalézt zmínku o již vyrobeném prototypu s konkrétními výsledky těchto nejnovějších technologií. Vývoj tedy zřejmě stále ještě pokračuje. Z tohoto důvodu nebudou zástupci této kapitoly *1.1.1.2 Li-ion baterie s anodou ze silikonu* zařazeni do výběru nejvhodnějšího akumulátoru pro použití v kombinaci s nestabilními zdroji elektrické energie v kapitole *1.2 Srovnání jednotlivých elektrochemických akumulátorů*.

1.1.1.3 Tesla Powerpack

Dalším probíraným zástupcem Li-ion baterií je Tesla Powerpack, které lze využívat například pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů, jako fotovoltaiky nebo větrné elektrárny [40, 41]. Tesla Powerpack jsou dále určeny pro komerční užití nebo elektrické přenosové soustavy, kde slouží k vykrývání spotřebních špiček elektrické energie, řazení zátěže, regulaci frekvence a kontrole napětí [42]. Dále mohou fungovat jako záložní napájení, a nebo je najdeme v mikrogrid aplikacích [42]. Výrobce Tesla uvádí, že Powerpack je možné přizpůsobit zákaznickým požadavkům na prostor a výkon [40]. Systém je škálovatelný pro malé i větší aplikace [40].

Dle [40] se Tesla Powerpack skládá z nejsložitějších baterií na světě. Jde o úložiště stejnosměrného proudu obsahující 16 samostatných bateriových modulů, systém řízení teploty a stovky senzorů, které monitorují a poskytují informace o aktuálním chodu jednotlivých článků baterií. Každý modul má svůj izolovaný DC-DC inverter, který převádí střídavý proud

na stejnosměrný pro skladování v Tesla Powerpack a poté jej převádí zpět na střídavý proud pro síťové připojení. Toto vše zajišťuje bezkonkurenční výkon, bezpečnost a spolehlivost. Odstavec byl zpracován s využitím zdroje [40].



Obr. 6 Tesla Powerpack [40, 43]

Dodávaný kryt těchto akumulátorů je navržen tak, aby odolal jakémukoli venkovnímu prostředí [40]. Nejsou zapotřebí žádné další ochrany, což zjednodušuje instalaci a snižuje náklady na přípravu staveniště [40]. Následující tabulka 2 uvádí jednotlivé parametry Tesla Powerpack.

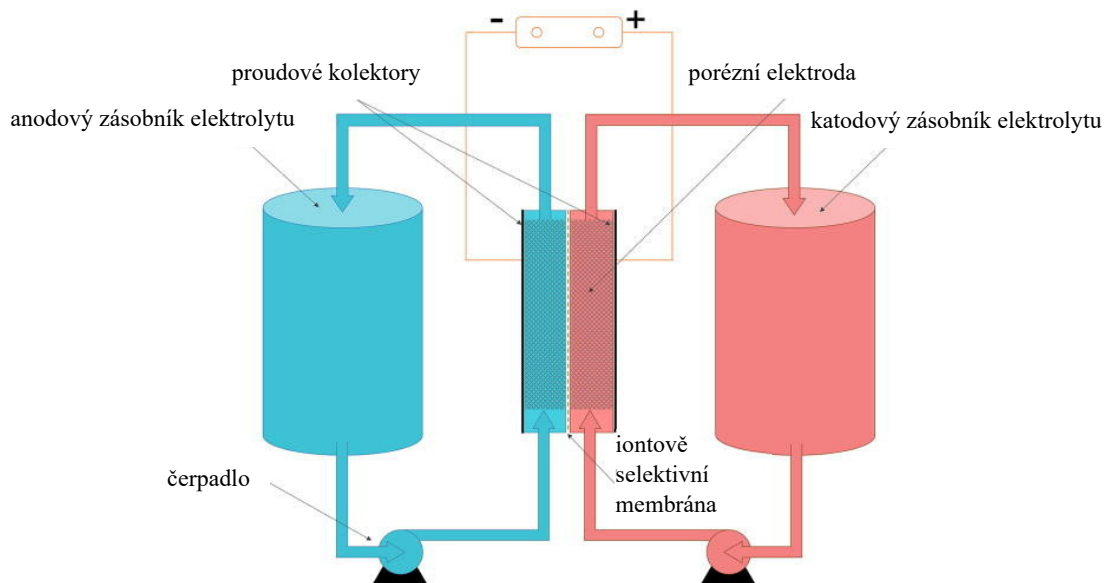
Tab. 2 Parametry Tesla Powerpack [40–42, 44, 45]

napětí (AC)	380 až 480 V, tři fáze
výkon	až 130 kW (AC)
výkon invertoru při 480 V	70 kVA
hloubka vybití – DOD	100 %
kapacita	232 kWh (AC)
provozní teploty	-30 °C až 50 °C
zpětná účinnost (AC) – 2h vybíjecí systém	88 %
zpětná účinnost (AC) – 4h vybíjecí systém	89,5 %
životnost	5000 cyklů
rozměry (délka, šířka, výška)	1317 mm, 968 mm, 2187 mm
váha	2199 kg
cena (Powerpack 2 – říjen 2016)	398 \$·kWh ⁻¹

Vzhledem k již realizovaným projektům Tesla Powerpack systémů s kapacitou 50 MWh i větší [46] a úplností nalezených jednotlivých parametrů, bude tento zástupce uvažován ve výběru nejvhodnějšího akumulátoru pro použití v kombinaci s nestabilními zdroji elektrické energie v kapitole 1.2 Srovnání jednotlivých elektrochemických akumulátorů.

1.1.2 Redoxní průtokové baterie

Další skupinou sekundárních akumulátorů elektrické energie, probíraných v této práci, jsou redoxní průtokové baterie. Jde o typ elektrochemických článků, ve kterých je chemická energie zajištěna dvěma chemickými složkami rozpuštěnými v kapalinách. Tyto roztoky označujeme jako elektrolyty. Každý z nich cirkuluje ve svém vlastním oběhu, jak naznačuje obrázek 7 níže. Při nabíjení (případně vybíjení) jsou čerpány přes katodu a anodu a poté zpět do svých zásobníků, kdy jeden z nich je určen pro ukládání elektrolytu pro pozitivní elektrodové reakce a druhý pro negativní. Jednotlivé elektrody jsou od sebe odděleny membránou, přes níž probíhá iontová výměna doprovázená tokem elektrického proudu. Napětí článku je chemicky určeno Nernstovou rovnicí a u praktických aplikací se pohybuje od 1 V do 2,2 V. Odstavec zpracován s využitím [47, 48].



Obr. 7 Stavba a princip redoxní průtokové baterie – upraveno z [49]

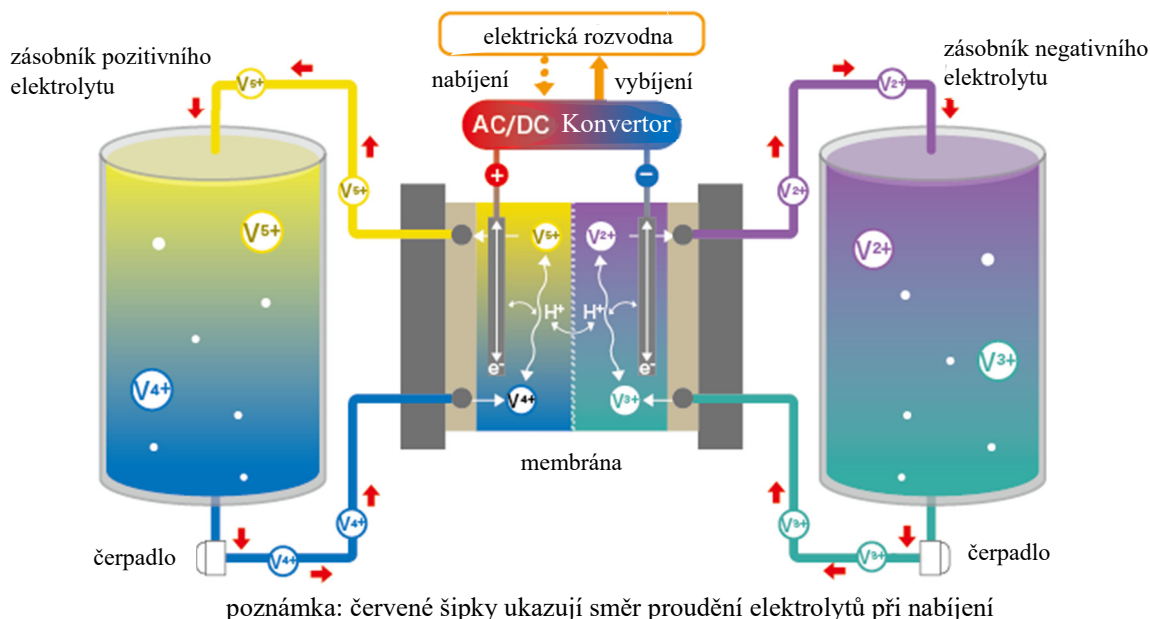
Průtokové baterie mohou fungovat jako palivové články, kde je staré použité palivo extrahováno ze systému a vyměněno za nové, nebo jako dobíjecí baterie, kde zdroj elektrické energie řídí regeneraci paliva [47].

1.1.2.1 Vanadiové redoxní průtokové baterie (VRFB)

Prvním zástupcem této skupiny akumulátorů jsou vanadiové redoxní průtokové baterie (z anglického „vanadium redox flow batteries“). Jde o dobíjecí průtokové baterie, které používají k ukládání chemické energie ionty vanadia ve čtyřech různých oxidačních stavech. Díky této vlastnosti vanadu mají VRFB pouze jeden elektroaktivní element namísto dvou. Jejich hlavním použitím je skladování elektrické energie v síti. Připojují se tedy k elektrárnám nebo přímo k síti.

Základní stavba těchto baterií je stejná jako výše popsaná u celé skupiny redoxních průtokových baterií. Elektrody VRFB jsou na bázi uhlíku. Elektrolyt procházející přes katodu (proudící v kladné cirkulační polovině článku) obsahuje ionty VO_2^+ a VO^{2+} . Elektrolyt procházející přes anodu (proudící v záporné cirkulační polovině článku) obsahuje ionty V^{3+} a V^{2+} . Elektrolyty mohou být připraveny například elektrolytickým rozpouštěním oxidu vanadičného (V_2O_5) v kyselině sírové (H_2SO_4). Roztok po smíchání zůstává i při použití

v VRFB silně kyselý. Oba elektrolyty jsou uloženy v zásobnících a k elektrodám jsou hnány čerpadly. Následující obrázek 8 naznačuje princip fungování a konstrukční rozvržení VRFB.



Obr. 8 Schéma vanadiové redoxní průtokové baterie – upraveno z [50]

Během nabíjení VRFB jsou v kladné cirkulační polovině článku ionty VO^{2+} přeměněny na ionty VO_2^+ a z katody uvolněny elektrony, které přechází do záporné cirkulační poloviny článku, kde dojde k přeměně iontů V^{3+} na V^{2+} . Během vybíjení je tento proces obrácený a má za následek typické napětí otevřeného obvodu 1,41 V při 25 °C.

Studie od University of New South Wales ukázaly, že vanadiové baterie jsou schopny velmi rychlé reakce na měnící se zatížení a mají extrémně velkou kapacitu přetížení. Konkrétně mohou dosáhnout doby odezvy pod 0,5 ms při 100% změně zatížení a povolit přetížení až 400 % po dobu 10 s. Zdroj [51] uvádí, že doba odezvy je většinou limitována elektrickým zařízením. Většina vanadiových baterií na bázi kyseliny sírové pracuje v teplotním rozmezí 10 °C až 40 °C, pokud nejsou speciálně navrženy pro chladnější nebo teplejší klima, neboť při teplotách nižších než 10 °C kyselina sírová krystalizuje. Zpětná účinnost v praktických aplikacích se pohybuje kolem 65 % až 75 %. Předchozí odstavce v této kapitole 1.1.2.1 Vanadiové redoxní průtokové baterie (VRFB) byly zpracovány s využitím zdroje [51].

Společnost VoltStorage nabízí ekologické akumulční systémy VoltStorage SMART vhodné především pro domácnosti s fotovoltaikou. Jejich baterie využívají vanadiovou redoxní průtokovou technologii (z anglického „vanadium redox flow technology“). VoltStorage SMART nejsou vytvořeny z vzácných prvků (z anglického „rare raw materials“) jako kobalt nebo lithium, ale z vanadu, který je vedlejším produktem výroby železa a může být nízkoenergeticky recyklován. Elektrolyty jsou složeny převážně z vody a dalších nehořlavých látek. Díky tomu je celý systém 100% nehořlavý. Další výhodou je dlouhá životnost bez ztráty kapacity, která i po 20 letech zůstává stále 100%. Tyto akumulční systémy umožňují jednofázový provoz s možnou třífázovou kompenzací. Díky spolehlivému vzdálenému monitorovacímu systému je VoltStorage SMART 100% bezúdržbový. Odstavec zpracován z [52, 53].



Obr. 9 Redoxní průtokové baterie VoltStorage SMART – upraveno z [52, 54]

VoltStorage SMART lze v libovolném počtu sériově zapojit, a tak zvýšit kapacitu celého akumulčního systému [52]. Společnost VoltStorage za 100 EUR vykupuje zpět své bateriové systémy na konci jejich životnosti a stará se o jejich demontáž a recyklaci [52]. V následující tabulce 3 jsou uvedeny parametry jedné takové výše popsané akumulční jednotky.

Tab. 3 Parametry VoltStorage SMART [52, 53, 55]

jmenovité napětí pro elektrické připojení	230 V AC ($\pm 10\%$)
jmenovitá frekvence pro elektrické připojení	50 Hz
max. vstupní/výstupní proud (AC) pro elektrické připojení	10 A
maximální účinnost invertoru	94 %
jmenovitý výkon (DC)	800 W
maximální výkon (kontinuální, DC)	1,5 kW
maximální výkon (30 sekund, DC)	2 kW
maximální proud (kontinuální, DC)	60 A
maximální proud (30 sekund, DC)	80 A
jmenovité napětí	25,2 V
maximální kapacita (DC)	245 Ah
kapacita	6,2 kWh
hloubka vybití – DOD	88 %
maximální energetická účinnost	84,5 %
životnost	>10000 cyklů
kapacita po 20 letech	100 %
minimální a maximální pracovní teplota	0 °C a 35 °C
skladovací teploty	-10 °C až 50 °C
rozměry (délka, výška, šířka)	580 mm, 1406 mm, 580 mm
hmotnost (instalace, provoz)	108 kg, 388 kg
úroveň hlasitosti	<45 dB
cena (baterie, inverter, dodání, montáž, pravidelná aktualizace softwaru)	6999 EUR včetně DPH

Jiný dodavatel vanadiových redoxních baterií VionX Energy nabízí velkokapacitní akumulční systémy až do velikosti 10 MWh, které lze použít s obnovitelnými zdroji elektrické energie. V USA je již nainstalován a provozován jeden takový projekt, který disponuje výkonem 500 kW (3000 kWh). Slouží jako 6h záloha elektrické energie z parku větrných elektráren o celkovém výkonu 600 kW. Druhý takový akumulční systém o výkonu 500 kW (3000 kWh) je nyní v procesu výstavby a bude sloužit pro akumulaci 1MW solární elektrárny. VionX Energy používá pro konstrukci svých úložišť modulární architekturu. Princip spočívá v postupném přidávání (odebírání) a propojování jednotlivých odolných kontejnerů námořní třídy, které obsahují všechny potřebné komponenty pro provoz systému včetně vanadiových redoxních baterií. Jednotlivé kontejnery jsou skládány přímo vedle sebe, případně na sebe. Díky tomu se snižuje jejich rozteč, maximalizuje hustota energie a zmenšuje zastavěná plocha. Odstavec zpracován z [56, 57].



Obr. 10 Akumulační systém od VionX Energy [56]

Následující tabulka 4 uvádí bližší parametry tří dodávaných akumulčních systémů od VionX Energy, konkrétně VNX1200-6, VNX1200-8, VNX1200-10 [56].

Tab. 4 Parametry akumulčních systémů VNX1200-6, VNX1200-8, VNX1200-10 [56]

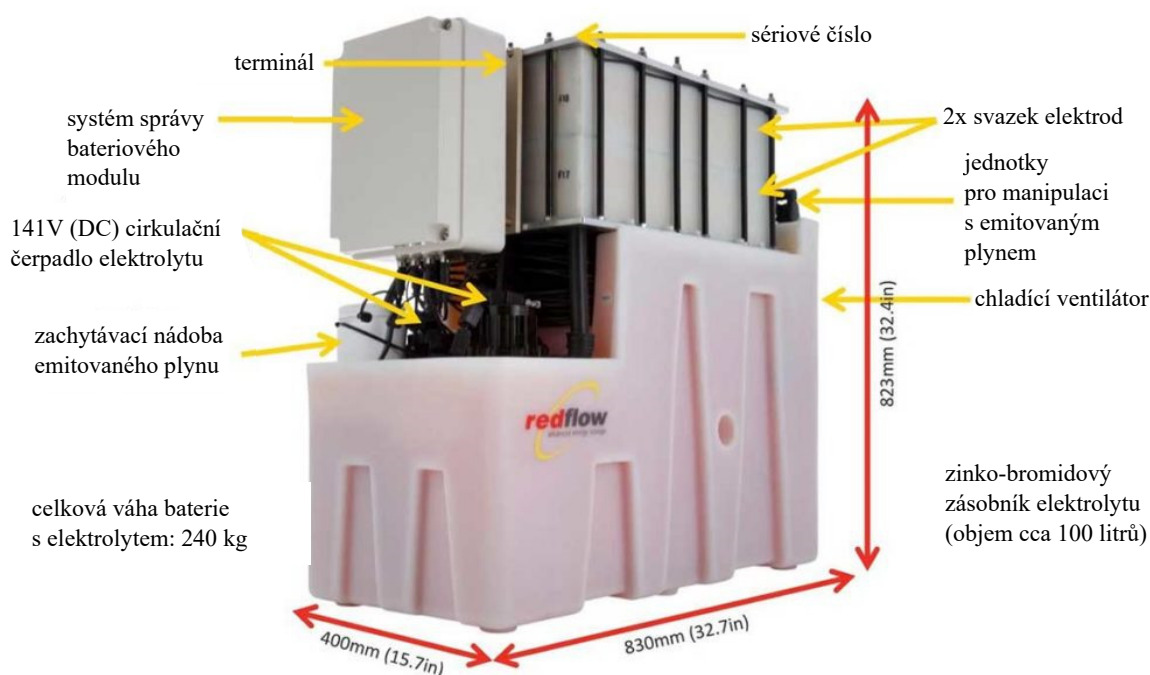
VNX1200-6	VNX1200-8	VNX1200-10
akumulace 6 MWh	akumulace 8 MWh	akumulace 10 MWh
4,8h výdrž při 1,2 MW	6,6h výdrž při 1,2 MW	8,4h výdrž při 1,2 MW
6h výdrž při 1 MW	8h výdrž při 1 MW	10h výdrž při 1 MW
185 m ² zastavěné plochy	195 m ² zastavěné plochy	205 m ² zastavěné plochy
100% použitelná DOD	100% použitelná DOD	100% použitelná DOD
životnost 20+ let	životnost 20+ let	životnost 20+ let
jmenovitý výkon 1,2 MW AC (2 kontejnery)	jmenovitý výkon 1,2 MW AC (2 kontejnery)	jmenovitý výkon 1,2 MW AC (2 kontejnery)

Bohužel výrobce VionX Energy přímo neuvádí cenu svých systémů. Pouze zmiňuje, že celkové náklady na životní cyklus 20 let systému VIONX mohou být o 20 % nižší než konvenční možnosti akumulace, při zachování značné zbytkové hodnoty systému v důsledku dlouhé životnosti systému [58]. Neuvádí rovněž ani hodnotu zpětné účinnosti. Vzhledem k neúplnosti informací u tohoto zástupce bude z vanadiových redoxních baterií zařazen do výběru nejvhodnější baterie pro akumulaci z nestabilních zdrojů v kapitole 1.2 Srovnání jednotlivých elektrochemických akumulátorů pouze systém VoltStorage SMART.

1.1.2.2 Zinko-bromová průtoková baterie ZBM2

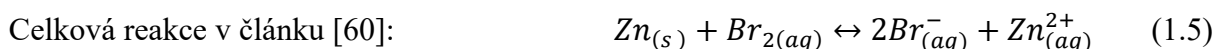
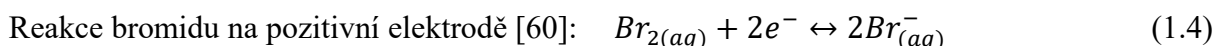
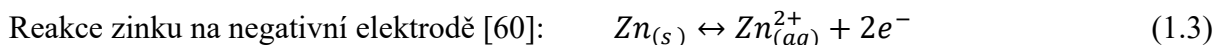
Společnost Redflow sustainable energy storage představila a na trh uvedla nejmenší zinko-bromovou průtokovou baterii ZBM2 na světě, které se bude věnovat tato kapitola [59].

Zdroj [60] uvádí, že elektrolyt zinko-bromových baterií se skládá převážně z bromidu zinečnatého rozpuštěného ve vodě. Princip fungování je shodný s výše popsaným v kapitole 1.1.2 Redoxní průtokové baterie. Jde o systém dvou zvlášť cirkulujících elektrolytů, které jsou při nabíjení (vybíjení) čerpány přes katodu a anodu a následně uloženy každý ve svém vlastním zásobníku. Jeden z nich se používá pro skladování elektrolytu pro pozitivní elektrodové reakce a druhý pro negativní. Jednotlivé elektrody jsou od sebe odděleny membránou, přes niž probíhá iontová výměna doprovázená tokem elektrického proudu. Odstavec zpracován z [60].



Obr. 11 Stavba ZBM2 baterie – upraveno z [61, 62]

Zinko-bromovou baterii lze považovat za pokovovací stroj. Během nabíjení je zinek přenesen z roztoku elektrolytu na povrch záporné elektrody, kde je galvanicky nanášen. Bromid je současně přeměněn na brom na kladném povrchu elektrody a je bezpečně uložen v chemicky složitě organické fázi v nádrži s elektrolytem. Při vybíjení dochází k obrácenému procesu. Zinek nanesený na záporné elektrodě se rozpustí v elektrolytu a je nachystán pro opětovné pokovování v dalším nabíjecím cyklu. Může být ponechán zcela vybitý bez poškození na dobu neurčitou. Zpracováno z [60, 63].



Baterie je navržena tak, aby mohla pracovat samostatně, ale i jako součást mnohem většího systému skladování energie. Více ZBM2 lze snadno zapojit do paralelních klastrů, a tak systém přesně dimenzovat podle potřeby zákazníka. Zdroj [59] uvádí, že baterie je možné

škálovat po 10 kWh a že jsou po celou dobu své provozní životnosti schopny provést vybití s 100% DOD – tedy opakovaně využít celé své kapacity. ZBM2 je možné ponechat v jakémkoli stavu nabití od 0 % do 100 % déle než 10 let bez snížení kapacity. Další výhodou je rychlý náběh během 30 s. Baterie bez aktivního chlazení pracuje bezchybně i při provozu za vysokých teplot až 50 °C. Výkon, bezpečnost a provozní životnost není za tohoto stavu nijak ovlivněna. Roztok bromidu zinečnatého je ve své podstatě nehořlavý a u ZBM2 nehrozí nebezpečí termálního úniku. Jednotlivé komponenty baterie jsou na konci své životnosti snadno recyklovatelné, případně opět použitelné, stejně jako tomu je u elektrolytu bromidu zinečnatého, který je vyčištěn a umístěn do nových zařízení. Společnost Redflow sustainable energy storage ke svému produktu dodává vzdálený monitorovací systém správy baterií BMS, který umožňuje zaznamenávat údaje o výkonu v reálném čase 24 h denně. Vše je možné kontrolovat z osobního počítače nebo telefonu připojenému k internetu. Odstavec byl zpracován s využitím zdrojů [59, 64]. Jednotlivé parametry ZBM2 jsou uvedeny v následující tabulce 5.

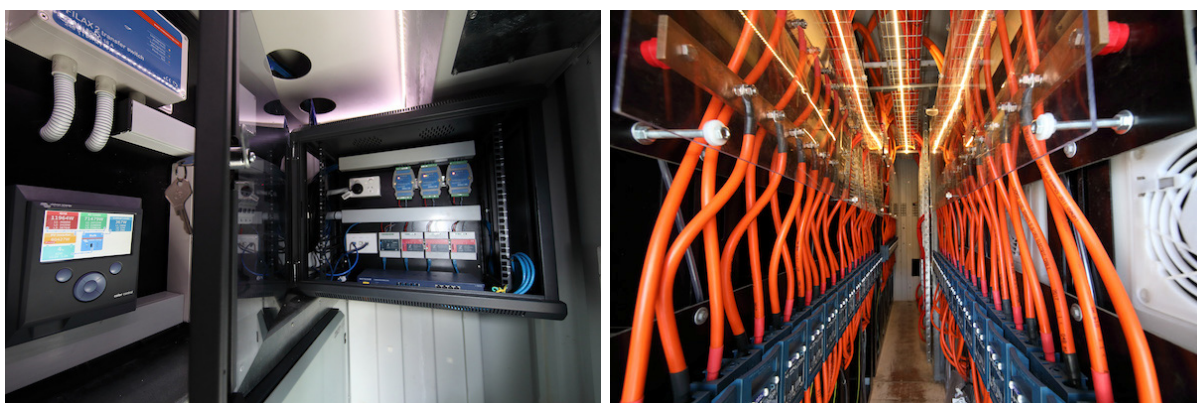
Tab. 5 Parametry zinko-bromové průtokové baterie ZBM2 [59, 65, 66]

nominální napětí (DC)	48 V
minimální pracovní napětí	40 V
maximální pracovní napětí	60 V
kapacita	10 kWh
kapacita při vybití 52,5 V	200 Ah
jmenovitý výkon – nepřetržitý	3 kW
vybíjecí proud – nepřetržitý	75 A (odpojovací bod 40 V)
jmenovitý výkon – špičkový	5 kW
vybíjecí proud – špičkový	125 A po dobu 45 minut při 100% nabití (odpojovací bod 40 V)
minimální pracovní teplota elektrolytu	15 °C
maximální pracovní teplota elektrolytu	50 °C
energetická účinnost DC-DC	80 %
životnost	4000 cyklů s 100% DOD
rozměry (délka, výška, šířka)	845 mm, 823 mm, 400 mm
hmotnost bez elektrolytu	90 kg
hmotnost s elektrolytem	240 kg
objem elektrolytu	100 l
cena (bez invertoru a instalace)	197996 Kč

Jak již bylo zmíněno, baterie ZBM2 lze paralelně spojit do většího celku, a tak zvýšit kapacitu úložiště elektrické energie. Společnost Redflow sustainable energy storage dodává také velká energetická úložiště LSB (Large Scale Battery). Celá platforma LSB je umístěna v 6m přepravním kontejneru, který obsahuje až 45 ZBM2 baterií a až 6 12kW bateriových invertorů (nabíječů) Victron Quattro 48/1500. Tyto systémy lze škálovat až do 450 kWh. V případě potřeby akumulovat ještě více kWh lze paralelně propojit více kontejnerů LSB. Tento typ úložiště je ideální pro použití v kombinaci s obnovitelnými zdroji elektrické energie. Odstavec zpracován s využitím zdroje [67].



Obr. 12 Kontejnerové úložiště LSB [67, 68]



Obr. 13 Interiér kontejnerového úložiště LSB [67, 69, 70]

Redflow sustainable energy storage dodává jako jeden celek 20kWh úložiště společně s 5,2kW solárním systémem. Cena tohoto balíčku včetně instalace je 56000 AU\$, což v přepočtu dle [71], kdy 1 AU\$ = 15,714 Kč, je přibližně 879984 Kč. Samotný solární systém stojí cca 11400 AU\$. Cena pouze za 20kWh úložiště tedy je 44600 AU\$, což v přepočtu, dle již použitého kurzu, vychází na 700844 Kč. Zpracováno z [72].

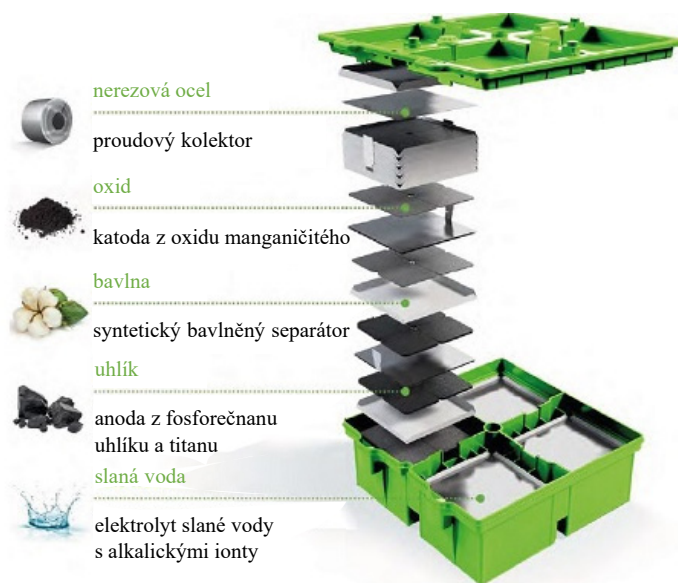
Zdroj [73] uvádí, že průměrná česká 3členná domácnost, která si elektřinou netopí, nenabíjí elektromobil a neohřívá vodu, spotřebuje za rok přibližně 2220 kWh elektrické energie. Průměrná měsíční spotřeba je tedy 183,3 kWh. Při využití, výše zmíněného, plně nabitého 20kWh úložiště je možné zabezpečit akumulaci energie pro spotřebu uvedené domácnosti na necelé 4 dny.

