

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**VYUŽITÍ STLAČENÉHO VZDUCHU PRO
AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ROSTISLAV MARTINÁK

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Rostislav Martinák

ID: 111092

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Využití stlačeného vzduchu pro akumulaci elektrické energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je shromáždění informací o možnostech akumulace energie v podobě stlačeného vzduchu.

Součástí práce by měla být i jednoduchá simulace motoru na stlačený vzduch.

- Teoretické základy termodynamiky plynů
- Praktické aplikace stlačeného vzduchu
- Akumulační systémy na stlačený vzduch u nás a ve světě
- Simulace chodu jednoduchého pístového motoru na stlačený vzduch

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

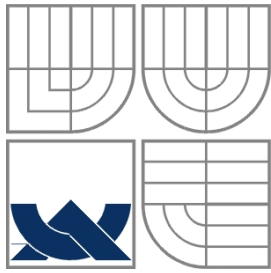
UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

MARTINÁK, R. *Využití stlačeného vzduchu pro akumulaci elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 43 s.

Prohlašuji, že jsem svou **bakalářskou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Využití stlačeného vzduchu pro akumulaci elektrické energie

Rostislav Martinák

Vedoucí: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

Use compressed air to electric power accumulation

Rostislav Martinák

Supervisor: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Brno University of Technology, 2010

Brno

ABSTRAKT

Cílem této práce je seznámit čtenáře s možnostmi využití energie stlačeného vzduchu v různých oblastech, především však s využitím stlačeného vzduchu pro akumulaci elektrické energie.

Práce seznamuje s technologiemi, které využívají ke své funkci pneumatická nářadí, auto na stlačený vzduch a akumulární zařízení elektrické energie na stlačený vzduch.

V další části je porovnání akumulárních systému na stlačený vzduch s některými možnými způsoby akumulace elektrické energie.

Závěrečná část je zhodnocením práce a možnosti akumulovat elektrickou energii ve stlačeném vzduchu.

KLÍČOVÁ SLOVA: akumulace energie; stlačený vzduch; akumulace energie ve stlačeném vzduchu

ABSTRACT

The aim of this paper is to acquaint the reader with the possibilities of using the energy of compressed air in different areas, but particularly with the use of compressed air to accumulate electrical power.

This paper introduces the technologies they use to their function pneumatic tools, compressed air car and compressed air energy storage facilities.

The next section is to compare the compressed air energy storage systems with some accumulation possible ways of electrical power.

The conclusion sums up work opportunities to accumulate electrical energy in compressed air.

KEY WORDS: accumulation of energy; compressed air; compressed air energy storage

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	12
2 ZPŮSOBY AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	13
2.1 KVANTITATIVNÍ AKUMALCE	13
2.2 TEPELNÁ AKUMULACE	13
2.3 CHEMICKÁ NEBO ELEKTROCHEMICKÁ AKUMULACE	13
2.4 MECHANICKÁ AKUMULACE	13
2.5 ELEKTROMAGNETICKÁ AKUMULACE	13
3 TEORETICKÉ ZÁKLADY TERMODYNAMIKY PLYNŮ	14
3.1 ZÁKONY TERMODYNAMIKY	14
3.2 IDEÁLNÍ PLYN	15
3.3 DĚJE V IDEÁLNÍCH PLYNECH	15
4 VYUŽITÍ STLAČENÉHO VZDUCHU V PRAXI	20
4.1 PNEUMATICKÉ NÁŘADÍ.....	20
4.1.1 PNEUMATICKÉ MOTORY	20
4.2 AUTO NA STLAČENÝ VZDUCH.....	23
4.2.1 PRINCIP FUNKCE	23
4.2.2 MOTOR NA STLAČENÝ VZDUCH	24
4.2.3 ZPŮSOBY TANKOVÁNÍ	27
4.2.4 NEOBVYKLÉ TECHNOLOGIE	27
4.2.5 TECHNICKÉ PARAMETRY VOZIDLA	28
4.3 CAES SYSTÉMY.....	28
4.3.1 PRINCIP FUNKCE	29
4.3.2 ZÁKLADNÍ PRACOVNÍ OBĚHY	30
4.3.3 GEOLOGICKÁ PODLOŽÍ.....	31
4.3.4 ZÁSOBNÍKY STLAČENÉHO VZDUCHU	33
4.3.5 CAES ELEKTRÁRNY	34
4.3.6 POROVNÁNÍ CAES S JINÝMI MOŽNÝMI TYPY AKUMULUCE ELEKTRICKÉ ENERGIE	37
5 ZÁVĚR.....	41
POUŽITÁ LITERATURA	42

Seznam obrázků

<i>Obr. 3-1: Diagram p-v</i>	16
<i>Obr. 3-2: Entropický diagram</i>	16
<i>Obr. 3-3: Diagram p-v</i>	17
<i>Obr. 3-4: Entropický diagram</i>	17
<i>Obr.3-5: Ideální a skutečná komprese</i>	18
<i>Obr. 3-6: Diagram p-v</i>	18
<i>Tab. 3-7: Entropický diagram</i>	18
<i>Obr. 4-1[4]: Pneumatická nářadí</i>	20
<i>Obr. 4-2 [4]: Pneumatický motor a elektromotor stejných výkonů</i>	21
<i>Obr. 4-3 [4]: Lamelový motor</i>	21
<i>Obr. 4-4 [4]: Zubový motor</i>	22
<i>Obr. 4-5 [4]: Turbínový motor</i>	23
<i>Obr. 4-6 [8]: Nádrž na stlačený vzduch</i>	24
<i>Obr. 4-7: Klikové mechanismy</i>	24
<i>Obr. 4-8 [7]:K vysvětlení činnosti motoru</i>	25
<i>Obr. 4-9 [12]: Funkce MDI motoru</i>	26
<i>Obr. 4-10 [12]: Plnění na kompresní stanici</i>	27
<i>Obr. 4-11 [11]: Auto na stlačený vzduch</i>	28
<i>Obr. 4-12 [15]: Princip funkce CAES</i>	29
<i>Obr. 4-13: Oběh CAES</i>	31
<i>Obr. 4-14: Oběh CAES</i>	31
<i>Obr. 4-15: Oběh AA-CAES</i>	31
<i>Obr. 4-16 [20]: Solná kaverna CAES Huntorf</i>	32
<i>Obr. 4-17 [20]: Výskyt solných podloží ve větru bohatých oblastech v Evropě</i>	32
<i>Obr. 4-18 [18]: Zásobníky stlačeného vzduchu</i>	34
<i>Obr. 4-19 [18]: Strojní uspořádání</i>	34
<i>Obr. 4-20 [18]: Náznornější uspořádání CAES Huntorf</i>	35
<i>Obr. 4-21 [17]: Schéma CAES McIntosh</i>	36
<i>Obr. 4-22: Vyrobená el. energie vztažená na objem zásobníku v závislosti na spádu</i>	38
<i>Obr. 4-23: Vyrobená el. energie vztažená na objem zásobníku v závislosti na rozdílu tlaků</i>	40
<i>Obr. 4-24: Vyrobená el. energie vztažená na objem zásobníku v závislosti na tlaku</i>	40

Seznam tabulek

<i>Tab. 4-1: Porovnání pneumatických a elektrických motorů</i>	22
<i>Tab. 4-2: Technické parametry vozidla MiniFlowAir</i>	28
<i>Tab. 4-3: Základní parametry turbíny a kompresorů</i>	35
<i>Tab. 4-4: Základní parametry motor/generátoru a kaverny</i>	35
<i>Tab. 4-5: Základní parametry CAES McIntosh</i>	36
<i>Tab. 4-6[20]: Porovnání jednotlivých typů akumulace</i>	37

Seznam symbolů a zkratk

Značka	Veličina	Značka jednotky
E	energie	J
E_v	energie vztažená na jednotku objemu	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$
H	spád	m
P	výkon	W
Q_m	hmotností průtok	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
R_m	molární plynová konstanta	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
T	termodynamická teplota	K
V	objem	m^3
V_m	molární objem	$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
c_p	měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
c_v	měrná tepelná kapacita při stálém objemu	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
g	tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
i	měrná entalpie	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
m	hmotnost	kg
n	polytropický exponent	l
p	tlak	Pa
q	měrné teplo	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
r	měrná plynová konstanta	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
s	měrná entropie	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
u	měrná vnitřní energie	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
v	měrný objem	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
w	měrná objemová práce	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
w_t	měrná technická práce	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
η	účinnost	l
κ	izoentropický exponent	l

1. Úvod

Výroba elektrické energie se řídí poptávkou, což je velkým problémem, jelikož během dne se potřeba této suroviny mění, a v zájmu nejvyšší hospodárnosti provozu se krytí základního zatížení svěřuje velkým tepelným a jaderným elektrárnám a průtočným hydroelektrárnám, které patří ke zdrojům se stálou dodávkou elektrické energie. Pak v době špičky nastává problém nedostatku a v době mimo špičku zase problém přebytku elektrické energie. Tento problém se řeší tím, že v době nedostatku elektrické energie se připojí do sítě během co nejkratší doby špičkové zdroje např. akumulární a přečerpávací vodní elektrárny nebo třeba plynové elektrárny. V době mimo špičku se přebytek elektrické energie využije k akumulaci např. v přečerpávacích vodních elektrárnách (PVE).

Jestliže se na výrobu většího množství elektrické energie využijí obnovitelné zdroje elektrické energie, jako je třeba energie větru (např. Německo), mohou být výkyvy dodávky ještě větší. Jedna z možností řešení tohoto problému spočívá v akumulaci energie.

Přes letité výzkumy nebyl stále nalezen způsob, jak akumulovat elektrickou energii ve velkém množství, s výjimkou přečerpávacích vodních elektráren (PVE). Jelikož lokality na jejich výstavbu jsou téměř vyčerpány, je potřeba hledat nové způsoby jak energii akumulovat. Jednou z možností je akumulace energie ve stlačeném vzduchu.

2. Způsoby akumulace elektrické energie

2.1 Kvantitativní akumulace

Pod tímto způsobem akumulace jsou myšleny zásoby pevných, kapalných nebo plyných paliv. V české elektroenergetické literatuře se obvykle používá pojmu „zásoby paliv“ a nehovoří se o akumulaci energie. Pojem „kvantitativní akumulace“ je překladem anglického termínu „quantitative storage“.

2.2 Tepelná akumulace

Tepelnou akumulací je myšleno skladování energie ve formě tepla. Této akumulace využívají tepelné akumulátory, které představují buď speciální zařízení, nebo běžné součásti technologických celků (dlouhé teplovody), které umožňují využít akumulované tepelné energie pro přeměnu na jiný druh energie (obvykle elektrické).

2.3 Chemická nebo elektrochemická akumulace

Označuje akumulaci elektrické energie ve formě chemické energie a využívá se v chemických bateriích, obvykle označovaných prostým pojmem „baterie“, nebo v akumulátorech. Akumulátory využívají přeměnu elektrické energie na energii chemickou, kterou je možno v případě potřeby transformovat zpět na elektrickou energii.

2.4 Mechanická akumulace

Tento způsob skladování energie využívá potenciální energie nebo kinetické energie v zařízeních umožňujících přeměnu této energie na jinou formu vhodnější pro praktické využití. V elektroenergetice se tohoto způsobu akumulace energie využívá u akumulčních vodních elektráren (AVE) a rovněž u přečerpávacích vodních elektráren (PVE). U AVE se jedná o prostou mechanickou akumulaci, ale PVE využívají přeměnu elektrické energie na energii potenciální, která se v případě potřeby mění zpět na elektrickou energii. Mezi mechanické způsoby akumulace energie patří také zásobníky stlačeného vzduchu (plynu), které však zatím nejsou příliš prakticky využívány. Akumulace ve formě kinetické energie využívají tzv. setrvačníky, které v současnosti nejsou příliš prakticky využívány, ale možnosti jejich praktického uplatnění se zkoumají.

2.5 Elektromagnetická akumulace

Založená na akumulování elektrické energie formou elektromagnetického pole kolem supravodivých vodičů. Tento způsob akumulace energie je poměrně nový a je předmětem intenzivního výzkumu.

3. Teoretické základy termodynamiky plynů

Termodynamika je část termomechaniky (část termiky nebo-li nauky o teple) zabývající se zkoumáním vlastností makroskopických soustav ve stavu termodynamické rovnováhy i ve stavech nerovnovážných.

3.1 Zákony termodynamiky

První zákon termodynamiky nebo-li též zákon zachování energie lze obecně zapsat ve tvaru

$$\Delta E = Q - W, \quad (3.1)$$

kde ΔE značí celkovou změnu energie soustavy, Q teplo dodané soustavě okolím a W značí celkovou práci vykonanou systémem.

Pro homogenní soustavu můžeme celkovou energii E soustavy nahradit vnitřní energií U . 1 (počáteční stav) a 2 (koncový stav) označíme stavy, mezi kterými probíhá děj v soustavě. Rovnici (3.1) pak můžeme vyjádřit ve tvaru

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12} \quad (3.2)$$

První zákon termodynamiky můžeme vyjádřit také v diferenciálním tvaru a jelikož jsou veličiny vystupující v rovnici (3.2) extenzivní, vyjádříme je zároveň jako veličiny měrné.

$$dq = du + dw = du + p dv, \quad (3.3)$$

$$dq = di + dw_t = di - v dp, \quad (3.4)$$

kde je definována jednak objemová (absolutní) práce jako

$$dw = p dv, \quad (3.5)$$

po integraci obdržíme pro děj mezi stavy 1 a 2

$$w_{12} = \int_{(1)}^{(2)} p dv \quad (3.6)$$

a jednak práce technická (tlaková)

$$dw_t = -v dp, \quad (3.7)$$

po integraci

$$w_{t12} = - \int_{(1)}^{(2)} v dp. \quad (3.8)$$

Rozdíl mezi jednotlivými pracemi je v tom, že objemovou práci lze získat pouze jednorázově, kdežto technickou práci lze získávat trvale realizací tepelného oběhu.

