



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

AKUMULACE ENERGIE DO STLAČENÉHO VZDUCHU

COMPRESSED-AIR ENERGY STORAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Strnad

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jan Strnad**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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 bakalářské práce:

Akumulace energie do stlačeného vzduchu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Akumulace energie je jedním z perspektivních způsobů, jak efektivně využívat energetické zdroje a vyrovnávat rozdíly mezi energetickou poptávkou a nabídkou. Akumulace energie do stlačeného vzduchu je konkrétní způsob akumulace, pro kterou se využívá vzduch jako pracovní medium a jeho komprese a expanze jako prostředek uložení a zpětného získání energie.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je (1) provést rešerši a seznámit se s problematikou akumulace energie do stlačeného vzduchu (tzv. CAES), (2) kriticky zhodnotit a okomentovat současný stav využití této technologie a (3) přehled (ukázka) realizovaných systémů v praxi.

Seznam doporučené literatury:

TING, David S.-K. a Jacqueline A. STAGNER. Compressed Air Energy Storage: Types, systems and applications. Londýn: Institution of Engineering and Technology, 2021. ISBN 978-1839531958.

ARABKOOHSAR, Ahmad. Mechanical Energy Storage Technologies. Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2020. ISBN 978-0128200230.

BREEZE, Paul. Power System Energy Storage Technologies. Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2018. ISBN 978-0128129029.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku akumulace energie do stlačeného vzduchu. Zahrnuje stručné poznatky z termodynamiky ideálních plynů. Byly rozebrány vhodné geologické podmínky pro výběr zásobníků systémů CAES (compressed air energy storage), výhody a nevýhody jednotlivých druhů, způsob jejich výroby a průběh samotné akumulace stlačeného vzduchu. Práce uvádí jednotlivá schémata elektráren na stlačený vzduch, důraz je kladen na popis průběhu akumulace. Poslední část se věnuje popisu a porovnání dvou zrealizovaných systémů CAES pracujících na totožné koncepci, dále také předkládá informace o neuskutečněných plánovaných systémech CAES.

Klíčová slova

Akumulace energie, CAES, stlačený vzduch, I-CAES, A-CAES, D-CAES.

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on the problematics of compressed air energy storage. It includes a short introduction to the thermodynamics of ideal gases. The suitable geological conditions for the selection of CAES (compressed air energy storage) systems, the advantages and disadvantages of each type, the method of their production, and the process of compressed air accumulation itself were discussed. The thesis presents individual diagrams of compressed air power plants, and special attention is given to the description of the accumulation process. The last section is focused on the description and comparison of two built CAES systems working on an identical concept and also presents information on the unrealized planned CAES systems.

Key words

Energy accumulation, CAES, Compressed air, I-CAES, A-CAES, D-CAES.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRNAD, Jan. *Akumulace energie do stlačeného vzduchu*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149512>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Lubomír Klimeš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Akumulace energie do stlačeného vzduchu** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

26.05.2023

Datum

Jan Strnad

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji touto cestou především mému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Lubomíru Klimešovi Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Ideální plyn.....	12
1.1 Vlastnosti a rovnice a vztahy odvozené pro ideální plyny	12
2 Zavedení pojmů.....	14
2.1 Termodynamické děje	14
2.1.1 Děj izobarický	14
2.1.2 Děj izochorický	15
2.1.3 Děj izotermický	16
2.1.4 Děj adiabatický	17
2.1.5 Děj polytropický	18
3 Systémy akumulace energie do stlačeného vzduchu	19
4 Vhodné geologické podmínky pro systémy CAES	21
4.1 Solné struktury	21
4.2 Tvrdé horniny	21
4.3 Aquifer	22
4.4 Podmořské (pod volní hladinou)	22
5 Druhy systémů CAES.....	24
5.1 Diabatické	24
5.2 Izotermické	24
5.3 Adiabatické	25
5.3.1 Bez systému skladování tepelné energie	25
5.3.2 Se systémem skladování tepelné energie	26
6 Využití stlačeného vzduchu v praxi.....	27
6.1 Pneumatické motory	27
6.2 Pneumatické brzdy.....	28
6.3 Pneumatické kladivo	28
7 Koncepce CAES ve světě	30
7.1 Huntorf	30
7.2 McIntosh	30
7.3 Porovnání elektráren Huntorf a McIntosh.....	31
7.4 Norton.....	31
7.5 Iowa Stored Energy Park	32
7.6 Adele	32
8 Diskuze.....	33
ZÁVĚR.....	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	35
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	38
SEZNAM OBRÁZKŮ	39
SEZNAM TABULEK	40

ÚVOD

Obecně při výrobě elektrické energie je stále častější situace, kdy elektrické energie dodávané do sítě je více než odebírané. Tuto přebytečnou energii nelze skladovat. Řešením může být akumulace energie, ta ale musí být nejprve transformována do jiných druhů energie. Příkladem mohou být přečerpávací vodní elektrárny, akumulátory, kondenzátory apod.

Perspektivním řešením této problematiky je využití jevu zkapalňování a opětovného vypařování plynu, resp. vzduchu. Tyto technologie jsou dostatečně známé, teoreticky zpracované, nevyžadují žádné úpravy terénu, nejsou závislé na umístění v terénu, emise jsou nulové, životnost dlouhodobá. Nízká účinnost tohoto systému je ale nevýhodou, neboť výzkum v tomto směru ještě nepokročil k jeho praktickému využití. Mnoho let je zaměřen na způsob, jak akumulovat energii ve větším množství. Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) – zde se akumulovaná energie v podobě nashromážděné vody v době špičky využívá k výrobě elektrické energie. Výhodou PVE je, že dokáže rychle reagovat na výkyvy ve spotřebě, je jednoduchá na obsluhu. Nevýhodou je ale náročnost stavby a vyhledávání vhodných terénních podmínek.

Akumulační systémy na stlačený vzduch fungují na podobném principu jako přečerpávací vodní elektrárny. Mají zkratku CAES. Do velkých zásobníků, kterými mohou být utěsněné velké podzemní prostory (např. jeskyně nebo důlní šachty po ukončení těžebních prací), se natlačí stlačený vzduch. Kompresor je poháněn elektromotorem v době přebytku elektřiny, v době nedostatku naopak alternátor elektřinu vyrábí s využitím stlačeného vzduchu. Příkladem mohou být solné jeskyně v Německu. U starších typů elektráren na stlačený vzduch se při stlačování vzduch ohřívá, teplo se uvolňuje do atmosféry a ztrácí se. Při dekompresi se naopak teplo na ohřev dodává, zde účinnost dosahuje jen 40 %, při využití odpadního tepla přes 50 %. První elektrárnou na stlačený vzduch, která rekuperuje tepelnou energii produkovanou při stlačování, je McIntosh v USA. I zde jsou zásobníky solné jeskyně. Tato elektrárna může dodávat až 110 MW po dobu 26 hodin. V důsledku toho poklesla potřeba tepelné energie na ohřev plynu. Účinnost se zvýšila na 54 %. V dokonalejších zařízeních lze dosáhnout účinnosti přes 70 % a jsou označeny A-CAES, kde účinnost může přesáhnout i přes 70 %. U izotermických elektráren na stlačený vzduch se teplota plynu při kompresi i dekompresi nemění, proces probíhá izotermicky. Využívá se zde kapek vody v pístu při stlačování, voda zde má vysokou tepelnou kapacitu, ze systému se odebere a využije při stejném ději během expanze. Práce na tomto zařízení jsou zatím experimentální, účinnost by zde mohla dosáhnout 70-80 %.

1 Ideální plyn

V termodynamice se zavádí ideální plyn jako zjednodušující model pro popis vlastností plynů reálných. Na rozdíl od plynu skutečného je dokonale stlačitelný a bez vnitřního tření [1]. Ideální plyny v praxi neexistují, ale poměrně jednoduché rovnice a zákony odvozené pro ideální plyny lze použít i pro plyny nedokonalé [2].

Částice ideálního plynu splňují následující podmínky. Rozměry částic jsou zanedbatelné vzhledem ke vzdálenostem mezi nimi. Tyto částice lze považovat za hmotné body, které se navzájem nedotýkají. Dotýkají se pouze v okamžiku srážky. Kromě srážek na sebe částice nijak nepůsobí. Srážky jsou dokonale pružné, tzn. celková kinetická energie se při vzájemných srážkách nemění [1].

1.1 Vlastnosti a rovnice a vztahy odvozené pro ideální plyny

Základním tvarem je **stavová rovnice pro 1 kg ideálního plynu:**

$$p \cdot v = r \cdot T \quad (1)$$

kde: p ... tlak [Pa],
 v ... měrný objem [$m^3 \cdot kg^{-1}$],
 r ... měrná plynová konstanta [$J \cdot mol^{-1} \cdot kg^{-1}$],
 T ... teplota [K].

Vynásobením rovnice (1) hmotností dostaneme **stavovou rovnici pro m kilogramů ideálního plynu:**

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T \quad (2)$$

kde: V ... objem [m^3],
 m ... hmotnost [kg].

Rozšířením rovnice (2) molovou hmotností M získáme **všeobecnou stavovou rovnici ideálního plynu:**

$$p \cdot V_m = M_m \cdot r \cdot T = R_m \cdot T \quad (3)$$

kde: V_m ... molární objem [$m^3 \cdot kmol^{-1}$],
 M_m ... molární hmotnost [$kg \cdot kmol^{-1}$],
 R_m ... univerzální (molová) plynová konstanta [$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$].

Vynásobíme-li rovnici (3) látkovým množstvím n , dostaneme **rozšířenou všeobecnou stavovou rovnici ideálního plynu**:

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T \quad (4)$$

kde: n ... *látkové množství* [mol].

