ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti využití stlačeného vzduchu pro akumulaci elektrické energie

Autor práce: **Bc. Ivo Vágner** **2012**
Vedoucí práce: **Ing. Jan Beneš**

/// originál zadání

Anotace

Cílem této diplomové práce je seznámit čtenáře s různými možnostmi akumulace elektrické energie, především však s využitím stlačeného vzduchu pro akumulaci elektrické energie.

Práce je zaměřena především na velkoobjemové akumulace energie jako je systém CAES (využívající stlačený vzduch) a PVE (využívající vodu).

Závěrečná část je věnována automobilu, který využívá stlačený vzduch ke svému pohonu.

Klíčová slova

stlačený vzduch, akumulace elektrické energie, přečerpávací vodní elektrárna, automobil na stlačený vzduch

Abstrakt

Bc. Vágner, Ivo. Possibilities of using compressed air for electricity accumulation [Možnosti využití stlačeného vzduchu pro akumulaci elektrické energie]. Pilsen, 2012. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Ing. Jan Beneš

The aim of this master thesis is to acquaint the reader with the possibilities of accumulation of the electrical energy, but above all with the use of compressed air for electric energy accumulation.

The thesis is mainly focused on large-scale energy storage, such as CAES system (using compressed air) and PSH (using water).

The final section is devoted to a car that uses compressed air to propel the vehicle.

Key words

compressed air, energy storage, pumped storage hydropower plant, compressed air car

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 1.5.2012 Bc. Ivo Vágner

……..

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Benešovi, za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady a připomínky při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům, jimž jsem vděčen za pomoc a podporu během studia.

Obsah

Seznam tabulek 9
Seznam symbolů a zkratek 10
1. Úvod 11
2. Potřeby akumulace 12
3. Možnosti akumulace elektrické energie 17
3.1 Elektrochemické akumulátory 17
3.1.1 Ni-Cd akumulátor 17
3.1.2 Li-ion akumulátor 17
3.1.3 Olověný akumulátor 18
3.1.4 NaS akumulátor 19
3.1.5 Zn-Br akumulátor 20
3.2 Vodík 21
3.3 Mechanické setrvačníky 22
3.4 Supravodivé prstence 24
3.5 Superkapacitor 25
3.6 Přečerpávací vodní elektrárna 27
3.7 Systémy CAES 28
4. Využití stlačeného vzduchu pro akumulaci 30
4.1 Využití stlačeného vzduchu 30
4.2 Složení stlačeného vzduchu 31
4.3 Systémy CAES 31
4.3.1 Princip funkce CAES 32
4.3.2 Pracovní oběhy CAES 33
4.3.3 Zásobníky stlačeného vzduchu 35
5. Systémy sloužící k akumulaci elektrické energie na území ČR 37
5.1 Černé Jezero 37
5.2 Dlouhé Stráně 38
5.3 Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice 40
5.4 Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice II. 41
5.5 Možné lokality pro PVE 41
3.5.1 Slavíč 42
5.5.2 Šumný důl 43

5.5.3 Spálená 44
5.5.4 Červená jáma 44
5.5.5 Smědavský vrch 44
5.5.6 Velká Morava 45
6. Auto na stlačený vzduch 46
6.1 Princip funkce 47
6.2 Motor na stlačený vzduch 47
6.2.1 Duální motor 48
6.3 Možnosti tankování 50
6.3.1 Kompresní stanice 50
6.3.2 V domácnosti 50
6.4 Konstrukce automobilu 51
6.5 Technické parametry automobilu 52
6.5.1 Městský cyklus (CEE 195 s) 53
6.5.2 Účinnost 54
6.5.3 Dojezd automobilu 54
6.6 Porovnání hodnot automobilů 55
7. Závěr 58
8. Použitá literatura – zdroje 60
Seznam příloh 63

Seznam tabulek

Tab. 4.1: Složení vzduchu..... 31
Tab. 4.2: Fyzikální vlastnosti vzduchu při 0°C a 1,01325 bar..... 31
Tab. 6.1: Technické parametry automobilu Airpod GT 52
Tab. 6.2: Městský cyklus (CEE 195 s) 53
Tab. 6.3: Účinnost systému..... 54
Tab. 6.4: Účinnost systému v praxi 54
Tab. 6.5: Dojezd automobilu 55

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Veličina	Značka jednotky
i	měrná entalpie	$[J \cdot kg^{-1}]$
p	tlak	[Pa]
T	termodynamická teplota	[K]
P	výkon	[W]
Q_m	hmotností průtok	$[kg \cdot s^{-1}]$
u	měrná vnitřní energie	$[J \cdot kg^{-1}]$
v	měrný objem	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
k	izoentropický exponent	[1]
w	měrná objemová práce	$[J \cdot kg^{-1}]$
C	kapacita	[F]
U	napětí	[V]

1. Úvod

V této diplomové práci se budu snažit shrnout informace o potřebách a možnostech akumulace elektrické energie. Vzhledem k tomu že možnosti regulace výkonu velkých elektráren, které porývají cca 90% spotřeby, jsou velice omezené, nebo skoro žádné, nemohou tyto elektrárny pružně reagovat na průběh spotřeby během dne a tím efektivně kompenzovat systémovou odchylku. Tyto výkyvy mohou být pokrývány akumulovanou energií z doby jejího přebytku, a využít v době energetických špiček. Zdrojem nejistot v dodávce mohou být obnovitelné zdroje, jako jsou solární a větrné elektrárny, které dodávají energii převážně v závislosti, na počasí. Nelze se tedy na jejich výrobu energie 100% spolehnout. Řešením pro zvýšení efektivnosti a spolehlivosti je tedy akumulace takto vyrobené elektřiny a možnost ji dodávat v době kdy náhle přestane foukat vítr, nebo solární panely zastíní mrak. Systémů pro akumulaci elektrické energie je celá řada, jednou z možností je ale akumulace pomocí stlačeného vzduchu.

2. Potřeby akumulace

Počátkem 20. století probíhala distribuce nízkého stejnosměrného napětí v relativně malých oblastech s vysokou hustotou populace. K pokrytí výkonových špiček a zároveň jako krátkodobá energetická rezerva, byly v těchto distribučních sítích využívány olověné akumulátory. Tehdy byly tyto akumulátory jediným možným systémem k uchování elektrické energie. Teprve až vznik přenosových systémů s vysokým střídavým napětím umožnil distribuovat elektrickou energii na velké vzdálenosti. Nebylo tak již třeba souběžného používání akumulátorů.

V dnešní době je výroba elektrické energie daleko více řízena poptávkou. Během dne a i v průběhu roku je spotřeba velice proměnlivá. V průběhu dne pomáhají tyto špičky vyrovnávat přečerpávací vodní elektrárny a pohotovostní zálohy. Pokud ale ani tyto systémy nepokryjí poptávku, musejí dispečeři nakoupit elektřinu od sousedních zemí, pokud tedy sousední systémy disponují jejím přebytkem. Nejen k tomuto účelu jsou proto na evropském kontinentu vzájemná propojení elektroenergetických sítí jednotlivých států. Toto propojení jsou tvořena takzvanými stejnosměrnými mosty s přenosovými linkami 400 až 750 kV. Stejnosměrný most je využíván pro synchronizaci kmitočtu v různých systémech.

Systémy vyrábějící elektřinu se dají zařadit do třech základních skupin pokrývající poptávku. Jsou to zdroje základního, pološpičkového a špičkové zatížení elektroenergetické sítě. Pro krytí základního zatížení je využíváno zdrojů se stálou dodávkou elektrické energie, jako jsou moderní tepelné, jaderné a vodní průtokové elektrárny. Tyto elektrárny hospodárně poryjí až 90% základního zatížení elektroenergetické sítě. Nevýhodou je ale jejich velmi omezená možnost regulace výkonu. Uhelná elektrárna je schopna najet na plný výkon až za půl dne a jaderná elektrárna v řádu dnů až týdnů. Jako pološpičkové elektrárny jsou využívány především klasické tepelné a vodní akumulační elektrárny. Pro špičkové zdroje je nejdůležitějším faktorem rychlost najetí na plný výkon, cena vyrobené energie zde není rozhodujícím faktorem. Pro tyto účely slouží především přečerpávací vodní elektrárny.

Nakoupená elektřina je ale jedna z nejdražších, proto je daleko výhodnější, ji v době jejího přebytku akumulovat a v případě potřeby použít. Akumulace elektrické energie dnes není problémem jen těžko regulovatelných elektráren, které vyrábějí elektřinu i v době její minimální spotřeby. Ale čím dál tím více tento problém zasahuje do problematiky obnovitelných zdrojů, jako jsou větrné a solární systém. Tyto systémy, hlavně tedy fotovoltaické elektrárny, vyrábějí nejvíce energie v letních dnech, kdy je její nejmenší spotřeba. Průměrné roční využití instalovaného výkonu, se udává kolem 12% [25]. Dalším a podstatnějším problémem jsou nemalé výkyvy ve výrobě, například když jsou solární panely náhle zastíněny přecházejícími mraky. U velkých FVE mohou tyto výkyvy dosahovat řádů MW. Nemluvě o tom že v noci nevyrábí vůbec.

Tyto výkyvy mohou vyrovnávat již zmiňované špičkové elektrárny, ale ne vždy to musí stačit. Proto je potřeba přebytečnou energii akumulovat a později tak vykrývat energetické špičky v distribuční síti. Existuje mnoho způsobů akumulace elektrické energie, které se liší v mnoha aspektech. Níže je uveden přehled nejdůležitějších technologií, současných i vyvíjených, způsobů akumulace energie:

- chemické akumulátory,
- vodík,
- nízko a vysoko rychlostní elektromechanické setrvačníky,
- supravodivý magnetický systém akumulace energie (SMES),
- superkapacitory,
- přečerpávací vodní elektrárny,
- akumulace energie založená na stlačeném vzduchu (CAES).