Veličina i vystupující v druhém tvaru prvního zákona termodynamiky se nazývá entalpie a je definována vztahem

$$i = u + p v \quad (3.9)$$

Druhý zákon termodynamiky lze matematicky vyjádřit

$$ds \geq \frac{dq_{vrat}}{T}, \quad (3.10)$$

kde s je měrná entropie, q_{vrat} je teplo sdělené mezi soustavou a okolím při vratné změně, T je termodynamická teplota. Znaménko $>$ platí pro děje nevratné a znaménko $=$ platí pro děje vratné. Tedy pro vratné děje platí vztah

$$ds = \frac{dq_{vrat}}{T}. \quad (3.11)$$

Po integraci vztahu (3.11) obdržíme

$$s_2 - s_1 = \int_{(1)}^{(2)} \frac{dq_{vrat}}{T}. \quad (3.12)$$

3.2 Ideální plyn

Ideální plyn je v termodynamice zaveden jako zjednodušující model pro popis vlastností reálných plynů. Je to látka s nejjednoduššími termodynamickými vlastnostmi, které jsou:

1. řídí se stavovou rovnicí

$$p v = r T; p V = m r T; p V_m = M_m r T = R_m T, \quad (3.13)$$

kde r je měrná plynová konstanta, která je charakteristická pro každý plyn, m je hmotnost příslušná objemu V , V_m je molární objem, M_m je molární hmotnost a R_m je molární plynová konstanta, která má pro všechny plyny stejnou hodnotu ($R_m = M_m r = 8,31441 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

2. Měrné tepelné kapacity jsou konstantní a tedy i izoentropický exponent je konstantní

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.14)$$

3. Vnitřní energie je pouze funkcí teploty

$$du = c_v dT, \quad (3.15)$$

námi definovanou entalpii můžeme pak vyjádřit

$$di = c_p dT. \quad (3.16)$$

4. Nedochozí v něm ke ztrátám energie

Tyto zjednodušující předpoklady aplikované na skutečné plyny nám umožňují jednoduché řešení při tepelných výpočtech.

3.3 Děje v ideálních plynech

Z hlediska komprese mají význam tři základní tepelné děje popsané matematicky níže. K základním tepelným dějům, které zde podrobněji nejsou rozebrány, neboť z hlediska komprese nemají význam, patří děje izobarický a izochorický ([3] str. 112 - 114).

Komprese může být:

a) izotermická – veškeré teplo vzniklé při kompresi se odvádí a teplota plynu se nemění. Děj je popsán rovnicí odvozené ze stavové rovnice ideálního plynu (3.13)

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (3.17)$$

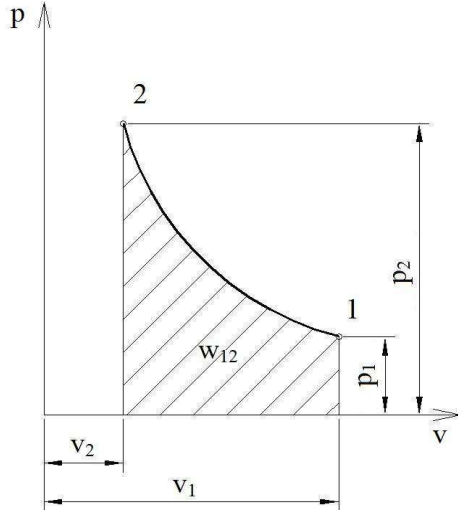
Měrné sdělené teplo určíme z prvního zákona termodynamiky (3.3)

$$dq = dw; q_{12} = w_{12}. \quad (3.18)$$

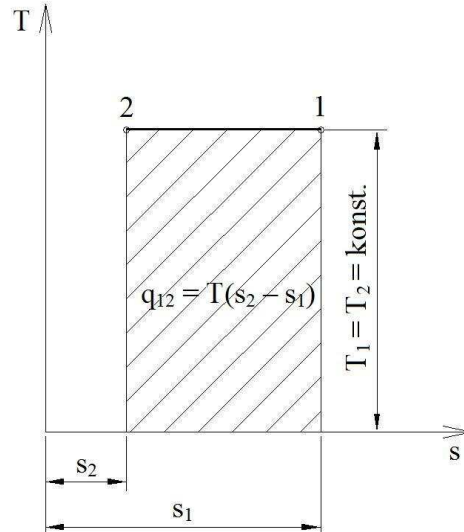
Z této rovnice plyne, že sdělené teplo při izotermickém stlačování se rovná objemové práci. Vnitřní energie po dobu komprese zůstává konstantní.

Pro měrnou objemovou práci plyne z rovnice (3.6)

$$w_{12} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (3.19)$$



Obr. 3-1: Diagram p-v



Obr. 3-2: Entropický diagram

Protože je izoterma v p - v diagramu rovnoosá hyperbola (Obr. 3-1) platí pro technickou práci

$$w_{t12} = w_{12} \quad (3.20)$$

Izoterma je v T - s diagramu přímka rovnoběžná s osou entropie (Obr. 3-2). Pro změnu entropie platí vztah

$$s_2 - s_1 = r_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = r_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (3.21)$$

Z druhého zákona termodynamiky (3.12) plyne pro měrné sdělené teplo rovnice

$$q_{12} = T(s_2 - s_1) \quad (3.22)$$

b) adiabatická (izoentropická) – teplo se plynu při kompresi neodvádí ani nepřivádí a entropie se nemění v případě, že se jedná o kompresi vratnou (izoentropickou). Proces probíhá dle rovnice (též rovnice izoentropie):

$$p_1 v_1^\kappa = p_2 v_2^\kappa = konst., \quad (3.23)$$

kde κ je izoentropický exponent (pro vzduch $\kappa = 1,4$)

Izoentropickou kompresi v p - v diagramu znázorňuje Obr. 3-3. Křivka je strmější než izoterma. V souřadnicích T - s je izoentropa kolmou přímkou k ose entropie (Obr. 3-4).

Pro měrnou objemovou práci při adiabatické změně plyne z prvního zákona termodynamiky (3.3)

$$w_{12} = u_1 - u_2 = c_v (T_1 - T_2). \quad (3.24)$$

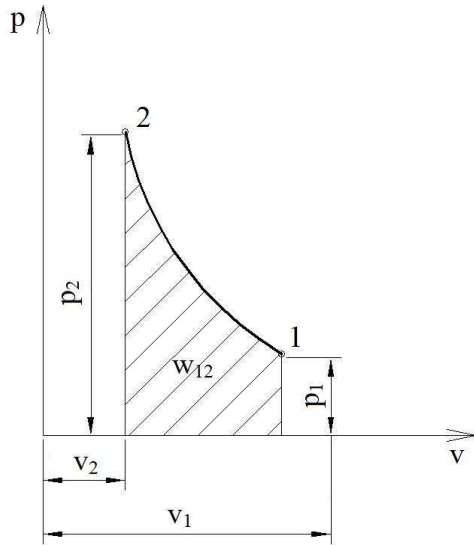
Pro stanovení měrné technické práce z prvního zákona termodynamiky (3.4) platí

$$w_{t12} = i_1 - i_2 = c_p (T_1 - T_2), \quad (3.25)$$

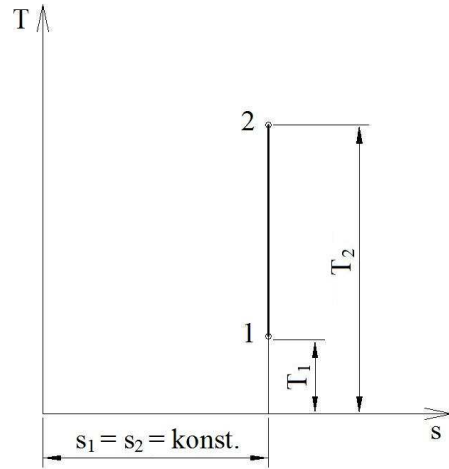
kde rozdíl entalpií $i_1 - i_2$ se nazývá adiabatický tepelný spád.

Z rovnice izoentropie (3.23) a ze stavové rovnice (3:13) (platí současně) plyne závislost mezi stavovými veličinami.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}. \quad (3.26)$$



Obr. 3-3: Diagram p-v



Obr. 3-4: Entropický diagram

Měrná objemová práce vyjádřená pomocí objemu a tlaku

$$w_{12} = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} \right] = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]. \quad (3.27)$$

Pro měrnou technickou práci platí

$$w_{t12} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]. \quad (3.28)$$

Pro poměr technické a objemové práce platí

$$\frac{w_{t12}}{w_{12}} = \kappa. \quad (3.29)$$

Skutečná nevratná adiabatická změna je podle druhého zákona termodynamiky pro nevratné děje provázána přírůstkem entropie soustavy, způsobeného ztrátou energie. Skutečnou kompresi ukazuje Obr. 3-5 (děj 1-2'). Absolutní hodnota práce při nevratné kompresi je pak větší. Pro hodnocení skutečné adiabatické komprese se používá vnitřní termodynamická účinnost komprese (kompresoru) definovaná vztahem (3.30)

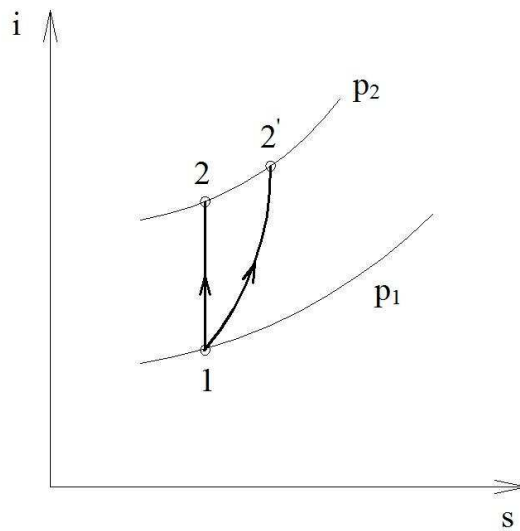
$$\eta_{tdi} = \frac{i_2 - i_1}{i_2' - i_1} \quad (3.30)$$

Při nevratném adiabatickém ději není možné použít rovnic (3.26) a tedy ani rovnice (3.27) a (3.28).

Měrná objemová a technická práce jsou pak dány pro nevratnou změnu podle prvního zákona termodynamiky rovnicemi

$$w_{12} = u_1 - u_2' = c_v (T_1 - T_2'), \quad (3.31)$$

$$w_{t12} = i_1 - i_2' = c_p (T_1 - T_2'). \quad (3.32)$$

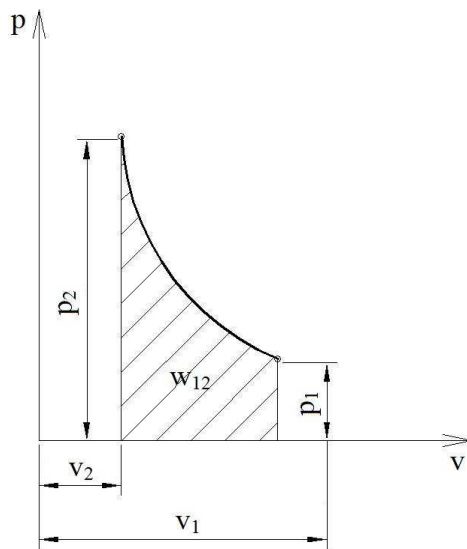


Obr. 3-5: Ideální a skutečná komprese

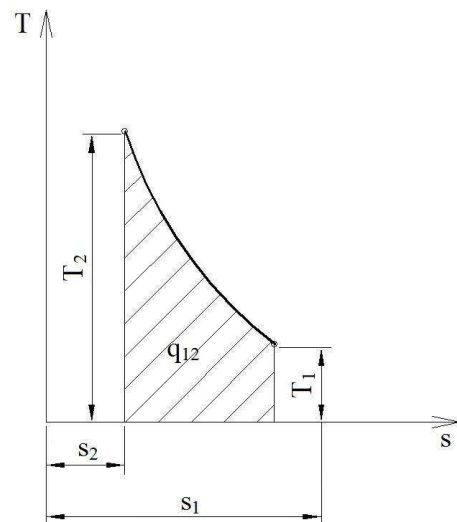
c) **polytropická** – jedná se o zobecněnou vratnou změnu stavu danou rovnicí

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = \text{konst.}, \quad (3.33)$$

kde n je polytropický exponent, který je zpravidla větší než exponent izotermy a menší než exponent izoentropy. Obecně však platí, že může mít hodnotu od $-\infty$ do $+\infty$. O exponentu n předpokládáme, že je během změny konstantní, což u skutečných změn není.



Obr. 3-6: Diagram p-v



Obr. 3-7: Entropický diagram

Pro polytropickou změnu mezi dvěma stavy plynu platí obdobné vztahy jako u vratné adiabatické změny.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (3.34)$$

pro měrnou objemovou práci

$$w_{12} = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa - 1} \right] = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right] \quad (3.35)$$

pro poměr technické a objemové práce

$$\frac{w_{t12}}{w_{12}} = n \quad (3.36)$$

a pro měrnou technickou práci

$$w_{t12} = \frac{n}{n - 1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n - 1}{n}} \right]. \quad (3.37)$$

U polytropické změny dochází mezi soustavou a okolím k výměně tepla. Tím se liší od změny adiabatické.

