



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

ACCUMULATION OF ELECTRICITY FROM RENEWABLE SOURCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Plíšek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Petr Plíšek
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 z obnovitelných zdrojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku akumulace elektrické energie se zaměřením na vztah akumulace a produkce el. energie z obnovitelných zdrojů. V práci bude zpracován přehled dostupných způsobů akumulace el. energie. Dále bude zpracován konkrétní návrh akumulace vyrovnávající nestabilitu produkce z fotovoltaické elektrárny.

Cíle diplomové práce:

- 1) Zpracovat přehled dostupných způsobů akumulace se zaměřením na akumulaci vhodnou pro spojení s obnovitelnými zdroji energie.
- 2) Zpracovat návrh akumulace ve stlačeném vzduchu pro vybranou fotovoltaickou elektrárnu.
- 3) Zpracovat technicko–ekonomické posouzení navrženého způsobu akumulace.

Seznam doporučené literatury:

DVORSKÝ, E. a HEJTMÁNKOVÁ, P. , Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073001187.

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

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 problematikou akumulace elektrické energie vyrobené z obnovitelných zdrojů. První část je zaměřena na popis možných způsobů akumulace, zvláště se zaměřením na ty způsoby, které jsou vhodné pro obnovitelné zdroje energie. Další část se věnuje návrhu akumulace energie ve stlačeném vzduchu pro vybranou fotovoltaickou elektrárnu. Nezbytností při návrhu určitého způsobu ukládání energie je i jeho ekonomická analýza, ta je obsahem poslední části práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

akumulace, energie, ekonomika, vzduch, elektrárna, fotovoltaika, efektivita, ukládání, baterie, obnovitelné zdroje energie

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the issue of accumulation of electricity produced by renewable sources. The first part focuses on the description of possible ways of accumulation, especially with focus on those methods, that are suitable for renewable energy sources. The next part deals with the design of the accumulation energy in the compressed air for the selected photovoltaic power plant. The necessity of designing a particular method of energy storage, is also its economic analysis, which is the content of the last part of the thesis.

KEYWORDS

accumulation, energy, economy, air, power station, photovoltaic, efficiency, storage, batteries, renewable energy source

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PLÍŠEK, Petr. *Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129638>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.d. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Bc. Petr Plíšek

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.d. za konzultace a odborné vedení této diplomové práce a čas, který vedení práce věnoval. Dále bych rád poděkoval všem učitelům a blízkým, kdo mi jakýmkoli způsobem během studia pomohl. ^M

OBSAH

Úvod	11
1 Způsoby akumulace elektrické energie	13
1.1 Úvod do problematiky	13
1.2 Základní formy akumulace elektrické energie.....	14
1.3 Historie akumulace elektrické energie.....	15
1.4 Olověné akumulátory	15
1.5 Superkondenzátory	16
1.6 Setrvačnickové akumulátory	17
1.7 Supravodivé akumulátory	18
1.8 Vodíkové hospodářství	19
1.9 Elektrochemické akumulátory	20
1.9.1 Lithiumiontové akumulátory	21
1.9.2 Průtokové baterie	25
1.10 Přečerpávací vodní elektrárny	26
1.10.1 PVE Dalešice.....	27
1.10.2 PVE Štěchovice II	29
1.10.3 PVE Dlouhé stráně	29
1.10.4 Přečerpávací vodní elektrárna Dněstr PSP	31
1.10.5 Mořské přečerpávací elektrárny	31
1.11 Tlakovzdušné akumulační elektrárny	33
1.11.1 Komponenty caes	34
1.11.2 Rozdělení Caes dle typu geologického uložště	34
1.11.3 Typy CAES	35
1.11.4 Příklady akumulačních elektráren v reálné praxi	37
1.12 Porovnání jednotlivých způsobů akumulace	39
1.13 Další aplikace pro velkou energetiku v probíhající vývoji.....	40
1.13.1 Systém Gravitricity.....	40
1.13.2 Systém Energy Vault.....	42
1.13.3 Akumulace elektrické energie ve zkapalněném vzduchu- highview power.....	44
2 Volba fotovoltaické elektrárny pro akumulaci elektrické energie.....	46
2.1 Volba fve elektrárny	46
2.1.1 Doba nabíjení systému	48
3 NÁVRH AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	50

3.1	Volba oleje pro výměníky	51
3.2	Výpočet kompresoru	52
3.3	Návrh prvního výměníku.....	55
3.4	Výpočet zásobníku vzduchu.....	60
3.5	Návrh druhého výměníku.....	62
3.6	Výpočet spalovací komory	66
3.7	Výpočet spalovací turbíny.....	72
3.8	Výpočet akumulární nádrže pro olej.....	75
3.9	Stanovení účinnosti adiabatického caes	76
3.10	Shrnutí výpočtu	78
4	Ekonomické zhodnocení navrženého systému akumulace	79
4.1	Investiční náklady.....	79
4.2	Náklady na palivo pro provoz adiabatického caes	80
4.3	Roční tržby	81
4.4	Výpočet teoretické doby návratnosti investovaných prostředků.....	82
	Diskuse.....	83
	Závěr	84
	Použité informační zdroje	86
	Seznam obrázků	94
	Seznam tabulek	95
	Seznam použitých zkratk	96
	Seznam použitých symbolů	97

ÚVOD

K současné civilizaci, zvláště v poslední době, neodmyslitelně patří využívání všech možných typů energie, které jsou současnými prostředky dostupné. Nejušlechtilější formou energie, kterou jako lidstvo známe a umíme vyrobit, je energie elektrická. Využívání elektrické energie je v současném světě jedním ze základních pilířů lidského života. Zvláště v rozvinutém světě je prakticky nemyslitelné, že by tato energie byla nedostupná. Jako lidé si však často nepřipouštíme ani její možný krátkodobý nedostatek. Není těžké si domyslet, jaké vážné příčiny by měl výpadek této energie, byť jen v řádu hodin, v kontextu celých států, či oblastí. Elektroenergetika je stabilní a nosnou součástí energetiky. Principem jejího získávání je přeměna různých forem energie a transport na místo konečného určení. Celý rozvoj lidstva je z velké části závislý na její snadné dostupnosti a relativně nízké ceně. Během průmyslové revoluce se ve velkém měřítku začalo využívat energie, která se odvozuje od fosilních paliv. Ať už je to zemní plyn, ropa, uhlí, případně paliva odvozená či upravená, ale mající původ právě ve fosilních palivech. Tento trend je z velké části platný a patrný až doposud. V posledních desetiletích však došlo ke značnému rozvoji obnovitelných zdrojů energie. Příčinou byl zajisté rozvoj technologií, vědy a výzkumu a dalších faktorů, včetně určité ekologické uvědomělosti. Pravděpodobně však hlavním důvodem byl fakt omezených zásob fosilních paliv a zrychlující se spotřeba energií. Problémem obnovitelných zdrojů, zvláště využívání solární energie a energie větru, je její velmi těžká predikovatelnost v krátkodobém měřítku. Pokud například nad velkou částí kontinentu bude oblačno nebo nebude vanout vítr a obráceně, přináší to velmi značné nároky na přenosovou soustavu a její regulaci. Tento problém bude pravděpodobně ještě částečně narůstat s rozvojem těchto forem využívání energie. Velkým problémem využívání elektrické energie je nemožnost jejího uchovávání ve větších objemech. Této problematice by se chtěla tato práce alespoň částečně dotknout. [3]

První část práce je zaměřena rešeršně. Zde byla snaha popsat hlavní možnosti ukládání elektrické energie. Některá zařízení jsou vhodná spíše pro lokální využití nebo drobnější aplikace. Akumulace elektrické energie ve větším měřítku je možná zvláště v přečerpávacích vodních elektrárnách a ve stlačeném vzduchu, tzv. CAES. Zvláště v poslední době jsou odbornou veřejností zmiňovány aplikace soustav vysokokapacitních baterií. Těmto třem variantám, které jsou vhodné pro velkou energetiku bude dán v rešeršní práci největší prostor. U přečerpávacích vodních elektráren, zvláště v hustěji obydlených oblastech, se značně omezila možnost jejich výstavby z hlediska odporu obyvatelstva nebo vyčerpání vhodných lokalit. Technologie využívající baterie pro ukládání velkých objemů elektrické energie jsou dosud značně nákladné a jejich aplikace potřebují další vývoj. V poslední části rešerše uvedu další perspektivní způsoby akumulace elektrické energie, které mohou sloužit dalším zájemcům o problematiku jako inspirace pro další studium. Vývoj dalších metod akumulace se v poslední době velmi urychluje se stále rychlejším nástupem elektromobility a legislativních zásahů politiky. Jmenujme například Green Deal Evropské unie.

Tato diplomová práce se bude v praktické části zabývat návrhem akumulace elektrické energie ve stlačeném vzduchu. Jako zdroj elektrické energie bude zvolena fotovoltaická elektrárna Ševětín. Tento způsob ukládání elektrické energie není dosud běžně využíván,

jeho vývoj stále pokračuje. Nicméně ve vhodných lokalitách, zvláště s již funkčními podzemními uložišti zemního plynu nebo vzduchotěsnými jeskyněmi apod. se tato možnost jeví perspektivně.

V poslední části práce bude provedeno ekonomické zhodnocení navrženého způsobu akumulace elektrické energie a bude vypočítána návratnost investice.

1 ZPŮSOBY AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Podstatou myšlenky akumulace elektrické energie je její uchování v době přebytku a využití v době nedostatku. Jednotlivými formami akumulace, které nám umožňují akumulovat elektrický proud se zabývá první část diplomové práce.

1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Výrazem akumulace elektrické energie jsou označeny technologie, které využívají vratné chemické nebo vratné fyzikální procesy. Mají společné to, že elektrický proud je jak vstupní, tak výstupní komoditou. Pokud budeme brát akumulaci elektřiny v nejužším smyslu slova, zahrnuje jen kondenzátory a indukčnosti. Energie je v nich uložena buď v elektromagnetickém nebo elektrostatickém poli. Přiradit k nim můžeme také akumulátory a superkapacitory. V nich výše zmíněné vratné chemické reakce probíhají samostatně bez účasti dalšího zařízení. V širším smyslu slova může akumulace elektřiny zahrnovat i přečerpávací vodní elektrárny, setrvačníky nebo akumulaci elektřiny s využitím stlačeného vzduchu. Můžeme ale zahrnout i technologie, u kterých není přeměna nazpět na elektřinu vůbec možná nebo sice možná je, ale využívá se meziprodukt. Jedná se např. o ohřev vody, výroba vodíku a poté výroba syntetického metanu. [5, 6]

Pro využívání obnovitelných zdrojů energie a pro jejich smysluplné rozšíření je nezbytná právě akumulace energie, a nejen pro obnovitelné zdroje. U neobnovitelných a velkých elektráren je problém s omezenou regulací výkonu. U uhelných elektráren trvá rozjezd na plný výkon i půl dne a u jaderné elektrárny to může trvat až několik týdnů. U solárních a větrných elektráren se nachází zase problém nekonstantního výkonu, protože nemůžeme ovlivnit intenzitu slunečního záření nebo sílu větru. To se dá částečně řešit vodními elektrárnami, případně inteligentní rozvodnou sítí, ale ani takováto řešení nejsou stoprocentní. A to je důvod, proč je nutné přebytečnou energii akumulovat pro případ nedostatku energie, kdy se z těchto zásob používá. Tímto mechanismem se můžou srovnávat výkyvy v odběru energie z distribuční sítě.

Akumulace energie se může rozdělit na několik typů podle toho, na jakou (odlišnou) formu se převádí. V této formě se uskládá s větší efektivitou a může se zpět přeměnit na elektrickou energii nebo v případě potřeby ještě na jinou formu. Tyto jednotlivé typy můžeme odlišit podle oblastí výkonů, ve kterých akumulací systémy pracují, dále podle účinnosti, doby (během které jsou schopny uloženou energii uchovávat, aniž by docházelo k nadměrným ztrátám energie), dále podle životnosti systému atd. [7]

Akumulace elektrické energie stále nabývá na významu, stává se z ní prakticky nutnost. Významným impulsem je značný rozvoj využívání k přírodě šetrných a obnovitelných zdrojů elektrické energie. Značná část těchto zdrojů má jeden hlavní nedostatek, a to je velmi těžce předvídatelný objem výroby a jeho průběh v čase. Různé akumulací systémy budou také stěžejní pro tzv. chytré sítě, kdy bude docházet k promyšlenější vazbě mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Je patné, že v této oblasti energetiky se otevírají možnosti dalšího výzkumu a vývoje.

1.2 ZÁKLADNÍ FORMY AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Základní formy akumulace el. energie jsou [4, 5]:

Mechanické

- Kinetická – setrvačníky
- Potenciální – Přečerpávací vodní elektrárna
- Tlaková – tlakový vzduch

Elektrická

- Kondenzátory – nízká kapacita
- Super kondenzátory – zvýšená kapacita,
- Supravodivé technologie

Tepelné

- Přírodní materiály
- Roztavené soli, kryogenika, eutektické materiály

Elektrochemická

- Tradiční akumulátory s elektrolyty
- Elektrochemické palivové články – REDOX
- Palivové články

Chemické

- Vodík, biopaliva, syntézní plyny, syntetický metanol

1.3 HISTORIE AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Nejstarším akumulátorem energie je setrvačnick. Byl pravděpodobně využíván několik tisíc roků př. Kr. Zlomem v akumulaci el. energie se stal rok 1859. Francouzský fyzik G. R. Planté objevil olověný akumulátor. Základem je pár olověných desek, které jsou ponořeny do nádoby s roztokem kyseliny sírové. Od tohoto roku začal rozvoj odvětví. [8, 9]

1.4 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY

Olověné akumulátory jsou technická zařízení, která jsou hojně využívána v dopravě. Kromě svého uplatnění při startování motorů automobilů jsou důležité i pro železniční dopravu a v elektrických vozících. [5, 8]

Jeho historie sahá až do 19. století, kdy Francouz G. R. Planté použil dvě olověné desky, postavil je naproti sobě a ponořil do roztoku kyseliny sírové. Díky chemické reakci se na povrchu desek začne vytvářet síran olovnatý. To se děje na akumulátoru, který není připojen k elektrickému proudu. Pokud ho připojíme ke stejnosměrnému napětí začne se nabíjet. Během tohoto procesu se na katodě začne usazovat olovo a na anodě vznikne oxid olovičitý. Rozdíl bude i v barvě obou elektrod. Anoda bude mít červenohnědou barvu, zatímco katoda šedou. Těmito chemickými procesy se vytvoří galvanický článek. Napětí mezi elektrodami bude 2,1 V. Pokud na takovýto galvanický článek připojíme nějaké zařízení, začne se vybíjet. Během vybíjení běží opačné chemické reakce než během procesu nabíjení. Nicméně napětí se mezi elektrodami nemůže dostat pod hodnotu 1.8 V. [5, 8]

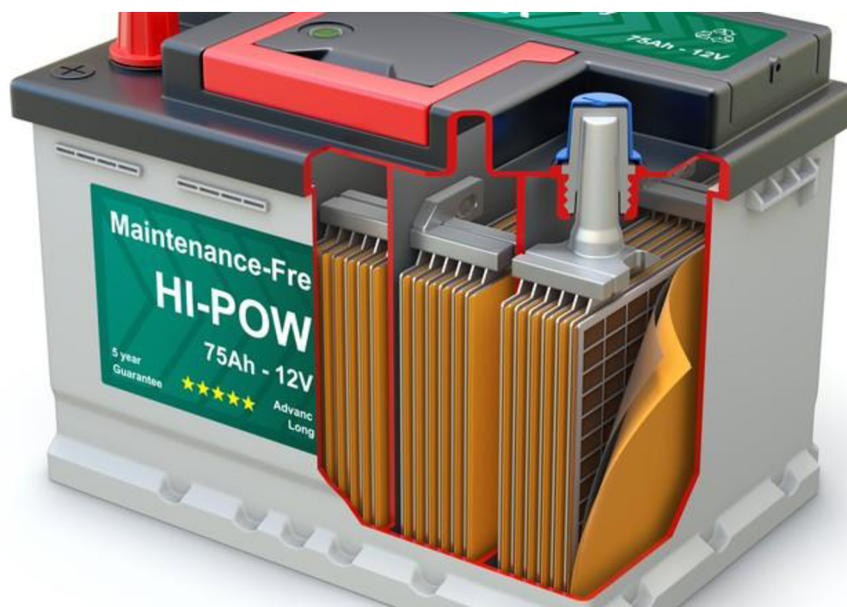
Dnešní akumulátory mají nádobu, ve které se nachází větší množství destiček, tvořících páry a jsou od sebe separovány pórovitými separátory. Napětí, které mohou dodávat je 6, 12, 24 nebo 48 V. To se ovlivňuje tím, kolik článků spolu spojíme pomocí olověných spojek. Jejich účinnost se pohybuje kolem 80 %. V automobilové dopravě se nejčastěji používají akumulátory s napětím 12 V. Vydrží i 500 nabití a disponují kapacitou 50 Ah. [5, 8]

Bezúdržbový olověný akumulátor je typ olověného akumulátoru vyvinutého v poslední čtvrtině 20. století. Akumulátor navíc obsahuje ventily, které jsou použity z důvodu případného uvolnění plynů při velmi rychlém nabíjení nebo vybíjení. Časté uvolňování plynů ale není vhodné z důvodu možného vysušení akumulátoru. Elektrolyt je umístěn v separátoru, díky tomu může akumulátor pracovat v různé poloze. Bezúdržbový olověný akumulátor je tvořen menším množstvím elektrolytu než starší typ, který má elektrody elektrolytem zaplaveny. Velkou výhodou tohoto typu akumulátoru je možnost reakce vodíku a kyslíku, kdy vzniká voda. Díky tomu nedochází k vysušování během cyklu. Tlak reakce je 0,14 bar. V bezúdržbovém olověném akumulátoru se téměř netvoří přepětí na rozdíl od akumulátoru se zaplavenými elektrodami. Gelový typ bezúdržbového akumulátoru by ale neměl být nabíjen naplněno, aby nedošlo k odvětrání. Negativem olověných akumulátorů je jejich základní součást a to olovo, které se ještě nepodařilo plnohodnotně nahradit. Snahy již byly značné, zvláště ze strany sdružení na ochranu přírody, ale pravděpodobně se s tímto akumulátorem budeme potkávat i v budoucnu. Díky recyklaci drtivé většiny zařízení není ekologické riziko velké. [13]

Nejčastějšími typy olověných bezúdržbových akumulátorů jsou následující:

typ SLA, běžně používaný v zařízeních zdravotnické péče, nemocnicích, vyznačují se uživatelskou nenáročností a nízkou cenou.

typ VRLA – jedná se o výkonnější akumulátory než předešlé a díky tomu mají také větší rozměry. Slouží jako záložní zdroje v telekomunikacích a dále v rozsáhlých zařízeních, jako letiště, úřady veřejné správy apod. [13]



Obr. 1 Řez olověným akumulátorem [13]

1.5 SUPERKONDENZÁTORY

Superkondenzátory patří mezi elektrochemické kondenzátory. Jedná se tedy o elektrochemické přístroje sloužící k uchování elektrické energie, a to dvěma způsoby. Prvním je chemická oxidačně-redukční reakce. Jedná se o tzv. pseudokondenzátory pracující na chemickém principu, kdy chemická reakce probíhá na elektrodách. [5, 8, 16]

Druhý typ žádnou oxidačně-redukční reakci nevyužívá, ale pracuje s tzv. elektrickou dvojrůstvou, kdy je náboj na elektrodu vázán ne chemickou reakcí ale elektrostaticky. Označují se jako EDCL kondenzátory. V nich se nachází dvě elektrody, které jsou obě elektricky nabitě, ale s opačným nábojem. Ionty s opačným nábojem jsou k elektrodě přitahovány a snaží se tak snížit náboj na elektrodě, ke které jsou přitahovány. Síly, které na tyto ionty působí, jsou především elektrostatické, ale i adsorpční a koncentrační. K výrobě elektrod se dnes používá grafit nebo uhlíkové saze, zajistí se tak maximální možný povrch elektrod (až $3\,000\text{ m}^2/\text{g}$) a tím se zvýší i kapacita kondenzátoru (kapacita dvojrůstvy je totiž pouze $50\text{ mF}/\text{cm}^2$). Navíc u těchto typů kondenzátorů se zvyšuje i

jejich životnost, protože elektrická energie je uložena jako náboj, a ne v podobě chemické reakce. [5, 8, 16]



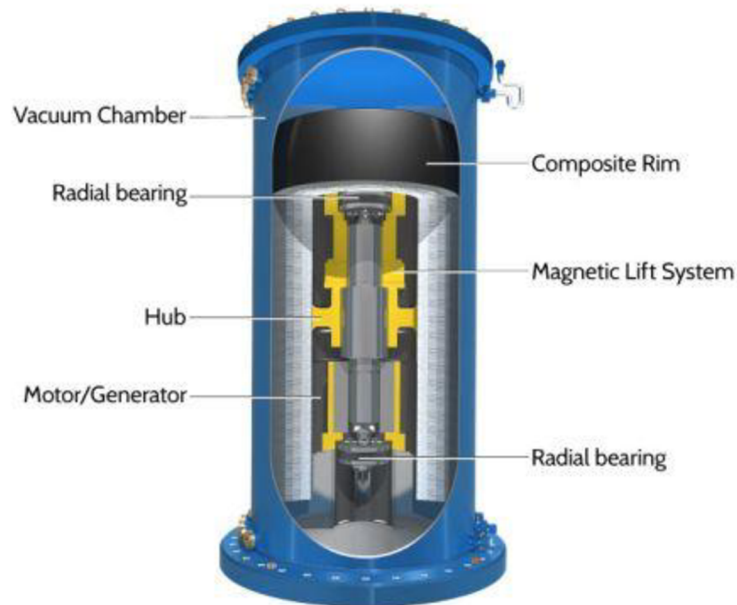
Obr. 2 Superkondenzátory [20]

1.6 SETRVAČNÍKOVÉ AKUMULÁTORY

Setrvačnickové akumulátory patří mezi nejstarší akumulátory vůbec. První známé využití setrvačnicku bylo v hrnčířství, kdy hrnčíř nohou roztáčí kotouč, který se potom setrvačností točí spolu s hrnčířskou hlinou, se kterou daný člověk pracuje. V současné době se používá pro vyrovnání chodu pístových spalovacích motorů. [5, 8]

Setrvačnick pracuje na principu dynamu. Častým typem použití bývá využití setrvačnicku s co možná největší hmotností, který spojíme s hřídelí elektromotoru. Elektromotor je připojen ke zdroji elektrické energie a setrvačnick akumuluje energii jako dynamo. Takto „uchovanou“ energii je poté schopný vrátit. [5, 8]

Pro ochranu počítačových systémů v průmyslu při krátkodobém výpadku v elektrické síti se dnes občas využívá právě setrvačnickových akumulátorů. Pro jejich výrobu se používají lehčí materiály jako plast a skříň ve které je buď vakuum nebo helium. Setrvačnickový akumulátor poté pracuje s otáčkami v řádech tisíců za minutu. Pokud se použije jako materiál kompozit s přídavkem uhlíkových vláken a nechá se otáčet ve vakuu, dosahuje 20 000 otáček za minutu. Pokud se zkombinují magnetická a mechanická ložiska, může pracovat až deset let bez přerušení otáčení. Navíc velkou výhodou je jejich velká účinnost, a to více než 80 %. [5, 8]



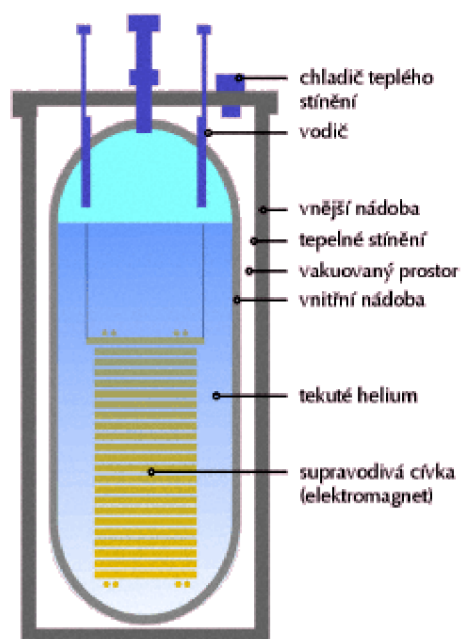
Obr. 3 Setrvačnicková baterie [84]

1.7 SUPRAVODIVÉ AKUMULÁTORY

Supravodivé akumulátory pracují na principu tzv. supravodivosti, tedy stavu, kdy materiály prakticky nemají elektrický odpor. Objev této vlastnosti je připisován Holanďanovi Kammerlinghovi Onnesovi na počátku 20. století. První „přístroj“ pracující s principem supravodivosti vyrobil ze rtuti, kterou zmrazil do smyčky v kapalném heliu. V něm indukoval po mnoho týdnů elektrický proud. V současnosti je možné navodit vlastnost supravodivosti i v kapalném vodíku nebo dusíku u různých slitin a kovů případně dokonce i ve speciálních typech keramiky. [5, 8]

V dnešní době jsou tyto akumulátory výjimečně využívány při výrobě např. čipů. Jejich úkolem je zabránit sebemenším výpadkům elektrické energie, která by mohla mít fatální dopad na výrobu. [5, 8]

Akumulátory, které jsou dnes vyráběny, jako např. UPS – Uninterruptible Power Supplies nebo SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage, pracují s účinností vyšší než 95 %. Jejich ztráta je okolo 0,3 kWh v průběhu 24 hodin a na výraznější pokles napětí v síti jsou schopné zareagovat do 0,2 mikrosekundy. [5, 8]



Obr. 4 Supravodivý akumulátor menších rozměrů [15]

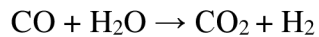
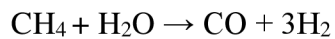
1.8 VODÍKOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ

Vodíkovou akumulaci chápeme jako výrobu vodíku elektrolýzou vody. Vzniklý vodík se poté musí jímat a uskladnit. Později je možno vodík oxidovat za vzniku jiného typu energie, tepelné, mechanické příp. elektrické. Oxidovat se může vodík buď kontrolovaně v palivovém článku elektrochemicky nebo přímo spalováním ve spalovacím motoru nebo v plynovém kotli. Tento způsob akumulace energie se nabízí u elektráren využívajících obnovitelné zdroje jako větrné nebo solární fotovoltaické elektrárny. Je možnost takovýmto způsobem uložit přebytečnou energii a šetřit rozvodnou síť před nevyváženou dodávkou elektrické energie. [5, 17, 18, 19]

Nicméně v současnosti se vodík vyrábí z fosilních paliv a biomasy jejich zplynováním a je součástí syntetických plynů. Jeho podíl na celkové produkci energie je ale pouze 1 %, většinou vyrobený právě z fosilních paliv. V raketových a proudových motorech se využívá kapalný vodík. Možností je i využití ve spalovacích motorech, nicméně k využití takovéhoho typu paliva musí být motory i speciálně zkonstruovány. [5, 17, 18, 19]

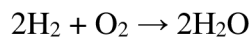
Abychom vyrobili 1 kg vodíku během elektrolýzy vody, musíme dodat 38 kWh energie, pokud počítáme s účinností okolo 90 %. Pokud jej chceme i zkapalnit, musíme k tomuto množství energie dodat ještě kolem 10 kWh navíc. Velkým plusem pro vodík jako palivo je jeho výhřevnost, která převyšuje výhřevnost ostatních paliv (okolo 100 MJ/kg). Navíc hlavním odpadním produktem během spalování je vodní pára, aniž by se uvolnily oxidy síry nebo uhlíku. Vzniká pouze malé množství oxidů dusíku. [5, 17, 18, 19]

Jiným způsobem, jak získat vodík, je reakce metanu a vody za teplot v rozmezí 800 – 1 700 °C. Chemická rovnice této reakce vypadá takto [17, 18, 19]:

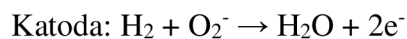


Místo, kde se vodík získává, se označuje jako fotochemický reaktor, který využívá koncentrovaného slunečního záření pro získání potřebné teploty. Vodík ale vyžaduje vysoké nároky na uskladnění. Musí být uložen v tlakových zásobnících jejichž materiály nereagují s vodíkem. Vodík má schopnost pronikat do krystalické mřížky některých materiálů a zapříčinit jejich zkřehnutí. Další možností je nechat vodík reagovat s kovovým práškem, za vzniku hydridu kovu. Nebezpečí vodíku tkví v jeho výbušnosti. Stačí jen nepatrné množství uniklé do vzduchu a vytvoří se vysoce výbušná směs. Elektrochemickou reakcí se poté energie uložená ve vodíku převede na potřebnou elektrickou energii. K tomu slouží palivové články. Proces se označuje jako studené spalování. Napětí článku mírně přesahuje 1 V. Během procesu se uvolní nepatrné množství tepla. V průběhu reakce je nezbytné odstraňovat zplodiny a přivádět vodík a okysličovadlo. Elektrody jsou většinou vyrobeny z ušlechtilých kovů jako platina, jsou pórovité a mezi nimi je elektrolyt. Samotná reakce probíhá uvnitř pórů (třífázové rozhraní – palivo, okysličovadlo a elektroda) a elektroda slouží zároveň jako katalyzátor reakce. [5, 17, 18, 19]

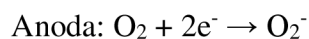
Reakce:



Iontová rovnice:



Dva volné elektrony přejdou na elektrodu.