Vzhledem k úplnosti informací a použitelnosti v kombinaci s obnovitelnými zdroji bude tento zástupce ZBM2 zařazen do výběru nejvhodnější baterie v kapitole 1.2 Srovnání jednotlivých elektrochemických akumulátorů.

1.1.3 Slanovodní baterie

Dle [11] je snaha vyvíjet nové alternativní možnosti uskladňování elektrické energie jako například slanovodní baterie. Tento vývoj provádí například německý Technologický institut v Karlsruhe [74]. Jako elektrolyt se používá koncentrovaný solný roztok [75]. Elektrody jsou tvořeny z různých materiálů, jako například polymerů – plastů [76], nebo jak uvádí zdroj [77], jejich slanovodní baterie používají hořčíkovou anodu a vzduch jako katodu.

V rámci rešerše se k této skupině akumulátorů podařilo nalézt společnost Bluesky Energy, která slanovodní baterie již v dnešní době dodává. Jejich řešení je založeno na sodium-ionové vodní technologii. Bluesky Energy uvádí, že jde o nejbezpečnější a nejekologičtější způsob skladování elektrické energie, zvláště vhodný pro dlouhodobé stacionární aplikace pro budovy a off-grid řešení. Slanovodní baterie společnosti Bluesky Energy lze také použít v kombinaci s fotovoltaikou [78]. Poskytují celou řadu výhod. Jsou netoxické, nekorozní, nehořlavé, nevýbušné, snadno recyklovatelné a bezúdržbové. Protože obsahují pH-neutrální elektrolyt jsou bezpečné na dotek, přepravu i skladování. Jeden článek slanovodní baterie od Bluesky Energy se skládá z anody, katody, elektrolytu, separátoru, proudového kolektoru z nerezové oceli a krytu baterie, jak naznačuje obrázek 14 níže. Odstavec zpracován z [79–81].



Obr. 14 Struktura článku slanovodní baterie od Bluesky Energy – upraveno z [80]

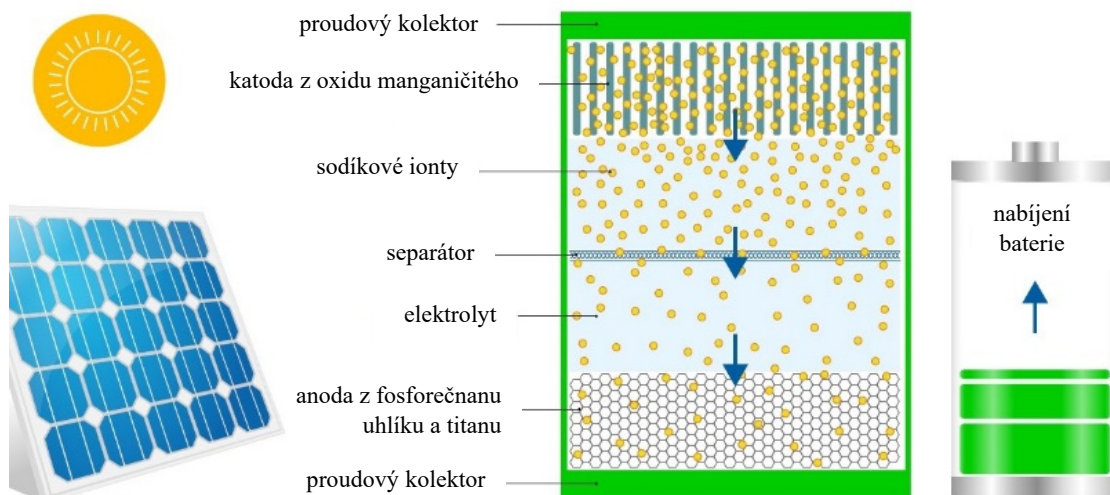
Bluesky Energy nabízí tři základní typy (tzv. jednotlivé „stacks“) slanovodních baterií, a to s napětím 12 V, 24 V nebo 48 V [79, 80]. Ty lze vzájemně spojovat a modulárně tak vytvářet větší akumulární systémy, přesně dle požadavků zákazníka [79, 80]. K bližšímu představení byl vybrán základní typ s napětím 48 V, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6 Parametry 48V slanovodní baterie od Bluesky Energy [79, 80, 82–84]

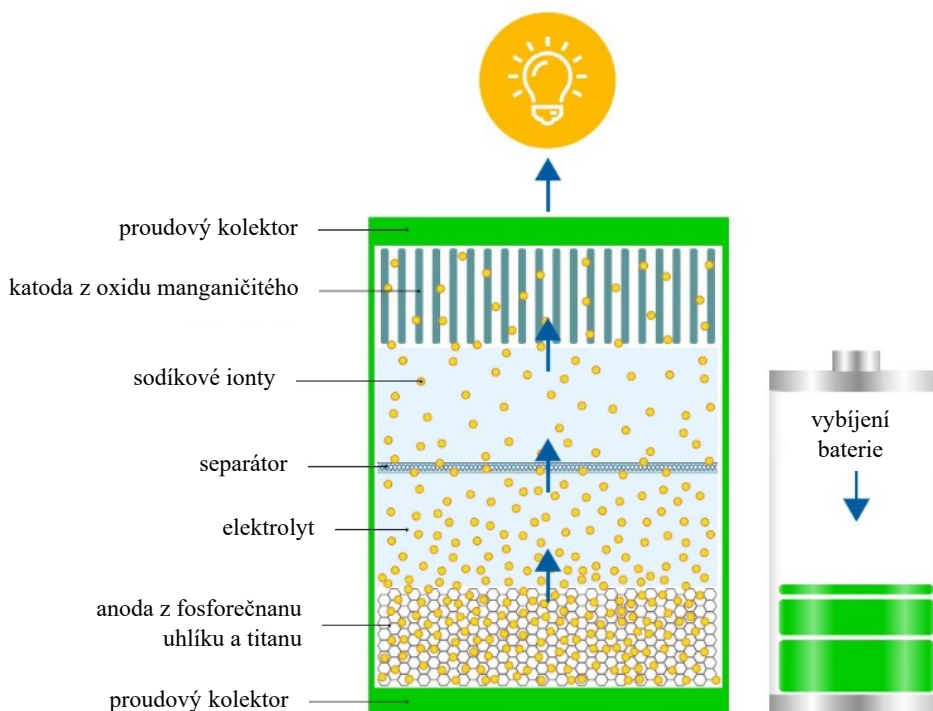
nominální napětí (DC)	48 V
nominální kapacita (nabíjení/vybíjení proudem 4 A)	2,7 kWh
rozsah provozního napětí	35 V až 59 V
nabíjecí proud	konstantní
hloubka vybití – DOD	100 %
účinnost	85,5 %
maximální nabíjecí proud	20 A
maximální vybíjecí proud	20 A
provozní a skladovací teploty	od -5 °C do 50 °C
životnost	5000 cyklů při 80% DOD
rozměry (délka, výška, šířka)	329 mm, 960 mm, 313 mm
hmotnost	140 kg
cena v roce 2017	850–1100 EUR·kWh ⁻¹

Nabíjení a vybíjení

Během nabíjení elektrická energie proudí do slanovodní baterie skrz proudový kolektor a ionty sodíku se pohybují směrem k anodě, kde se usazují v anodové mřížce. Při vybíjení je proces obrácený. Ionty sodíku se pohybují směrem ke katodě a elektrická energie odchází z baterie přes proudový kolektor. Zpracováno s využitím zdroje [81]. Princip nabíjení a vybíjení naznačují následující obrázky 15 a 16.



Obr. 15 Nabíjení článku slanovodní baterie od Bluesky Energy – upraveno z [81]



Obr. 16 Vybíjení článku slanovodní baterie od Bluesky Energy – upraveno z [81]

Následující tabulky 7 a 8 na další stránce uvádí informace, jak se mění kapacita a účinnost 48V slanovodní baterie od společnosti Bluesky Energy při rozdílných nabíjecích a vybíjecích proudech [79, 80].

Tab. 7 Kapacita 48V slanovodní baterie od Bluesky Energy – upraveno z [79, 80]

kapacita [Ah]		nabíjecí proud [A]			kapacita [Wh]		nabíjecí proud [A]		
		5	10	15			5	10	15
vybíjecí proud [A]	5	53,1	42,8	35,8	vybíjecí proud [A]	5	2565	2004	1619
	10	46,7	39,0	32,5		10	2258	1827	1467
	15	42,9	35,8	31,3		15	2071	1676	1414

Tab. 8 Účinnost 48V slanovodní baterie od Bluesky Energy – upraveno z [79, 80]

energetická účinnost [%]		nabíjecí proud [A]		
		5	10	15
vybíjecí proud [A]	5	88,5	87,6	86,2
	10	85,0	84,2	82,0
	15	83,8	82,0	80,0

Bluesky Energy dodává dva větší akumulční systémy na klíč, a to konkrétně GREENROCK Home (škálovatelný od 5 kWh do 30 kWh) a GREENROCK Business, který bude blíže představen. Tento systém je škálovatelný od 30 kWh do 270 kWh. Součástí jsou základní slanovodní baterie, výkonová elektronika, systém řízení energie EMS, kabeláž a pojistky. Zpracováno z [80, 85, 86]. Následující tabulka 9 uvádí parametry takového systému.

Tab. 9 Parametry 30kWh GREENROCK Business úložiště od Bluesky Energy [82, 85]

kapacita	30 kWh
napětí	48 V, třífázové, možnost AC/DC propojení
zpětná účinnost	90 %
hloubka vybití – DOD	100 %
životnost	5000 cyklů při 80% DOD
provozní teploty	od -5 °C až do 50 °C
váha (bateriový modul + „junction box“)	1800 kg + 400 kg
cena v roce 2017	850–1100 EUR·kWh ⁻¹



Obr. 17 Akumulační systém GREENROCK Business od Bluesky Energy [85]

Z dvou popsanych dodávaných produktů společnosti Bluesky Energy byl z důvodu vyšší účinnosti vybrán pro další posouzení v kapitole 1.2 Srovnání jednotlivých elektrochemických akumulátorů zástupce GREENROCK Business.

1.2 Srovnání jednotlivých elektrochemických akumulátorů

V této kapitole bude pro účely návrhu akumulace z obnovitelných zdrojů vybrán nejvhodnější zástupce elektrochemických akumulátorů z již uvedených typů baterií, které nebyly při předchozí rešerši ze zmíněných důvodů vyřazeny. Následující tabulka 10 uvádí jednotlivé srovnávané parametry, které se podařilo dohledat. Všechny ceny baterií byly dle aktuálních kurzů 1 \$ = 23,284 Kč [87] a 1 EUR = 27,011 Kč [88] převedeny na české koruny a následně vztaženy ke kapacitě v kWh. Srovnání je dále provedeno na základě jmenovitého výkonu, kapacity, napětí, životních cyklech nabití/vybití a zpětné účinnosti jednotlivých akumulátorů.

Tab. 10 Srovnání vybraných zástupců elektrochemických akumulátorů

	jmenovitý výkon [kW]	kapacita [kWh]	napětí [V]	životnost [cykly]	účinnost [%]	cena [Kč·kWh ⁻¹]
Winston článek Lithium Yttrium	-	2,102	2,8 až 3,8	2000 až 8000	-	14809
Tesla Powerpack	až 130	232	380 až 480	5000	88	9276
VoltStorage SMART	0,8	6,2	25,2	>10000	84,5	30492
ZBM2	3	10	48	4000	80	19799,6
GREENROCK Business	-	30	48	5000	90	22959

Z tabulky 10 vyplývá, že v rámci provedené rešerše se jako nejperspektivnější elektrochemická baterie, pro realizaci systému akumulace elektrické energie z nestabilních zdrojů, jeví Tesla Powerpack. V kapitole 4 *Návrh akumulace v elektrochemických bateriích* bude provedeno konkrétní řešení systému tohoto zástupce.



Obr. 18 Tesla Powerpack akumulující elektrickou energii z větrných elektráren [89]

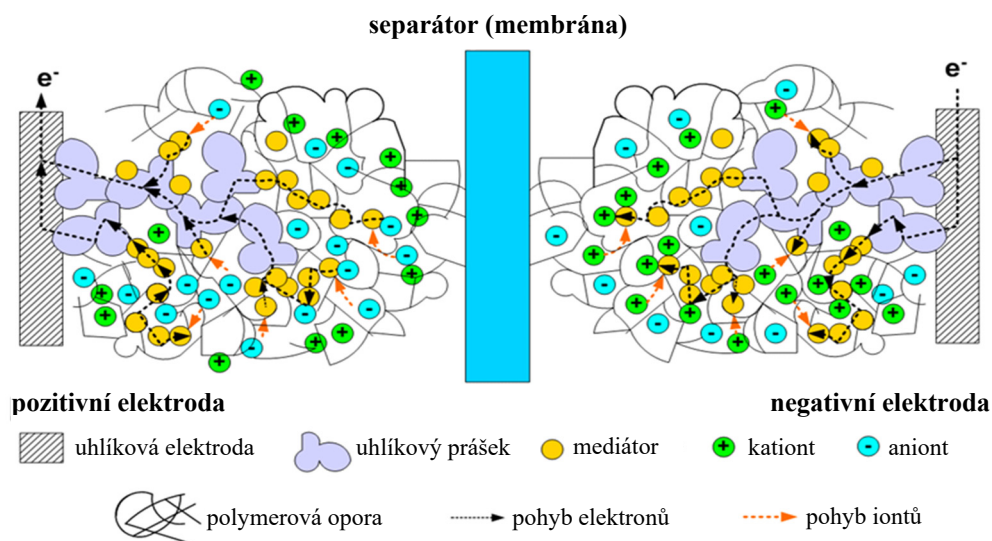
1.3 Superkondenzátory

Pro lepší pochopení pojmu superkondenzátor bude úvod této kapitoly zaměřen také na klasické kondenzátory. Obě tyto elektrotechnické součástky mají společné, že jsou každá tvořena dvěma vodivými deskami (elektrodami). U kondenzátorů jsou elektrody odděleny nevodivým dielektrikem a po přivedení napětí se elektrická energie akumuluje v podobě elektrického náboje, který vznikne orientací elektrických dipólů dielektrika jedním směrem. Kapacita kondenzátoru je přímo úměrná ploše elektrod a kvalitě dielektrika. Superkondenzátory neboli superkapacity mají namísto dielektrika elektrolyt a separátor. Při nabíjení se pohybem kationtů a aniontů v elektrolytu vytváří na obou elektrodách tenká polarizovaná elektrická dvojvrstva, která akumuluje elektrický náboj. Používají se pórovité elektrody s uhlíkovými částicemi, které mají větší plochu, a tak zvyšují kapacitu superkondenzátorů. Zpracováno s využitím zdrojů [90, 91].

1.3.1 Superkapacity s pevným elektrolytem

Společnost FlashCharge Batteries se zabývá superkapacity s pevným elektrolytem (z anglického „Solid-State Supercapacitor“), které fungují jako rychlonabíjecí baterie [92]. Jejich revoluční technologie je založena na zavedení nové komponenty tzv. mediátoru do pevného elektrolytu, díky které dosahují zlepšení všech vlastností stávajících polovodičových superkapacitorů s pevným elektrolytem při zachování jejich výhody rychlého nabíjení [93]. Díky tomu jsou schopny konkurovat Li-ion bateriím [93].

Jeden článek takového superkapacitoru se skládá z následujících vrstev: pozitivní elektroda, pevný elektrolyt, membrána, opět pevný elektrolyt a negativní elektroda. Za účelem vytvoření co největší kontaktní plochy s elektrolytem jsou elektrody vyrobeny z materiálu s vysokou pórovitostí. Elektrolyt je prolut pevným rozpouštědlem a solí schopnou disociace na elektricky nabitě atomy nebo molekuly (ionty/kationty). Také obsahuje černý uhlíkový prášek a již zmíněný mediátor, který se účastní redoxní reakce a usnadňuje přenos elektronů za účelem vytvoření více elektricky nabitých prvků v elektrolytu. Uhlíkový černý prášek chemicky nereaguje s ostatními látkami, ale působí jako prodloužení elektrody a zvětšení její kontaktní plochy. Všechny tyto komponenty jsou uzavřeny v chemicky a elektricky neutrální obálce a elektrody jsou spojeny tak, aby vytvořily baterii. Následující obrázek 19 naznačuje stavbu a schéma fungování superkapacitoru od FlashCharge Batteries. Zpracováno z [93].



Obr. 19 Schéma superkapacitoru od FlashCharge Batteries – upraveno z [92]

Při nabíjení superkapacitoru se na jednu elektrodu (anodu) okamžitě nanese záporný náboj a na druhou elektrodu (katodu) kladný náboj. Černý uhlíkový prášek v elektrolytu je nabitý stejnou polaritou jako daná elektroda. Během nabíjení mediátor v elektrolytu přijímá elektrony z anody, a tak vytváří místa se záporným nábojem. Díky principu fungování mediátoru a černého uhlíkového prášku je superkapacitor schopen uložit podstatně více nábojů. Jakmile je superkapacitor odpojen od nabíjecího zdroje, membrána nepustí elektrony z anody ke katodě, aby ji neutralizovaly. Jelikož se náboj akumuluje dvěma reverzibilními reakcemi s prakticky žádnou pamětí, lze proces nabíjení/vybíjení opakovat řádově 10000krát bez snížení schopnosti superkondenzátoru ukládat energii. Zpracováno z [93].

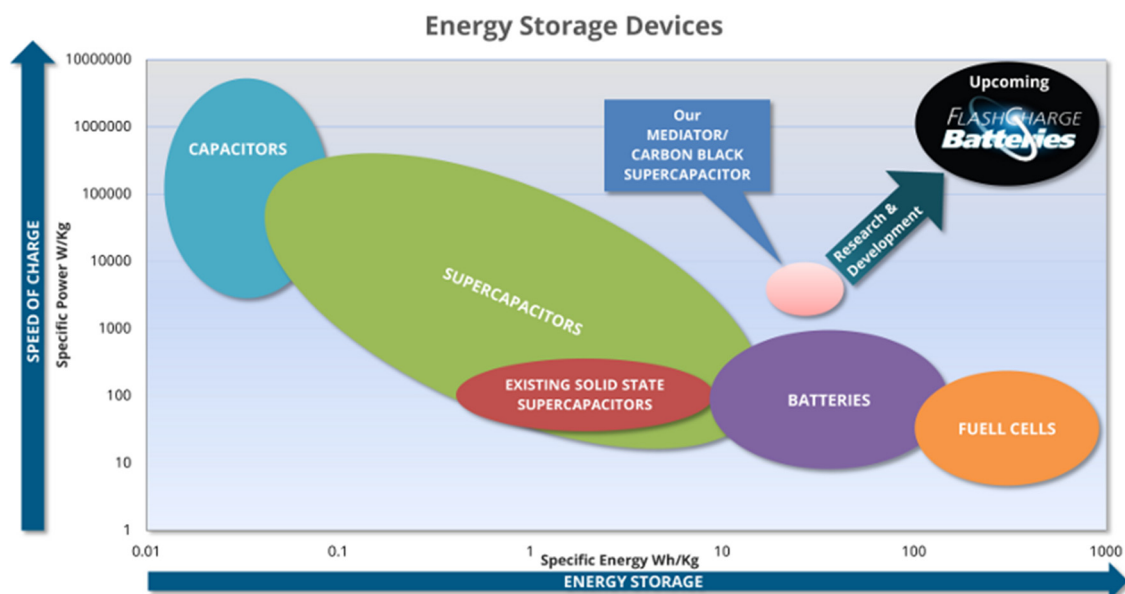
Zdroj [93] uvádí, že cílem současného výzkumu a vývoje FlashCharge Batteries je navrhnout článek, který přesáhne kapacitu lithium-iontových akumulátorů. Společnost předpokládá, že nové materiály a konstrukční řešení poskytnou lepší výsledky ukládání elektrického náboje vztaženého na jednotku objemu a přinesou možnost zvětšit kontaktní povrch mezi jednotlivými vrstvami článku [93]. Očekává se zdvojnásobení měrné energie a hustoty energie výše zmíněného mediátoru a černého uhlíkového prášku [93]. V konečném důsledku by tato zlepšení měla umožnit ukládání většího množství elektrické energie a mnohem rychlejší nabíjecí čas [93]. Následující tabulka 11 uvádí předpokládané parametry superkapacitoru od FlashCharge Batteries a porovnává je s ostatními dostupnými možnostmi akumulace elektrické energie.

Tab. 11 Srovnání superkapacitorů od FlashCharge Batteries a jiných typů akumulace [92]

	Li-ion baterie	kapalný superkapacitor	konvenční pevný superkapacitor	nynější FlashCharge Batteries	budoucí FlashCharge Batteries
specifická energie [Wh·kg ⁻¹]	200	30	5	30	500
energetická hustota [Wh·l ⁻¹]	230	40	10	60	950
specifický výkon [kW·kg ⁻¹]	0,2	2	0,25	4	8
hustota výkonu [kW·l ⁻¹]	0,3	3	0,5	8	16
životnost [cykly]	~1000	>50000	>50000	>50000	>50000
provozní teploty [°C]	0 až 50	-30 až 80	-30 až 80	-30 až 80	-30 až 80
rychlost nabíjení	-	rychlejší než Li-ion bat.	rychlejší než Li-ion bat.	20x rychlejší než Li-ion bat.	40x rychlejší než Li-ion bat.
bezpečnost	hořlavé, toxické	hořlavé, korozivní, toxické	bezpečné	bezpečné	bezpečné
flexibilita	minimální	minimální	vysoká	vysoká	vysoká

Zdroj [94] uvádí, že superkapacitory od FlashCharge Batteries bude možné použít ve veřejných elektrických dopravních prostředcích, vojenských aplikacích nebo vesmírných letech. Dále by měly sloužit k akumulaci elektrické energie v elektrické síti a z obnovitelných zdrojů, jako například fotovoltaiky a větrných turbín [94].

Prozatímním cílem společnosti FlashCharge Batteries bylo dokončit výzkum výše zmíněných nových technologií do 3. čtvrtletí roku 2018 a mít funkční prototyp [92]. Bohužel se, i po rozsáhlé rešerši s použitím různých vyhledávacích prostředků v kombinaci s různými klíčovými slovy, nepodařilo najít zmínku o již vytvořeném prototypu. Vývoj tedy zřejmě stále pokračuje a jeho trend naznačuje následující obrázek 20.



Vysvětlivky: *Energy Storage Devices* = zařízení pro skladování energie; *SPEED OF CHARGE* = rychlost nabíjení; *Specific Power* [$W \cdot kg^{-1}$] = specifický měrný výkon [$W \cdot kg^{-1}$]; *ENERGY STORAGE* = energetické úložiště; *Specific Energy* [$Wh \cdot kg^{-1}$] = specifická měrná energie [$Wh \cdot kg^{-1}$]; *CAPACITORS* = kapacitory; *SUPERCAPACITORS* = superkapacitory; *EXISTING SOLID STATE SUPERCAPACITORS* = existující superkapacitory s pevným elektrolytem; *BATTERIES* = baterie; *FUELL CELLS* = palivové články; *Our MEDIATOR/CARBON BLACK SUPERCAPACITOR* = náš mediátor/uhlikový černý superkapacitor; *Research & Development* = výzkum & vývoj; *Upcoming FlashCharge Batteries* = nadcházející FlashCharge Batteries

Obr. 20 Schéma směru vývoje superkapacitorů od FlashCharge Batteries [93]

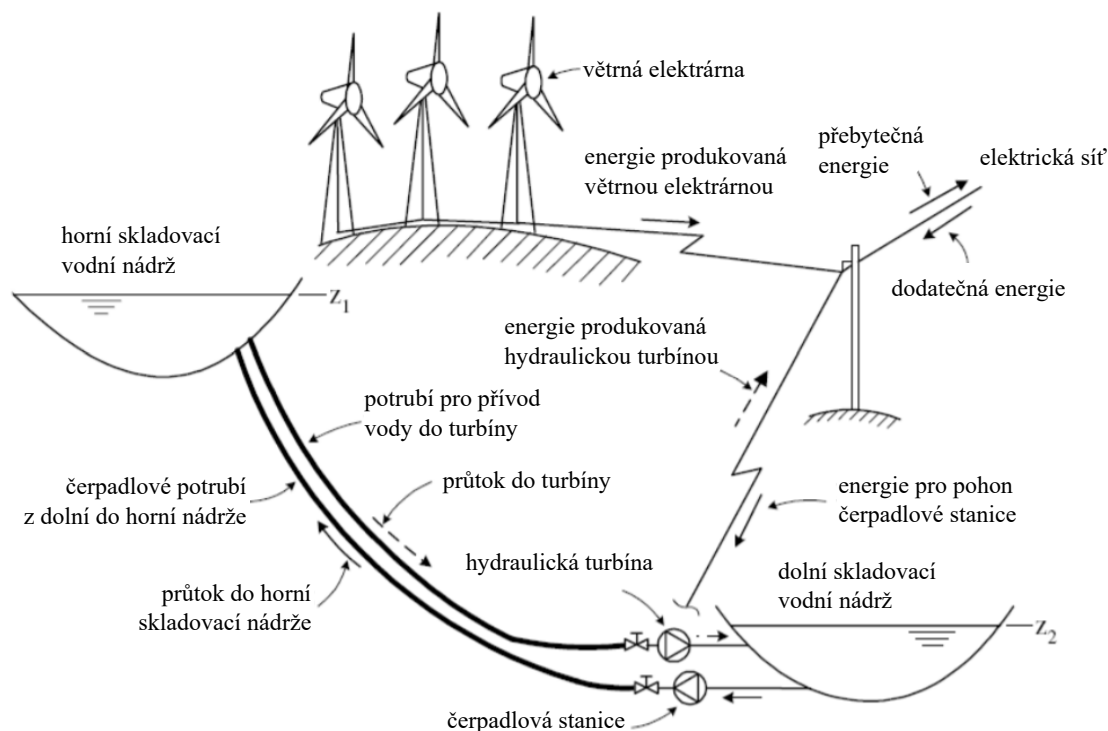
1.4 Mechanické ukládání energie

Další možností uchovávání elektrické energie je její přeměna na mechanickou energii – tedy potenciální nebo kinetickou. Těmto způsobům akumulace se budou věnovat následující kapitoly.

1.4.1 Přecherňovací vodní elektrárny

Přecherňovací vodní elektrárny umožňují krátkodobé i dlouhodobé ukládání elektrické energie a jsou nedílnou součástí elektrizační soustavy České republiky. Základ celého akumulárního systému tvoří dvě vodní nádrže ve vzájemně rozdílných výškových hladinách. Jsou propojeny potrubím vedeným přes výkonné reverzní vodní turbíny, které jsou připojeny

k motorgenerátoru. Případně je také možné zapojení, kdy namísto reverzních turbín jsou použity vodní turbíny a čerpadla. Princip provozu přečerpávací vodní elektrárny spočívá v tom, že v době přebytku elektrické energie v elektrizační soustavě probíhá pumpování vody ze spodní nádrže do nádrže horní, čímž získává kapalina větší potenciální energii. Při požadavku elektrickou energii opět dodávat se voda vypouští z horní nádrže do dolní a díky gravitaci dochází k přeměně potenciální energie na kinetickou. Spád vody je hnán potrubím na turbíny, které se roztáčí a pohání motorgenerátor vyrábějící elektrickou energii. Odstavec byl zpracován s využitím vlastních znalostí a zdroje [95].



Obr. 21 Schéma fungování přečerpávací vodní elektrárny [133]

Dle [95] je celková účinnost tohoto způsobu akumulace elektrické energie cca 75 %. Podle Mezinárodní agentury pro obnovitelnou energii (IRENA) se průměrné investiční náklady u větších přečerpávacích vodních elektráren pohybují od $1050 \$\cdot\text{kW}^{-1}$ do $7650 \$\cdot\text{kW}^{-1}$ [96]. Celkové náklady na výrobu elektrické energie potom jsou mezi $40 \$\cdot\text{MWh}^{-1}$ až $110 \$\cdot\text{MWh}^{-1}$ (běžně $75 \$\cdot\text{MWh}^{-1}$) [96]. Značnou nevýhodou těchto metod akumulace elektrické energie je vysoká cenová náročnost výstavby celého systému a nutnost specifických topografických podmínek. Přesto po dlouhou dobu byly a jsou přečerpávací vodní elektrárny hojně využívány, neboť nebyl nalezen lepší způsob velkokapacitní akumulace elektrické energie. Situaci by však mohla změnit nová technologie, kterou se bude zabývat následující kapitola.

1.4.2 Gravitační technologie akumulace – jeřáb a bloky (cihly)

Společnost Energy Vault vytvořila mechanický akumulátor elektrické energie využívající gravitaci, kinetickou a potenciální energii pro bezpečné a spolehlivé ukládání elektrické energie. Řešení je připraveno k nasazení v kombinaci s nízkonákladovou výrobou ze solárních a větrných elektráren. Tato průmyslová technologie pracuje na podobném principu jako přečerpávací vodní elektrárny, které využívají gravitaci a pohyb vody. Energy Vault

nahradila vodu válcovými bloky tzv. kompozitními cihlami vyrobenými z nízkonákladových materiálů, jako například z recyklovatelných odpadů. Zdroje [97, 98] uvádí, že tento patentovaný systém design a chytrý řídicí software švýcarské společnosti Energy Vault poskytuje všechny výhody přečerpávacích vodních elektráren a to za mnohem nižší cenu, s vyšší účinností a bez nutnosti specifických topografických podmínek. Ve srovnání s existujícími řešeními pro stacionární ukládání energie, zejména s chemickými bateriemi, poskytuje Energy Vault udržitelnou alternativu, která s časem nijak nedegraduje a po celou dobu životnosti má kompetitivní výkon se zpětnou účinností spouštění kompozitních cihel 80–90 % a to při srovnatelné ceně za kWh. Odstavec zpracován s využitím zdrojů [97, 98].