Sdělené teplo je možno určit z rovnice

$$q_{12} = \frac{\kappa - n}{\kappa - 1} w_{12}. \quad (3.38)$$

Změna entropie lze vyjádřit

$$s_2 - s_1 = c_n \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (3.39)$$

Polytropická změna stavu se používá pro popis nevratné adiabatické změny stavu. Nevratnou adiabatickou kompresi můžeme nahradit polytropou s exponentem $n > \kappa$, kde střední hodnotu polytropického exponentu pro tuto náhradu určíme z rovnice

$$n = \frac{\ln \frac{p_1}{p_2}}{\ln \frac{v_2}{v_1}}. \quad (3.40)$$

Náhradní rovnice polytropy můžeme použít jen pro výpočet stavových veličin v průběhu nevratné adiabatické změny. Rovnice (3.34), (3.35) a (3.37) platí jen pro vratnou polytropickou změnu, při nevratné adiabatické změně jsou práce dány vztahy (3.31), (3.33) a sdělené teplo je rovno nule.

4. Využití stlačeného vzduchu v praxi

Stlačený vzduch je důležitým zdrojem energie v průmyslových provozech. Nejčastějšími oblastmi využití jsou:

- čištění, broušení, leštění, natírání;
- odstraňování prachu, sušení;
- vrtání, šroubování, vyklepávání, kování;
- řízení, seřizování, regulování;
- chlazení-chlazení vinutí rotorů alternátorů v elektrárnách;
- pneuservis.

Z výše vyjmenovaných oblastí využití energie stlačeného vzduchu většina souvisí s činností pneumatického nářadí. Dále se energie stlačeného vzduchu využívá k akumulaci elektrické energie v tzv. CAES systémech (compressed air energy storage – akumulace energie ve stlačeném vzduchu) a také jako „palivo“ pro auta.

4.1 Pneumatické nářadí

Mnozí nevědí, že energie stlačeného vzduchu je využívána pro pohon strojů jako jsou vrtačky, brusky, pily a další, neboť většina z nás se s těmito stroji setkává jako se stroji elektrickými. Běžně se ale toto nářadí využívá např. ve fabrikách vyrábějících auta a všude tam, kde je častá potřeba broušení, vrtání, šroubování a výše uvedených funkcí a plně nahrazuje nářadí elektrické. Na první pohled se nijak od elektrického nářadí neliší (Obr. 4-1), princip jejich činnosti je však jiný, pohonem je motor na stlačený vzduch.



Obr. 4-1 [4]: Pneumatické nářadí

4.1.1 Pneumatické motory

Hlavní výhodou pneumatických motorů je vysoký poměr výkonu a hmotnosti. Pneumatické motory nabízí srovnatelný výkon při zástavbě pouze 1/5 rozměru nebo 1/3 konstrukční velikosti elektromotoru [5]. Porovnání velikosti elektromotoru a motoru na stlačený vzduch stejných výkonů je na Obr. 4-2. Nízká hmotnost je důležitá především u ručního náradí, neboť při dlouhodobém užívání je znatelná každá úspora jeho hmotnosti.

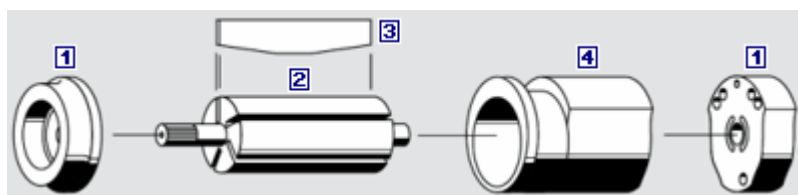


Obr. 4-2 [4]. Pneumatický motor a elektromotor stejných výkonů

Firma Deprag vyrábějící pneumatická náradí využívá jako pohon tři typy pneumatickým motorů: pneumatické lamelové motory, zubové motory a turbíny.

Pneumatické lamelové motory

Všechny lamelové motory se v podstatě skládají z rotoru, který je umístěn ve statoru mimo střed (excentricky). V drážkách rotoru jsou volně umístěny lamely a protože je rotor umístěn vzhledem ke statoru excentricky, lamely se vysouvají ke stěně statoru a vytvářejí pracovní komory, jejichž objem se zvětšuje ve směru otáčení. Expanzí stlačeného vzduchu v komorách se mění tlaková energie vzduchu na kinetickou energii otáčivého pohybu rotoru. Struktura lamelového motoru je vidět na Obr. 4-3: 1-čelo, 2-rotor, 3-lamela, 4-stator(rotorový válec)



Obr. 4-3 [4]: Lamelový motor

Tento typ motoru představuje nejpestřejší nabídku. Používá se pro pohon ručního náradí jako jsou brusky, frézky a vrtačky. Dále jsou nabízeny motory s výkonem stovek Wattů a také firma Deprag nabízí řadu výkonnějších motorů v rozsahu 1,6 – 18 kW.

Zubové motory

Zubové motory se skládají ze dvou ozubených kol, které se otáčejí v tělese krytu motoru tak, že se ho nedotýkají, takže není potřeba mazání. Jedno kolo je propojeno s hnací hřídelí, druhé vytváří točivý moment. Síla je vyvíjena na dvou stranách, na jedné ve směru otáčení a na druhé proti směru otáčení. Odpadní vzduch se hromadí v komorách mezi stranou ozubeného kola a stěnou tělesa, poté je vyveden k výfukové straně a vzniká rotační pohyb. Vyobrazení motoru je na Obr. 4-4: 1-těsnící deska, 2-ozubená kola, 3-jehlový váleček ložiska, 4-kryt motoru



Obr. 4-4 [4]: Zubový motor

Tab. 4-1: Porovnání pneumatických a elektrických pohonů

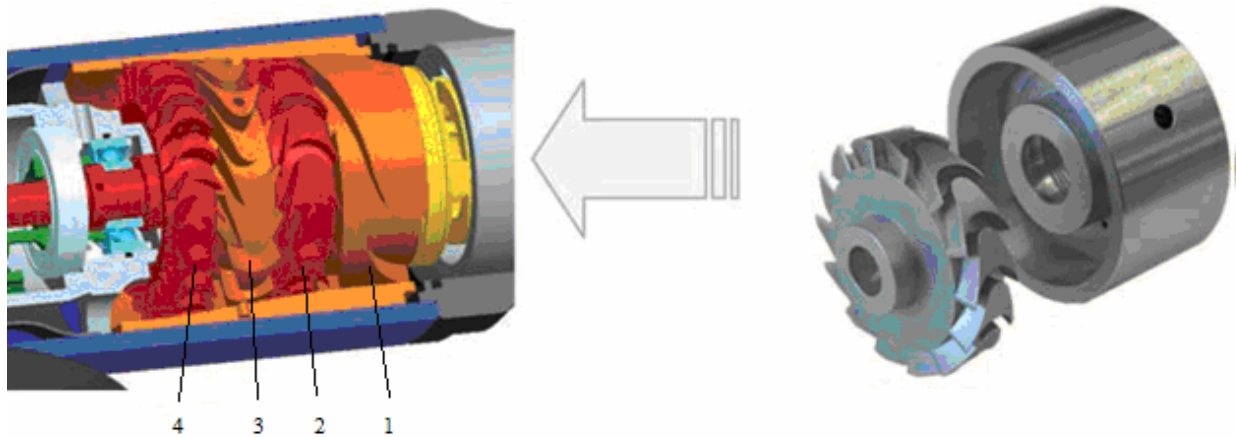
Pneumatické motory		Elektromotory	
Výhody	Nevýhody	Výhody	Nevýhody
Zatížení bez poškození až do úplného zastavení	Celková spotřeba energie	Náklady	Možnost poškození při přetížení
Nízké náklady na instalaci	Hlučnost	Celková spotřeba energie	Riziko z hlediska bezpečnosti elektrické instalace
Jednoduchá údržba	Častá údržba	Nízká hlučnost	Vysoká hmotnost a velké rozměry
Nevýbušné		Údržba	
Bezpečný provoz v různém prostředí -prach, voda, plyn		Regulovatelnost (nastavitelnost)	
Nízká hmotnost a malá velikost			
Výkon			
Sterilní			
Růst točivého momentu při zvětšujícím se zatížení			

Turbíny

Přeměna tlakové energie na energii kinetickou se děje v parciálním ostříku, tedy tlak vzduchu poklesne a vzduch se urychlí na nadzvukovou rychlost. Většina kinetické energie je přeměněna na rotační pohyb v prvním oběžném kole. Pevné rozváděcí kolo mění směr proudění vzduchu, aby vzduch svou energií působil ve směru otáčení prvního oběžného kola v druhém oběžném kole, kde je přeměněn zbytek energie. Na rozdíl od lamelových motorů je možný provoz bez oleje, neboť oproti lamelovému motoru nedochází v pracovním prostoru k žádnému tření. Popis pneumatického turbínového pohonu je na Obr. 4-5: 1-parciální ostřík, 2-první oběžné kolo, 3-rozváděcí kolo, 4-druhé oběžné kolo.

Díky provozu vzduchových turbín bez oleje, nedochází k absolutně žádnému opotřebení. Oproti lamelovým motorům využívají lépe energii stlačeného vzduchu a tím klesne jeho spotřeba. Turbíny se například využívají ve výkonových bruskách, což zaručuje nízkou hmotnost. Při

výkonu 2,2 kW váží bruska 1,8 kg, zatímco elektrické brusky mají při stejném výkonu asi 5,7 kg [4]



Obr. 4-5 [4]. Turbínový motor

4.2 Auto na stlačený vzduch

Když před několika lety přišel francouzský vynálezce Guy Négre s konceptem automobilu, poháněného stlačeným vzduchem, zdála se tato myšlenka jako sci-fi, a po mediálním rozruchu kolem (úspěšných) testů prototypu opět na čas vše utichlo. V závěru května přišla zpráva: unikátní auto na vzduch bude pod názvem Air Car vyrábět indická automobilka Tata Motors [6]. Takhle byl citován tento výrok na internetových stránkách zdroje [6] v roce 2007.

Auto na stlačený vzduch se na silnici mělo objevit už před léty, jenže uvedení na trh se stále oddaluje. Tak například podle zdroje [10] měly v roce 2002 jezdit vozidla na stlačený vzduch v mexické metropoli jako taxíky, nakonec z toho sešlo. Dnes už je rok 2010 a zatím stále nic. Objevují se však zprávy, že zavedení těchto aut na trh by mělo být již v blízké budoucnosti, ať už firmou MDI (Motor development international), indickou automobilkou Tata Motors nebo nově firmou ZPM – Zero Pollution Motors, která plánuje, že kolem roku 2010 bude vyrábět vozidla s technologií CAT (Compress air technology) v některých částech Ameriky [10].

4.2.1 Princip funkce

„Palivo“, stlačený vzduch, je umístěno v nádobách z termoplastické vložky potažené uhlíkovým vláknem (Obr. 4-6), které jsou umístěny na podvozku auta, a které pojmu 90 m³ vzduchu stlačeného na 300 bar (30 MPa). Rozpínání stlačeného vzduchu, který vstupuje do uzavřené oblasti válce, tlačí na píst a způsobuje pohyb vozidla. Princip je tedy založen na stlačování vzduchu – kompresi, což způsobuje jeho zahřívání a na rozpínání vzduchu – expanzi, to způsobuje ochlazování vzduchu.

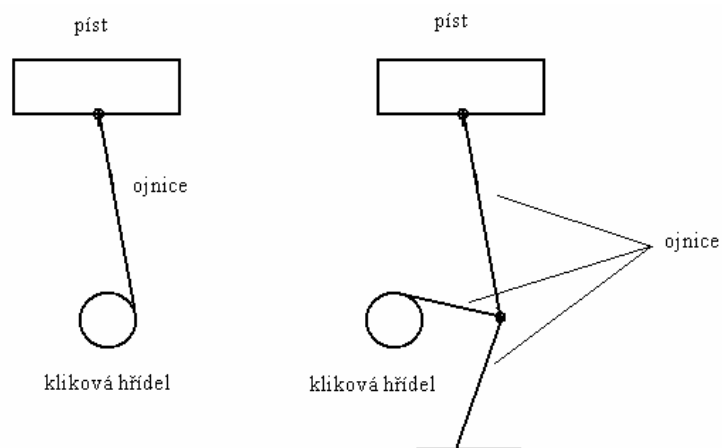


Obr. 4-6 [8]: Nádrž na stlačený vzduch

4.2.2 Motor na stlačený vzduch

Jedná se o pístový motor, který dokáže velmi efektivně přeměnit energii stlačeného vzduchu na mechanickou rotační energii. Označuje se také jako MDI motor, podle firmy MDI (Motor development international) založenou Guy Négrem roku 1991.

MDI motor v sobě slučuje různé inovativní a neobvyklé systémy, nejen základní myšlenku energie ze stlačeného vzduchu, ale i použité materiály a technický design. Tělo motoru je především z lehkého hliníku. Použití tohoto materiálu je umožněno díky tomu, že v motoru nedochází ke spalování, a proto nepotřebuje masivní konstrukci jako spalovací motory. Oproti spalovacím motorům neznečišťuje ovzduší, ba naopak čistí ho. Vzduch nasávaný motorem prochází uhlíkovými filtry, aby se zbavil nečistot, takže z motoru vychází čistý vzduch o teplotě až -30°C .



Obr. 4-7: Klikové mechanismy

Co se designu týče, je tu další výjimečný faktor, systém přídavných ojnic, které dovolují pístu zastavit se na určitou dobu, když dosáhne konce cyklu (píst setrvává v nejvyšší poloze, zatímco hřídel se otočí o 70°), což umožňuje vytvoření expanzní komory stálého objemu. Faktem je, že systém může být adaptován na konvenční benzínový motor. Na Obr. 4-7 je ukázka konvenčního klikového mechanismu (vlevo) a klikového mechanismu se systémem přídavných ojnic (vpravo).

Pracovní fáze MDI motoru

Pro popis jednotlivých fází motoru na stlačený vzduch poslouží Obr. 4-8

1. Fáze sání a komprese

První píst (1) nasaje vzduch z atmosféry a poté jej stlačuje na tlak 20 bar (2 MPa), přičemž se zahřívá na 400 °C. Vzduch se pak pohybuje do kulové komory (2).