Dva elektrony jsou z elektrody odebrány [17, 18, 19]

1.9 ELEKTROCHEMICKÉ AKUMULÁTORY

Mezi elektrochemické akumulátory patří nikel-ocelové akumulátory označované zkratkou NiFe. Jejich vynálezcem byl T. A. Edison. Své uplatnění našly především v elektronice jako jsou mobilní telefony, kamery, počítače a další. Také jsou využívány v železniční dopravě. Rozdíl mezi nikel-ocelovými a olověnými akumulátory je v materiálech klíčových součástí. U NiFe jsou desky vyrobeny z oceli a niklu, jak napovídá označení, a součástí elektrolytu je hydroxid draselný. Oproti olověnému akumulátoru mají ale nižší napětí a to jen 1,4 V. [5, 8]

Dalším typem elektrochemických akumulátorů s označením NiCd je akumulátor nikl-kadmiový. Opět se hojně využívá v elektronice. Jeho velkou nevýhodou je paměťový efekt, kdy je nutné nechat baterii zcela vybit a teprve potom ji připojit k nabíječe. Pokud se tento postup nedodrží, akumulátor ztrácí svou kapacitu. Naopak výhodou je rychlé nabíjení, a to i za méně než jednu hodinu. Umožňuje až 3000 nabití. Napětí je srovnatelné s NiFe s hodnotou 1,2 V a kapacita se pohybuje v hodnotách od 0,3 do 8 Ah. [5, 8]

NiCd je ale v dnešní době nahrazováno akumulátory bez obsahu kadmia z ekologických důvodů. Používají se lithiumentové a metalhydridové akumulátory se zkratkami NiMH respektive Li-Ion. Mají oproti nikl-kadmiovým akumulátorům vyšší kapacitu, a to až třikrát. Velkou výhodou lithiumentových akumulátorů je odstranění nedostatku v podobě paměťového efektu, vyšší je ale také cena. [5, 8]

Pro budoucnost jsou perspektivní zinko-vzdušné nebo sodíko-sírové akumulátory. Mají vyšší výkon, proto je předpokládáné využití v automobilovém průmyslu. [5, 8]



Obr. 5 Ni-Cd akumulátor [14]

1.9.1 LITHIUMENTOVÉ AKUMULÁTORY

Lithiumentové akumulátory, (zkratka Li-ion) patří mezi lithiové akumulátory a jsou využívány v různých elektronických zařízeních jako jsou notebooky a další IT zařízení, malé spotřebiče, aku nářadí nebo jako systémy skladování energie a v dalších oblastech. Tyto baterie mají, díky využití lithia, vyšší hustotu elektrické energie než např. olovené akumulátory nebo další typy baterií. Je to díky tomu, že je lithium nejlehčím kovem v periodické soustavě prvků. Principem nabíjení a vybíjení je pohyb lithiových iontů mezi elektrodami tedy katodou a anodou. [21], [23]

Akumulátory se skládají ze 4 součástí: Katody, anody, separátoru a elektrolytu. Katoda je zdrojem lithiových iontů. Z důvodu nedostatečné stability lithia jako prvku se pro výrobu katody používají sloučeniny lithia. Materiály, kterými bývá katoda tvořena, jsou např.: LiCoO_2 nebo LiMn_2O_4 . [21], [22], [23]

Prvkem využívaným pro výrobu anody je uhlík, většinou v podobě grafitu. Nicméně je snaha o vývoj nových anodových materiálů. Příkladem může být grafen, kdy z povrchu

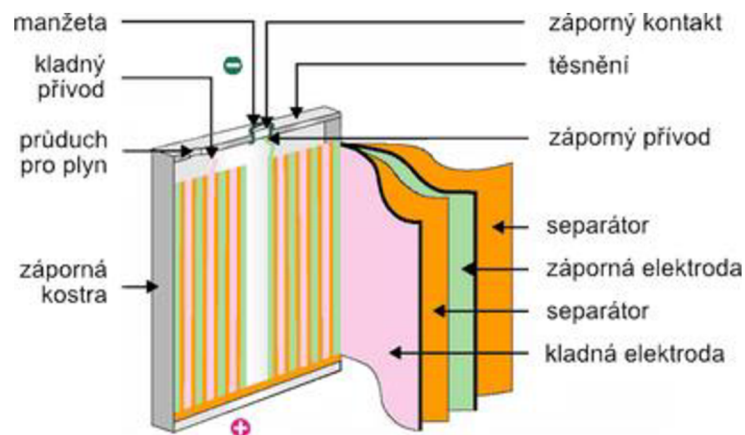
krystalů grafitu byly mikromechanicky odstraněny monovrstvy atomů. Grafen disponuje velkým specifickým povrchem – $2630 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. Nicméně náročnost jeho výroby a také vysoká cena jsou překážkou pro větší rozšíření jeho použití. Další součástí akumulátoru je separátor. Tato součást slouží k oddělení katody a anody, a tím brání zkratu, zároveň ale musí umožnit pohyb iontů mezi elektrodami. Jedná se o mikroporézní membránu vyráběnou většinou ze syntetických materiálů jako polyethylen (PE) nebo polypropylen (PP). Čtvrtou součástí akumulátoru je elektrolyt, který se využívá jako médium umožňující pohyb iontů lithia mezi elektrodami. Musí být tedy dostatečně iontově vodivý. Jako elektrolyt se často používá lithium hexafluorofosfát (LiPF_6) v nepolárním organickém rozpouštědle. [21], [22], [23]

V průběhu nabíjení nebo vybíjení dochází k přesunům iontů lithia (při nabíjení z kladné (katody) na zápornou elektrodu (anodu), při vybíjení v opačném směru). Lithiové ionty ale se samotnou zápornou elektrodou chemicky nereagují tedy s materiálem, ze kterého je vyrobena. Jen se do její struktury vmísí – interkalují. Neprobíhá tedy chemická reakce jako u jiných typů akumulátorů. To prodlužuje životnost lithiumiontových akumulátorů a zároveň nedochází k výrazným změnám výkonu. Další výhodou, kterou disponují, je jejich vyšší napětí na článek – nabíjecí je 4,2 V, jmenovité má hodnotu 3,6 V. Díky tomuto napětí mají také vyšší energetickou hustotu. Zařízení, které jako zdroj napájení využívá právě tyto akumulátory, má také prakticky konstantní vstupní napětí. To je dáno téměř plochou vybíjecí napěťovou křivkou. [21], [22], [23]

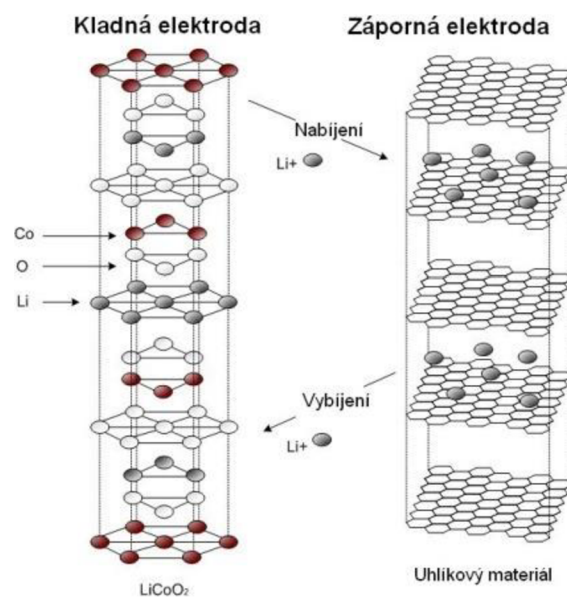
Nevýhodou těchto akumulátorů je nebezpečí požáru. Pokud dojde k poškození článku, může dojít ke zkratu mezi jednotlivými vrstvami. Zvýšené riziko požáru je především při např. propíchnutí článku. V krátkém čase dochází ke vzniku množství tepla přeměnou energie uložené v akumulátoru. Tím může dojít k zapálení materiálů, které se nachází v blízkosti akumulátoru. Pokud dojde k poškození, které sice nezpůsobí zkrat, ale umožní pronikání vzduchu dovnitř článku, tato skutečnost vede ke zničení akumulátoru. Dochází k tomu z důvodu reakce lithia a sloučenin obsahujících tento prvek se vzdušným kyslíkem a také s vlhkostí, což má za následek degradaci těchto sloučenin. Dalším faktorem negativně působícím na akumulátor je i nízká okolní teplota, která snižuje jeho výkon. Mezi negativa také počítáme ztrátu kapacity v průběhu času po prvním nabití, a to i tehdy, kdy není článek využíván. Dochází totiž k postupné degradaci materiálů tvořících vnitřek akumulátoru. [22] [23]

Mezi negativa také můžeme započít zvyšující se cenu lithia, kterou do jisté míry podporuje zvyšující se poptávka ze sektoru elektrických automobilů. [21], [22], [23]

Tyto akumulátory jsou často používány v serioparalelním řazení. Používá je např. firma Tesla u svých elektromobilů, kdy právě využívají množství malých válcových článků, které spojují serioparalelně. [23]



Obr. 6 Řez lithiovým akumulátorem [24]



Obr. 7 Nabíjení/ vybití lithiové baterie [23]

V předchozím článku byla popsán úvod do problematiky Li-ion baterií, nyní bude uveden konkrétní příklad aplikace v energetice:

Li-ion akumulátory Tesla

V roce 2015 na jedné z konferencí představila společnost Tesla produkt Tesla Powerpack. Dosud společnost vyráběla baterie Powerwall pro menší instalace, jako jsou rodinné domy a podobně. Naproti tomu Powerpack se hodí do instalací spojených s velkou energetikou. Konkrétní instalaci je možné pozorovat v Austrálii pod názvem Hornsdale

Power Reserve, v blízkosti větrné farmy 99 větrných elektráren. Samotnou instalaci provedla Tesla za 63 dní. Náklady instalace byly 90 milionů dolarů. S kapacitou 129 MWh se jednalo o největší instalaci lithium-iontový baterií v historii. Během roku 2020 došlo k rozšíření na 193,5 MWh. [25]

Z Tesly Powerpack byl později vyvinut produkt Megapack, který je závěrečným produktem společnosti. Tento produkt je určen pro největší instalace. Megapack má koncentrovanější kapacitu, tudíž potřebuje o 40% méně plochy. Obsahuje také výrazně menší počet dílů. Instalace probíhá v desetinovém čase oproti Powerpacku. Megapack obdobně jako Powerpacky je možné libovolně řadit za sebe. Je proto možné poskládat prakticky libovolnou kapacitu. V Kalifornii by měla v nejbližší době vzniknout soustava baterií s kapacitou 400 MWh. Společně s Pacific Gas and Electric Company by mělo dojít opět v Kalifornii k instalaci uložistiště elektrické energie o kapacitě 1200 MWh.[25]



Obr. 8 Vizualizace Tesla Megapack [26]

1.9.2 PRŮTOKOVÉ BATERIE

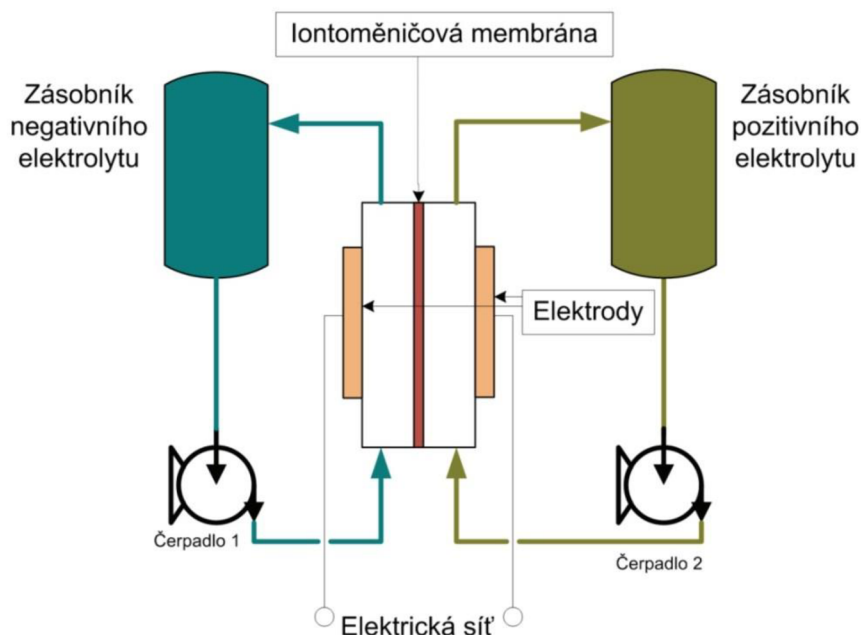
Podkapitola vypracována pomocí zdrojů [32], [33], [34]

Principem tohoto typu akumulace energie je uložení elektrické energie do energie chemické. Ta se váže do elektrolytu. Průtokové baterie jsou složeny ze dvou samostatných nádrží. V těchto nádržích jsou uchovávány již zmíněné elektrolyty. V jedné je pozitivní a v druhé negativní, přičemž se spolu nesmíchávají. Tyto elektrolyty jsou čerpadlem hnané k elektrochemickému článku, kterým proudí. Uvnitř je iontoměničová membrána, která od sebe obě směsi odděluje, aby se nesmíchaly, ale zároveň také umožňuje výměnu některých iontů. Uvnitř článku probíhají chemické redoxní reakce, kdy jeden elektrolyt se oxiduje a druhý redukuje. Poté jsou čerpány zpět do nádrží. Elektrická energie je uchovávána právě v těchto směsích a nikoli v samotném článku, jako u jiných typů baterií. Pokud je potřeba využít uloženou energii, probíhají reakce opět v článku ale opačným směrem.

V současné době rozlišujeme vanadium redoxní, bromid sodné nebo zinko-bromidové baterie.

To, jakou bude mít baterie hustotu energie určuje množství elektrolytu. Chemické reakce, které probíhají na elektrodách uvnitř článku, zase určují hustotu výkonu. Napětí na článku se nachází mezi hodnotami 1,4 V a 1,8 V, záleží na tom, jaký elektrolyt byl použitý. Účinnost průtokových baterií se pohybuje mezi 75 % a 85 %.

Výhodou tohoto způsobu uložení energie je předpokládaná dlouhá životnost až 50 let a velký počet nabíjecích cyklů. Těch se předpokládá až desítky tisíc. Elektrolyty totiž prakticky nepodléhají degradačním procesům. Součástí s nejkratší životností je iontoměničová membrána, která je schopná vydržet zhruba 15 000 cyklů. Nicméně její výměna by neměla být časově ani technicky náročná. Další výhodou je také možnost zvýšit kapacitu baterie, a to tak, že se zvětší množství elektrolytu. Za pozitivní vlastnost se považuje i fakt, že jsou velmi stabilní. Mohou zůstat ve vybitém stavu po poměrně dlouhou dobu bez negativního vlivu na kapacitu či životnost. Jejich hustota energie je ale vcelku nízká, pohybuje se v rozmezí 15 – 25 kWh/m³. Když ji porovnáme např. s Li-Ion akumulátory (300 kWh/m³), je zhruba desetkrát menší. I složitost např. čerpacích systémů může představovat nevýhodu.



Obr. 9 Schéma průtokové baterie [33]

1.10 PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY

Přečerpávací vodní elektrárny pracují na jednoduchém principu. Jejich součástí je horní a dolní nádrž, potrubí, které tyto nádrže spojuje, a v tomto potrubí se nachází ještě čerpadla a vodní turbíny. Pokud je v elektrické síti nadbytek energie, čerpadla přečerpají potrubím vodu z dolní nádrže do horní. Tato nádrž se nachází poměrně vysoko nad dolní nádrží. Během tohoto procesu se mění elektrická energie ze sítě nejprve v energii kinetickou (díky hnací síle elektromotoru) a poté na potenciální energii (díky uložení horní nádrže). Pokud je v síti nedostatek energie, voda proudí potrubím zpět z horní nádrže do dolní přes vodní turbíny, ve kterých se pomocí alternátorů mění takto uložená energie zpět na energii elektrickou, která se vrací zpět do sítě. [7, 8]

Existuje více variant, jakými jsou PVE konstruovány. Prvním příkladem je PVE na jednom toku řeky, kterým jsou obě nádrže propojeny, a navíc jsou spojeny tlakovými potrubími. Spád se může pohybovat v rozmezí 100 až 500 m. Navíc dolní nádrž může mít další využití v podobě zásobárny vody pro chladicí věže tepelných nebo jaderných elektráren. Může se také využít jezer ve vysokých horách, které mají dostatečný výškový rozdíl. Ty se poté propojí tunelovými šachtami. Nejnovější možností je umístění přečerpávací vodní elektrárny u pobřeží, s tím, že dolní nádrž tvoří moře a horní nádrž je uměle zbudovaná na pobřeží. [7, 8]

PVE jsou stavěny od 30. let minulého století a důležitým znakem je využívání třístrojových soustrojí. Jejich součástí je motorgenerátor, který se nachází v betonové šachtě. Tu najdeme v úrovni podlaží strojovny, tedy úplně nahoře. Další součástí je hřídel, ta je zavěšena na ložisku a sama nese oběžné kolo. Nejnižší je umístěno oběžné kolo odstředivého čerpadla. To se nachází pod úrovní dolní hladiny. Pokud je elektrárna

v provozu, kdy vytváří elektrickou energii, tak je zavzdušněna komora s čerpadlem. Turbína s čerpadlem se pohání vodou, která proudí pod velkým tlakem. [7, 8]

Avšak v současné době se většinou využívají dvoustrojová soustrojí. U tohoto typu pracuje oběžné kolo v čerpacím režimu jako čerpadlo. Ing. Hosnedl a akademik M. Nechleba z VUT Brno se na vývoji tohoto typu turbín významně podíleli.

Účinnost akumulace energie se v současné době pohybuje okolo 75 %. K uložení 1 kWh je tedy nutné použít 1,3 kWh. [7, 8]

Dalším typem PVE může být taková, kde jako horní nádrž využijeme přírodní jezero a spodní nádrž je pod zemí. Takovýto typ se využívá tam, kde by mohlo dojít k narušení rázu krajiny. U těchto elektráren se zvyšuje spád ze stovek metrů (jako u jiných typů PVE) až na např. 1000 m. Při tomto zvýšení spádu klesá objem vody, která se musí prohnat systémem na desetinu původního objemu. To umožní elektrárnu rozměrově zmenšit a tím snížit i náklady. [7, 8]

Důvodem stavby PVE v naší zemi bylo především uchování přebytečné energie v mimošpičkovém čase z jaderných elektráren. Stejně využití by mohlo být i u větrných či fotovoltaických elektráren. V České republice jsou historicky postaveny čtyři PVE. Dlouhé Stráně jsou největší z těchto elektráren. [7, 8]

Pro uvedení do problematiky přečerpávacích vodních elektráren bude ve zkratce vytvořena rešerše jednotlivých aplikací na našem území a nejzajímavějších ve světě.

V České republice fungují celkem čtyři přečerpávací vodní elektrárny, z čehož tři jsou využívány ve velké energetice.

Jedná se o PVE Dalešice, PVE Dlouhé stráně a PVE Štěchovice II.

První přečerpávací vodní elektrárna na našem území byla spuštěna před 2. světovou válkou. Jedná se o elektrárnu Černé jezero, která dosud funguje na Šumavě pro výrobu nižších výkonů elektrické energie. [39]

1.10.1 PVE DALEŠICE

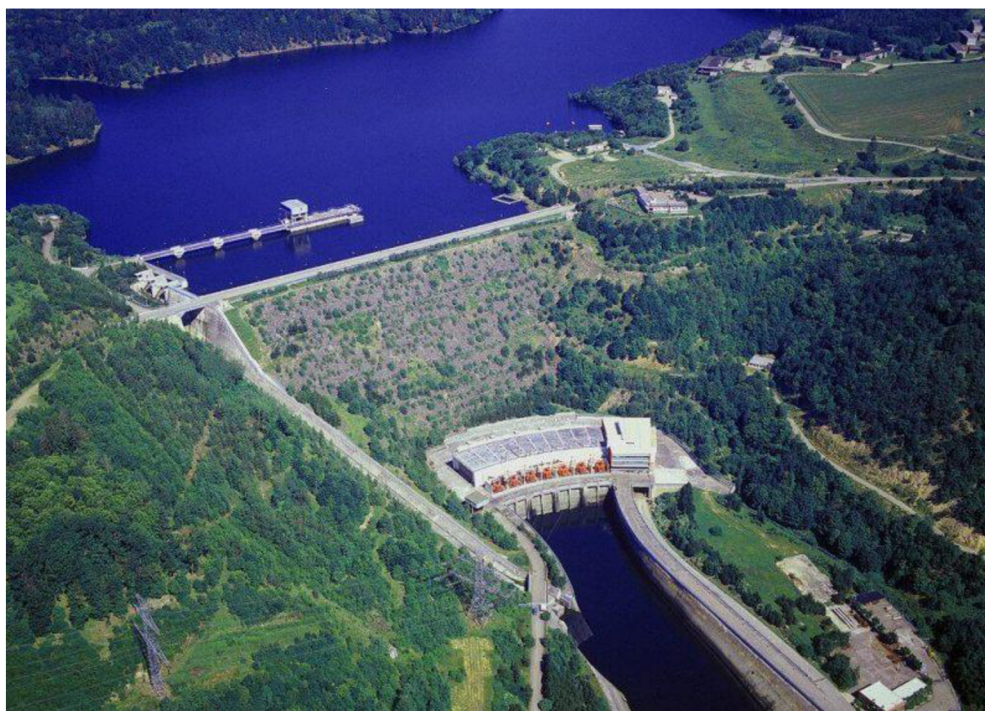
Tato přečerpávací vodní elektrárna je jednou z nejdůležitějších energetických staveb u nás. Její důležitost je velkou měrou dána možností akumulovat značné množství el. energie. Tím, že vyrovnává nestabilitu elektrizační soustavy je jako zdroj velmi ceněna. Její důležitost navíc podtrhuje možnost najet z nulového stavu na plný turbínový výkon v rekordně krátkém čase, jak bude popsáno dále. Její vznik spadá do období výstavby Jaderné elektrárny Dukovany. Vodní nádrž Dalešice a Mohelno byly plánovány jako zdroj vody pro chladicí věže a zároveň bylo využito nádrží pro vodní elektrárny Mohelno a zmíněné Dalešice. V dané lokalitě tedy vyrostl komplexní zdroj pro zásobování elektrickou energií.