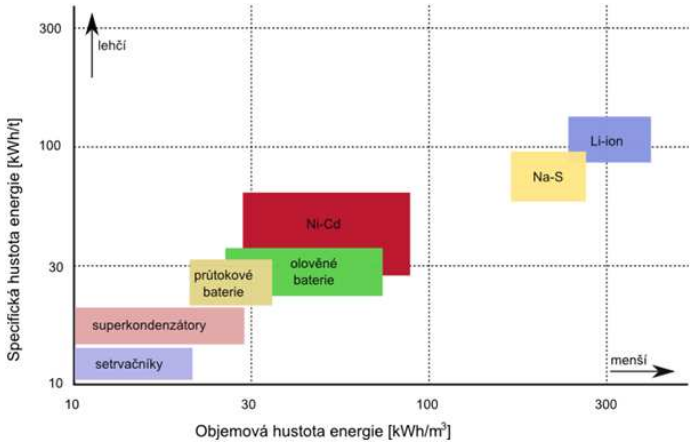
Přečerpávací vodní elektrárny a systém CAES se od ostatních liší především objemem akumulovaného možností energie. Tyto systémy mohou dodávat výkon v řádech 100 MW, po relativně dlouhou dobu (řádově hodiny). Nevýhodou těchto systémů je náběhový čas, najetí na plný výkon elektrárny, který je v řádech minut. Nehodí se tedy pro aplikace, které mají kompenzovat jalový výkon, nebo zlepšovat kvalitu sítě. Ideální systém akumulace energie, by měl dobře splňovat následující základní vlastnosti:

- vysoký výkon (desítky MW),

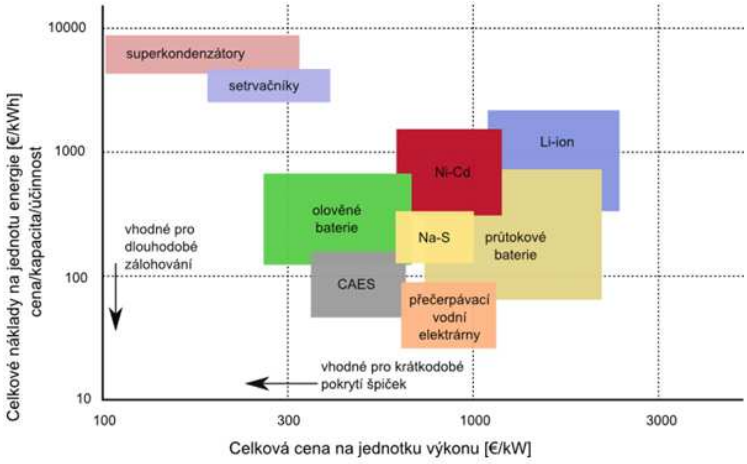
- maximální doba uchování energie a minimum ztrát,
- vysoká energetická kapacita (desítky MWh),
- nízká cena za akumulovanou MWh,
- množství kWh, které může uchovat na kilogram hmotnosti,
- jak rychle dokáže energii uvolnit, časová odezva,
- počet cyklů, životnost,
- možnost kompenzace jalového výkonu,
- vysoká účinnost,
- možnost samostatného ostrovního provozu,
- nízké pořizovací i provozní náklady,
- neškodící přírodě.

Většinu z výše uvedených vlastností mají olověné akumulátory. Ale množství energie dosažitelné z akumulátoru je závislé na vybíjecí rychlosti. Malé SMES, nízkootáčkové setrvačníky a olověné akumulátory jsou technologicky připraveny pro použití v systémech akumulace elektrické energie. Nejpropracovanější jsou však olověné akumulátory, které se vyrábějí pro různé typy použití. Malé SMES systémy a nízkootáčkové setrvačníky, jsou komerčně dostupné. Mega SMES systémy, vysokootáčkové setrvačníky, superkapacitory a moderní akumulátory jsou ve stadiu prototypu, koncepčního modelu, nebo funkčního vzorku. Přečerpávací vodní elektrárny jsou osvědčené technologie, za příklad slouží například PVE Dlouhé Stráně s výkonem 2x325 MW. Technologie CAES, využívající stlačený vzduch, jsou ve velkém měřítku funkční pouze dvě, a to v Německu 290 MW a USA 110 MW.

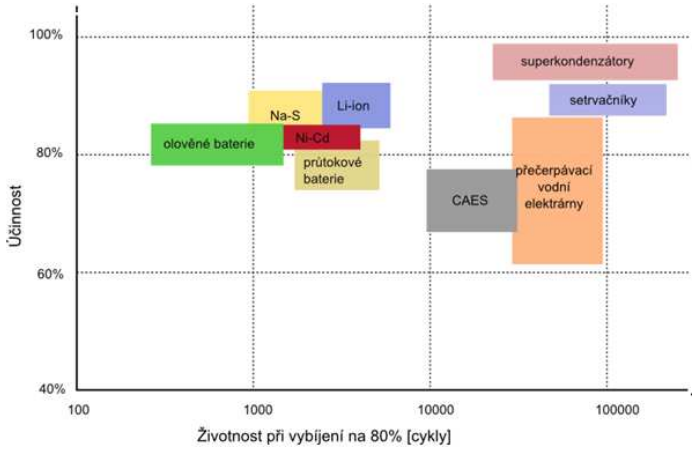
Výkonové možnosti, předpokládaná doba použití a náklady na jeden akumulační cyklus některých akumulačních systémů jsou uvedeny na obrázcích obr. 2.1, obr. 2.2 a obr. 2.3.



Obr. 2.1[9]: Specifická hustota energie v závislosti na objemové hustotě energie



Obr. 2.2[9]: Náklady na jednotku energie



Obr. 2.3[9]: Závislost účinnosti na životnosti

Systémy SMES a superkapacitory jako jediné technologie využívají pro ukládání energie přímo elektřiny. CAES a PVE ukládají energii v mechanické formě a akumulátory ve formě chemické. V těchto případech je nutná konverze zpět na energii elektrickou.

Co se budoucnosti jednotlivých systémů týče je hlavní využití PVE a CAES především jako systémů pro pokrývání energetických špiček v průběhu dne. SMES, setrvačníky a superkapacitory především pro snižování jalového výkonu a zvyšování stability přenosové soustavy.

Žádný s těchto systémů ukládání energie není vhodný pro dlouhodobou a především levnou akumulaci velkého množství energie. Umět efektivně a hlavně levně akumulovat elektrickou energii, by bylo mnohem přínosnější než nový typ zdroje elektřiny.

3. Možnosti akumulace elektrické energie

V této kapitole je uveden přehled nejdůležitějších způsobů akumulace elektrické energie, jako jsou chemické akumulátory, vodík, nízko a vysoko rychlostní elektromechanické setrvačníky, supravodivý magnetický systém akumulace energie (SMES), superkapacitory, přečerpávací vodní elektrárny, a systém CAES.

3.1 Elektrochemické akumulátory

Elektrochemické akumulátory akumulují elektrickou energii ve formě chemické energie. Vybíjení a nabíjení je proto mnohem pomalejší než například u super-kondenzátorů, nebo supravodivých cívek. Jejich výhodou je relativně nízká cena díky dobře zvládnuté technologii výroby, možnost operativního použití skoro kdekoliv je potřeba a mnohonásobné opětovné nabíjení a vybíjení. Mezi hlavní nevýhody patří například samovybíjení a poměr akumulované energie ke hmotnosti-objemu akumulátoru. Níže jsou uvedeny nejvýznamnější typy chemických akumulátorů:

3.1.1 Ni-Cd akumulátor

Ni-Cd (Nikl-Kadmiové) akumulátory jsou osvědčené svojí spolehlivostí za extrémních provozních stavů. Mají vysokou hustotu energie na jednotku hmotnosti i objemu, ta se pohybuje v kolem 100 Wh/dm^3. Mezi výhody těchto akumulátorů patří malé samovybíjení a odolnost proti zvýšeným teplotám. Životnost je více než 500 cyklů nabití-vybití při 80% DOD (Depth of Discharge – hloubka vybití). U velkých systémů pro akumulaci energie s Ni-Cd, byly vyvinuty akumulátory s životností 20 let, ale pouze za předpokladu 15% DOD. Nevýhodou Ni-Cd akumulátoru je pořizovací cena, která je v porovnání s adekvátním olověným akumulátorem cca 6-8 krát vyšší, a další nevýhodou je takzvaný paměťový efekt. Největším problémem je ale ovšem kadmium, které tyto baterie obsahují. Je to vysoce nebezpečný a karcinogenní kov. Proto se pro všechny tyto nevýhody Ni-CD akumulátorů upouští od výroby a jako neperspektivní systém je opuštěn.

3.1.2 Li-ion akumulátor

Lithium-iontové akumulátory vynikají především svou lehkostí, oproti olověným akumulátorům. Lithium je velice lehký kov a poměrně hojně zastoupený

prvek, takže oproti olovu jeho těžba nepředstavuje významné ohrožení pro životní prostředí. Díky jeho velké reaktivitě mají Li-ion články relativně vysoké napětí 3,7 V a velkou energetickou hustotu, která se pohybuje kolem 500 Wh/kg. Katodu v akumulátoru tvoří sloučeniny lithia jako $LiCoO_2$, $LiFePO_4$ a mnoho dalších. Anoda je vyrobena z uhlíku. Elektrolyt je tvořen z lithiové soli, například $LiPF_6$, rozpuštěné v organickém rozpouštědle. Baterie jsou citlivé podmínky nabíjení i vybíjení a ve velkých kapacitách představují značné riziko výbuchu a požáru. I přes své další nevýhody jako je, vysoká cena a nižší životnost jsou v posledních letech stále více využívány jako akumulátory elektrické energie pro elektromobily.

3.1.3 Olověný akumulátor

Olověné akumulátory jsou stále nejběžnějším způsobem akumulace energie v různých odvětvích, i když mají relativně malou objemovou hustotu energie a jsou těžké. Olovo je navíc také značně jedovaté a poměrně drahé. Běžně se využívají olověné akumulátory sestavené sériově do baterií, kde se napětí akumulátoru pohybuje v rozmezí 1,1 až 2 V. Elektrolytem je zde zředěná kyselina sírová, která v roztoku disociuje na kladné vodíkové ionty a záporné síranové ionty.

Podle provedení lze tyto akumulátory rozdělit na dva typy, a to: otevřený akumulátor se zaplavenou konstrukcí a akumulátor bezúdržbový ventilem řízený, takzvaný VRLA (valve regulated lead acid - ventilem řízený olověný akumulátor). Dále mohou být rozděleny na akumulátory s deskovými elektrodami a elektrodami trubkovými.