2. Fáze vstřikování vzduchu

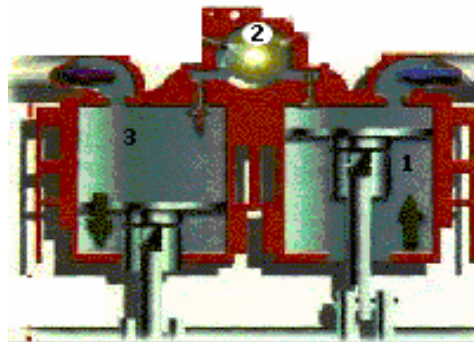
V okamžiku kdy se první píst zastaví, malé množství stlačeného vzduchu pokojové teploty je z nádrže izobaricky vstříknuto do kulové komory (2)

3. Fáze expanze

V této části se uplatňuje právě systém přídavných ojnic, který přidrží první píst po určitou dobu, po kterou má komora stálý objem (nejmenší). Prudké ochlazení plynu v kulové komoře způsobuje jeho rozpínání, takže směs venkovního a stlačeného vzduchu tlačí na píst (3), který dává vozidlu energii.

4. Fáze výfuku

Ještě než se otevře ventil pro vyfouknutí „spáleného“ ochlazeného vzduchu (0 °C až -30 °C), vysokorychlostní závěrka na velmi krátkou dobu spojí komoru, kde proběhla expanze (komoru s chladným vzduchem) (3) s první komorou, kde probíhá komprese (1), a je tam vstříknut. Protože okolní teplota začne ohřívat vzduch v první komoře (po expanzi) ochlazený vstříknutý vzduch způsobí expanzi vzduchu a píst (1) je tlačěn nahoru.



Obr. 4-8 [7]: K vysvětlení činnosti motoru

Původně byly v motoru dva písty každý objemu 566 cm³. V roce 2005 firma představila zdokonalenou konstrukci motoru, čtyřválcový motor 41P01. Ke každému hlavnímu pístu je připojen ještě jeden malý (Obr.4-9). Základem jsou tedy dva písty jeden malý, připojený ke klikové hřídeli konvenčním způsobem, a jeden velký připojený k hřídeli systémem přídavných ojnic. Díky nové konstrukci se vylepšuje zpětné plnění nádrží a energie stlačeného vzduchu je lépe využita než v předešlém typu motoru. Nový je také koncept, který kombinuje motor na vzduch se spalovacím motorem o spotřebě necelé dva litry na 100 km. Firma MDI nabízí dva základní typy motorů na stlačený vzduch s novou konstrukcí:

1) Motor využívající pouze jednoho druhu energie (Stlačený vzduchu)

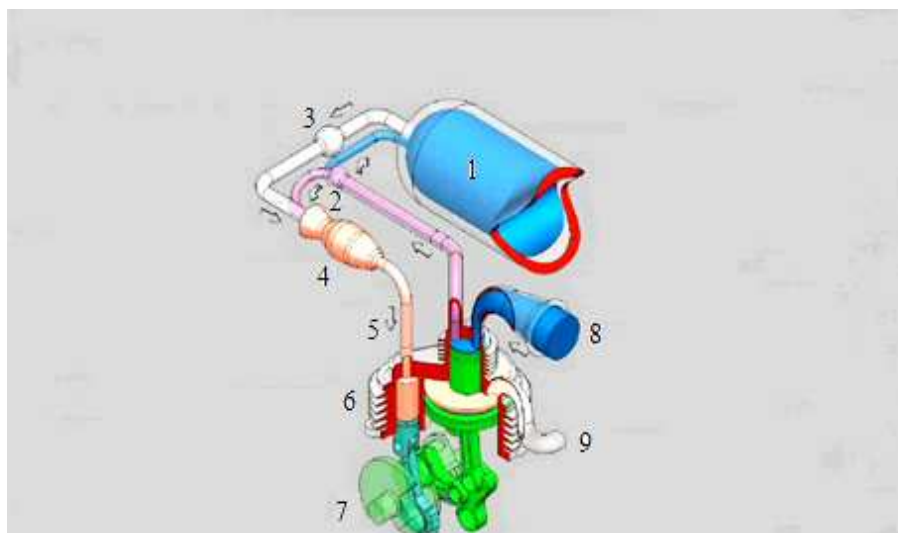
Funkce motoru je založena na stejném principu jako u staršího modelu akorát vzduch expanduje v obou pístech.

2) Motor využívající dvojího druhu energie (Stlačený vzduch + energeticky výpomocná látka)

Motor je založen se stejném základě jako pokročilý motor na stlačený vzduch akorát je přidána spalovací komora (nebo tepelný výměník). Palivo se nespaluje uvnitř motoru jako ve spalovacích motorech, ale dochází k němu mimo motor ve spalovací komoře, kde se ohřívá stlačený vzduch předtím než expanduje v pístech. Spalování je průběžné a nesouvisí s cykly motoru. Tyto motory jsou zcela „multi-palivové“ a mají nebývale malé hodnoty spotřeby.

Práce v multi-palivovém režimu

Obr. 4-9 poslouží k popsání práce motoru v multi-palivovém režimu (1-Nádrž se stlačeným vzduchem, 2-Ventil 1, 3-Ventil 2, 4-Spalovací komora, 5-Ventil 3, 6- Aktivní komora, 7-kliková hřídel 8-Nasávání, 9-Výfuk). Při otevření přívodního ventilu (5), stlačený vzduch na 30 bar (3 MPa) tlačí na menší z obou pístů po celou dobu až do jeho dolní úvrati, zatímco větší píst zůstává dále v horní části dvou pístových komor (díky systému přidavných ojnic). Sací ventil je potom zavřen a stlačený vzduch se nachází v horní části prvního pístu a aktivní komoře společné pro oba písty. Nyní se rozpíná a tlačí na druhý, větší píst. Když je píst v dolní úvrati tlak je asi 1,2 bar (120 kPa) a výfuk vzduchu do atmosféry se děje pohybem většího pístu směrem nahoru.



Obr. 4-9 [12]: Funkce MDI motor

Větší píst je také spojen s malým nástavcem na vrcholu, který funguje jako píst na stlačením vzduchu používaného pro výrobu počáteční části stlačeného vzduchu, který pak expanduje ohříváním mimo motor. Když je větší píst v dolní úvrati tak je vzduch „vdechnut“ a v horní úvrati většího pístu, píst na stlačením nasátého vzduchu tlačí nasátý vzduch na 30 barů a tlačí ho přes spalovací komoru, kde bude vyhříván při konstantním tlaku. Toto teplo přivedené vzduchu při konstantním tlaku způsobuje expanzi stlačeného vzduchu, ještě než bude aplikován na horní straně menšího pístu.

Při multi-palivovém režimu může motor pracovat ve čtyřech módech:

a) Využití pouze stlačeného vzduchu

Do rychlosti 50 km/h by auto jezdilo pouze na stlačený vzduch uložený v nádržích. Neboť do této rychlosti je nejmenší spotřeba stlačeného vzduchu vzhledem k najetým kilometrům (tedy dojezd je největší).

b) Jednoduchá práce se dvěma energetickými látkami

Stlačený vzduch z nádrží je přehříván palivem ve spalovací komoře ještě před tím než je zaveden do motoru.

c) Nezávislá práce dvou energetických látek

Nad 50 km/h se stlačený vzduch v nádrží dále nevyužívá. Motor vyrábí stlačený vzduch o pracovním tlaku, který je pak zahříván ve spalovací komoře ještě před tím než expanduje v pracovních válkách.

d) Práce dvou energetických látek se zpětným plněním nádrží

Část stlačeného vzduchu vyprodukovaného motorem je použita k pohybu vozidla jako v módu c) a zbytkem se zpětně plní nádrže.

4.2.3 Způsoby tankování

a) V domácnosti

Natankování stlačeného vzduchu na 30 MPa se může uskutečnit doma, neboť součástí vybavení je motor-alternátor. V době jízdy auta využívá energii při zpomalování a brzdění. Když je potřeba doplnit „palivo“, je auto vybaveno zdířkou na 230 V pro připojení do sítě a motor-alternátor se využívá jako pohon motoru na stlačený vzduch, který funguje jako kompresor a doplňuje zásoby stlačeného vzduchu. Doba naplnění by se lišila podle typu vozidla od 1h 30 min až po 4h 30 min.

b) Kompresní stanice

Vzduch by byl stlačen v nádržích na kompresních stanicích (benzínkách) pomocí vícestupňových kompresorů. Nádrž auta by se poté naplnila ze zásobníků stlačeného vzduchu na kompresní stanici. Doba naplnění cca 3 minuty (Obr. 4-10).



Obr. 4-10 [12]: Plnění na kompresní stanici

4.2.4 Neobvyklé technologie

Jak už bylo napsáno v předešlých kapitolách, díky tomu že v motoru nedochází ke spalování, ale k pouhému stlačování a rozpínání vzduchu, tělo motoru je především z hliníku a novou je také technologie přidavných (vedlejších) ojníc. Karoserie automobilu je lepená a je vytvořena ze skelných vláken což výrazně snižuje hmotnost auta. Vozidlo nemá obvykle ukazatele veličin (rychlost, otáčky, množství paliva atd..) jaké najdeme v běžných autech, ale má palubový počítač, který ukazuje všechny potřebné údaje. Jiný je také systém bezpečnostních pásů a systém elektronické instalace. Množství kabelů je zredukováno pouze na jediný. Využívá se malého

rádiového vysílače (velikosti kroužku na klíče) jehož signál je přijímán a transformován mikropřijímači v každém elektronickém zařízení auta

4.2.5 Technické parametry vozidla

Na Obr. 4-11 je ukázka jednoho z aut, které by měla v nejbližší době nabízet firma MDI k prodeji. Auto se jmenuje MiniFlowAir a podle toho co uvádí firma MDI na svých stránkách, tak by mělo být k dostání po uvedení na trh jak s motorem na stlačený vzduch tak i v provedení s duálním motorem. Technické parametry jsou uvedeny podle informací na oficiálních stránkách MDI v Tab. 4-2.



Obr. 4-11 [11]: Auto na stlačený vzduch

Tab. 4-2: Technické parametry vozidla MiniFlowAir

Technické parametry	jednotka	motor na stlačený vzduch	duální motor
Výkon	kW	18,4	36,8
Maximální rychlost	km/h	110	130
Dojezd ve městě	km	180	50
Dojezd na dálnici	km	0	1500
Spotřeba paliva	l	0	1,8
Množství emisí CO ₂	g/km	0	35
Odhadovaná cena	euro	9200	

4.3 CAES systémy

Základní myšlenkou CAES (Compressed Air Energy Storage - Skladování energie stlačením vzduchu) je společný přenos mimošpičkové energie do období nejvyšší poptávky, za použití pouhého zlomku zemního plynu nebo ropy, které by byly použity ve standardních špičkových strojích jako jsou plynové turbíny.

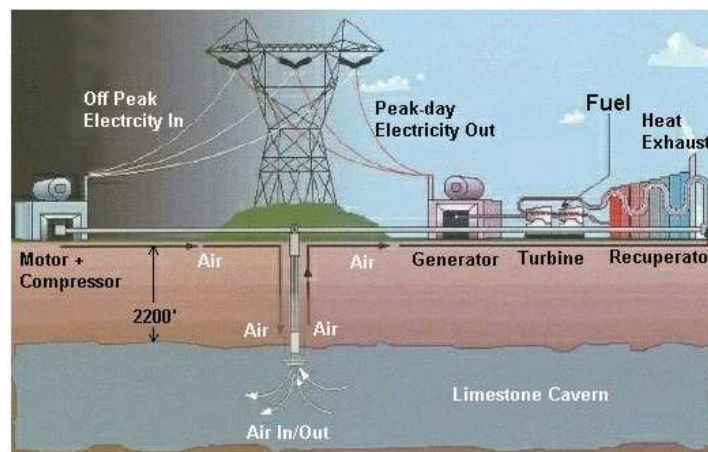
CAES elektrárny (u nás se také používá pojem tlakovzdušné akumulární elektrárny) jsou tedy variantou elektráren s plynovou turbínou.

Při pohonu alternátoru plynovou turbínou se až 2/3 energie uvolněné spalováním plynu spotřebovávají k pohonu kompresoru a 1/3 se mění v energii elektrickou. Proto bylo už před několika lety navrženo oddělit mechanicky i časově provoz turbíny a kompresoru, aby se v případě potřeby mohl pro výrobu elektřiny využít plný výkon turbíny bez zátěže kompresorem, jehož funkci může po dobu několika hodin nahrazovat stlačený vzduch odebíraný z podzemního zásobníku. Špičková plynová turbína v tomto typu elektrárny tedy spotřebuje méně než 40% paliva (např. zemní plyn) oproti běžnému oběhu s plynovou turbínou.

Kromě vyvažování špiček je jednou z hlavních aplikací možné využití CAES pro skladování energie z větrných elektráren v dobách zkráceného přenosu a dodávání energie do sítě během dob výpadků větru. Takovéto aplikace vyvažující kolísání větru vyžadují nejen velké skladovací objemy energie, dostatečně dlouhou dobu poskytování energie, ale také rychlou odezvu na výstup (krátkou dobu najetí na plný výkon) a možnosti umístění ve větru-bohatých regionech.

4.3.1 Princip funkce

V době přebytku elektrické energie, tedy v nočních hodinách, se levná elektrická energie využije pro pohon kompresoru. Vícestupňovými kompresory je nasátý atmosférický vzduch adiabaticky stlačen a uložen pod tlakem (5-7,5 MPa) v podzemní jeskyni. Obvykle se však vzduch ochladí během komprese, aby se zabránilo přehřátí buď vzduchotechnických zařízení nebo zdi kaverny. Následně, kdy poptávka převyšuje nabídku energie, vyrobené alternátory v síti, je vzduch vypouštěn z jeskyně a přivádí se do spalovací komory kde se ohřeje spalováním paliva. Směs vzduchu a spalin poté expanduje ve spalovací turbíně, která pohání alternátor a ten poskytuje špičkovou energii, kterou dodává v době potřeby do sítě. Problematika oběhu plynových a spalovacích turbín je podrobněji rozebrána v [2] (str.162-174).