Princip fungování akumulčního systému od Energy Vault spočívá v tom, že jeřáb s 6 rameny postupně zvedá kompozitní cihly a skládá je na sebe tak, aby vytvořily „věž“. Elektrická energie je uložena jako potenciální polohová energie cihel. Ty jsou v době zpětné výroby spouštěny dolů. Dochází k přeměně uložené potenciální energie na kinetickou energii cihly a ta je přeměněna pomocí generátoru zpět na elektřinu. Speciálně navržený ovládací software zajišťuje, že cihly jsou vždy umístěny na správné místo. Jde o modulární a flexibilní akumulční systém s kapacitou 20, 35 nebo 80 MWh úložné kapacity poskytující 4–8 MW nepřetržitého výkonu po dobu 8–16 h. Způsob akumulace společnosti Energy Vault je ideální pro dlouhodobé skladování, ale lze jej také využít pro krátkodobé až střednědobé doplňkové služby. Zpracováno z [97, 99].



Obr. 22 Postupné vybíjení gravitačního úložiště od Energy Vault [100]

Výhody [97]:

- jednoduchá a bezpečná konstrukce
- 50% nižší cena za kWh
- 100% automatizovaný provoz s minimálními provozními náklady
- akumulace s nulovou degradací výkonu a životností 30+ let
- snadná instalace základové plochy
- samostavěcí jeřáb (z anglického „self-constructing crane“)
- kompozitní cihly je možné vyrábět přímo na místě akumulace z odpadních materiálů
- dnes již dostupná technologie

Zdroj [101] uvádí, že technologie společnosti Energy Vault pracuje velmi rychle. Disponuje milisekundovou odezvou a za 1 s dodává 1,3 MW výkonu [101]. Během 2,9 s poskytuje výkon 4 MW při téměř lineárním dodacím profilu [101].

Standardní akumulací systém od Energy Vault o výkonu 35 MWh je relativně velký [101]. Kombinuje věž o výšce 150–160 m s 6000–7000 kompozitními cihlami, z nichž každá váží 35 t [101]. Plocha potřebná pro toto úložiště je kruh o průměru zhruba 100 m [102].



Obr. 23 Gravitační technologie akumulace od Energy Vault na pobřeží [98]

V kombinaci s nízkonákladovou větrnou nebo solární energií dosahuje úložiště od Energy Vault bezprecedentních rovnoměrných nákladů na dodanou energii (LCOED) (z anglického „Levelized Cost of Energy Delivered“) pod $0,06 \$\cdot\text{kWh}^{-1}$ na základě poskytování stálého skladování energie s 100% DOD. Tato technologie nijak s časem neztrácí svoji kapacitu, jelikož jde principiálně pouze o umístování bloků do vyšších pozic a jejich následné spouštění doprovázené výrobou elektrické energie. Odstavec zpracován s využitím [97].

Dle zdroje [103] stavba gravitačního úložiště od Energy Vault stojí cca 7 až 8 milionů amerických dolarů. Rovnoměrné náklady na skladování (LCOS) (z anglického „Levelized Cost of Storage“) uváděné v $\text{\$}\cdot\text{kWh}^{-1}$, které zahrnují počáteční investiční náklady, ale také náklady na provoz, údržbu a výměnu, jsou pro přečerpávací vodní elektrárnu $0,17 \$\cdot\text{kWh}^{-1}$. V případě řešení akumulacího systému od Energy Vault se LCOS pohybují pod $0,05 \$\cdot\text{kWh}^{-1}$ a jsou přibližně o 50 % levnější než technologie ukládání elektrické energie v bateriích, zejména v lithium-iontových, které mohou mít rovnoměrné náklady na skladování přibližně $0,25 \$\cdot\text{kWh}^{-1}$ až $0,35 \$\cdot\text{kWh}^{-1}$. Tento fakt je částečně způsoben mnohem vyšší cenou stavebních materiálů Li-ion baterií oproti ceně materiálu pro cihly akumulacího systému společnosti Energy Vault. Zpracováno s využitím zdroje [103].



Obr. 24 Gravitační technologie akumulace od Energy Vault ve vnitrozemí [99]

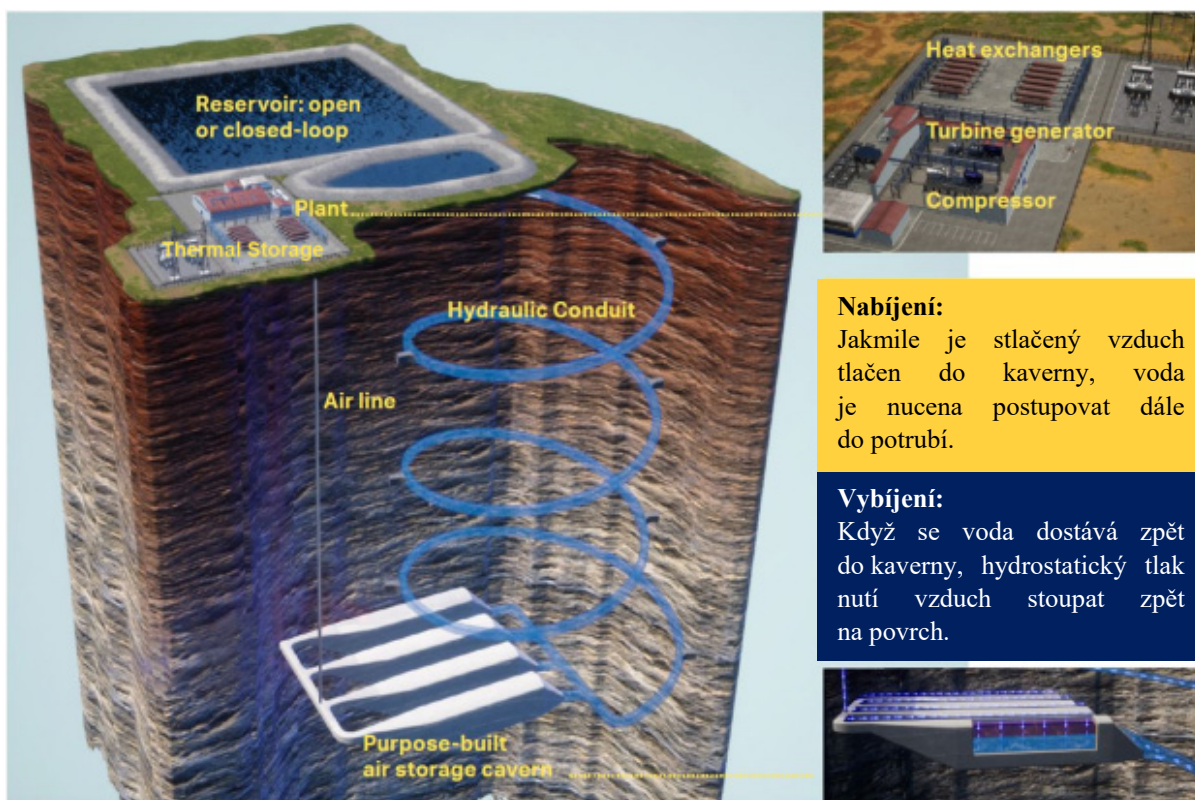
Dle [104] vložil japonský investiční fond SoftBank VisionFund finanční prostředky v hodnotě 110 milionů amerických dolarů do švýcarské společnosti Energy Vault, která nyní plánuje vybudovat prototyp gravitačního úložiště blízko Milána s kapacitou 35 MWh. Bohužel však i po rozsáhlé rešerši s použitím různých klíčových slov a vyhledávačů nebyla nalezena zmínka o již postaveném úložišti. Práce tedy zřejmě stále ještě pokračují.

1.5 Pokročilá úložiště energie ve stlačeném vzduchu

(z anglického „Advanced Compressed Air Energy Storage“ = A-CAES)

Další možností uchování elektrické energie generované z obnovitelných zdrojů, jako větrných a solárních elektráren, je její akumulace ve stlačeném vzduchu, čehož využívá například společnost Hydrostor, která takové systémy A-CAES dodává [105, 106]. Přebytek vyrobené elektrické energie pohání kompresory, které stlačují vzduch z okolí a uloží ho 600 m hluboko pod povrch do podzemní jeskyně tzv. kaverny. Teplo vzniklé při kompresi plynu je ukládáno do izolovaných nádrží s horkou vodou. Jakmile je potřeba elektrickou energii získat zpět, proces se obrátí. Uvolní se stlačený vzduch, který se ohřeje teplem ze zásobníků s horkou vodou a odchází do plynové turbíny, která je propojena s generátorem vyrábějícím elektrickou energii. Ke zvýšení celkové účinnosti systému je podzemní jeskyně naplněna vodou a propojena potrubím s povrchovou nádrží. Jakmile stlačený vzduch plní jeskyni, tlačí zároveň vodu v potrubí směrem k povrchu. Při výrobě elektrické energie je daný proces obrácený. Voda naopak tlačí vzduch směrem na povrch k turbíně. Tento vyvažovací úkon navíc zajišťuje, že stlačený vzduch zůstává vždy pod stejným tlakem. Kompresory vykonávají při stlačování vždy stejnou práci a mohou být přesně dimenzovány tak, aby byly energeticky co nejúčinnější. Odstavec zpracován z [106, 107].

Následující obrázek 25, na další stránce, naznačuje schéma výše popsaného pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu od společnosti Hydrostor.



Vysvětlivky: Reservoir: open or closed-loop = vodní nádrž: otevřená nebo uzavřená smyčka; Plant = elektrárna; Thermal Storage = termální úložiště; Hydraulic Conduit = hydraulické potrubí; Air line = vzduchové potrubí; Purpose-built air storage cavern = účelově postavená kaverna ke skladování stlačeného vzduchu; Heat exchangers = tepelné výměníky; Turbine generator = turbogenerátor; Compressor = kompresor

Obr. 25 Schéma A-CAES od Hydrostor – upraveno z [107]

Zdroj [107] uvádí, že účinnost řešení společnosti Hydrostor je 60 %, což je horší v porovnání s Li-ion bateriemi, které mají účinnost 90 %, avšak lepší než jiné systémy skladování energie ve stlačeném vzduchu, jejichž účinnost se blíží 40 %.

Náklady na výstavbu pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu jsou přibližně stejné jako náklady na elektrárnu na zemní plyn [107]. A-CAES o výkonu 250 MW se skladovací kapacitou 2000 MWh (tzn. poskytující zálohu elektřiny na 8 h) stojí přibližně 440 milionů amerických dolarů, což je v přepočtu $220 \$\cdot\text{kWh}^{-1}$ [107]. Výhodou přístupu společnosti Hydrostor je velmi levné navýšení skladovací kapacity A-CAES, které spočívá v dodatečném zvětšení podzemní kaverny [107]. Například akumulací systém o výkonu 500 MW se skladovací kapacitou 6000 MWh, poskytující zálohu elektřiny na 12 h, bude stát méně než $100 \$\cdot\text{kWh}^{-1}$ [107]. Taková částka je schopna konkurovat i lithium-iontovým bateriím, jejichž cena se pohybuje přibližně mezi 200–400 $\text{\$}\cdot\text{kWh}^{-1}$ [107].

Životnost A-CAES od Hydrostor je 50+ let s téměř neomezeným počtem cyklů a bez nutnosti provádět výměny [108]. Systém nepoužívá toxické materiály ani nezpůsobuje termální dopady na životní prostředí [108].

Tabulka 12, na následující stránce, porovnává dosahované výsledky A-CAES od společnosti Hydrostor s jinými možnostmi skladování elektrické energie.

Tab. 12 Srovnání A-CAES od Hydrostor s dalšími způsoby akumulace – upraveno z [109]

	A-CAES od Hydrostor	tradiční CAES	přečerpávací vodní elektrárny	Li-ion baterie	průtočné baterie
výkon [MW]	50 až 500+	150 až 500+	>100	1 až 100	1 až 20
výdrž [h]	>6	>6	>6	1 až 4	4 až 6
zpětná účinnost [%]	>60	30 až 40	70 až 85	85	70
emise	žádné	emituje	žádné	žádné	žádné
živostnost [cykly]	>20000	>20000	>20000	5000	10000
CAPEX [\$·kW ⁻¹]	1500 až 3000	1500 až 2500+	>2500	3000+	5000
CAPEX [\$·kWh ⁻¹]	150 až 300*	150 až 250+	>250	300+**	500
operativní náklady	nízké až střední	vysoké (palivo)	nízké až střední	střední	nízké až střední
flexibilita umístění	střední až vysoká	nízká (emise)	nízká (topografie)	vysoká	vysoká

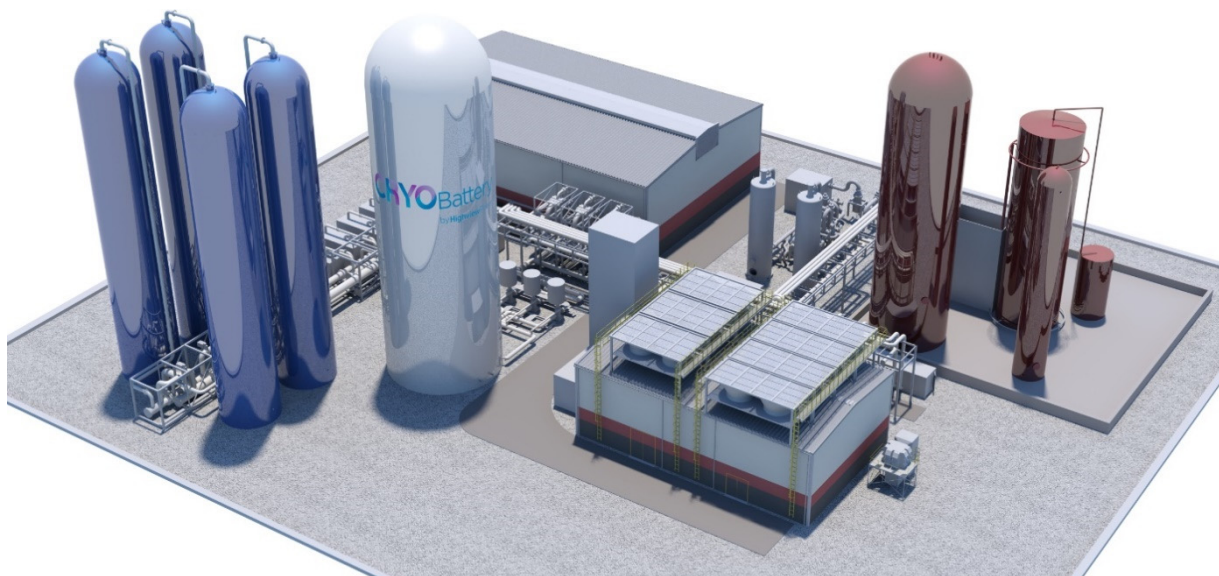
Poznámka: * Předpoklad 10h vybíjení úložiště + kompletně dodaný systém s BOP („Balance of plant“ = veškeré zařízení elektrárny). Další možné snížení nákladů při využití stávající infrastruktury.; ** Cena Li-ion baterií založená na Lazard LCOS v4.0, upravené pro 10h vybíjení pomocí CPUC („California Public Utilities Commission“ = Komise pro veřejné služby v Kalifornii) metodiky pro znázornění ekvivalence s 10h A-CAES.

1.6 Úložiště energie ve zkapalněném vzduchu

(z anglického „Liquid Air Energy Storage“ = LAES)

Společnost Highview Power představila projekt CRYOBattery. Jde o akumulační elektrárny s životností více než 30 let, které využívají zkapalněný vzduch ke spolehlivému skladování elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Systémy CRYOBattery produkují nulové emise a jsou vyráběny pro výkony od 10 MW (40 MWh) do více než 200 MW (2 GWh). Mohou tedy napájet až 200000 domácností po celý den. Zpracováno z [110–112].

První ze tří hlavních částí akumulační elektrárny CRYOBattery je tzv. nabíjecí zařízení (z anglického „Charging device“), které využívá elektrickou energii vyrobenou mimo spotřební špičku nebo její přebytek k pohonu industriálního zkapalňovače. Na začátku procesu se nasává vzduch, který je postupně zbaven nečistot, vysušen, stlačen kompresory a ochlazen na -196 °C. Při takto nízkých teplotách dochází ke zkapalnění vzduchu, který je poté uskladněn pod nízkým tlakem v druhé hlavní části systému – v izolovaných nádobách. V době potřeby opět dodávat elektrickou energii je zkapalněný vzduch čerpán ze zásobníků a ohříván, což způsobí rychlé zplyňování spojené s 700násobným zvětšením jeho objemu. V třetí hlavní části – jednotce pro znovuzískávání elektrické energie opět plynný vzduch pohání expanzní turbogenerátor a vyrábí se elektrická energie. Celková účinnost systému je zvýšena připojením termálního zásobníku a chladicího zásobníku. Termální zásobník zachycuje teplo z komprese a skladuje ho pro opětovné využití při expanzi. Chladicí zásobník naopak odebírá chlad zkapalněnému vzduchu při vypařování a skladuje ho pro ochlazení vzduchu při zkapalňování. Odstavec zpracován s využitím zdrojů [113, 114].



Obr. 26 Akumulační elektrárna CRYOBattery od Highview Power [115]

Účinnost CRYOBattery je 60 % [111]. Tento systém lze připojit k zařízení na výrobu tepla, ocelárnám, případně i LNG terminálům (tzn. zplyňovacím zařízením [116]) a využívat průmyslové odpadní teplo a chlad [111, 112]. Tímto způsobem lze zvýšit účinnost cca na 70 % [111, 112].

Výhodou technologie společnosti Highview Power, oproti akumulaci ve stlačeném vzduchu pracující na podobném principu, je, že nevyžaduje specifické geologické podmínky s podzemními kavernami a může být postavena prakticky kdekoli [117]. Další předností těchto systémů je vysoká energetická hustota v porovnání s jinými možnostmi akumulace a malá plocha zastavěná elektrárnou [113].

Následující obrázky 27 a 28 uvádí srovnání technologie společnosti Highview Power využívající zkapalněný vzduch s ostatními možnostmi akumulace elektrické energie [114].

	účinnost [%]	životnost [roky]	škálovatelnost [MW] +4 h	udržitelnost systému
CRYOBattery	60-75	30-40	●	●
průtokové baterie	60-75	20	◐	◐
Li-ion baterie	75-85	<10	◐	◐
CAES	N/A	40	●	◐
přečerpávací vodní elektrárny	80	50	●	◐

Obr. 27 Srovnání CRYOBattery s jinými způsoby akumulace část 1. – upraveno z [114]

	flexibilita umístění	reakční doba	možnost rozšíření syst.	black start systému
CRYOBattery				
průtokové baterie				
Li-ion baterie				
CAES				
přečerpávací vodní elektrárny				

Obr. 28 Srovnání CRYOBattery s jinými způsoby akumulace část 2. – upraveno z [114]

Zdroj [115] uvádí, že CRYOBattery o výkonu 200 MW (2 GWh) umožňuje akumulovat energii po dobu týdnů za cenu přibližně $110 \text{ £} \cdot \text{MWh}^{-1}$ za každých 10 h. Jiný zdroj [118] uvádí rovnoměrné náklady na skladování (LCOS) $140 \text{ \$} \cdot \text{MWh}^{-1}$ za 10 h akumulace pro tentýž systém o výkonu 200 MW (2 GWh).

Plocha zastavěná akumulací elektrárnou od společnosti Highview Power o výkonu 20 MW je uváděna 0,5 akru, což je přibližně 2023 m^2 [119, 120]. V případě tohoto systému uložení energie ve zkapalněném vzduchu o výkonu 200 MW je zastavěná plocha 4 akry, což po přepočtu vychází přibližně 16187 m^2 [119, 120].



Obr. 29 5MW úložiště energie od Highview Power instalované u Manchesteru [121]

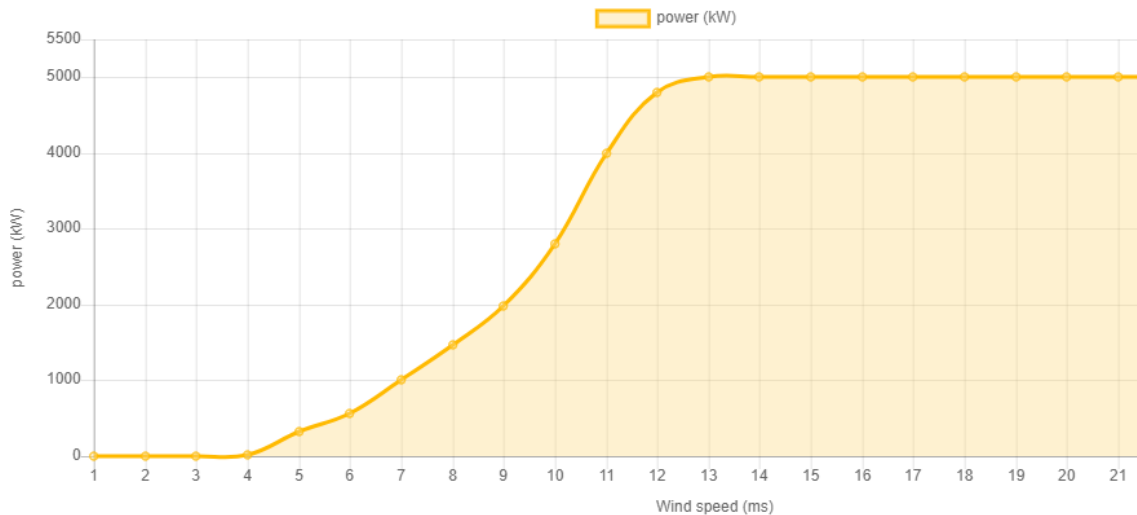
2 Specifikace nestabilního zdroje elektrické energie

Pro posouzení možností akumulace elektrické energie z nestabilních zdrojů byla zvolena větrná elektrárna. Konkrétně byl vybrán typ Multibrid M5000 o jmenovitém výkonu 5 MW [122]. Bližší parametry této elektrárny jsou uvedeny v následující tabulce 13.

Tab. 13 Parametry větrné elektrárny Multibrid M5000 [122, 123]

jmenovitý výkon	5 MW
roztáčecí („cut-in“) rychlost větru	3,5 m·s ⁻¹
jmenovitá rychlost větru	12 m·s ⁻¹
zastavovací („cut-out“) rychlost větru	25 m·s ⁻¹
průměr rotoru	116 m
plocha vytvořená rotací rotoru	10568 m ²
počet lopatek	3
váha jedné lopatky	16,5 t
maximální rychlost rotoru	14,8 ot·min ⁻¹
špičková rychlost lopatek	90 m·s ⁻¹
materiál rotoru	GFK/CfK
váha rotoru	110 t
výrobce rotoru	Euros
hustota výkonu (z anglického „power density“)	473,1 W·m ⁻² (2,1 m ² ·kW ⁻¹)
převodovka	planetární
stupně převodovky	2
převodový poměr	1:10
výrobce převodovky	Renk
generátor	synchronní, permanentní
maximální otáčky generátoru	147 ot·min ⁻¹
napětí	3 kV
zapojení do sítě	IGBT
frekvence sítě	50 Hz
výrobce generátoru	Alstom
výška rozbočovače (z anglického „hub“)	90/102 m
váha rozbočovače	60 t
typ věže větrné elektrárny	ocelová trubka, lakovaná
tvar věže větrné elektrárny	kónický
váha věže (maximální)	825 t
výrobce věže větrné elektrárny	SSC
váha gondoly	200 t
celková váha větrné elektrárny	1135 t
použití pro aplikace na pobřeží	ano
použití pro aplikace na pevnině	ano
cena	cca 500 milionů EUR

Na obrázku 30, na následující stránce, je zobrazen průběh závislosti dodávaného výkonu jedné větrné elektrárny Multibrid M5000 na rychlosti větru.



Vysvětlivky: $power [kW] = \text{výkon} [kW]$; $wind\ speed [m \cdot s^{-1}] = \text{rychlost větru} [m \cdot s^{-1}]$

Obr. 30 Závislost výkonu větrné elektrárny Multibrid M5000 na rychlosti větru [122]

Jednotlivé návrhy systémů akumulace elektrické energie ve stlačeném vzduchu a v elektrochemických akumulátorech budou realizovány pro větrný park tři výše popsaných elektráren Multibrid 5000 o celkovém instalovaném jmenovitém výkonu $P_{v\dot{e}tr_el} = 15\ MW$. Pro výpočty je zaveden předpoklad, že kvůli nutným servisním odstávkám a případným opravám větrného parku bude jeho provoz omezen pouze na 340 dní v roce. Vzhledem k zohlednění proměnlivých povětrnostních podmínek během tohoto časového období, bude v této práci předpokládáno, že roční průměrná rychlost větru ve výšce 100 m nad povrchem země je $11\ m \cdot s^{-1}$, a tudíž pro možnosti akumulace bude ve skutečnosti dostupný pouze 80% dodávaný jmenovitý výkon $P_{v\dot{e}tr_el_skut} = P_{v\dot{e}tr_el} \cdot 0,8 = 15 \cdot 0,8 = 12\ MW$ vycházející z obrázku 30. Pro jednotlivé výpočty je také dále uvažováno, že větrné elektrárny pracují nepřetržitě po dobu 8 h denně a pomocí generátoru větrného parku dodávají elektrickou energii $E_{el_skut_den} = P_{v\dot{e}tr_el_skut} \cdot 8 = 12 \cdot 8 = 96\ MWh$ každý den.



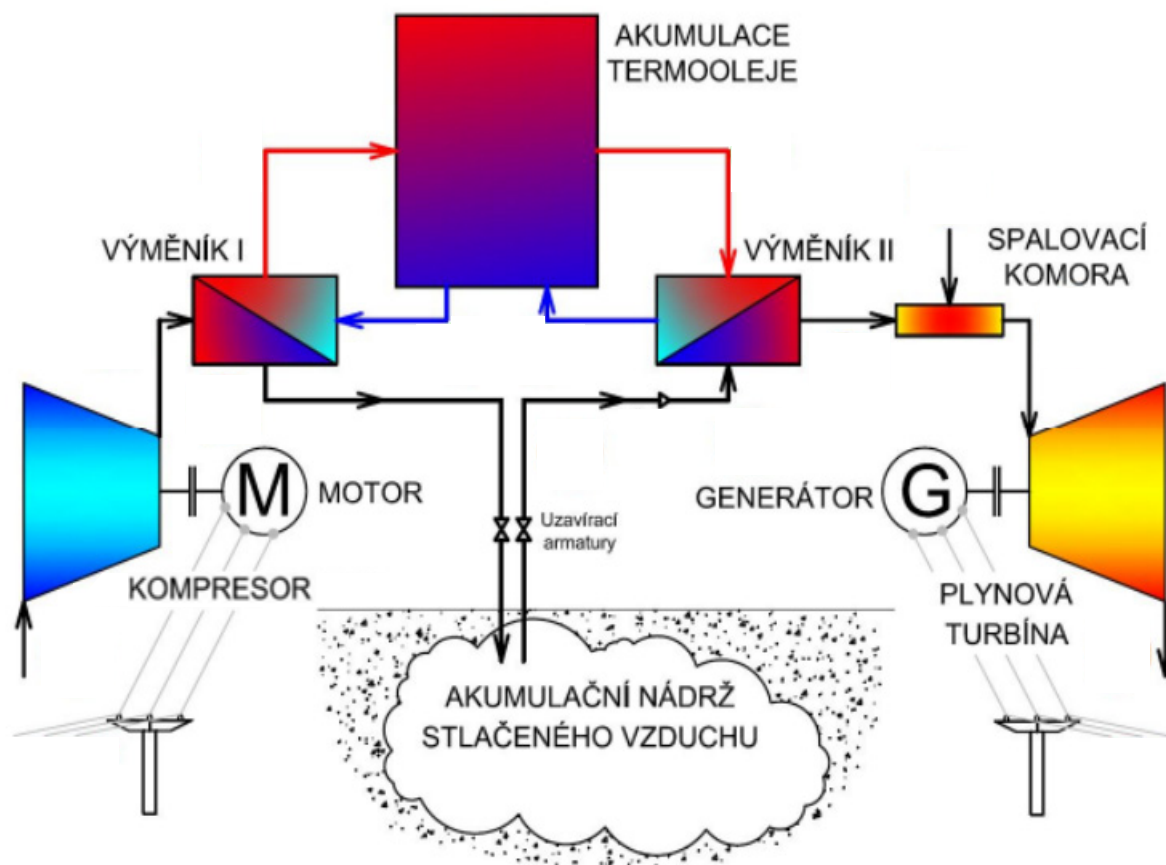
Obr. 31 Větrné elektrárny Multibrid M5000 [122]

3 Návrh systému akumulace ve stlačeném vzduchu

Jako první pro posouzení možností akumulace elektrické energie ze tří větrných elektráren Multibrid 5000 byl vybrán systém pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu (A-CAES), který bude navržen s následujícími komponentami:

- kompresor
- výměník vzduch-termoolej 1
- čerpadlo pro termoolej 1
- kaverna s konstantním tlakem
- výměník vzduch-termoolej 2
- čerpadlo pro termoolej 2
- akumulární nádrž na termoolej
- spalovací komora
- plynová turbína
- generátor

Předpokládaný dodávaný skutečný výkon větrného parku $P_{v\acute{e}tr_el_skut} = 12\text{ MW}$ je primárně určen pro pohon motoru kompresoru. Dále je také využit pro napájení dvou čerpadel termooleje, který slouží k akumulaci tepla ze vzduchu po kompresi a akumulaci chladu ze vzduchu před vstupem do spalovací komory. Vzájemné uspořádání jednotlivých komponent naznačuje obrázek 32 níže.



Obr. 32 Schéma navrhovaného systému A-CAES – upraveno z [134]

V následujících kapitolách bude s využitím programu EES proveden komplexní termodynamický výpočet a částečné technické řešení celého výše popsaného systému A-CAES.