Období výstavby přehrady a elektrárny Dalešice spadá do let 1970 až 1978. Stavba stojí na dolním toku řeky Jihlavy. Celá energeticko-vodní soustava zahrnuje vodní nádrž Dalešice, vyrovnávací nádrž Mohelno, přečerpávací vodní elektrárnu Dalešice a

průtočnou vodní elektrárnu Mohelno. Nádrži Dalešice se také říká horní, její objem je větší, pojme 127 mil m³ vody, nádrž Mohelno se také nazývá dolní nádrž. Nadmořská výška hladiny horní nádrže činí 385 m. Obě nádrže slouží kromě energetických účelů, také jako zásobárna vody, k chovu ryb, rekreaci a další. [11, 12]

Hráz nádrže Dalešice má unikátní sypanou hráz o výšce okolo 100 m. Tato hráz je v současnosti nejvyšší sypanou hrází v Evropě. Sypané hráze o takovýchto parametrech se běžně nebudují, ale díky přirozenému vzhledu vhodně zapadá do krajiny. Délka hráze v jejich základech i v koruně je více než 300 m. O těsnění nádrže se stará jílovité jádro hráze. Nádrž obsahuje také hydrotechnické zařízení pro případ povodňových průtoků a pro případné vypuštění celé nádrže. O přívod vody k samotným turbínám se starají čtyři ocelová potrubí, pro uzavření jsou nainstalovány hydraulicky ovládané klapky. Vtoky a výtoky jsou vybaveny česlemi proti vniknutí hrubých nečistot. V nedávné době byly realizovány generální opravy turbosoustrojí a jejich celkový současný výkon je 480 MW. O výrobu elektrické energie se v přečerpávací vodní elektrárně Dalešice starají čtyři soustrojí, jejichž hlavními zařízeními jsou reverzní Francisovy turbíny. Spád, pro který jsou navrženy, je 90 m. Jak je již z názvu patrné, mohou pracovat buď v turbínovém provozu nebo čerpadlovém, kdy zvláště v noci nasávají vodu z dolní nádrže do horní. Součástí soustrojí jsou synchronní generátory o napětí 13,8 kV, točení je obousměrné a o transformaci napětí generátorů se starají transformátory s napětím vývodů 420 kV. [11,12]

V září 2018 uplynulo 40 roků od uvedení přečerpávací vodní elektrárny Dalešice do provozu. Při té příležitosti byla možnost dozvědět se více o jejím provozu a vyrobené elektrické energie. Jak vlastník, tedy společnost ČEZ při této příležitosti uvedla, PVE Dalešice vyrobila 12 900 gigawatthodin el. energie. Pokud by byla horní nádrž na svém plném objemu, dokázaly by soustrojí vyrobít 2,3 milionu kWh v jednom cyklu. [12]



Obr. 10 Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice [12]

1.10.2 PVE ŠTĚCHOVICE II

Podkapitola zpracována s použitím zdroje [38]

Historicky byla uvedena do provozu v roce 1947. Již v době uvedení do provozu byla tato přečerpávací elektrárna automatizována, což v té době bylo celosvětově výjimkou. Elektrárna sestává ze spodní nádrže, kterou tvoří nádrž přehrady Štěchovice I, a uměle zbudovaná horní nádrž. Horní nádrž leží na kopci Homole a její objem je 0,5 mil m³. Obě nádrže jsou spojeny potrubím a celkový spád je téměř 220 m. Odpadní teplo bylo využíváno k vyhřívání vody nedalekého bazénu. Odstavena byla v roce 1991. Důvodem byla technická zastaralost. Elektrárna vyrobila do té doby 1650 GWh elektrické energie.

Další přelom v životě elektrárny nastal mezi léty 1992 až 1996, kdy byla vystavěna nová přečerpávací vodní elektrárna. Elektrárna byla postavena tak, aby odpovídala novodobým nárokům přenosové soustavy a legislativě. Nová elektrárna vznikla v místě původní elektrárny. Využívá její horní nádrž, z velké části původní propojovací potrubí a některé části rozvodného zařízení. Původní elektrárna měla dvě soustrojí s instalovaným výkonem 21 MW. Nová elektrárna disponuje soustrojím jedním o výkonu 45 MW. Jedná se o Francisovu turbínu typ FR-180, kterou vyrobilo ČKD Blansko. Soustrojí má oběžné kolo s průměrem 2,2 m a hltností 24 m³ za sekundu.



Obr. 11 Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice [38]

1.10.3 PVE DLOUHÉ STRÁNĚ

Podkapitola zpracována s použitím zdroje [41 a 42]

Přečerpávací vodní elektrárnu Dlouhé stráně najdeme v katastrálním území obce Loučná nad Desnou, okres Šumperk v Olomouckém kraji. Provoz elektrárny byl zahájen v roce

1996. Stejně jako jiné PVE slouží ke stabilizaci elektrizační soustavy. Skládá se ze dvou nádrží, přičemž horní nádrž se rozprostírá v nadmořské výšce 1350 m. n. m. na hoře Dlouhé Stráně. Dolní nádrž leží na toku Divoká Desná v nadmořské výšce 825 m. n. m. Výškový rozdíl mezi nádržemi je 535 m. Jedná se o největší spád elektrárny v České republice. Kapacita dolní nádrže je 3,4 mil m³ a rozprostírá se na ploše 16 ha. Hráz je vysoká 56 m. Vodní hladina může kolísat o 22,2 m. Objem horní nádrže odpovídá 2,72 mil m³ na ploše 15,4 ha.

Mezi horní nádrží a elektrárnou se nachází dva přivaděče. Délka přivaděčů je 1499 a 1547 metrů. Spojení mezi elektrárnou a dolní nádrží tvoří dva odpadní tunely. Délky těchto tunelů jsou 390 m a 354 m. Průměr obou je 5,2 m. Provoz elektrárny se nachází v podzemí. Jedna kaverna slouží pro soustrojí, druhá pro transformátory. Na povrchu jsou umístěny další provozy nutné pro chod elektrárny jako např. správní budovy a velín, čistírna odpadních vod, skladovací prostory a další.

V jedné z podzemních kaveren se nachází dvě turbosoustrojí, každé má svůj přivaděč z horní nádrže. Jedná se o reverzní turbíny typu Francis. Výkon každého soustrojí je při turbínovém režimu 325 MW, při čerpadlovém 312 MW.

Ve druhé kaverně se nachází dva blokové trojfázové transformátory a další zařízení jako např. rozvodny 22 kV.

Tab. 1 Srovnání přečerpávacích vodních elektráren v ČR [40]

Elektrárna	Štěchovice II	Dalešice	Dlouhé Stráně
Uvedení do provozu	1947 1996 rekonstrukce	1978 2007 rekonstrukce	1996
Výkon [MW]	45	480 (4 · 120)	650 (2 · 325)
Počet soustrojí	1	4	2
Typ turbín	Francis reverzní FR 180	Francis reverzní	Francis reverzní FR100
Turbínový spád [m]	209,8-219,5	60,5-90,7	534,3
Průtok turbínou [m ³ /s]	24 (výroba) 21 (čerpání)	150 (výroba) 137,5 (čerpání)	68,6(výroba) 54,5(čerpání)
Průměr oběžného kola [mm]	2 200	6 000	4 540
Otáčky [ot./min]	600	136,4	428,6
Objem horní nádrže [mil. m ³]	0,467	127	2,72

1.10.4 PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNA DNĚSTR PSP

Podkapitola zpracována s použitím zdroje [43, 45 a 46]

V této podkapitole bude stručně představena největší přečerpávací vodní elektrárna v Evropě a její technologie.

Elektrárna Dněstr PSP leží na stejnojmenné řece na Ukrajině v blízkosti hranic s Moldavskem. Tvoří součást energetického využívání řeky Dněstr. Po dokončení bude elektrárna disponovat turbínovým výkonem 2268 MW, čerpadlovým výkonem 2947 MW. Tohoto výkonu bude dosahováno díky zapojení sedmi reverzibilních vodních jednotek, každá o výkonu 324 MW v turbínovém provozu. Pro instalaci je použito Francisových turbín s průtokem 270 m³ za sekundu. Přečerpávací elektrárna má dvě nádrže. Tu dolní tvoří přehrada o objemu 70 mil m³, horní je uměle zbudována na vyvýšeném terénu nad přehradou, jak je vidět z obrázku č. 12. Objem této horní nádrže je 38,8 mil m³ a je viditelná i z horních vrstev atmosféry. Konečná plocha nádrže bude zaujímat 300 ha. Výškový spád je 135 m.



Obr. 12 Přečerpávací vodní elektrárna Dněstr PSP [44]

1.10.5 MOŘSKÉ PŘEČERPÁVACÍ ELEKTRÁRNY

Speciálním případem přečerpávací vodní elektrárny je mořská přečerpávací elektrárna. Tento typ je možné stavět v přímořských oblastech na pobřeží. Umělá nádrž je postavena na vyvýšeném pobřeží nad mořem. Výhodou je využití mořské vody. [47, 48]

Tento typ je proto vhodný pro území, která nemají mohutnější řeky, které by zásobovaly elektrárnu. Nevýhodou jsou korozivní účinky slané mořské vody.

První elektrárna tohoto typu byla elektrárna Okinawa Yambaru na japonských ostrovech, o které bude v této práci krátká zmínka v další podkapitole. Plánované jsou další stavby těchto elektráren v Irsku a Havaji. [47]

1.10.5.1 PŘEČERPÁVACÍ MOŘSKÁ ELEKTRÁRNA OKINAWA YAMBARU

Podkapitola zpracována s použitím zdroje [47 a 48]

Elektrárna Okinawa Yambaru byla uvedena do provozu během března 1999 v Japonsku. Japonsko se rozhodlo ke stavbě přečerpávací elektrárny na mořskou vodu z důvodu značného vyčerpání vhodných lokalit na místních řekách. Důvodem byla také možnost experimentálně podobné zařízení odzkoušet před případnými dalšími výstavbami. Roli také sehrála typologie pobřeží, neboť poblíž moře se zde nachází množství vyvýšených lokalit. Maximální výkon elektrárny je 30 MW, maximální průtok 26 m³ za sekundu a výškový rozdíl mezi mořem a horní nádrží je 152 m.

U elektrárny jsou ověřovány dopady na životní prostředí, jako nasávání mořských živočichů, zasolování krajiny okolo horní nádrže, korozivní účinky mořské vody na zařízení a materiály, provoz za různých klimatických podmínek.

Aby se zamezilo zasolení okolní krajiny a půdy mořskou vodou, byla v horní nádrži použita folie ze syntetického kaučuku oddělující vodu od podkladu. Případné úniky jsou pravidelně monitorovány. Během prvních roků provozu nedošlo ke zvýšení zasolenosti okolní krajiny. Na nejvíce korozně ohrožené materiály byla použita vylepšená korozivzdorná austenitická nerezová ocel. Nevýhodou je její značná cena.

V lokalitách, kde hrozí tajfuny a tsunami, je nutné uvažovat při stavbě jednotlivých komponentů této elektrárny poblíž mořské hladiny i s těmito možnostmi. Japonsko nedlouho po výstavbě této elektrárny, 11.3.2011 zasáhlo ničivé tsunami, jehož následky na jaderné elektrárně Fukušima ještě v době psaní této práce nebyly odstraněny.



Obr. 13 Mořská přečerpávací vodní elektrárna Okinawa Yambaru [49]

1.11 TLAKOVZDUŠNÉ AKUMULAČNÍ ELEKTRÁRNY

Dalším způsobem akumulace el. energie je akumulace ve stlačeném vzduchu. Běžně je užívána zkratka CAES.

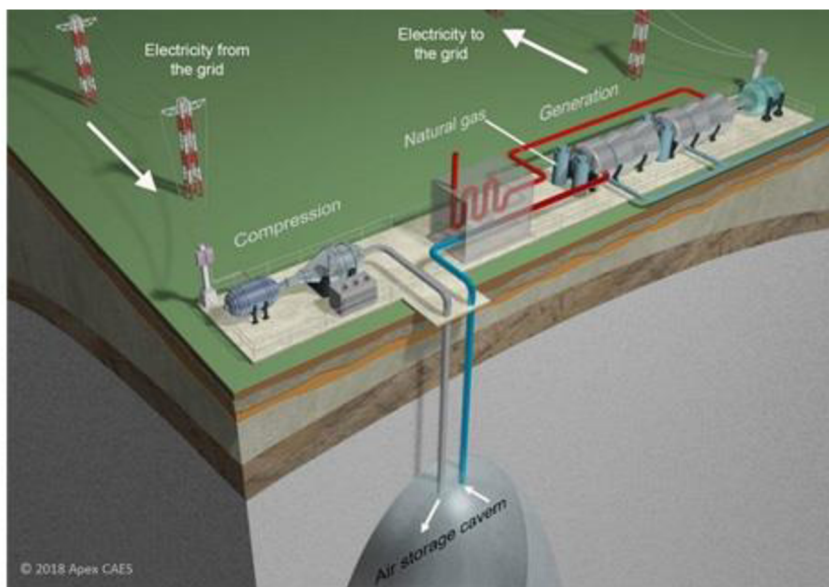
Ukládání elektrické energie ve stlačeném vzduchu funguje podobným způsobem jako u přečerpávací vodní elektrárny. Součástí tohoto systému jsou velké dobře utěsněné prostory. Do nich je vháněn pomocí kompresoru vzduch, který je stlačován. Jako prostory pro stlačování vzduchu se mohou využít jak přírodní, tak i umělé zásobníky. Mezi přírodní zásobníky se řadí např. dutiny vzniklé po vytěžení ropy. Ve chvíli, kdy je potřebná výroba elektrické energie, vzduch proudí přes plynovou turbínu a na generátoru je vyráběna el. energie. Nicméně jako vedlejší produkt při vhánění vzduchu do zásobníků, vzniká teplo, protože dochází k ohřívání kompresoru, ale toto teplo se může také použít. [7, 8]

U elektráren s plynovými turbínami je nevýhodou ztráta energie. Kompresor spotřebovával 2/3 energie, která se uvolnila při spalování plynu, a tedy pouze 1/3 uložené energie se přemění na energii elektrickou. To bylo snad důvodem v snaze o oddělení turbíny od kompresoru jak mechanické, tak i časové. Vývoj umožnil, že funkci kompresoru je schopen nahradit stlačený vzduch, a to po několik hodin. Navíc jako pohon pro kompresor je možné využít elektromotor pracující na spotřebě levné a přebytečné elektrické energie v noci. Takovýto systém je podobný PVE. Prvním zařízením, které

takto pracuje, se nachází v Huntorfu v Německu od roku 1974. Zařízení pracuje o výkonu až 290 MW. Vzduch je stlačován do dvou solných jeskyní o celkovém objemu 150 000 m³. Tlak v těchto jeskyních se nachází v rozmezí 5 – 7,5 MPa. [8, 9]

O jednotlivých aplikacích bude více napsáno v samostatných podkapitolách.

O nová zařízení CAES nebude nouze, neboť se rozbíhá mnoho instalací. Problémem jsou vysoké počáteční investice a častokrát je obtížné najít vhodnou lokalitu [8, 9]



Obr. 14 Princip tlakovzdušné akumulární elektrárny [10]

1.11.1 KOMPONENTY CAES

Použito zdrojů [30, 68]

Mezi hlavní komponenty potřebné pro instalaci CAES patří:

- Kompressor s chladiči a mezichladiči vzduchu
- Turbína s nízkotlakým a vysokotlakým stupněm
- Ovládání nutné pro řízení turbíny, kompresoru a dalších nezbytných zařízení pro kontrolu a regulaci
- Motor/generátor
- Zařízení pro nakládání s palivem
- Zásobárna vzduchu

1.11.2 ROZDĚLENÍ CAES DLE TYPU GEOLOGICKÉHO ULOŽIŠTĚ

Podkapitola zpracována pomocí zdrojů [27, 28, 29, 68]

Jako zásobníky pro stlačený vzduch je potřeba vybrat objemné prostory. Zároveň je ale nezbytné, aby byly dostatečně pevné a těsné, protože tlak vzduchu v těchto zásobnících může dosahovat hodnot až několik jednotek MPa. Z tohoto důvodu se uvažuje o využívání, jako vhodného prostoru, jeskyní, dolů v kamenném masivu nebo vytěžené prostory po zemním plynu.

Solné jeskyně

Jako prostor pro uložení stlačeného vzduchu je možné využít právě vytěžené solné jeskyně. Výhody tohoto prostoru spočívají ve snadné realizaci a také jednoduchosti samotného skladování. Také je možné prostory zvětšovat, pokud je to potřeba, a to s poměrně malými náklady (\$2/kWh). Ať už umělá tvorba jeskyně či její zvětšení se realizuje tak, že se do podloží načerpá voda, ve které se soli rozpustí a poté se vzniklý roztok vyčerpá. Je tedy nutné zajistit přívod dostatečného množství vody k místu a poté ekologickou a levnou likvidaci odčerpané slané vody. Díky vlastnostem solí, jako je plasticita, se snižuje riziko úniku stlačeného vzduchu na minimum. U uměle vytvořených kaveren je také výhodou jejich tvar. Horní klenba má jen malou plochu, tím se snižuje riziko zborcení stropu kaverny. Nicméně tento způsob uložení má i svou nevýhodu. V průběhu času dochází k tečení stěn jeskyně tvořených solí. Vzniká tak nálev, který může znečistit nebo i zanést turbínu.

Porézní skála

Další možností, jak skladovat stlačený vzduch, je využití porézní skály. Jedná se o akvifer, tedy porézní skalnaté podloží, které je prosáklé vodou. Jde o levnější metodu než u využití solných jeskyní. V tomto případě se náklady mohou pohybovat kolem \$0,11/kWh.

Kamenný masiv

Při využití skalního masivu jako zásobníku se stejně jako u solných jeskyní využívá vytvořených kaveren, v tomto případě ale v kamenném podloží. Při hledání vhodného místa je ale potřeba posoudit stabilitu podloží či případný únik vzduchu. Je možné využít jak uměle vytvořené kaverny, tak také doly vytvořené již při dřívější těžbě. Problémem této metody je ale její neekonomičnost. Pokud se prostor vytváří uměle těžbou, náklady stoupají až na zhruba \$30/kWh. O něco méně nákladnější je využití bývalých dolů. V tomto případě se náklady pohybují okolo \$10/kWh.

Jako možnost se jeví i využití vaků upevněných na dně např. jezera, do kterých se čerpá vzduch. Díky tomuto způsobu je vzduch uložen při konstantním tlaku. Turbína posléze vyrábí elektrický proud při vyfukování vaků. Tato technologie je zatím ve stádiu vývoje.

1.11.3 TYPY CAES

V následujících podkapitolách budou popsány základní typy akumulace elektrické energie ve stlačeném vzduchu.

1.11.3.1 PRVNÍ GENERACE CAES

Toto zařízení si nechal patentovat Dr. Michael Nakhamkin. Bylo postavené v Huntorfu. Kooperovalo s jinou elektrárnou, konkrétně jadernou elektrárnou Unterwesser. Nevýhodou této technologie byla ale její nižší účinnost. Konkrétní parametry tohoto zařízení jsou popsány v příslušné podkapitole 1.11.4.1 Huntorf [29, 30, 68]

1.11.3.2 DRUHÁ GENERACE CAES

Patent na toto zařízení znovu vlastní Dr. Michael Nakhamkin. Oproti původní technologii se mu podařilo zvýšit provoz, výkon ale i ekonomickou návratnost. Tento typ CAES bylo tedy možné zapojit do systému inteligentních sítí, aby srovnávala energetické výkyvy způsobené zařízeními využívající obnovitelné zdroje. Došlo ke zvýšení účinnosti oproti první generaci. To se podařilo díky předehřevu stlačeného vzduchu před spalovací komorou, a také chlazením zařazeným mezi stupni kompresoru. Tuto technologii využívá zařízení umístěné ve městě McIntosh. O tomto uložišti opět blíže pojednává podkapitola 1.11.4.2. McIntosh [68, 29, 30]

1.11.3.3 CAES SE SPALOVACÍ TURBÍNOU

Zpracováno s použitím zdrojů [68, 29, 30]

Jedná se o druhou generaci CAES. Vzduch je u tohoto typu do turbíny vstříkovan, což zvyšuje její výkon. Tento typ zařízení používá již dobře ověřené technologie. Ty mohou dodávat stlačený vzduch spolehlivě i ve velkých zařízeních bez nutnosti testování nevyzkoušených technologií. Turbína dodává jak odpadní teplo, tak i energii rekuperačnímu výměníku vzduch – vzduch. Vzduch se skladuje za využití vícenásobné komprese turbokompresory.

Nejvýhodnější použití se ukazuje v hodnotách výkonu mezi 3 – 430 MW. To umožňuje pákový efekt pro již vytvořenou infrastrukturu elektráren či optimalizaci inteligentní sítě.

Plynová turbína produkuje 40 % celkového výkonu. Zbytek, tedy 60 %, je tvořen z uskladněného stlačeného vzduchu. Vzduch je ohřátý teplem z plynové turbíny vznikající jako tzv. odpadní teplo. Nevznikají proto žádné oxidy dusíku. Mluvíme o tzv. zeleném výkonu.

1.11.3.4 ADIABATICKÉ CAES

Hlavními součástmi zařízení jsou tepelné výměníky, tepelný expandér, elektrický generátor, turbokompresor a motor k jeho pohonu a také termoolej. U tohoto zařízení se využívá odpadní teplo vznikající za kompresorem díky stlačování vzduchu. Toto teplo ohřívá studený termoolej a stlačený vzduch se tak ochlazuje. Olej slouží ke skladování tepla mezi rekuperačními výměníky. Pokud se spalovací turbína musí v čase potřeby elektřiny spustit, slouží právě tepelná energie uložená v termooleji k předehřátí stlačeného vzduchu. Tím se olej ochladí a může poté znovu případně akumulovat teplo vznikající při kompresi vzduchu. Tento proces se stále opakuje. Tento proces zvyšuje účinnost systému až na 70 %. Tím se velmi přibližuje k účinnosti přečerpávacích vodních elektráren. Výhodou tohoto systému je také jeho ekologičnost. Ta je dána tím, že se vzduch nepředehřívá za využití paliv, ale právě výše zmíněným teplem akumulovaným v oleji. Nevnikají proto žádné emise. Je ale nezbytné, aby čas mezi ohřátím oleje a využitím v něm uložené tepelné energie, byl co nejkratší, aby se předešlo tepelným ztrátám. [68, 29, 30]

1.11.4 PŘÍKLADY AKUMULAČNÍCH ELEKTRÁREN V REÁLNÉ PRAXI

Kapitola zpracována pomocí zdrojů [29, 30, 35, 36, 68]

Několik akumulčních elektráren již bylo do současnosti úspěšně zprovozněno. Většinou se jedná o lokality v Evropě a v severní Americe. Instalace byly realizovány koncem dvacátého století.

1.11.4.1 HUNTORF

V Huntorfu bylo realizováno první zařízení tohoto typu. Je možné ho nalézt v blízkosti města Brém v SRN Německo. Zařízení zprovoznila společnost ABB a uvedení do provozu proběhlo v roce 1978. Celkový výkon je 290 MW. Záměrem při výstavbě bylo postavit zařízení, které by nahradilo výpadek na jaderných elektrárnách poblíž Severního moře. Dalším záměrem bylo získat zdroj levné regulační energie. Huntorf jako první realizované zařízení tohoto typu nedisponuje značnou účinností, nevyužívá rekuperátor spolu se spalovací turbínou a byl postaven takzvaně na zelené louce. Poskytl ale mnoho cenných údajů pro další zařízení v budoucnu. Doba provozu již činní zhruba 40 let a slouží k doplnění kapacity přečerpávacích vodních elektráren. Původní myšlenka byla, aby byl schopen dodávat elektrickou energii po dobu 2 hodin, nejpodstatnější parametr byla vysoká rychlost rozběhu. Postupem času, se prodloužila doba kontinuální výroby elektrické energie na 3 hodiny. Díky tomu byl již využíván k vyvažování obnovitelných zdrojů energie, kterých v Německu razantně přibývá.

Zásobníky vzduchu tvoří dvě podzemní jeskyně, o společném objemu 310000 kubických metrů. Leží 650- 800 m pod zemí. Provozní tlaky zásobníků jsou mezi 4,5 a 6,5 MPa. Zásobníky tvoří prázdné solné jeskyně, které ale uvolňují do ukládaného vzduchu soli, což má neblahý vliv na materiály zařízení. Postupem času se to podařilo vyřešit použitím kvalitnějších materiálů.

Stlačený vzduch je ochlazován a teplo není dále využíváno a putuje do chladicích věží. Turbokompresor pohání elektromotor o výkonu 60 MW. Generátor pro výrobu elektrické energie je poháněn turbínami o výkonu 290 MW.



Obr. 15 Zařízení CAES v Huntorfu [31]

1.11.4.2 MCINTOSCH

Toto uložení elektrické energie ve stlačeném vzduchu využívá solné jeskyně v blízkosti stejnojmenného města ve státě Alabama. Zařízení dokáže produkovat elektrickou energii plných 26 hodin. Vzduch je akumulován při tlacích 4,5-7,4 MPa do jedné jeskyně. Její objem je 560000 kubických metrů. Zařízení bylo konstruováno 11 roků a podstatná část prvků se inspirovala z německého Huntorfu. Ke spuštění došlo na počátku devadesátých let. Výhodou tohoto zařízení je využívání rekuperace spalin k předehřevu vzduchu před spalovací turbínou. Spotřeba paliva v turbíně je tím snížena o 22 %. Kromě zemního plynu je možné spalovat topný olej. Začátky provozu nebyly bez problémů. Zařízení procházelo častými výpadky, které se postupem času podařilo odstranit.

1.11.4.3 ADELE

V Německu je připravován projekt Adele. Jedná se o pokročilý typ AA-CAES, tedy dokáže využít teplo ze stlačování vzduchu pro adiabatickou dekompresi. Teplo bude ukládáno do kamenných nebo keramických materiálů do zásobníků 40 metrů vysokých. Zařízení by mělo dosahovat účinnosti okolo 70 %. Huntorf dosahuje 42 % a McIntosch 54%. Investorem zařízení je firma RWE. Kapacita uložení by měla dosahovat 360 MWh. Maximální výkon dosahuje 90 MW. Zařízení je konstruováno na nepřetržitý provoz až 4 hodiny.

1.11.4.4 NORTON

Toto zařízení se bude nacházet v USA, jeho příprava započala již před 20 lety. Kvůli špatné situaci na trhu s elektrickou energií byl pozastaven. Zařízení bude velmi podobné tomu poblíž McIntosh. Zásobníkem vzduchu bude opuštěný vápencový důl 70 metrů v podzemí. Jeho objem je úctyhodných 9570000 kubických metrů. Tento zásobník je mnohonásobně větší než u předešlých případů. Vzduch bude ukládán o plánovaném tlaku 6,8- 12,4 MPa. Celkový výkon zařízení by se měl pohybovat na hodnotě 2700 MW.

1.12 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ZPŮSOBŮ AKUMULACE

Tab. 2 Porovnání jednotlivých způsobů akumulace, zpracováno dle zdrojů z dosavadní rešerše a [69]

	Li-ion baterie	průtokové baterie	přečerpávací vodní elektrárny	CAES	A-CAES
výkon [MW]	1 – 100	1 – 20	>100	150 – 500+	50 – 500+
účinnost [%]	85	75	70 – 85	30 – 40	>60
emise	bez	bez	bez	produkuje	bez
výdrž [h]	1 – 4	4 – 6	>6	>6	>6
Životnost [v cyklech]	5 000	10 000	>20 000	>20 000	>20 000
Kapitálové náklady [$\$ \cdot kW^{-1}$]	3 000+	5 000	>2 500	1 500 – 2 500+	1 500 – 3000
Kapitálové náklady [$\$ \cdot kWh^{-1}$]	300+	500	>250	150 – 250+	150 – 300
operativní náklady	střední	nízké – střední	nízké – střední	vysoké (palivo)	nízké – střední
variabilita umístění	vysoká	vysoká	nízká	nízká (důvodem-palivo)	střední – vysoká

Zdroje, které prochází vývojem obsažené v další kapitole v tabulce nejsou zahrnuty, neboť některé údaje dosud nejsou známy. U těchto zdrojů budou popsány výhody a nevýhody, které jsou již dostupné, slovně.