Obr. 4-12 [15]: Princip funkce CAES

Překlad k Obr. 4-12 [15]: Off-Peak Electricity In – Mimošpičkový odběr elektřiny, Peak-day Electricity Out – Dodávka elektřiny v době špičky, Motor+Compressor – Motor+kompresor, Air – Vzduch, Air In/Out – Vstup/Výstup vzduchu, Limestone Cavern – Vápencová kaverna, Generátor – Generátor, Turbine – Turbína, Recuperator – Výměník tepla (Rekuperátor), Heat Exhaust – Spaliny, Fuel – Palivo

Asi každého napadne proč je třeba před expanzí v turbíně vzduch přehřívat palivem. Vše plyne z povahy energie, kterou přeměňujeme. Jelikož entalpie je dána součtem vnitřní a vnější energie (tlakové) rovnice (3.9), je tedy možnost přeměny omezena stavem okolí, tedy tlakem p_0 (vnější

energie) a teplotou T_0 (vnitřní energie) okolí. Tudíž můžeme využít jen část celkové energie obsažené ve stlačeném vzduchu tzv. exergii. Výkon turbíny můžeme určit ze vztahu

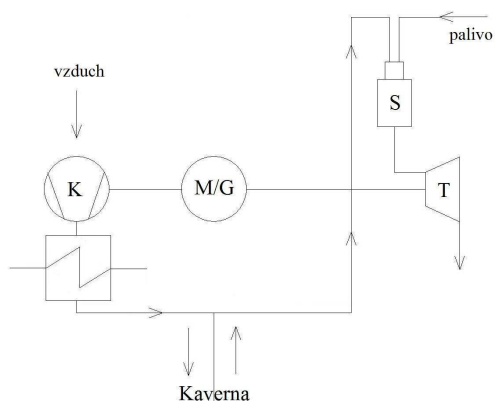
$$P = Q_m \cdot (i_1 - i_2), \quad (4.1)$$

kde Q_m je hmotnostní průtok vzduchu, i_1 je vstupní entalpie (před turbínou) a i_2 výstupní entalpie (za turbínou)

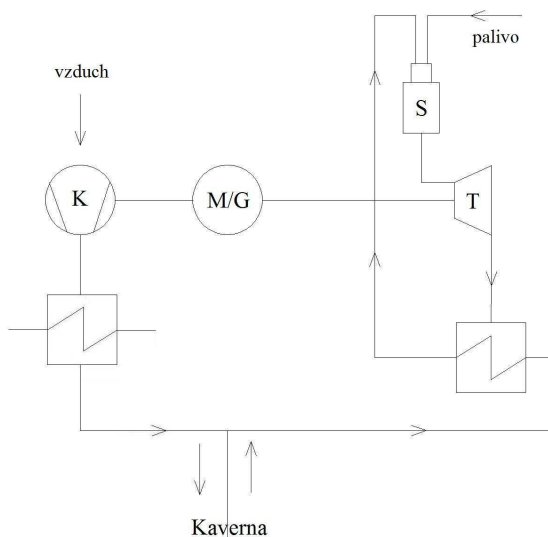
Jelikož je přeměna entalpie omezena stavem okolí, tak při expanzi vzduchu o teplotě stěny nádrže by byl výkon turbíny malý. Proto by bylo zapotřebí mnohem většího průtoku vzduchu, aby se dosáhlo stejného výkonu turbíny, jak plyne z rovnice (4.1). Tím pádem by bylo potřeba vynaložit více energie na pohon kompresorů, čímž by se snižovala ekonomičnost provozu. Kromě toho, při nepřihřívání vzduchu palivem, by nízké teploty na výstupu turbíny mohly představovat značné riziko námrazy na ostří vzhledem k velkému proudění vzduchu přes turbínu, i přes malou specifickou vlhkost vzduchu při vysokém tlaku. Je zde také možnost, že materiály turbíny a těsnění by se při nízkých teplotách mohly stát křehkými. Vyjdeme-li ze vztahu (3.26) tak po menší úpravě můžeme vypočítat výstupní teplotu vzduchu při expanzi z tlaku 4 MPa a teplotě 20 °C. Teplota se bude pohybovat kolem – 171 °C.

4.3.2 Základní pracovní oběhy

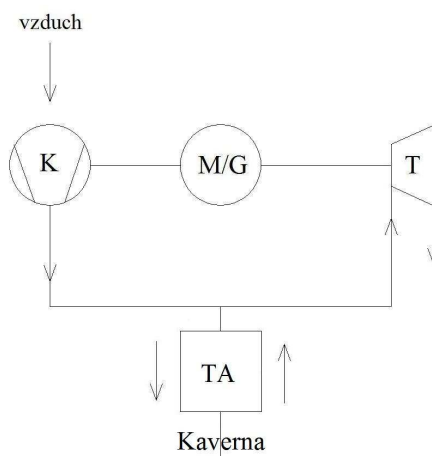
Oběhy lze rozdělit podle mnoha kritérií. Dole na obrázcích jsou vyobrazeny oběhy podle regenerace tepla. Jedná se o oběhy otevřené, neboť nasátá látka z atmosféry (vzduch) je po řetězci termodynamických pochodů vypouštěna zpět do atmosféry. Na Obr. 4-13 je vyobrazen nejjednodušší oběh CAES elektrárny. Kompresor (K) poháněný motorgenerátorem (M/G), pracujícím v motorovém režimu, nasává vzduch z okolní atmosféry a stlačuje ho izotermicky do podzemní kaverny. Teplo odvedené stlačenému vzduchu se dále nijak nevyužije. V době potřeby je stlačený vzduch pod stálým tlakem vypouštěn do spalovací komory (S), kde je spalováno palivo a společně ve směsi se spaliny expanduje v turbíně (T), která pak pohání motorgenerátor (M/G) pracující v režimu generátoru. Vysoká teplota směsi za turbínou je vypouštěna bez využití do okolí. Oběh na Obr. 4-14 se odlišuje od přecházejícího v tom, že je za turbínou zařazen rekuperační výměník tepla využívající energii směsi za turbínou k ohřátí stlačeného vzduchu vstupujícího do spalovací komory. Tím se zvyšuje účinnost oběhu a zmenšuje se spotřeba paliva. Oběh na Obr. 4-15 se liší od dvou předcházejících hned v několika věcech. Komprese vzduchu probíhá adiabaticky, takže teplo předané vzduchu během stlačování se nevypouští do atmosféry (chybí chladič), ale skladuje se ve vysokoteplotních akumulátorech tepla (TA), a v době potřeby se využije k ohřátí stlačeného vzduchu před tím, než vstoupí do plynové turbíny. Přihříváním stlačeného vzduchu z vysokoteplotních akumulátorů tepla je energie stlačeného vzduchu dostačující na to, aby byl možný provoz bez spalování paliva (chybí spalovací komora), takže v plynové turbíně expanduje pouze vzduch. Na rozdíl od předcházejících oběhů nebyl tento oběh uveden ještě do praxe a je uváděn pod zkratkou AA-CAES (advanced adiabatic – compressed air energy storage). Kromě AA-CAES, bylo EPRI (Electric power research institut) vyvinuto několik pokročilých CAES oběhů. Některé potřebují méně paliva než stávající CAES elektrárny (Huntorf, McIntosh). U těchto oběhů druhé generace CAES se u většiny z nich využívá nových vývojových technologií plynových a paroplynových cyklů. Podrobněji o nových typech CAES oběhů pojednává pramen [23].



Obr. 4-13: Oběh CAES



Obr. 4-14: Oběh CAES



Obr. 4-15: Oběh AA-CAES

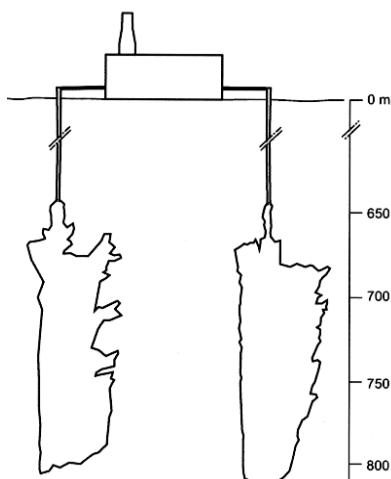
4.3.3 Geologická podloží pro CAES

Podloží vhodná pro akumulční reservoáry CAES můžou být rozdělena do tří kategorií: solná skála (sůl), tvrdá skála (kámen), porézní (pórovitá) skála

Sůl

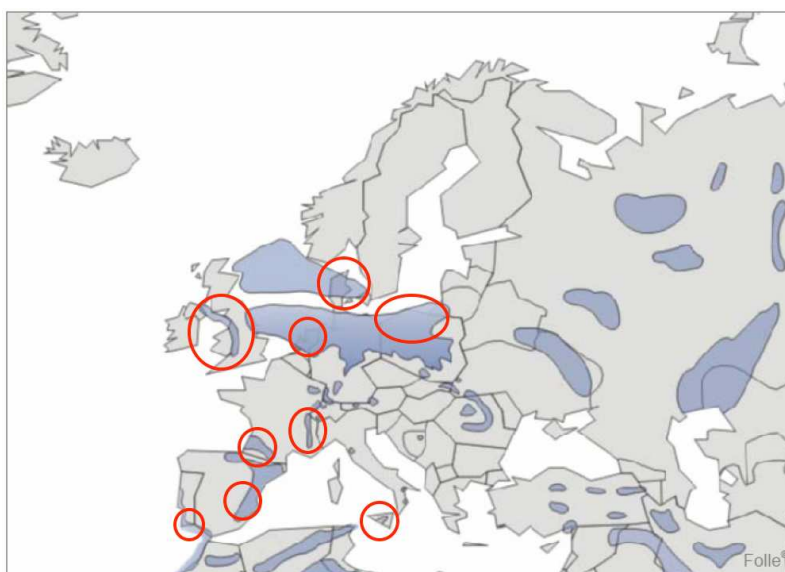
Dvě CAES elektrárny, které v současné době pracují používají jako zásobníky stlačeného vzduchu dutiny, vzniklé rozpuštěním solných hornin. V mnoha ohledech je solný podklad nejvhodnější pro rozvoj a provoz CAES ze všech možných geologických podloží. Technika rozpouštění skály může poskytnout spolehlivou, nízkonákladovou cestu pro rozvoj skladovacích objemů potřebných velikostí při skladovacích kapitálových nákladech ~ \$ 2,00 za kWh, je-li k dispozici dostatečný přísun čerstvé vody a jestliže následující slaná voda lze snadno zlikvidovat. Navíc, vzhledem k elasto-plastickým vlastnostem soli představují akumulční nádrže vytvořené rozpouštěním soli minimální riziko úniku vzduchu[20]. Zásobníky těžené ze solných podkladů

bývají vysoké a úzké s minimální stropní klenbou jak je tomu u obou pracujících CAES zařízení (Obr. 4-16).



Obr. 4-16 [20]: Solné kaverny CAES Huntorf

Na Obr.-17 je vyobrazení lokalit s tímto typem podloží ve větru bohatých oblastech. Červená kolečka označují oblasti, které jsou zkoumány z hlediska možné výstavby CAES zařízení.



Obr.4-17 [20]: Výskyt solných podloží ve větru bohatých oblastech v Evropě.

Kámen

Přestože je možné pro CAES vytvořit v kamenitém podloží rezervoár, náklady na těžbu nových nádrží jsou často relativně vysoké (\$ 30/kWh). V některých případech může být použito stávajících dolů. Náklady pak budou přibližně \$ 10/kWh [20].

Podrobné hodnocení stability skály, těsnosti a energetických ztrát v zásobníku z pevné skály byly provedeny v Japonsku. Dále bylo testováno tohoto podloží, na tvorbu zásobníků s konstantním tlakem (kapitola 4.3.4)

Protože náklady na vývoj zásobníků stlačeného vzduchu na tomto typu podloží jsou v současné době vysoké ve srovnání s jinými geologickými podložími, je nepravděpodobné, že by se využívalo pro CAES ve velkém měřítku. Přestože budoucí vývoj v oblasti těžební techniky může snížit náklady na využití tohoto geologického podloží, zdá se, že jiná geologická podloží mohou v současné době nabídnout lepší příležitost k rozvoji CAES.

Tohoto typu podloží jako zásobníku by se mělo využívat u navrhovaného CAES zařízení v americkém městě Norton ve státě Ohio, které bude využívat jako rezervoár vápencový lom.

Porézní skála

Zvláště vhodné pro CAES zařízení jsou porézní skalní útvary, jako jsou solné akvifery (podzemní prostory nasáklé vodou). Porézní nádrže mají potenciál být nejméně nákladnou skladovací možností pro velkoobjemové CAES s předpokládanými náklady \$ 0.11/kWh [20]. Přes nízké náklady na vytvoření zásobníku v tomto typu podloží, vyžaduje využití akviferů pro CAES rozsáhlou studii ze všech možných stran ke stanovení jejich vhodnosti.

25 MW CAES testovací zařízení na porézním podloží bylo v provozu několik let v Itálii v městě Sesta. I když testy byly úspěšné, geologické události narušily místo, což vedlo k uzavření zařízení. Vhodnost tohoto typu podloží je testována v USA. Výstavba prvního komerčního CAES zařízení na porézním podloží se děje ve státě Iowa v USA.