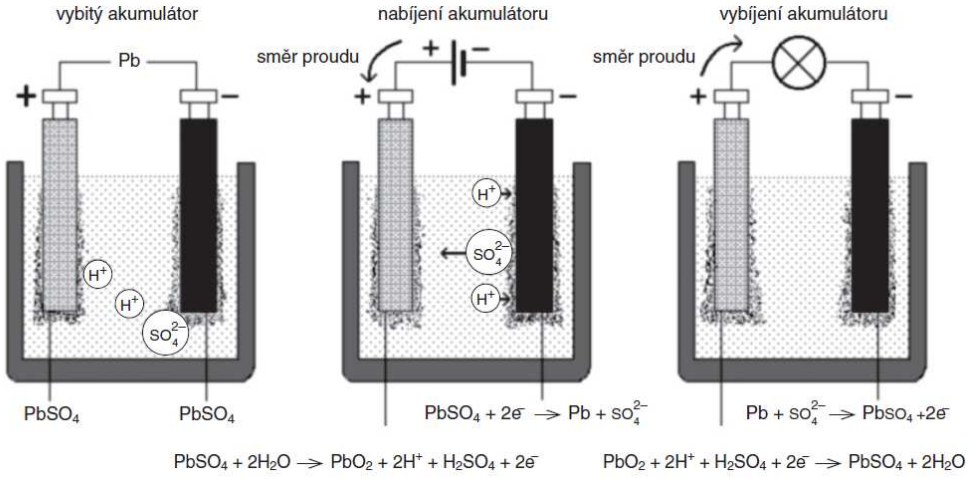
Prvním typem jsou deskové akumulátory se zaplavenou konstrukcí, mají tzv. automobilový design. Využívány byly také v automobilovém průmyslu, dnes se již ale standardně používají bezúdržbové. Tyto akumulátory mají relativně malou hustotu energie na jednotku objemu, přibližně 50 Wh/dm^3. Podle provozních podmínek může být životnost tohoto akumulátoru až 3 roky. I přes všechny tyto nevýhody akumulátoru se díky jeho nízké pořizovací ceně využívá v rozvojových zemích a pro malé-domácí solární systémy.

Dalším typem jsou trubkové akumulátory se zaplavenou konstrukcí. Tyto akumulátory mají mnohem delší životnost, cca 8 let při 50% DOD. Jejich cena je cca 3x vyšší oproti deskovým akumulátorům se zaplavenou konstrukcí. Tento typ

akumulátorů se převážně využívá pro akumulaci energie ve velkých solárních elektrárnách, ale také u hybridních systémů, venkovských elektrifikacích, nebo domácích aplikacích.

Základním problémem akumulátorů se zaplavenou konstrukcí je vlastní konstrukce. U těchto akumulátorů, během času, dochází k hromadění elektrolytu s vyšší koncentrací u dna nádoby. Důsledkem je pak postupná nevratná sulfatace elektrod akumulátoru a tím snížení životnosti, nebo úplné nefunkčnosti akumulátoru. Odstranění tohoto problému se řeší speciálním míchacím zařízením, které promíchává elektrolyt, aby jeho koncentrace byla rovnoměrná. Akumulátory také vyžadují kontrolu hladiny elektrolytu a případně dorovnání požadované hladiny destilovanou vodou.

Ventilem řízený bezúdržbový akumulátor používá, pro znehybnění elektrolytu uvnitř článků, elektrolyt ve formě gelu, nebo separátor ze skelných vláken, do kterého je elektrolyt nasáknutý. Pořizovací cena těchto akumulátorů je dnes srovnatelná s cenou trubkových akumulátorů se zaplavenou konstrukcí. Dosahují životnosti 5 až 10 let v závislosti na prostředí, ve kterém jsou provozovány.



Obr. 3.1[1]: Schéma olověného akumulátoru

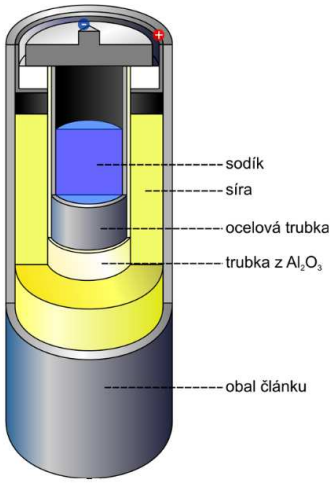
3.1.4 NaS akumulátor

Akumulátory NaS (síra-sodík) mají nejvýhodnější vlastnosti pro energetiku. Mají poměrně velkou energetickou hustotu (150 Wh/kg) a dosahují účinnosti kolem 90%. Životnost těchto akumulátorů se odhaduje na 15 let, při kterých bude docházet

k velkým počtu cyklů nabíjení-vybíjení. Síra i sodík jsou levné a dostupné prvky, které při správném zacházení nejsou toxické.

Základní nevýhodou NaS akumulátorů je pracovní teplota, cca 300 °C, při které je sodík a síra v kapalném stavu. Kapalný sodík při styku se vzduchem okamžitě hoří a při kontaktu s vodou dojde k výbuchu vzniklého vodíku. Pro komerční použití by mohl být takovýto akumulátor značně nebezpečný, ale ve velkých stacionárních jednotkách-elektrárnách to není zásadní omezení.

Tato akumulátorová baterie o výkonu 1 MW a s kapacitou 7,2 MWh, je nainstalována například v Japonsku v oblasti Tokia, kde vyrovnává zatížení sítě a zlepšuje její stabilitu. Nebo také ve městě Presidio v USA, kde je instalována akumulační stanice, která je schopna při výpadku elektřiny dodávat 4 MW po dobu 8 hodin.



Obr. 3.2[26]: Schéma NaS článku

3.1.5 Zn-Br akumulátor

Akumulátory Zn-Br (zinek-bromid) mají na rozdíl od klasických akumulátorů, oddělené elektrolyty, v nichž je energie akumulována. Je zde oddělený systém elektrod a elektrolytu. Během nabíjení je čerpán roztok bromidu zinečnatého do prostoru mezi elektrody. Na kladné elektrodě se vylučuje kapalný bróm, který je společně s vodou a přísadami pro zlepšení jeho rozpustnosti přečerpáván do druhé nádrže. Na záporné elektrodě se vylučuje kovový zinek. Při vybíjení je roztok bromu pumpován z druhé nádrže do první a na elektrodách reaguje s kovovým zinkem. Vzniká tak bromid

zinečnatý a elektrický proud. Napětí na jeden článek je cca 1,7 V. Tento akumulátor lze vybít na „nulu“ bez jeho poškození s velkým počtem cyklů. Energetická hustota není veliká, cca 50 Wh/kg, tuto nevýhodu ale vyvažuje relativně nízká pořizovací cena.

3.2 Vodík

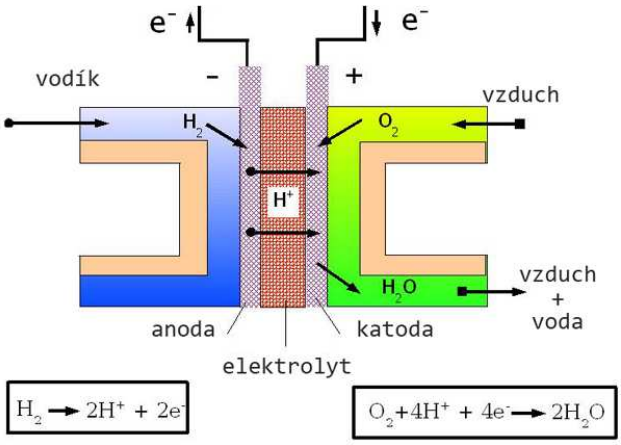
Vodíkové energetické systémy se začali zkoumat od 60. let 20. století. Tehdy šlo převážně o využití mimošpičkového výkonu z jaderných elektráren, podobně jako tomu bylo u přečerpávacích vodních elektráren. Teprve v posledních letech přibyla i možnost akumulace přebytečného výkonu ze solárních systémů a větrných elektráren.

Nadbytečná elektřina je využita na elektrolýzu, při které je z vody uvolňován kyslík a vodík. Elektrolýzu lze provádět i za tlaku, takže celý systém nemusí mít žádné pohyblivé části, a rovnou je získán stlačený vodík. Na stlačení je využito pouze 3% energie. Účinnost elektrolýzy je kolem 70% a palivových článků kolem 60%, z čehož vyplívá poměrně malá účinnost celého procesu, která je pod 50% [26].

Vzniklý vodík uložíme do vhodného zásobníku, ve kterém takto uloženou energii můžeme skladovat po dlouhou dobu. Zásobníkem jsou speciální tlakové nádoby vyrobené z materiálů, které nereagují s vodíkem. Vodík totiž v mnoha materiálech difunduje do krystalické mřížky a způsobuje tak křehnutí daného materiálu. Vodík lze skladovat i pomocí kovových prášků, na které se naváže a vytvoří s nimi hydridy kovů. Skladování vodíku je možné pouze podle přísných bezpečnostních norem, jelikož již malé množství vodíku ve vzduchu tvoří výbušnou směs.

Takto akumulovaná energie ve vodíku může být oxidací přeměněna na jiný druh energie, například elektrickou, tepelnou, nebo mechanickou. Oxidace může probíhat řízenou elektrochemickou cestou v palivovém článku, nebo přímím spalováním ve spalovacím motoru nebo kotli.

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které přeměňuje energii ve vodíku během oxidačně-redukční reakce přímo na elektrický proud. Na anodu je přiváděn vodík a ke katodě okysličovadlo (vzdušný kyslík).



Obr. 3.3[26]: Schéma palivového článku

Vodík má nejvyšší výhřevnost ze všech paliv, cca 100 $MJ \cdot kg^{-1}$ (závisí na jeho čistotě). Spalováním vodíku nevznikají oxidy uhlíku a síry ani jiné škodliviny, vzniká pouze vodní pára a malé množství oxidů dusíku. Existují již upravené spalovací motory, kde lze vodík použít jako palivo a zároveň čerpací stanice vodíku pro autobusy a automobily.