Vztah mezi měrnou tepelnou kapacitou za konstantního tlaku c_p a měrnou tepelnou kapacitou za konstantního objemu c_v se nazývá Mayerův vztah:

$$c_p = c_v + r \quad (5)$$

kde: c_p ... *měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku* [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
 c_v ... *měrná tepelná kapacita za konstantního objemu* [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

Platí, že měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku je u ideálních plynů větší než měrná tepelná kapacita za konstantního objemu, a to o hodnotu měrné plynové konstanty r .

U ideálních plynů jsou měrné tepelné kapacity konstantní, poté je poměr c_p/c_v také konstantní a označuje se jako Poissonova konstanta:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (6)$$

kde: κ ... *Poissonova konstanta* [-].

Vnitřní energie je pouze funkcí teploty:

$$du = c_v \cdot dT \quad (7)$$

kde: du ... *změna vnitřní energie* [$J \cdot kg^{-1}$],
 dT ... *změna teploty* [K].

Entalpie je závislá pouze na teplotě:

$$dh = c_p \cdot dT \quad (8)$$

kde: dh ... *změna entalpie* [$J \cdot kg^{-1}$].

2 Zavedení pojmů

2.1 Termodynamické děje

Termodynamický děj představuje posloupnost stavů, při nichž se soustava mění v čase i v prostoru. Popisovat děje skutečné by bylo příliš složité, proto jsou nahrazovány jednoduššími teoretickými ději, které je možné popisovat snadněji [2].

Rozlišují se dva druhy dějů – vratné a nevratné. Při ději vratném soustava prochází pouze rovnovážnými stavy, lze použít stavovou rovnici a při opačném ději se vrátí do původního stavu. Naopak při ději nevratném soustava rovnovážnými stavy neprochází a při opačném ději se nevrací do původního stavu. Vratné termodynamické děje jsou vhodné pro teoretické rozborů [3].

Výhodné je definovat teoretické děje tak, aby určitá stavová veličina v soustavě byla v průběhu děje konstantní. Rozlišují se termodynamické děje izobarické, izochorické, izotermické, adiabatické a polytropické [2].

2.1.1 Děj izobarický

S izobarickým dějem se v technické praxi lze setkat zejména ve výměnících tepla, např. při ohřívání vzduchu nebo přehřívání páry v přehřívacích páry u parních kotlů, nebo při kondenzaci par. Na obr. 1 je zobrazen izobarický děj v p-v diagramu. Jde o izobarický ohřev 1-2, do soustavy se přivádí teplo, soustava se rozpíná (expanduje) a tím koná práci. Při opačném ději 2-1 (izobarickém ochlazení) je tomu naopak [4].

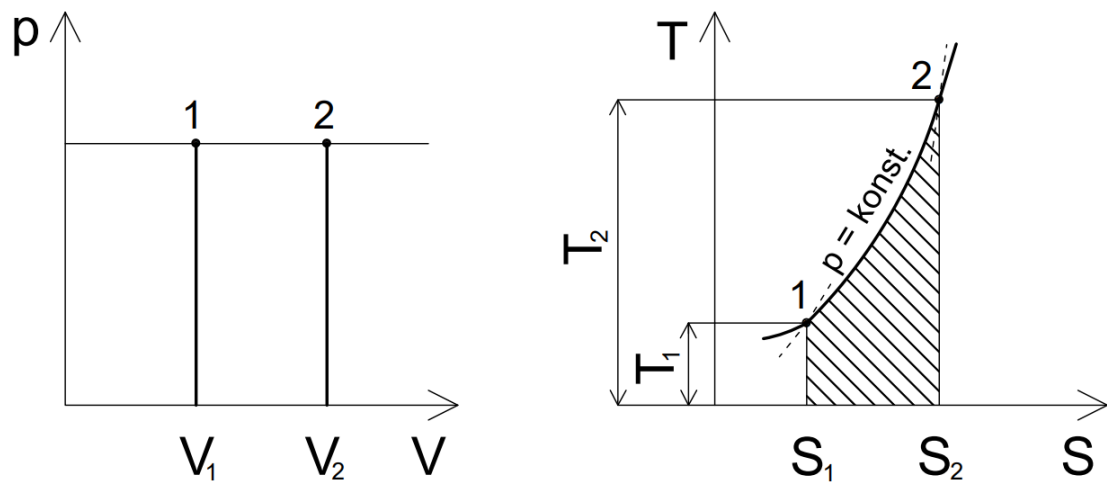
Rovnice změny stavu jsou:

$$dp = 0, p = konst., p_1 = p_2 \quad (9)$$

kde: dp ... změna tlaku [Pa]

Po dosazení $p_1=p_2$ do stavových rovnic se získá Gay-Lussacův zákon:

$$\frac{v}{T} = konst. \text{ nebo } \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad (10)$$



Obr. 1 Izobarická expanze v p-V a T-s diagramu.

2.1.2 Děj izochorický

Izobarický děj lze uplatnit při ohřevu nebo ochlazení plynů v uzavřených nádobách, pro řešení přívodu či odvodu tepla u teoretických cyklů tepelných strojů. Obr. 2 zobrazuje izochorický ohřev 1-2, u kterého je do soustavy přiváděno teplo, naopak je tomu při izochorickém ochlazení 2-1 [2].

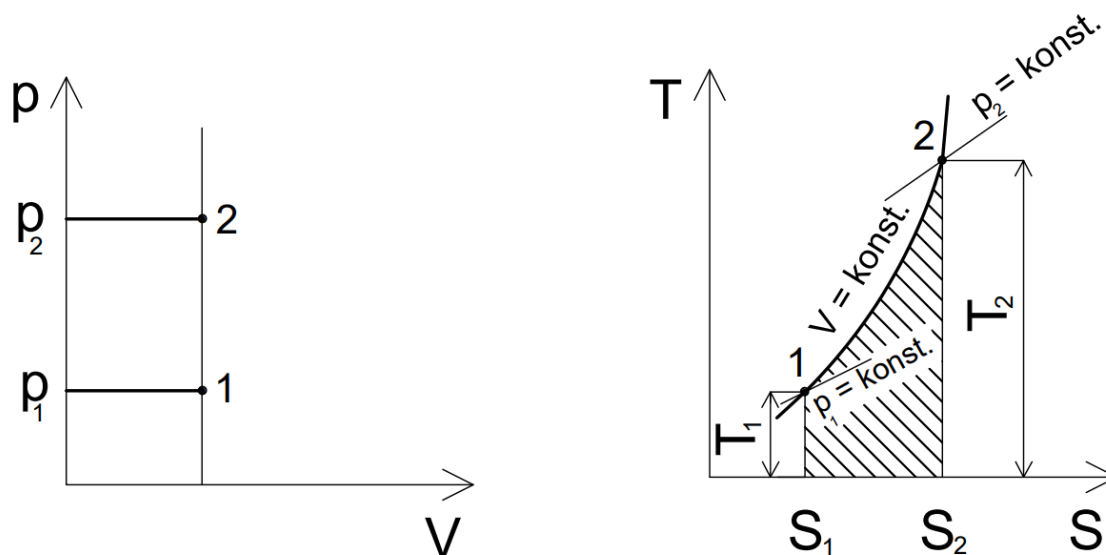
Rovnice změny stavu jsou:

$$dv = 0, v = konst., v_1 = v_2 \quad (11)$$

kde: dv ... změna měrného objemu [$m^3 \cdot kg^{-1}$]

Po dosazení $v_1=v_2$ do stavových rovnic se získá Charlesův zákon:

$$\frac{p}{T} = konst. \text{ nebo } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (12)$$



Obr. 2 Izochorická komprese v p-V a T-s diagramu.

2.1.3 Děj izotermický

Příkladem izotermického děje může být izotermická expanze či komprese. Děj musí probíhat velmi pomalu, aby bylo možné udržovat konstantní teplotu přívodem či odvodem tepla. Izotermický děj na obr. 3 zobrazuje izotermickou expanzi 1-2, při které plyn koná práci a je třeba do soustavy dodávat teplo, u izotermické komprese 2-1 je tomu naopak [2].

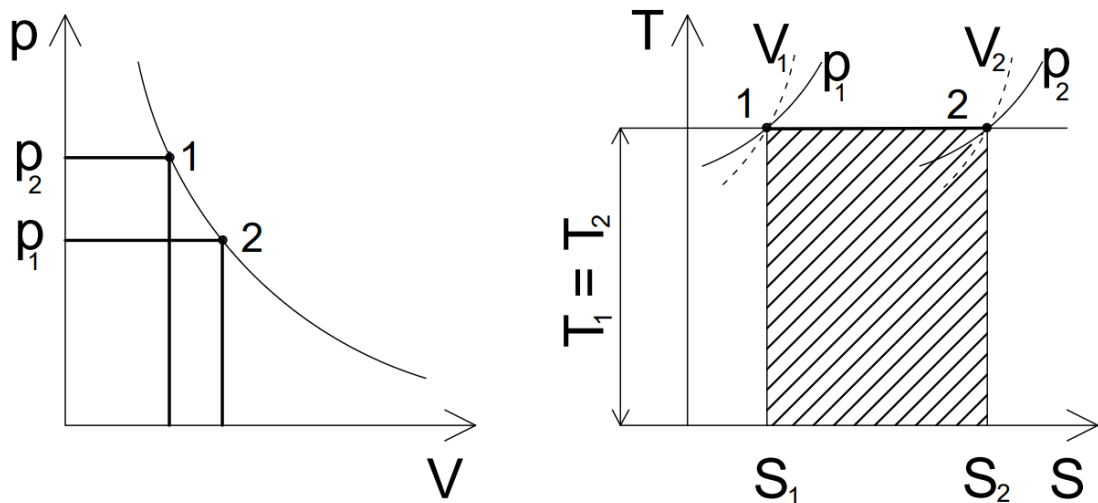
Rovnice změny stavu jsou:

$$dT = 0, T = konst., T_1 = T_2 \quad (13)$$

kde: dT ... změna teploty [K]

Po dosazení $T_1=T_2$ do stavových rovnic se získá Boyle-Mariotteův zákon:

$$p \cdot v = konst. \text{ nebo } p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2 \quad (14)$$



Obr. 3 Izotermická expanze v p-V a T-s diagramu.