3.1 Kompresor

První navrhovanou komponentou je kompresor, který nasává suchý a nečistot zbavený vzduch z okolí o složení 21 % O_2 a 78 % N_2 a parametrech uvedených níže:

$$\dot{m}_{vz_1} = 40 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.1)$$

$$t_{vz_1} = 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

$$p_{vz_1} = 101325 \text{ Pa} \quad (3.3)$$

Stanovené molární zlomky jednotlivých složek vzduchu:

$$x_{O_2} = 0,21 \quad (3.4)$$

$$x_{N_2} = 0,78 \quad (3.5)$$

Molární hmotnosti jednotlivých složek vzduchu z programu EES:

$$M_{O_2} = 32 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1} \quad (3.6)$$

$$M_{N_2} = 28,01 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1} \quad (3.7)$$

Hmotnostní zlomky jednotlivých složek vzduchu:

$$w_{O_2} = \frac{x_{O_2} \cdot M_{O_2}}{x_{O_2} \cdot M_{O_2} + x_{N_2} \cdot M_{N_2}} \quad (3.8)$$

$$w_{O_2} = \frac{0,21 \cdot 32}{0,21 \cdot 32 + 0,78 \cdot 28,01}$$

$$w_{O_2} \doteq 0,2352$$

$$w_{N_2} = \frac{x_{N_2} \cdot M_{N_2}}{x_{O_2} \cdot M_{O_2} + x_{N_2} \cdot M_{N_2}} \quad (3.9)$$

$$w_{N_2} = \frac{0,78 \cdot 28,01}{0,21 \cdot 32 + 0,78 \cdot 28,01}$$

$$w_{N_2} \doteq 0,7648$$

Pomocí programu EES byly stanoveny entalpie O_2 a N_2 při vstupní teplotě vzduchu do kompresoru $t_{vz_1} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$i_{O_2_1} = 0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.10)$$

$$i_{N_2_1} = 0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.11)$$

Byla zvolena vztažná teplota $t_{vzt} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, k níž budou vztaženy všechny entalpie v celém termodynamickém výpočtu. Pro tuto teplotu byly v programu EES stanoveny hodnoty vztažných entalpií jednotlivých složek vzduchu:

$$i_{O_2_vzt} = 0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.12)$$

$$i_{N_2_vzt} = 0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.13)$$

Entalpie suchého vzduchu na vstupu do kompresoru:

$$\begin{aligned} i_{vz_1} &= w_{O_2} \cdot (i_{O_2_1} - i_{O_2_vzt}) + w_{N_2} \cdot (i_{N_2_1} - i_{N_2_vzt}) \\ i_{vz_1} &= 0,2352 \cdot (0 - 0) + 0,7648 \cdot (0 - 0) \\ i_{vz_1} &= 0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Je zaveden předpoklad, že v kompresoru dochází k ideální adiabatické kompresi suchého vzduchu s adiabatickým exponentem:

$$\kappa_K = 1,4 \quad (3.15)$$

Za kompresorem byl zvolen výstupní tlak:

$$p_{vz_2} = 775770 \text{ Pa} \quad (3.16)$$

Stanovený kompresní poměr:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{p_{vz_2}}{p_{vz_1}} \\ \varepsilon &= \frac{775770}{101325} \\ \varepsilon &\doteq 7,656 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Dopočítána teplota vzduchu za kompresorem:

$$\begin{aligned} t_{vz_2} &= T_{vz_1} \cdot (\varepsilon)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 273,15 \\ t_{vz_2} &= (25 + 273,15) \cdot (7,656)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 273,15 \\ t_{vz_2} &\doteq 260,2 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Pomocí programu EES byly určeny entalpie O_2 a N_2 pro výstupní teplotu vzduchu z kompresoru $t_{vz_2} = 260,2 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$i_{O_2_2} = 223511 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.19)$$

$$i_{N_2_2} = 246358 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.20)$$

Entalpie vzduchu na výstupu z kompresoru:

$$\begin{aligned} i_{vz_2} &= w_{O_2} \cdot (i_{O_2_2} - i_{O_2_vzt}) + w_{N_2} \cdot (i_{N_2_2} - i_{N_2_vzt}) \\ i_{vz_2} &= 0,2352 \cdot (223511 - 0) + 0,7648 \cdot (246358 - 0) \\ i_{vz_2} &\doteq 240984 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Rozdíl entalpií vzduchu na výstupu z kompresoru a vstupu do kompresoru:

$$\begin{aligned} \Delta i_{vz_12} &= i_{vz_2} - i_{vz_1} \\ \Delta i_{vz_12} &= 240984 - 0 \\ \Delta i_{vz_12} &= 240984 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Ideální výkon kompresoru:

$$P_{K_id} = \Delta i_{vz_12} \cdot \dot{m}_{vz_1} \quad (3.23)$$

$$P_{K_id} = 240984 \cdot 40$$

$$P_{K_id} = 9639360 \text{ W} \doteq 9,639 \text{ MW}$$

Účinnost kompresoru byla dle [124] zvolena:

$$\eta_K = 0,85 \quad (3.24)$$

Skutečný příkon kompresoru je dle [135] navýšen:

$$P_{K_skut} = \frac{P_{K_id}}{\eta_K} \quad (3.25)$$

$$P_{K_skut} = \frac{9,639}{0,85}$$

$$P_{K_skut} = 11,34 \text{ MW}$$

3.2 Výměník vzduch-termoolej 1

Během stlačování plynu dochází k jeho značnému ohřátí, jak můžeme pozorovat na výrazně vyšší teplotě $t_{vz_2} = 260,2 \text{ }^\circ\text{C}$ na konci komprese ve srovnání s teplotou $t_{vz_1} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ na začátku tohoto děje. Vzduch vystupující z kompresoru proudí do protiproudého výměníku 1 s termoolejem SHELL Thermia B. Toto médium je použito z důvodu dobrých termodynamických vlastností, které jsou uvedeny v tabulce 14 níže a slouží k ochlazení vzduchu ještě před tím, než vstoupí do kaverny. Ohřátý termoolej proudí z výměníku 1 do akumulární nádrže s termoolejem. Jeho druhou funkcí je uchování tepla, které je později využito v tomto systému A-CAES pro opětovné ohřátí vzduchu vystupujícího z kaverny.

Tab. 14 Fyzikální vlastnosti termooleje SHELL Thermia B [134]

teplota [$^\circ\text{C}$]	0	20	40	100	150	200	250	300	340
hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	876	863	850	811	778	746	713	681	655
měrná tepelná kapacita [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1,809	1,882	1,954	2,173	2,355	2,538	2,633	2,902	3,048
tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,136	0,134	0,133	0,128	0,125	0,121	0,118	0,114	0,111
Prandtlovo číslo [-]	3375	919	375	69	32	20	14	11	9

Parametry vzduchu vstupujícího do výměníku 1 vychází z hodnot vzduchu na výstupu z kompresoru:

$$\dot{m}_{vz,1} = 40 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.26)$$

$$p_{vz,2} = 775770 \text{ Pa} \quad (3.27)$$

$$t_{vz,2} = 260,2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.28)$$

Pomocí programu EES byly pro teplotu $t_{vz,2}$ a tlak $p_{vz,2}$ zjištěny hodnoty měrných tepelných kapacit jednotlivých složek vzduchu na vstupu do výměníku 1:

$$c_{p_{O_2,2}} = 987 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.29)$$

$$c_{p_{N_2,2}} = 1065 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.30)$$

Měrná tepelná kapacita vzduchu na vstupu do výměníku 1:

$$c_{p_{vz,2}} = w_{O_2} \cdot c_{p_{O_2,2}} + w_{N_2} \cdot c_{p_{N_2,2}} \quad (3.31)$$

$$c_{p_{vz,2}} = 0,2352 \cdot 987 + 0,7648 \cdot 1065$$

$$c_{p_{vz,2}} \doteq 1047 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Byla zvolena hodnota teploty vzduchu na výstupu z výměníku 1. Tlak v tomto místě je uvažován stejný jako na vstupu do výměníku 1. Ve výpočtu tohoto zařízení nejsou uvažovány tlakové ztráty.

$$t_{vz,3} = 70 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.32)$$

$$p_{vz,3} = p_{vz,2} = 775770 \text{ Pa} \quad (3.33)$$

Pomocí programu EES byly pro teplotu $t_{vz,3}$ a tlak $p_{vz,3}$ zjištěny hodnoty měrných tepelných kapacit jednotlivých složek vzduchu na výstupu z výměníku 1:

$$c_{p_{O_2,3}} = 926,7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.34)$$

$$c_{p_{N_2,3}} = 1039 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.35)$$

Měrná tepelná kapacita vzduchu na výstupu z výměníku 1:

$$c_{p_{vz,3}} = w_{O_2} \cdot c_{p_{O_2,3}} + w_{N_2} \cdot c_{p_{N_2,3}} \quad (3.36)$$

$$c_{p_{vz,3}} = 0,2352 \cdot 926,7 + 0,7648 \cdot 1039$$

$$c_{p_{vz,3}} \doteq 1013 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Střední hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu ve výměníku 1:

$$c_{p_{vz,stř,1}} = \frac{c_{p_{vz,2}} + c_{p_{vz,3}}}{2} \quad (3.37)$$

$$c_{p_{vz,stř,1}} = \frac{1047 + 1013}{2}$$

$$c_{p_{vz,stř,1}} = 1030 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Přenesený tepelný výkon ze strany vzduchu je stejný jako ze strany termooleje a pro výměník 1 je stanoven:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{vz,1} &= \dot{Q}_{to,1} = \dot{m}_{vz,1} \cdot c_{p,vz,stř,1} \cdot (T_{vz,2} - T_{vz,3}) & (3.38) \\ \dot{Q}_{vz,1} &= 40 \cdot 1030 \cdot ((260,2 + 273,15) - (70 + 273,15)) \\ \dot{Q}_{vz,1} &= 7836240 \text{ W} \doteq 7,836 \text{ MW}\end{aligned}$$

Byly zvoleny následující parametry termooleje na vstupu do výměníku 1 (označeny indexem 3) a na výstupu z výměníku 1 (označeny indexem 2). Měrné tepelné kapacity byly pro dané teploty určeny interpolací z tabulky 14.

$$t_{to,3} = 60 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.39)$$

$$c_{p,to,3} = 2027 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.40)$$

$$t_{to,2} = 225 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.41)$$

$$c_{p,to,2} = 2586 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.42)$$

Střední hodnota měrné tepelné kapacity termooleje ve výměníku 1:

$$c_{p,to,stř,1} = \frac{c_{p,to,3} + c_{p,to,2}}{2} \quad (3.43)$$

$$c_{p,to,stř,1} = \frac{2027 + 2586}{2}$$

$$c_{p,to,stř,1} = 2306,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Úpravou rovnice 3.44 byl zjištěn hmotnostní průtok termooleje výměníkem 1:

$$\dot{Q}_{vz,1} = \dot{Q}_{to,1} = \dot{m}_{to,1} \cdot c_{p,to,stř,1} \cdot (T_{to,2} - T_{to,3}) \quad (3.44)$$

$$\dot{m}_{to,1} = \frac{\dot{Q}_{to,1}}{c_{p,to,stř,1} \cdot (T_{to,2} - T_{to,3})} \quad (3.45)$$

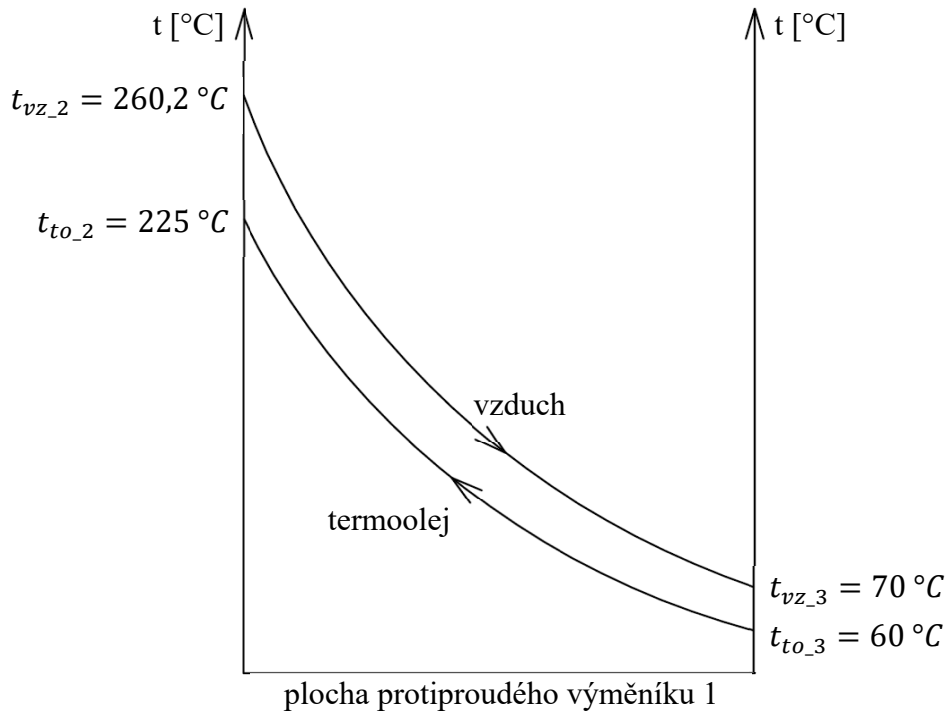
$$\dot{m}_{to,1} = \frac{7836240}{2306,5 \cdot ((225 + 273,15) - (60 + 273,15))}$$

$$\dot{m}_{to,1} \doteq 20,59 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Dle [134] byla zvolena hodnota součinitele přestupu tepla pro výměník 1:

$$k_1 = 98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.46)$$

V programu AutoCAD byl vytvořen teplotní diagram pro media vzduch a termoolej proudící ve výměníku 1, který je přiložen na následujícím obrázku 33 na další stránce.



Obr. 33 Teplotní diagram pro výměník vzduch-termoolej 1

Vypočítaný střední logaritmický teplotní spád pro výměník 1:

$$\Delta T_{ln_1} = \frac{(t_{vz_2} - t_{to_2}) - (t_{vz_3} - t_{to_3})}{\ln \frac{(t_{vz_2} - t_{to_2})}{(t_{vz_3} - t_{to_3})}} \quad (3.47)$$

$$\Delta T_{ln_1} = \frac{(260,2 - 225) - (70 - 60)}{\ln \frac{(260,2 - 225)}{(70 - 60)}}$$

$$\Delta T_{ln_1} \doteq 20,02 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vypočítaná plocha protiproudého výměníku 1:

$$S_1 = \frac{\dot{Q}_{vz_1}}{k_1 \cdot \Delta T_{ln_1}} \quad (3.48)$$

$$S_1 = \frac{7836240}{98 \cdot 20,02}$$

$$S_1 \doteq 3994 \text{ m}^2$$

Termoolej je nutné pohánět skrz výměník 1 pomocí čerpadla, které bude specifikováno v následující části kapitoly. Dle rovnice 3.45 byl vypočítaný hmotnostní průtok termooleje roven $\dot{m}_{to_1} = 20,59 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Interpolací z tabulky 14 byly určeny hustoty pro vstupní ($t_{to_3} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$) a výstupní ($t_{to_2} = 225 \text{ } ^\circ\text{C}$) teplotu termooleje. Z nich byla poté stanovena střední hodnota těchto hustot a zjištěn objemový průtok termooleje výměníkem 1.

$$\rho_{to_3} = 837 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.49)$$

$$\rho_{to_2} = 713,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.50)$$

$$\rho_{to_stř_1} = \frac{\rho_{to_3} + \rho_{to_2}}{2} \quad (3.51)$$

$$\rho_{to_stř_1} = \frac{837 + 713,5}{2}$$

$$\rho_{to_stř_1} = 775,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\dot{V}_{to_1} = \frac{\dot{m}_{to_1}}{\rho_{to_stř_1}} \quad (3.52)$$

$$\dot{V}_{to_1} = \frac{20,59}{775,25}$$

$$\dot{V}_{to_1} \doteq 0,02656 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \doteq 0,027 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 97,2 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$$

Dle [125] čerpadlo HANSCRAFT FLOW JET 5000 pracuje s podobných objemovým průtokem $95 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$, jako je průtok termooleje výměníkem 1. Jeho příkon činí 4 kW . Z důvodu mírně vyššího objemového průtoku termooleje v navrhovaném systému bude zvolen příkon čerpadla pro výměník 1 $P_{čerp_V1} = 4,2 \text{ kW}$. Tato hodnota je uvažována do celkové spotřeby elektrické energie navrhovaného systému A-CAES.

Ohřátý termoolej odchází z výměníku 1 do akumulární nádrže s termoolejem, kde je uložen pro další použití ve výměníku 2.

3.3 Zásobník stlačeného vzduchu – kaverna

Ochlazený vzduch z výměníku 1 proudí přes bezpečnostní uzavírací ventil do podzemního zásobníku tzv. kaverny, v které je udržován konstantní tlak. Toho je dosaženo pomocí sloupce vody, jako v případě systému A-CAES od společnosti Hydrostor popsáno v kapitole 1.5 *Pokročilá úložiště energie ve stlačeném vzduchu*. Kaverna je naplněna vodou a propojena potrubím s povrchovou nádrží. Jakmile stlačený vzduch plní kavernu, tlačí zároveň vodu v potrubí směrem k povrchu. Při výrobě elektrické energie je proces obrácený. Voda naopak tlačí vzduch směrem na povrch k turbíně.

Parametry vzduchu vstupujícího do kaverny při plnění vychází z parametrů vzduchu na výstupu z výměníku 1:

$$p_{kav} = p_{vz_3} = 775770 \text{ Pa} \quad (3.53)$$

$$t_{kav_in} = t_{vz_3} = 70 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.54)$$

$$\dot{m}_{kav_in} = \dot{m}_{vz_1} = 40 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.55)$$

Pro teplotu t_{kav_in} a tlak p_{kav} byla s využitím [126] určena hustota vzduchu na vstupu do kaverny:

$$\rho_{kav_in} = 7,8794 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.56)$$

Doba plnění kaverny byla stanovena shodná s denní dobou provozu větrného parku:

$$\tau_{plnění} = 8 \text{ h} = 28800 \text{ s} \quad (3.57)$$

Celková hmotnost vzduchu v zcela naplněné kaverně:

$$m_{vz_kav} = \dot{m}_{kav_in} \cdot \tau_{plnění} \quad (3.58)$$

$$m_{vz_kav} = 40 \cdot 28800$$

$$m_{vz_kav} = 1152000 \text{ kg}$$

Vypočítaný objem kaverny:

$$V_{vz_kav} = \frac{m_{vz_kav}}{\rho_{kav_in}} \quad (3.59)$$

$$V_{vz_kav} = \frac{1152000}{7,8794}$$

$$V_{vz_kav} \doteq 146204 \text{ m}^3$$

Zvolený rozdíl teplot vzduchu na vstupu (při nabíjení systému) a výstupu z kaverny (při vybíjení systému):

$$\Delta t = 15 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.60)$$

Vypočítaná teplota vzduchu na výstupu z kaverny:

$$t_{kav_out} = t_{kav_in} - \Delta t \quad (3.61)$$

$$t_{kav_out} = 70 - 15$$

$$t_{kav_out} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$$

Pro teplotu t_{kav_out} a tlak p_{kav} byla s využitím [126] stanovena hustota vzduchu na výstupu z kaverny:

$$\rho_{kav_out} = 7,9719 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.62)$$

Zvolený hmotnostní průtok odchozího vzduchu z kaverny:

$$\dot{m}_{kav_out} = 50 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.63)$$

Hmotnost vzduchu dostupného pro vybíjení systému:

$$m_{vz_kav_vyb} = V_{vz_kav} \cdot \rho_{kav_out} \quad (3.64)$$

$$m_{vz_kav_vyb} = 146204 \cdot 7,9719$$

$$m_{vz_kav_vyb} \doteq 1165524 \text{ kg}$$

Vypočítaná doba vypouštění celého objemu kaverny při úplném vybíjení systému:

$$\tau_{vyb} = \frac{m_{vz_kav_vyb}}{\dot{m}_{kav_out}} \quad (3.65)$$

$$\tau_{vyb} = \frac{1165524}{50}$$

$$\tau_{vyb} \doteq 23310 \text{ s} \doteq 6,475 \text{ h}$$

3.4 Výměník vzduch-termoolej 2

Vzduch je z kaverny veden přes bezpečnostní uzavírací ventil do protiproudého výměníku vzduch-termoolej 2, aby se před vstupem do spalovací komory oteplil pomocí ohřátého termooleje, doposud uloženého v akumulární nádrži na termoolej.

Parametry vzduchu na vstupu do výměníku 2 vychází z parametrů vzduchu na výstupu z kaverny:

$$\dot{m}_{vz_2} = \dot{m}_{kav_out} = 50 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.66)$$

$$t_{vz_5} = t_{kav_out} = 55 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.67)$$

$$p_{vz_5} = p_{kav} = 775770 \text{ Pa} \quad (3.68)$$

Pomocí programu EES byly pro teplotu t_{vz_5} a tlak p_{vz_5} zjištěny měrné tepelné kapacity jednotlivých složek vzduchu na vstupu do výměníku 2:

$$c_{p_{O_2_5}} = 922,1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.69)$$

$$c_{p_{N_2_5}} = 1038 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.70)$$

Měrná tepelná kapacita vzduchu na vstupu do výměníku 2:

$$c_{p_{vz_5}} = w_{O_2} \cdot c_{p_{O_2_5}} + w_{N_2} \cdot c_{p_{N_2_5}} \quad (3.71)$$

$$c_{p_{vz_5}} = 0,2352 \cdot 922,1 + 0,7648 \cdot 1038$$

$$c_{p_{vz_5}} \doteq 1011 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Byla zvolena teplota vzduchu na výstupu z výměníku 2. Tlak v tomto místě je uvažován stejný jako na vstupu do výměníku 2. Ve výpočtu tohoto zařízení nejsou uvažovány tlakové ztráty.

$$t_{vz_6} = 210 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.72)$$

$$p_{vz_6} = p_{vz_5} = 775770 \text{ Pa} \quad (3.73)$$

Pomocí programu EES byly pro teplotu t_{vz_6} a tlak p_{vz_6} zjištěny hodnoty měrných tepelných kapacit jednotlivých složek vzduchu na výstupu z výměníku 2:

$$c_{p_{O_2_6}} = 972,1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.74)$$

$$c_{p_{N_2_6}} = 1056 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.75)$$

Měrná tepelná kapacita vzduchu na výstupu z výměníku 2:

$$c_{p_{vz_6}} = w_{O_2} \cdot c_{p_{O_2_6}} + w_{N_2} \cdot c_{p_{N_2_6}} \quad (3.76)$$

$$c_{p_{vz_6}} = 0,2352 \cdot 972,1 + 0,7648 \cdot 1056$$

$$c_{p_{vz_6}} \doteq 1036 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Střední hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu ve výměníku 2:

$$c_{p_vz_stř_2} = \frac{c_{p_vz_5} + c_{p_vz_6}}{2} \quad (3.77)$$

$$c_{p_vz_stř_2} = \frac{1011 + 1036}{2}$$

$$c_{p_vz_stř_2} = 1023,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Přenesený tepelný výkon ve výměníku 2 ze strany vzduchu je stejný jako ze strany termooleje a je určen dle rovnice 3.78:

$$\dot{Q}_{vz_2} = \dot{Q}_{to_2} = \dot{m}_{vz_2} \cdot c_{p_vz_stř_2} \cdot (T_{vz_6} - T_{vz_5}) \quad (3.78)$$

$$\dot{Q}_{vz_2} = 50 \cdot 1023,5 \cdot ((210 + 273,15) - (55 + 273,15))$$

$$\dot{Q}_{vz_2} = 7932125 \text{ W} \doteq 7,932 \text{ MW}$$

Byly zvoleny následující parametry termooleje na vstupu (označeny indexem 6) a výstupu (označeny indexem 5) z výměníku 2. Měrné tepelné kapacity byly pro dané teploty určeny interpolací z tabulky 14.

$$t_{to_6} = 225 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.79)$$

$$c_{p_to_6} = 2586 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.80)$$

$$t_{to_5} = 60 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.81)$$

$$c_{p_to_5} = 2027 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.82)$$

Střední hodnota měrné tepelné kapacity termooleje ve výměníku 2:

$$c_{p_to_stř_2} = \frac{c_{p_to_6} + c_{p_to_5}}{2} \quad (3.83)$$

$$c_{p_to_stř_2} = \frac{2586 + 2027}{2}$$

$$c_{p_to_stř_2} = 2306,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Úpravou rovnice 3.84 byl zjištěn hmotnostní průtok termooleje výměníkem 2:

$$\dot{Q}_{vz_2} = \dot{Q}_{to_2} = \dot{m}_{to_2} \cdot c_{p_to_stř_2} \cdot (T_{to_6} - T_{to_5}) \quad (3.84)$$

$$\dot{m}_{to_2} = \frac{\dot{Q}_{to_2}}{c_{p_to_stř_2} \cdot (T_{to_6} - T_{to_5})} \quad (3.85)$$

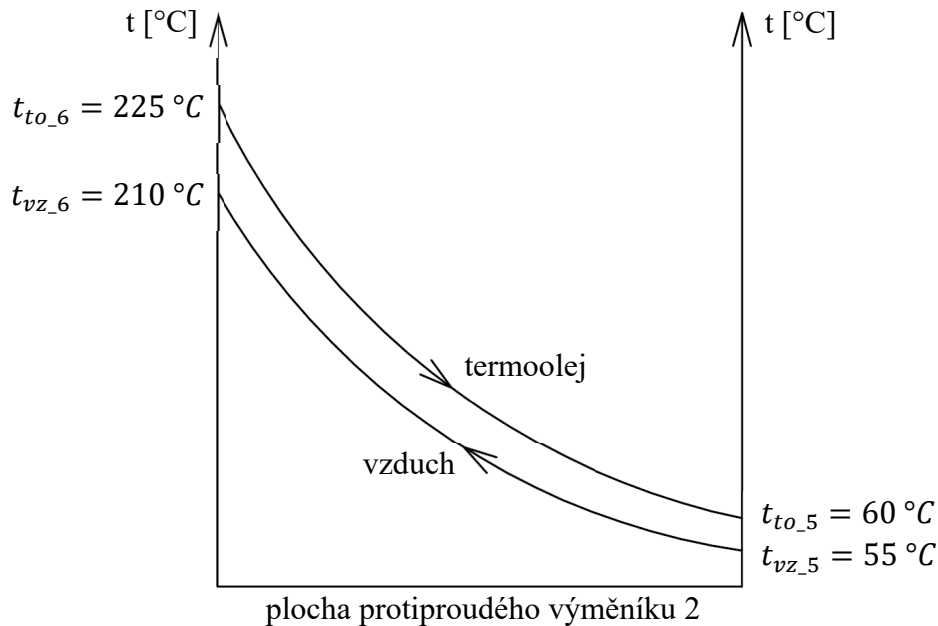
$$\dot{m}_{to_2} = \frac{7932125}{2306,5 \cdot ((225 + 273,15) - (60 + 273,15))}$$

$$\dot{m}_{to_2} \doteq 20,84 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Dle [134] byla zvolena hodnota součinitele přestupu tepla pro výměník 2:

$$k_2 = 98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.86)$$

V programu AutoCAD byl vytvořen teplotní diagram pro media vzduch a termoolej proudící ve výměníku 2, který je přiložen na následujícím obrázku 34.



Obr. 34 Teplotní diagram pro výměník vzduch-termoolej 2

Vypočítaný střední logaritmický teplotní spád pro výměník 2:

$$\Delta T_{ln,2} = \frac{(t_{to,6} - t_{vz,6}) - (t_{to,5} - t_{vz,5})}{\ln \frac{(t_{to,6} - t_{vz,6})}{(t_{to,5} - t_{vz,5})}} \quad (3.87)$$

$$\Delta T_{ln,2} = \frac{(225 - 210) - (60 - 55)}{\ln \frac{(225 - 210)}{(60 - 55)}}$$

$$\Delta T_{ln,2} \doteq 9,102 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vypočítaná plocha protiproudého výměníku vzduch-termoolej 2:

$$S_2 = \frac{\dot{Q}_{vz,2}}{k_2 \cdot \Delta T_{ln,2}} \quad (3.88)$$

$$S_2 = \frac{7932125}{98 \cdot 9,102}$$

$$S_2 \doteq 8893 \text{ m}^2$$

Termoolej je nutné pohánět skrz výměník 2 pomocí čerpadla, které bude specifikováno v následující části kapitoly. Dle rovnice 3.85 byl vypočítaný hmotnostní průtok termooleje roven $\dot{m}_{to,2} = 20,84 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Interpolací z tabulky 14 byly určeny hustoty pro vstupní ($t_{to,6} = 225 \text{ } ^\circ\text{C}$) a výstupní ($t_{to,5} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$) teplotu termooleje. Z nich byla poté stanovena střední hodnota těchto hustot a zjištěn objemový průtok termooleje výměníkem 2.

$$\rho_{to,6} = 713,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.89)$$

$$\rho_{to,5} = 837 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.90)$$

$$\rho_{to_stř_2} = \frac{\rho_{to_5} + \rho_{to_6}}{2} \quad (3.91)$$

$$\rho_{to_stř_2} = \frac{837 + 713,5}{2}$$

$$\rho_{to_stř_2} = 775,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\dot{V}_{to_2} = \frac{\dot{m}_{to_2}}{\rho_{to_stř_2}} \quad (3.92)$$

$$\dot{V}_{to_2} = \frac{20,84}{775,25}$$

$$\dot{V}_{to_2} \doteq 0,02688 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \doteq 0,027 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 97,2 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$$

Dle [125] čerpadlo HANSCRAFT FLOW JET 5000 pracuje s podobných objemovým průtokem $95 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$, jako je průtok termooleje výměníkem 2. Jeho příkon činí 4 kW . Z důvodu mírně vyššího objemového průtoku termooleje v navrhovaném systému bude zvolen příkon čerpadla pro výměník 2 $P_{čerp_V2} = 4,2 \text{ kW}$. Tato hodnota je uvažována do celkové spotřeby elektrické energie navrhovaného systému A-CAES.