3.3 Mechanické setrvačníky

Mechanické setrvačníky jsou nejstarším mechanickým akumulátorem. Dříve pomáhali uloženou kinetickou energií překonávat mrtvé body klikového mechanizmu parních strojů a dodnes jsou nezbytnou součástí každého spalovacího motoru. Roztočený mechanizmus předává svou energii zpět ve zlomkách sekund s účinností až 85%. V minulém století byly setrvačníky použity pro projekt takzvaných „Gyrobusů“. Jednalo se o trolejbus s jeden a půl tunovým setrvačníkem pod podlahou spojeným na hřídeli s motorgenerátorem. Na každé zastávce se gyrobus, pomocí sběračů, připojil k napájecímu stožáru. Motorgenerátor dokázal během minuty urychlit setrvačník tak, že akumuloval cca 10 kWh energie. Trolejbus tak dokázal se staženým sběračem ujet cca 2 km – k další zastávce s napájecím stožárem. Vlivem obrovského gyroskopického momentu, který stěžoval gyrobusu jízdu do zatáček, se od tohoto způsobu akumulace energie upustilo. Setrvačník se neosvědčil ani u elektromobilů, které tak díky setrvačníkům dokázali akumulovat část energie při brzdění.

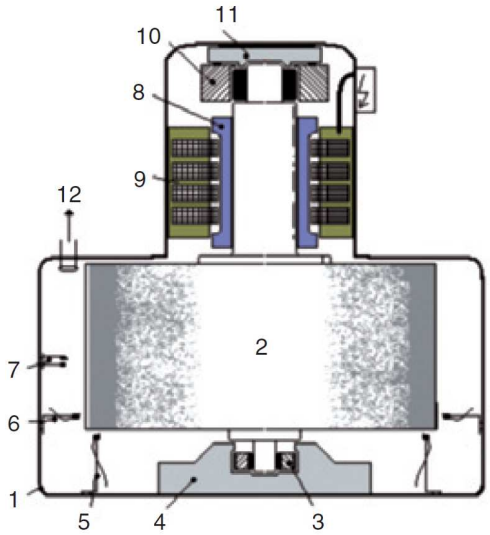
Ve výkonové energetice se dnes používají setrvačníky ve spojení s motorgenerátorem pro krátkodobou akumulaci elektrické energie. Setrvačníkové

akumulátory se dělí na dva typy. První, který pracuje při otáčkách do 8 000 min^{-1} a využívá velké hmotnosti uspořádané do takového tvaru, kde je dosaženo co největšího momentu setrvačnosti.

Druhým typem jsou setrvačníky lehčí. Jsou vyrobeny z odolných vyztužených plastů, které dokážou pracovat při otáčkách až 100 000 min^{-1}. Takto vysoké otáčky si vyžádaly také změnu ložisek. Mechanická ložiska zde nahradil magnetický závěs rotoru. Tyto magnetická ložiska s magnetickou levitací tak snížila tření na minimum. Dalším krokem je také umístění rotoru do vakua, aby se zamezilo tření způsobené přítomným vzduchem.

V laboratorních podmínkách se podařilo zkonstruovat super-sertvačník s hmotností jen 0,6 kg, který lze jako rotor v magnetickém závěsu roztočit až na 1 000 000 min^{-1}. Vysokootáčkové setrvačníkové akumulátory využívá pro akumulaci energie např. NASA ve svém vesmírném programu, kde je využit i gyroskopický efekt setrvačníku pro polohovou stabilizaci, který byl pro gyrobusy takovým problémem.

Hlavní nevýhodou setrvačníků je prozatím jejich vysoká cena, která je především dána náročností výroby, kterou v současné době zvládne jen pár firem na světě. Mezi přednosti setrvačníků patří hlavně vysoký výkon, dlouhá životnost a rychlost změn v akumulaci-čerpání energie. Díky těmto přednostem je plánováno jejich mnohé využití pro krátkodobou akumulaci energie. Například v solárních elektrárnách, kde pomohou odstranit prudké kolísání výkonu při krátkodobém zastínění solárních panelů přecházejícími mraky. Nebo zařízení určená pro stabilizaci frekvence sítě, jako je právě stavěné zařízení v USA ve Stephentownu, které je složeno z velkého množství setrvačníkových jednotek o celkovém výkonu 20 MW.



Obr. 3.4[1]: Schéma setrvačníkového akumulátoru

Vysvětlivky k obr.3.4:

1 – kryt setrvačníku s vakuem uvnitř,

2 – kompozitové těleso setrvačníku,

3 – víceosé magnetické uložení,

4 – mechanické uložení pro případ defektu magnetického uložení,

5 – čidla vyosení v horizontálním směru,

6 – čidla vyosení ve vertikálním směru,

7 – optický snímač otáček,

8 – permanentní magnety,

9 – elektrické vinutí (motor/generátor),

10 – víceosé magnetické uložení,

11 – mechanické uložení pro případ selhání magnetického uložení,

12 – příruba pro čerpání vývěvou.

3.4 Supravodivé prstence

První zmínky o supravodivosti materiálů jsou datovány od roku 1911, kdy Nizozemský fyzik Kamerlingh Onnes ve rtuťové smyčce, chlazené kapalným heliem, indukoval elektrický proud, který po vypnutí induktoru obíhal bez přerušení dny a týdny. První pokusy s akumulací elektrické energie do supravodivých cívek začali až o mnoho let později v USA v 80. letech 20. století.

Při akumulaci energie do magnetického pole, se nejprve musí střídavý proud z rozvodné sítě přeměnit na stejnosměrný a pomocí vhodného spínacího prvku je přiváděn do supravodivé cívky. Cívka musí být konstruována pro velké proudy a ze supravodivého materiálu. Supravodivým materiálem, tj. vodičem s nulovým odporem, dnes může být řada kovů, slitin, ale i dokonce speciální keramika při teplotě kapalného hélia (bod varu kapalného hélia, za atmosférického tlaku: -269 °C), existují ale i materiály které jsou supravodivé za přijatelnějších teplot, jako je tekutý dusík (bod varu kapalného dusíku, za atmosférického tlaku: -196 °C). Cívka proto také musí být vhodně tepelně izolována [14].

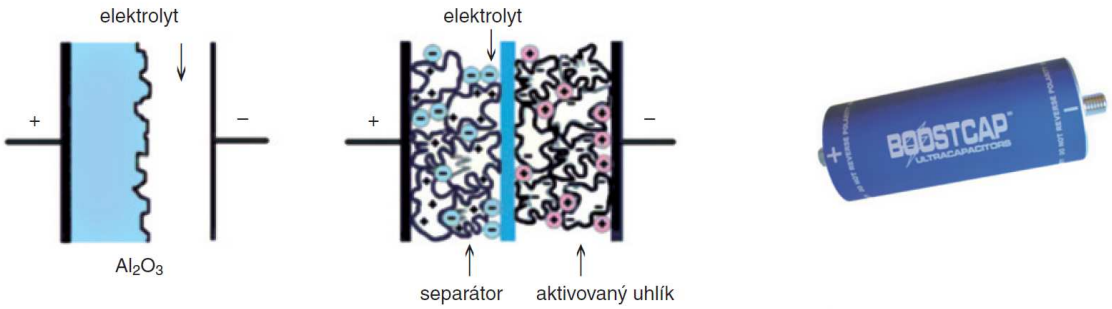
Při čerpání energie z cívky je proces přesně opačný. Stejnosměrný proud cívky je přes výkonový střídač přiveden na síť. Mezi velké výhody tohoto systému patří zejména možnost velice rychle přecházet ze stavu akumulace do stavu čerpání energie. Toho lze například využít v továrních sítích, kde z cívky může být během několika milisekund čerpán výkon v řádu 1 MW. Účinnost toho systému se pohybuje kolem 95%, ke ztrátám dochází ve výkonových měničích a chladicím systému, který udržuje teplotu supravodivých materiálů.

Při experimentech se supravodivými akumulátory SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage – Supravodivý magnetický systém akumulace energie) bylo dosaženo účinnosti systému nad 95% při milionech cyklů nabití-vybití. V budoucnu, dle zveřejněných projektů, by mohli být využívány SMES akumulátory až s kapacitou 4000 MW. Tyto akumulátory s účinností až 99%, by v podobě prstenců uložených v podzemí, mohly nahradit velké akumulátory energie, jako jsou například vodní přečerpávací elektrárny.

3.5 Superkapacitor

Teprve v posledních několika letech zažívá superkapacitor větší rozvoj. Princip je skoro totožný jako u běžných kondenzátorů, kde je energie akumulována do elektrického pole nabitého kondenzátoru. Příkladem může být kondenzátor, který například slouží k uchování paměti v elektronických zařízeních, při výpadu napájení. Běžně se používají velkokapacitní kondenzátory na napětí U = 24 V s kapacitou C = 1,2 F. Velikost energie do takto nabitého kondenzátoru je možno vypočítat známým vzorcem W = (1/2)CU2 ≈ 345 J (tento vztah platí i pro superkapacitory).

Elektrody superkapacitorů jsou vyrobeny ze speciálního materiálu, který vyniká velkou plošnou hustotou. Je jím práškový uhlík, který je nanesený na hliníkové fólii. O ploše v poměru k hmotnosti cca 2 000 $m^2 \cdot g^{-1}$. Prostor elektrod, který odděluje polypropylenová fólie, je vyplněn tekutým elektrolytem. Napětí jednoho článku je zhruba 2,5 V, sériovým řazením článků je možné akumulovat energii s vyšším napětím. Superkapacitory mají malý sériový odpor, tudíž jsou vhodné pro rychlé dodávky i odběry energie. V současné době se můžeme setkat s kapacitami superkondenzátorů v rozmezí 2 – 3 000 F (při napětí článku 2,5 V [1].