1.13 DALŠÍ APLIKACE PRO VELKOU ENERGETIKU V PROBÍHAJÍCÍM VÝVOJI

Mezi již standardní způsoby akumulace elektrické energie v bateriích, přečerpávacích vodních elektrárnách a CAES téměř jistě přibudou další aplikace. Vývoj je velmi urychlován tlakem na obnovitelné zdroje elektrické energie. Tyto varianty jsou ale stále ve výzkumu a musí nejdříve dojít k jejich ověření. V této kapitole budou jen nastíněny. S ubíhajícím časem a pokračujícím výzkumem je bude možné v budoucnu dále rozvést buď ve vysokoškolských pracích či soukromým studiem.

Dalo by se tvrdit a platí to beze zbytku pro systémy popsané v této kapitole, že společnosti vyvíjející smysluplné aplikace zažívají strmý rozvoj. Je to dáno akutní potřebou budování uložišť elektrické energie.

1.13.1 SYSTÉM GRAVITRICITY

V podkapitole byly použity zdroje [50, 51 a 52]

Start-up Gravitricity ze Skotska přišel s dalším řešením v podobě gravitačního ukládání elektrické energie. Společnost zatím podala sedm patentových přihlášek. Princip je velice jednoduchý. Je založen na zvedání a spouštění těžkého předmětu, který využívá gravitaci. Je předpokládáno, že k lokalitě pro spouštění a zvedání závaží budou využívány doly. Hmotnost závaží je navržena běžně od 500 do 5000 tun. Ale je předpoklad využívat hmotnosti až 12000 tun. Závaží je spouštěno a zvedáno pomocí několika ocelových lan zavěšených na kladkách. Pokud je třeba elektrickou energii ukládat, kladky ji spotřebují k vytažení závaží. Pokud je třeba elektrickou energii vyrábět, závaží je spuštěno. Ke změně obou fází by mělo docházet v jednotkách vteřin s účinností 80-90%. Životnost udávaná výrobcem je 50 let. Výrobce neudává, jaká je životnost lan, ale podle zkušeností autora této práce bude pravděpodobně nutné lana několikrát v průběhu životnosti zdroje měnit. Důvodem je zamezení poškození zařízení v případě prasknutí některého z lan. Tyto servisní výdaje nepředstavují významnou finanční zátěž.

Prvotní instalace je zkoušena ve Skotsku poblíž Edinburgu. Bude tvořena dvěma závažími o hmotnosti 25 tun, které budou uchycena na 16 m vysoké věži. Výstup z uložišť bude mít hodnotu 250 kW. Na obrázku č. 14 je vidět vizuální podoba zařízení. Jako zajímavost je možné uvést, že prototypy, ať už mechanických prvků, navijáky a ovládání vyrábí česká firma Huisman. Dle posledních dostupných informací by měla společnost Gravitricity v České republice prozkoumat nečinný hlubinný důl po těžbě černého uhlí poblíž Karviné.

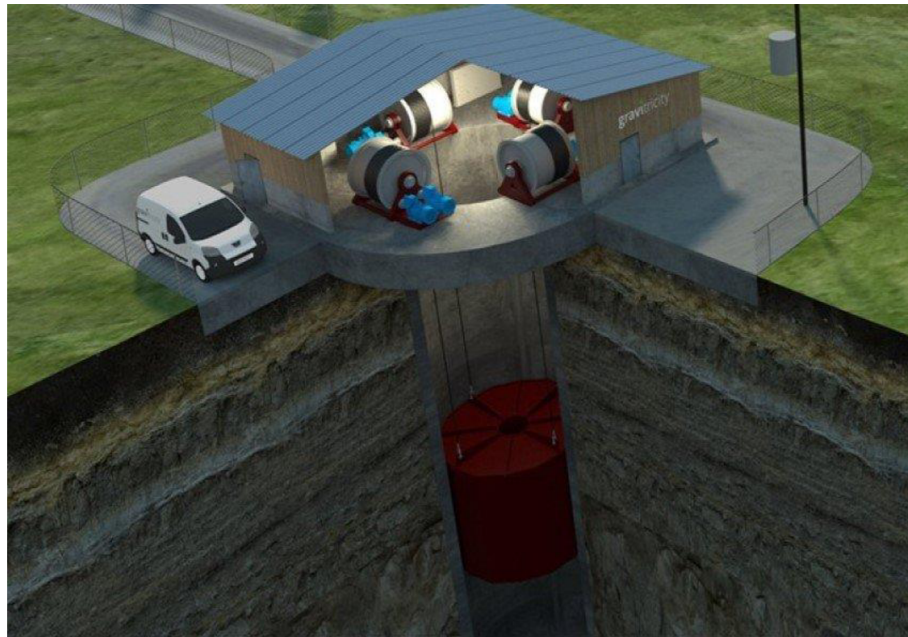
Jedna podobná instalace, jako je vidět na obr. 13 viz níže, by měla mít dle dostupných údajů výstup 1-20 MW.

Mezi velkou výhodou patří možnost uvolnění celé naakumulované energie velmi rychle. Zdroje udávají časový interval 15 minut a zároveň, pokud to regulační potřeby budou vyžadovat velmi pomalu, až v intervalu 8 hodin. Další výhodou lze spatřovat

v kompaktních rozměrech které nezasahují příliš do okolního prostředí. Nezanedbatelná je vysoká účinnost.

Nevýhodou se zatím jeví nižší akumulované objemy elektrické energie a nalezení vhodných lokalit.

Z důvodu praktických zkušeností, které s velkou pravděpodobností získá náš průmysl na výstavbě prvních zařízení, navrhuji tento typ akumulace jako podnět k dalšímu rozpracování ve vysokoškolských pracích.



Obr. 16 Systém ukládání elektrické energie- Gravitricity [50]



Obr. 17 Další varianta akumulčního uložitiště Gravitricity [53]

1.13.2 SYSTÉM ENERGY VAULT

V podkapitole byly použity zdroje: [52, 56, 57 a 58]

Velké diskuze, což se ukazuje v počtu komentářů pod články v průběhu zjišťování údajů pro rešerši, způsobuje systém ukládání elektrické energie s kterým přišel start-up ze Švýcarska Energy Vault. Je zajímavé, že podobné zařízení vzniká až v posledních letech, neboť princip je velice jednoduchý. Určitá složitost se objevuje v algoritmu rovnání bloků na sebe. Tento systém nejspíše potřeboval rozvoj automatizačních technologií.

Principem funkce tohoto typu uložistiště je jeřáb, který ukládá bloky betonu o jednotkové hmotnosti 35 tun. Jeřáb je standartně vybaven šesti rameny. Výška celého zařízení je mezi 120-150 m. Cihly jsou jeřábem vytahovány při potřebě akumulovat elektrickou energii. Pokyn ke skládání cihel je řízen automatizačními technologiemi a bloky jsou rovnány podle předvoleného schématu. Během potřeby vyrábět elektřinu dochází ke spouštění bloků. Kinetická energie bloku je přetransformována v energii elektrickou. Při spouštění roztáčí bloky generátory v motoru. Předpokládaná životnost je více než 30 roků. Udávaná účinnost je stejná jako u předešlého gravitricity 80- 90%. Společnost udává, že věže je možné podle potřeby zvětšovat nebo naopak zmenšovat. Dle autora této práce dojde pravděpodobně k ukládání bloků podle jiného schématu. To zaručí navýšení nebo snížení objemu uložistiště bloků. Pravděpodobně může dojít k vyvýšení jeřábu. Společnost udává standardizovanou kapacitu zařízení na hodnotách 20, 35 a 80 MWh ukládané elektrické energie. Kapacitu uložistiště je možné upravovat podle počtu použitých bloků. Standartizované zařízení bude dosahovat kapacity 35 MWh. Je jistě nasnadě si představit, že při začátku provozu bude používán omezený počet bloků z důvodu omezení vstupních nákladů. Po rozšíření provozu bude investováno do dalšího počtu bloků.

Firma dokončila v létě 2020 testovací instalaci s kapacitou 20-80 MWh ve Švýcarsku. Zařízení je testováno spolu s provozovatelem přenosové soustavy ve Švýcarsku. Během roku 2021 by mělo dojít ke komerčnímu provozu zařízení.

Systém má několik výhod. Dle údajů firmy je cena uložené energie nízká v hodnotě 0,06 eur za kWh. Bloky mohou být vyrobeny z recyklované suroviny ze stavebnictví. Elektrická energie může být v zařízení uložena velmi dlouho až v řádech roků. Naopak je možné velmi rychle vyrábět v případě potřeby přenosové soustavy. Zařízení je možné postavit prakticky kdekoli v krátkém časovém úseku.

Nevýhodou je prozatím vzhled a rozměry, není těžké si představit odpor obyvatelstva v hustě obydlených oblastech proti výstavbě tohoto zařízení. Firma nicméně hodlá pracovat na úpravě designu. To bude patrně hlavním problémem při budoucí výstavbě, jinak se tento systém jeví velmi perspektivně.

Ekonomická situace firmy vypovídá hodně o velké poptávce po akumulaci energie:

Podle dostupných zdrojů firma zaznamenala větší počet objednávek než je schopna uspokojit. Japonská společnost Softbank zainvestovala v létě 2019 do Energy Vault 110 mil dolarů. Investice putují na zprovoznění ověřovacích instalací.



Obr. 18 Vizualizace systému Energy Vault [54]



Obr. 19 Detail konstrukce jeřábu- Energy Vault [55]

1.13.3 AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE VE ZKAPALNĚNÉM VZDUCHU- HIGHVIEW POWER

V podkapitole byly použity zdroje: [52, 59, 60, 61, 62]

Tento systém akumulace elektrické energie je založen na relativně známém principu. Jedná se o takzvaný LAES systém, který je znám již delší dobu. V poslední době ho rozvinula společnost Highview Power. Na aplikace této společnosti bude zaměřena tato podkapitola. Zařízení funguje na následujícím principu:

Přebytečná elektrická energie je využita k stlačení a současnému ochlazení vzduchu, díky čemuž dojde ke změně skupenství vzduchu. Zkapalněný vzduch je jímán do kovových tanků a ve zkapalněném stavu je skladován až do okamžiku potřeby elektrické energie. Zkapalňování vzduchu je energeticky náročný proces. V případě potřeby se vzduch rychle ohřeje, tím dojde k jeho expanzi a v turbíně vyrábí elektrickou energii.

Společnost v nedávné době představila projekt Highview Power CRYOBattery, který se zaměřuje na dlouhodobé skladování elektrické energie. Pro zkapalňování vzduchu v CRYOBattery slouží kryogenní chlazení. Jedno zařízení má kapacitu 250 MWh.

Chystané projekty společnosti Highview: Janus Continental Group (JCG) investovala 13 mil dolarů do Highview Enterprises Limited. Důvodem byl společný rozvoj projektů dceřiné společnosti Great Lakes Africa Energy Ltd (GLAE) a Highview. Společnosti chtějí investovat do výroby a skladování elektrické energie z obnovitelných zdrojů v Africe, která se potýká se špatnou dostupností elektrické energie. Prameny udávají 600 mil obyvatel, kteří nemají přístup k elektrické energii v afrických zemích. Obnovitelné zdroje, zvláště solární, a následná akumulace elektrické energie má tedy na tomto kontinentu velkou perspektivu. Důvodem perspektivní kombinace obnovitelných zdrojů energie a její akumulace je také rychlý nárůst populace a zvyšování životní úrovně v afrických zemích.

Další projekty jsou připravovány ve Velké Británii, kde se Highview spojila s firmou Carlton Power za účelem rozšíření kryogenní akumulace na výkon 1 GW. Společnosti na vybudování projektů obdržely grant od vlády Velké Británie v hodnotě 10 mil. liber.

Systémy akumulující elektrickou energii ve zkapalněném vzduchu jsou často porovnávány s bateriemi. Výhodou akumulace ve zkapalněném vzduchu je větší kapacita a schopnost skladovat elektrickou energii po výrazně delší dobu. Dlouhodobější skladování je v porovnání s bateriemi levnější. Dopad na životní prostředí je u zkapalněného vzduchu kladný, neboť tyto zařízení jsou emisně neutrální. U baterií je problém s jejich odstraňováním po skončení životnosti. Nevýhodou je nižší účinnost zpětné výroby elektrické energie oproti bateriím. Předpokladem tedy je využívat baterie pro krátkodobé ukládání elektrické energie a zkapalňovaný vzduch pro dlouhodobé.



Obr. 20 Vizualizace zařízení- Highview Power [59]

2 VOLBA FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY PRO AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE

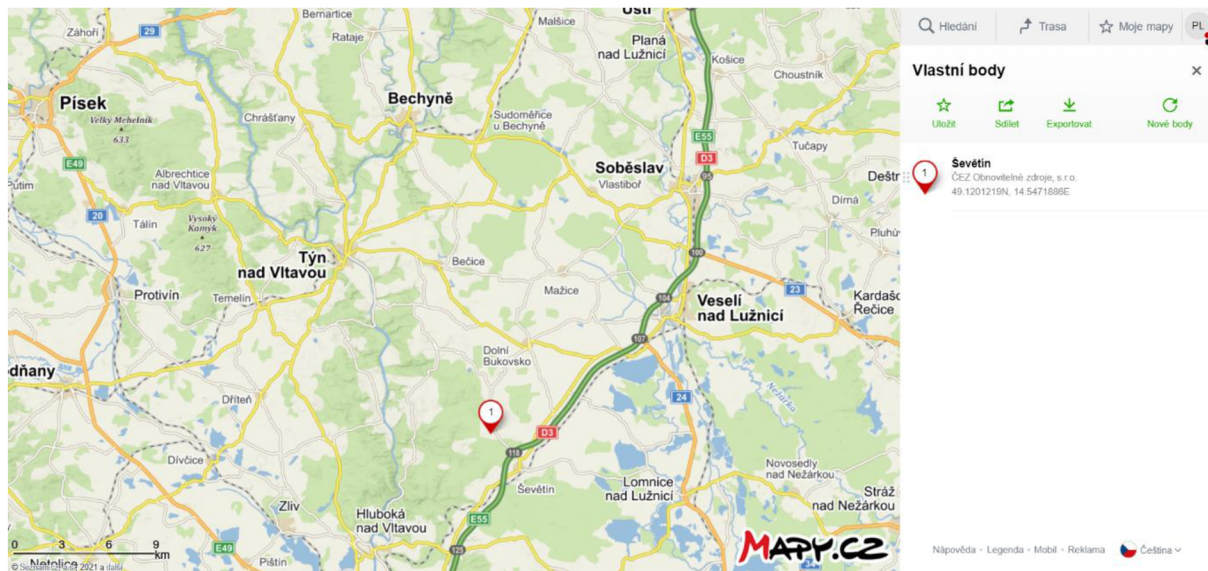
Vedle přečerpávacích vodních elektráren nemáme v naší zemi mnoho způsobů, jak ukládat větší objemy elektrické energie. Nové projekty se začínají objevovat, neboť s rozvojem obnovitelných zdrojů energie jinou možnost nemáme, ale způsobů, jak uložit větší objemy energie v současné době není mnoho. Další možná řešení pro větší objemy je uložení této energie ve stlačeném vzduchu v podzemních zásobnících, případně v soustavách baterií. Postupně se rýsují další instalace pro velkou energetiky, ale ty ve větší míře nejsou dostatečně odzkoušeny.

Pro regulaci přenosové soustavy v případě výpadku zásadního zdroje či zdrojů el. energie jsou důležité vedle akumulátorů energie, kterých se týká tato práce, také plynové spalovací a paroplynové elektrárny, které jsou v rámci možností schopné vyregulovat nelinearity v přenosové soustavě. [68]

2.1 VOLBA FVE ELEKTRÁRNY

Tato kapitola byla zpracována s použitím zdrojů: [70], [72]

Pro návrh akumulace ve stlačeném vzduchu byla vybrána fotovoltaická elektrárna Ševětín, která je jednou z největších elektráren svého druhu v České republice. Je zároveň ve vlastnictví energetické skupiny ČEZ, konkrétně dceřiné firmy ČEZ Obnovitelné zdroje, s.r.o., která by díky jejímu spojení s akumulací zde vyrobené energie získala další zdroj vysoce cenné elektrické energie. Ta by mohla posloužit k regulaci přenosové soustavy.



Obr. 21 Lokace fotovoltaické elektrárny Ševětín [71]

Fotovoltaická elektrárna Ševětín, jak už název napovídá, se rozprostírá v katastrálním území obce Ševětín. Ale kromě této obce také zasahuje do katastru Drahotěšic. Obě tyto

obce najdeme v Jihočeském kraji ve směru na Veselí nad Lužnicí od Českých Budějovic. Rozprostírá se přibližně 15 km od krajského města.

Elektrárna byla vystavena v roce 2010, její životnost skončí k datu 31.12. 2029. Fotovoltaické panely jsou rozprostřeny na ploše 60 ha. Pro představu je to plocha 80 fotbalových hřišť. V této oblasti globální záření v průběhu roku dosahuje hodnoty až 3,8 MJ/m². Celkový výkon elektrárny je 29,9 MW. S tímto výkonem je schopna zásobit elektrickou energií cca 8 000 domácností.

Instalované fotovoltaické panely jsou typu Brisbane BS-185 S, střídače typu Xantrex GT500. Fixování nosných pilotů v zemi bylo provedeno pomocí zaráženého systému. Tyto piloty tvoří konstrukci pro nosiče, na které jsou upevněny samotné fotovoltaické panely.

U této stavby je uvažován i případný dopad na zemědělskou půdu, na které byla vystavěna. Proto po konci životnosti elektrárny, tedy po roce 2029, musí být celé zařízení odmontováno, následně pozemek vrácen do stavu před výstavbou a půda se bude dále využívat k zemědělským účelům. Likvidace stavby bude hrazena provozovatelem elektrárny.



Obr. 22 Fotovoltaická elektrárna Ševětín [72]

2.1.1 DOBA NABÍJENÍ SYSTÉMU

Tato kapitola byla zpracována s použitím zdroje: [68], [70], [72]

Pro výpočet budu uvažovat délku provozu FVE elektrárny 345 dnů v roce, zbylé dny slouží pro případné odstávky či údržbu. Fotovoltaická elektrárna Ševětín má dle údajů od provozovatele instalovaný výkon 29,9 MW a roční suma vyrobené elektřiny je cca 32,2 GWh.

Pro stanovení doby, po kterou se bude navrhovaný zásobník vzduchu tzv. nabíjet musíme nejdříve stanovit průměrnou dobu po kterou bude fotovoltaická elektrárna Ševětín vyrábět elektrický proud. Budeme stanovovat přibližnou průměrnou denní dobu provozu této elektrárny. Pro výpočet použijeme údaje z předešlého odstavce, které byly získány od provozovatele.

$$P_R = 32,2 \cdot 10^9 \text{ Wh}$$

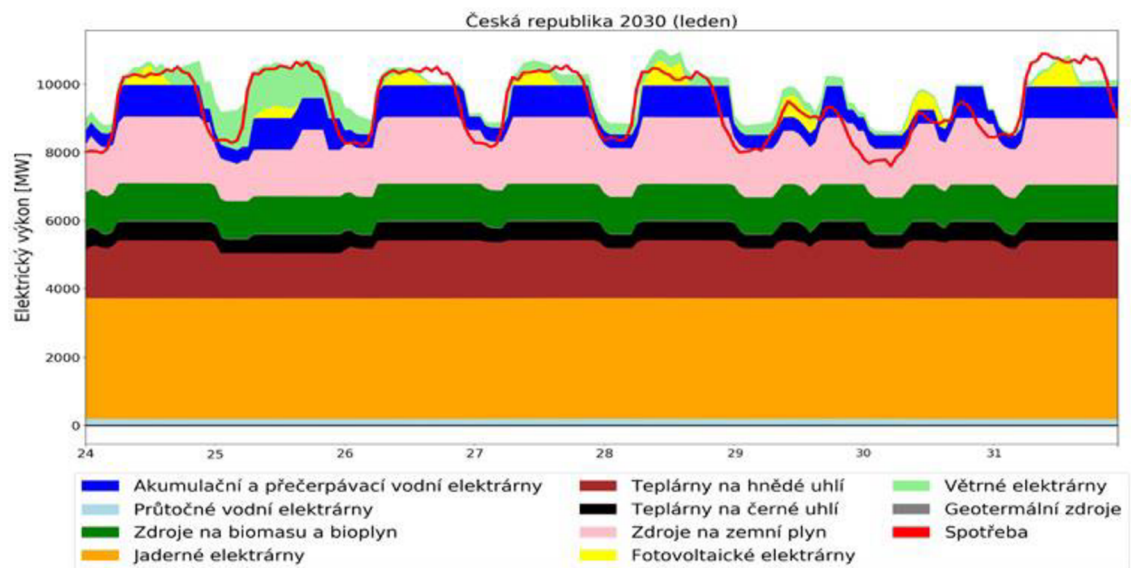
$$P_{inst} = 29,9 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$n_{počet\ hodin,rok} = \frac{P_R}{P_{inst}} = \frac{32,2 \cdot 10^9}{29,9 \cdot 10^6} \doteq 1077 \text{ h}$$

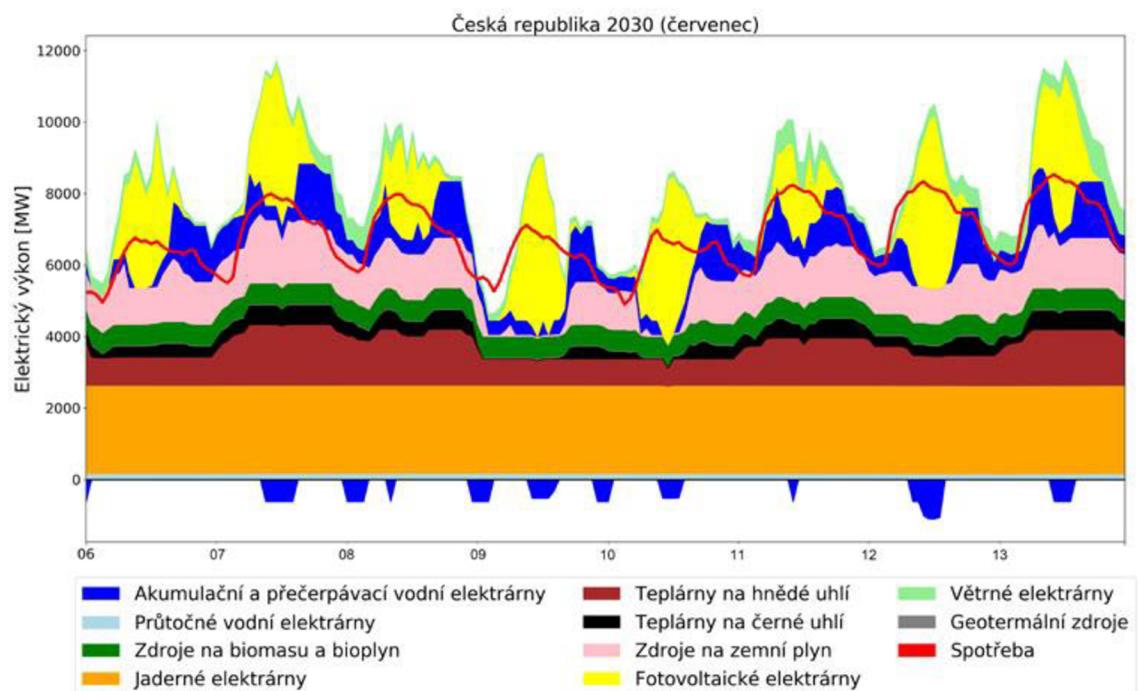
$$n_{počet\ hodin,den} = \frac{345 \cdot 24}{n_{počet\ hodin,rok}} = \frac{8280}{1077} = 7,69 \text{ h} \doteq 7,7 \text{ h}$$

Díky výsledku získáváme průměrnou denní dobu, po kterou elektrárna vyrábí elektrický proud a zároveň bude docházet k stlačování vzduchu do uložiště. Data o výkonech FVE Ševětín byly získány od provozovatele a ERU. V případě malého výkonu, (zimní měsíce) je možné ukládat elektrickou energii i z dalších zdrojů elektrické energie, např. větrných nebo okolních fotovoltaických elektráren.

Na následujících grafech můžeme vidět předpoklad pokrytí spotřeby elektrické energie v České republice z jednotlivých zdrojů během jednoho lednového a jednoho červencového týdne roku 2030. Za povšimnutí stojí práce přečerpávacích vodních elektráren, k nimž můžeme přiřadit i další systémy pro akumulaci elektrické energie, zvláště v slunečných červencových dnech. Je předpoklad vysokých nároků na regulaci přenosové soustavy.



Obr. 23 Struktura pokrytí spotřeby el. energie, lednový týden 2030, ČR [37]



Obr. 24 Struktura pokrytí spotřeby el. energie, červencový týden 2030, ČR [37]

3 NÁVRH AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Tato kapitola a příslušné podkapitoly byly zpracovány s použitím zdrojů: [1], [2], [68], [69], [83], další zdroje pro konkrétní použití během návrhu akumulace elektrické energie, budou uvedeny na příslušném místě výpočtu.

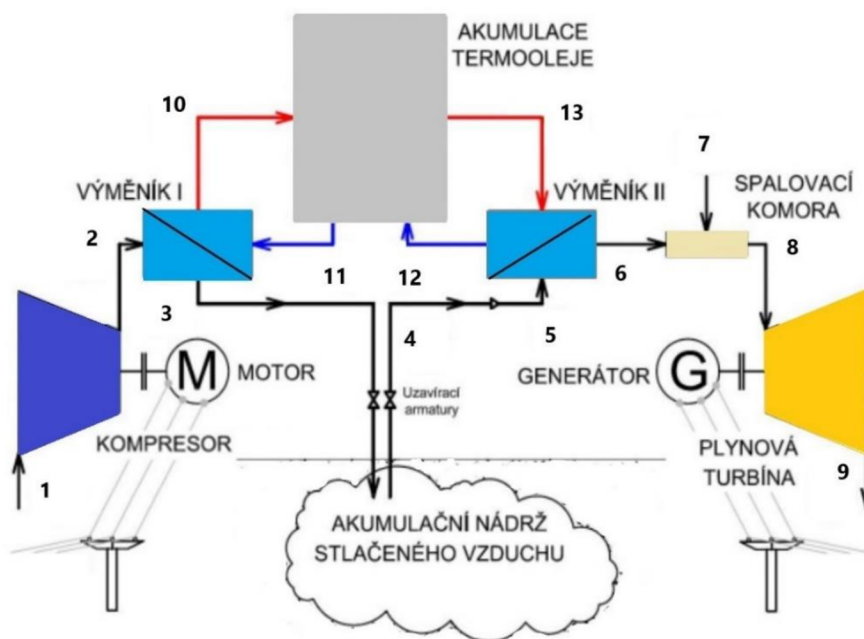
Pro návrh akumulace elektrické energie ve fotovoltaické elektrárně Ševětín bude zvolen adiabatický CAES systém z důvodu vysoké účinnosti v rámci jednotlivých CAES systémů.