Ochlazený termoolej odcházející z výměníku 2 je před dalším použitím ve výměníku 1 uložen v akumulární nádrži s termoolejem, jejíž návrhem se zabývá další kapitola.

3.5 Akumulační nádrž na termoolej

Toto zařízení slouží pro uchování tepla a chladu v termooleji za účelem jeho opětovného použití, a tím zvýšení celkové účinnosti navrhovaného systému A-CAES. Z důvodu minimalizace tepelných ztrát do okolí jsou nádrž a potrubí, spojující ji s jednotlivými výměníky 1 a 2, tepelně izolovány. Kvůli zabránění vzájemnému mísení ohřátého termooleje z výměníku 1 a ochlazeného termooleje z výměníku 2, je nádrž rozdělena na dvě části pohyblivou přepážkou taktéž opatřenou tepelnou izolací. Při plnění akumulární nádrže ohřátým termoolejem do horní části nad přepážku dochází, vlivem navýšení objemu, k jejímu samovolnému posunu směrem dolů. Naopak při plnění ochlazeným termoolejem do dolní části akumulární nádrže je přepážka vytlačována zpět nahoru. Z důvodu mírně rozdílných objemových průtoků ohřátého a ochlazeného termooleje je v přepážce cíleně vytvořen malý otvor, který slouží k automatickému vyrovnávání objemů a tlaků. Ve výpočtu těchto částí nejsou uvažovány tepelné ani tlakové ztráty. Parametry potřebné pro výpočet objemu akumulární nádrže jsou uvedeny níže.

Již dříve dle rovnice 3.45 zjištěný hmotnostní průtok termooleje z výměníku 1:

$$\dot{m}_{to_1} = 20,59 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.93)$$

Již dříve dle rovnice 3.51 určená střední hustota termooleje ve výměníku 1:

$$\rho_{to_stř_1} = 775,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.94)$$

Již dříve dle rovnice 3.57 stanovená doba plnění kaverny:

$$\tau_{plnění} = 8 \text{ h} = 28800 \text{ s} \quad (3.95)$$

Vypočítaná celková hmotnost termooleje, která projde výměníkem 1 při plnění kaverny:

$$m_{to_1} = \dot{m}_{to_1} \cdot \tau_{plnění} \quad (3.96)$$

$$m_{to_1} = 20,59 \cdot 28800$$

$$m_{to_1} = 592992 \text{ kg}$$

Objem akumulační nádrže na termoolej:

$$V_{aku_nádrž} = \frac{m_{to_1}}{\rho_{to_stř_1}} \quad (3.97)$$

$$V_{aku_nádrž} = \frac{592992}{775,25}$$

$$V_{aku_nádrž} \doteq 764,9 \text{ m}^3$$

3.6 Spalovací komora

Další částí navrhovaného systému A-CAES je spalovací komora do níž vstupuje ohřátý vzduch z výměníku 2 o následujících parametrech:

$$\dot{m}_{vz_sp_kom} = \dot{m}_{vz_2} = 50 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.98)$$

$$t_{vz_sp_kom} = t_{vz_5} = 210 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.99)$$

$$p_{vz_sp_kom} = p_{vz_5} = 775770 \text{ Pa} \quad (3.100)$$

Množství kyslíku vstupujícího do spalovací komory:

$$\dot{m}_{O_2_sp_kom} = \dot{m}_{vz_sp_kom} \cdot x_{O_2} \quad (3.101)$$

$$\dot{m}_{O_2_sp_kom} = 50 \cdot 0,21$$

$$\dot{m}_{O_2_sp_kom} = 10,5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pomocí programu EES stanovené entalpie O_2 a N_2 pro teplotu vzduchu na vstupu do spalovací komory $t_{vz_sp_kom} = 210 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$i_{O_2_sp_kom_in} = 174336 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.102)$$

$$i_{N_2_sp_kom_in} = 193148 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.103)$$

Entalpie vzduchu na vstupu do spalovací komory:

$$i_{vz_sp_kom_in} = w_{O_2} \cdot (i_{O_2_sp_kom_in} - i_{O_2_vzt}) + w_{N_2} \cdot (i_{N_2_sp_kom_in} - i_{N_2_vzt}) \quad (3.104)$$

$$i_{vz_sp_kom_in} = 0,2352 \cdot (174336 - 0) + 0,7648 \cdot (193148 - 0)$$

$$i_{vz_sp_kom_in} \doteq 188723 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Do vzduchu ve spalovací komoře je pomocí soustavy trysek vstříkováno palivo – zemní plyn. Tlak paliva před tryskami je zvolen výrazně vyšší, než je tlak ve spalovací komoře [127]. V důsledku toho a velmi malých rozměrů trysek dochází během vstříku paliva k jeho kvalitnímu rozprášení na jemné částice [127]. Jednotlivé parametry zemního plynu jsou uvedeny na další stránce (výhřevnost zemního plynu zvolena dle [134]).

$$Q_i^r = 50 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.105)$$

$$t_{ZP} = 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.106)$$

$$p_{ZP} = 800000 \text{ Pa} \quad (3.107)$$

Dle [128] je zvolené palivo zemní plyn až z 99 % tvořen metanem (CH_4). Pro účely práce, vzhledem k návrhu celého systému A-CAES, bude uvažováno, že zemní plyn je tvořen pouze metanem. Stanovený molární zlomek zemního plynu:

$$x_{ZP} = x_{CH_4} = 1 \quad (3.108)$$

Molární hmotnost metanu z programu EES:

$$M_{CH_4} = 16,04 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1} \quad (3.109)$$

Hmotnostní zlomek zemního plynu:

$$w_{ZP} = w_{CH_4} = \frac{x_{CH_4} \cdot M_{CH_4}}{x_{CH_4} \cdot M_{CH_4}} \quad (3.110)$$

$$w_{ZP} = w_{CH_4} = \frac{1 \cdot 16,04}{1 \cdot 16,04}$$

$$w_{ZP} = w_{CH_4} = 1$$

Pomocí programu EES byla pro teplotu $t_{ZP} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ určena entalpie zemního plynu:

$$i_{CH_4} = -4650000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.111)$$

Teplota zemního plynu je totožná s vztažnou teplotou $t_{vzt} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, a proto bude hodnota vztažné entalpie zemního plynu totožná s hodnotou již určené entalpie zemního plynu.

$$i_{CH_4-vzt} = -4650000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.112)$$

Výsledná entalpie paliva:

$$i_{pal} = i_{CH_4} - i_{CH_4-vzt} \quad (3.113)$$

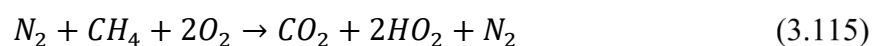
$$i_{pal} = -4650000 - (-4650000)$$

$$i_{pal} = 0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Bilance hmotnostních toků ve spalovací komoře – součet hmotnostního toku vzduchu a hmotnostního toku paliva je dohromady roven hmotnostnímu toku spalin:

$$\dot{m}_{vz_sp_kom} + \dot{m}_{pal_sp_kom} = \dot{m}_{spal_sp_kom} \quad (3.114)$$

Je zaveden předpoklad dokonalého spalování metanu a vzduchu s výše uvedeným složením. Chemická rovnice dokonalého spalování dle [129]:



Vyjádření rovnice 3.115 pomocí molárních hmotností získaných z programu EES:

$$M_{N_2} + M_{CH_4} + 2 \cdot M_{O_2} \rightarrow M_{CO_2} + 2 \cdot M_{H_2O} + M_{N_2} \quad (3.116)$$

$$28,01 + 16,04 + 2 \cdot 32 \rightarrow 44,01 + 2 \cdot 18,02 + 28,01$$

Potřebné množství O_2 v kg na spálení 1 kg paliva CH_4 :

$$\frac{M_{N_2}}{M_{CH_4}} + \frac{M_{CH_4}}{M_{CH_4}} + \frac{2 \cdot M_{O_2}}{M_{CH_4}} \rightarrow \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}} + \frac{2 \cdot M_{H_2O}}{M_{CH_4}} + \frac{M_{N_2}}{M_{CH_4}} \quad (3.117)$$

$$\frac{28,01}{16,04} kg N_2 + 1 kg CH_4 + \frac{64}{16,04} kg O_2 \rightarrow \frac{44,01}{16,04} kg CO_2 + \frac{36,04}{16,04} kg H_2O + \frac{28,01}{16,04} kg N_2$$

$$1,75 kg N_2 + 1 kg CH_4 + 3,99 kg O_2 \rightarrow 2,74 kg CO_2 + 2,25 kg H_2O + 1,75 kg N_2$$

Z předchozí rovnice 3.117 vyplývá, že na spálení 1 kg paliva zemního plynu 100% tvořeného methanem je potřeba $m_{O_2,na-CH_4} = 3,99 kg O_2$.

Stechiometrický hmotnostní průtok paliva do spalovací komory:

$$\dot{m}_{pal_stech} = \frac{\dot{m}_{O_2_sp_kom}}{m_{O_2,na-CH_4}} \quad (3.118)$$

$$\dot{m}_{pal_stech} = \frac{10,5}{3,99}$$

$$\dot{m}_{pal_stech} \doteq 2,632 kg_{pal} \cdot s^{-1}$$

Stechiometrický palivový poměr:

$$f_{st} = \frac{\dot{m}_{pal_stech}}{\dot{m}_{vz_sp_kom}} \quad (3.119)$$

$$f_{st} = \frac{2,632}{50}$$

$$f_{st} = 0,05264$$

Vhodně zvolený přebytek vzduchu pro spalování, jehož hodnota byla zjištěna několika iteracemi následujícího výpočtu v programu EES tak, aby teplota spalin na konci spalovací komory vyšla v běžném rozmezí pro plynové turbíny:

$$\alpha = 5 \quad (3.120)$$

Stechiometrický hmotnostní průtok vzduchu vstupujícího do spalovací komory:

$$\dot{m}_{vz_stech} = \frac{\dot{m}_{vz_sp_kom}}{\alpha} \quad (3.121)$$

$$\dot{m}_{vz_stech} = \frac{50}{5}$$

$$\dot{m}_{vz_stech} = 10 kg \cdot s^{-1}$$

Skutečný palivový poměr:

$$f = \frac{f_{st}}{\alpha} \quad (3.122)$$

$$f = \frac{0,05264}{5}$$

$$f = 0,010528$$

Skutečný hmotnostní průtok paliva přiváděného do spalovací komory:

$$\dot{m}_{pal_sp_kom} = f \cdot \dot{m}_{vz_sp_kom} \quad (3.123)$$

$$\dot{m}_{pal_sp_kom} = 0,010528 \cdot 50$$

$$\dot{m}_{pal_sp_kom} = 0,5264 \text{ kg}_{pal} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hmotnostní průtok spalin na konci spalovací komory:

$$\dot{m}_{spal_sp_kom} = \dot{m}_{vz_sp_kom} + \dot{m}_{pal_sp_kom} \quad (3.124)$$

$$\dot{m}_{spal_sp_kom} = 50 + 0,5264$$

$$\dot{m}_{spal_sp_kom} = 50,5264 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Bilanční rovnice spalovací komory:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{vz_sp_kom} \cdot i_{vz_sp_kom_in} + \dot{m}_{pal_sp_kom} \cdot i_{pal} + \dot{m}_{pal_sp_kom} \cdot Q_i^r &= \\ &= \dot{m}_{spal_sp_kom} \cdot i_{spal_sp_kom} \end{aligned} \quad (3.125)$$

Entalpie spalin na konci spalovací komory vyjádřená z bilanční rovnice 3.125:

$$i_{spal_sp_kom} = \frac{\dot{m}_{vz_sp_kom} \cdot i_{vz_sp_kom_in} + \dot{m}_{pal_sp_kom} \cdot i_{pal} + \dot{m}_{pal_sp_kom} \cdot Q_i^r}{\dot{m}_{spal_sp_kom}} \quad (3.126)$$

$$i_{spal_sp_kom} = \frac{50 \cdot 188723 + 0,5264 \cdot (0) + 0,5264 \cdot 50 \cdot 10^6}{50,5264}$$

$$i_{spal_sp_kom} \doteq 707673 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Hmotnostní tok N_2 obsaženého ve spalinách:

$$\dot{m}_{N_2_spal} = \dot{m}_{vz_sp_kom} \cdot w_{N_2} \quad (3.127)$$

$$\dot{m}_{N_2_spal} = 50 \cdot 0,7648$$

$$\dot{m}_{N_2_spal} = 38,24 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hmotnostní zlomek N_2 obsaženého ve spalinách:

$$w_{N_2_spal} = \frac{\dot{m}_{N_2_spal}}{\dot{m}_{spal_sp_kom}} \quad (3.128)$$

$$w_{N_2_spal} = \frac{38,24}{50,5264}$$

$$w_{N_2_spal} \doteq 0,7568$$

Hmotnostní tok H_2O obsažené ve spalinách:

$$\dot{m}_{H_2O_spal} = \frac{w_{CH_4}}{W_{CH_4}} \cdot \dot{m}_{pal_sp_kom} \cdot \frac{2 \cdot M_{H_2O}}{M_{CH_4}} \quad (3.129)$$

$$\dot{m}_{H_2O_spal} = 1 \cdot 0,5264 \cdot \frac{36,04}{16,04}$$

$$\dot{m}_{H_2O_spal} \doteq 1,183 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hmotnostní zlomek H_2O obsažené ve spalinách:

$$w_{H_2O_spal} = \frac{\dot{m}_{H_2O_spal}}{\dot{m}_{spal_sp_kom}} \quad (3.130)$$

$$w_{H_2O_spal} = \frac{1,183}{50,5264}$$

$$w_{H_2O_spal} \doteq 0,0234$$

Hmotnostní tok CO_2 obsaženého ve spalinách:

$$\dot{m}_{CO_2_spal} = \frac{w_{CH_4}}{W_{CH_4}} \cdot \dot{m}_{pal_sp_kom} \cdot \frac{2 \cdot M_{CO_2}}{M_{CH_4}} \quad (3.131)$$

$$\dot{m}_{CO_2_spal} = 1 \cdot 0,5264 \cdot \frac{44,01}{16,04}$$

$$\dot{m}_{CO_2_spal} \doteq 1,444 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hmotnostní zlomek CO_2 obsaženého ve spalinách:

$$w_{CO_2_spal} = \frac{\dot{m}_{CO_2_spal}}{\dot{m}_{spal_sp_kom}} \quad (3.132)$$

$$w_{CO_2_spal} = \frac{1,444}{50,5264}$$

$$w_{CO_2_spal} \doteq 0,0286$$

Stechiometrický hmotnostní tok O_2 přiváděného do spalovací komory:

$$\dot{m}_{O_2_stech_spal} = \dot{m}_{pal_sp_kom} \cdot m_{O_2_na_CH_4} \quad (3.133)$$

$$\dot{m}_{O_2_stech_spal} = 0,5264 \cdot 3,99$$

$$\dot{m}_{O_2_stech_spal} \doteq 2,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hmotnostní tok O_2 ve spalinách:

$$\dot{m}_{O_2_spal} = (\alpha - 1) \cdot \dot{m}_{O_2_stech_spal} \quad (3.134)$$

$$\dot{m}_{O_2_spal} = (5 - 1) \cdot 2,1$$

$$\dot{m}_{O_2_spal} = 8,4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hmotnostní zlomek O_2 obsaženého ve spalinách:

$$w_{O_2\text{-spal}} = \frac{\dot{m}_{O_2\text{-spal}}}{\dot{m}_{\text{spal_sp_kom}}} \quad (3.135)$$

$$w_{O_2\text{-spal}} = \frac{8,4}{50,5264}$$

$$w_{O_2\text{-spal}} \doteq 0,1662$$

V programu EES byly určeny vztažné entalpie jednotlivých složek spalin pro vztažnou teplotu $t_{vzt} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$i_{N_2\text{-spal_vzt}} = i_{N_2\text{-vzt}} = 0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.136)$$

$$i_{H_2O\text{-spal_vzt}} = -13420000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.137)$$

$$i_{CO_2\text{-spal_vzt}} = -8941000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.138)$$

$$i_{O_2\text{-spal_vzt}} = i_{O_2\text{-vzt}} = 0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.139)$$

Rovnice entalpie spalin na konci spalovací komory obsahující funkce entalpií složek spalin na konci spalovací komory, které jsou závislé na teplotě spalin na konci spalovací komory $t_{\text{spal_sp_kom}}$:

$$\begin{aligned} i_{\text{spal_sp_kom}} = & w_{N_2\text{-spal}} \cdot (i_{N_2\text{-spal}} - i_{N_2\text{-spal_vzt}}) + w_{H_2O\text{-spal}} \cdot (i_{H_2O\text{-spal}} \\ & - i_{H_2O\text{-spal_vzt}}) + w_{CO_2\text{-spal}} \cdot (i_{CO_2\text{-spal}} - i_{CO_2\text{-spal_vzt}}) \\ & + w_{O_2\text{-spal}} \cdot (i_{O_2\text{-spal}} - i_{O_2\text{-spal_vzt}}) \end{aligned} \quad (3.140)$$

$$\begin{aligned} 707673 = & 0,7568 \cdot (i_{N_2\text{-spal}} - 0) + 0,0234 \cdot (i_{H_2O\text{-spal}} - (-13420000)) \\ & + 0,0286 \cdot (i_{CO_2\text{-spal}} - (-8941000)) + 0,1662 \cdot (i_{O_2\text{-spal}} - 0) \end{aligned}$$

V programu EES zpětně získaná hodnota teploty spalin na konci spalovací komory z rovnice 3.140 a z rovnic jednotlivých funkcí entalpií složek spalin na konci spalovací komory:

$$t_{\text{spal_sp_kom}} = 687,1 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.141)$$

Účinnost spalovací komory dle [134]:

$$\eta_{\text{sp_kom}} = 0,96 \quad (3.142)$$

Byla stanovena tlaková ztráta spalovací komory dle [134]:

$$\Delta p_{z\text{-sp_kom}} = 0,02 \cdot p_{vz\text{-sp_kom}} \quad (3.143)$$

$$\Delta p_{z\text{-sp_kom}} = 0,02 \cdot 775770$$

$$\Delta p_{z\text{-sp_kom}} \doteq 15515 \text{ Pa}$$

Tlak spalin na výstupu ze spalovací komory:

$$p_{\text{sp_kom_out}} = p_{vz\text{-sp_kom}} - \Delta p_{z\text{-sp_kom}} \quad (3.144)$$

$$p_{\text{sp_kom_out}} = 775770 - 15515$$

$$p_{\text{sp_kom_out}} = 760255 \text{ Pa}$$

Energie uložená v palivu:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{pal} &= Q_i^r \cdot \dot{m}_{pal_sp_kom} & (3.145) \\ \dot{Q}_{pal} &= 50 \cdot 10^6 \cdot 0,5264 \\ \dot{Q}_{pal} &= 26,32 \cdot 10^6 \text{ W} = 26,32 \cdot \text{MW}\end{aligned}$$

Zvolené objemové zatížení plamence dle [134]:

$$\dot{q}_{SK_red}^V = 50 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (3.146)$$

Objem plamence dle [134]:

$$\begin{aligned}V_{plamenec} &= \frac{\dot{Q}_{pal} \cdot \eta_{sp_kom}}{p_{vz_sp_kom} \cdot \dot{q}_{SK_red}^V} & (3.147) \\ V_{plamenec} &= \frac{26,32 \cdot 10^6 \cdot 0,96}{775770 \cdot 50} \\ V_{plamenec} &\doteq 0,6514 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Spaliny opouští spalovací komoru a proudí do další části navrhovaného systému A-CAES a tou je plynová turbína, jejíž návrhem se bude zabývat další kapitola.

3.7 Plynová turbína

Je zaveden předpoklad, že v tomto zařízení probíhá ideální adiabatická expanze spalin, které do tohoto zařízení vstupují při stejných parametrech, jako vystupují ze spalovací komory:

$$\dot{m}_{sp_T} = \dot{m}_{spal_sp_kom} = 50,5264 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.148)$$

$$p_{sp_T_in} = p_{sp_kom_out} = 760255 \text{ Pa} \quad (3.149)$$

$$t_{sp_T_in} = t_{spal_sp_kom} = 687,1 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.150)$$

$$i_{sp_T_in} = i_{spal_sp_kom} = 707673 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.151)$$

Adiabatický exponent pro tři a více atomové plyny:

$$\kappa_T = 1,33 \quad (3.152)$$

Za turbínou byl zvolen výstupní tlak:

$$p_{sp_T_out} = 101325 \text{ Pa} \quad (3.153)$$

Vypočítaný expanzní poměr turbíny:

$$\varepsilon_T = \frac{p_{sp_T_out}}{p_{sp_T_in}} \quad (3.154)$$

$$\varepsilon_T = \frac{101325}{760255}$$

$$\varepsilon_T \doteq 0,133$$

Dopočítána teplota spalin za turbínou po expanzi:

$$t_{sp_T_out} = T_{sp_T_in} \cdot (\varepsilon)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 273,15 \quad (3.155)$$

$$t_{sp_T_out} = (687,1 + 273,15) \cdot (0,133)^{\frac{1,33-1}{1,33}} - 273,15$$

$$t_{sp_T_out} \doteq 309,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jednotlivé entalpie složek spalin za turbínou po expanzi při teplotě $t_{sp_T_out} = 309,2^\circ\text{C}$:

$$i_{N_2_spal_T_out} = 298781 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.156)$$

$$i_{H_2O_spal_T_out} = -12880000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.157)$$

$$i_{CO_2_spal_T_out} = -8666000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.158)$$

$$i_{O_2_spal_T_out} = 272236 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.159)$$

Entalpie spalin za turbínou po expanzi:

$$\begin{aligned} i_{sp_T_out} = & w_{N_2_spal} \cdot (i_{N_2_spal_T_out} - i_{N_2_spal_vzt}) + w_{H_2O_spal} \cdot (i_{H_2O_spal_T_out} \\ & - i_{H_2O_spal_vzt}) + w_{CO_2_spal} \cdot (i_{CO_2_spal_T_out} - i_{CO_2_spal_vzt}) \\ & + w_{O_2_spal} \cdot (i_{O_2_spal_T_out} - i_{O_2_spal_vzt}) \end{aligned} \quad (3.160)$$

$$\begin{aligned} i_{sp_T_out} = & 0,7568 \cdot (298781 - 0) + 0,0234 \cdot (-12880000 - (-13420000)) \\ & + 0,0286 \cdot (-8666000 - (-8941000)) + 0,1662 \cdot (272236 - 0) \end{aligned}$$

$$i_{sp_T_out} \doteq 291864 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Rozdíl entalpií spalin na vstupu a výstupu z plynové turbíny:

$$\Delta i_{st_T} = i_{sp_T_in} - i_{sp_T_out} \quad (3.161)$$

$$\Delta i_{st_T} = 707673 - 291864$$

$$\Delta i_{st_T} = 415809 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ideální výkon plynové turbíny:

$$P_{T_id} = \Delta i_{st_T} \cdot \dot{m}_{sp_T} \quad (3.162)$$

$$P_{T_id} = 415809 \cdot 50,5264$$

$$P_{T_id} \doteq 21009332 \text{ W} \doteq 21 \text{ MW}$$

Zvolená účinnost plynové turbíny dle [136]:

$$\eta_T = 0,9 \quad (3.163)$$

Skutečný výkon plynové turbíny:

$$P_{T_skut} = P_{T_id} \cdot \eta_T \quad (3.164)$$

$$P_{T_skut} = 21009332 \cdot 0,9$$

$$P_{T_skut} \doteq 18908399 \text{ W} \doteq 18,9 \text{ MW}$$

Plynová turbína je pomocí převodovky spojena s generátorem, který bude v následující kapitole blíže specifikován.

3.8 Generátor

Celý výkon plynové turbíny slouží pro pohon generátoru, který vyrábí elektrickou energii určenou pro její distribuci do přenosové soustavy.

Zvolená účinnost generátoru dle [136]:

$$\eta_G = 0,98 \quad (3.165)$$

Mechanická účinnost převodovky mezi plynovou turbínou a generátorem dle [136]:

$$\eta_{mech} = 0,95 \quad (3.166)$$

Elektrický výkon na svorkách generátoru:

$$\begin{aligned} E_{el} &= P_{T_skut} \cdot \eta_G \cdot \eta_{mech} \quad (3.167) \\ E_{el} &= 18908399 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \\ E_{el} &\doteq 17603719 \text{ W} \doteq 17,6 \text{ MW} \end{aligned}$$

3.9 Celková účinnost navrženého systému A-CAES

Pro určení celkové účinnosti navrženého systému je nutné nejdříve dodefinovat další parametry. Jako první bude zjištěna hodnota elektrické energie vyrobené generátorem při úplném vybíjení systému, která je vypočítána jako součin doby vypouštění celého objemu kaverny při úplném vybíjení systému, určené dle rovnice 3.65, a elektrického výkonu na svorkách generátoru:

$$\tau_{vyb} = 6,475 \text{ h} = 23310 \text{ s} \quad (3.168)$$

$$E_{el_vyb} = E_{el} \cdot \tau_{vyb} \quad (3.169)$$

$$E_{el_vyb} = 17,6 \cdot 23310$$

$$E_{el_vyb} = 410256 \text{ MJ}$$

Dále je vyčíslena hodnota elektrické energie dodané větrným parkem tří elektráren Multibrid 5000 při plnění kaverny, která je stanovena jako součin skutečného dostupného výkonu větrného parku a doby plnění kaverny určené dle rovnice 3.57:

$$P_{větr_el_skut} = 12 \text{ MW} \quad (3.170)$$

$$\tau_{plnění} = 8 \text{ h} = 28800 \text{ s} \quad (3.171)$$

$$E_{el_plnění} = P_{větr_el_skut} \cdot \tau_{plnění} \quad (3.172)$$

$$E_{el_plnění} = 12 \cdot 28800$$

$$E_{el_plnění} = 345600 \text{ MJ}$$

Již dříve dle rovnice 3.145 zjištěná hodnota energie uložené v palivu:

$$\dot{Q}_{pal} = Q_i^r \cdot \dot{m}_{pal_sp_kom} \quad (3.173)$$

$$\dot{Q}_{pal} = 50 \cdot 10^6 \cdot 0,5264$$

$$\dot{Q}_{pal} = 26,32 \cdot 10^6 \text{ W} = 26,32 \cdot \text{MW}$$

Výpočet energie uložené v palivu při úplném vybíjení systému A-CAES:

$$\begin{aligned}Q_{pal_vyb} &= \dot{Q}_{pal} \cdot \tau_{vyb} & (3.174) \\Q_{pal_vyb} &= 26,32 \cdot 23310 \\Q_{pal_vyb} &= 613519,2 \text{ MJ}\end{aligned}$$

Celková účinnost navrhovaného systému A-CAES je určena jako podíl elektrické energie vyrobené generátorem při úplném vybíjení systému a součtu elektrické energie dodané větrným parkem při plnění kaverny s energií uloženou v palivu při úplném vybíjení systému:

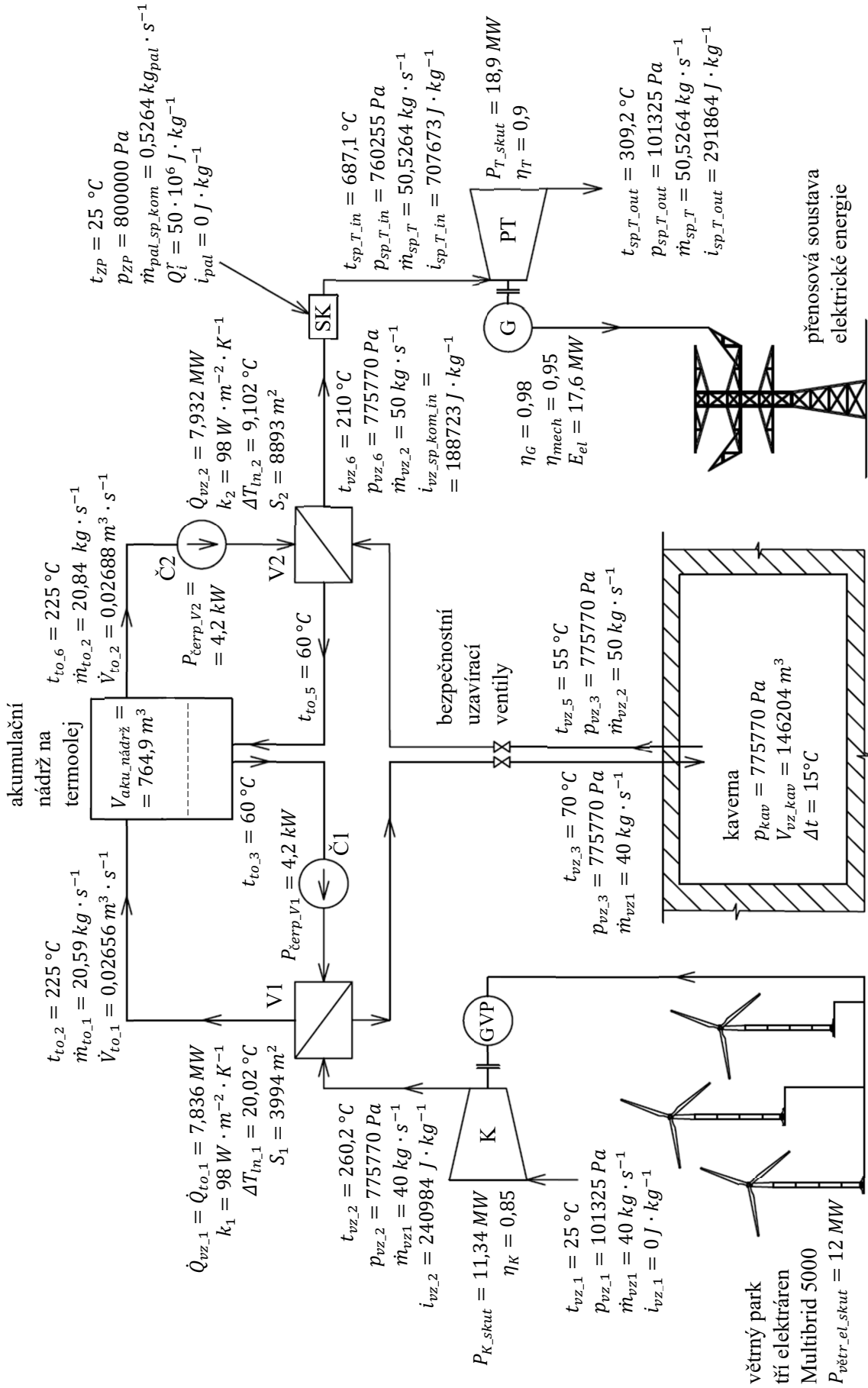
$$\begin{aligned}\eta_{celk} &= \frac{E_{el_vyb}}{E_{el_plnění} + Q_{pal_vyb}} & (3.175) \\ \eta_{celk} &= \frac{410256}{345600 + 613519,2} \\ \eta_{celk} &= 0,4277\end{aligned}$$

Vypočítaná celková účinnost 42,77 % vychází pro tento typ akumulacních systémů využívající stlačený vzduch v běžných mezích.