Obr. 3.5[1]: Schéma vnitřního uspořádání a modul superkapacitoru

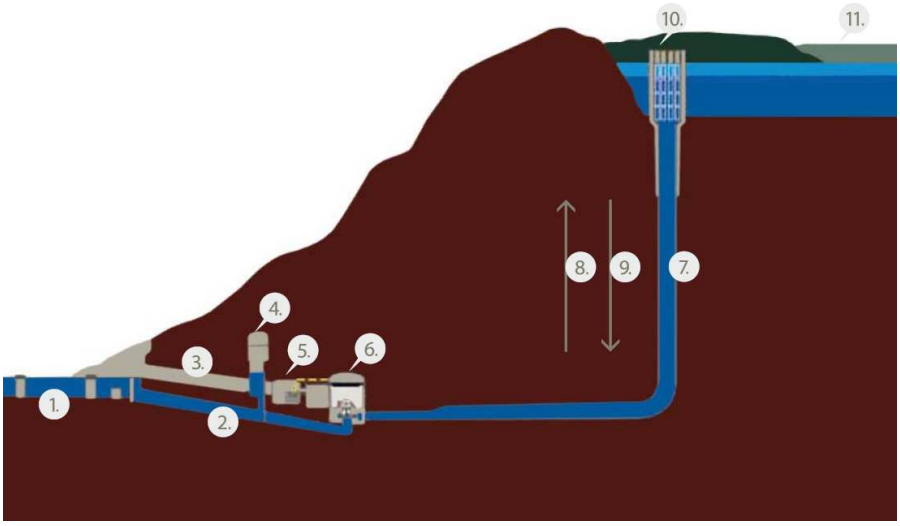
Superkapacitory mají široké využití. Dnes jsou běžně využívány v elektromobilech, kde je využíváno jejich hlavních vlastností, a to rychlé akumulaci energie při rekuperaci během brzdění, nebo naopak k rychlému dodání velké energie při zrychlování automobilu. Dalším vhodným použitím je oblast obnovitelných zdrojů a to především v oblasti fotovoltaiky. Zde jsou využívány především jako vyrovnávací akumulátory energie pro menší systémy spojené na síti. Vývoji a výzkumu superkapacitorů jsou v posledních letech věnovány nemalé finanční prostředky. Lze tedy očekávat další rozvoj, a možnost konkurovat klasickým elektrochemickým akumulátorům, především v ostrovních fotovoltaických systémech.

Nepřehlédnutelnou výhodou superkapacitorů je relativně vysoká účinnost akumulace, a to až 95%. Nevýhodou je však poměrně vysoká cena, která ale s objemem zavedení v průmyslu a sérové výroby bude klesat.

3.6 Přečerpávací vodní elektrárna

Přečerpávací vodní elektrárna je nejběžnější metodou pro akumulaci velkého množství elektrické energie. Princip je zdánlivě jednoduchý, zapotřebí jsou dva vodní rezervoáry, kde jeden musí být umístěn výše než druhý. Oba jsou vhodně propojeny potrubím s turbosoustrojím, které je spojeno s elektrickým generátorem, který v okamžiku nedostatku elektřiny přeměňuje, průtokem vody z horní nádrže přes turbosoustrojí, potenciální energii vody na elektřinu. V době přebytku elektřiny je voda čerpána z dolní nádrže do horní. Generátor zde pak převezme funkci elektromotoru. Takto je v podstatě elektřina ukládána do potenciální energie vody horní nádrže. Účinnost přečerpávacích vodních elektráren dosahuje až 75%, to znamená, že na akumulaci 1 kWh je nutné vynaložit cca 1,3 kWh v čerpacím režimu.

Mezi výhody PVE patří velké výkony, u nás například Dlouhé stráně s výkonem 2x325 MW a možnost akumulovat energii po dlouhou dobu (v řádech hodin). Ročně tak díky takto instalovanému výkonu ušetří naše hospodářství 2,5 tuny uhlí a 60 kg oxidu siřičitého za každý instalovaný kW, který by museli dodat tepelné elektrárny. Nové PVE jsou schopné najet na plný výkon během 60 sekund a podle velikosti nádrže jsou schopné ho dodávat 4-10 hodin. Hlavní nevýhodou je potřeba vhodných lokalit s dostatečně velkým převýšením a prostorem pro obě nádrže. Znamená to obětování poměrně velké plochy jedinému účelu. V rovinách, nebo hustě osídlených oblastech je tedy výstavba nemožná. Uvažované vhodné lokality pro výstavbu nových PVE jsou uvedeny v kapitole 5.5.



Obr. 3.6[21]: Modelové schéma PVE

Vysvětlivky k obr. 3.6:

1 – dolní nádrž,

2 – odpadní tunely,

3 – hlavní přístupový tunel,

4 – vyrovnávací komora,

5 – transformátorová kaverna,

6 – kaverna s reverzními turbínami,

7 – jeden nebo více přivaděčů - tlaková potrubí ve štolách,

8 – akumulace (čerpadlový provoz),

9 – výroba el. Energie (turbínový provoz),

10 – horní vtokový objekt,

11 – horní nádrž.

3.7 Systémy CAES

CAES systémy (Compressed Air Energy Storage – skladování energie stlačením vzduchu) jsou variantou elektráren s plynovou turbínou. Plynová turbína pro svůj provoz potřebuje přívod stlačeného vzduchu do spalovací komory. Běžně je využíván lopatkový kompresor na hřídeli turbíny, ten ale spotřebuje okolo 2/3 výkonu této turbíny.

Princip je tedy podobný jako u přečerpávací vodní elektrárna. Zde je ale přebytečnou energií poháněn kompresor, který tak stlačením vzduchu ukládá

přebytečnou elektřinu do dobře utěsněných objemných prostor. Elektřina je tedy kompresorem přeměněna na tlakovou energii vzduchu, který je skladován pod tlakem v rozmezí 5 až 7,5 MPa. Pro tyto účely může být využit umělý zásobník, ale i přírodní kaverny, solné doly apod.

V okamžiku potřeby se uložený stlačený vzduch pod tlakem okolo 6 MPa vpustí do spalovací komory spolu s přídavkem plynu, který se podílí na elektrickém výkonu turbosoustrojí pouze 1/3.

První CAES elektrárna uvedená do průmyslového provozu by postavena v německém Hundorfu v roce 1974. Vzduch je ukládán do dvou hlubinných solných jeskyň o objemu 150 000 m^3. Plynová turbína je pak schopna disponovat výkonem 290 MW po dobu tří hodin. Další svého druhu byla postavena v Alabamě v USA s výkonem 110 MW. Díky ztrátám tepla při stlačování vzduchu nepřekračuje účinnost 55%. Pokud má být dosaženo vyšší účinnosti, je nutné teplo vznikající při kompresi vzduchu uchovat a při expanzi ho plynu vrátit. Jinak nám energie, která vyprchá v podobě tepla, bude chybět ve chvíli, kdy budeme chtít stlačený vzduch znovu použít jako zdroj energie. Jednou z možností je, že necháme teplo vyprchat a následně pak studený plyn ohřejeme, například hořáky se zemním plynem. Druhou možností je tepelně izolovat tlakový zásobník, to ale lze pouze u malých systémů. Třetí možností je oddělené skladování tepla vzniklého při kompresi. Další nevýhodou CAES systému je relativní nebezpečnost tlakových zásobníků, které mají tendenci při sebemenším poškození uvolnit naráz obrovské množství uskladněné energie. Řešením je skladování vzduchu v kesonech na dnech jezer nebo moří. Podrobnější popis funkce CAES systému je uveden v kapitole 4.3.

4. Využití stlačeného vzduchu pro akumulaci

Stlačený vzduch se vyrábí stlačením atmosférického vzduchu pomocí kompresoru. Kompresory lze dělit na mnoho druhů, podle principu stlačování, na nejrozšířenější pístové, šroubové lamelové spirálové a další.

4.1 Využití stlačeného vzduchu

Stlačený vzduch je používán v mnoha průmyslových odvětvích a to především v dělnictví, hutnictví, laboratořích, nemocnicích, elektrárnách a dalších. Bez stlačeného vzduchu se neobejde ani výroba potravin, papíru, skla, textilu, při zpracování dřeva ale například i při výrobě léků. Stlačeným vzduchem je poháněno nespočet různých přístrojů a strojů. Výhodou pneumatických nástrojů, oproti elektrickým, je především jejich váha. Při dlouhodobém používání je znatelný každý ušetřený gram váhy, především u ručního nářadí. Porovnání velikosti motoru na stlačený vzduch a elektromotoru, stejných výkonů, je uvedeno na obr. 4.1.

Obr. 4.1[11]: Elektromotor a motor na stlačený vzduch stejných výkonů

Neméně zajímavé je také využití stlačeného vzduchu jako „paliva“ pro automobily. Tyto systémy by pomohli především ke zlepšení v ovzduší ve velkých městech, podrobněji popsaným v kapitole 6. Dalším, podrobněji popsaným systémem v kapitole 4.3, který využívá stlačený vzduch pro akumulaci elektrické energie, je systém CAES (Compressed Air Energy Storage – skladování energie stlačením vzduchu).

4.2 Složení stlačeného vzduchu

Stlačený vzduch, z atmosféry, v nižších vrstvách, se skládá především ze 78% dusíku, 21% kyslíku, a 1% jiných plynů. Podrobnější seznam je uveden v tab. 4.1 a fyzikální vlastnosti vzduchu při teplotě 0° a tlaku 1,01325 bar tab. 4.2.

Tab. 4.1[32]: Složení vzduchu

plyn	objem %	hmotnost %
dusík	78,09 %	75,51 %
kyslík	20,95 %	23,16 %
argon	0,93 %	1,28 %
oxid uhličitý	0,033 %	0,05 %
neon	0,001 8 %	0,001 2 %
helium	0,000 524 %	0,000 072 %
metan	0,000 2 %	0,000 1 %
krypton	0,000 114 %	0,000 3 %
vodík	0,000 05 %	0,000 001 %
xenon	0,000 0087 %	0,000 04 %

Tab. 4.2 [32]: Fyzikální vlastnosti vzduchu při 0°C a 1,01325 bar

Vlastnost	Jednotka	Rozměr	Hodnota
Molární hmotnost	Mm	g/mol	28,96
Molární objem	Vm	dm^3/mol	22,40
Plynová konstanta	r	J/kg.K	287,10
Hustota	ρ	kg/m^3	1,29
Měrná tepelná kapacita (0 °C)	c	kJ/kg.K	1,01
Izoentropický exponent	κ=cp/cv	-	1,40
Teplota tání	tt	°C	-213,4
Teplota varu	tv	°C	-194,5

4.3 Systémy CAES

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.7 v přehledu možných systémů akumulace elektrické energie. Hlavní myšlenkou CAES systémů je ukládání přebytků energie pomocí stlačeného vzduchu, a následné použití v době odběrových špiček.