4.3.4 Zásobníky stlačeného vzduchu

Jak z hlediska technického tak i ekonomického jsou pro zásobníky stlačeného vzduchu, vhodné podzemní kaverny. Výroba povrchových zásobníků je technicky a ekonomicky příliš nákladná.

Zásobníky s měnícím se tlakem stlačeného vzduchu (solné podloží)

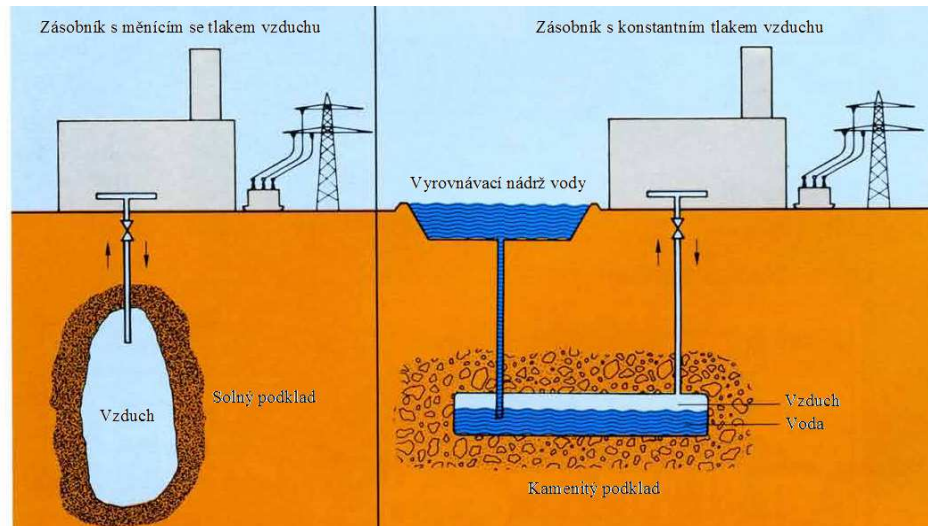
Ekonomickým řešením pro výstavbu kaverny jako zásobníku stlačeného vzduchu s proměnným tlakem je proces vyplavování (rozpuštění solné skály), který se aplikuje na podzemním solném usazeném podkladu, jak už bylo řečeno výše.

Tlak vzduchu se mění během plnění i během vyprazdňování. Pokud je turbína poháněna stlačeným vzduchem z tohoto typu zásobníku, bude se její výkon snižovat s vyprazdňováním. Protože tato situace není přijatelná pro dodávku elektrické energie do sítě, musí být turbína spuštěna s konstantní tlakem na vstupu nezávisle na tlaku v zásobníku. Proto se tlak vypouštěný ze zásobníku redukuje tzv. škrcením před vstupem do turbíny, což ovšem způsobuje ztráty. Po poklesu tlaku stlačeného vzduchu v zásobníku na hodnotu tlaku potřebnou na vstupu do turbíny již provoz dále není možný. Objem zásobníku se pohybuje až kolem 500000 m³

Zásobníky s konstantním tlakem stlačeného vzduchu

Vodní vyrovnávací nádrž nad zemí, udržuje konstantní tlak v zásobníku (Obr. 4-18). Požadovaný objem zásobníku se stálým tlakem je podstatně menší než u zásobníku s proměnným tlakem (cca 1/4 objemu zásobníku typu a)), protože téměř všechno množství vzduchu může být použito pro výrobu užitečné práce. Nevznikají ztráty škrcením a změny ve stlačeném vzduchu, které se vyskytují u zásobníku s měnícím se tlakem.

Náklady na výstavbu tohoto typu zásobníku pro dodávku stejného výkonu, jako při použití předešlého typu zásobníku jsou téměř stejné. Zatím se používají zásobníky s proměnným tlakem stlačeného vzduchu.



Obr. 4-18 [18]: Zásobníky stlačeného vzduchu

4.3.5 CAES elektrárny

Elektrárna Huntorf

První CAES elektrárna na světě, která byla uvedena do provozu roku 1978 v německém Huntorfu poblíž Brém. Tato 290 MW elektrárna byla postavena, aby poskytovala energii při úplných výpadech sítě jaderným elektrárnám poblíž Severního moře (black-start funkce) a aby poskytovala levnou špičkovou energii. Původně byla elektrárna navržena se skladovacím objemem, který zajišťoval dodávku plného výkonu po dobu dvou hodin. Postupně, byla elektrárna provozně upravena, aby poskytovala výkon 290 MW po dobu třech hodin a čím dál víc

Getriebe – spojky

Hochdruckverdichter – Vysokotlaký kompresor

Niederdruckverdichter – Nízkotlaký kompresor

Luftkühler – Chladič stlačovaného vzduchu

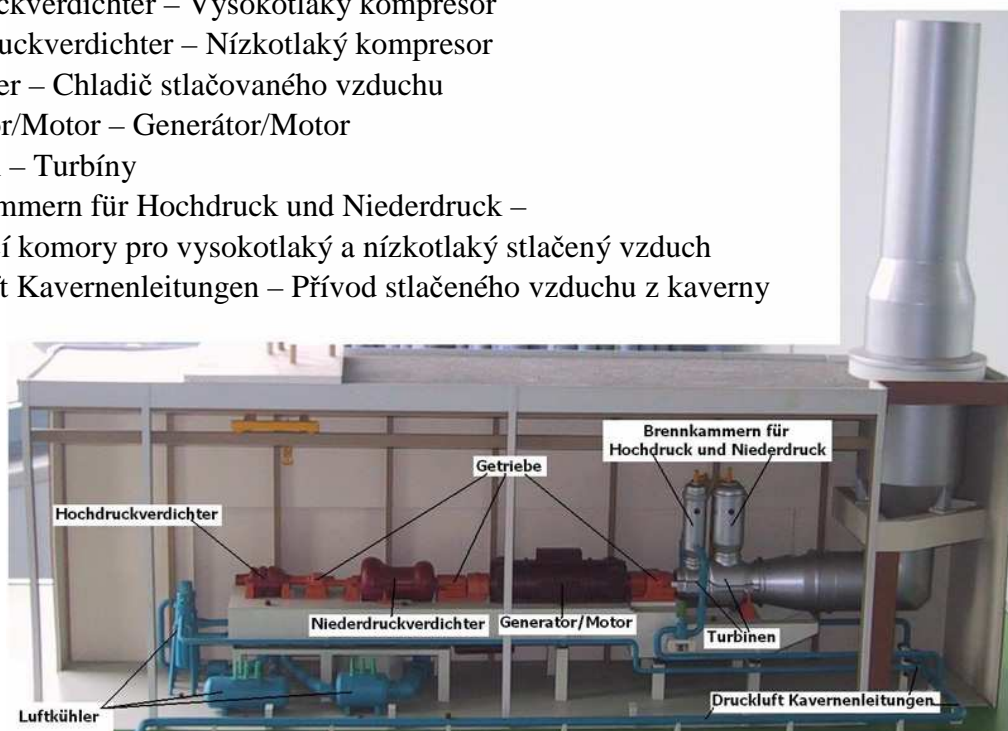
Generátor/Motor – Generátor/Motor

Turbinen – Turbíny

Brennkammern für Hochdruck und Niederdruck –

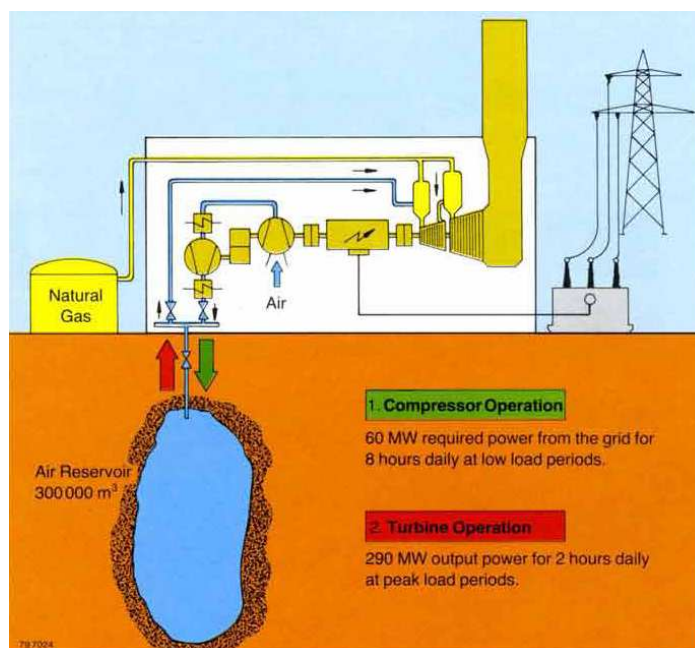
Spalovací komory pro vysokotlaký a nízkotlaký stlačený vzduch

Druckluft Kavernenleitungen – Přívod stlačeného vzduchu z kaverny



Obr. 4-19 [18]: Strojní uspořádání

byla používána ke kompenzaci výkyvů dodávek elektrické energie z větrných elektráren umístěných na severu Německa [20].



Obr. 4-20 [18]: Náznornější schéma uspořádání CAES Huntorf

Elektrárna má nejjednodušší oběh (Obr. 4-13), bez rekuperátoru, takže vysoká teplota spalin za turbínou je nevyužita, což se projeví na celkové účinnosti akumulace elektrické energie, která je asi 42%. Rekuperátor nebyl zařazen kvůli požadavku na co nejrychlejší dobu najetí. Obr. 4-19 ukazuje strojní upořádání. Základní informace jsou shrnuty v Tab. 4-3 a Tab. 4-4.

Tab. 4-3: Základní parametry turbíny a kompresorů

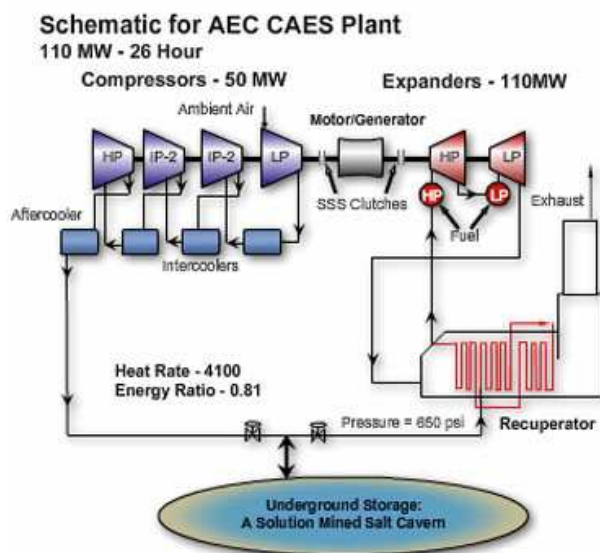
Spalovací turbína		Kompresory	
Výkon	290 MW	Počet kompresorů	2
Otáčky	3000 min ⁻¹	Maximální výkon	60 MW
Spotřeba vzduchu	417 kg/s	Typ NT kompresoru	axiální
Vstupní poměry VT turbíny	4,2 MPa/550 °C	otáčky	3000 min ⁻¹
Vstupní poměry NT turbíny	1,1 MPa/825 °C	Typ VT kompresoru	odstředivý
Měrná spotřeba tepla	5800 kJ/kWh	otáčky	7622 min ⁻¹
Palivo	Zemní plyn	Parametry sání	10 °C/1013 hPa
Doba chodu při práci	2 h	Tok vzduchu	108 kg/s
Spotřeba energie na 1 kWh el.	0,8 kWh el. energie	Parametry stl. vzduchu	4,6 - 7,2 MPa/50 °C
	1,6 kWh paliva	Počet vnitřních chladičů	3
		Počet vnějších chladičů	1
		Doba chodu při práci	8h

Tab. 4-4: Základní parametry motor/generátoru a kaverny

Motor/Generátor		Sklad stlačeného vzduchu (kaverna)	
Měrná spotřeba tepla	341 MVA	Typ kaverny	S měnícím se tlakem
frekvence	50 Hz	Objem	2 x 150000 m ³
napětí	21 kV	Rozsah tlaků	4,6 – 7,2 MPa
otáčky	3000 min	Tlakový spád během vyprazdňování	1 MPa/h
chlazení	vodík/voda	Hloubka pod zemí	600-800 m

Elektrárna McIntosh

Elektrárna byla uvedena do provozu roku 1991 v USA ve státě Alabama v městě McIntosh. Elektrárna má oběh s rekuperátorem (Obr. 4-14) a dodává do sítě výkon 110 MW po dobu 26 hodin. Informace o elektrárně jsou shrnuty níže v tabulce. Obr. 4-21 ukazuje skutečné schéma elektrárny. Účinnost akumulace elektrické energie se pohybuje kolem 52%.



Obr. 4-21 [17]: Schéma CAES McIntosh

Tab. 4-5: Základní parametry CAES McIntosh

Ostatní		Sklad stlačeného vzduchu (kaverna)	
Měrná spotřeba tepla	4100 kJ/kWh	Typ kaverny	S měnícím se tlakem
Spotřeba energie na 1 kWh el.	0,69 kWh el. energie	Objem	538000 m ³
	1,6 kWh energie paliva	Rozsah tlaků	4,5 – 7,6 MPa
Doba chodu turbíny	26 h	Hloubka pod zemí	450-750 m
Výkon turbíny	110 MW		

Norton

Podle všech informací stále není v provozu. Návrhem bylo využít vápencový lom v Nortonu, ve státě Ohio v USA jako akumulární nádrže s 800MW CAES zařízením s prozatímní plány rozšířit ho až na 2700 MW (9 x 300 MW). Důl byl koupen v roce 1999, aby poskytl 9,6 milionů krychlových metrů skladovacího prostoru při tlacích mezi 55 a 110 bar (5,5 – 11 MPa). Projekt byl schválen v roce 2001. V roce 2006 bylo poskytnuto pětileté prodloužení výstavby [20]. V současné době probíhají práce na výstavbě, takže to vypadá, že se projekt bude pohybovat vpřed. Pracovní oběh je vyobrazen na Obr. 4-12, na kterém je demonstrován princip funkce CAES zařízení.