3.10 Shrnutí a náskres navrženého systému A-CAES

Na následující stránce je na obrázku 35 uveden, v programu AutoCAD vytvořený, náskres celého navrženého systému A-CAES, který je zapojený v kombinaci se třemi větrnými elektrárnami Multibrid 5000 a který při vybíjení dodává elektrickou energii do přenosové soustavy. Na schématu jsou také shrnuty hodnoty důležitých veličin v hlavních bodech navrženého akumulacního systému, jež byly stanoveny v průběhu výpočtu. Níže jsou sepsány vysvětlivky zkratk použitých v náskresu:

- GVP..... generátor větrného parku
- K..... kompresor
- V1 výměník vzduch-termoolej 1
- Č1 čerpadlo pro termoolej 1
- V2..... výměník vzduch-termoolej 2
- Č2 čerpadlo pro termoolej 2
- SK..... spalovací komora
- PT plynová turbína
- G..... generátor



Obr. 35 Schéma navrženého systému A-CAES

3.11 Ekonomické zhodnocení navrženého systému A-CAES

V této kapitole bude provedeno finanční zhodnocení celé investice na výstavbu a provoz navrženého systému pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu s parametry popsány výše. Jako první budou určeny počáteční investiční náklady, dále pak roční náklady na palivo, roční příjmy za dodanou kladnou regulační energii a z nich vycházející roční cash flow. Na závěr kapitoly bude stanovena teoretická doba návratnosti celé investice.

3.11.1 Investiční náklady navrženého systému A-CAES

Zdroj [134] uvádí, že předpokládané celkové náklady na výstavbu akumulární elektrárny využívající stlačený vzduch jsou:

$$N_{výstav} = 650 \$ \cdot kW^{-1} \quad (3.176)$$

Tyto náklady jsou vztaženy k výkonu turbíny [134], který je u navrženého systému dle rovnice 3.164 roven $P_{T_skut} = 18,9 MW = 18900 kW$. Hodnota celkových investičních nákladů na výstavbu v dolarech je potom vyčíslena:

$$N_{celk} = N_{výstav} \cdot P_{T_skut} \quad (3.177)$$

$$N_{celk} = 650 \cdot 18900$$

$$N_{celk} = 12290000 \$ = 12,29 \text{ mil. } \$$$

Dle [87] je aktuální kurz $1 \$ = 23,284 \text{ Kč}$. Celkové investiční náklady na výstavbu A-CAES v českých korunách jsou tedy stanoveny:

$$N_{celk_Kč} = N_{celk} \cdot 23,284 \quad (3.178)$$

$$N_{celk_Kč} = 12,29 \cdot 23,284$$

$$N_{celk_Kč} \doteq 286,16 \text{ mil. Kč}$$

3.11.2 Roční náklady na palivo pro provoz navrženého systému A-CAES

Vzhledem k předpokládaným nutným odstávkám systému A-CAES pro pravidelný servis, případným opravám atd. je uvažovaná doba provozu 340 dní v roce, stejně jako v případě tří větrných elektráren Multibrid 5000. Je počítáno s jedním nabíjecím a vybíjecím cyklem systému denně.

Již dle rovnice 3.123 stanovený skutečný hmotnostní průtok paliva do spalovací komory:

$$\dot{m}_{pal_sp_kom} = 0,5264 \text{ kg}_{pal} \cdot s^{-1} \quad (3.179)$$

Pro teplotu $t_{ZP} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlak $p_{ZP} = 101325 \text{ Pa}$ přiváděného paliva zemního plynu byla v programu EES určena hustota methanu:

$$\rho_{pal} = \rho_{CH_4} = 0,6558 \text{ kg} \cdot m^{-3} \quad (3.180)$$

Doba vybíjení A-CAES během jednoho denního cyklu je shodná s dobou vypouštění celého objemu kaverny při úplném vybíjení systému určené dle rovnice 3.65:

$$\tau_{vyb} = 6,475 \text{ h} = 23310 \text{ s} \quad (3.181)$$

Objem paliva spotřebovaného během ročního provozu A-CAES:

$$V_{pal_rok} = \frac{\dot{m}_{pal_sp_kom} \cdot \tau_{vyb} \cdot 340}{\rho_{pal}} \quad (3.182)$$

$$V_{pal_rok} = \frac{0,5264 \cdot 23310 \cdot 340}{0,6558}$$

$$V_{pal_rok} \doteq 6361590 \text{ m}^3$$

Dle [130] je aktuální průměrná cena za metr krychlový zemního plynu:

$$c_{ZP} = 7,84 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.183)$$

Roční náklady na palivo:

$$N_{pal_rok} = V_{pal_rok} \cdot c_{ZP} \quad (3.184)$$

$$N_{pal_rok} = 6361590 \cdot 7,84$$

$$N_{pal_rok} \doteq 49874865 \text{ Kč} \doteq 49,87 \text{ mil. Kč}$$

3.11.3 Cash flow navrženého systému A-CAES

Již vypočítaný elektrický výkon na svorkách generátoru dle rovnice 3.167:

$$E_{el} = 17,6 \text{ MW} \quad (3.185)$$

Elektrická energie vyrobená generátorem při ročním provozu A-CAES 340 dní:

$$E_{el_rok} = E_{el} \cdot \tau_{vyb} \cdot 340 \quad (3.186)$$

$$E_{el_rok} = 17,6 \cdot 6,475 \cdot 340$$

$$E_{el_rok} \doteq 38746 \text{ MWh}$$

Je předpokládáno, že veškerou vyrobenou elektrickou energii systém A-CAES dodává do elektrické přenosové soustavy jako kladnou regulační energii (SR+). Její cena je dle [131] stanovena:

$$c_{kl_reg_en} = 2350 \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1} \quad (3.187)$$

Roční příjmy za prodanou kladnou regulační energii:

$$P_{kl_reg_en} = c_{kl_reg_en} \cdot E_{el_rok} \quad (3.188)$$

$$P_{kl_reg_en} = 2350 \cdot 38742$$

$$P_{kl_reg_en} = 91053100 \text{ Kč} = 91,05 \text{ mil. Kč}$$

Elektrický příkon kompresoru, obou čerpadel pro termoolej, podpůrné elektroniky a veškerého dalšího příslušenství navrženého systému A-CAES je realizován přímo z výkonu tří větrných elektráren Multibrid 5000 – respektive z generátoru připojeného k tomuto větrnému parku. Náklady na provoz výše uvedených spotřebičů jsou z pohledu dodávky externí elektrické energie stanoveny na 0 Kč. Celkové roční náklady na provoz navrženého systému A-CAES jsou tedy určeny pouze jako roční náklady na palivo.

$$N_{celk_rok} = N_{pal_rok} = 49,87 \text{ mil. Kč} \quad (3.189)$$

Celkový roční zisk A-CAES je určen rozdílem ročních příjmů za dodanou kladnou regulační energii a celkových ročních nákladů na provoz navrženého akumulčního systému:

$$Z_{celk_rok} = P_{kl_reg_en} - N_{celk_rok} \quad (3.190)$$

$$Z_{celk_rok} = 91,05 - 49,87$$

$$Z_{celk_rok} = 41,18 \text{ mil. Kč}$$

3.12 Teoretická doba návratnosti navrženého systému A-CAES

Teoretická doba návratnosti investice výstavby navrženého akumulčního systému:

$$\tau_{návratnost} = \frac{N_{celk_Kč}}{Z_{celk_rok}} \quad (3.191)$$

$$\tau_{návratnost} = \frac{286,16}{41,18}$$

$$\tau_{návratnost} \doteq 6,95 \text{ let}$$

Jak již bylo uvedeno, doba provozu navrženého systému A-CAES byla uvažována 340 dní v rámci jednoho kalendářního roku s jedním nabíjecím/vybíjecím cyklem denně. Přepočtené teoretické doby návratnosti investice 6,95 let na cykly nabití/vybití je roven:

$$\tau_{návrat_cykly} = \tau_{návratnost} \cdot 340 \quad (3.192)$$

$$\tau_{návrat_cykly} = 6,95 \cdot 340$$

$$\tau_{návrat_cykly} = 2363 \text{ cyklů}$$

Dle [108] se životnost systému pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu od společnosti Hydrostor pohybuje okolo 50+ let, respektive dle [109] je garantovaná životnost 20000 cyklů.

Podmínky srovnání vypočítané teoretické doby návratnosti systému A-CAES navrženého touto prací (hodnoty na levé straně rovnic) a garantované životnosti A-CAES od společnosti Hydrostor (hodnoty na pravé straně rovnic):

$$\tau_{návratnost} < 50 \text{ let} \quad (3.193)$$

$$6,95 \text{ let} < 50 \text{ let}$$

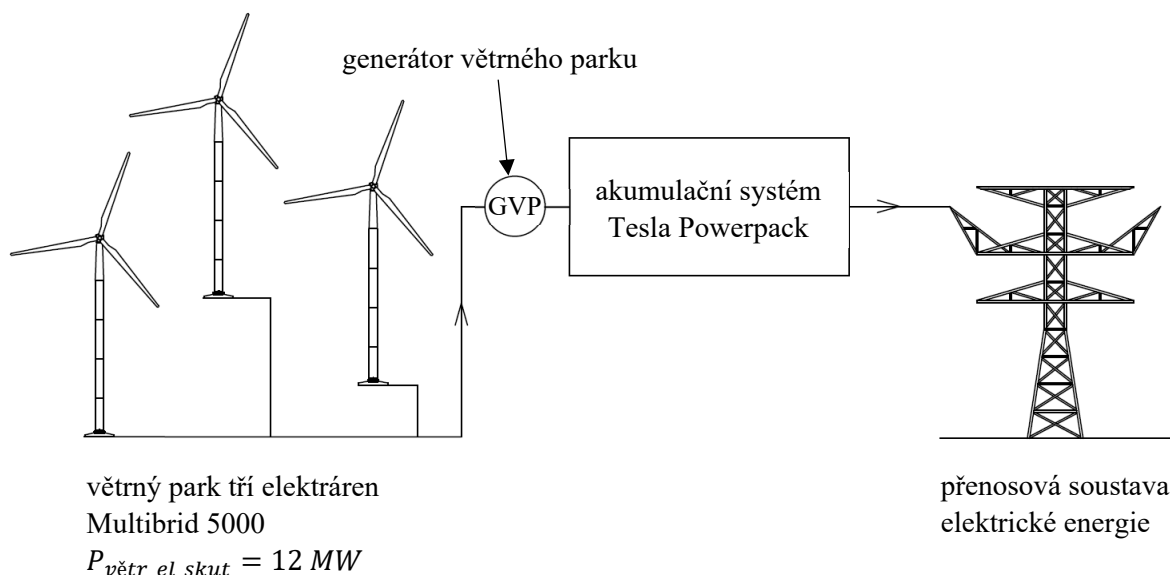
$$\tau_{návrat_cykly} < 20000 \text{ cyklů} \quad (3.194)$$

$$2363 \text{ cyklů} < 20000 \text{ cyklů}$$

Podmínky srovnání byly splněny. Z uvedených hodnot lze předpokládat, že v čase zpětného získání investičních nákladů bude navržený systém A-CAES stále funkční, nadále provozovatelný po dobu dalších cca 43 let a za předpokladu žádných velkých havárií již pouze finančně ziskový.

4 Návrh akumulace v elektrochemických bateriích

V kapitole 1.2 Srovnání jednotlivých elektrochemických akumulátorů byl, z baterií uvedených v rešerši, vybrán nejperspektivnější zástupce pro možnosti uchování elektrické energie z nestabilních zdrojů – Tesla Powerpack. Tato práce se nyní bude zabývat konkrétním návrhem a výpočtem systému těchto akumulátorů, který bude napájen třemi větrnými elektrárnami Multibrid 5000 o celkovém skutečném dodávaném výkonu $P_{v\dot{e}tr_el_skut} = 12\text{ MW} = 12000\text{ kW}$ a to po dobu $\tau_{v\dot{e}tr_el} = 8\text{ h}$ denně – 340 dní v roce. Tento stejný předpoklad je zaveden také pro návrh systému Tesla Powerpack, jako tomu bylo v případě předchozího návrhu A-CAES, aby bylo později možné srovnat dosahované výsledky jednotlivých akumuláčnických systémů mezi sebou. Baterie Tesla Powerpack jsou schopny provádět opakované vybíjení s 100% DOD, a tak při zpětném dodávání elektrické energie využít celou svou kapacitu. V následujícím výpočtu bude uvažováno, že během jednoho denního provozního cyklu tohoto navrhovaného akumuláčnického systému bude provedeno jedno úplné nabití a jedno úplné vybití. Pro numerické kalkulace byl opět použit program EES. Následující obrázek 36 naznačuje v programu AutoCAD vytvořené schéma vzájemného zapojení větrného parku, navrhovaného systému akumulace do baterií Tesla Powerpack a přenosové soustavy.



Obr. 36 Schéma zapojení navrhovaného systému Tesla Powerpack

4.1 Počet akumulátorů a parametry navrhovaného systému Tesla Powerpack

Množství elektrické energie vyrobené generátorem větrného parku, které bude denně ukládáno do akumulátorů Tesla Powerpack:

$$E_{el_skut_den} = P_{v\dot{e}tr_el_skut} \cdot \tau_{v\dot{e}tr_el} \quad (4.1)$$

$$E_{el_skut_den} = 12000 \cdot 8$$

$$E_{el_skut_den} = 96000\text{ kWh}$$

Kapacita jednoho akumulátoru Tesla Powerpack:

$$E_{el_1TP} = 232\text{ kWh} \quad (4.2)$$

Počet akumulátorů Tesla Powerpack pro denní uložení energie z větrného parku:

$$N_{TP} = \frac{E_{el_skut_den}}{E_{el_1TP}} \quad (4.3)$$

$$N_{TP} = \frac{96000}{232}$$

$$N_{TP} \doteq 413,79 \doteq 414 \text{ akumulátorů}$$

Celková kapacita akumulčního systému 414 akumulátorů Tesla Powerpack:

$$E_{el_414TP} = N_{TP} \cdot E_{el_1TP} \quad (4.4)$$

$$E_{el_414TP} = 414 \cdot 232$$

$$E_{el_414TP} = 96048 \text{ kWh}$$

Roční množství energie uložené do 414 akumulátorů Tesla Powerpack:

$$E_{el_rok_in} = E_{el_skut_den} \cdot 340 \quad (4.5)$$

$$E_{el_rok_in} = 96000 \cdot 340$$

$$E_{el_rok_in} = 32640000 \text{ kWh} = 32640 \text{ MWh}$$

Zpětná účinnost baterií Tesla Powerpack při 2h vybití:

$$\eta_{TP} = 0,88 \quad (4.6)$$

4.2 Investiční náklady navrženého systému Tesla Powerpack

Pořizovací náklady na Tesla Powerpack:

$$c_{TP} = 398 \$ \cdot \text{kWh}^{-1} \quad (4.7)$$

Investiční náklady na 414 akumulátorů Tesla Powerpack v dolarech:

$$N_{inv_TP} = E_{el_414TP} \cdot c_{TP} \quad (4.8)$$

$$N_{inv_TP} = 96048 \cdot 398$$

$$N_{inv_TP} = 38227104 \$$$

Dle [87] je aktuální kurz 1 \$ = 23,284 Kč. Investiční náklady na 414 akumulátorů Tesla Powerpack v českých korunách:

$$N_{inv_TP_Kč} = N_{inv_TP} \cdot 23,284 \quad (4.9)$$

$$N_{inv_TP_Kč} = 38227104 \cdot 23,284$$

$$N_{inv_TP_Kč} = 890079889,5 \text{ Kč} \doteq 890,0799 \text{ mil. Kč}$$

4.3 Roční příjmy, náklady a zisky navrženého systému Tesla Powerpack

Roční množství energie zpět získané z 414 akumulátorů Tesla Powerpack:

$$E_{el_rok_out} = E_{el_rok_in} \cdot \eta_{TP} \quad (4.10)$$

$$E_{el_rok_out} = 32640 \cdot 0,88$$

$$E_{el_rok_out} = 28723,2 \text{ MWh}$$

Je zaveden předpoklad, že veškerá elektrická energie čerpaná zpět z 414 akumulátorů Tesla Powerpack je dodávána do elektrické přenosové soustavy jako kladná regulační energie (SR+), jejíž cena je dle [131]:

$$c_{kl_reg_en} = 2350 \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1} \quad (4.11)$$

Roční příjmy za prodanou kladnou regulační energii z 414 Tesla Powerpack:

$$P_{kl_reg_en_TP} = c_{kl_reg_en} \cdot E_{el_rok} \quad (4.12)$$

$$P_{kl_reg_en_TP} = 2350 \cdot 28723,2$$

$$P_{kl_reg_en_TP} = 67499520 \text{ Kč} \doteq 67,4995 \text{ mil. Kč}$$

Předpokládá se, že navržený systém Tesla Powerpack je bezúdržbový a bez dalších nákladů na provoz. Celkové roční náklady a celkové roční zisky jsou stanoveny:

$$N_{celk_rok_TP} = 0 \text{ mil. Kč} \quad (4.13)$$

$$Z_{celk_rok_TP} = P_{kl_reg_en_TP} = 67,4995 \text{ mil. Kč} \quad (4.14)$$

4.4 Teoretická doba návratnosti navrženého systému Tesla Powerpack

Teoretická doba návratnosti investice výstavby akumulčního systému 414 Tesla Powerpack je určena jako podíl počátečních investičních nákladů na 414 akumulátorů Tesla Powerpack v českých korunách a celkových ročních zisků:

$$\tau_{návratnost_TP} = \frac{N_{inv_TP_Kč}}{Z_{celk_rok_TP}} \quad (4.15)$$

$$\tau_{návratnost_TP} = \frac{890,0799}{67,4995}$$

$$\tau_{návratnost_TP} \doteq 13,1865 \text{ let} \doteq 13,2 \text{ let}$$

Teoretická doba návratnosti investice výstavby akumulčního systému 414 akumulátorů Tesla Powerpack v cyklech:

$$\tau_{návratnost_cykly} = \tau_{návratnost} \cdot 340 \quad (4.16)$$

$$\tau_{návratnost_cykly} = 13,2 \cdot 340$$

$$\tau_{návratnost_cykly} = 4488 \text{ cyklů}$$

Udávaná životnost akumulátorů Tesla Powerpack:

$$\tau_{životnost_TP} = 5000 \text{ cyklů} \quad (4.17)$$

Porovnání teoretické doby návratnosti investice a životnosti baterií Tesla Powerpack:

$$\tau_{návratnost_cykly} < \tau_{životnost_TP} \quad (4.18)$$

$$4488 \text{ cyklů} < 5000 \text{ cyklů}$$

Podmínka srovnání byla splněna. V rámci teoretické doby návratnosti systému Tesla Powerpack by dle zjištěných údajů měly být akumulátory stále funkční s rezervou životnosti 512 cyklů. Je tedy pravděpodobné, že tento systém ukládání elektrické energie bude možné provozovat přibližně další rok a půl.

5 Srovnání navržených akumulačních systémů

V předchozích kapitolách byly vypracovány podrobné návrhy a výpočty systému pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu (A-CAES) stejně jako systému elektrochemických akumulátorů Tesla Powerpack. Jejich vzájemné srovnání na základě dosahovaných výsledků uvedených v tabulce 15 je provedeno níže.

Tab. 15 Vzájemné srovnání parametrů navržených systémů Tesla Powerpack a A-CAES

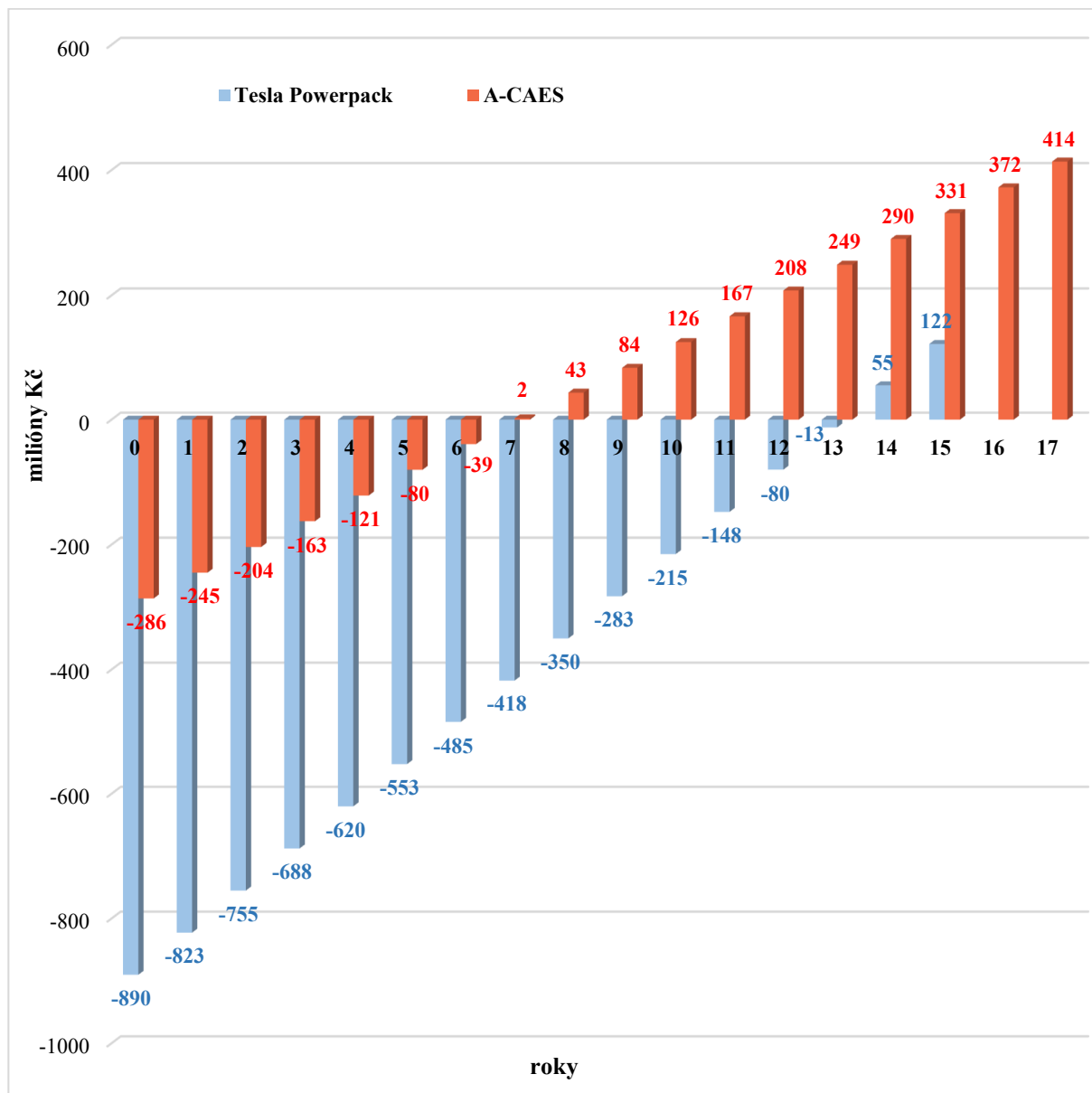
	A-CAES	Tesla Powerpack
jmenovitý výkon [MW]	generátor 17,6 (6,475 h)	48,024 (2 h)
kapacita [kWh]	113960	96048
napětí [V]	nespecifikováno	380 až 480
životnost [cykly]	20000	5000
zpětná účinnost [%]	42,77	88
investiční náklady [Kč]	286160000	890079889,5
roční náklady na provoz [Kč]	49874865	0
roční příjmy [Kč]	91053100	67499520
roční zisky [Kč]	41178235	67499520
teoretická návratnost [roky]	6,95	13,2
cena [Kč·kWh ⁻¹]	2511	9267

Vzhledem k zadání této diplomové práce je rozhodnutí o vhodnějším návrhu systému akumulace elektrické energie z větrného parku tří elektráren Multibrid 5000 o jmenovitém výkonu 15 MW učiněno především na základě parametrů životnosti, zpětné účinnosti a teoretické doby návratnosti investice daného systému.

Z tabulky 15 je patrné, že cca 3,7krát lepší ceny v Kč·kWh⁻¹ dosahuje systém A-CAES, který má také přibližně 3,1krát nižší investiční náklady, ale bohužel dosahuje zhruba 2krát nižší zpětné účinnosti 42,77 %. Kapacita systému Tesla Powerpack je stanovena pro 2h dobu vybíjení a je přibližně o 17,9 MWh nižší než kapacita systému A-CAES, která byla určena pro vybíjení 6,475 h. Systém Tesla Powerpack disponuje přibližně 2,7krát vyšším výkonem, ale 4krát nižší životností oproti navrženému A-CAES.

Otázkou možná zůstává posoudit také složitost jednotlivých systémů. Lze předpokládat, že navržené pokročilé úložiště energie ve stlačeném vzduchu, obsahující výrazně větší počet mechanických a elektromechanických komponent, bude více komplikované a zřejmě také i více poruchové. Naopak navržený systém akumulátorů Tesla Powerpack je uvažován bezúdržbový a obsahuje výrazně menší počet mechanických součástí.

Na obrázku 37 na následující stránce je uveden v programu Microsoft Excel vytvořený graf, naznačující srovnání cash flow obou navržených akumulačních systémů v průběhu 17 let. Vzhledem k tomu, že nebylo stanoveno přesné datum zahájení výstavby jednotlivých navržených systémů a ve výpočtu finančního zhodnocení investic je uvažována konstantní hodnota peněz bez vlivu inflace, je graf nediskontovaný.



Obr. 37 Graf cash flow navržených systémů Tesla Powerpack a A-CAES

Hodnoty jednotlivých cash flow grafů obou systémů v „roce nula“ odpovídají počátečním investičním nákladům, které jsou v letech dalších sníženy o dané roční zisky. V případě navrženého systému A-CAES můžeme sledovat překonání teoretické doby návratnosti investice, při překnutí vodorovné nulové osy milionů Kč, mezi 6. a 7. rokem. U navrženého systému Tesla Powerpack je tato doba mezi 13. a 14. rokem. Modrý graf tohoto systému je vykreslen pouze do 15. roku, neboť v letech dalších již není garantovaná životnost těchto akumulátorů.

Z přiloženého grafu na obrázku 37 a předchozího srovnání v této kapitole je možné rozhodnout, že navzdory některým výše popsaným výhodám navrženého systému Tesla Powerpack, se jako perspektivnější způsob pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů s nestabilní produkcí jeví navržený systém pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu (A-CAES), neboť ve většině srovnávaných parametrech dosahuje lepších výsledků.

DISKUSE

V této kapitole uvádím nedokonalosti a limity své práce, kterých si jsem vědom, a které mohou případně sloužit jako inspirace pro další vysokoškolské práce, vědecké publikace nebo experimenty. V nadcházejících odstavcích jsou shrnuty a odůvodněny.

Rešerše neobsahuje zcela všechny základní typy akumulace, jako například mechanické akumulátory – setrvačníky, protože záměrem práce bylo se soustředit hlavně na nejperspektivnější a nové způsoby uchovávání elektrické energie. Dále není uvedena například technologie Power-to-Gas, neboť vzhledem k již tak velkému rozsahu rešerše bylo společně s vedoucím práce rozhodnuto, že uvedený obsah je postačující a dostatečně vystihuje aktuální trendy v akumulaci elektrické energie.

V rámci jednotlivých kapitol návrhu systému A-CAES je učiněno mnoho předpokladů, které z části idealizují výpočet. Je tomu tak, neboť jde o komplexní návrh velmi obsáhlé technologie, jejíž kompletní realizaci provádí mnohačlenné týmy a celé společnosti. Vzhledem k rozsahu práce, časové dispozici a dostupným informacím nebylo u všech zařízení zcela možné provést detailní prostorové rozvržení a konstrukční řešení, ale pouze termodynamický výpočet. Dále nebyly zcela u všech zařízení uvažovány tepelné a tlakové ztráty, které částečně vyplývají právě z jednotlivých rozměrů zařízení atd. Z těchto důvodů je možné, že při provedení návrhu systému A-CAES se zcela všemi parametry všech zařízení, by některé hodnoty vyšly mírně odlišně. Navzdory této částečné idealizaci však byla snaha práce dojít k co nejpřesnějšímu výsledku a co nejvíce se přiblížit realitě s maximálním využitím dostupných prostředků.