2.1.4 Děj adiabatický

S adiabatickým dějem se lze setkat při teoretickém rozboru práce tepelných zařízení. Jedná se zejména o adiabatické komprese a expanze v pístových strojích, rotačních strojích, dýzách či turbínách [2]. Při adiabatickém ději se pracovní látce teplo nepřivádí, ale ani neodvádí. To znamená, že děj probíhá velmi rychle v dokonale tepelně izolované soustavě [4].

Rovnice změny stavu jsou:

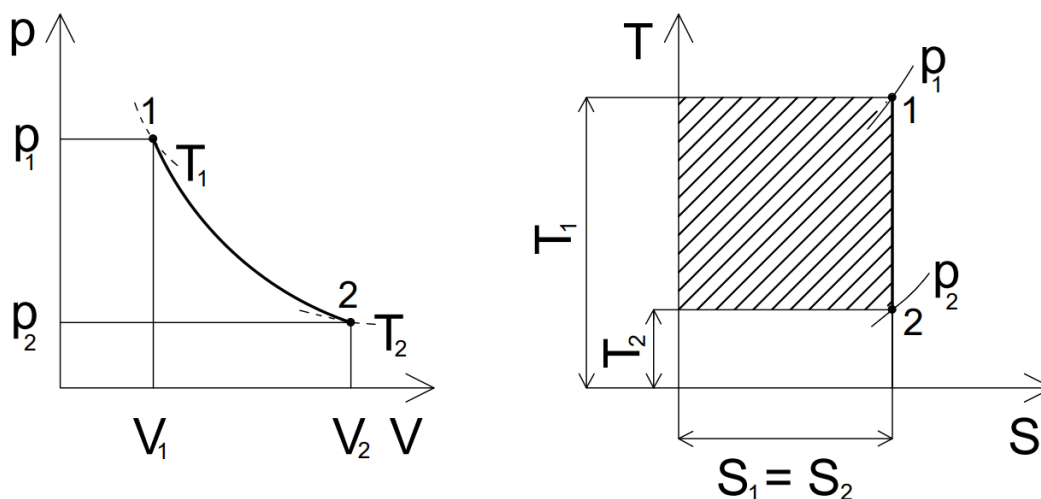
$$dq = 0, q_{12} = 0, Q_{12} = 0 \quad (15)$$

kde: dq ... změna měrného tepla [$J \cdot kg^{-1}$]

Rovnice adiabaty jsou:

$$p \cdot v^\kappa = konst. \text{ nebo } p_1 \cdot v_1^\kappa = p_2 \cdot v_2^\kappa \quad (16)$$

kde: κ ... Poissonova konstanta [-]



Obr. 4 Adiabatická expanze v p-V a T-s diagramu.

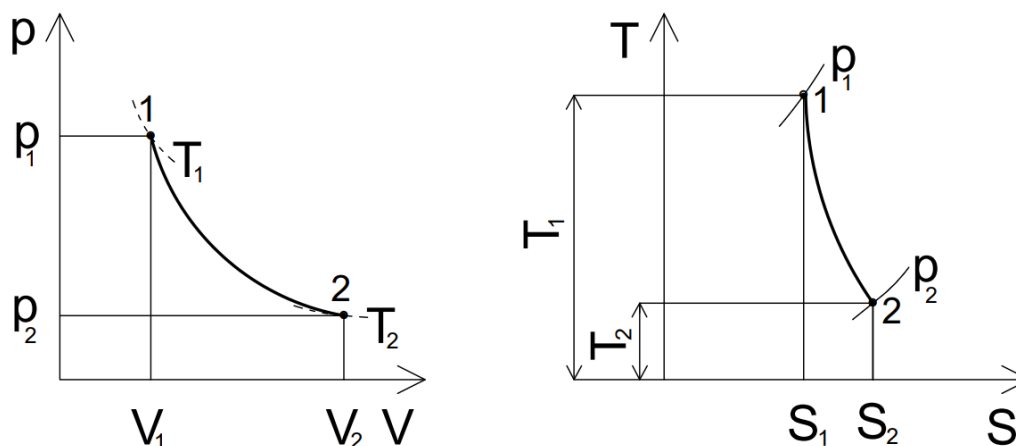
2.1.5 Děj polytropický

Adiabatický a izotermický děj jsou mezními případy při kompresi a expanzi plynů, které však nelze ve skutečnosti provést. Polytropický děj byl zaveden, aby lépe modeloval uvedené změny a spadal do oblasti mezi děj izotermický a adiabatický. V rovnicích vystupuje polytropický exponent n , jenž náleží intervalu 1 až κ . Děj vykreslený na obr. 5 je polytropická expanze 1-2, kde soustava koná práci. Opačný děj je polytropická komprese 2-1, kdy soustava práci spotřebovává [2].

Rovnice změny stavu jsou:

$$p \cdot v^n = \text{konst.} \text{ nebo } p_1 \cdot v_1^n = p_2 \cdot v_2^n \quad (17)$$

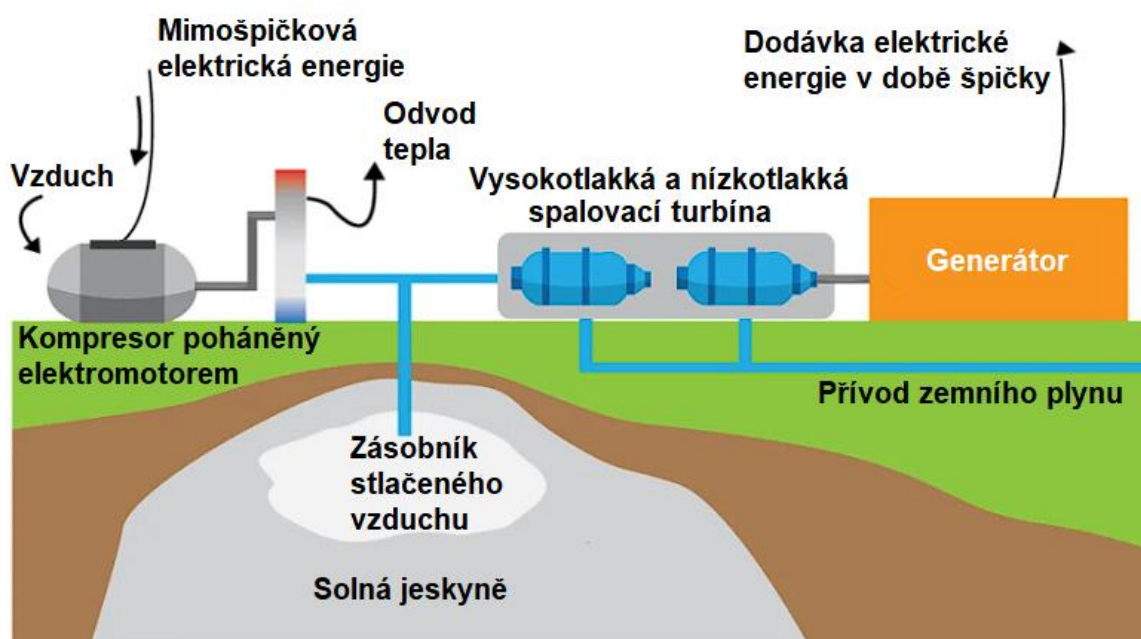
kde: n ... polytropický exponent [-]



Obr. 5 Polytropická expanze v p-V a T-s diagramu.

3 Systémy akumulace energie do stlačeného vzduchu

Skladování energie ve stlačeném vzduchu, v cizojazyčné literatuře označováno jako CAES (compressed-air-energy-storage), je nízkonákladová technologie pro skladování velkého množství různých druhů energie ve formě stlačeného vzduchu. Tato technologie je jako jedna z mála vhodná pro dlouhodobé skladování energie. Systém akumuluje levnou elektrickou energii mimo špičku do zásobníku, kterým může být například povrchové potrubí při menším měřítku, avšak pro rozsáhlejší aplikace je nákladově efektivnější zvolit utěsněné podzemní prostory, nebo specificky vyrobené nádrže. Příkladem mohou být jeskyně nebo důlní šachty po ukončení těžebních prací, solné dutiny a struktury vzniklé vytěžením tvrdých hornin [5].



Obr. 6 Schéma systému CAES, upraveno dle [6].

Systém CAES využívá dva oddělené procesy, a to proces nabíjení (komprese) a vybíjení (expanze), které jsou oddělené z důvodu separace výroby a spotřeby elektrické energie. V procesu nabíjení je okolní vzduch stlačován víceetapovým kompresorem za použití levné elektrické energie v době nejmenší poptávky. Ale lze také využít elektřinu z obnovitelných zdrojů energie [7]. Během stlačování vzduchu se kompresor ohřívá, naopak při expanzi se ochlazuje. Teplo vzniklé při kompresi lze využít pro ohřev vzduchu u expanzní fáze, čímž se zvýší celková účinnost systému [8]. U expanzní fáze je stlačený vzduch uvolněn a průchodem skrze turbínu je jeho tlaková energie přeměněna na energii kinetickou. K turbíně je připojen generátor, v němž se tato kinetická energie mění na energii elektrickou a směřuje do sítě [5].