Pro tento systém bude proveden termodynamický výpočet a navrhnuo základní technické řešení celého systému pro akumulaci elektrické energie vyrobené v FVE Ševětín.

Adiabatický CAES systém má vysokou účinnost. To je způsobeno využitím a akumulací značné tepelné energie, která vzniká při stlačování vzduchu v uložišti. Tato tepelná energie bude uložena do oleje vhodného pro přenos tepla. Následně po dobu vybíjení akumulátoru bude tepelná energie využita pro ohřev uvolňovaného vzduchu ze zásobníku před vstupem do plynové turbíny. V systému bude dále využita spalovací komora. Důvodem jejího využití je zvýšení teplot před samotnou spalovací turbínou. Výkon fotovoltaické elektrárny bude sloužit k pohonu kompresoru, který bude stlačovat nasávaný vzduch do kaverny.

Seznam zařízení, které budou využity pro akumulační elektrárnu v lokalitě solárního zdroje Ševětín a pro které bude proveden termodynamický výpočet:

generátor, plynová turbína, spalovací komora, akumulační nádrž termooleje, 2 čerpadla termooleje, 2 výměníky pro výměnu tepelné energie mezi vzduchem a olejem, uložišť vzduchu, kompresor. Technické schéma je znázorněno na následujícím obrázku:



Obr. 25 Technické schéma navrženého systému akumulace el. energie, upraveno z [68]

Získávání termodynamických veličin entalpie, měrné tepelné kapacity v průběhu výpočtu:

Pro výpočet jednotlivých termodynamických veličin bude použit program MS excel a doplněk Coolprop.

Vzor funkce s jednotlivými zadávanými parametry pro kyslík uveden na tomto příkladu:

```
=PropsSI("H"; "T";100+273,15;"P";101325;"Oxygen")
```

Tímto způsobem byly získávány potřebné entalpie a měrné tepelné kapacity. Za hodnotu 100 je dosazována potřebná teplota ve °C, za 101325 absolutní tlak v Pascalech. Pro získání měrných tepelných kapacit je zadáváno místo písmena H písmeno C, vzor:

```
=PropsSI("C"; "T";100+273,15;"P";101325;"Oxygen")
```

Pro získání potřebných veličin v následujícím výpočtu, je pro dusík nutné místo Oxygen zadat Nitrogen, pro vodu Water a pro oxid uhličitý CO2.

3.1 VOLBA OLEJE PRO VÝMĚNÍKY

Kapitola byla zpracována s použitím zdroje: [73]

Jako olej do výměníků pokročilého CAES systému byl zvolen teplotnosný olej MOL Thermol 68. Olej byl vybrán z důvodu vhodné kvality pro podobné využití a po prozkoumání trhu s dalšími oleji pro teplotnosné aplikace.

Tab. 3 Fyzikální vlastnosti termooleje MOL thermol 68 [73]

Temperature °C	Kinematic viscosity, mm ² /s	Density g/cm ³	Specific heat capacity kJ/kgK	Thermal conductivity W/mK	Vapour pressure mbar	Prandtl number
0	1102	0,893	1,80	0,133		
20	223	0,880	1,87	0,132		2795
40	69,4	0,867	1,95	0,130		900
50	43,5	0,861	1,98	0,129		574
100	8,7	0,828	2,16	0,126		124
150	3,4	0,794	2,35	0,122	0,11	52
200	1,86	0,760	2,53	0,119	1,4	30
250	1,20	0,724	2,71	0,115	10,4	20,5
300	0,86	0,688	2,89	0,111	55	15,4
330	0,73	0,666	3,00	0,109	130	13,3
350	0,65	0,651	3,07	0,108	221	12,1

Tab. 4 Vlastnosti a typické hodnoty termooleje MOL thermol 68 [73]

Vlastnosti	Typické hodnoty
Barva (ISO)	1,5
Hustota při 15 °C [g/cm ³]	0,881
Kinematická viskozita při 40 °C [mm ² /s]	70,2
Kinematická viskozita při 100 °C [mm ² /s]	8,75
Viskozitní index	96
Bod tekutosti [°C]	-12
Bod vzplanutí v otevřeném kelímku (Cleveland) [°C]	260
Bod hoření (Cleveland) [°C]	295
Conradsonův karbonizační zbytek (CCT) [hmotnost %]	0,02

3.2 VÝPOČET KOMPRESORU

Hlavní úlohou kompresoru bude nasávání vzduchu z okolní atmosféry. Z důvodu čistoty vzduchu je vhodné použít čističe vzduchu, případně další zařízení pro dosažení požadované kvality vzduchu. Celý výpočet směřuje ke stanovení výkonu kompresoru.

$$t_{vzduch_1} = 20 \text{ °C} \quad (3.1)$$

$$p_{vzduch_1} = 101325 \text{ Pa} \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_{vzduch_1} = 40 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.3)$$

Nyní budou určeny molární zlomky a molární hmotnosti pro výpočet hmotnostních zlomků složek vzduchu. Nasávaný vzduch je složen z 21% kyslíku a 78% dusíku, uvedené složení převedeme na molární zlomky:

$$x_{N_2} = 0,78 \quad (3.4)$$

$$x_{O_2} = 0,21 \quad (3.5)$$

Molární hmotnosti vzduchu použité pro návrh kompresoru:

$$M_{N_2} = 28,007 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (3.6)$$

$$M_{O_2} = 32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (3.7)$$

Hmotnostní zlomky dusíku a kyslíku ve vzduchu:

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

$$w_{N_2} = \frac{0,78 \cdot 28,007}{0,21 \cdot 32 + 0,78 \cdot 28,007}$$

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

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

$$w_{O_2} = \frac{0,21 \cdot 32}{0,21 \cdot 32 + 0,78 \cdot 28,007}$$

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

Pro výpočet entalpie suchého vzduchu, který je nasáván kompresorem, bude použito doplňku Coolprop. Entalpie dusíku a kyslíku pro teplotu vzduchu 20°C na vstupu do kompresoru, která byla výše zvolena jsou:

$$i_{20} = 304060,2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.10)$$

$$i_{O_{20}} = 266413,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.11)$$

$$i_{vzduch_1} = w_{O_2} \cdot (i_{O_{20}} - i_{O_{20_vzt}}) + w_{N_2} \cdot (i_{N_{20}} - i_{N_{20_vzt}}) \quad (3.12)$$

$$i_{vzduch_1} = 0,2352 \cdot (266413,5 - 266413,5) + 0,7648 \cdot (266413,5 - 266413,5)$$

$$i_{vzduch_1} = 0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ve vztahu 3.2.12 byla vypočítána entalpie suchého vzduchu. Pro její výpočet byly určeny v prostředí Coolprop vztažné entalpie, viz 3.2.13 a 3.2.14 pro teplotu 20 °C, které jsou totožné s $i_{N_{20^\circ\text{C}}}$ a $i_{O_{20^\circ\text{C}}}$, neboť tuto teplotu budeme považovat za vztažnou pro další výpočet. Tedy:

$$i_{O_{20_vztažná}} = 266413,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.13)$$

$$i_{N_2_vztažná} = 304060,2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.14)$$

Výstupní tlak na výstupu z kompresoru, volím 0,76 MPa a díky němu je možné vypočítat parciální tlak par:

$$p_{vzduch_2} = 760000 \text{ Pa} \quad (3.15)$$

$$\varepsilon = \frac{p_{vz_2}}{p_{vz_1}} \quad (3.16)$$

$$\varepsilon = \frac{760000}{101325} \doteq 7,5$$

Pro výpočet teploty vzduchu za kompresorem bude potřebné určit adiabatický exponent. Předpoklad je adiabatická komprese vzduchu v kompresoru:

$$\kappa_K = 1,4 \quad (3.17)$$

$$t_{vzduch_2} = T_{vzduch_1} \cdot (\varepsilon)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 273,15 \quad (3.18)$$

$$T_{vzduch_1} = (20 + 273,15) = 293,15$$

$$t_{vzduch_2} = 293,15 \cdot (7,5)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 273,15$$

$$t_{vzduch_2} \doteq 248,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pomocí programu Coolprop pro MS excel byly pro výstupní teplotu vzduchu z kompresoru 248,2 °C zjištěny entalpie kyslíku a dusíku.

$$i_{O_2_248,2} = 481743,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.19)$$

$$i_{N_2_248,2} = 542837,8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.20)$$

Entalpie vzduchu za kompresorem:

$$i_{vzduch_2} = w_{O_2} \cdot (i_{O_2_248,2} - i_{O_2_vzt}) + w_{N_2} \cdot (i_{N_2_248,2} - i_{N_2_vzt}) \quad (3.21)$$

$$i_{vzduch_2} = 0,2352 \cdot (481743,4 - 266413,5) + 0,7648 \cdot (542837,8 - 304060,2)$$

$$i_{vzduch_2} \doteq 233262,7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Nyní bude určen rozdíl entalpií na vstupu a výstupu z kompresoru:

$$\Delta i_{vzduch_{12a}} = i_{vzduch_2} - i_{vzduch_1} \quad (3.22)$$

$$\Delta i_{vzduch_{12a}} = 233262,7 - 0$$

$$\Delta i_{vzduch_{12a}} = 233262,7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

V předešlém výpočtu jsem počítal rozdíl entalpií s použitím entalpií z hlavních dvou složek vzduchu a to kyslíku a dusíku, přitom bylo zanedbáno 1 % složek vzduchu. Tento výpočet posloužil jako kontrolní, stejně tak tomu bude i v dalších kapitolách výpočtu. Postup řešení se tím drobně protáhne, ale autorovi práce pomohl neudělat zbytečnou chybu. Nyní bude spočítán rozdíl entalpií ze stavu vzduchu před a za kompresorem. K určení entalpií byl použit Coolprop pro MS excel. Tento rozdíl bude následně využit pro výpočet výkonu kompresoru:

$$\Delta i_{vzduch_{12b}} = i_{vzduch_2} - i_{vzduch_1} \quad (3.23)$$

$$\Delta i_{vzduch_{12b}} = 651156 - 419405$$

$$\Delta i_{vzduch_{12b}} = 231751 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Z obou výpočtů je vidět že rozdíl ve výsledku je minimální. Pro výpočet výkonu kompresoru bude použit rozdíl entalpií $\Delta i_{vzduch_{12b}}$, neboť je přesnější.

Ideální výkon kompresoru:

$$P_{Kompressor_{id}} = \Delta i_{vzduch_{12b}} \cdot \dot{m}_{vzduch_1} \quad (3.24)$$

$$P_{Kompressor_{id}} = 231751 \cdot 40 = 9,270 \text{ MW}$$

Pro výpočet skutečného výkonu kompresoru, volím účinnost: [83]

$$\eta_K = 0,7 \quad (3.25)$$

$$P_{Kompressor_{skut}} = \frac{P_{Kompressor_{id}}}{\eta_{Kompressor}} \quad (3.26)$$

$$P_{Kompressor_{skut}} = \frac{9,270}{0,7} = 13,243 \text{ MW}$$

3.3 NÁVRH PRVNÍHO VÝMĚNÍKU

Stlačováním plynu pomocí kompresoru dochází k jeho ohřátí, v tomto případě dojde k ohřátí na teplotu $t_{vzduch_2} = 248,2 \text{ }^\circ\text{C}$ z původní teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Této tepelné energie bude využito ve výměníku, v kterém budou proudit dvě látky a to vzduch a olej pro energetické

využití. V našem případě byl navolen olej MOL Thermol 68, viz kapitola 3.1. Ohřátý olej bude shromažďován v zásobníku termooleje.

Ve výpočtovém řešení jsem u prvního výměníku rozložil vzduch na dvě základní složky a to na kyslík a dusík. Pro oba plyny jsem určil měrnou tepelnou kapacitu a z těchto dvou kapacit vypočítal střední měrnou tepelnou kapacitu vzduchu. Měrnou tepelnou kapacitu bylo možno zjistit ze softwaru přímo, což bylo také provedeno. Důvodem použití obou způsobů byla průběžná kontrola výpočtu a případné zamezení chybě i když si jsem vědom zhoršené přehlednosti samotného výpočtu. Pro další počítané veličiny ve výpočtu byla posléze použita hodnota měrné tepelné kapacity přímo ze softwarového prostředí, neboť je přesnější. U výpočtu druhého výměníku jsem již postupoval přímo.

Vstupní parametry vzduchu pro vstup do výměníku jsou shodné s parametry vzduchu na výstupu z kompresoru.

$$\dot{m}_{vzduch_1} = 40 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.27)$$

$$t_{vzduch_2} \doteq 248,2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.28)$$

$$p_{vzduch_2} = 760000 \text{ Pa} \quad (3.29)$$

Pomocí doplňku Coolprop pro MS excel byly pro teplotu vzduchu 248,2 °C zjištěny měrné tepelné kapacity kyslíku a dusíku, které tvoří dominantní složení vzduchu. Ty následně posloužily pro výpočet měrné tepelné kapacity vzduchu vcházejícího do výměníku.

$$c_{p_{O_2_2}} = 981,7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.30)$$

$$c_{p_{N_2_2}} = 1062,8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.31)$$

$$c_{p_{vzduch_{2a}}} = w_{O_2} \cdot c_{p_{O_2_3}} + w_{N_2} \cdot c_{p_{N_2_3}} \quad (3.32)$$

$$c_{p_{vzduch_{2a}}} = 0,2352 \cdot 981,7 + 0,7648 \cdot 1062,8$$

$$c_{p_{vzduch_{2a}}} \doteq 1043,7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Hodnota měrné tepelné kapacity $c_{p_{vzduch_{2b}}}$ přímo z programu Coolprop:

$$c_{p_{vz_{2b}}} \doteq 1036,9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.33)$$

Tlak na výstupu z výměníku je ponechán stejný jako na vstupu do výměníku, teplota je zvolena na hodnotě 65 °C. Tlakové ztráty pro tento výpočet budou zanedbány. Následně budou pro tuto teplotu a tlak zvoleny hodnoty měrných tepelných kapacit z Coolprop a dopočítaná měrná tepelná kapacita vzduchu na výstupu z výměníku:

$$p_{vzduch_3} = p_{vzduch_2} = 760000 \text{ Pa} \quad (3.34)$$

$$t_{vzduch_3} = 65 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.35)$$

$$c_{p_{O_2_3}} = 934,24 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.36)$$

$$c_{p_{N_2_3}} = 1049,9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.37)$$

$$c_{p_{vzduch_3a}} = w_{O_2} \cdot c_{p_{O_2_3}} + w_{N_2} \cdot c_{p_{N_2_3}} \quad (3.38)$$

$$c_{p_{vzduch_3a}} = 0,2352 \cdot 934,24 + 0,7648 \cdot 1049,9$$

$$c_{p_{vzduch_3a}} \doteq 1022,7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Hodnota měrné tepelné kapacity přímo z programu Coolprop:

$$c_{p_{vz_3b}} \doteq 1016,2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.39)$$

Z měrné tepelné kapacity vzduchu na vstupu do výměníku a z měrné tepelné kapacity na výstupu z výměníku je dopočítána střední hodnota měrné tepelné kapacity ve výměníku:

$$c_{p_{vzduch_s_1}} = \frac{c_{p_{vzduch_2b}} + c_{p_{vzduch_3b}}}{2} \quad (3.40)$$

$$c_{p_{vzduch_s_1}} = \frac{1036,9 + 1016,2}{2}$$

$$c_{p_{vzduch_s_1}} = 1026,55 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Tepelný výkon, který je přenášen olejem a stejně tak vzduchem ve výměníku je:

$$\dot{Q}_{vzduch_1a} = \dot{Q}_{o_1} = \dot{m}_{vzduch_1} \cdot c_{p_{vzduch_s_1}} \cdot (T_{vzduch_2} - T_{vzduch_3}) \quad (3.41)$$

$$\dot{Q}_{vzduch_1a} = 40 \cdot 1026,55 \cdot ((248,2 + 273,15) - (65 + 273,15))$$

$$\dot{Q}_{vzduch_1a} = 7522558,4 \text{ W} \doteq 7,523 \text{ MW}$$

Použití měrných tepelných kapacit pro výpočet výkonu výměníku není tak přesné, jako výpočet s použitím rozdílu entalpií, proto za směrodatný výpočet výkonu výměníku bude považován následující výpočet:

Výpočet byl častokrát prováděn dvěma způsoby pro průběžné kontrolování výsledku, zvláště v prvních fázích výpočtu.

Před tím bude určena pomocí Coolprop entalpie vzduchu pro t_{vzduch_3} a $p_{vzduch_3} = p_{vzduch_2}$:

$$i_{vzduch_3} = 463587 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.42)$$

$$\dot{Q}_{vzduch_{1b}} = \dot{Q}_{o_1} = \dot{m}_{vzduch_1} \cdot (i_{vzduch_2} - i_{vzduch_3}) \quad (3.43)$$

$$\dot{Q}_{vzduch_{1b}} = 40 \cdot (651156 - 463587)$$

$$\dot{Q}_{vzduch_{1b}} = 7502760 \text{ W} \doteq 7,503 \text{ MW}$$

Pro výpočet střední hodnoty měrné tepelné kapacity oleje ve výměníku je zvolena teplota oleje na vstupu do výměníku, dále teplota oleje na výstupu z výměníku:

$$t_{o_2} = 220 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.44)$$

$$t_{o_3} = 50 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.45)$$

Pro výpočet střední hodnoty měrné tepelné kapacity oleje je ještě udělán interpolační výpočet pro určení měrných tepelných kapacit oleje pro dané teploty tabulky č. 3:

$$c_{p_{o_2}} = 2602 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.46)$$

$$c_{p_{o_3}} = 1980 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.47)$$

Střední hodnota měrné tepelné kapacity oleje ve výměníku:

$$c_{p_{o_s1}} = \frac{c_{p_{to_2}} + c_{p_{to_3}}}{2} \quad (3.48)$$

$$c_{p_{o_s1}} = \frac{2602 + 1980}{2}$$

$$c_{p_{o_s1}} = 2291 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Olej s parametry, které byly doteď určeny nebo vypočítány proudí výměníkem o tomto hmotnostním průtoku:

$$\dot{Q}_{vzduch_{1b}} = \dot{Q}_{o_1} = \dot{m}_{o_1} \cdot c_{p_{o_{stř1}}} \cdot (T_{o_2} - T_{o_3}) \quad (3.49)$$

$$\dot{m}_{o_1} = \frac{\dot{Q}_{o_1}}{c_{p_{o_s1}} \cdot (T_{o_2} - T_{o_3})} \quad (3.50)$$

$$\dot{m}_{o_1} = \frac{7502760}{2291 \cdot ((220 + 273,15) - (50 + 273,15))}$$

$$\dot{m}_{o_1} \doteq 19,26 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hodnota součinitele přestupu tepla, zvolena dle [77]

$$k_1 = 98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.51)$$

Výpočet středního logaritmického teplotního spádu pro protiproudé uspořádání:

$$\Delta T_{\ln_1} = \frac{(t_{vzduch_2} - t_{o_2}) - (t_{vzduch_3} - t_{o_3})}{\ln \frac{(t_{vzduch_2} - t_{o_2})}{(t_{vzduch_3} - t_{o_3})}} \quad (3.52)$$

$$\Delta T_{\ln_1} = \frac{(248,2 - 220) - (65 - 50)}{\ln \frac{(248,2 - 220)}{(65 - 50)}}$$

$$\Delta T_{\ln_1} \doteq 20,91 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Plocha výměníku:

$$S_1 = \frac{\dot{Q}_{vzduch_1} b}{k_1 \cdot \Delta T_{\ln_1}} \quad (3.53)$$

$$S_1 = \frac{7502760}{98 \cdot 20,91}$$

$$S_1 \doteq 3661 \text{ m}^2$$

Nyní bude stanoven objemový průtok oleje ve výměníku. K výpočtu použijeme hodnotu hmotnostního průtoky, která byla spočítána výše. Jeho hodnota je $19,26 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Dále

bude k výpočtu potřeba určit interpolací hodnotu hustoty oleje pro jednotlivé hustoty z tabulky č. 3, které odpovídají teplotám 220 °C a 50°C.

$$\rho_{o,3} = 861 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.54)$$

$$\rho_{o,2} = 745,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.55)$$

$$\rho_{o,s,1} = \frac{\rho_{to,3} + \rho_{to,2}}{2} \quad (3.56)$$

$$\rho_{o,s,1} = \frac{861 + 745,6}{2}$$

$$\rho_{o,s,1} = 803,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\dot{V}_{o,1} = \frac{\dot{m}_{to,1}}{\rho_{to,stř,1}} \quad (3.57)$$

$$\dot{V}_{o,1} = \frac{19,26}{803,3}$$

$$\dot{V}_{to,1} \doteq 0,02398 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \doteq 86,31 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$$

Olej o tomto průtoku odchází do zásobníku oleje, kde bude posléze využit k ohřátí nasávaného vzduchu z kaverny. Na tento objemový průtok oleje, případně vyšší bude muset být dimenzováno čerpadlo, které ho bude dopravovat.

3.4 VÝPOČET ZÁSOBNÍKU VZDUCHU

Vzduch, kterému byla odebrána větší část tepelné energie je hnán do zásobníku vzduchu v podzemí. V kaverně bude uvažován konstantní tlak, který bude zabezpečovat sloupec vody. Sloupec vody je tvořen vodou v kaverně propojenou potrubím s povrchovou nádrží. Při plnění kaverny vzduchem voda proudí na povrch, při vyprazdňování obráceně. Plnění kaverny vzduchem bude zabezpečeno bezpečnostním uzavíracím ventilem. Díky sloupci vody není potřebné používat škrťací dýzu k udržování konstantního tlaku na turbínu. Provozování turbíny v režimu konstantního tlaku je jednodušší než při proměnném tlaku. Použití vody je z hlediska provozní spolehlivosti a jednoduchosti vhodný způsob.

Parametry vzduchu před kavernou jsou shodné jako parametry na výstupu z výměníku:

$$p_k = p_{vzduch,3} = 760000 \text{ Pa} \quad (3.58)$$

$$t_{k,in} = t_{vzduch,3} = 65 \text{ °C} \quad (3.59)$$

$$\dot{m}_{k_in} = \dot{m}_{vzduch_1} = 40 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.60)$$

$$\rho_{k_in} = 7.838888 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\tau_{vzduch} = 7,7 \text{ h} = 27720 \text{ s}$$

Hustota ρ_{k_in} byla určena s použitím programu Peace Software pro vstupní parametry vzduchu, $p_{vzduch_3} = 760 \text{ kPa}$ a $t_{vzduch_3} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$. Doba plnění vzduchu do kaverny τ_{vzduch} je shodná s průměrnou denní dobou provozu solární elektrárny Ševětín.

Nyní bude vypočítána hmotnost vzduchu po jejím úplném naplnění a posléze objem kaverny:

$$m_{vzduch_k} = \dot{m}_{vzduch_kav} \cdot \tau_{plnění} \quad (3.61)$$

$$m_{vzduch_k} = 40 \cdot 27720$$

$$m_{vzduch_k} = 1108,8 \text{ t}$$

$$V_{vzduch_k} = \frac{m_{vzduch_kav}}{\rho_{k_vstup}} \quad (3.62)$$

$$V_{vzduch_k} = \frac{1108,8 \cdot 10^3}{7,838888}$$

$$V_{vzduch_k} \doteq 141449 \text{ m}^3$$

Rozdíl teplot pro vzduch pro nabíjení a vybíjení kaverny volím s použitím zdrojů [74, 75, 76] 10°C :

$$\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.63)$$

Teplota vzduchu po vystoupení z podzemního zásobníku:

$$t_{k_out} = t_{k_in} - \Delta t \quad (3.64)$$

$$t_{k_out} = 65 - 10$$

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

Hustota ρ_{k_out} na výstupu z kaverny byla určena s použitím programu Peace Software pro výstupní parametry vzduchu, $p_k = 760 \text{ kPa}$ a $t_{k_out} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho_{k_out} = 8,078296 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.65)$$

Výpočet hmotnosti vzduchu, který bude využit při vybíjení pro výrobu el. energie bude počítán z hodnot: ρ_{k_out} a ρ_k :

$$m_{vzduch_k_vyb} = V_{vzduch_k} \cdot \rho_{k_out} \quad (3.66)$$

$$m_{vzduch_k_vyb} = 141449 \cdot 8,078296$$

$$m_{vzduch_k_vyb} \doteq 1142663,9 \text{ kg} = 1142,7 \text{ t}$$

Pro vypočítání doby vybíjení celého systému uložistiště bude zvolen hmotnostní průtok vzduchu na výstupu z kaverny v hodnotě $50 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$\dot{m}_{k_out} = 50 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.67)$$

$$\tau_{vyb} = \frac{m_{vzduch_k_vyb}}{\dot{m}_{kav_out}} \quad (3.68)$$

$$\tau_{vyb} = \frac{1142663,9}{50}$$

$$\tau_{vyb} \doteq 22853,3 \text{ s} \doteq 6,35 \text{ h}$$

3.5 NÁVRH DRUHÉHO VÝMĚNÍKU

Nyní vzduch putuje obrácenou cestou, než tomu bylo u prvního výměníku. Média jsou stále stejná, jedná se o olej pro termické účely a vzduch. Vzduch nyní odchází z podzemního zásobníku a v tomto druhém výměníku je ohříván, díky tomu, že přijímá teplo od oleje. Před vstupem do výměníku bude opět bezpečnostní uzavírací ventil. Uspořádání výměníku je protiproudé.