Iowa

Další plánovaná výstavba CAES elektrárny se děje opět v USA ve státě Iowa. Projekt je znám pod jména Iowa storage energy park (ISEP). CAES elektrárna (200-300 MW) by tu měla spolupracovat s větrnou farmou o výkonu 75-150 MW. Více na stránkách ISEP (animace) [25] nebo [24].

4.3.6 Porovnání CAES s jinými možnými typy akumulace elektrické energie

CAES je nízkonákladová technologie pro ukládání velkého množství elektrické energie v podobě vzduchu stlačeného na velký tlak. Je to jedna z mála technologií skladování elektrické energie vhodných pro dlouhodobou dodávku (desítky hodin), v mezích od 100 do 1000 MW. Několik dalších technologií akumulace energie, jako jsou setrvačníky a ultrakondenzátory mají schopnost poskytovat krátkodobé služby v oblasti kvality a stabilizace elektrické energie, ale nejsou efektivní z hlediska nákladů na přesun zatížení a podporu výroby elektrické energie z větru [20]. Jediné technologie, schopné dodávat po dobu několika hodin elektrickou energii na úrovni klasických elektráren při atraktivních systémových nákladech jsou CAES a přečerpávací vodní elektrárny (PVE). Přestože, některé nové bateriové technologie mohou zastoupit kolísání větru stejně dobře (VRB-Vanadium Redox Battery - Vanadová redoxová baterie) [21], lze vidět z Tab.4-6, že skladovací velikost je mnohonásobně menší než u CAES a PVE. Stejně tak i celkové náklady na výrobu elektrické energie jsou větší než u PVE a CAES.

Tab. 4-6 [20]: Porovnání jednotlivých typů akumulace

Technologie	CAES	PVE	Baterie sodík-síra	Vanadová-redoxová baterie
Výkon (MW)	300	1000	10	10
Doba dodávky (h)	40	10	6-9	5-8
Množství dodávky el. energie (MWh)	12000	10000	600-900	500-800
Náklady na akumulační zásobník (\$/kWh)	580	600	1720-1860	2410-2550
Náklady na výrobu elektrické energie (\$/kWh)	1,75	37,5	180-210	240-340
Celkové náklady (\$/kWh)	650	975	3100-3400	4300-4500

Na základě výše uvedených informací se proto zaměříme na porovnání přečerpávacích vodních elektráren a CAES elektráren. PVE nevyžadují spalování paliva a mají větší zkušenosti z praxe vzhledem k CAES, ale jsou ekonomicky životaschopné jen na místech, kde jsou k dispozici rezervoáry s velkými výškovými rozdíly, nebo kde tyto rezervoáry mohou být postaveny. Kromě toho, dopad na životní prostředí PVE velkých výkonů je stále více otázkou, zejména tam, kde přírodní nádrže nejsou k dispozici. Místa s velkými, přirozeně se vyskytujícími zásobníky s velkými výškovými rozdíly, kde mohou být PVE postaveny, jsou stále více vzácností.

V kontrastu k tomu můžou CAES elektrárny použít široké spektrum zásobníků pro skladování vzduchu a mají menší povrchové stopy, čímž dávající větší flexibilitu umístění vzhledem k PVE. Vysokotlaký vzduch může být uložen v povrchových potrubí, ale pro velké aplikace se rozvíjí skladovací nádrže v podzemních geologických formacích jak bylo uvedeno v předešlých kapitolách. Všeobecná dostupnost geologických míst vhodných pro CAES v kontinentální USA, naznačuje, že tato technologie stojí daleko méně než místně omezené PVE, což je zvláště důležité

pro možnost nasazení CAES pro větrné vyvážení [20]. Výskyt solných podloží s příznivými větrnými podmínkami v Evropě ukazuje Obr. 4-12.

Největším problémem CAES elektráren je celková účinnost akumulace, tedy přeměna elektrické energie na energii stlačeného vzduchu a poté její zpětná přeměna na energii elektrickou, která se pohybuje kolem 42% (Huntorf) a 54% (McIntosh). Příslibem pro zlepšení účinnosti by mohl být oběh AA-CAES s možnou účinností kolem 70%. Z hlediska účinnosti tedy jasně vedou PVE jejichž účinnost se pohybuje v rozmezí 75%-85%. Pro zajímavost u systémů VRB se účinnosti pohybují v rozmezí 65%-75%.

Dalším možným ukazatelem pro posouzení vhodnosti dané akumulační technologie je, jaké množství elektrické energie se dá vyrobit z daného množství média (voda, stlačený vzduch, chemická látka), použitého pro akumulaci. V našem případě tedy můžeme vztáhnout vyrobenou elektrickou energii na objem dané akumulační látky (voda-PVE a stlačený vzduch-CAES).

PVE

Pro výpočet energie obsažené v rezervoáru vody, umístěného v určité výšce, vyjdeme ze vztahu pro velikost potenciální energie

$$E = m \cdot g \cdot H = \rho \cdot V \cdot g \cdot H, \quad (4.2)$$

kde m je hmotnost, g je tíhové zrychlení, H značí výškový rozdíl nebo-li spád, ρ je hustota vody a V je objem zásobníku.

Množství elektrické energie, které lze z daného množství vody vytlačené do určité výšky vyrobit, pak určíme ze vztahu

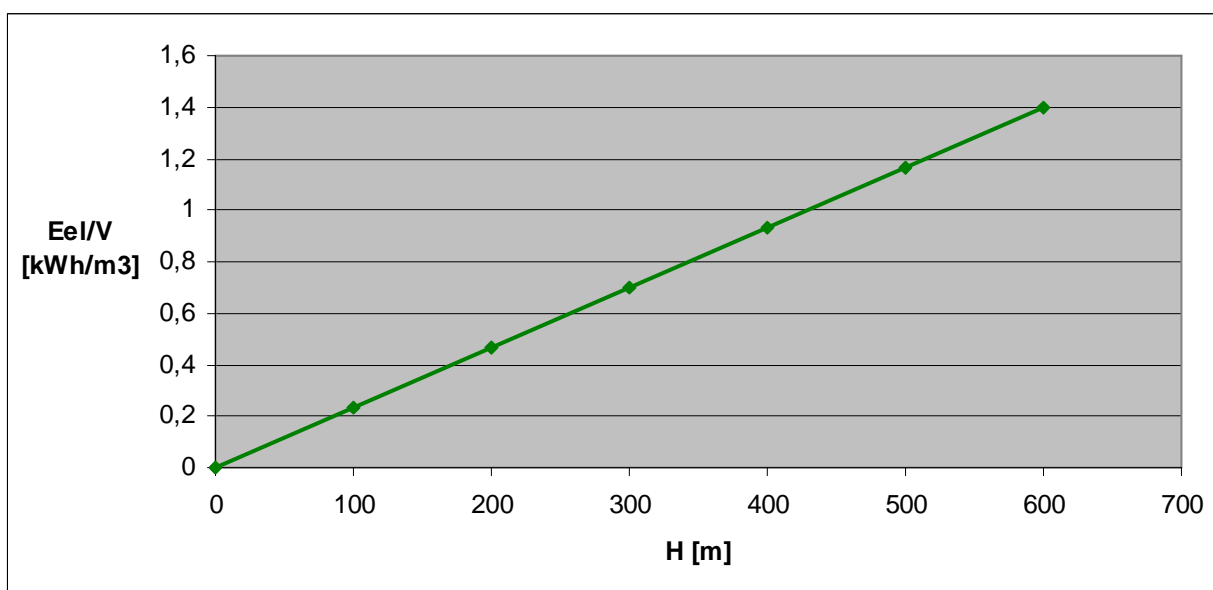
$$E_{el} = E \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g, \quad (4.3)$$

kde η_t je účinnost turbíny, η_m je mechanická účinnost a η_g účinnost generátoru.

Ztráty energie vzniklé v potrubí zanedbáváme.

Množství elektrické energie vyrobené z 1m^3 vody tedy určíme ze vztahu

$$E_v = \frac{E_{el}}{V} \quad (4.4)$$



Obr. 4.22: Vyrobená el. energie vztažená na objem zásobníku v závislosti na spádu

Výpočet byl proveden pro tyto hodnoty: $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $V = 500000 \text{ m}^3$, $\eta_t = 0,9$, $\eta_m = 0,95$ a $\eta_g = 0,98$.

CAES

Celkovou energii obsaženou ve stlačeném vzduchu můžeme určit ze vztahu

$$E = m \cdot i = m \cdot c_p \cdot T. \quad (4.5)$$

Jelikož entalpie není ušlechtilou formou energie jako je energie potenciální, můžeme pouze využít jen část z celkové energie stlačeného vzduchu tzv. exergie, jak bylo řečeno již výše. Využitelnou část energie tedy určíme ze vztahu

$$E = m \cdot \Delta i = m \cdot (i_1 - i_2) = m \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2). \quad (4.6)$$

U CAES elektráren expanduje vzduch spolu se spalinami ve dvou stupních. Poté určíme celkovou exergii ze vztahu

$$E = m \cdot [(i_1 - i_2) + (i_3 - i_4)] = m \cdot c_p \cdot [(T_1 - T_2) + (T_3 - T_4)] \quad (4.7)$$

Při výpočtu celkové exergie předpokládáme znalost teplot na vstupech do jednotlivých částí turbíny a znalost tlaků na vstupech a výstupech. Výstupní teploty pak můžeme určit ze vztahu (3.26) pro adiabatickou expanzi.

Celkovou hmotnost vzduchu určíme ze stavové rovnice ideálního plynu (3.13). Hmotnost spalin zanedbáme. Po úpravě stavové rovnice dostáváme vztah pro výpočet hmotnosti

$$m = \frac{pV}{rT} \quad (4.8)$$

Označíme-li p_k tlak vzduchu v kaverně, V_k objem kaverny a T_k teplotu vzduchu kaverny, můžeme psát pro kavernu s konstantním tlakem dle (4.8), že celková hmotnost bude

$$m = \frac{p_k \cdot V_k}{r \cdot T_k} \quad (4.9)$$

Pro celkovou hmotnost stlačeného vzduchu, pro výrobu elektrické energie u kaverny s proměnným tlakem bude platit

$$m = m_1 - m_2 = \frac{p_{1k} \cdot V_k}{r \cdot T_{1k}} - \frac{p_{2k} \cdot V_k}{r \cdot T_{2k}}, \quad (4.10)$$

kde p_{1k} je horní hodnota tlaku vzduchu v kaverně, p_{2k} je dolní hodnota tlaku vzduchu v kaverně (když už další vypouštění vzduchu není možné), T_{1k} je teplota vzduchu v kaverně při tlaku p_{1k} a T_{2k} je teplota vzduchu v kaverně při tlaku p_{2k} .

Teplotu kaverny při horní hodnotě tlaku kaverny známe. Poté teplotu T_{2k} vypočítáme opět ze vztahu (3.26).

Elektrická energie vyrobená z daného množství stlačeného vzduchu je pak dána vztahem

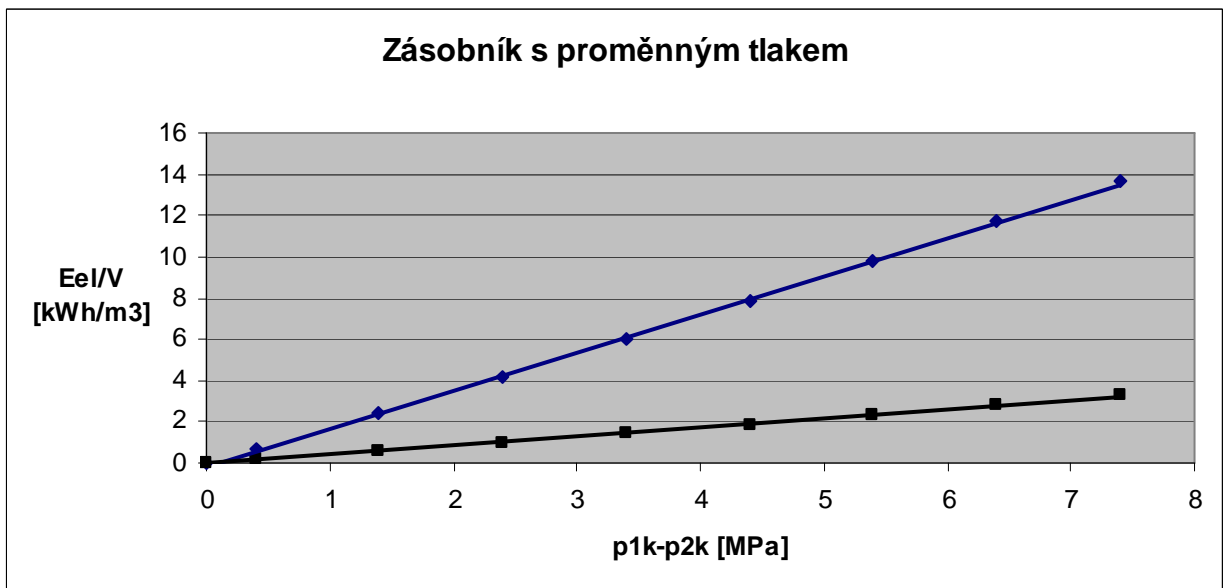
$$E_{el} = E \cdot \eta_{td} \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (4.11)$$

Ztráty energie vzniklé škrcením vzduchu u zásobníku s proměnným tlakem zanedbáváme.