4.3.1 Princip funkce CAES

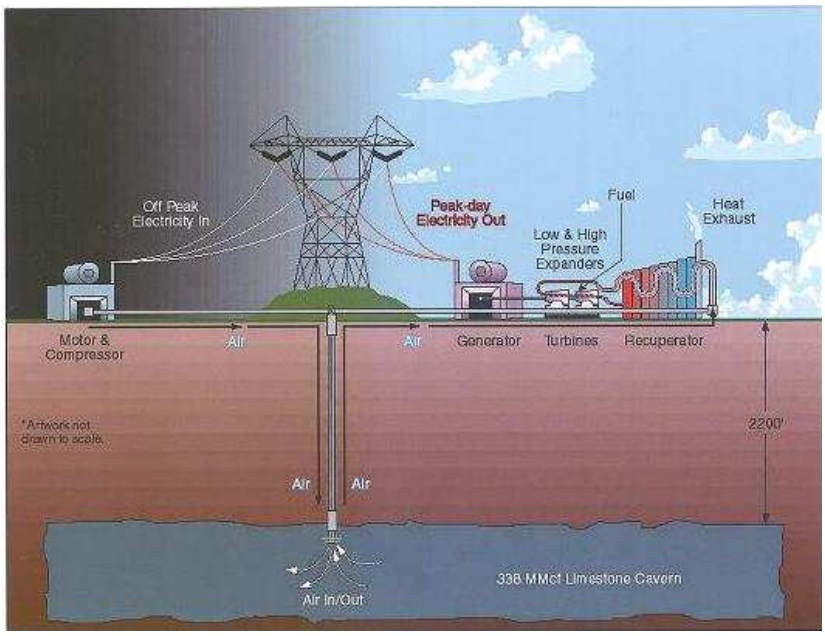
Atmosférický vzduch je vícestupňovým kompresorem adiabaticky stlačen a uložen pod tlakem 5 - 7,5 MPa v tlakovém zásobníku. Pro tyto účely se využívají především vytěžené doly a solné jeskyně. Stlačováním vzduchu dochází k jeho zahřívání, proto se během komprese musí chladit vzduchotechnické zařízení a zároveň vzduch samotný. Zabrání se tím možnému poškození kompresorové jednotky i stěn tlakového zásobníku. V době odběrových špiček je stlačený vzduch vypouštěn do spalovací komory a zároveň přihříván spalováním paliva. V turbíně poté expanduje směs vzduchu a spalin, která pohání alternátor. Vzduch je nutné před expanzí přihřívat jelikož entalpie je dána součtem vnitřní a vnější energie. A je definována vztahem,

$$i = u + p\,v \tag{4.1}$$

její možnost přeměny je tedy omezena staven okolí. Tedy tlakem vnější energie (p_0) a teplotou vnitřní energie (T_0). Lze tedy využít jen část energie obsažené ve stlačeném vzduchu. Ze vztahu (4.2) lze určit výkon turbíny

$$P = Q_m \cdot (i_1 - i_2). \tag{4.2}$$

Výkon je tedy dán hmotnostním průtokem vzduchu Q_m a rozdílem vstupní entalpie i_1 a výstupní entalpie i_2. Vlivem nízké teploty akumulovaného vzduchu, který je dám teplotou stěny tlakové nádrže (např. solné jeskyně) je při expanzi vzduchu přeměna entalpie omezena a výkon turbíny by byl malý. Turbína by, pro dosažení stejného výkonu, potřebovala mnohem větší průtok vzduchu, jak plyne z rovnice (4.2). To znamená, že na pohon kompresorů by bylo spotřebováno daleko více mimošpičkové energie, a tím se i snížila účinnost celého systému. Zároveň by nepřihřátý vzduch, který může při výstupu dosahovat teplot kolem -170 °C, mohl způsobovat námrazu na ostří turbíny a to i přes malou specifickou vlhkost při vysokém tlaku vzduchu. Při takto nízkých teplotách se mohou stát díly turbíny křehkými a může tak dojít poškození celého soustrojí. Výstupní teplota vzduchu dosahuje až -171 °C při expanzi ze 4 MPa a 20 °C [4].



Obr. 4.2[12]: Princip funkce CAES

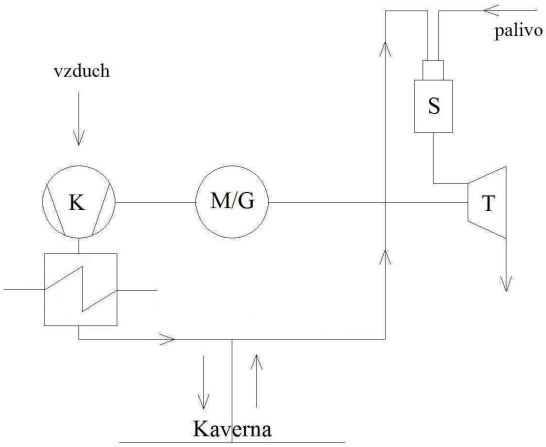
Překlad k obr. 4.2:

- off-peak electricity in – mimošpičkový odběr elektřiny,
- peak-day electricity out – dodávka špičkové elektřiny,
- low & high pressure expanders – nízkotlaká a vysokotlaká turbína,
- fuel – palivo,
- heat exhaust – odvod spalin,
- motor+compressor – motor+kompresor,
- air in/out – vstup/výstup vzduchu,
- generator – generátor,
- turbine – turbína,
- recuperator – rekuperátor (výměník tepla),
- limestone cavern – vápencová kaverna.

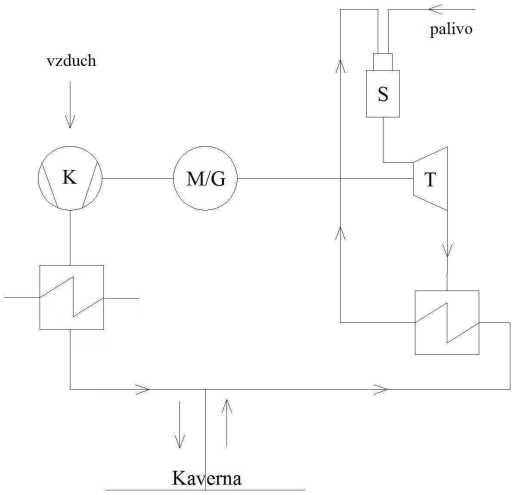
4.3.2 Pracovní oběhy CAES

Oběhy akumulačních elektráren CAES lze rozdělit na tři typy, dle závislosti na využití tepla vznikajícího při kompresi vzduchu. Při akumulaci je stlačován vzduch z atmosféry a při vypouštění je uvolňován zpět. Jedná se tedy o otevřené oběhy. První, nejjednodušší, oběh CAES elektrárny je zobrazen na obr. 4.3. V tomto oběhu je vzduch izotermicky stlačován do podzemní kaverny kompresorem (K), který je poháněný

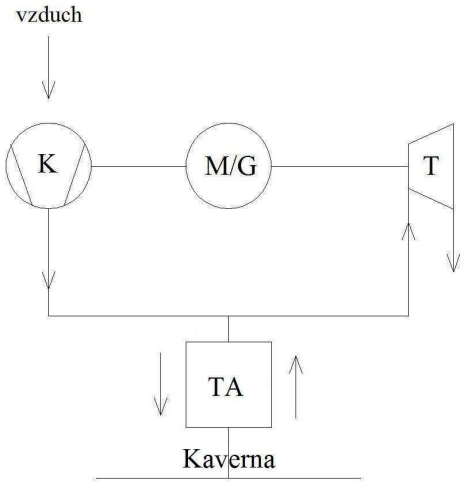
motorgenerátorem (MG) pracujícím v motorovém režimu. Teplo vznikající při kompresi není nijak využito, pouze je odvedeno pryč z akumulačního systému, aby vlivem vysokých teplot nedošlo k poškození kompresní jednotky a zásobníku stlačeného vzduchu. V době energetických špiček je stlačený vzduch vypouštěn do spalovací komory (S) a zároveň přihříván spalováním paliva. Směs pak expanduje v turbíně (T), která pohání motorgenerátor (M/G). Motorgenerátor, pracující v režimu generátoru, tak následně z akumulovaného vzduchu vyrábí zpět elektřinu. Jak vzniklá teplota při kompresi, tak i vysoká teplota spalin za turbínou, je bez užitku vypuštěna do okolí. Na obr. 4.4 je oběh podobný předcházejícímu, ale s tím rozdílem, že za turbínou je zařazen rekuperační výměník tepla. Tato rekuperovaná energie je využívána k ohřátí vzduchu vstupujícího do spalovací komory. Tím se zvyšuje účinnost celého oběhu a snižuje množství paliva, které by bylo potřebné k ohřátí stlačeného vzduchu před spalovací komorou. Oběh na obr. 4.5 se od předcházejících dvou liší především tím, že pro provoz tohoto CAES systému, není potřeba spalování paliva. Spalovací komora v tomto systému vůbec není. Tento systém využívá teploty vzniklé při kompresi vzduchu, kterou ukládá do vysokoteplotních akumulátorů (TA). Tato energie je pak využita pro ohřátí vzduchu před vstupem do plynové turbíny, kde expanduje pouze vzduch. Tento oběh, na rozdíl od předcházejících dvou, nebyl ještě uveden do praxe. Je uváděn pod zkratkou AA-CAES (Advanced adiabatic – compressed air energy storage) [4].