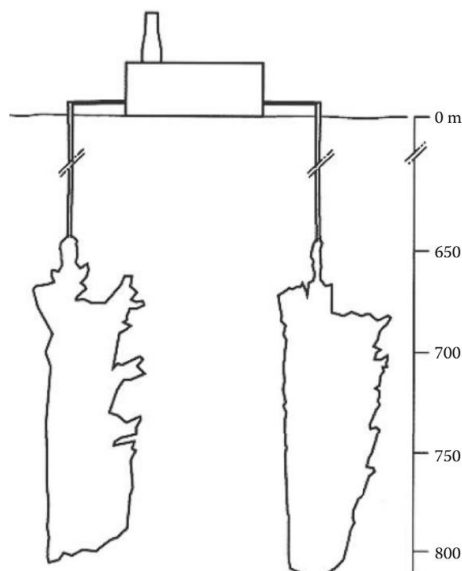
Existuje více druhů těchto systémů. Z hlediska nakládání s teplem vzniklým při kompresi lze CAES klasifikovat jako adiabatické, diabatické nebo izotermické, a to podle toho, zda je teplo zadržováno v systému pro ukládání tepelné

energie(adiabatické), nebo je nevratně (diabatické) či vratně (izotermické) odvedeno do okolí [5]. Dále na základě změny objemu a tlaku v zásobníku na skladování stlačeného vzduchu lze systémy klasifikovat jako izochorické nebo izobarické. Izobarické CAES, které vyžadují k udržení konstantního tlaku proměnlivý skladovací objem, představují v praxi geologický problém. Oproti tomu izochorické systémy lze v praxi realizovat snadno. Ze všech alternativ CAES jsou v současné době považovány za praktické pouze izochorické diabatické a izochorické adiabatické systémy [9].

4 Vhodné geologické podmínky pro systémy CAES

4.1 Solné struktury

Zásobníkem pro CAES může být dutina, která vznikla ze solného ložiska proplachováním pomocí vody. Technika těžby pomocí proplachování může poskytnout spolehlivou a levnou cestu pro vytvoření skladovacího objemu potřebné velikosti, pokud je k dispozici dostatečná zásoba sladké vody a pokud lze vzniklý solný roztok snadno zlikvidovat [10]. Stěny solných jeskyní mají také středně vysokou pevnost a obvykle jsou jejich vlastnosti rovnoměrnější než u jiných typů hornin. Zachovávají si samoreparační vlastnost, kdy materiál může plasticky proudit a utěšňovat trhliny, což zabraňuje jejich dalšímu šíření [11]. Díky elasto-plastickým vlastnostem představují solné dutiny jakožto zásobníky minimální riziko úniku vzduchu. Ačkoliv lze použít jak kopulovitě, tak ložiskové struktury, solná ložiska jsou často náročnější na vývoj, pokud je požadován velký skladovací objem. Bývají mnohem tenčí a obsahují vyšší koncentrace nečistot, což představuje problém z hlediska strukturní stability [10].



Obr. 7 Tvar a velikost jeskyní použitých v elektrárně Huntorf [5].

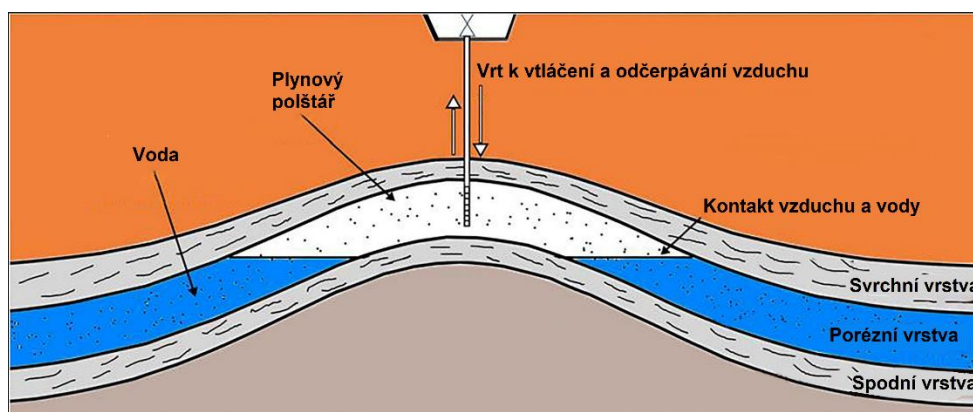
4.2 Tvrdé horniny

Tvrdé horniny jsou jednou z možností pro konstrukci zásobníku pro CAES. Avšak náklady na těžbu nového ložiska jsou často relativně vysoké, proto je výhodnější využít již existující struktury [5]. Vhodné mohou být například dutiny pozůstalé po těžbě zemního plynu či ropy. Vzhledem k tomu, že tyto dutiny dříve obsahovaly ropu nebo zemní plyn, jejich vlastnosti, pokud se jedná o pórovitost a propustnost, již splňují požadavky na skladování vysokotlakého vzduchu a je tedy pravděpodobné, že struktura a geologie vyčerpaných zásobníků jsou známy díky průzkumu a prospekci před těžbou i během ní [11].

Kromě využití vyčerpaných zásobníků, ropných či plynových vrtů se uvažuje o opětovném využití nepoužívaných dolů. Mnohé vyčerpané uhelné doly disponují velkými předem vytěženými objemy, a proto mají potenciál výrazně snížit počáteční potřebné investice. Úprava stávajících šachet v dříve využívaných uhelných dolech však představuje riziko vznícení zbývajících uhelných slojí při vysokých teplotách. Bylo by nezbytné šachty vhodně utěsnit a posoudit, aby byl zajištěn bezpečný provoz a proveditelnost [11].

4.3 Aquifer

Vhodnými geologickými podmínkami jsou také porézní skalnatá podloží nasáknutá vodou, tzv. akvifery [12]. Kompresorem je vzduch stlačen a skrze vrt ukládán v zásobníku [13]. Zásobník je zpočátku nasycen vodou, proto je prvním krokem vytvoření velké plynové bubliny, tzv. plynového polštáře, který by měl zajistit dostatečnou tlakovou podporu pro druhý krok, aby nedošlo k návratu vody do vrtu během výroby stlačeného vzduchu. V druhém kroku se do zásobníku vtlačuje další stlačený vzduch a polštář se zvětšuje. Při potřebě energie se vzduch vypustí a průchodem skrz turbínu vyrábí elektrickou energii. Při vypouštění vzduchu může nastat situace, kdy se plynový polštář zhroutí, následně je nutné opakovat první krok a plynový polštář obnovit [14].



Obr. 8 Schéma akviféru, upraveno dle [15].

4.4 Podmořské (pod volní hladinou)

Nastane-li situace, kdy není k dispozici podzemní jeskyně pro skladování stlačeného vzduchu, může být další možností skladovat vzduch pod mořskou hladinou. Zásobník, který se instaluje na mořském dně, může mít podobu pružného měchýře. Vzduch přiváděný do podvodní vzduchové nádrže vytlačuje mořskou vodu a díky hydrostatickému tlaku v určité hloubce bude stlačený vzduch skladován za konstantního tlaku. Hydrostatický tlak se zvyšuje přibližně o jednu desetinu

megapascalu na každých 10 m hloubky. Například pro návrh systému s tlakem 6 MPa je zapotřebí hloubka přibližně 600 m [16].

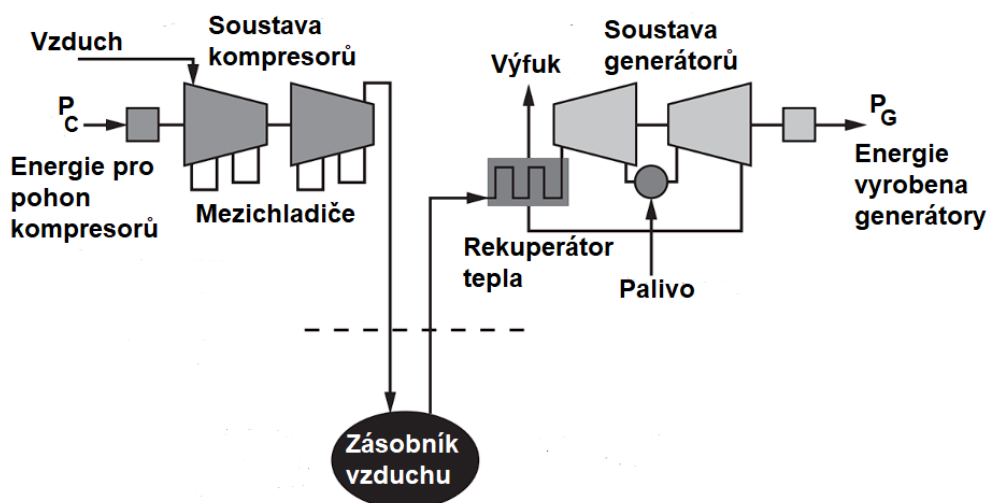


Obr. 9 Pružné vaky pro skladování pod mořskou hladinou [17].

5 Druhy systémů CAES

5.1 Diabatické

U diabatických systémů se při procesu nabíjení vzduch stlačuje z atmosférického tlaku na vysokotlaký stlačený vzduch o tlaku až 7,2 MPa. Při kompresi dochází k nárůstu teploty, před jeho uložením je tedy nutné jej ochladit za pomoci mezichladičů (intercoolers) a dochlazovačů (aftercoolers) [5]. S teplem vzniklým při každé kompresi je nakládáno jako s odpadem a je vypuzeno do atmosféry. Během procesu vybíjení se stlačený vzduch uvolňuje a přehřívá pomocí spalování paliva, než expanduje v turbíně a vyrábí elektřinu. Pro přehřev je nejčastěji využíván zemní plyn [18].