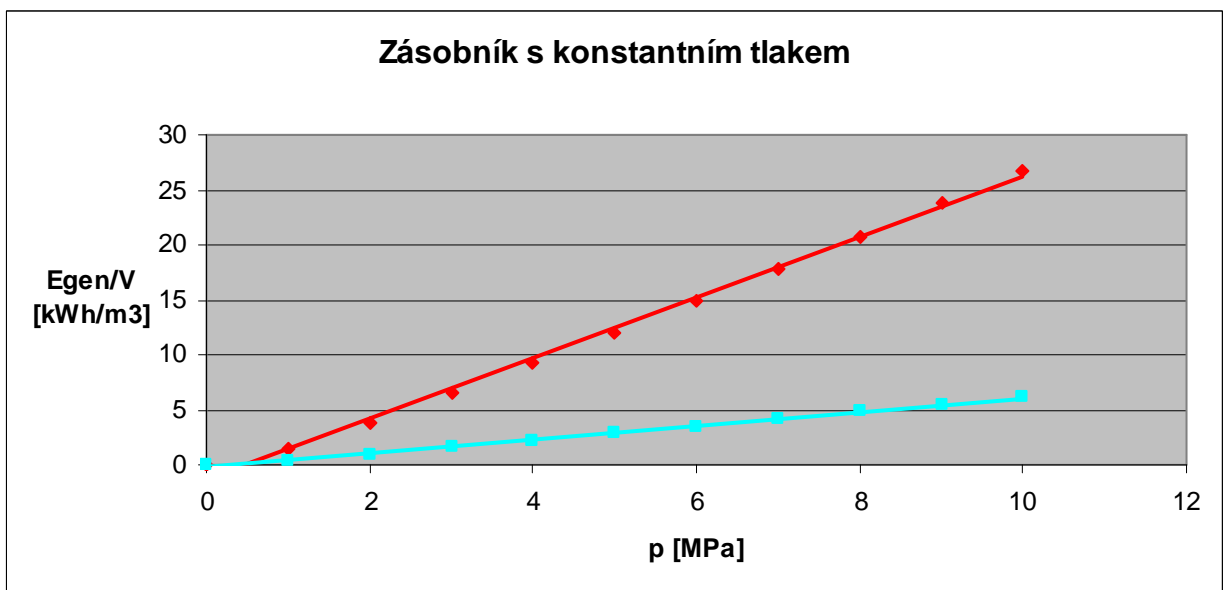
Množství energie vyrobené z 1 m^3 stlačeného vzduchu pak určíme ze vztahu (4.4).

Výpočet byl proveden s těmito hodnotami: $c_p = 1000,6 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $r = 287 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $p_{VT} = 4 \text{ MPa}$, $p_{NT} = 1,1 \text{ MPa}$, $T_{VT} = 825 \text{ K}$, $T_{NT} = 1100 \text{ K}$, $\eta_{td} = 0,9$, $\eta_m = 0,95$ a $\eta_g = 0,98$. Při přihřívání vzduchu.

Bez přihřívání vzduchu byly voleny tyto hodnoty: $c_p = 1000,6 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $r = 287 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $p_1 = 4 \text{ MPa}$, $p_2 = 0,1 \text{ MPa}$, $T_1 = 294 \text{ K}$, $\eta_{td} = 0,9$, $\eta_m = 0,95$ a $\eta_g = 0,98$.



Obr. 4.23: Vyrobená el. energie vztažená na objem zásobníku v závislosti na rozdílu mezních tlaků kaverny, při přehřívání vzduchu (modrá) a bez přehřívání vzduchu (černá)



Obr. 4-24: Vyrobená el. energie vztažená na objem zásobníku v závislosti na tlaku vzduchu v kaverně s přehříváním vzduchu (červená) a bez přehřívání vzduchu (tyrkysová)

Z vynesných závislostí, když tedy porovnáme například PVE Dlouhé Stráně, která má spád 534,3 m, a CAES elektrárnu Huntorf, kde se mění tlak v zásobníku v rozmezí 4,6-7,2 MPa, tedy rozdíl tlaků je 1,6 MPa, lze vidět, že množství vyrobené elektrické energie z 1 m³ vody je asi 1,25 kWh a množství z 1m³ stlačeného vzduchu je kolem 3 kWh. Při expanzi stlačeného vzduchu o teplotě kaverny (294 K) by se z 1m³ stlačeného vzduchu u CAES Huntorf dalo vyrobit asi 1 kWh.

Pokud by byl jako zásobník stlačeného vzduchu použit zásobník s konstantním tlakem a na vstupu turbíny by byl tlak 4,2 MPa tak by se z 1m³ dalo vyrobit 2,7 kWh elektrické energie bez přehřívání a s přehříváním vzduchu 10,5 kWh.

5. ZÁVĚR

Akumulace elektrické energie je jednou z možností řešení problému současné energetiky, jak vhodně kompenzovat nestabilitu dodávky z tzv. obnovitelných zdrojů energie a zajistit tak optimální podmínky pro provoz elektrizační soustavy.

V této práci byla věnována pozornost možnosti akumulace elektrické energie ve stlačeném vzduchu, nebo-li technologii CAES. Z výše shrnutých informací plyne, že akumulační systémy CAES byly úspěšně komerčně testovány, zatím ve dvou případech a to v německém Huntorfu a americkém McIntoshi.

Tento způsob akumulace má řadu výhodných vlastností, jako jsou nízké náklady na výstavbu akumulačního rezervoáru, velké množství vhodných lokalit pro výstavbu, všudypřítomnost akumulačního média (vzduch), relativně mírné povrchové stopy, větší hustota energie vzhledem k PVE, možnost akumulovat velké množství energie, dodávat výkon po velmi dlouhou dobu, rychlá doba najetí, možnost dlouhodobého skladování (řádově roky).

Největší zápor pro využití technologie CAES k akumulaci elektrické energie je prozatím nízká účinnost pohybující se kolem 54% a závislost na palivu (ropa, zemní plyn). Nízká účinnost je způsobena odvodem tepla při kompresi, takže ke zlepšení celkové účinnosti (není myšleno zlepšení účinnosti akumulace elektrické energie) by byla kombinovaná výroba elektřiny a tepla, nebo akumulace tepelné energie ve vysokoteplotních akumulátorech (VTA), ke zlepšení účinnosti akumulace elektrické energie. Posledně zmíněné myšlenky, tedy akumulace tepelné energie plynu ve VTA je využito u oběhu AA-CAES, kde je možná účinnost 70% a nepotřebuje ke svému provozu spalovat palivo. Na výstavbě prvního AA-CAES zařízení se podílejí firmy v Německu. Projekt se jmenuje ADELE a měl by být dokončen po roce 2013.

Zajímavou možností je použití kompresoru, místo generátoru v gondole větrné elektrárny, a tím pádem přímá přeměna energie větru na energii stlačeného vzduchu, čímž se odstraní dvojitá přeměna energie. Ztráty energie se tím sníží, je však potřeba vybudovat vysokotlakou síť potrubí pro přivedení stlačeného vzduchu do akumulačního zásobníku.

Zatím nejlepší způsob, jak akumulovat elektrickou energii je využít u PVE, ale jak už bylo řečeno vzhledem k nedostatku lokalit je jejich výstavba téměř u konce. Jako další možnost, jak akumulovat větší množství energie, se tedy jeví stlačený vzduch neboť bateriové systémy nepojmou tak velké množství energie a jsou nákladné. CAES systémy, i když je jejich účinnost zatím poměrně malá, jsou možností, jak šetrněji využít paliva jako je ropa či zemní plyn k výrobě elektrické energie. Příslibem pro využití tohoto typu akumulace v širším měřítku, závisí na úspěšnosti otestování oběhu AA-CAES v praxi, především na úspěšné akumulaci tepelné energie plynu ve vysokoteplotních keramických akumulátorech. Vzhledem k tomu, jak problematické je účinně akumulovat tepelnou energii, je potřeba nahlížet na podstatné zlepšení tohoto typu akumulace elektrické energie s určitou rezervou. Záleží na tom po jakou dobu bude možno akumulovat tepelnou energii při zachování co největší účinnosti. Hodnotné závěry k tomuto typu oběhu lze vyslovit, až po otestování v praxi.

Součástí práce měla být simulace pístového motoru na stlačený vzduch. Po domluvě s vedoucím práce byla simulace z důvodu náročnosti vypuštěna.

Použitá literatura

- [1] KUCHARČÍK, M. *Auto, které tankuje vzduch* [online] 20.5.2005, poslední změna 30.10.2009 [cit. 2009-10-30]. <http://www.21stoleti.cz/view.php?cislocianku=2005052028>
- [2] RAČEK, J. *Strojní zařízení elektráren*. Brno: Nakladatelství Novotný, 2007, 192 stran. ISBN 978-80-214-3388-5.
- [3] RAČEK, J. *Technická mechanika. Mechanika tekutin a termomechanika*. Brno: Nakladatelství Novotný, 2007, 231 stran. ISBN 978-80-214-3368-7.
- [4] *Deprag – profesionální pneumatické nářad* [online], poslední změna 8. 9. 2009 [cit. 2009 - 10 - 23]. <http://www.deprag.com/>
- [5] *Pneumatické turbínové pohony pro ruční nářadí* [online] poslední změna 24.10.2009 [cit. 2009-10-24]. <http://www.mmspektrum.com/clanek/pneumaticke-turbinove-pohony-pro-rucni-naradi>
- [6] *Auto na vzduch? Přijede z Indie* [online] 14.7.2007, poslední změna 30.10.2009 [cit. 2009-10-28]. <http://www.tipcar.cz/auto-na-vzduch--prijede-z-indie-2672.html>
- [7] *MDI, Auto na vzduch* [online], poslední změna 28.10.2009 [cit. 2009-10-28]. <http://www.autonavzduch.cz/>
- [8] *Cesty k akumulaci elektrické energie* [online] 2006, poslední změna 12.10.2009 [cit. 2009-10-12]. http://www.simopt.cz/energyweb/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=6.1.6
- [9] *MDI Enterprises S.A. - Voitures à air comprimé Flowair - Véhicules propres - Technologie durable* [online], poslední změna 30.10.2009 [cit. 2009-10-30]. <http://www.mdi.lu/>
- [10] *Auto na vzduch míří na trh* [online] 18.3.2008, poslední změna 30.10.2009 [cit. 2009-10-30]. <http://www.prateleprirody.cz/clanek-229>
- [11] *MDI's "AirCar" officially becomes the FlowAIR* [online] 10.9.2008, poslední změna 30.10.2009 [cit. 2009-10-30]. <http://www.engadget.com/2008/10/10/mdis-aircar-officially-becomes-the-flowair/>
- [12] *MDI MiniCat & CitiCat Air Cars* [online] 10.1.2007 poslední změna 30.10.2009 [cit. 2009-10-30]. <http://www.greencar.com>
- [13] *Druckluftspeicher* [online], poslední změna 30.10.2009 [cit. 2009-10-30]. <http://www.rwe.com/web/cms/de/183732/rwe/innovationen/stromerzeugung/energiespeicherung/druckluftspeicher/> <http://www.greencar.com/articles/mdi-minicat-citicat-air-cars.php>
- [14] *Akumulace energie* [online] 17.7.2004, poslední změna 12.10.2009 [cit. 2009 - 10 - 12]. <http://diskuse.elektrika.cz/index.php/topic,1599.0.html>
- [15] *Electricity storage association* [online]. 2009 [cit. 2010-03-16]. Technologies. <http://www.electricitystorage.org/ESA/technologies/>
- [16] *Deprag – profesionální pneumatické nářad* [online], poslední změna 8. 9. 2009 [cit. 2009 - 10 - 23]. <http://www.depragindustrial.de/>
- [17] *Green Technology* [online] poslední změna 30.11.2009 [cit. 2009-11-20]. www.greentechnolog.com/solar/

- [18] *Huntorf Air Storage Gas Turbine Power Plant* [online] Brown, Boveri & CIE Aktiengesellschaft Mannheim. Mannheim, Germany [cit. 2009-11-20]. <http://www.kraftwerk-wilhelmshaven.com/>
- [19] *Ready for peak load* [online] poslední změna 30.11.2009 [cit. 2009-11-20]. <http://www.kraftwerk-wilhelmshaven.com/>
- [20] SUCCAR S., WILLIAMS H. R., Compressed air energy storage: Theory, Resources and application for wind power [online] *Princeton Environmental Institute*. 8. 4. 2008. [cit. 2010-4-5] <http://www.princeton.edu/pei/energy/publications/texts/#2008>
- [21] RADIL L. *Model akumulace velkých objemů energie*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně 2008, 65 stran. [online], https://www.vutbr.cz/index.php?gm=gm_prohlizeni_zp&ak_rok=2007&tzp_id=2&fakulta_id=5&text=radil&pz=1&zp_id=13506&lang
- [22] KAMINSKÝ J., *Využití pracovního prostoru pístových kompresorů*, Praha: SNTL, 1982, 232 stran
- [23] SCHAIKER B. R., NAKHAMKIN M., KULKARNI P., KEY T., New Utility Scale CAES Technology: Performance and Benefits (Including CO₂ Benefits) [online], *EESAT Conference 2007*. September 2007 [cit. 2010-4-5]. <http://www.espcinc.com/index.html>
- [24] *Iowa to combine wind energy & CAES technology* [online] 12.1.2007, poslední změna 17.4.2010 [cit. 17.4.2010]. <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2007/01/iowa-to-combine-wind-energy-caes-technology-47096>
- [25] *Iowa stored energy park* [online], poslední změna: 17.4.2010 [cit. 2010-4-7]. <http://www.isepa.com/>
- [26] CHLUMSKÝ V., LIŠKA A., *Kompresory*, Praha: SNTL, 1982, 196 stran
- [27] *Energy Storage and Power Corporation* [online] poslední změna 25.3.2010 [cit. 2010-4-3]. <http://www.espcinc.com/>
- [28] *Electricity storage association* [online] poslední změna 30.11.2009 [cit. 2009-11-20]. <http://www.electricitystorage.org/ESA/home/>