Obr. 4.3[4]: Základní oběh CAES



Obr. 4.4[4]: Základní oběh CAES



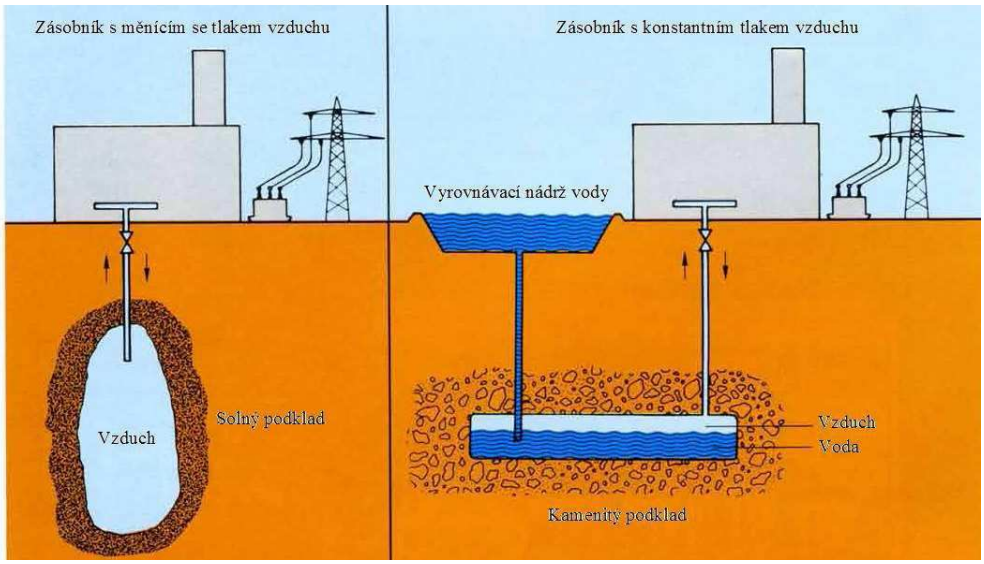
Obr. 4.5[4]: Oběh AA-CAES

4.3.3 Zásobníky stlačeného vzduchu

Pro akumulování stlačeného vzduchu se mohou využívat tři základní typy zásobníků, v závislosti na struktuře a složení daného podloží. Prvním a ekonomicky nejméně nákladným typem jsou reservoáry vzniklé rozpuštěním solných hornin. Skladovací náklady se zde mohou pohybovat kolem $ 2 za kWh. Druhou možností je vytvořit reservoár v kamenitém podloží. Zde jsou ale náklady spojené s těžbou mnohonásobně vyšší. Pohybují se kolem $ 30 za kWh. Tyto náklady lze snížit v případě využití vytěžených dolů, kde se budou náklady pohybovat kolem $ 10 za kWh. Posledním typem pro vytvoření reservoáru je porézní skála. Hlavní předností tohoto podloží jsou nízké náklady na vytvoření zásobníku, které jsou přibližně $ 0.11 za kWh. Na tomto porézním podloží byla několik let v provozu testovací CAES elektrárna o výkonu 25 MW. Ale i přes úspěšné testy byla uzavřena, jelikož došlo k narušení geologického podloží [5].

Podzemní kaverny jsou pro ukládání stlačeného vzduchu vhodné především z technického, ale i ekonomického hlediska. Velké povrchové zásobníky jsou téměř nerealizovatelné a příliš nákladné. Jak je patrné z obr. 4.6 dají se také zásobníky rozdělit na zásobníky s měnícím se tlakem stlačeného vzduchu a na zásobníky s konstantním tlakem. Zásobníky s proměnným tlakem, během čerpání, jsou ekonomičtější na výstavbu díky solnému podloží. Nevýhodou je však již zmiňovaný pokles tlaku během čerpání, kdy se poklesem tlaku zároveň snižuje výkon. Tento problém se řeší

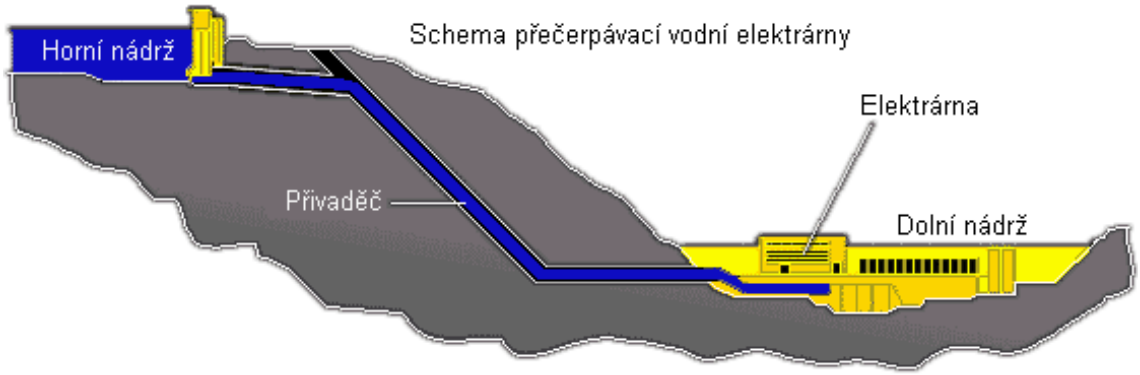
redukováním tlaku na vstupu do turbíny, to ale ovšem způsobuje ztráty. Provoz turbíny, při poklesu tlaku vzduchu v zásobníku pod hranici tlaku potřebnou pro provoz turbíny, je její provoz dále nemožný. Tento problém je u zásobníku s konstantním tlakem vyřešen vodní vyrovnávací nádrží umístěnou nad zemí. Tato nádrž tak udržuje konstantní tlak v zásobníku. Oproti předcházejícímu typu mají tyto zásobníky zhruba 1/4 objemu (objem zásobníku v solném podloží se pohybuje kolem 500 000 m^3). Protože je ale téměř celý objem stlačeného vzduchu použit na výrobu a nevznikají ztráty regulací a změnami ve stlačeném vzduchu, jsou i při rozdílném objemu schopny dodávat stejný výkon.



Obr. 4.6[4]: Zásobníky stlačeného vzduchu

5. Systémy sloužící k akumulaci elektrické energie na území ČR

Vzhledem k možnostem skladování elektrické energie, na území České republiky, respektive její akumulaci v podobě jiné energie. Využívány jsou převážně vodní přečerpávací elektrárny, které navíc v elektrizační soustavě plní hned tři významné funkce. Funkci statickou, dynamickou a kompenzační. Statická funkce je využívána zejména v nočních hodinách, kdy je v soustavě přebytek energie. Tato nadbytečná energie je využívána k přečerpávání vody z dolní nádrže do horní a v době nedostatku elektřiny je v turbínovém režimu vyráběna zpět elektrická energie. Dynamickou funkcí se rozumí převážně výkonová rezerva systému, dále pak regulační výkon a schopnost podílet se na řízení kmitočtu soustavy. Poslední funkcí je kompenzační provoz, který slouží k regulaci napětí v soustavě. Modelové schéma PVE je uvedeno v kapitole 3.6.



Obr. 5.1[27]: Schéma přečerpávací vodní elektrárny

5.1 Černé Jezero

První přečerpávací vodní elektrárna vznikla ve 20. letech 20. století na Černém jezeře na Šumavě. V tehdejším Československu byly investorem Západočeské elektrárny, dodavatelem a projektantem technologie pak Škodovy závody v Plzni. Přečerpávací elektrárna byla uvedena do provozu v roce 1930 a byla poháněna Peltonovou turbínou o výkonu 1 500 kW. Na turbínu je vháněna voda z přívodního potrubí o délce 1266 m a světlosti 800 mm s průtočným množstvím 800 l/s. Tlačné potrubí má délku 1007 m se světlostí 560-600 mm, při maximální výkonu je zpět tlačeno 400 l/s. Spodní vyrovnávací nádrž o objemu 23 000 m^3 je umístěna na řece Úhlavě. Užitečný objem spodní nádrže, který odpovídá možnému kolísání hladiny vody

v rozsahu 2 m, je 15 000m^3. Tato zásoba vody umožňuje 10-ti hodinový čerpadlový provoz denně a pak následný 5-ti hodinový provoz výroby elektřiny. Navýšení výrobních hodin, lze pak dosáhnout díky přirozeným přítokům černého Jezera. Tento provoz způsobí kolísání hladiny jezera o 8 - 9 cm (povolené kolísání: +30/-50 cm). Čerpadlový provoz je ale od roku 1960 omezen.

Obr. 5.2[17]: Přečerpávací vodní elektrárna Černé Jezero

5.2 Dlouhé Stráně

Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně, leží v katastru obce Loučná nad Desnou, v okrese Šumperk. Elektrárna má dvě reverzní turbosoustrojí, každé o výkonu 325 MW. Francisova turbína dosahuje výkonu až 325 MW při turbínovém provozu a 312 MW při čerpadlovém režimu, převýšení zde dosahuje 510,7 m. Dolní nádrž o objemu 3,4 mil m^3 leží na říčce Divoká Desná. Horní nádrž o objemu 2,72 mil. m^3 se nachází na hoře Dlouhé stráně. Elektrárna je schopna najet na plný turbinový výkon do 90 sekund od obdržení povelu z dispečinku.

Výstavba elektrárny byla zahájena v květnu 1978, avšak do provozu byla uvedena až v roce 1996, jelikož na počátku 80. let byla stavba převedena do útlumového programu. Po tomto odkladu byla elektrárna v roce 1985 modernizována a po roce 1989 bylo rozhodnuto o jejím dokončení.

Obě soustrojí elektrárny jsou umístěny v podzemí, v kaverně o rozměrech 87,5 x 25,5 x 50 m. V podzemí je také zároveň umístěna transformátorová komora o rozměrech 115 x 16 x 21,7 m, tato komora poskytuje prostor pro dva blokové trojfázové transformátory rozvodny 22 kV. Na povrchu je pouze velín se správní budovou, zapouzdřená rozvodna 400 kV a přidružené objekty jako dílny, sklady, úpravna vody, čistírna odpadních vod a garáže.

Obr. 5.3[28]: Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně (horní nádrž)

Obr. 5.4[29]: Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně (letecký pohled)

5.3 Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice

Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice leží na řece Jihlavě a nedaleko Jaderné elektrárny Dukovany. Vodní dílo Dalešice zde bylo vybudováno v souvislosti již zmiňované jaderné elektrárny, pro kterou zajišťuje technologickou vodu a zároveň vytváří spád a obsah 127 mil. m^3 pro přečerpávací vodní elektrárnu Dalešice. Jako vyrovnávací nádrž zde slouží nádrž Mohleno s objemem 17,1 mil. m^3, která slouží i jako průtočná vodní elektrárna s výkonem 1,2 MW a 0,6 MW.