Na závěr diskuse bych rád doplnil, že jako jednu z nejvhodnějších a nejperspektivnějších možností akumulace elektrické energie shledávám gravitační technologii jeřáb a bloky (cihly) od společnosti Energy Vault. Tento systém poskytuje celou řadu výhod detailně popsanych v příslušné kapitole této práce. Zde bych pouze ještě jednou rád vyzdvihl ty největší z nich. Gravitační úložiště – jeřáb a bloky lze postavit prakticky kdekoli bez nutnosti specifických topografických podmínek. Dosahuje značně nízkých rovnoměrných nákladů na skladování (LCOS) pod $0,05 \text{ \$}\cdot\text{kWh}^{-1}$ a také pracuje velmi rychle. V neposlední řadě je výrazným pozitivem možnost využívat recyklovatelné odpadní materiály pro vytvoření zmíněných cihel. Bohužel k technologii společnosti Energy Vault zatím není mnoho volně dostupných detailních informací, a proto nebyl proveden konkrétní návrh akumulačního systému. Tato situace se však může změnit v následujících letech s plánovanou výstavbou tohoto typu úložiště. Technologie společnosti Energy Vault je zajisté cestou budoucnosti akumulace elektrické energie a toto téma může sloužit jako inspirace pro další práce.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo posoudit aktuální technické a ekonomické možnosti akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů s nestabilní produkcí a provést konkrétní návrh systémů akumulace ve stlačeném vzduchu a elektrochemických akumulátorech.

V rámci rešerše bylo detailně probráno široké spektrum různých způsobů uchování elektrické energie, které reprezentují aktuální trendy v této oblasti energetiky. Jejich dosahované technické a ekonomické výsledky byly představeny na konkrétních zástupcích od skutečných dodavatelů. Bylo také provedeno srovnání všech uvedených elektrochemických baterií, které nebyly v průběhu rešerše již vyřazeny z výběru nejperspektivnějšího zástupce této skupiny akumulátorů, kvůli důvodům popsaných v příslušných kapitolách.

Pro posouzení možností akumulace byla jako obnovitelný zdroj s nestabilní produkcí zvolena větrná elektrárna Multibrid 5000 s jmenovitým výkonem 5 MW. Pro účely návrhu obou akumulačních systémů byly definovány jednotlivé parametry a podmínky provozu větrného parku složeného z tří takových větrných elektráren.

V následujících kapitolách se práce věnovala podrobnému návrhu pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu (A-CAES). Byly vybrány jednotlivé komponenty systému, proveden termodynamický výpočet těchto částí a u některých z nich nastíněno technické řešení konstrukce. Dále byla vypočítána celková účinnost tohoto systému 42,77 % a jako souhrn všech hlavních určených veličin byl v programu AutoCAD vytvořen podrobný náčrt celého navrhovaného systému A-CAES s danými výslednými hodnotami. Na závěr bylo stanoveno ekonomické zhodnocení celé investice, tedy jednotlivé náklady, příjmy a zisky, z nich vycházející cash flow a byla zjištěna teoretická doba návratnosti investice 6,95 let.

Jako nejvhodnější zástupce elektrochemických akumulátorů se z již uvedeného srovnání v rešerši jeví Tesla Powerpack. V čtvrté části práce byl realizován podrobný návrh systému 414 těchto baterií s účinností 88 %. Dále bylo také provedeno ekonomické zhodnocení a výpočet teoretické doby návratnosti investice, která vyšla 13,2 let. V programu AutoCAD byl vytvořen náčrt celého tohoto navrhovaného systému v součinnosti s větrným parkem a přenosovou soustavou elektrické energie.

V kapitole 5 bylo sepsáno zhodnocení a srovnání dosahovaných výsledků obou navržených systémů, které bylo provedeno na základě vybraných reprezentativních parametrů ve vytvořené tabulce 15 a nediskontovaném grafu jednotlivých cash flow. Rozhodnutí bylo učiněno především na základě porovnání hodnot životností, zpětných účinností a teoretických dob návratnosti investic. Konkrétně navržený systém A-CAES dosahuje zhruba 3,7krát lepší ceny $2511 \text{ Kč} \cdot \text{kWh}^{-1}$ a má také přibližně 3,1krát nižší investiční náklady cca 286,16 milionů Kč než navržený systém Tesla Powerpack. Ten však disponuje přibližně 2,7krát vyšším výkonem 48,024 MW. Jeho kapacita 96,048 MWh byla stanovena pro 2h dobu vybíjení a je přibližně o 17,9 MWh nižší než kapacita systému A-CAES, která byla stanovena pro vybíjení 6,475 h. Životnost navrženého systému pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu je 50+ let nebo případně 20000 cyklů, což je 4krát více než životnost 5000 cyklů akumulátorů Tesla Powerpack. Součástí zhodnocení bylo také naznačení srovnání složitosti jednotlivých systémů. Lze předpokládat,

že systém A-CAES, obsahující výrazně větší počet mechanických a elektromechanických komponent, bude více komplikovaný, a tedy také více poruchový. Naopak navržený systém Tesla Powerpack je uvažován bezúdržbový a obsahuje výrazně menší počet mechanických součástí. Z nediskontovaného grafu srovnání cash flow obou navržených akumulačních systémů, vykresleného v průběhu 17 let, lze vyčíst dané počáteční investiční náklady, dále jednotlivé roční zisky a lze pozorovat průběh překonání teoretické doby návratnosti investice při překlenutí horizontální nulové osy milionů Kč. Graf cash flow systému Tesla Powerpack byl vykreslen pouze do 15. roku, neboť v letech následujících již není garantovaná životnost těchto akumulátorů. Naopak systém A-CAES se svou výrazně delší životností bude s velkou pravděpodobností výdělečný i dalších cca 43 let po dosažení své teoretické doby návratnosti investice. V závěru kapitoly 5 byl navzdory některým výhodám systému Tesla Powerpack, jako perspektivnější možnost akumulace elektrické energie z větrného parku tří elektráren Multibrid 5000, vybrán navržený systém pokročilého úložiště energie ve stlačeném vzduchu, neboť ve většině srovnávaných parametrech dosahuje lepších výsledků.

Hlavní úkoly zadání byly naplněny v následující kapitolách:

1. Zpracovat rešerši k problematice možností akumulace elektrické energie z OZE a aktuálních trendů v této oblasti. (kapitola 1)
2. Pro zadaný nestabilní zdroj elektrické energie provést alternativní návrhy akumulace elektrické energie (návrh bude zahrnovat minimálně akumulaci ve stlačeném vzduchu a elektrochemických akumulátorech). (kapitoly 2; 3 a 4)
3. Provést srovnání alternativních návrhů akumulace pro zadaný zdroj z předchozího bodu z hlediska efektivnosti, případně návratnosti. (kapitola 5)

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] S.R.O, Residit. Co je to elektrochemický zdroj - Časopis Elektro - Odborné časopisy. *Odbornecasopisy.cz* [online]. [vid. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/co-je-to-elektrochemicky-zdroj--12911>
- [2] *Definice | Elektrochemické zdroje proudu obecně | Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. [vid. 2019-10-20]. Dostupné z: <http://www.battex.info/elektrochemicke-zdroje-proudu-obecne/definice>
- [3] *Akumulátor* [online]. 2019 [vid. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Akumul%C3%A1tor&oldid=17644532>
- [4] *Akumulátorová baterie | Slovníček a pojmy | Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. [vid. 2019-10-20]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/akumul%C3%A1torov%C3%A1+baterie>
- [5] *Galvanický článek | Slovníček a pojmy | Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. [vid. 2019-10-20]. Dostupné z: <http://www.battex.info/?p=slovnicek-a-pojmy&id=185>
- [6] *Galvanický článek* [online]. 2019 [vid. 2019-10-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Galvanick%C3%BD_%C4%8Dl%C3%A1nek&oldid=17667137
- [7] *Rozdělení | Elektrochemické zdroje proudu obecně | Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. [vid. 2019-10-20]. Dostupné z: <http://www.battex.info/elektrochemicke-zdroje-proudu-obecne/rozdeleni>
- [8] *Baterie | Slovníček a pojmy | Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. [vid. 2019-10-20]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/baterie>
- [9] *Olověný akumulátor* [online]. 2019 [vid. 2020-05-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Olov%C4%9Bn%C3%BD_akumul%C3%A1tor&oldid=17928985
- [10] *Akumulace elektřiny. TZB-info* [online]. [vid. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektřiny>
- [11] *Future of Batteries: The Search for the Best Battery Storage Methods Continues* [online]. 14. říjen 2019 [vid. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/the-search-for-the-best-battery-storage-methods-continues>
- [12] *Lithium-ion battery* [online]. 2020 [vid. 2020-05-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium-ion_battery&oldid=954794548
- [13] *Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1.část) - Cnews.cz* [online]. [vid. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>

- [14] Three battery technologies that could power the future. *Saft Batteries | We energize the world*. [online]. 3. duben 2017 [vid. 2019-10-24]. Dostupné z: <https://www.saftbatteries.com/media-resources/our-stories/three-battery-technologies-could-power-future>
- [15] *Soo Kyung Chemical Co., Ltd.* [online]. [vid. 2019-10-26]. Dostupné z: http://skchems.com/e_sub.html?menu=60
- [16] The Lithium-ion Battery Problem. *FlashCharge Batteries* [online]. [vid. 2019-10-24]. Dostupné z: <http://www.flashchargebatteries.com/problem/>
- [17] *Lithium Shortage Expected Due to Lack of Mines* [online]. [vid. 2019-11-07]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/17068/Lithium-Shortage-Expected-Due-to-Lack-of-Mines.aspx>
- [18] 5 minutes with... Kunal Phalpher, chief commercial officer, Li-Cycle, Canada. *E-Waste World Conference & Expo* [online]. 8. říjen 2019 [vid. 2019-10-24]. Dostupné z: <https://www.ewaste-expo.com/5-minutes-with-kunal-phalpher-chief-commercial-officer-li-cycle-canada/>
- [19] Typical Applications for LiFePO₄ Batteries. *Bioenno Power* [online]. [vid. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.bioennopower.com/pages/typical-applications-for-lifepo4-batteries>
- [20] M. ŚWIERCZYŃSKI, D. STROE, A. STAN a R. TEODORESCU. The lifetime of the LiFePO₄/C battery energy storage system when used for smoothing of the wind power plant variations. In: *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* [online]. [vid. 2020-05-04]. 2013, s. 6825–6830. ISSN 1553-572X. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6700262>
- [21] *Lithium iron phosphate battery* [online]. 2019 [vid. 2019-10-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium_iron_phosphate_battery&oldid=921939971
- [22] H. YIN-QUAN, Liu HE-PING, Zhang YI a Liu KAI-FENG. Charging Method Research for Lithium Iron Phosphate Battery. *Procedia Engineering* [online]. [vid. 2019-10-26]. 2011, 15, 4367–4371. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.820>
- [23] *InTech-Lifepo4_cathode_material.pdf* [online]. [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: http://cdn.intechopen.com/pdfs/18671/InTech-Lifepo4_cathode_material.pdf
- [24] B. WU, Yonghuan REN a Ning LI. LiFePO₄ Cathode Material. *Electric Vehicles - The Benefits and Barriers* [online]. 2011 [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-the-benefits-and-barriers/lifepo4-cathode-material>
- [25] *State of charge* [online]. 2019 [vid. 2019-10-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=State_of_charge&oldid=907987231

- [26] *How to charge Lithium Iron Phosphate lithium ion battery packs including packs with high current and High Capacity.* [online]. [vid. 2019-10-26]. Dostupné z: <https://www.powerstream.com/LLLF.htm>
- [27] Kinstar batteries: Lithium-ion, Lithium-ion Polymer and LiFePO4 batteries for various applications. *Kinstar* [online]. [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: <http://www.kinstarbattery.com/Service/faq/18>
- [28] *Lithium-železo-fosfátový akumulátor* [online]. 2019 [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium-%C5%BEelezo-fosf%C3%A1tov%C3%BD_akumul%C3%A1tor&oldid=17419840
- [29] *LiFePO4 battery|LiFePO4 battery pack | Hot battery introductions* [online]. [vid. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.pdbattery.com/lifepo4-battery.html>
- [30] *Official Depth Of Discharge Recommendations For LiFePO4 - Victron Energy* [online]. [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://community.victronenergy.com/questions/10779/official-depth-of-discharge-recommendations-for-li.html>
- [31] What is Depth of Discharge (DOD) and how does it affect a battery? *Battle Born Batteries* [online]. [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://battlebornbatteries.com/depth-of-discharge-li-ion-deep-cycle-batteries/>
- [32] *Winston článek Lithium Yttrium - LiFePO4/LiFeYPO4 akumulátor 3.2V, 700Ah | battery.cz* [online]. [vid. 2019-10-26]. Dostupné z: <https://www.battery.cz/winston-clanek-lithium-yttrium-lifepo4-lifeypo4-akumulator-3-2v-700ah.html>
- [33] *The advantages and disadvantages of LiFePO4 battery and its applications - DT ENERGY Co., Ltd.* [online]. [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: <http://www.dt-energy.com/news/20.html>
- [34] M. KASSEM, J. BERNARD, R. REVEL, S. PÉLISSIER, F. DUCLAUD a C. DELACOURT. Calendar aging of a graphite/LiFePO4 cell. *Journal of Power Sources* [online]. [vid. 2020-05-04]. 2012, 208, 296–305. ISSN 0378-7753. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.068>
- [35] Lithium reserves worldwide top countries 2019. *Statista* [online]. [vid. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/268790/countries-with-the-largest-lithium-reserves-worldwide/>
- [36] *LITHIOVÉ BATERIE LiFePO4 -Li-ion | battery.cz* [online]. [vid. 2019-10-26]. Dostupné z: <https://www.battery.cz/lithiove-baterie-lifepo4-li-ion/>
- [37] *Shop GWL | WB-LYP700AHA LiFeYPO4 (3.2V/700Ah)* [online]. [vid. 2020-04-06]. Dostupné z: https://shop.gwl.eu/_d2157.html#tab1

- [38] GMT, Posted 06 Jan 2019 | 16:00. To Boost Lithiumion Battery Capacity By Up To 70 Add Silicon - IEEE Spectrum. *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News* [online]. [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/energy/renewables/to-boost-lithiumion-battery-capacity-by-up-to-70-add-silicon>
- [39] *Enovix* [online]. [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://enovix.com/>
- [40] *Powerpack - Commercial & Utility Energy Storage Solutions | Tesla* [online]. [vid. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/powerpack>
- [41] *Press Kit | Tesla* [online]. [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.tesla.com/cs_CZ/presskit
- [42] *Tesla Powerwall* [online]. 2019 [vid. 2019-12-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Tesla_Powerwall&oldid=931219314
- [43] Nova Innovation on Twitter: „Our #TESS project uses the @Tesla Powerpack to enable the active management & storage of renewable generation to shape a reliable and predictable source of power from the tides #tidalenergy #Scotland #batterystorage #TESS <https://t.co/RP8vtyC9xp>” / Twitter. *Twitter* [online]. [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://twitter.com/NovaInnovation/status/1057621432732184576>
- [44] LAMBERT, Fred. Tesla slashes price of the Powerpack system by another 10% with new generation. *Electrek* [online]. 14. listopad 2016 [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://electrek.co/2016/11/14/tesla-powerpack-2-price/>
- [45] Tesla Powerwall & Powerpacks Per-kWh Lifetime Prices vs Aquion Energy, Eos Energy, & Imergy. *CleanTechnica* [online]. 10. květen 2015 [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2015/05/09/tesla-powerwall-powerblocks-per-kwh-lifetime-prices-vs-aquion-energy-eos-energy-imergy/>
- [46] LAMBERT, Fred. Tesla deploys another big 50 MWh Powerpack project in Australia. *Electrek* [online]. 16. listopad 2018 [vid. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://electrek.co/2018/11/16/tesla-powerpack-project-australia-megapack/>
- [47] *Flow battery* [online]. 2019 [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Flow_battery&oldid=922184539
- [48] *Elektrolyt* [online]. 2017 [vid. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektrolyt&oldid=15395969>
- [49] *File:Redox Flow Battery.jpg* [online]. nedatováno [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Redox_Flow_Battery.jpg
- [50] *System of Vanadium Redox Flow Battery | VRFB | LE SYSTEM* [online]. [vid. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://www.lesys.jp/english/redox/index.php>
- [51] *Vanadium redox battery* [online]. 2019 [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vanadium_redox_battery&oldid=912132981

- [52] Buy the VoltStorage SMART home battery and save on costs. *VoltStorage* [online]. [vid. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://voltstorage.com/en/voltstorage-smart-home-battery/>
- [53] GRACEFFA, Andre. *VoltStorage SMART Technical Datasheet* [online]. [vid. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://voltstorage.com/wp-content/uploads/2019/05/VoltStorage-SMART-Technical-Datasheet.pdf>
- [54] Vanadium Redox Flow storage technology for your home. *VoltStorage* [online]. [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://voltstorage.com/en/vanadium-redox-flow-energy-storage-technology/>
- [55] *VoltStorage Smart: VRF-Stromspeicher zum Festpreis* [online]. [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/stromspeicher/voltstorage-smart>
- [56] *PRODUCTS – Vionx Energy* [online]. [vid. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://www.vionxenergy.com/products/>
- [57] *PROJECTS – Vionx Energy* [online]. [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.vionxenergy.com/projects/>
- [58] *Vionx Energy – Long Run, Durable Energy Storage – Guaranteed* [online]. [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.vionxenergy.com/>
- [59] *ZBM2 zinc-bromine flow battery – Redflow* [online]. [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://redflow.com/products/redflow-zbm2/>
- [60] *Zinc–bromine battery* [online]. 2018 [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Zinc%E2%80%93bromine_battery&oldid=876174683
- [61] Redflow tells ASX „no probs" despite continuing cash bleed. *Stockhead* [online]. 1. říjen 2017 [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://stockhead.com.au/tech/redflow-tells-asx-no-probs-despite-continuing-cash-bleed/>
- [62] *Safety; Gas Emissions; Electrolyte Leaks - Redflow ZBM Quick Start Manual [Page 10]* [online]. [vid. 2020-01-10]. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/manual/1128262/Redflow-Zbm.html?page=10#manual>
- [63] Zinc Bromine Flow Batteries (ZNBR). *Energy Storage Association* [online]. [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/zinc-bromine-znbr-flow-batteries/>
- [64] *Commercial & Industrial (C&I) – Redflow* [online]. [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://redflow.com/applications/commercial-industrial/>
- [65] *Redflow-ZBM2-datasheet-1910-Public-Web.pdf* [online]. [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://redflow.com/wp-content/uploads/2019/10/Redflow-ZBM2-datasheet-1910-Public-Web.pdf>

- [66] Flow batteries and solar battery storage. *SolarQuotes* [online]. [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://www.solarquotes.com.au/flowbatteries.html>
- [67] *LSB (Large Scale Battery) reference platform – Redflow* [online]. [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://redflow.com/products/redflow-zbm2/redflow-lsb/>
- [68] *Redflow-LSB-November-2017-23-W.jpg (600×440)* [online]. [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://redflow.com/wp-content/uploads/2018/02/Redflow-LSB-November-2017-23-W.jpg>
- [69] *Redflow-LSB-November-2017-16-W.jpg (600×400)* [online]. [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://redflow.com/wp-content/uploads/2018/02/Redflow-LSB-November-2017-16-W.jpg>
- [70] *Redflow-LSB-November-2017-1-W.jpg (600×400)* [online]. [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://redflow.com/wp-content/uploads/2018/02/Redflow-LSB-November-2017-1-W.jpg>
- [71] KURZY.CZ. *AUD, australský dolar - převod měn na CZK, českou korunu* [online]. [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/kurzy.asp?a=X&mena1=AUD&mena2=CZK&c=44600&d=25.10.2019&convert=P%F8eve%EF+m%ECnu>
- [72] WEAVER, John Fitzgerald. „World’s smallest" zinc bromine residential flow batteries coming for lithium. *Electrek* [online]. 6. listopad 2017 [vid. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://electrek.co/2017/11/06/zinc-bromine-batteries-coming-for-lithium/>
- [73] S.R.O, Ušetřeno.cz. *Průměrná cena elektřiny za kWh v roce 2019 zdražila na 4,6 korun. Kdo ji prodává levněji?* [online]. [vid. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/cena-elektřiny-za-kwh-2019-cez-eon-pre-a-dalsi-dodavatele>
- [74] TECHNOLOGIE, Karlsruhe Institut fuer. *KIT - PI 2019* [online]. 18. říjen 2019 [vid. 2019-10-24]. Dostupné z: http://www.kit.edu/kit/pi_2019_134_colloquium-fundamentale-batterien-der-zukunft.php
- [75] *Salt water battery* [online]. 2020 [vid. 2020-05-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Salt_water_battery&oldid=951462243
- [76] LONDON, Main campus address: Imperial College, South Kensington CAMPUS, London SW7 2AZ, tel: +4420 7589 5111 Campus MAPS a information | About this site | This site uses cookies | Report incorrect content | Log IN. Non-toxic salt water battery prototype can charge in seconds | Imperial News | Imperial College London. *Imperial News* [online]. [vid. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.imperial.ac.uk/news/190596/non-toxic-salt-water-battery-prototype-charge/>
- [77] *9.4 Salt Water Batteries | Horizon Energy Curriculum* [online]. [vid. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.horizoncurriculum.com/chapter-9-batteries/9-4-salt-water-batteries/>

- [78] BRIGITTE. Off-Grid - farm in the US. *BlueSky Energy I Stromspeicher Batterien* [online]. [vid. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.bluesky-energy.eu/en/portfolio-items/off-grid-farm-in-the-us>
- [79] BRIGITTE. Saltwater Battery - Technology. *BlueSky Energy I Stromspeicher Batterien* [online]. [vid. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.bluesky-energy.eu/en/salt-water-battery-aib-technology/>
- [80] WORDPRESSADMIN. Greenrock Stacks and Combiner Box. *BlueSky Energy I Stromspeicher Batterien* [online]. [vid. 2020-01-14]. Dostupné z: <https://www.bluesky-energy.eu/en/greenrock-stacks-combiner-box-2/>
- [81] WORDPRESSADMIN. The Saltwater Battery. *BlueSky Energy I Stromspeicher Batterien* [online]. [vid. 2020-01-14]. Dostupné z: https://www.bluesky-energy.eu/en/saltwater_battery/
- [82] *BlueSky Energy* [online]. [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.idtechex.com/fr/research-article/bluesky-energy/14074>
- [83] BRIGITTE. Cost Comparison of Battery Storage. *BlueSky Energy I Stromspeicher Batterien* [online]. 2. srpen 2018 [vid. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.bluesky-energy.eu/en/2018/08/02/cost-comparison-of-battery-storage/>
- [84] *Constant Current (CC) 250 mA Napájecí zdroje LED | Mouser Česká Republika* [online]. [vid. 2020-04-08]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/Optoelectronics/LED-Lighting/LED-Lighting-Electronics/LED-Drivers-Power-Supplies/_/N-b1asl?P=1yzot00Z1yxt7by&pop=23chm
- [85] WORDPRESSADMIN. GREENROCK Business. *BlueSky Energy I Stromspeicher Batterien* [online]. [vid. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://www.bluesky-energy.eu/en/greenrock-business-3/>
- [86] WORDPRESSADMIN. GREENROCK Home. *BlueSky Energy I Stromspeicher Batterien* [online]. [vid. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://www.bluesky-energy.eu/en/greenrock-home-2/>
- [87] KURZY.CZ. *USD, americký dolar - převod měn na CZK, českou korunu | Kurzy.cz* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/kurzy.asp?a=X&mena1=USD&mena2=CZK&c=1&d=24.02.2020&convert=P%F8eve%EF+m%ECnu>
- [88] KURZY.CZ. *Kurz Eura, Euro EUR, aktuální kurzy koruny a měn | Kurzy.cz* [online]. [vid. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/nejlepsi-kurzy/EUR-euro/>
- [89] *Tesla Powerpack to Enable Large Scale Sustainable Energy to South Australia* [online]. 6. červenec 2017 [vid. 2020-04-09]. Dostupné z: https://www.tesla.com/cs_CZ/blog/tesla-powerpack-enable-large-scale-sustainable-energy-south-australia

- [90] Hybrid.cz. *Hybrid.cz* [online]. [vid. 2019-10-31]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/superkondenzatory-nahradi-v-budoucnu-lithium-iontove-baterie>
- [91] *Kondenzátor* [online]. 2019 [vid. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kondenz%C3%A1tor&oldid=17888159>
- [92] Our Fast Charging Battery Solution. *FlashCharge Batteries* [online]. [vid. 2019-10-24]. Dostupné z: <http://www.flashchargebatteries.com/solution/>
- [93] Our Fast Charging Battery Technology. *FlashCharge Batteries* [online]. [vid. 2019-10-31]. Dostupné z: <http://www.flashchargebatteries.com/technology/>
- [94] Renewable Energy Storage Applications. *FlashCharge Batteries* [online]. [vid. 2019-10-31]. Dostupné z: <http://www.flashchargebatteries.com/applications/renewable-energy-storage/>
- [95] Přečerpávací vodní elektrárna - princip a uspořádání. *oEnergetice.cz* [online]. [vid. 2020-01-11]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2/>
- [96] Operational costs of Hydropower plants? *ResearchGate* [online]. [vid. 2020-01-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/post/Operational_costs_of_Hydropower_plants
- [97] *Energy Vault – Ground-breaking energy storage technology enabling a planet powered by renewable resources* [online]. [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://energyvault.com/>
- [98] Fond, který stojí za společnostmi jako Uber či WeWork, nyní investuje do energetiky. *oEnergetice.cz* [online]. [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/fond-ktery-stoji-za-spolecnostmi-jako-uber-ci-wework-nyni-investuje-energetiky/>
- [99] DOLEŽEL, Michal. Se skladováním energie mohou pomoci betonové bloky. *Nazeleno.cz* [online]. 18. prosinec 2018 [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/se-skladovanim-energie-mohou-pomoci-betonove-bloky/>
- [100] *Energy Vault Announces Commercial Availability of Transformative Utility-Scale Energy Storage Technology Yielding Unprecedented Economic Benefits to Global Energy Providers* [online]. 7. listopad 2018 [vid. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.businesswire.com/news/home/20181106006096/en/Energy-Vault-Announces-Commercial-Availability-Transformative-Utility-Scale>
- [101] KELLY-DETWILER, Peter. Energy Vault Receives \$110 Million From SoftBank For Gravity-Assisted Power Storage. *Forbes* [online]. [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/peterdetwiler/2019/08/14/tower-of-power-110-million-investment-primis-energy-vault-to-take-on-global-energy-storage-markets/>
- [102] Způsobí jeřabová úložiště elektrické energie revoluci na trhu s akumulací energie? *oEnergetice.cz* [online]. [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/zpusobi-jarabova-uloziste-elektricke-energie-revoluci-trhu-akumulaci-energie/>

- [103] Tower of power: gravity-based storage evolves beyond pumped hydro. *Power Technology | Energy News and Market Analysis* [online]. 7. března 2019 [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.power-technology.com/features/gravity-based-storage/>
- [104] STAFF, Editorial. \$110 mln for the development of an extraordinary energy storage. *BiznesAlert EN* [online]. 23. srpna 2019 [vid. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://biznesalert.com/rowicki-skme-energy-storage-energy-vault/>
- [105] *Compressed-air energy storage* [online]. 2019 [vid. 2019-11-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Compressed-air_energy_storage&oldid=920502844
- [106] Hydrostor | Advanced Compressed Air Energy Storage. *Hydrostor* [online]. [vid. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.hydrostor.ca>
- [107] RATHI, Akshat. Storing energy in compressed air could finally become cheap enough for the big time. *Quartz* [online]. [vid. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://qz.com/1711536/canadian-startup-hydrostor-is-storing-energy-in-compressed-air/>
- [108] *Benefits – Hydrostor* [online]. [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.hydrostor.ca/benefits/>
- [109] *Hydrostor_Brochure_2020.pdf* [online]. [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: https://www.hydrostor.ca/wp-content/uploads/2020/01/Hydrostor_Brochure_2020.pdf
- [110] Home. *Highview Power* [online]. [vid. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.highviewpower.com/>
- [111] Plants. *Highview Power* [online]. [vid. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.highviewpower.com/plants/>
- [112] Benefits. *Highview Power* [online]. [vid. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.highviewpower.com/benefits/>
- [113] *Liquid Air Energy Storage Animation 2018* [online]. [vid. 2019-11-12]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?time_continue=6&v=kDvlh_aG7iA
- [114] Technology. *Highview Power* [online]. [vid. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.highviewpower.com/technology/>
- [115] Highview Power to Develop Multiple Cryogenic Energy Storage Facilities in the UK and to Build Europe's Largest Storage System. *Highview Power* [online]. [vid. 2019-11-12]. Dostupné z: https://www.highviewpower.com/news_announcement/highview-power-to-develop-multiple-cryogenic-energy-storage-facilities-in-the-uk-and-to-build-europes-largest-storage-system/
- [116] *What is an LNG terminal?* [online]. [vid. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://www.elengy.com/en/lng/what-is-an-lng-terminal.html>