Parametry vzduchu před výměníkem jsou totožné jako parametry vzduchu za kavernou:

$$\dot{m}_{vzduch_2} = \dot{m}_{k_out} = 50 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.69)$$

$$t_{vzduch_5} = t_{k_out} = 55 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.70)$$

$$p_{vzduch_5} = p_k = 760000 \text{ Pa} \quad (3.71)$$

Hodnotu měrné tepelné kapacity $c_{p_vzduch_5}$ pro tlak a teplotu p_{vzduch_5} a t_{vzduch_5} je určena z programu Coolprop a její hodnota je následující:

$$c_{p_vzduch_5} \doteq 1016,1 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \quad (3.72)$$

Nyní bude zvolena teplota na výstupu z druhého výměníku. Tlakové ztráty pro tento termodynamický výpočet budou zanedbány a bude uvažováno, že tlak před a za druhým výměníkem bude konstantní.

$$t_{vzduch_6} = 200 \text{ } ^\circ C \quad (3.73)$$

$$p_{vzduch_6} = p_{vzduch_5} = 760000 Pa \quad (3.74)$$

Měrná tepelná kapacita vzduchu na výstupu z druhého výměníku byla zjištěna z Coolprop pro t_{vzduch_6} a p_{vzduch_6} :

$$c_{p_vzduch_6} \doteq 1028,5 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \quad (3.75)$$

Z $c_{p_vzduch_5}$ a $c_{p_vzduch_6}$ vyjde střední hodnota měrné tepelné kapacity pro druhý výměník následovně:

$$c_{p_vzduch_s_2} = \frac{c_{p_vzduch_5} + c_{p_vzduch_6}}{2} \quad (3.76)$$

$$c_{p_vz_s_2} = \frac{1016,1 + 1028,5}{2}$$

$$c_{p_vzduch_s_2} = 1022,3 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$$

Vzduch i námi zvolený olej přenesou stejný tepelný výkon:

$$\dot{Q}_{vzduch_2a} = \dot{Q}_{o_2} = \dot{m}_{vzduch_2} \cdot c_{p_vzduch_s_2} \cdot (T_{vzduch_6} - T_{vzduch_5}) \quad (3.77)$$

$$\dot{Q}_{vz_2a} = 50 \cdot 1022,3 \cdot ((200 + 273,15) - (55 + 273,15))$$

$$\dot{Q}_{vz_2a} = 7411675 W \doteq 7,412 MW$$

Tepelný výkon určený z entalpií pro t_{vzduch_5} , t_{vzduch_6} a tlak 0,76 MPa:

Entalpie i_{vzduch_5} a i_{vzduch_6} byly určeny v Coolprop:

$$i_{vzduch_5} = 453426 J \cdot kg^{-1} \quad (3.78)$$

$$i_{vzduch_6} = 601386 J \cdot kg^{-1} \quad (3.78)$$

$$\dot{Q}_{vzduch_{2b}} = \dot{Q}_{o_2} = \dot{m}_{vzduch_2} \cdot (i_{vzduch_6} - i_{vzduch_5}) \quad (3.79)$$

$$\dot{Q}_{vzduch_{2b}} = \dot{Q}_{o_2} = 50 \cdot (601386 - 453426)$$

$$\dot{Q}_{vzduch_{2b}} = 7398000 = 7,398 \text{ MPa}$$

Výsledek vyšel podobně jako v případě použití měrných tepelných kapacit.

Nyní budou zvoleny teploty oleje na vstupu a výstupu u tohoto druhého výměníku, pro ně interpolací z Tab.3 budou stanoveny měrné tepelné kapacity pro dané teploty, posléze bude z obou hodnot určena střední měrná tepelná kapacita:

$$t_{o_6} = 220 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.80)$$

$$c_{p_{o_6}} = 2602 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \quad (3.81)$$

$$t_{o_5} = 60 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.82)$$

$$c_{p_{o_5}} = 2016 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \quad (3.83)$$

$$c_{p_{o_{s_2}}} = \frac{c_{p_{to_6}} + c_{p_{to_5}}}{2} \quad (3.84)$$

$$c_{p_{o_{s_2}}} = \frac{2602 + 2016}{2}$$

$$c_{p_{o_{s_2}}} = 2309 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$$

Hmotnostní průtok oleje druhým výměníkem:

$$\dot{Q}_{vzduch_2} = \dot{Q}_{o_2} = \dot{m}_{o_2} \cdot c_{p_{o_{s_2}}} \cdot (T_{o_6} - T_{o_5}) \quad (3.85)$$

$$\dot{m}_{o_2} = \frac{\dot{Q}_{o_2}}{c_{p_{o_{s_2}}} \cdot (T_{o_6} - T_{o_5})} \quad (3.86)$$

$$\dot{m}_{o_2} = \frac{7398000}{2309 \cdot ((220 + 273,15) - (60 + 273,15))}$$

$$\dot{m}_{o_2} \doteq 20,02 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla z [77]

$$k_2 = 98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.87)$$

$$\Delta T_{\ln_2} = \frac{(t_{o_6} - t_{vzduch_6}) - (t_{o_5} - t_{vzduch_5})}{\ln \frac{(t_{o_6} - t_{vzduch_6})}{(t_{o_5} - t_{vzduch_5})}} \quad (3.88)$$

$$\Delta T_{\ln_2} = \frac{(220 - 200) - (60 - 55)}{\ln \frac{(220 - 200)}{(60 - 55)}}$$

$$\Delta T_{\ln_2} \doteq 10,82 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Plocha druhého výměníku:

$$S_2 = \frac{\dot{Q}_{vzduch_2}}{k_2 \cdot \Delta T_{\ln_2}} \quad (3.89)$$

$$S_2 = \frac{7398000}{98 \cdot 10,82}$$

$$S_2 \doteq 6977 \text{ m}^2$$

Průtok oleje z předešlého výpočtu byl zjištěn na hodnotě $20,02 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Z tabulky č. 3 budou nyní určeny hodnoty hustot pro teploty oleje na vstupu a výstupu z druhého výměníku t_{o_5} a t_{o_6} . Objemový průtok oleje druhým výměníkem bude následně určen z jejich střední hodnoty.

$$\rho_{o_5} = 854,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.90)$$

$$\rho_{o_6} = 745,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (3.91)$$

$$\rho_{o_s_2} = \frac{\rho_{o_5} + \rho_{o_6}}{2} \quad (3.92)$$

$$\rho_{o_s_2} = \frac{854,4 + 745,6}{2}$$

$$\rho_{o_s_2} = 800,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\dot{V}_{o_2} = \frac{\dot{m}_{o_2}}{\rho_{o_s_2}} \quad (3.93)$$

$$\dot{V}_{o_1} = \frac{20,02}{800}$$

$$\dot{V}_{o_2} \doteq 0,02503 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \doteq 90,09 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$$

Pro solární elektrárnu Ševětín a pro tento navrhovaný způsob ukládání elektrické energie bude třeba zapojit čerpadlo oleje s tímto vypočítaným objemovým průtokem.

3.6 VÝPOČET SPALOVACÍ KOMORY

Za druhým výměníkem vstupuje vzduch do spalovací komory. Spalovací komora bude spalovat zemní plyn. Hmotnostní průtok zemního plynu bude podřízen výstupní teplotě na konci spalovací komory a potřebnému výkonu turbíny. Vzduch má tyto hodnoty:

$$p_{vzduch_k} = p_{vzduch_5} = 760000 \text{ Pa} \quad (3.94)$$

$$t_{vzduch_k} = t_{vzduch_5} = 200 \text{ °C} \quad (3.95)$$

$$\dot{m}_{vzduch_k} = \dot{m}_{vzduch_2} = 50 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.96)$$

Výstupní teplota spalin ze spalovací komory t_{spalin_k} , byla zvolena dle [81]:

$$t_{spalin_k} \doteq 630 \text{ °C} \quad (3.97)$$

Účinnost spalovací komory η_{kom} stanovena dle [82]:

$$\eta_{kom} = 0,96 \quad (3.98)$$

Díky použití doplňku Coolprop pro excel byly zjištěny entalpie pro kyslík a dusík. Teplota, pro kterou byly entalpie zjišťovány byla t_{vzduch_k}

$$i_{O_2_k_vstup} = 434778 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.99)$$

$$i_{N_2_k_vstup} = 491778 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.100)$$

Kontrolní výpočet entalpie vzduchu pro složky vzduchu kyslík a dusík, posléze bude určena hodnota přímo z Coolprop, která bude používána pro další výpočet, neboť je přesnější.

$$i_{vzduch_k_vstup_a} = w_{O_2} \cdot (i_{O_2_k_vstup} - i_{O_2_vzt}) + w_{N_2} \cdot (i_{N_2_k_vstup} - i_{N_2_vzt}) \quad (3.101)$$

$$i_{vzduch_k_vstup_a} = 0,2352 \cdot (434778 - 266413,5) + 0,7648 \cdot (491778 - 304060,2)$$

$$i_{vzduch_k_vstup_a} \doteq 183165,9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Přímo entalpie vzduchu z Coolprop:

Entalpie vzduchu pro t_{vzduch_k} a p_{vzduch_k} :

$$i_{vzduch_k_vstup} = 601385,7 J \cdot kg^{-1} \quad (3.102)$$

Vztažná entalpie pro vzduch z předešlého výpočtu:

$$i_{vzduch_1} = 419404,9 \quad (3.103)$$

$$i_{vzduch_k_vstup_b} \doteq (i_{vzduch_k_vstup} - i_{vzduch_1}) \quad (3.104)$$

$$i_{vzduch_k_vstup_b} \doteq (601385,7 - 419404,9) = 181980,1 J \cdot kg^{-1}$$

Hmotnostní tok kyslíku vstupujícího do spalovací komory:

$$\dot{m}_{O_2_k} = \dot{m}_{vzduch_k} \cdot x_{O_2} \quad (3.105)$$

$$\dot{m}_{O_2_k} = 50 \cdot 0,21$$

$$\dot{m}_{O_2_k} = 10,5 kg \cdot s^{-1}$$

Jako palivo bude ve spalovací komoře sloužit zemní plyn, který je tvořen téměř výhradně methanem-CH₄. Pro výpočet v této práci bude uvažováno výhradní zastoupení methanu. Tedy molární zlomek x_{zem_p} i hmotnostní zlomek w_{zem_p} jsou rovny jedné.

$$p_{ZP} = 790000 Pa \quad (3.106)$$

$$t_{ZP} = 20 \text{ } ^\circ C \quad (3.107)$$

$$Q_i^r = 50 \cdot MJ \cdot kg^{-1} \quad (3.108)$$

$$x_{zem_p} = 1 \quad (3.109)$$

$$w_{zem_p} = 1 \quad (3.110)$$

$$M_{CH_4} = 16 kg \cdot kmol^{-1} \quad (3.111)$$

Objemové zatížení plamence určeno ze zdroje [82, str. 370]:

$$\dot{q}_{SK_red}^V = 50 MW \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1} \quad (3.112)$$

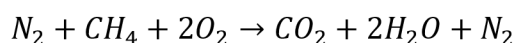
Zemní plyn bude díky kvalitním tryskám rozprašován do spalovací komory, která obsahuje vzduch. Tlak plyn před vstupem do trysek je zvolen vyšší, aby bylo docíleno ještě kvalitnějšího rozprašení. Entalpie zemního plynu byla získána jako entalpie methanu

pro teplotu 20 °C z Coolprop. Tato teplota byla zvolena stejně jako teplota vzduchu na vstupu do kompresoru.

$$i_{CH_4} = 892158,4 J \cdot kg^{-1} \quad (3.113)$$

Pokud bude sečten hmotnostní tok vzduchu a hmotnostní tok paliva, výsledkem bude hmotnostní tok spalín za spalovací komorou:

$$\dot{m}_{vzduch_k} + \dot{m}_{pal_k} = \dot{m}_{spaliny_k} \quad (3.114)$$



Z rovnice dokonalého hoření methanu [79], [80]:

$$N_2 + M_{CH_4} + 2 \cdot M_{O_2} \rightarrow M_{CO_2} + 2 \cdot M_{H_2O} + N_2 \quad (3.115)$$

$$28 + 16 + 2 \cdot 32 \rightarrow 44 + 2 \cdot 18 + 28$$

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

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

$$1,75 kg N_2 + 1 kg CH_4 + 4 kg O_2 \rightarrow 2,75 kg CO_2 + 2,25 kg H_2O + 1,75 kg N_2$$

Stechiometrický hmotnostní tok paliva dle předchozích výpočtů:

$$\dot{m}_{pal_s} = \frac{\dot{m}_{O_2_k}}{m_{O_2_CH_4}} = \frac{10,5}{4} \quad (3.117)$$

$$\dot{m}_{pal_s} \doteq 2,625 kg \cdot s^{-1}$$

Palivový poměr ze stechiometrie:

$$f_s = \frac{\dot{m}_{pal_stech}}{\dot{m}_{vzduch_k}} \quad (3.118)$$

$$f_s = \frac{2,625}{50}$$

$$f_s = 0,0525$$

Hmotnostní průtok vzduchu ze stechiometrie:

$$\dot{m}_{vzduch_s} = \frac{\dot{m}_{vzduch_k}}{\alpha} \quad (3.119)$$

$$\dot{m}_{vzduch_s} = \frac{50}{4,5}$$

$$\dot{m}_{vzduch_s} = 11,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Přebytek vzduchu zvolený iteračně:

$$\alpha = 4,5 \quad (3.120)$$

Palivový poměr zjištěný z palivového poměru získaného ze stechiometrie a přebytku vzduchu:

$$f = \frac{f_s}{\alpha} \quad (3.121)$$

$$f = \frac{0,0525}{4,5}$$

$$f = 0,0117$$

Hmotnostní průtok paliva:

$$\dot{m}_{pal_k} = f \cdot \dot{m}_{vzduch_k} \quad (3.122)$$

$$\dot{m}_{pal_k} = 0,0117 \cdot 50$$

$$\dot{m}_{pal_k} = 0,583 \text{ kg}_{pal} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hmotnostní průtok spalín za spalovací komorou:

$$\dot{m}_{spal_k} = \dot{m}_{vzduch_k} + \dot{m}_{pal_k} \quad (3.123)$$

$$\dot{m}_{spal_k} = 50 + 0,583$$

$$\dot{m}_{spal_k} = 50,583 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Bilance spalovací komory:

Před samotným výpočtem bude ještě určena vztažná entalpie $i_{CH_4, vztažná}$, která je totožná s i_{CH_4} , neboť teplota zemního plynu je stejná jako vztažná teplota. Vztažná teplota byla určena již při výpočtu kompresoru.

$$i_{paliva} = i_{CH_4} - i_{CH_4, vztažná} \quad (3.124)$$

$$i_{paliva} = 892158,4 - 892158,4$$

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

$$\dot{m}_{vzduch_k} \cdot i_{vzduch_k, vstup} + \dot{m}_{pal_k} \cdot i_{pal} + \dot{m}_{pal_k} \cdot Q_i^r = \dot{m}_{spal_k} \cdot i_{spal_k} \quad (3.125)$$

$$i_{spal_k} = \frac{\dot{m}_{vzduch_k} \cdot i_{vzduch_k, vstup_b} + \dot{m}_{pal_k} \cdot i_{paliva} + \dot{m}_{pal_k} \cdot Q_i^r}{\dot{m}_{spal_k}} \quad (3.126)$$

$$i_{spal_k} = \frac{50 \cdot 181980,1 + 0,583 \cdot (0) + 0,583 \cdot 50 \cdot 10^6}{50,583}$$

$$i_{spal_k} \doteq 756163,2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tlaková ztráta uvnitř spalovací komory, stanoveno pomocí [82]:

$$\Delta p = 0,02 \cdot p_{vzduch_k} = 0,02 \cdot 760000 = 15200 \text{ Pa} \quad (3.127)$$

Nyní budou vypočítány hmotnostní toky a hmotnostní zlomky složek spalin ve spalinách. Ty poslouží k dalšímu výpočtu:

$$\dot{m}_{N_2, spal} = \dot{m}_{vz, sp, kom} \cdot w_{N_2} \quad (3.128)$$

$$\dot{m}_{N_2, spal} = 50 \cdot 0,7648$$

$$\dot{m}_{N_2, spal} = 38,24 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$w_{N_2, spal} = \frac{\dot{m}_{N_2, spal}}{\dot{m}_{spal_k}} \quad (3.129)$$

$$w_{N_2, spal} = \frac{38,24}{50,583}$$

$$w_{N_2, spal} \doteq 0,7560$$

$$\dot{m}_{H_2O_spal} = \frac{w_{CH_4}}{W_{CH_4}} \cdot \dot{m}_{palivo_k} \cdot \frac{2 \cdot M_{H_2O}}{M_{CH_4}} \quad (3.130)$$

$$\dot{m}_{H_2O_spal} = 1 \cdot 0,583 \cdot \frac{36}{16}$$

$$\dot{m}_{H_2O_spal} \doteq 1,312 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$w_{H_2O_spal} = \frac{\dot{m}_{H_2O_spal}}{\dot{m}_{spal_k}} \quad (3.131)$$

$$w_{H_2O_spal} = \frac{1,312}{50,583}$$

$$w_{H_2O_spal} \doteq 0,0259$$

$$\dot{m}_{CO_2_spal} = \frac{w_{CH_4}}{W_{CH_4}} \cdot \dot{m}_{palivo_k} \cdot \frac{2 \cdot M_{CO_2}}{M_{CH_4}} \quad (3.132)$$

$$\dot{m}_{CO_2_spal} = 1 \cdot 0,583 \cdot \frac{44}{16}$$

$$\dot{m}_{CO_2_spal} \doteq 1,603 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$w_{CO_2_spal} = \frac{\dot{m}_{CO_2_spal}}{\dot{m}_{spal_k}} \quad (3.133)$$

$$w_{CO_2_spal} = \frac{1,603}{50,583}$$

$$w_{CO_2_spal} \doteq 0,0317$$

$$\dot{m}_{O_2_s_spal} = \dot{m}_{pal_k} \cdot m_{O_2_CH_4} \quad (3.134)$$

$$\dot{m}_{O_2_s_spal} = 0,583 \cdot 4$$

$$\dot{m}_{O_2_s_spal} \doteq 2,332 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{O_2_spal} = (\alpha - 1) \cdot \dot{m}_{O_2_s_spal} \quad (3.135)$$

$$\dot{m}_{O_2_spal} = (4,5 - 1) \cdot 2,332$$

$$\dot{m}_{O_2_spal} = 8,16 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$w_{O_2_spal} = \frac{\dot{m}_{O_2_spal}}{\dot{m}_{spal_k}} \quad (3.136)$$

$$w_{O_2_spal} = \frac{8,16}{50,583}$$

$$w_{O_2_spal} \doteq 0,1614$$

Tlak spalin na výstupu z komory:

$$p_{spalin_k_výstup} = p_{vzduch_k} - \Delta p \quad (3.137)$$

$$p_{spalin_k_výstup} = 760000 - 15200$$

$$p_{spalin_k_výstup} = 744800 \text{ Pa}$$

Energie dostupná v palivu:

$$\dot{Q}_{palivo} = Q_i^r \cdot \dot{m}_{pal_k} \quad (3.138)$$

$$\dot{Q}_{palivo} = 50 \cdot 10^6 \cdot 0,583$$

$$\dot{Q}_{palivo} = 29,15 \cdot 10^6 \text{ W} = 29,15 \text{ MW}$$

Objem plamence:

$$V_p = \frac{\dot{Q}_{palivo} \cdot \eta_{kom}}{p_{vzduch_k} \cdot \dot{q}_{SK_red}^V} \quad (3.139)$$

$$V_p = \frac{29,15 \cdot 10^6 \cdot 0,96}{760000 \cdot 50}$$

$$V_p \doteq 0,7364 \text{ m}^3$$

3.7 VÝPOČET SPALOVACÍ TURBÍNY

Spaliny, které vystupují ze spalovací komory odchází do spalovací turbíny. Vypočítaný výkon plynové turbíny poslouží díky převodovce k pohonu generátoru. Vyrobená elektrická energie je dodávána do přenosové soustavy, kterou může pomáhat regulovat dle aktuální potřeby.

Pro výpočet plynové turbíny je zaveden předpoklad výstupního tlaku:

$$p_{T_výstup} = 101325 \text{ Pa} \quad (3.140)$$

Pro výpočet plynové turbíny je dále zavedena poissonova konstanta pro tři a víceatomové plyny:

$$\kappa_T = 1,33 \quad (3.141)$$

Hodnoty z předešlých výpočtů:

$$\dot{m}_T = \dot{m}_{spal_k} = 50,583 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.142)$$

$$p_{T_vstup} = p_{spalin_k_výstup} = 744800 \text{ Pa} \quad (3.143)$$

$$t_{T_vstup} = t_{spalin_k} \doteq 630 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.144)$$

$$i_{T_vstup} = i_{spal_k} \doteq 756163,2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.145)$$

Expanzní poměr:

$$\varepsilon_T = \frac{p_{T_výstup}}{p_{T_vstup}} \quad (3.146)$$

$$\varepsilon_T = \frac{101325}{744800}$$

$$\varepsilon_T \doteq 0,136$$

Teplota spalin za turbínou:

$$t_{T_výstup} = T_{T_vstup} \cdot (\varepsilon)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 273,15 \quad (3.147)$$

$$t_{sp_T_out} = (630 + 273,15) \cdot (0,136)^{\frac{1,33-1}{1,33}} - 273,15$$

$$t_{sp_T_out} \doteq 277,37 \text{ }^\circ\text{C}$$

Entalpie složek spalin po expanzi pro $t_{sp_T_out}$ z Coolprop:

$$i_{N_2_T_výstup} = 574036 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.148)$$

$$i_{H_2O_T_výstup} = 3029084 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.149)$$

$$i_{CO_2_T_výstup} = 747369,3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.150)$$

$$i_{O_2_T_výstup} = 510851,3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.151)$$

Entalpie složek spalin pro teplotu 20 °C, která je od začátku výpočtu považována za vztahnou, pro výpočet entalpií:

$$i_{O_2_s_vztažná} = i_{O_2_vztažná} = 266413,5 J \cdot kg^{-1} \quad (3.152)$$

$$i_{N_2_s_vztažná} = i_{N_2_vztažná} = 304060,2 J \cdot kg^{-1} \quad (3.153)$$

$$i_{H_2O_s_vztažná} = 84007,3 J \cdot kg^{-1} \quad (3.154)$$

$$i_{CO_2_s_vztažná} = 501599,2 J \cdot kg^{-1} \quad (3.155)$$

Výpočet entalpie spalin po expanzi:

$$i_{sp_T_výstup} = w_{N_2_spal} \cdot (i_{N_2_T_výstup} - i_{N_2_s_vztažná}) + w_{H_2O_spal} \cdot (i_{H_2O_T_výstup} - i_{H_2O_s_vztažná}) + w_{CO_2_spal} \cdot (i_{CO_2_T_výstup} - i_{CO_2_s_vztažná}) + w_{O_2_spal} \cdot (i_{O_2_T_výstup} - i_{O_2_s_vztažná}) \quad (3.156)$$

$$i_{sp_T_výstup} = 0,756 \cdot (574036 - 304060,2) + 0,0259 \cdot (3029084 - 84007,3) + 0,0317 \cdot (747369,3 - 501599,2) + 0,1614 \cdot (510851,3 - 501599,2)$$

$$i_{sp_T_výstup} \doteq 327622,36 J \cdot kg^{-1}$$

Výpočet rozdílu entalpie spalin, které vstupují a vystupují ze spalovací turbíny:

$$\Delta i_T = i_{T_vstup} - i_{T_výstup} \quad (3.157)$$

$$\Delta i_T = 756163,2 - 327622,36$$

$$\Delta i_T = 428540,83 J \cdot kg^{-1}$$

Výpočet výkonu turbíny při 100% účinnosti:

$$P_{T_ideální} = \Delta i_T \cdot \dot{m}_T \quad (3.158)$$

$$p_{T_ideální} = 428540,83 \cdot 50,583$$

$$P_{T_ideální} \doteq 21676880,8 W \doteq 21,68 MW$$

Účinnost turbíny zvolena s použitím [68]:

$$\eta_r = 0,92 \quad (3.159)$$

Výpočet výkonu turbíny ze zvolené účinnosti:

$$P_T = P_{T_ideální} \cdot \eta_r \quad (3.160)$$

$$P_T = 21676880,8 \cdot 0,92$$

$$P_T \doteq 19942730,34 W \doteq 19,94 MW$$

Výpočet elektrického výkonu generátoru:

Dle zdroje [78] je zvolena účinnost převodovky mezi generátorem a plynovou turbínou. Jedná se o mechanickou účinnost:

$$\eta_m = 0,94\% \quad (3.161)$$

Dle zdroje [78] je dále zvolena účinnost generátoru:

$$\eta_{\text{generátor}} = 0,98\% \quad (3.162)$$

Elektrický výkon generátoru:

$$E_{\text{elekt}} = p_T \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{generátor}} \quad (3.163)$$

$$E_{\text{elekt}} = 19942730,34 \cdot 0,94 \cdot 0,98$$

$$E_{\text{elekt}} = 18371243,19W = 18,371MW$$

3.8 VÝPOČET AKUMULAČNÍ NÁDRŽE PRO OLEJ

Využití tepla získaného v prvním výměníku jako následek komprese vzduchu kompresorem, je výhodné z hlediska podstatného zvýšení účinnosti celého systému. Teplo bude přeneseno ze stlačeného vzduchu do termooleje a ten odchází do akumulární nádrže. Olejová nádrž i potrubní cesty mezi nádrží a výměníky bude zaizolovaná pro zamezení ztrát tepla. Naakumulované teplo poslouží při vybíjení výměníku k ohřátí stlačeného vzduchu. Nyní bude proveden výpočet parametrů nádrže oleje.

Z předešlého výpočtu zjištěná doba výroby elektrického proudu a zároveň stlačování a ukládání vzduchu:

$$\tau_{\text{vzduch}} = 7,7 h = 27720 s \quad (3.164)$$

Střední hustota pro olej z prvního výměníku, dřívější výpočet:

$$\rho_{o_s_1} = 803,3 kg \cdot m^{-3} \quad (3.165)$$

Hmotnostní průtok oleje z prvního výměníku, dřívější výpočet:

$$\dot{m}_{o_1} = 19,26 kg \cdot s^{-1} \quad (3.166)$$

Výpočet hmotnosti oleje procházejícího prvním výměníkem:

$$m_{o_1} = \dot{m}_{o_1} \cdot \tau_{\text{vzduch}} \quad (3.167)$$

$$m_{o_1} = 19,26 \cdot 27720$$

$$m_{o_1} = 533887 \text{ kg}$$

Objem nádrže na olej:

$$V_{nádrž} = \frac{m_{o_1}}{\rho_{o_s_1}} \quad (3.168)$$

$$V_{nádrž} = \frac{533887}{803,3}$$

$$V_{nádrž} \doteq 664,6 \text{ m}^3$$

Výpočet byl zjednodušen zanedbáním ztrát tepla do okolí a tlakových ztrát.

3.9 STANOVENÍ ÚČINNOSTI ADIABATICKÉHO CAES

Pro výpočet účinnosti je třeba určit některé veličiny s použitím vypočítaných hodnot v předchozím řešení.