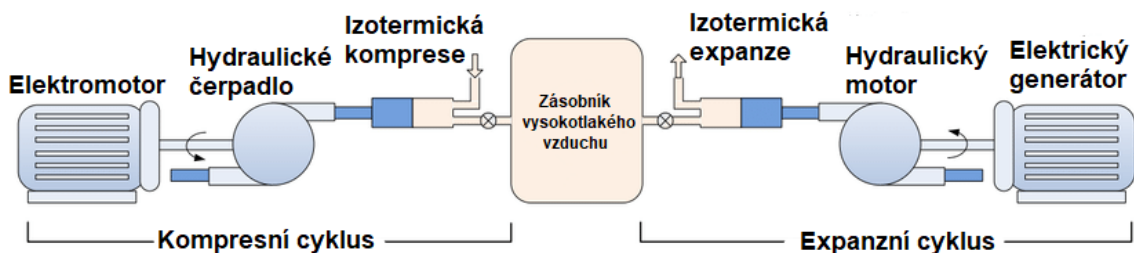
Obr. 10 Schéma diabatického systému CAES, upraveno dle [5].

5.2 Izotermické

Izotermické systémy zachycují teplo a neodvádějí ho do okolí. Využívají ho k opětovnému ohřevu uloženého stlačeného vzduchu před expanzní fází, čímž výrazně zvyšují celkovou účinnost systému a eliminují potřebu spalování fosilních paliv. Izotermický proces udržuje konstantní teplotu tím, že během procesu komprese průběžně odebírá teplo ze vzduchu a během procesu expanze ho průběžně přidává [19].

Všechny dosud známé koncepce jsou založeny na pístových strojích, protože tyto stroje mohou provádět poměrně pomalý proces komprese nebo expanze, což ponechává dostatek času na procesy výměny tepla uvnitř samotného stroje. Výměnu tepla lze provádět zvětšením teplosměnných ploch, například použitím

kapalinového pístu tzv. liquid piston. Další metodou může být vstřikování kapaliny do stlačovací komory, čímž dojde ke zvětšení plochy pro přestup tepla [20].

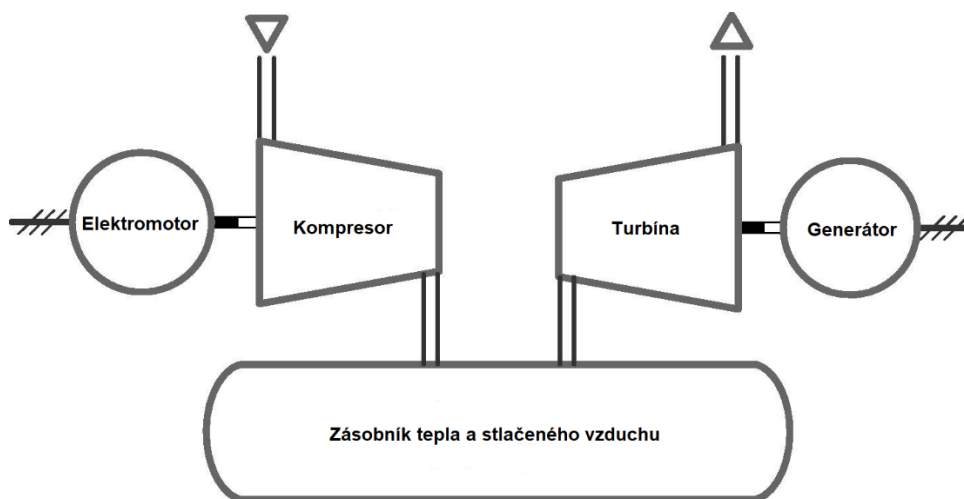


Obr. 11 Schéma izotermického systému CAES, upraveno dle [21].

5.3 Adiabatické

5.3.1 Bez systému skladování tepelné energie

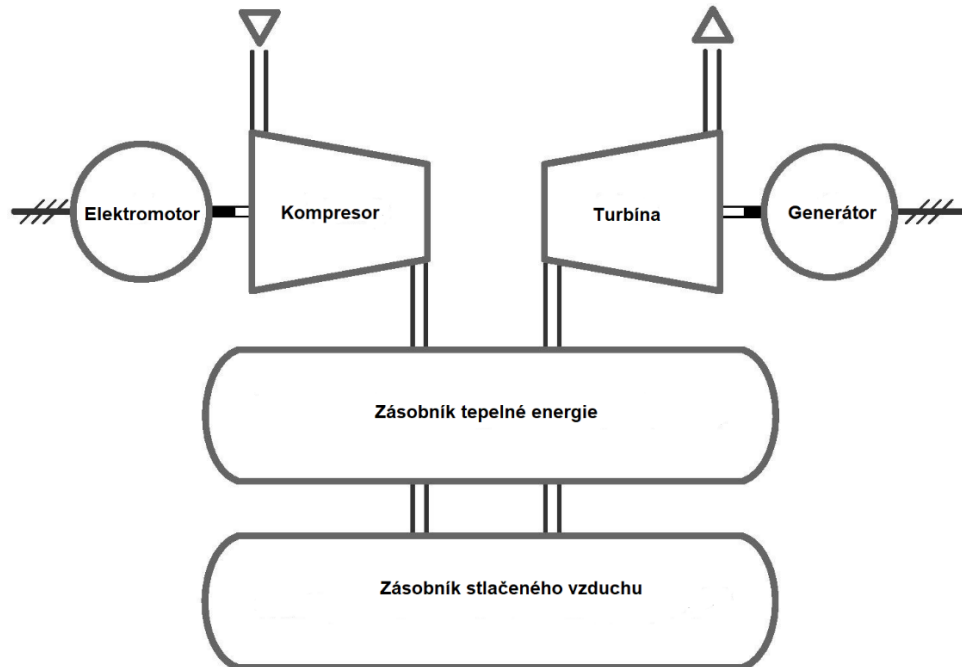
Systém skladování tepelné energie (TES – thermal energy storage) uchovává teplo vzniklé při kompresi, aby odstranil potřebu spalování paliva u expanzní fáze. Konstrukčně jednodušším řešením je adiabatický systém bez systému TES. Akumulace tepla vzniklého při kompresi probíhá tak, že se samotný horký vzduch uloží v zásobníku. Vzhledem k vysokým teplotám dosahovaným již při poměrně nízkých tlakových poměrech vyžadují tyto koncepce vysoce tepelně odolné skladovací zásobníky. Například adiabaticky stlačený vzduch se při stlačení na nízký tlak 10 barů zahřeje přibližně na 277 °C. Z tohoto důvodu jsou adiabatické systémy CAES bez systémů TES omezeny na poměrně nízké skladovací tlaky a v důsledku toho také na nízké měrné výkony [20].



Obr. 12 Schéma CAES bez systému TES, upraveno dle [20].

5.3.2 Se systémem skladování tepelné energie

Omezení koncepcí bez systému skladování tepelné energie vedou k použití speciálního zařízení, které bude schopno nadbytečné teplo vznikající při kompresi uchovávat. Díky odstranění tepla ze stlačovaného vzduchu lze vzduch skladovat při vyšším tlaku a lze dosáhnout vyšších měrných výkonů. Nejdůležitějším parametrem adiabatických systémů je zvolená skladovací teplota. Má přímý vliv na konstrukci i na provozní chování celého uložistiště [20].



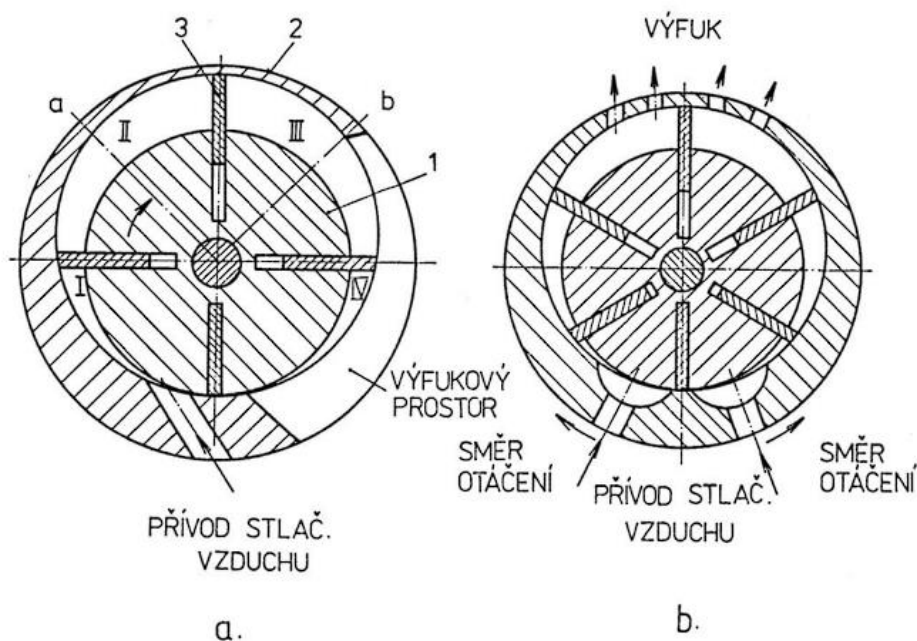
Obr. 13 Schéma CAES se systémem TES, upraveno dle [20].