- [117] SPECTOR, Julian. *Highview Power Completes UK Plant to Test 'Liquid Air' Storage Technology* [online]. 6. květen 2018 [vid. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/highview-power-completes-uk-liquid-air-storage-plant>
- [118] *Giga-Scale Cryogenic Battery Reaches \$140/MWh Levelized Cost of Storage | Neware battery testers* [online]. [vid. 2019-11-12]. Dostupné z: <http://www.newarebattery.com/giga-scale-cryogenic-battery-reaches-140-mwh-levelized-cost-of-storage/>
- [119] MOGHTADER, Alicia. *LIQUID AIR ENERGY STORAGE (LAES)* [online]. [vid. 2019-11-12]. Dostupné z: https://warwick.ac.uk/fac/sci/eng/research/grouplist/electricalpower/images/newsnews/hies2017/presentations/hies2017_highview.pdf
- [120] *Akr do Čtvereční metr převod* [online]. [vid. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.metric-conversions.org/cs/plochu/akr-do-ctverecni-metr.htm>
- [121] *Cryogenic energy storage firm teams with Tenaska to develop U.S. projects. pv magazine USA* [online]. 18. červenec 2019 [vid. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://pv-magazine-usa.com/2019/07/18/cryogenic-energy-storage-firm-teams-with-tenaska-to-develop-u-s-projects/>
- [122] *Multibrid M5000 - 5,00 MW - Wind turbine* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/22-multibrid-m5000#datasheet>
- [123] *Renewables: AREVA to supply Germany with offshore wind turbines worth 500 million euros* [online]. [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: <http://www.sa.areva.com/EN/news-948/renewables-areva-to-supply-germany-with-offshore-wind-turbines-worth-500-million-euros.html>
- [124] *2179.pdf* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/2179.pdf>
- [125] *HANSCRAFT FLOW JET 5000 -400V. Heureka.cz* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://cerpadla.heureka.cz/hanscraft-flow-jet-5000-400v/specifikace/>
- [126] *Online - Calculation - Air* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: http://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft_e.html
- [127] *Vstřikování paliva* [online]. 2019 [vid. 2020-06-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vst%C5%99ikov%C3%A1n%C3%AD_paliva&oldid=17726783
- [128] *Co je zemní plyn?* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.wingas.cz/o-zemnim-plynu/co-je-zemni-plyn.html>
- [129] *Methan* [online]. 2020 [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Methan&oldid=18191554>

- [130] *Cena 1 m3 plynu (aktuální) | 2020* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.energie123.cz/plyn/ceny-plynu/cena-1-m3/>
- [131] *PC-84844.pdf* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://portal.gov.cz/obcan/vestniky/eeuaau7/P:C-84844.pdf>
- [132] WPSOLROOT. How to Find Happiness With LiFePO4 (Lithium-Ion) Batteries. *Solacity Inc.* [online]. 30. srpen 2018 [vid. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://www.solacity.com/how-to-keep-lifepo4-lithium-ion-batteries-happy/>
- [133] ZOBAA, Ahmed Faheem. 2013. ENERGY STORAGE – TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS. Novi Sad: InTech. ISBN 978-953-51-0951-8.
- [134] BEDNÁŘ, F. Analýza možností akumulační tepelné elektrárny v podmínkách ČR. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 106 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.
- [135] VÝTISK, J. Zapojení chladičů kompresoru pro energetickou centrálu s akumulací elektrické energie – EA CAES: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2018, 72 s. Vedoucí práce: KOLARČÍK, K.
- [136] MARTINÁK, R. Využití stlačeného vzduchu pro akumulaci elektrické energie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 43 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
α	přebytek vzduchu pro spalování	[-]
Δi_{st_T}	rozdíl entalpií spalin na vstupu a výstupu z plynové turbíny	[J·kg ⁻¹]
Δi_{vz_12}	rozdíl entalpií vzduchu na výstupu a vstupu z kompresoru	[J·kg ⁻¹]
$\Delta p_{z_sp_kom}$	tlaková ztráta spalovací komory	[Pa]
ΔT_{ln_1}	střední logaritmický teplotní spád pro výměník 1	[°C]
ΔT_{ln_2}	střední logaritmický teplotní spád pro výměník 2	[°C]
Δt	rozdíl teplot vzduchu na vstupu a výstupu z kaverny	[°C]
ε	kompresní poměr suchého vzduchu	[-]
ε_T	expanzní poměr plynové turbíny	[-]
η_G	účinnost generátoru	[-]
η_K	účinnost kompresoru	[-]
η_T	účinnost plynové turbíny	[-]
η_{TP}	zpětná účinnost baterií Tesla Powerpack	[-]
η_{celk}	celková účinnost navrženého systému A-CAES	[-]
η_{mech}	mechanická účinnost převodovky mezi turbínou a generátorem	[-]
η_{sp_kom}	účinnost spalovací komory	[-]
κ_K	adiabatickým exponent suchého vzduchu	[-]
κ_T	adiabatický exponent pro tři a více atomové plyny	[-]
ρ_{kav_in}	hustota vzduchu v kaverně	[kg·m ⁻³]
ρ_{kav_out}	hustota vzduchu na výstupu z kaverny	[kg·m ⁻³]
$\rho_{pal} = \rho_{CH_4}$	hustota paliva – zemního plynu	[kg·m ⁻³]
ρ_{to_2}	hustota termooleje na výstupu z výměníku 1	[kg·m ⁻³]
ρ_{to_3}	hustota termooleje na vstupu do výměníku 1	[kg·m ⁻³]
ρ_{to_5}	hustota termooleje na výstupu z výměníku 2	[kg·m ⁻³]
ρ_{to_6}	hustota termooleje na vstupu do výměníku 2	[kg·m ⁻³]
$\rho_{to_stř_1}$	střední hodnota hustoty termooleje ve výměníku 1	[kg·m ⁻³]
$\rho_{to_stř_2}$	střední hodnota hustoty termooleje ve výměníku 2	[kg·m ⁻³]
$\tau_{návratnost}$	teoretická doba návratnosti investice výstavby navrženého systému A-CAES	[roky]
$\tau_{návratnost_TP}$	teoretická doba návratnosti investice výstavby akumulčního systému 414 akumulátorů Tesla Powerpack	[roky]
$\tau_{návrat_cykly}$	teoretická doba návratnosti investice výstavby navrženého systému A-CAES v cyklech	[cykly]

Symbol	Veličina	Jednotka
$\tau_{\text{návratnost_cykly}}$	teoretická doba návratnosti investice výstavby akumulčního systému 414 akumulátorů Tesla Powerpack v cyklech	[cykly]
$\tau_{\text{plnění}}$	doba plnění kaverny	[hod; s]
$\tau_{\text{větr_el}}$	doba denního provozu větrného parku	[hod]
τ_{vyb}	doba vypouštění celého objemu kaverny při úplném vybíjení systému	[hod; s]
$\tau_{\text{životnost_TP}}$	udávaná životnost akumulátorů Tesla Powerpack	[cykly]
C_{TP}	pořizovací náklady na Tesla Powerpack	[\$·kWh ⁻¹]
C_{ZP}	aktuální průměrná cena v korunách za metr krychlový zemního plynu	[Kč·m ⁻³]
$C_{kl_reg_en}$	cena za kladnou regulační energii	[Kč·MWh ⁻¹]
$C_{p_N_2-2}$	měrná tepelná kapacita dusíku na vstupu do výměníku 1	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_N_2-3}$	měrná tepelná kapacita dusíku na výstupu z výměníku 1	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_N_2-5}$	měrná tepelná kapacita dusíku na vstupu do výměníku 2	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_N_2-6}$	měrná tepelná kapacita dusíku na výstupu z výměníku 2	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_O_2-2}$	měrná tepelná kapacita kyslíku na vstupu do výměníku 1	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_O_2-3}$	měrná tepelná kapacita kyslíku na výstupu z výměníku 1	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_O_2-5}$	měrná tepelná kapacita kyslíku na vstupu do výměníku 2	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_O_2-6}$	měrná tepelná kapacita kyslíku na výstupu z výměníku 2	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_to_2}$	měrná tepelná kapacita termooleje na výstupu z výměníku 1	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_to_3}$	měrná tepelná kapacita termooleje na vstupu do výměníku 1	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_to_5}$	měrná tepelná kapacita termooleje na výstupu z výměníku 2	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_to_6}$	měrná tepelná kapacita termooleje na vstupu do výměníku 2	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_to_stř_1}$	střední hodnota měrné tepelné kapacity termooleje ve výměníku 1	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_to_stř_2}$	střední hodnota měrné tepelné kapacity termooleje ve výměníku 2	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_vz_2}$	měrná tepelná kapacita vzduchu na vstupu do výměníku 1	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_vz_3}$	měrná tepelná kapacita vzduchu na výstupu z výměníku 1	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_vz_5}$	měrná tepelná kapacita vzduchu na vstupu do výměníku 2	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$C_{p_vz_6}$	měrná tepelná kapacita vzduchu na výstupu z výměníku 2	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]

Symbol	Veličina	Jednotka
$c_{p_vz_stř_1}$	střední hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu ve výměníku 1	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{p_vz_stř_2}$	střední hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu ve výměníku 2	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
E_{el}	elektrický výkon na svorkách generátoru při vybíjení systému A-CAES	[MW]
E_{el_1TP}	kapacita jednoho akumulátoru Tesla Powerpack	[kWh]
E_{el_414TP}	celková kapacita akumulčního systému 414 akumulátorů Tesla Powerpack	[kWh]
$E_{el_plnění}$	elektrická energie dodaná větrným parkem při plnění kaverny A-CAES	[MJ]
E_{el_rok}	elektrická energie vyrobená generátorem při ročním provozu A-CAES 340 dní	[MWh]
$E_{el_rok_in}$	roční množství energie uložené do 414 akumulátorů Tesla Powerpack	[MWh]
$E_{el_rok_out}$	roční množství energie zpět získané z 414 akumulátorů Tesla Powerpack	[MWh]
$E_{el_skut_den}$	elektrická energie denně dodaná generátorem větrného parku (množství elektrické energie denně ukládané do Tesla Powerpack)	[MWh; kWh]
E_{el_vyb}	elektrická energie vyrobená generátorem při vybíjení systému A-CAES	[MJ]
f	skutečný palivový poměr	[-]
f_{st}	stechiometrický palivový poměr	[-]
i_{CH_4}	entalpie zemního plynu	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{CH_4_vzt}$	vztažná entalpie zemního plynu	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{CO_2_spal}$	entalpie oxidu uhličitého ve spalinách na konci spalovací komory	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{CO_2_spal_T_out}$	entalpie oxidu uhličitého ve spalinách za turbínou po expanzi	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{CO_2_spal_vzt}$	vztažná entalpie oxidu uhličitého ve spalinách	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{H_2O_spal}$	entalpie vody ve spalinách na konci spalovací komory	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{H_2O_spal_T_out}$	entalpie vody ve spalinách za turbínou po expanzi	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{H_2O_spal_vzt}$	vztažná entalpie vody ve spalinách	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{N_2_1}$	entalpie dusíku nasávaného kompresorem	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{N_2_2}$	entalpie dusíku za kompresorem	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{N_2_sp_kom_in}$	entalpie dusíku vstupujícího do spalovací komory	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{N_2_spal}$	entalpie dusíku ve spalinách na konci spalovací komory	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{N_2_spal_T_out}$	entalpie dusíku ve spalinách za turbínou po expanzi	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{N_2_spal_vzt}$	vztažná entalpie dusíku ve spalinách	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{N_2_vzt}$	vztažná entalpie dusíku	$[J \cdot kg^{-1}]$

Symbol	Veličina	Jednotka
$i_{O_2,1}$	entalpie kyslíku nasávaného kompresorem	[J·kg ⁻¹]
$i_{O_2,2}$	entalpie kyslíku za kompresorem	[J·kg ⁻¹]
$i_{O_2,sp,kom,in}$	entalpie kyslíku vstupujícího do spalovací komory	[J·kg ⁻¹]
$i_{O_2,spal}$	entalpie kyslíku ve spalinách na konci spalovací komory	[J·kg ⁻¹]
$i_{O_2,spal,T,out}$	entalpie kyslíku ve spalinách za turbínou po expanzi	[J·kg ⁻¹]
$i_{O_2,spal,vzt}$	vztažná entalpie kyslíku ve spalinách	[J·kg ⁻¹]
$i_{O_2,vzt}$	vztažná entalpie kyslíku	[J·kg ⁻¹]
i_{pal}	entalpie přiváděného paliva	[J·kg ⁻¹]
$i_{sp,T,in}$	entalpie spalin vstupujících do plynové turbíny	[J·kg ⁻¹]
$i_{sp,T,out}$	entalpie spalin za turbínou po expanzi	[J·kg ⁻¹]
$i_{spal,sp,kom}$	entalpie spalin na konci spalovací komory	[J·kg ⁻¹]
$i_{vz,1}$	entalpie suchého vzduchu nasávaného kompresorem	[J·kg ⁻¹]
$i_{vz,2}$	entalpie suchého vzduchu za kompresorem	[J·kg ⁻¹]
$i_{vz,sp,kom,in}$	entalpie vzduchu na vstupu do spalovací komory	[J·kg ⁻¹]
k_1	součinitele přestupu tepla pro výměník 1	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
k_2	součinitele přestupu tepla pro výměník 2	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
M_{CO_2}	molární hmotnost oxidu uhličitého	[kg·kmol ⁻¹]
M_{H_2O}	molární hmotnost vody	[kg·kmol ⁻¹]
M_{N_2}	molární hmotnost dusíku	[kg·kmol ⁻¹]
M_{O_2}	molární hmotnost kyslíku	[kg·kmol ⁻¹]
M_{CH_4}	molární hmotnost metanu	[kg·kmol ⁻¹]
m_{O_2,na,CH_4}	množství kyslíku potřebné pro spálení 1 kg paliva CH ₄	[-]
$m_{to,1}$	celková hmotnost termooleje procházející výměníkem 1 při plnění kaverny	[kg]
$m_{vz,kav}$	celková hmotnost vzduchu v naplněné kaverně	[kg]
$m_{vz,kav,vyb}$	hmotnost vzduchu dostupného pro vybíjení systému	[kg]
$\dot{m}_{H_2O,spal}$	hmotnostní tok H ₂ O obsažené ve spalinách	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{N_2,spal}$	hmotnostní tok N ₂ obsaženého ve spalinách	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{O_2,sp,kom}$	množství kyslíku vstupujícího do spalovací komory	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{O_2,spal}$	hmotnostní tok kyslíku ve spalinách	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{O_2,stech,spal}$	stechiometrický hmotnostní tok O ₂ přiváděného do spalovací komory	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{CO_2,spal}$	hmotnostní tok CO ₂ obsaženého ve spalinách	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{kav,in}$	hmotnostní průtok vzduchu vstupujícího do kaverny	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{kav,out}$	hmotnostní průtok odchozího vzduchu z kaverny	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{pal,sp,kom}$	skutečný hmotnostní průtok paliva přiváděného do spalovací komory	[kg _{pal} ·s ⁻¹]

Symbol	Veličina	Jednotka
\dot{m}_{pal_stech}	stechiometrický hmotnostní průtok paliva do spalovací komory	[kg _{pal} ·s ⁻¹]
\dot{m}_{sp_T}	hmotnostní průtok spalin vstupujících do plynové turbíny	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{spal_sp_kom}$	hmotnostní průtok spalin na konci spalovací komory	[kg·s ⁻¹]
\dot{m}_{to_1}	hmotnostní průtok termooleje výměníkem 1	[kg·s ⁻¹]
\dot{m}_{to_2}	hmotnostní průtok termooleje výměníkem 2	[kg·s ⁻¹]
\dot{m}_{vz_1}	množství suchého vzduchu nasávaného kompresorem	[kg·s ⁻¹]
\dot{m}_{vz_2}	hmotnostní průtok vzduchu na vstupu do výměníku 2	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{vz_sp_kom}$	hmotnostní průtok vzduchu vstupujícího do spalovací komory	[kg·s ⁻¹]
\dot{m}_{vz_stech}	stechiometrické hmotnostní průtok vzduchu vstupujícího do spalovací komory	[kg·s ⁻¹]
N_{TP}	počet akumulátorů Tesla Powerpack pro denní uložení energie z větrného parku	[-]
N_{celk}	celkové investiční náklady na výstavbu A-CAES v dolarech	[mil. \$]
$N_{celk_Kč}$	celkové investiční náklady na výstavbu A-CAES v českých korunách	[mil. Kč]
N_{celk_rok}	celkové roční náklady na provoz navrženého systému A-CAES	[mil. Kč]
$N_{celk_rok_TP}$	celkové roční náklady na provoz systému 414 Tesla Powerpack	[mil. Kč]
N_{inv_TP}	investiční náklady na 414 akumulátorů Tesla Powerpack v dolarech	[\$]
$N_{inv_TP_Kč}$	investiční náklady na 414 akumulátorů Tesla Powerpack v českých korunách	[mil. Kč]
N_{pal_rok}	roční náklady na palivo pro navržený systém A-CAES	[mil. Kč]
$N_{výstav}$	předpokládané celkové náklady na výstavbu akumulární elektrárny využívající stlačený vzduch	[\$·kW ⁻¹]
P_{K_id}	ideální výkon kompresoru	[MW]
P_{K_skut}	skutečný příkon kompresoru	[MW]
P_{T_id}	ideální výkon plynové turbíny	[MW]
P_{T_skut}	skutečný výkon plynové turbíny	[MW]
$P_{čerp_V1}$	příkon čerpadla na termoolej pro výměník 1	[kW]
$P_{čerp_V2}$	příkon čerpadla na termoolej pro výměník 2	[kW]
$P_{kl_reg_en}$	roční příjmy navrženého systému A-CAES za prodanou kladnou regulační energii	[mil. Kč]
$P_{kl_reg_en_TP}$	roční příjmy za prodanou kladnou regulační energii z 414 Tesla Powerpack	[mil. Kč]
$P_{větr_el}$	instalovaném jmenovitý výkon tří Multibrid 5000	[MW]

Symbol	Veličina	Jednotka
$P_{v\check{e}tr_el_skut}$	skutečnosti dostupný výkon tří Multibrid 5000	[MW]
p_{ZP}	tlak paliva – zemního plynu	[Pa]
p_{kav}	tlak vzduchu v kaverně	[Pa]
$p_{sp_T_in}$	tlak spalin vstupujících do plynové turbíny	[Pa]
$p_{sp_T_out}$	tlak spalin za plynovou turbínou	[Pa]
$p_{sp_kom_out}$	tlak spalin na výstupu ze spalovací komory	[Pa]
p_{vz_1}	tlak suchého vzduchu nasávaného kompresorem	[Pa]
p_{vz_2}	tlak suchého vzduchu za kompresorem	[Pa]
p_{vz_3}	tlak vzduchu na výstupu z výměníku 1	[Pa]
p_{vz_5}	tlak vzduchu na vstupu do výměníku 2	[Pa]
p_{vz_6}	tlak vzduchu na výstupu z výměníku 2	[Pa]
$p_{vz_sp_kom}$	tlak vzduchu vstupujícího do spalovací komory	[Pa]
Q_i^r	výhřevnost paliva – zemního plynu	[J·kg ⁻¹]
\dot{Q}_{pal}	energie uložená v palivu	[MW]
Q_{pal_vyb}	energie uložená v palivu při vybíjení systému A-CAES	[MJ]
$\dot{Q}_{vz_1} = \dot{Q}_{to_1}$	přenesený tepelný výkon ve výměníku 1	[MW]
$\dot{Q}_{vz_2} = \dot{Q}_{to_2}$	přenesený tepelný výkon ve výměníku 2	[MW]
$\dot{q}_{SK_red}^V$	objemové zatížení plamence	[MW·m ⁻³ ·MPa ⁻¹]
S_1	plocha protiproudého výměníku 1	[m ²]
S_2	plocha protiproudého výměníku 2	[m ²]
t_{ZP}	teplota paliva – zemního plynu	[°C]
t_{kav_in}	teplota vzduchu na vstupu do kaverny	[°C]
t_{kav_out}	teplota vzduchu na výstupu z kaverny	[°C]
$t_{sp_T_in}$	teplota spalin vstupujících do plynové turbíny	[°C]
$t_{sp_T_out}$	teplota spalin za turbínou po expanzi	[°C]
$t_{spal_sp_kom}$	teploty spalin na konci spalovací komory	[°C]
t_{to_2}	teplota termooleje na výstupu z výměníku 1	[°C]
t_{to_3}	teplota termooleje na vstupu do výměníku 1	[°C]
t_{to_5}	teplota termooleje na výstupu z výměníku 2	[°C]
t_{to_6}	teplota termooleje na vstupu do výměníku 2	[°C]
t_{vz_1}	teplota suchého vzduchu nasávaného kompresorem	[°C]
t_{vz_2}	teplota suchého vzduchu za kompresorem	[°C]
t_{vz_3}	teplota vzduchu na výstupu z výměníku 1	[°C]
t_{vz_5}	teplota vzduchu na vstupu do výměníku 2	[°C]
t_{vz_6}	teplota vzduchu na výstupu z výměníku 2	[°C]
$t_{vz_sp_kom}$	teplota vzduchu vstupujícího do spalovací komory	[°C]
$V_{aku_nádrž}$	objem akumulační nádrže na termoolej	[m ³]

Symbol	Veličina	Jednotka
V_{pal_rok}	objem paliva spotřebovaného během ročního provozu A-CAES	[m ³]
$V_{plamenec}$	objem plamenec	[m ³]
V_{vz_kav}	objem kaverny	[m ³]
\dot{V}_{to_1}	objemový průtok termooleje výměníkem 1	[m ³ ·hod ⁻¹]
\dot{V}_{to_2}	objemový průtok termooleje výměníkem 2	[m ³ ·hod ⁻¹]
$w_{H_2O_spal}$	hmotnostní zlomek H_2O obsažené ve spalinách	[-]
w_{N_2}	hmotnostní zlomky dusíku v suchém vzduchu	[-]
$w_{N_2_spal}$	hmotnostní zlomek N_2 obsaženého ve spalinách	[-]
w_{O_2}	hmotnostní zlomky kyslíku v suchém vzduchu	[-]
$w_{O_2_spal}$	hmotnostní zlomek kyslíku obsaženého ve spalinách	[-]
$w_{CO_2_spal}$	hmotnostní zlomek CO_2 obsaženého ve spalinách	[-]
$w_{ZP} = w_{CH_4}$	hmotnostní zlomek zemního plynu	[-]
x_{N_2}	molární zlomek dusíku v suchém vzduchu	[-]
x_{O_2}	molární zlomek kyslíku v suchém vzduchu	[-]
$x_{ZP} = x_{CH_4}$	molární zlomek zemního plynu	[-]
Z_{celk_rok}	celkový roční zisk navrženého A-CAES	[mil. Kč]
$Z_{celk_rok_TP}$	celkové roční zisky navrženého systému Tesla Powerpack	[mil. Kč]

Zkratka	Význam
3D	trojdimenzionální
AC	alternating current = střídavý proud
A-CAES	pokročilé úložiště energie ve stlačeném vzduchu
AU\$	australský dolar
aq	aqua = kapalný
atd.	a tak dále
BMS	vzdálený monitorovací systém správy baterií
BOP	Balance of plant = veškeré zařízení elektrárny
bat.	baterie
CAES	úložiště energie ve stlačeném vzduchu
CAPEX	kapitálové (investiční) náklady
CfK	pultrudovaný profil s laminováním uhlíkovými vlákny
CPUC	Komise pro veřejné služby v Kalifornii
cca	přibližně
Č1	čerpadlo pro termoolej 1
Č2	čerpadlo pro termoolej 2
ČR	Česká republika
DC	direct current = stejnosměrný proud

Zkratka	Význam
DOD	Depth of Discharge = hloubka vybití
DPH	daň z přidané hodnoty
EC–DMC	ethylenkarbonát-dimethylkarbonát
EES	Engineering Equation Solver – počítačový výpočetní program
EMS	system řízení energie
EUR	euro
G	generátor
GFK	pultrudovaný profil s laminováním skelnými vlákny
GVP	generátor větrného parku
IGBT	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
IRENA	Mezinárodní agentura pro obnovitelnou energii
K	kompresor
LAES	úložiště energie ve zkapalněném vzduchu
LCOED	bezprecedentní rovnoměrné náklady na dodanou energii
LCOS	rovnoměrné náklady na skladování
Li-ion	lithium-iontové
LNG	zkapalněný zemní plyn
LSB	Large Scale Battery – velká energetická úložiště
LTO	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$
max.	maximální
mil.	milión
OZE	obnovitelné zdroje energie
pH	vodíkový exponent
PT	plynová turbína
SK	spalovací komora
SoC	State of charge = stav nabití
SR+	kladná regulační energie
SSC	výrobce věže elektrárny Multibrid 5000 (zřejmě SSC Wind GmbH)
syst.	system
s	solid = pevný
tzn.	to znamená
tzv.	tak zvané; tak zvaný
UPS	Uninterruptible power supply = nepřerušitelný zdroj energie
USA	Spojené státy americké
V1	výměník vzduch-termoolej 1
V2	výměník vzduch-termoolej 2
VRFB	vanadiové redoxní průtokové baterie
ZBM2	zinko-bromová průtoková baterie

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Schéma sekundárního galvanického článku/akumulátoru [2].....	12
Obr. 2	Schéma sekundárního článku Li-ion baterie – upraveno z [15].....	13
Obr. 3	Schéma sekundárního článku LiFePO ₄ baterie – upraveno z [132].....	14
Obr. 4	Graf nabíjení LiFePO ₄ baterie – upraveno z [26].....	15
Obr. 5	Struktura nabíjecí baterie od Enovix – upraveno z [39].....	17
Obr. 6	Tesla Powerpack [40, 43].....	18
Obr. 7	Stavba a princip redoxní průtokové baterie – upraveno z [49].....	19
Obr. 8	Schéma vanadiové redoxní průtokové baterie – upraveno z [50].....	20
Obr. 9	Redoxní průtokové baterie VoltStorage SMART – upraveno z [52, 54].....	21
Obr. 10	Akumulační systém od VionX Energy [56].....	22
Obr. 11	Stavba ZBM2 baterie – upraveno z [61, 62].....	23
Obr. 12	Kontejnerové úložiště LSB [67, 68].....	25
Obr. 13	Interiér kontejnerového úložiště LSB [67, 69, 70].....	25
Obr. 14	Struktura článku slanovodní baterie od Bluesky Energy – upraveno z [80].....	26
Obr. 15	Nabíjení článku slanovodní baterie od Bluesky Energy – upraveno z [81].....	27
Obr. 16	Vybíjení článku slanovodní baterie od Bluesky Energy – upraveno z [81].....	27
Obr. 17	Akumulační systém GREENROCK Business od Bluesky Energy [85].....	28
Obr. 18	Tesla Powerpack akumulující elektrickou energii z větrných elektráren [89].....	29
Obr. 19	Schéma superkapacitoru od FlashCharge Batteries – upraveno z [92].....	30
Obr. 20	Schéma směru vývoje superkapacitorů od FlashCharge Batteries [93].....	32
Obr. 21	Schéma fungování přečerpávací vodní elektrárny [133].....	33
Obr. 22	Postupné vybíjení gravitačního úložiště od Energy Vault [100].....	34
Obr. 23	Gravitační technologie akumulace od Energy Vault na pobřeží [98].....	35
Obr. 24	Gravitační technologie akumulace od Energy Vault ve vnitrozemí [99].....	36
Obr. 25	Schéma A-CAES od Hydrostor – upraveno z [107].....	37
Obr. 26	Akumulační elektrárna CRYOBattery od Highview Power [115].....	39
Obr. 27	Srovnání CRYOBattery s jinými způsoby akumulace část 1. – upraveno z [114].....	39
Obr. 28	Srovnání CRYOBattery s jinými způsoby akumulace část 2. – upraveno z [114].....	40
Obr. 29	5MW úložiště energie od Highview Power instalované u Manchesteru [121].....	40
Obr. 30	Závislost výkonu větrné elektrárny Multibrid M5000 na rychlosti větru [122].....	42
Obr. 31	Větrné elektrárny Multibrid M5000 [122].....	42
Obr. 32	Schéma navrhovaného systému A-CAES – upraveno z [134].....	43
Obr. 33	Teplotní diagram pro výměník vzduch-termoolej 1.....	49
Obr. 34	Teplotní diagram pro výměník vzduch-termoolej 2.....	54
Obr. 35	Schéma navrženého systému A-CAES.....	66
Obr. 36	Schéma zapojení navrhovaného systému Tesla Powerpack.....	70
Obr. 37	Graf cash flow navržených systémů Tesla Powerpack a A-CAES.....	74

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Parametry Winston článku Lithium Yttrium [32, 37].....	16
Tab. 2	Parametry Tesla Powerpack [40–42, 44, 45].....	18
Tab. 3	Parametry VoltStorage SMART [52, 53, 55]	21
Tab. 4	Parametry akumulčních systémů VNX1200-6, VNX1200-8, VNX1200-10 [56]...	22
Tab. 5	Parametry zinko-bromové průtokové baterie ZBM2 [59, 65, 66]	24
Tab. 6	Parametry 48V slanovodní baterie od Bluesky Energy [79, 80, 82–84]	26
Tab. 7	Kapacita 48V slanovodní baterie od Bluesky Energy – upraveno z [79, 80].....	28
Tab. 8	Účinnost 48V slanovodní baterie od Bluesky Energy – upraveno z [79, 80].....	28
Tab. 9	Parametry 30kWh GREENROCK Business úložiště od Bluesky Energy [82, 85]...	28
Tab. 10	Srovnání vybraných zástupců elektrochemických akumulátorů	29
Tab. 11	Srovnání superkapacitorů od FlashCharge Batteries a jiných typů akumulace [92]....	31
Tab. 12	Srovnání A-CAES od Hydrostor s dalšími způsoby akumulace – upraveno z [109].	38
Tab. 13	Parametry větrné elektrárny Multibrid M5000 [122, 123]	41
Tab. 14	Fyzikální vlastnosti termooleje SHELL Thermia B [134].....	46
Tab. 15	Vzájemné srovnání parametrů navržených systémů Tesla Powerpack a A-CAES ...	73