Elektrická energie vyrobená na svorkách generátoru při plném vybití zařízení:

$$E_{e_v} = E_e \cdot \tau_v \quad (3.169)$$

$$E_{e_v} = 18,371 \cdot 22860$$

$$E_{e_v} = 419961,06 \text{ MJ}$$

Hodnota τ_v určená v předchozí kapitole, přepočtená na sekundy:

$$\tau_v = 6,35 \text{ h} = 6,35 \cdot 3600 = 22860 \text{ s} \quad (3.170)$$

Energie uložená v palivu z předchozího výpočtu:

$$\dot{Q}_p = Q_i^r \cdot \dot{m}_{pal_k} \quad (3.171)$$

$$\dot{Q}_p = 50 \cdot 10^6 \cdot 0,583$$

$$\dot{Q}_p = 29,15 \cdot 10^6 \text{ W} = 29,15 \text{ MW}$$

$$Q_{p_v} = \dot{Q}_p \cdot \tau_{vyb} \quad (3.172)$$

$$Q_{p_v} = 29,15 \cdot 22860$$

$$Q_{p_v} = 666369 \text{ MJ}$$

V podkapitole 2.1.1 byla zjištěna roční suma vyrobené elektřiny: 32,2 GWh a doba provozu 345 dnů v roce. Pomocí těchto veličin a denní doby nabíjení bude spočítána suma vyrobené elektrické energie za hodinu:

$$P_{solár_e_den} = \frac{P_{solár_e_rok}}{\text{počet dnů} \cdot \tau_{vzduch}} = \frac{32200}{345 \cdot 7,7} = 12,12 \text{ MWh} \quad (3.173)$$

$$P_{solár_e_den} = 12,12 \text{ MWh}$$

Průměrná denní doba výroby elektrické energie fotovoltaickou elektrárnou Ševětín, určená v kapitole 2:

$$\tau_{vzduch} = 7,7 \text{ h} = 27720 \text{ s} \quad (3.174)$$

Elektrická energie vyrobená solární elektrárnou:

$$E_{el} = P_{solár_e} \cdot \tau_{vzduch} \quad (3.175)$$

$$E_{el} = 12,12 \cdot 27720$$

$$E_{el} = 335966,4 \text{ MJ}$$

Celková účinnost adiabatického CAES:

$$\eta_{celk} = \frac{E_{e_v}}{E_{el} + Q_{p_v}} \quad (3.176)$$

$$\eta_{celk} = \frac{419961,06}{335966,4 + 666369}$$

$$\eta_{celk} = 0,419 \Rightarrow 41,9\%$$

Účinnost byla vypočítána z podílu elektrické energie vyrobené úplným vybitím uložiště generátorem a elektrické energie dodané solární elektrárnou vynásobené energií obsaženou v palivu.

3.10 SHRNUTÍ VÝPOČTU

Jednotlivé stěžejní body navrženého systému akumulace elektrické energie pro fotovoltaickou elektrárnu Ševětín jsou shrnuty v následující tabulce. Jednotlivé body je možné nalézt ve schématu na Obrázku č. 25 a straně 49.

Tab. 5 Shrnutí navrženého systému akumulace, upraveno z [68]

bod	látka	tlak [Pa]	teplota [°C]	hmotnostní průtok [kg · s ⁻¹]
1	vzduch	101325	20	40
2	vzduch	760000	248,2	40
3	vzduch	760000	65	40
4	vzduch	760000	55	50
5	vzduch	760000	55	50
6	vzduch	760000	200	50
7	zemní plyn	790000	20	0,583
8	spaliny	744800	630	50,583
9	spaliny	101325	277,37	50,583
10	termoolej		220	19,26
11	termoolej		50	19,26
12	termoolej		60	20,02
13	termoolej		220	20,02

4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO SYSTÉMU AKUMULACE

Kapitola vypracována s použitím zdrojů [63, 68, 69]

V této kapitole bude provedeno základní ekonomické zhodnocení navrženého systému akumulace elektrické energie. Mnoho parametrů muselo být voleno ze zkušenosti nebo odhadem, proto je zřejmé že reálný ekonomický výsledek hospodaření může být značně jiný. Například cena zemního plynu je u podobně zaměřených zhodnocení uvažována z ceníku pro domácnosti. Autor této práce má za to, že se jedná o chybu, která může ekonomické zhodnocení výrazně zkreslit. Při objemech potřebného zemního plynu bude jeho cena výrazně nižší, neboť značnou položku v ceně plynu pro domácnosti tvoří distribuční a přidružené náklady. Navíc akumulační zařízení pro elektrický proud budou často stavět významné společnosti, které mají svou distribuci. Proto v tomto výpočtu bude uvažována aktuální cena zemního plynu na energetické burze a u nákladů na distribuci bude proveden kvalifikovaný odhad.

Dalším parametrem, který může celkové ekonomické zhodnocení výrazně ovlivnit, je odhadovaná cena nákladů na výstavbu tohoto zařízení. Ty prakticky nikdo nedokáže spolehlivě odhadnout. V době psaní této práce probíhají v České republice úvahy o rozšíření jaderné elektrárny Dukovany a i když na tomto problému pracuje mnoho odborníků, odhady nákladů výstavby se velmi liší. Přitom jaderných zařízení bylo postaveno značně více než akumulačních zařízení na stlačený vzduch.

Důležitým kritériem v ekonomickém zhodnocení je celková doba odstávek a náklady servisních prací na zařízení. Z kapitoly o zařízení MCIntosch v USA bylo zřejmé, že při spouštění takového zařízení mohou nastat značné komplikace.

4.1 INVESTIČNÍ NÁKLADY

Dle zdroje [63] a průzkumu trhu jsou investiční náklady na výstavbu 400-1000 \$·kW⁻¹

S přihlédnutím k inflaci budu uvažovat 750 \$·kW⁻¹

Dle kurzovnímu lístku České národní banky k 19.5.2021, viz [65] je kurz 1\$ = 20,912 Kč.

Z výše uvedeného **náklady na výstavbu** činí:

$$N_{CK} = 750 \cdot P_T \quad (4.1)$$

$$N_{CK} = 750 \cdot 19940$$

$$N_{CK} = 14955000 \$$$

Přepočet na českou korunu:

$$N_{CK_CZK} = 14955000 \cdot 20,912 = \mathbf{312,74 \text{ mil Kč}} \quad (4.2)$$

Roční náklady na provoz:

Náklady na provoz činní 19-25 \$·kW⁻¹/rok [63]

Dle [63], volím 23 \$·kW⁻¹/rok, tedy **roční provozní náklady** činní:

$$N_p = 23 \cdot P_T \quad (4.3)$$

$$N_p = 23 \cdot 19940$$

$$N_p = 458620 \$$$

Přepočet na českou korunu:

$$N_{P_CZK} = 458620 \cdot 20,912 = \mathbf{9,59 \text{ mil Kč}} \quad (4.4)$$

4.2 NÁKLADY NA PALIVO PRO PROVOZ ADIABATICKÉHO CAES

Dle [66] je cena zemního plynu k 19.5.2021 0,1064 \$/m³

Cena zemního plynu v korunách:

$$C_{zp} = 0,1064 \cdot 20,912 = 2,23 \text{ Kč/m}^3$$

K burzovní ceně zemního plynu budou přičteny náklady na jeho distribuci a další služby ve výši 120% ceny zemního plynu.

Náklady na 1 m³ zemního plynu po započítání ceny za distribuci:

$$C_{ZP} = C_{zp} + 1,2 \cdot C_{zp} = 2,23 + 1,2 \cdot 2,23 \cong 4,9 \text{ Kč/m}^3 \quad (4.5)$$

Roční provoz solární elektrárny, stejně jako systému akumulace je uvažován 345 dnů v roce, pro nutné odstávky a údržbu.

Dříve zjištěný hmotnostní průtok paliva: $\dot{m}_{pal_k} = 0,583 \text{ kg}_{pal} \cdot s^{-1}$

Hustota zemního plynu pro teplotu 20 °C a tlak 101320 Pa dle programu Peace software, předpoklad 100% methanu: $\rho_{zp} = 0,668 \text{ kg/m}^3$

Doba vybíjení dle předchozích výpočtů:

$$\tau_v = 6,35 \text{ h} = 22860 \text{ s} \quad (4.6)$$

Roční objem spotřebovaného paliva:

$$V_{pal} = \frac{\dot{m}_{pal_k} \cdot \tau_v \cdot 345}{\rho_{zp}} \quad (4.7)$$

$$V_{pal} = \frac{0,583 \cdot 22860 \cdot 345}{0,668}$$

$$V_{pal} = 6883153 \text{ m}^3$$

Náklady na palivo za 1 rok provozu:

$$N_{pal} = V_{pal} \cdot C_{zp} = 6883153 \cdot 4,9 = \mathbf{33,727 \text{ mil K}\check{c}} \quad (4.8)$$

4.3 ROČNÍ TRŽBY

Drobnějších tržeb, které může generovat provoz akumulačního zařízení elektrické energie může být vícero. Například částečné využití tepla z termooleje. Ekonomické zhodnocení v této práci bude zaměřeno na dvě hlavní tržby a to: za dodávku kladné a záporné regulační energie.

Sazby byly zjištěny z Cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. XX/2017 ze dne XX. listopadu 2017, viz [67]

Výše sazeb je následující:

Cena kladné regulační energie $SR^+ = 2350 \text{ K}\check{c} \cdot \text{MWh}^{-1}$

Cena záporné regulační energie $SR^- = 1 \text{ K}\check{c} \cdot \text{MWh}^{-1}$

Pro toto ekonomické zhodnocení budeme předpokládat, že veškerá elektrická energie bude prodána v sazbě za regulační energii.

Vypočítaný elektrický výkon generátoru:

$$E_{elekt} = 18,371 \text{ MW} \quad (4.9)$$

Elektrická energie vyrobená za 1 rok provozu:

$$E_{ELEKT1} = E_{elekt} \cdot \tau_v \cdot 345 = 18,371 \cdot 6,35 \cdot 345 = 40246 \text{ MWh} \quad (4.10)$$

Roční tržba za kladnou regulační energii činí:

$$P_{E+} = 2350 \cdot E_{ELEKT1} = 2350 \cdot 40246 = 94,578 \text{ mil K}\check{c} \quad (4.11)$$

Elektrická energie spotřebovaná kompresorem za 1 rok provozu:

$$E_{ELEKT2} = P_{K_skut} \cdot \tau_{vzduch} \cdot 345 = 13,243 \cdot 7,7 \cdot 345 = 35180 \text{ MWh} \quad (4.12)$$

Pro výpočet bude uvažováno zjednodušení, že veškerá uložená energie, bude považována za zápornou regulační energii.

Roční tržba za zápornou regulační energii činí:

$$P_{E-} = 1 \cdot E_{ELEKT2} = 1 \cdot 35180 = 35180 \text{ K}\check{c} \quad (4.13)$$

Celkový roční příjem za obě regulační energie:

$$P_E = P_{E-} + P_{E+} = 94,578 + 0,035 = \mathbf{94,613 \text{ mil Kč}} \quad (4.14)$$

Výpočet ročního zisku:

$$Z = P_E - N_{Pal} - N_{P_{CZK}} = 94,613 - 33,727 - 9,59 = \mathbf{51,296 \text{ mil Kč}} \quad (4.15)$$

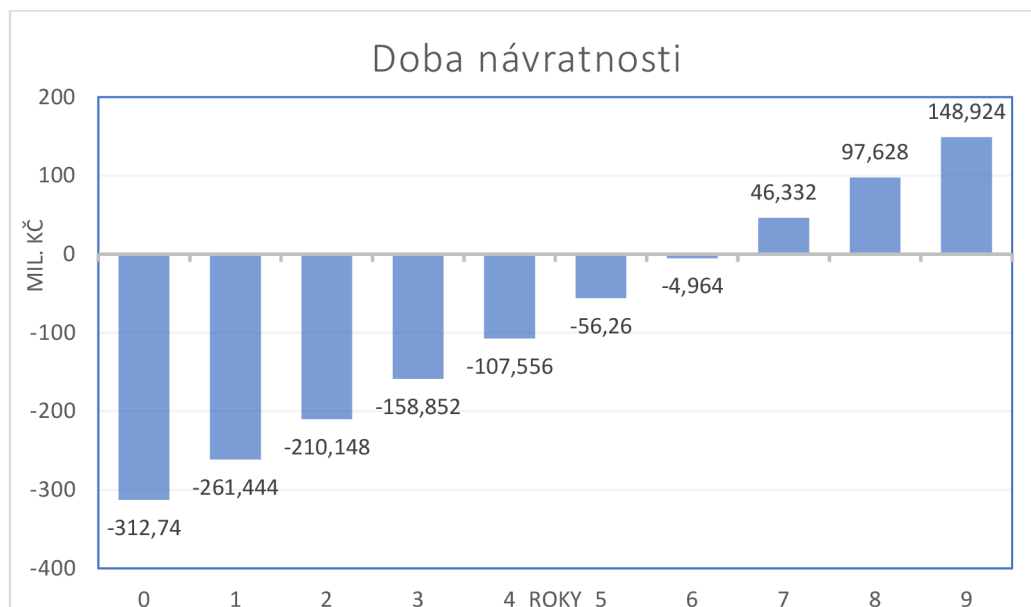
Roční zisk je vypočítán jako roční příjem za regulační energii minus roční náklady na palivo a provozní náklady.

4.4 VÝPOČET TEORETICKÉ DOBY NÁVRATNOSTI INVESTOVANÝCH PROSTŘEDKŮ

Teoretická doba návratnosti je spočítaná jako podíl prvotní investice do zařízení a ročního zisku.

$$\tau = \frac{N_{CK_CZK}}{Z} = \frac{312,74}{51,296} \cong \mathbf{6,1 \text{ let}} \quad (4.16)$$

Teoretická doba návratnosti byla vypočítána bez uvažování diskontní sazby. Není tedy započítán pokles hodnoty peněz. S výstavbou tohoto nebo podobného zařízení není zatím počítáno, proto mění se diskontní sazba daná Českou národní bankou nebyla uvažovaná. Byla vypočítána pouze prostá návratnost, která by v případě výpočtu diskontovaného Cashflow vyšla vyšší. Do výpočtu nebyly také uvažovány další náklady, které jsou dopředu většinou stěží predikovatelné. Odhad autora práce je reálná doba návratnosti okolo 8 let.



Obr. 26 Graf návratnosti vypočítaného Adiabatického CAES

DISKUSE

Motivací k sepsání diskuse byl záměr seznámit případné zájemce o danou problematiku s nedostatky a částečnou idealizací této diplomové práce.

V rešeršní části práce nebyly zpracovány všechny možnosti akumulace elektrické energie. V souladu se zadáním byly vybírány přednostně ty typy, které je možné použít pro tzv. velkou energetiku a obnovitelné zdroje. V poslední části rešerše, kde byly popisovány nové možnosti akumulace, byly vybrány ty způsoby akumulace, které mají alespoň částečné praktické prověření.

U návrhu akumulace elektrické energie ve stlačeném vzduchu bylo mnoho veličin zvoleno dle dostupných pramenů informací, uvedených na příslušném místě výpočtu a výpočet mohly ovlivnit. Vzhledem k složitosti navrhovaného zařízení by komplexní výpočet potřeboval mnohonásobně více prostoru a úsilí mnoha specialistů. Cílem práce bylo provést základní nastínění řešeného problému, základní termodynamický výpočet a částečné technické posouzení. V řešení byly některé veličiny zanedbány, například tlakové a tepelné ztráty. Jako příklad lze uvést tepelné ztráty v potrubí rozvádějící termoolej nebo tepelné ztráty přes stěnu kaverny.

V případě ekonomického posouzení byla snaha vycházet z aktuálních dostupných informací. Tak byly zjišťovány například aktuální ceny kladné regulační energie, cena zemního plynu nebo směnný kurz mezi českou korunou a dolarem. Některé tyto veličiny se v průběhu času mohou nezanedbatelně měnit.

V rámci diskuse bych ještě uvedl částečné překvapení z toho, jak rychle se rozvíjí obor akumulace elektrické energie. Rozvíjející se potřeba akumulovat elektrickou energii, zvláště s rozvojem obnovitelných zdrojů, je obecně známá. Dynamika vývoje je ale značná. Do budoucna se jedná jistě o perspektivní obor, který se bude ještě více rozvíjet.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo nejdříve zpracovat přehled dostupných způsobů akumulace elektrické energie, zvláště se zaměřením na akumulaci vhodnou pro spojení s obnovitelnými zdroji. Další body byly zaměřeny na návrh akumulace ve stlačeném vzduchu pro zvolenou fotovoltaickou elektrárnu a technicko-ekonomické posouzení navrženého způsobu akumulace.

V rešeršní části práce byla snaha o popsání základních způsobů akumulace elektrické energie, částečně s přihlédnutím k historii a možnostem akumulace v drobnějším měřítku. Majoritní zaměření rešerše bylo ale věnováno možnostem akumulace pro tzv. velkou energetiku. Prostor byl věnován elektrochemickým akumulátorům, přečerpávacím elektrárnám a popisu ukládání elektrické energie do stlačeného vzduchu. Vždy byla snaha uvést konkrétní aplikace, které se v rámci toho či onoho zdroje uskutečnily v nedávné době. Pro porovnání základních parametrů mezi jednotlivými způsoby akumulace byla do rešerše vložena tabulka s jejich základním porovnáním.

Závěrečná část rešeršního úseku diplomové práce byla věnována perspektivním možnostem akumulace elektrické energie, které prochází vývojem a objevily se z velké části až v poslední době. Zvláště bych vyzvedl systém Gravitricity, jehož praktické výsledky bude možné zkoumat a získat i v České republice a doporučuji ho k dalšímu studiu a případnému rozpracování v dalších pracích. Jednotlivé výhody a nevýhody těchto posledních směrů v akumulaci byly popsány ústně, neboť všechny parametry nejsou ještě známy.

V druhé kapitole byl proveden výběr fotovoltaického zdroje elektrické energie. Byla zvolena fotovoltaická elektrárna Ševětín, neboť se jedná o jednu z největších fotovoltaických elektráren v naší zemi. Důvodem tohoto výběru byl také její vlastník, který by pravděpodobně jako jeden z mála byl schopen v současnosti zařízení na akumulaci elektrické energie vybudovat. V této kapitole byly popsány získané parametry této elektrárny a přiblíženy základní dostupné informace o elektrárně. Součástí kapitoly byl výpočet průměrné denní doby provozu elektrárny.

V následující kapitole byl proveden návrh akumulace elektrické energie v pokročilém uložišti energie ve stlačeném vzduchu. Pro systém byly zvoleny jednotlivé komponenty a k nim byl proveden termodynamický výpočet a částečně technické posouzení. Celková účinnost navrženého způsobu akumulace dosáhla hodnoty 41,9 %. Pro snadnější orientaci v samotném návrhu bylo vyhotoveno shrnutí základních vypočítaných veličin.

Poslední stránky práce patřily ekonomickému posouzení a vypočítání základních ekonomických parametrů a doby návratnosti počáteční investice. Na základě získaných dat a vypočítaných veličin vyšla doba návratnosti 6,1 let. Tento výsledek lze považovat za velmi dobrý a takováto instalace by mohla přinést investorovi zisk mnoho let po splacení prvotní investice. V reálné praxi je ale nutné počítat s případnými neočekávanými poruchami nebo problémy během zavádění zařízení, proto bude reálná doba návratnosti pravděpodobně nepatrně vyšší.

Úkoly zadání byly řešeny v kapitolách:

- 1) Přehled dostupných způsobů akumulace se zaměřením na akumulaci vhodnou pro spojení s obnovitelnými zdroji energie (1. kapitola)
- 2) Návrh akumulace ve stlačeném vzduchu pro vybranou fotovoltaickou elektrárnu. (2. a 3. kapitola)
- 3) Technicko-ekonomické posouzení navrženého způsobu akumulace. (3. a 4. kapitola)

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] DVORSKÝ, E. a HEJTMÁNKOVÁ, P. , Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073001187.
- [2] PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.
- [3] ŠPINAR, Marek. Ekonomické aspekty stavby a provozu tepelné elektrárny na biomasu. 2013. 47 l. Bakalářská práce. Vedoucí práce Petr Mastný.
- [4] RADIL, Lukáš. Současné možnosti akumulace elektrické energie. TZB-info.cz [online]. [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/docu/clanky/0080/008065_Radil_Baterie.pdf
- [5] POSPÍŠIL, Jiří. Akumulace elektrické energie. Vysokoškolský výukový text. 2017.
- [6] Obnovitelná energie a úspory energie: Akumulace elektriny. Tzbinfo [online]. [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny>
- [7] MAREŠ, Jan, Martin LIBRA, Vladislav POULEK a . Akumulace elektrické energie. ELEKTRO: Časopis pro elektrotechniku [online]. 2019 [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie--9696>
- [8] CESTY K AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE. ČEZ [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html
- [9] WÁGNER, Vladimír. Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie. OENERGETICE.cz [online]. 11. září 2018, 16:56 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie/>
- [10] Hydrostor launches new Terra bulk energy storage system. Energy storage news: Global news, analysis and opinion on energy storage innovation and technologies [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/news/hydrostor-launches-new-terra-bulk-energy-storage-system>
- [11] PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNA DALEŠICE. SKUPINA ČEZ [online]. 2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/dalesice-58156>
- [12] ČTK. Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice je v provozu již 40 let. OENERGETICE.cz [online]. 17. září 2018, 13:54 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z:

<https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarna-dalesice-je-v-provozu-jiz-40-let/>

- [13] Jak funguje olověný akumulátor?. Tzbinfo [online]. Battery University, 2.8.2017 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [14] Ni-cd akumulátor 1,2 V 1600mAh modrá. MiniInTheBox.com [online]. MiniInTheBox, 2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.miniinthebox.com/cz/p/ni-cd-akumulator-1-2-v-1600mah-modra_p194069.html
- [15] CESTY K AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE. Energyweb [online]. energyweb [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=6.1.6
- [16] DVOŘÁK, Petr. Superkondenzátory: (Elektrochemické kondenzátory). Tzbinfo [online]. Topinfo, 2019, 16.8.2010 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6710-superkondenzatory>
- [17] RADIL, L. Eliminace diskontinuity dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Vysoké učení technické v Brně: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013, 166 s. Dizertační práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.
- [18] JESTŘÁB, T. Vliv akumulace na provoz distribuční sítě. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 70 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [19] Akumulace elektrické energie. Elektro: časopis pro elektrotechniku [online]. FCC Public, 2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie-9696>
- [20] DIOPAN, Václav. Superkondenzátory: nahradí v budoucnu lithium-iontové baterie?. Hybrid.cz [online]. Hybrid, 2018, 20 Březen 2018 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/superkondenzatory-nahradi-v-budoucnu-lithium-iontove-baterie>
- [21] PAVLOVEC, LUKÁŠ, JAN ŽITKA a ZBYNĚK PIENKA. CHEMICKÝ POHLED NA LITHIUM-IONTOVÉ BATERIE. Chemické listy [online]. 2018, 508 - 516 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3150/3134>
- [22] The Four Components of a Li-ion Battery. Samsung SDI [online]. SAMSUNG SDI CO, 2016 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z:

- <https://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/55272.html?listType=gallery>
- [23] ING. TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory: Přehled základních typů a jejich vlastností. TZB info [online]. Topinfo, 2019 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [24] TICHÝ, Ing. Jiří. Lithiové akumulátory: Přehled základních typů a jejich vlastností. Tzb-info.cz [online]. c2001-2021, 15.7.2019 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [25] LENC, Michal. Encyklopedie Tesly: Baterie Powerwall, Powerpack a Megapack. Elonx [online]. c2021, 6.7.2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.elonx.cz/encyklopedie-tesly-baterie-powerwall-powerpack-a-megapack/>
- [26] BÁRTA, Martin. Austrálie zvýší stabilitu energetické sítě další baterií Megapack od Tesly Elona Muska. Energozrouti.cz [online]. energozrouti.cz, c2019-2020, 6.11.2020 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://energozrouti.cz/z/australie-zvysi-stabilitu-energeticke-site-dalsi-baterii-megapack-od-elona-muska>
- [27] Electric Power Research Institute and U.S. Department of Energy. 2003. Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications. Palo Alto, CA, and Washington.
- [28] Electric Power Research Institute and U.S. Department of Energy. 2004. *Energy Storage for Grid-Connected Wind Generation Applications*. Palo Alto, CA, and Washington.
- [29] REŠILIÁNO, T. Akumulace energie v tlakovém vzduchu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 75 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [30] HAISHENG C., XINJING Z., JINCHAO L., CHUNQUING T., Compressed Air Energy Storage, [online]. 2013 [cit. 2014-04-10], Dostupné z WWW: <http://dx.doi.org/10.5772/52221>
- [31] Power to Pressure. Update: The phoenix contact innovation magazine [online]. Phoenix Contact, c2020, 5.11.2020 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://update.phoenixcontact.com/en/energy/provider/power-to-pressure/>
- [32] DVORÁK, Ing. Petr, doc. Ing. Petr BAČA a Ing. David PLÉHA PH.D. Akumulace elektřiny. TZB info [online]. Topinfo, 2011 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
- [33] REICHL, Tomáš. Průtoková baterie. OEnergetice [online]. OM Solutions s.r.o., 2015 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/prutokova-baterie>

- [34] Německým vědcům se podařilo vylepšit vlastnosti redox-flow baterií. Solární novinky [online]. 2020 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/148190-2/>
- [35] F. Crotogino, K. U. Mohmeyer, and R. Scharf. 2002. Huntorf CAES: More Than Twenty Years of Successful Operation. Solution Mining Research Institute Meeting Orlando, FL.
- [36] BECKMANN, G., GILLI, P. V. Thermal energy storage, Wien: Springer- Verlag, 1984, 230 p. ISBN: 3-211-81764-6.
- [37] JAK MŮŽE ČESKÁ SÍŤ ZVLÁDNOUT ÚTLUM UHELNÝCH ELEKTRÁREN A NÁSTUP OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ. Glopolis [online]. Glopolis a Frank Bold, květen 2018 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: https://frankbold.org/sites/default/files/publikace/infolist-sit_bez_uhli.pdf
- [38] VODNÍ ELEKTRÁRNY ŠTĚCHOVICE. SKUPINA ČEZ [online]. c2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/stechovice-58100>
- [39] SCHREIER, Martin. PŘEČERPÁVACÍ ELEKTRÁRNY POKOŘILY HISTORICKÝ REKORD. ZA POSLEDNÍCH 10 LET ZVEDLY VÝROBU DVOJNÁSOBNĚ A POČET STARTŮ O VÍCE NEŽ 70 %. SKUPINA ČEZ [online]. c2021, 28.12.2020 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/precerpavaci-elektrarny-pokorily-historicky-rekord.-za-poslednich-10-let-zvedly-vyrobu-dvojnaso-bne-a-pocet-startu-o-vice-nez-70-127385>
- [40] VOBOŘIL, David. Přečerpávací vodní elektrárny v České republice. OENERGETICE.cz [online]. 3. ledna 2017 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice>
- [41] PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNA DLOUHÉ STRÁNĚ. SGGEOTECHNIKA [online]. SG GEOTECHNIKA, 2020 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.geotechnika.cz/cs/co-delame/reference/112-precerpavaci-vodni-elektrarna-dlouhe-strane>
- [42] PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNA DLOUHÉ STRÁNĚ. SKUPINA ČEZ [online]. ČEZ, 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/dlouhe-strane-58155>
- [43] Hydroenergetika na Ukrajině. Tv-adams.wz.cz [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <http://www.tv-adams.wz.cz/seznamy/evropa/ve/ukrajina.html>
- [44] Частка Укргідроенерго у виробництві електроенергії торік сягнула 10,5%. Www.ukrinform.ua: Мультимедійна платформа іномовлення