6 Využití stlačeného vzduchu v praxi

Stlačený vzduch nachází široké využití jako zdroj energie pro různé pneumatické pohony, řízení či regulaci. Může být tedy využit jako pohon pro různé manipulátory, roboty, výrobní stroje, otevírání dveří v autobusech, brzdové systémy nákladních automobilů, nebo například v lékařství pro pohon zubařského náčiní. Pneumatický pohon nemusí být nutně spojen pouze s rotačním pohybem. V dnešním průmyslu se jedná především o přímočaré pneumatické pohony. Takové pneumatiky se využívají pro pohon úchopových hlavic a malých lisů, kde očekáváme malé momenty setrvačnosti, rychlé reakce zařízení a vysoké rychlosti mechanismů [22].

6.1 Pneumatické motory

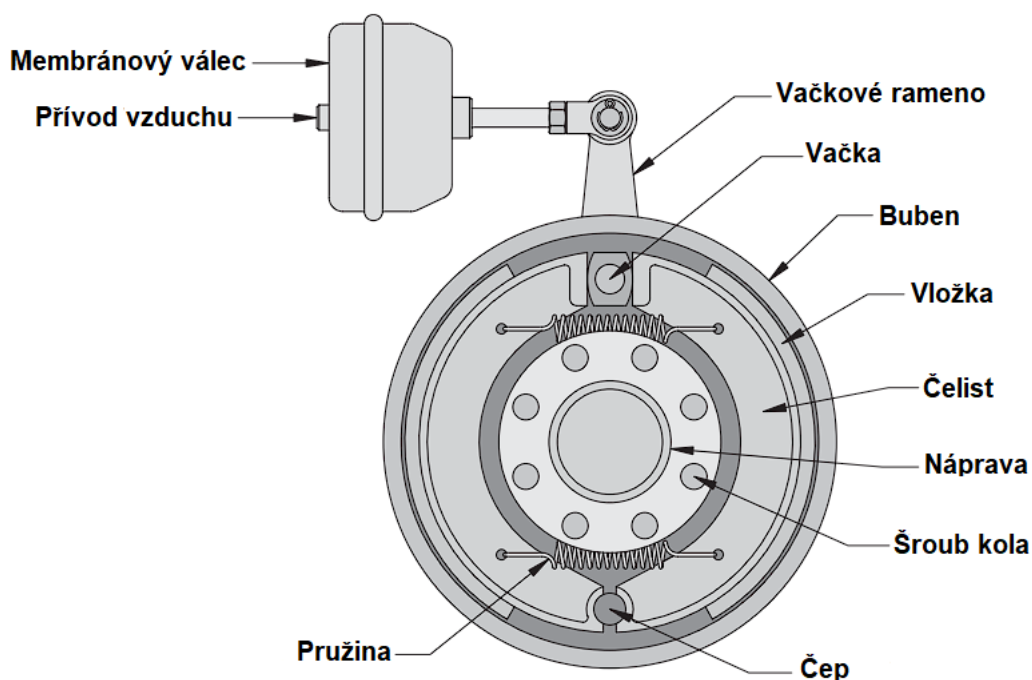
Pneumatické motory přeměňují potenciální energii ve formě stlačeného vzduchu na mechanickou práci. Obecně převádějí stlačený vzduch na mechanickou práci lineárním nebo rotačním pohybem. Lineární pohyb může pocházet například z membránového, nebo pístového aktuátoru. Naopak rotační pohyb je dodáván například lamelovým či pístovým vzduchovým motorem [23].



Obr. 14 Lamelový rotační motor a) pro jeden směr otáčení, b) pro oba směry otáčení [24].

6.2 Pneumatické brzdy

Pneumatické brzdy zajišťují rychlý brzdný účinek a krátké brzdné doby. Místo hydraulické kapaliny či oleje jsou ovládány stlačeným vzduchem. Výhodou pneumatických brzd ve srovnání s brzdami hydraulickými je eliminace rizika rozlití nebo úniku kapaliny, které by mohlo vyžadovat odstávku stroje [25]. Využívají stlačený vzduch vyrobený kompresorem uložený v zásobníku. Když obsluha stiskne pedál, ventil přivede stlačený vzduch k pístu, který sepne brzdu. Po uvolnění tlaku se brzda uvolní pomocí pružiny. Různé typy brzd používají různé metody k vytvoření brzdného účinku, který odebírá pohybujícímu se systému nebo vozidlu kinetickou energii. Pneumatické brzdy jsou hlavní metodou snižování rychlosti nákladních vozidel, autobusů či vlaků, protože představují velmi účinný způsob brzdění velkých a těžkých vozidel [26].

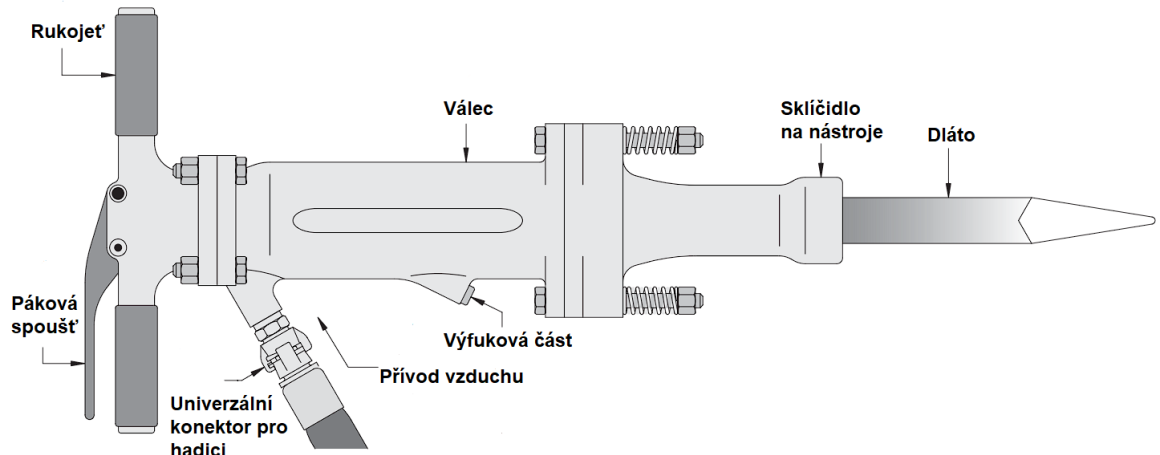


Obr. 15 Schéma pneumatické brzdové soustavy, upraveno dle [27].

6.3 Pneumatické kladivo

Pneumatické kladivo, hovorově nazývané sbíječka, spadá do skupiny mechanických strojních kladiv. Zpravidla se jedná o ruční nářadí, které je určeno k vrtání otvorů do betonu, kamene či železového betonu. Ve stavebnictví slouží k demolicím zdiva, v těžebním průmyslu k narušování hornin v dolech a v lomech, v hutním průmyslu je vhodné k oklepávání odlitků a výpalků [28]. Tělo sbíjecího kladiva tvoří svislý válec, který slouží jako tlaková komora. Stlačený vzduch vstupuje do komory a aktivuje spouštěcí ventil, který je nucen se rychle otevírat a zavírat. Při otevření vhání píst tlakový vzduch do pístní komory, kde dochází ke zvýšení tlaku,

což způsobí pohyb pístu, který udeří do dláta. Dláto následně narazí na povrch pod ním, čímž dojde k rozlomení horniny. Po nárazu pístu do dláta se spouštěcí ventil uzavře a přeměruje stlačený vzduch do válce pod pístem. Energie vzduchu spolu s pružinou tlačí píst zpět do původní polohy a proces se stále opakuje. Na válci se obvykle nachází minimálně jeden výfukový ventil, který uvolňuje tlak během cyklu, kdy se píst pohybuje nahoru a dolů [29].



Obr. 16 Schéma pneumatického bouracího kladiva, upraveno dle [27].

7 Koncepce CAES ve světě

7.1 Huntorf

První elektrárnou CAES na světě byla elektrárna Huntorf vybudovaná na severu Německa v roce 1978. Zásobník tvoří 2 solné jeskyně s celkovým objemem přibližně 310 000 m³, které jsou umístěny v hloubce 650-800 m pod povrchem. Původní výkon byl 290 MW, avšak v roce 2006 byl zvýšen na 321 MW. Jedná se o diabatickou koncepci, kde elektromotor spotřebovává energii a stlačuje vzduch v době mimo špičku, kdy jsou náklady nižší. Následuje proces expanze, stlačený vzduch je smíchán se zemním plynem, tato směs je následně spalována a expanduje přes plynovou turbínu, která roztáčí generátor a vyrábí elektřinu. Plného výkonu může dosáhnout během 6 minut [30].

Zpočátku poskytovala služby tzv. černého startu jaderným blokům v blízkosti Severního moře, nebo zajišťovala levnou špičkovou energii. V současné době se obvykle využívá jako rezerva, nebo pro snižování špiček ve večerních hodinách, pokud není k dispozici žádná kapacita přečerpávacích vodních elektráren. V posledních letech také našla uplatnění při vyrovnávání rychle rostoucího výkonu větrných elektráren a může kompenzovat případné neočekávané výpadky větrné energie. [30].

7.2 McIntosh

Elektrárna McIntosh nacházející se v Alabamě v USA je v provozu od roku 1991. Výkon elektrárny dosahuje 110 MW. Stlačený vzduch je skladován v jedné velké solné jeskyni o celkovém objemu přibližně 570 000 m³, která se nachází v hloubce 125–459 m. Do plného zatížení naběhne během 10 minut [30].

Pro stlačování vzduchu využívá přebytečnou energii vyrobenou uhelnou elektrárnou Power South v době mimo špičku. Tlak vzduchu v zásobníku je téměř 76 barů. V době nejvyšší poptávky je vzduch vypuštěn a prochází přes rekuperátor tepla, kde se zahřeje přibližně na 315°C. Ohřátý vzduch následně vstupuje do vysokotlaké spalovací komory, kde je smíchán se zemním plynem. Směs je spalována a teplota vzroste přibližně na 537°C. Spaliny pokračují do vysokotlaké turbíny, kde se opět ohřejí na teplotu kolem 871°C. Poté vstupují do nízkotlaké turbíny, na jejímž konci se vracejí zpět do rekuperátoru a poskytují účinný zdroj tepla při teplotě pohybující se okolo 178°C. Vysokotlaká a nízkotlaká turbína společně roztáčí generátor a vyrábí elektrickou energii [30].

7.3 Porovnání elektráren Huntorf a McIntosh

I když jsou obě elektrárny založeny na totožné koncepci, hlavní rozdíl spočívá v tom, že elektrárna Huntorf je jednoduchým diabatickým systémem, zatímco McIntosh je diabatickým systémem s rekuperátorem tepla. Využitím rekuperátoru tepla snížila elektrárna McIntosh spotřebu zemního plynu o 25 % a zvýšila celkovou účinnost na 54 %. V důsledku toho spálí na jednu kWh výkonu zhruba třetinu množství zemního plynu ve srovnání s konvenční spalovací turbínou a vyprodukuje přibližně o třetinu méně skleníkových plynů [30].

Charakteristiky elektráren	Huntorf	McIntosh
Rok uvedení do provozu	1978	1991
Výkon [MW]	321	110
Maximální počet skladovacích hodin	3	26
Počet skladovacích jeskyní	2	1
Celkový skladovací objem zásobníku [m ³]	310 000	570 000
Maximální přípustný tlak [MPa]	7	7,6
Účinnost [%]	42	54
Investiční náklady (rok 2002) [\$]	116M	45,1M

Tab. 1 Srovnání klíčových charakteristik elektráren Huntorf a McIntosh [30].

7.4 Norton

V roce 2001 byl oznámen projekt CAES využívající vytěžený vápencový důl v Nortonu v Ohio. Důl nabízel skladovací objem přibližně 9,6 milionů m³. Celkový výkon zařízení byl plánován na 2700 MW, měl být rozdělen do 9 výrobních jednotek, kde každá jednotka disponovala 300 MW, které by umožnily nepřetržitý výrobní provoz po dobu 2 dnů. Tlak skladovaného vzduchu se měl pochybovat v rozmezí 5,5 až 11 MPa [20].

Projekt Norton však doposud nebyl realizován. V prosinci 2006 společnost Alstom jako hlavní dodavatel generátorového zařízení odstoupila z důvodu nedostatku interních zdrojů. Jako nový dodavatel zařízení se k projektu připojila společnost Dresser-Rand. V listopadu 2009 zakoupila práva na další rozvoj zařízení Norton americká společnost FirstEnergy Generation Corp [20]. V červenci 2013 bylo oznámeno, že společnost FirstEnergy odložila výstavbu navrhovaného projektu z důvodu nízkých cen energie a nedostatečné poptávky [30].

7.5 Iowa Stored Energy Park

Projekt Iowa Stored Energy Park (ISEP) byl navržen jako systém s výkonem 270 MW umístěný v Dallas center Iowa. Celková hodnota zařízení měla být 400 milionů amerických dolarů. Projekt měl být uveden do provozu v roce 2015 a jako zásobník měl využívat unikátní pískovcovou akviférovou geologickou strukturu v hloubce přibližně 91 m pod zemským povrchem. Projekt ISEP byl však roku 2011 po 8 letech vývoje přerušen z důvodu geologických omezení, protože geologické průzkumy v místě realizace projektu ukázaly, že zásobník není vhodný pro rozsah zamýšleného projektu [30].

7.6 Adele

Projekt Adele byl prvním adiabatickým projektem CAES na světě, jeho realizace měla probíhat ve Stasfurtu v Německu. Byl zahájen roku 2010 spoluprací společností RWE Power, General Electric, Zublin AG a Německého centra pro letectví a kosmonautiku. Jednalo se o první bezemisní technologii CAES [30]. Hlavní předností byla plánovaná účinnost až 70 %. Pro realizaci výstavby tohoto skladovacího zařízení bylo třeba překonat 2 hlavní překážky. První překážka byla na straně vysokoteplotního TES, který by musel odolávat kombinaci tepelného a mechanického namáhání, což by vyžadovalo užití speciálních materiálů [20]. Maximální pracovní tlak zařízení by byl 10 MPa a teplota do 600 °C [31]. Druhá překážka vznikla také díky vysoké teplotě, protože nebyl k dispozici žádný volně dostupný elektromotorem poháněný kompresor, který by pracoval při tak vysoké teplotě. Obecně je zařízení proveditelné, ale je zapotřebí značného inženýrského úsilí [20]. Přes veškeré investice a snahu spolupracujících společností byl projekt zrušen z netechnických důvodů [30].

8 Diskuze

V současné době se stále častěji setkáváme s přebytkem elektrické energie v síti. Tuto energii lze akumulovat v době přebytku a opět využít v době jejího nedostatku. Častou volbou pro akumulaci energie jsou přečerpávací vodní elektrárny (PVE). Konkurencí pro přečerpávací vodní elektrárny mohou být systémy CAES. Dle mého názoru jsou elektrárny na stlačený vzduch perspektivním řešením do budoucna. Oproti PVE jsou zásobníky CAES systémů realizovatelné pod zemským povrchem, čímž výrazně méně zasahují do krajiny a do životního prostředí. Účinnost PVE se pohybuje okolo 75 % a do budoucna lze očekávat její nárůst. Efektivita elektráren na stlačený vzduch je závislá na koncepci. Hodnoty účinností se pohybují v rozmezí od 40 % do 70 %.

Huntorf a McIntosh jsou jediné existující elektrárny na stlačený vzduch, které byly zrealizovány ve světě. Obě jsou založeny na totožné koncepci, avšak elektrárna McIntosh využívá rekuperátor tepla, díky tomu zvýšila svoji účinnost, snížila spotřebu paliva a produkci skleníkových plynů. Elektrárna v Huntorfu dosahuje účinnosti 42 %, zatímco McIntosh 54 %. Stejného pokroku by mohla dosáhnout i elektrárna Huntorf s využitím rekuperátoru tepla.

Již zmiňované elektrárny Huntorf a McIntosh jsou diabatické systémy. Teplo vzniklé při kompresi neukládají, naopak s ním zachází jako s odpadem a odvádí ho do atmosféry. Při expanzní fázi však potřebují teplotu stlačeného vzduchu zvýšit, spalují proto zemní plyn. Zde se zdá být adiabatická koncepce výhodnější i šetrnější vůči životnímu prostředí. Adiabatické koncepce ukládají teplo vzniklé při kompresi a opět jej využívají při expanzi, díky tomu eliminují potřebu spalování fosilních paliv a zvyšují celkovou účinnost systému. Konstrukční řešení těchto systémů je však složité, protože obsahuje systém skladování tepelné energie TES (thermal energy storage), který musí odolávat vysokým teplotám. Zásobník systému TES je nutné vyrábět z tepelně odolných materiálů, což značně zvyšuje cenu celého zařízení. Adiabatické systémy mohou dosahovat celkových účinností až 70 %. I když v praxi zatím žádný adiabatický systém realizován nebyl, mezi perspektivní řešení akumulace energie ve stlačeném vzduchu do budoucna určitě patří.

Ačkoliv byly doposud zrealizovány pouze 2 systémy CAES, které stále pracují, plánovaných projektů bylo mnohem více. V práci jsou popsány 3 nezrealizované projekty. Projekt Norton byl plánovaný systém, který se skládal z 9 výrobních jednotek s celkovým výkonem 2700 MW. Důvodem neúspěchu byla nízká cena energie a nedostatečná poptávka. Iowa stored energy park (ISEP) byl navržen jako systém s výkonem 270 MW a jako zásobník měl využívat pískovcovou akviférovou strukturu. Avšak geologické průzkumy v místě realizace projektu ukázaly, že tento zásobník není vhodný. Projekt ADELE měl být první adiabatický systém. Při realizaci se vyskytly problémy s vysokoteplotním systémem TES. Účinnost měla dosahovat až 70 %. Na projektu se podílelo několik společností a i přes jejich veškeré investice a snahu byla realizace projektu zrušena z netechnických důvodů. Návrh systémů CAES vyžaduje značné inženýrské úsilí při překonávání překážek s jeho realizací.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo seznámit s problematikou akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES – compressed air energy storage), kriticky zhodnotit a okomentovat současný stav využití této technologie, uvést přehled realizovaných systémů v praxi. Cíl bakalářské práce byl splněn.

V práci jsou rozděleny a popsány jednotlivé vhodné geologické podmínky pro realizaci zásobníků systémů CAES včetně způsobu jejich fungování. Následuje část věnovaná individuálním druhům systémů, která analyzuje, jak nakládají s teplem vzniklým při kompresi, dále pak průběh samotné komprese a následné expanze. U každého systému je přiloženo jeho schéma s popisem.

Další část stručně pojednává o faktu, že stlačený vzduch nemusí být nutně spojen pouze s akumulací. Lze využít a převést jeho tlakovou energii na jiný druh energie, při kterém například pohání pneumatické stroje.

První polovina závěrečné části této práce je věnovaná koncepcím CAES systémů ve světě, které se zrealizovaly. Jsou zde popsány hlavní charakteristiky a následuje jejich porovnání. V druhé polovině jsou zmíněny plánované koncepce, které však nikdy zrealizovány nebyly.