- України [online]. c2015-2021, 15.1.2019 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/2620103-castka-ukrgidroenergo-u-virobnictvi-elektroenergii-torik-sagnula-105.html>
- [45] Dniester PSP. UKRHYDROPROJECT PRJSC [online]. c2021 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: http://uhp.kharkov.ua/en/dniester_psp
- [46] A model system. International Water Power [online]. c2021, 10. 2. 1999 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.waterpowermagazine.com/features/featurea-model-system/>
- [47] PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNA. Wikipedie: Otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99e%C4%8Derp%C3%A1vac%C3%AD_vodn%C3%AD_elektr%C3%A1rna
- [48] Japanese pumped storage embraces the ocean waves. International water power [online]. c2021, 14.8.2000 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.waterpowermagazine.com/features/featurejapanese-pumped-storage-embraces-the-ocean-waves/> Japanese pumped storage embraces the ocean waves. International water power [online]. c2021, 14.8.2000 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.waterpowermagazine.com/features/featurejapanese-pumped-storage-embraces-the-ocean-waves/>
- [49] Pumped hydro energy storage – making better use of wind. Yes2renewables.org [online]. 9.10.2013 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://yes2renewables.org/2013/10/09/pumped-hydro-energy-storage-making-better-use-of-wind/>
- [50] Startup Gravitricity staví prototyp gravitačního systému pro uskladnění energie. OSEL: Objective Source E-learning [online]. 1.9.2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/11349-startup-gravitricity-stavi-prototyp-gravitacniho-systemu-pro-uskladneni-energie.html>
- [51] Fast, long-life energy storage. GRAVITRICITY [online]. [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://gravitricity.com/technology/>
- [52] AKUMULACE NEJSOU JEN BATERKY A PŘEČERPÁVAČKY: VZNIKAJÍCÍ ZPŮSOBY UKLÁDÁNÍ ENERGIE, KTERÉ SI ZASLOUŽÍ VAŠI POZORNOST. Aliance pro energetickou soběstačnost [online]. c2011-2019, 3.9.2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.alies.cz/akumulace-nejsou-jen-baterky-a-precerpavacky-vznikajici-zpusoby-ukladani-energie-ktere-si-zaslouzi-vasi-pozornost/>
- [53] Huisman start fabrication of energy storage demonstrator. The engineer [online]. c2019, 2.9.2020 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.theengineer.co.uk/huisman-kelvin-power-gravitricity/>

- [54] Energy Vault SA: Concrete energy storage technology. Startupch [online]. c2020 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.startup.ch/EnergyVault>
- [55] <http://www.sinelab.com/resources/illustration/FastCompanyEnergyVault.html>
- [56] Energy Vault uskládá energii s masivním jeřábem a těžkými bloky betonu. OSEL: Objective Source E-learning [online]. 14.10.2019 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/10832-energy-vault-uskladnuje-energii-s-masivnim-jerabem-a-tezkymi-bloky-betonu.html>
- [57] COMMERCIAL DEMONSTRATION UNIT. Energy Vault: Enabling a renewable world [online]. Energy Vault, c2021 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://energyvault.com/commercial-demonstration-unit/>
- [58] Video: Energy Vault spouští do provozu první baterii v podobě jeřábu s účinností 85%. Www.solarninovinky.cz [online]. Dobrá 177: Ing. Jaroslav Dorda, c2009-2021, 15.1.2021 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/video-energy-vault-spousti-do-provozu-prvni-baterii-v-podobе-jeřabu-s-ucinnosti-85/>
- [59] JCG commits US\$13mn in Highview Power to help tackle renewable energy storage gap in Africa. African review: of business and technology [online]. Alain Charles Publishing, c2020, 9.2.2021 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.africanreview.com/energy-a-power/renewables/jcg-commits-us-13mn-in-highview-power-to-help-tackle-renewable-energy-storage-gap-in-africa>
- [60] KRONEISL, Jan. V Anglii otestují akumulaci energie do zkapalněného vzduchu. Dokáže tato technologie konkurovat bateriím? OENERGETICE.cz [online]. OM Solutions, 6.6.2018 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/anglii-otestuji-akumulaci-energie-zkapalneneho-vzduchu-dokaze-tato-technologie-konkurovat-bateriim>
- [61] Největší baterie na principu zkapalněného vzduchu na světě se staví ve Velké Británii. Solární novinky.cz [online]. c2009-2021, 4.9.2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/nejvetsi-baterie-na-principu-zkapalneneho-vzduchu-na-svete-se-stavi-ve-velke-britanii/>
- [62] KEKRT, Lukáš. Britské úložiště CRYOBattery bude skladovat energii v podobě kapalného vzduchu. Profí průmysl [online]. Čas, c2021 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.profiprumysl.cz/sektory/energetika-a-tezba/britske-uloziste-cryobattery-bude-skladovat-energii-v-podobе-kapalneho-vzduchu/>
- [63] ŠMÍD, Jakub. Model použití akumulace elektřiny: Business case of electricity storage system. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Filip Jelínek.
- [64] “Roční zpráva”, OTE, a.s. [Online]. Available: <http://www.otecr.cz/statistika/rocni-zprava>. [Accessed: 01-May-2021].

- [65] Obchodní kurz - kurzovní lístek ČNB. Česká národní banka [online]. ČNB, c2021, 19.5.2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/platebni-styk/sluzby-pro-klienty/kurzovni-listek-cnb/>
- [66] Zemní plyn - ceny a grafy zemního plynu, vývoj ceny zemního plynu 1m³ - 18 let - měna USD. KURZYCZ [online]. Kurzy.cz, c2000-2021, 19.5.2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/zemni-plyn-graf-vyvoje-ceny/1m3-usd-30-let>
- [67] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. XX/2017 ze dne XX. listopadu 2017: kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a další regulované ceny [online]. 20.11.2017 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/3691381/CR_ER%C3%9A_2018_VVN+VN+do+VKP.pdf/aea1bc71-7902-4bfa-8466-2df44bcd4bf3
- [68] BEDNÁŘ, F. *Analýza možností akumulace 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.
- [69] 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.
- [70] FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA ŠEVĚTÍN. SKUPINA ČEZ [online]. ČEZ, 2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobnizdroje/obnovitelne-zdroje/slunce/provozovane-fotovoltaicke-elektrarny/fotovoltaicka-elektrarna-sevetin-58087>
- [71] Mapy.cz. Seznam.cz [online]. Seznam.cz, 2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=14.5699017&y=49.0987372&z=13&source=base&id=2116096>
- [72] FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA ŠEVĚTÍN. Svět energie: vzdělávací portál čez [online]. ČEZ, 2020 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/sluncni-elektrarny-cez/fotovoltaicka-elektrarna-sevetin>
- [73] Technický datový list- MOL Thermol 68: teplotnosný olej. MOL Česká republika: Member of MOL group [online]. Praha: MOL Česká republika, 2019.05.23 8:30 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://molcesko.cz/cz/maziva-autochemikalie/prumysl/prumyslova-maziva/teplotnosne/mol-thermol-68/>
- [74] BECKMANN, Georg, GILLI, Paul. Thermal energy storage, 1984. ISBN 3-211-81764-6.

- [75] KADRNOŽKA, Jaroslav. *tepelné elektrárny a teplárny*, 1984. SNTL.
- [76] ŠKORPÍK, Jirí. *Transformační technologie*, <http://www.transformacni-technologie.cz>, ISSN 1804-8293.
- [77] FRAAS, A. *Heat exchanger design*. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, c1989, x, 547 s. ISBN 0-471-62868-9.
- [78] MARTINÁK, R. *Využití stlačeného vzduchu pro akumulaci elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 43 s.
- [79] MRÁZKOVÁ, Ing. Mariana. *Alkany*. ZŠ Slušovice [online]. ZŠ Slušovice [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: http://data.zsslusovice.cz/wcd/prezentace/chemie/ch_027_uhlovodky_alkany.pdf
- [80] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [81] VESELÝ, Stanislav. *Spalovací komory: termodynamika a základy konstrukce*. Brno: [s.n.], 2007, 237 s. ISBN 978-80-254-0418-8.
- [82] KOUSAL, Milan. *Spalovací turbíny*, 1980. 2. vydání, přepracované. Praha: Nakladatelství technické literatury, n. p.
- [83] 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.
- [84] FlyeES: *Čeští vědci pracují na vývoji nové setrvačnickové baterie*. www.solarninovinky.cz [online]. Dobrá 177: Ing. Jaroslav Dorda, c2009-2021, 21.11.2019 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/flyees-cesti-vedci-pracuji-na-vyvoji-nove-setrvacnikove-baterie/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Řez olověným akumulátorem [13].....	16
Obr. 2 Superkondenzátory [20].....	17
Obr. 3 Setrvačnicková baterie [84]	18
Obr. 4 Supravodivý akumulátor menších rozměrů [15].....	19
Obr. 5 Ni-Cd akumulátor [14].....	21
Obr. 6 Řez lithiovým akumulátorem [24]	23
Obr. 7 Nabíjení/ vybíjení lithiové baterie [23]	23
Obr. 8 Vizualizace Tesla Megapack [26]	24
Obr. 9 Schéma průtokové baterie [33]	26
Obr. 10 Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice [12]	28
Obr. 11 Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice [38].....	29
Obr. 12 Přečerpávací vodní elektrárna Dněstr PSP [44].....	31
Obr. 13 Mořská přečerpávací vodní elektrárna Okinawa Yambaru [49]	33
Obr. 14 Princip tlakovzdušné akumulární elektrárny [10]	34
Obr. 15 Zařízení CAES v Huntorfu [31].....	38
Obr. 16 Systém ukládání elektrické energie- Gravitricity [50].....	41
Obr. 17 Další varianta akumulárního uložení Gravitricity [53].....	41
Obr. 18 Vizualizace systému Energy Vault [54].....	43
Obr. 19 Detail konstrukce jeřábu- Energy Vault [55].....	43
Obr. 20 Vizualizace zařízení- Highview Power [59]	45
Obr. 21 Lokace fotovoltaické elektrárny Ševětín [71].....	46
Obr. 22 Fotonvoltaická elektrárna Ševětín [72]	47
Obr. 23 Struktura pokrytí spotřeby el. energie, lednový týden 2030, ČR [37].....	49
Obr. 24 Struktura pokrytí spotřeby el. energie, červencový týden 2030, ČR [37]	49
Obr. 25 Technické schéma navrženého systému akumulace el. energie, upraveno z [68]	50
Obr. 26 Graf návratnosti vypočítaného Adiabatického CAES	82

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání přečerpávacích vodních elektráren v ČR [40].....	30
Tab. 2 Porovnání jednotlivých způsobů akumulace, zpracováno dle zdrojů z dosavadní rešerše a [69].....	39
Tab. 3 Fyzikální vlastnosti termooleje MOL thermol 68 [73].....	51
Tab. 4 Vlastnosti a typické hodnoty termooleje MOL thermol 68 [73]	52
Tab. 5 Shrnutí navrženého systému akumulace, upraveno z [68]	78

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AA CAES	pokročilé adiabatické uložení el. energie ve stlačeném vzduchu
A-CAES	pokročilé uložení elektrické energie ve stlačeném vzduchu
ADELE	adiabater Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung
atd.	a tak dále
CAES	uložení elektrické energie ve stlačeném vzduchu
ČR	Česká republika
EDCL akumulátor	electrochemical double layer akumulátor
EUR	euro
FVE	fotovoltaická elektrárna
I-CAES	isothermal Compressed Air Energy Storage
LAES	uložení elektrické energie ve zkapalněném vzduchu
Li-Ion	lithium-iontové
max.	maximální
Mil.	milión
min.	minimální
NiCd	nikl-kadmiové
NiFe	nikl-ocelové
NiMH	metalhydridové
OZE	obnovitelné zdroje energie
PVE	přečerpávací vodní elektrárna
RWE	rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerke
s.r.o.	společnost s ručením omezeným
SLA	sealed Lead Acid
SMES	superconducting Magnetic Energy Storage
SR-	záporná regulační energie
SR+	kladná regulační energie
tzn.	to znamená
tzv.	tak zvaný/ takzvaně
UPS	uninterruptible Power Supplies
USA	Spojené státy americké
VRLA	valve Regulated Lead Acid

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
α	přebytek vzduchu po spalování	[–]
ΔT_{\ln_1}	střední logaritmický teplotní spád pro první výměník	[°C]
ΔT_{\ln_2}	střední logaritmický teplotní spád pro druhý výměník	[°C]
Δt	rozdíl teplot vzduchu na vstupu a výstupu z kaverny	[°C]
ε	kompresní poměr suchého vzduchu	[–]
ε_T	expanzní poměr plynové turbíny	[–]
$\eta_{\text{generátor}}$	účinnost generátoru	[–]
η_K	účinnost kompresoru	[–]
η_T	účinnost plynové turbíny	[–]
η_{celk}	celková účinnost navrženého systému A-CAES	[–]
η_m	mechanická účinnost převodovky mezi turbínou a generátorem	[–]
η_{kom}	účinnost spalovací komory	[–]
κ_K	adiabatický exponent suchého vzduchu	[–]
κ_T	adiabatický exponent pro tři a více atomové plyny	[–]
ρ_{k_in}	hustota vzduchu v kaverně	[kg·m ⁻³]
ρ_{k_out}	hustota vzduchu na výstupu z kaverny	[kg·m ⁻³]
ρ_2	hustota termooleje na výstupu z prvního výměníku	[kg·m ⁻³]
ρ_3	hustota termooleje na vstupu do prvního výměníku	[kg·m ⁻³]
ρ_5	hustota termooleje na výstupu z druhého výměníku	[kg·m ⁻³]
ρ_6	hustota termooleje na vstupu do druhého výměníku	[kg·m ⁻³]
$\rho_{o_s_2}$	střední hodnota hustoty termooleje v prvním výměníku	[kg·m ⁻³]
$\rho_{o_s_2}$	střední hodnota hustoty termooleje ve druhém výměníku	[kg·m ⁻³]
τ	teoretická doba návratnosti investice výstavby	[roky]

	navrženého systému A-CAES	
H	entalpie, Coolprop	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
T	teplota	$[\text{K}]$
p	tlak, Coolprop	$[\text{Pa}]$
τ_{vzduch}	doba plnění kaverny	$[\text{hod}; \text{s}]$
τ_{vyb}	doba vypouštění celého objemu kaverny při úplném vybíjení systému	$[\text{hod}; \text{s}]$
C_{ZP}	aktuální průměrná cena v korunách za metr krychlový zemního plynu	$[\text{Kč}\cdot\text{m}^{-3}]$
$c_{p_{N_2-2}}$	měrná tepelná kapacita dusíku na vstupu do prvního výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{N_2-3}}$	měrná tepelná kapacita dusíku na výstupu z prvního výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{O_2-2}}$	měrná tepelná kapacita kyslíku na vstupu do prvního výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{O_2-3}}$	měrná tepelná kapacita kyslíku na výstupu z prvního výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{o_5}}$	měrná tepelná kapacita termooleje na výstupu z druhého výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{o_6}}$	měrná tepelná kapacita termooleje na vstupu do druhého výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{o_s_1}}$	střední hodnota měrné tepelné kapacity termooleje v prvním výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{o_s_2}}$	střední hodnota měrné tepelné kapacity termooleje ve druhém výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{vzduch_2}}$	měrná tepelná kapacita vzduchu na vstupu do prvního výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{vzduch_3}}$	měrná tepelná kapacita vzduchu na výstupu z prvního výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{vzduch_5}}$	měrná tepelná kapacita vzduchu na vstupu do druhého výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$c_{p_{vzduch_s_1}}$	střední hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

	v prvním výměníku	
$c_{p_vzduch_s_2}$	střední hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu ve druhém výměníku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
E_{elekt}	elektrický výkon na svorkách generátoru při vybíjení systému A-CAES	$[\text{MW}]$
E_{el}	elektrická energie dodaná solární elektrárnou při plnění kaverny A-CAES	$[\text{MJ}]$
E_{ELEKT1}	elektrická energie vyrobená generátorem při ročním provozu A-CAES 340 dní	$[\text{MWh}]$
E_{e_v}	elektrická energie vyrobená generátorem při vybíjení systému A-CAES	$[\text{MJ}]$
f	skutečný palivový poměr	$[-]$
f_s	stechiometrický palivový poměr	$[-]$
i_{CH_4}	entalpie zemního plynu	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
$i_{CO_2_T_výstup}$	entalpie oxidu uhličitého ve spalínách za turbínou po expanzi	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
$i_{CO_2_s_vztažná}$	vztažná entalpie oxidu uhličitého ve spalínách	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
$i_{H_2O_T_výstup}$	entalpie vody ve spalínách za turbínou po expanzi	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
$i_{H_2O_s_vztažná}$	vztažná entalpie vody ve spalínách	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
i_{N_20}	entalpie dusíku nasávaného kompresorem	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
i_{N_2-2}	entalpie dusíku za kompresorem	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
$i_{N_2-248,2}$	entalpie dusíku vstupujícího do spalovací komory	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
$i_{N_2_k_vstup}$	entalpie dusíku ve spalínách na konci spalovací komory	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
$i_{N_2_T_výstup}$	entalpie dusíku ve spalínách za turbínou po expanzi	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
$i_{N_2_s_vztažná}$	vztažná entalpie dusíku ve spalínách	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
$i_{N_2_vztažná}$	vztažná entalpie dusíku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$

$i_{O_{20}}$	entalpie kyslíku nasávaného kompresorem	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{O_{2_248,2}}$	entalpie kyslíku za kompresorem	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{O_{2_k_vstup}}$	entalpie kyslíku vstupujícího do spalovací komory	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{O_{2_T_výstup}}$	entalpie kyslíku ve spalinách za turbínou po expanzi	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{O_{2_s_vztažná}}$	vztažná entalpie kyslíku ve spalinách	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{O_{2_vtažná}}$	vztažná entalpie kyslíku	$[J \cdot kg^{-1}]$
i_{paliva}	entalpie přiváděného paliva	$[J \cdot kg^{-1}]$
i_{T_vstup}	entalpie spalin vstupujících do plynové turbíny	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{sp_T_výstup}$	entalpie spalin za turbínou po expanzi	$[J \cdot kg^{-1}]$
i_{spal_k}	entalpie spalin na konci spalovací komory	$[J \cdot kg^{-1}]$
i_{vzduch_1}	entalpie suchého vzduchu nasávaného kompresorem	$[J \cdot kg^{-1}]$
i_{vzduch_2}	entalpie suchého vzduchu za kompresorem	$[J \cdot kg^{-1}]$
$i_{vzduch_k_vstup}$	entalpie vzduchu na vstupu do spalovací komory	$[J \cdot kg^{-1}]$
k_1	součinitele přestupu tepla pro první výměník	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
k_2	součinitele přestupu tepla pro druhý výměník	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
M_{CO_2}	molární hmotnost oxidu uhličitého	$[kg \cdot kmol^{-1}]$
M_{H_2O}	molární hmotnost vody	$[kg \cdot kmol^{-1}]$
M_{N_2}	molární hmotnost dusíku	$[kg \cdot kmol^{-1}]$
M_{O_2}	molární hmotnost kyslíku	$[kg \cdot kmol^{-1}]$
M_{CH_4}	molární hmotnost metanu	$[kg \cdot kmol^{-1}]$
\dot{m}_{O_1}	hmotnostní tok procházející prvním výměníkem při plnění kaverny	$[kg \cdot s^{-1}]$
m_{vzduch_k}	celková hmotnost vzduchu v naplněné kaverně	$[kg]$
$m_{vzduch_k_vyb}$	hmotnost vzduchu dostupného pro vybíjení systému	$[kg]$
$\dot{m}_{H_2O_spal}$	hmotnostní tok H_2O obsažené ve spalinách	$[kg \cdot s^{-1}]$

$\dot{m}_{N_2_spal}$	hmotnostní tok N_2 obsaženého ve spalinách	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_{O_2_k}$	množství kyslíku vstupujícího do spalovací komory	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_{O_2_spal}$	hmotnostní tok kyslíku ve spalinách	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_{CO_2_spal}$	hmotnostní tok CO_2 obsaženého ve spalinách	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{k_out}	hmotnostní průtok odchozího vzduchu z kaverny	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{pal_k}	skutečný hmotnostní průtok paliva přiváděného do spalovací komory	$[\text{kgpal}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{pal_s}	stechiometrický hmotnostní průtok paliva do spalovací komory	$[\text{kgpal}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_T	hmotnostní průtok spalin vstupujících do plynové turbíny	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{spal_k}	hmotnostní průtok spalin na konci spalovací komory	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{o_1}	hmotnostní průtok termooleje prvním výměníkem	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{o_2}	hmotnostní průtok termooleje druhým výměníkem	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{vzduch_1}	množství suchého vzduchu nasávaného kompresorem	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{vzduch_2}	hmotnostní průtok vzduchu na vstupu do druhého výměníku	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{vzduch_k}	hmotnostní průtok vzduchu vstupujícího do spalovací komory	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{vzduch_s}	stechiometrické hmotnostní průtok vzduchu vstupujícího do spalovací komory	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
N_{CK}	celkové investiční náklady na výstavbu A-CAES v dolarech	[mil. \$]
N_{CK_CZK}	celkové investiční náklady na výstavbu A-CAES v českých korunách	[mil. Kč]
$P_{kompresor_id}$	ideální výkon kompresoru	[MW]
$P_{kompresor_skut}$	skutečný příkon kompresoru	[MW]
$P_{T_ideální}$	ideální výkon plynové turbíny	[MW]
P_T	skutečný výkon plynové turbíny	[MW]
P_{E+}	roční příjmy navrženého systému A-CAES za prodanou	[mil. Kč]

	kladnou regulační energii	
p_{ZP}	tlak paliva – zemního plynu	[Pa]
p_k	tlak vzduchu v kaverně	[Pa]
p_{T_vstup}	tlak spalin vstupujících do plynové turbíny	[Pa]
$p_{T_výstup}$	tlak spalin za plynovou turbínou	[Pa]
$p_{spalin_k_výstup}$	tlak spalin na výstupu ze spalovací komory	[Pa]
p_{vzduch_1}	tlak suchého vzduchu nasávaného kompresorem	[Pa]
p_{vzduch_2}	tlak suchého vzduchu za kompresorem	[Pa]
p_{vzduch_3}	tlak vzduchu na výstupu z prvního výměníku	[Pa]
p_{vzduch_5}	tlak vzduchu na vstupu do druhého výměníku	[Pa]
p_{vzduch_k}	tlak vzduchu vstupujícího do spalovací komory	[Pa]
Q_i^r	výhřevnost paliva – zemního plynu	[J·kg ⁻¹]
\dot{Q}_{palivo}	energie uložená v palivu	[MW]
\dot{Q}_{pal_v}	energie uložená v palivu při vybíjení systému A-CAES	[MJ]
$\dot{Q}_{vzduch_1} = \dot{Q}_{o_1}$	přenesený tepelný výkon v prvním výměníku	[MW]
$\dot{Q}_{vzduch_2} = \dot{Q}_{o_2}$	přenesený tepelný výkon ve druhém výměníku	[MW]
$\dot{q}_{SK_red}^V$	objemové zatížení plamence	[MW· ·m ⁻³ ·MPa ⁻¹]
S_1	plocha protiproudého prvního výměníku	[m ²]
S_2	plocha protiproudého druhého výměníku	[m ²]
t_{ZP}	teplota paliva – zemního plynu	[°C]
t_{k_in}	teplota vzduchu na vstupu do kaverny	[°C]
t_{k_out}	teplota vzduchu na výstupu z kaverny	[°C]
t_{T_vstup}	teplota spalin vstupujících do plynové turbíny	[°C]
$t_{T_výstup}$	teplota spalin za turbínou po expanzi	[°C]

t_{spalin_k}	teploty spalin na konci spalovací komory	[°C]
t_{o_2}	teplota termooleje na výstupu z prvního výměníku	[°C]
t_{o_3}	teplota termooleje na vstupu do prvního výměníku	[°C]
t_{o_5}	teplota termooleje na výstupu z druhého výměníku	[°C]
t_{o_6}	teplota termooleje na vstupu do druhého výměníku	[°C]
t_{vzduch_1}	teplota suchého vzduchu nasávaného kompresorem	[°C]
t_{vzduch_2}	teplota suchého vzduchu za kompresorem	[°C]
t_{vzduch_3}	teplota vzduchu na výstupu z prvního výměníku	[°C]
t_{vzduch_5}	teplota vzduchu na vstupu do druhého výměníku	[°C]
t_{vzduch_6}	teplota vzduchu na výstupu z druhého výměníku	[°C]
t_{vzduch_k}	teplota vzduchu vstupujícího do spalovací komory	[°C]
$V_{nádrž}$	objem akumulční nádrže na termoolej	[m ³]
V_{pal}	objem paliva spotřebovaného během ročního provozu A-CAES	[m ³]
V_p	objem plamence	[m ³]
V_{vzduch_k}	objem kaverny	[m ³]
\dot{V}_{o_1}	objemový průtok termooleje prvním výměníkem	[m ³ ·hod ⁻¹]
\dot{V}_{o_2}	objemový průtok termooleje druhým výměníkem	[m ³ ·hod ⁻¹]
$w_{H_2O_spal}$	hmotnostní zlomek H ₂ O obsažené ve spalinách	[–]
w_{N_2}	hmotnostní zlomek dusíku v suchém vzduchu	[–]
$w_{N_2_spal}$	hmotnostní zlomek N ₂ obsaženého ve spalinách	[–]
w_{O_2}	hmotnostní zlomek kyslíku v suchém vzduchu	[–]
$w_{O_2_spal}$	hmotnostní zlomek kyslíku obsažené ve spalinách	[–]
$w_{CO_2_spal}$	hmotnostní zlomek CO ₂ obsaženého ve spalinách	[–]
w_{zem_p}	hmotnostní zlomek zemního plynu	[–]
\varkappa_{N_2}	molární zlomek dusíku v suchém vzduchu	[–]

x_{O_2}	molární zlomek kyslíku v suchém vzduchu	[-]
x_{zem_p}	molární zlomek zemního plynu	[-]
P_E	celkový roční zisk navrženého A-CAES	[mil. Kč]