Nejperspektivnějším druhem elektráren na stlačený vzduch s výhledem do budoucna je adiabatický systém. Oproti konvenčnímu diabatickému systému dosahuje vyšší účinnosti a eliminuje potřebu spalování fosilních paliv za účelem zvýšení teploty před expanzní fází. Izotermické systémy rovněž jako adiabatické nebyly v praxi realizovány, vždy byly zrušeny již ve fázi plánování. Adiabatické systémy jsou tedy do budoucna perspektivní možností, avšak složitost a nákladnost jejich konstrukce značně ovlivňuje proces jejich realizace.

Při plánování výstavby elektráren na stlačený vzduch se vyskytují překážky, které často zapříčiní zánik celého projektu. Proto je hlavním úkolem projektantů vypořádat se s případnou překážkou, aby došlo k realizaci a veškerá snaha a úsilí nebyly zbytečné.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Ideální plyn. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Ide%C3%A1ln%C3%AD_plyn
- [2] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [3] KLIMEŠ, Lubomír. Termodynamické děje – prezentace [online]. Brno: Přednáška, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://sites.google.com/vutbr.cz/klimes/>
- [4] ŠTĚTINA, Josef. Termodynamické děje – prezentace [online]. Brno: Přednáška, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://sites.google.com/vutbr.cz/termomechanika/doma/termomechanika-6tt?authuser=0>
- [5] BARNES, Frank S. a Jonah G. LEVINE. *Large energy storage systems handbook*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8600-3.
- [6] DE ROOIJ, Dricus. Isothermal Compressed Air Energy Storage (CAES). Sinovoltaics [online]. China: Sinovoltaics, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/isothermal-caes/>
- [7] Zhang, Aibo, et al. „Investigation of the Compressed Air Energy Storage (CAES) System Utilizing Systems-Theoretic Process Analysis (STPA) towards Safe and Sustainable Energy Supply". *Renewable Energy*, roč. 206, duben 2023, s. 1075–85. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.098>.
- [8] MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a Vladislav POULEK. Akumulace elektrické energie. *Elektro* [online]. 2011, 2011(2), 6-10 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>
- [9] Yu, Haoshui, et al. „Process Improvements and Multi-Objective Optimization of Compressed Air Energy Storage (CAES) System". *Journal of Cleaner Production*, roč. 335, únor 2022, s. 130081. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130081>.
- [10] SUCCAR, Samir a Robert H. WILLIAMS. Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, And Applications For Wind Power [online]. Princeton, 2008 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1129/ML11294A619.pdf>. Report. Princeton University – Princeton Environmental Institute.
- [11] King, Marcus, et al. „Overview of Current Compressed Air Energy Storage Projects and Analysis of the Potential Underground Storage Capacity in India and the UK". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 139, duben 2021, s. 110705. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110705>.
- [12] REŠILIÁNO, Tomáš. Akumulace energie v tlakovém vzduchu [online]. Brno, 2016 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/60680>.

- Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství – VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil Ph.D.
- [13] Li, Yi, et al. „A Comparison of Compressed Carbon Dioxide Energy Storage and Compressed Air Energy Storage in Aquifers Using Numerical Methods". *Renewable Energy*, roč. 187, březen 2022, s. 1130–53. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.036>.
- [14] Guo, Chaobin, et al. „Modelling Studies for Influence Factors of Gas Bubble in Compressed Air Energy Storage in Aquifers". *Energy*, roč. 107, červenec 2016, s. 48–59. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.003>.
- [15] Guo, Chaobin, et al. „The Promise and Challenges of Utility-Scale Compressed Air Energy Storage in Aquifers". *Applied Energy*, roč. 286, březen 2021, s. 116513. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116513>.
- [16] LIM, Sanie Dong. *Ocean Compressed Air Energy Storage (OCAES) Integrated with Offshore Renewable Energy Sources* [online]. Raleigh, North Carolina, 2013 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/8878>. Master thesis. Faculty of North Carolina State University. Vedoucí práce Andre Mazzoleni.
- [17] CUMMINS, Kate. Compressed air energy storage has bags of potential. *The Engineer* [online]. England: The Engineer, 2011 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.theengineer.co.uk/content/in-depth/compressed-air-energy-storage-has-bags-of-potential>
- [18] Zhang, Jianjun, et al. „Performance Analysis of Diabatic Compressed Air Energy Storage (D-CAES) System". *Energy Procedia*, roč. 158, únor 2019, s. 4369–74. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.782>.
- [19] MOHAMED, Alaeldin. *Isothermal Compressed Air Energy Storage (I-CAES)* [online]. Vienna, 2018 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.34726/hss.2018.59962>. Master thesis. TU Wien. Vedoucí práce Reinhard Haas.
- [20] Budt, Marcus, et al. „A Review on Compressed Air Energy Storage: Basic Principles, Past Milestones and Recent Developments". *Applied Energy*, roč. 170, květen 2016, s. 250–68. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.108>.
- [21] THOMASSON, Tomi. Dynamic model development of adiabatic compressed air energy storage [online]. Lappeenranta, 2016 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/308803108_Dynamic_Model_Development_of_Adiabatic_Compressed_Air_Energy_Storage. Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology – School of Energy Systems. Vedoucí práce M. Sc. Matti Tähtinen.
- [22] Dnešní použití pneumatiky. *Elektropneumatika* [online]. Plzeň: Střední odborné učiliště elektrotechnické, 2015 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z:

- https://www.souepl.cz/wp-content/ucitele/moc/dnes_pneumatika/pneumatika_dnes_1.htm
- [23] Pneumatický motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Pneumatick%C3%BD_motor
- [24] KOPÁČEK, Jaroslav. *Pneumatické mechanismy*. V Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov v Žiline, 1991. ISBN 80-7100-057-4.
- [25] GANNON, Mary. What are air brakes and clutches?. *PneumaticTips* [online]. New York: PneumaticTips, 2015 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.pneumatictips.com/what-are-air-brakes-and-clutches/>
- [26] Pneumatic Brakes Information. *GlobalSpec* [online]. New York: GlobalSpec, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/clutches_brakes/pneumatic_brakes
- [27] ELLIOTT, Brian S. *Compressed air operations manual: an illustrated guide to selection, installation, applications, and maintenance*. New York: McGraw-Hill, c2006. ISBN 978-0-07-147526-6.
- [28] Pneumatické kladivo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Pneumatick%C3%A9_kladivo
- [29] CHANDLER, Nathan. How Jackhammers Work. *HowStuffWorks* [online]. Marina Del Rey: HowStuffWorks, 2014 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://home.howstuffworks.com/jackhammers.htm>
- [30] Matos, Catarina R., et al. „Overview of Compressed Air Energy Storage Projects and Regulatory Framework for Energy Storage“. *Journal of Energy Storage*, roč. 55, listopad 2022, s. 105862. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105862>.
- [31] ADELE – Adiabatic Compressed-Air Energy Storage for Electricity Supply. In: *We Can Figure This Out.org* [online]. Essen/Köln: RWE, 2010 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://wecanfigurethisout.org/ENERGY/Web_notes/Round_Pegs/Power_Cycles_and_Energy_Storage_Supporting_Files/ADELE%20%E2%80%93%20Adiabatic%20Compressed-Air%20Energy%20Storage%20for%20Electricity%20Supply.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
PVE	Přečerpávací vodní elektrárny
CAES	(Compressed air energy storage) Akumulační systémy na stlačený vzduch
A-CAES	(Adiabatic compressed air energy storage) Adiabatický akumulací systém na stlačený vzduch
TES	(Thermal energy storage) Systém skladování tepelné energie

Symbol	Jednotka	Popis
p	[Pa]	Tlak
v	[m ³ .kg ⁻¹]	Měrný objem
r	[J.mol ⁻¹ .kg ⁻¹]	Měrná plynová konstanta
T	[K]	Teplota
V	[m ³]	Objem
m	[kg]	Hmotnost
V_m	[m ³ .kmol ⁻¹]	Molární objem
R_m	[kg.kmol ⁻¹]	Molární hmotnost
R_m	[J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]	Univerzální plynová konstanta
n	[mol]	Látkové množství
c_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
c_v	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita za konstantního objemu
κ	[-]	Poissonova konstanta
n	[-]	Polytropický exponent

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Izobarická expanze v p-V a T-s diagramu
- Obr. 2 Izochorická komprese v p-V a T-s diagramu
- Obr. 3 Izotermická expanze v p-V a T-s diagramu
- Obr. 4 Adiabatická expanze v p-V a T-s diagramu
- Obr. 5 Polytropická expanze v p-V a T-s diagramu
- Obr. 6 Schéma systému CAES [6]
- Obr. 7 Tvar a velikost jeskyní použitých v elektrárně Huntorf [5]
- Obr. 8 Schéma akviféru [15]
- Obr. 9 Pružné vaky pro skladování pod mořskou hladinou [17]
- Obr. 10 Schéma diabatického systému CAES [5]
- Obr. 11 Schéma izotermického systému CAES [21]
- Obr. 12 Schéma CAES bez systému TES [20]
- Obr. 13 Schéma CAES se systémem TES [20]
- Obr. 14 Lamelový rotační motor a) pro jeden směr otáčení, b) pro oba směry otáčení [24]
- Obr. 15 Schéma pneumatické brzdy [27]
- Obr. 16 Schéma pneumatického bouracího kladiva [27]

SEZNAM TABULEK

Tab.1 Srovnání klíčových charakteristik elektráren Huntorf a McIntosh [30]