Výstavba vodního díla začala v roce 1970 a byla dokončena po osmi letech v roce 1978. U paty 100 m vysoké hráze je umístěna přečerpávací vodní elektrárna a rozvodna s blokovými transformátory, které slouží pro transformaci napětí generátorů (použity jsou synchronní generátory s napětím 13,8 kV) na napětí 420 kV. V přečerpávací elektrárně jsou použity 4 turbosoustrojí s reverzními Francisovými turbínami, na které je vháněna voda ze čtyř ocelových potrubí, které spojují vtokový objekt s elektrárnou. Vtoky i výtoky jsou vybaveny hradidly, česlemi a potřebnými mechanizmy pro regulování průtoku vody. Plného výkonu, 480 MW, může elektrárna dosáhnout do 60 sekund. Proto má i nezastupitelnou úlohu při regulaci výkonu a slouží i jako okamžitá poruchová rezerva. Elektrárna je plně automatizovaná a dálkově řízena z centrálního dispečinku v Praze.

Obr. 5.5[30]: Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice

5.4 Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice II.

Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice II. leží na řece Vltavě. Poprvé byla uvedena do provozu v roce 1947, v roce 1991 byl její provoz zastaven z důvodu zastaralého turbosoustrojí. Za svého 44 let dlouhého provozu vyrobila 1 650 GWh převážně špičkové energie. Výrobu zde zajišťovali dvě turbosoustrojí o výkonu 21 MW. V letech 1992 až 1996 proběhla modernizace PVE, která nadále využívá původní horní nádrž na kopci Homole. Odtud vedou ocelové přivaděče s průměrem 1,7 – 2 m a o délce 590 m, převýšení zde dosahuje až 220 m. Objem nádrže je 500 000 m^3. Zrekonstruovaná PVE nově využívá pouze jedno turbosoustrojí s Francisovou reverzní turbínou o výkonu 45 MW o průměru 2,2 m a s hltností 24 m^3 za sekundu.

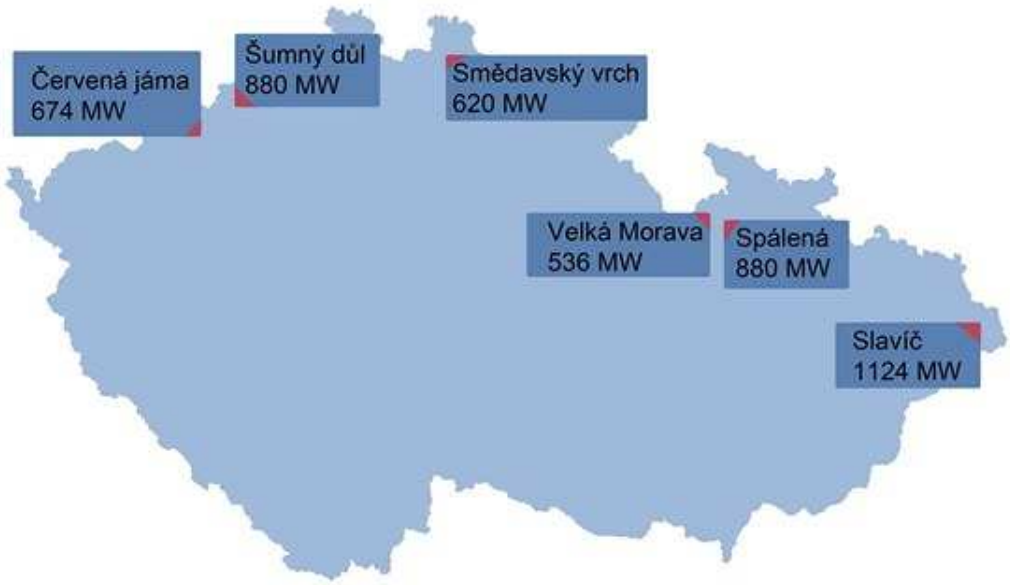
Obr. 5.6[31]: Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice II.

5.5 Možné lokality pro PVE

Vzhledem k neustále rostoucím potřebám regulačních výkonů je uvažováno o nových lokalitách PVE. Tento nárůst je nepochybně spojen s rozvojem obnovitelných zdrojů energie. V České republice především z fotovoltaických elektráren, kde výkon dosáhl 2000 MW. Tento výkon však není kontinuální, ale může kolísat v rozmezí zhruba 70%, to znamená, že v soustavě začne náhle „cestovat“ 1400 MW. Tento výkon, a to především jeho výpadek, není nezanedbatelný a musí se kompenzovat v rychlých intervalech. To je důvod pro uplatnění nových PVE nejen ČR, ale především i na evropském energetickém trhu, který je čím dál tím víc zasycen energií z obnovitelných zdrojů [16].

Všechna vytipovaná místa se nacházejí v horách, ve kterých profil terénu umožňuje dosáhnout potřebného převýšení mezi horní a dolní nádrží. Toto ale není jediná podmínka výstavby. Když opomeneme nemalé investiční prostředky, tak jsou s případnou výstavbou spojeny i další, neméně důležité faktory, jako zpracování vodního díla ve všech druzích územně plánovací dokumentace, souhlas dotčených obcí s projektem, a dalších diskusí na téma jako: poškozování rázu krajiny, chráněných území, fauně a flóře, přemisťování stavebního materiálu apod. Proto je výstavba nových PVE velice komplikovaná. Jedná se tedy prozatím pouze o vytipované lokality.

Nejvýznamnějšími lokalitami jsou: Šumný důl a Červená jáma v Krušných horách, Smědavský vrch v Jizerských horách, Spálená a Velká Morava v Jeseníkách, nebo Slavíč v Beskydech.



Obr. 5.7[16]: Možné lokality PVE

3.5.1 Slavíč

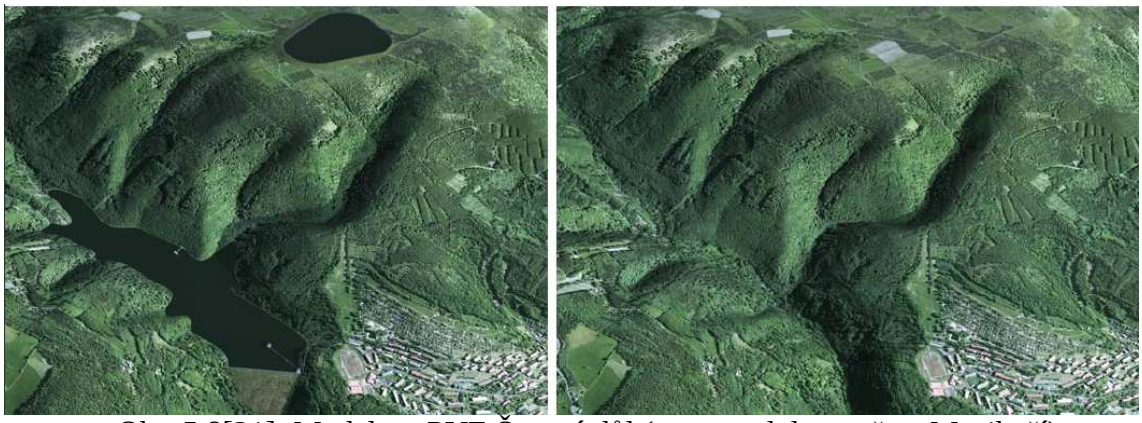
Slavíč, který leží u Frýdku-Místku, nedaleko přehrady Morávka v Beskydech, je jedna z nejvhodnějších lokalit. Již před zhruba 40 lety se zde plánovala velká vodní elektrárna, ale nakonec tehdy byla vybrána lokalita Dlouhé stráně. PVE Slavíč by mohl disponovat výkonem 1124 MW a zároveň tak být největší PVE v České republice. Realizaci nenahrávají jak investiční náklady ve výši cca 29 mld. Kč, tak ani Správa

Chráněné krajinné oblasti Beskydy a strach obyvatel ze snížení kvality vody a dalších faktorů spojených s výstavbou.

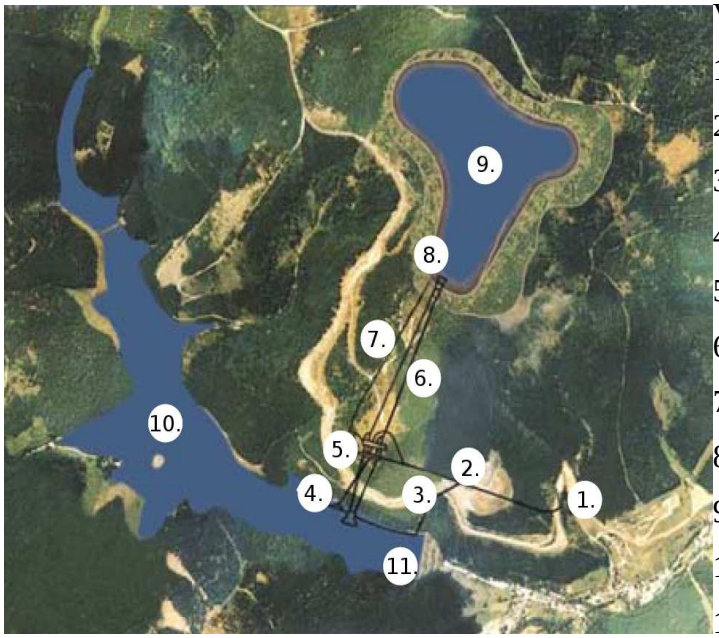
5.5.2 Šumný důl

Šumný důl leží v Krušných horách. Jako asi jediný má největší šanci na realizaci. Již před zhruba dvěma a půl lety začala podnikat první kroky k přípravě projektu PVE firma Synergion, následně pak ale projekt převzal nový investor společnost Energion. PVE o výkonu 880 MW, jejíž horní nádrž by měla být vybudována na kopci Studenec a Loučná v nadmořské výšce 900 m n.m.. Dolní nádrž o rozloze více než 40 hektarů s objemem cca 15 mil. m^3 by měla být investicí ve výši 27 mld. Kč. Pokud by došlo k realizaci, mohla by být dle odborníků zprovozněna už v roce 2020. Vše je ale zatím otázkou spekulací. Projekt by musel schválit Ústecký kraj (který by musel změnit územní plán), tak ministerstvo průmyslu a obchodu, a životního prostředí, jelikož je lokalita cennou přírodní oblastí.

Modelace možné podoby PVE firmy Synergion:



Obr. 5.8[21]: Modelace PVE Šumný důl (v pravo dole – město Meziboří)



Vysvětlivky k obr. 5.9:
1. řídící a správní budova,
2. hlavní přístupový tunel,
3. odpadní štoly,
4. spojovací tunel,
5. kaverny,
6. tlakové přivaděče,
7. větrací šachta,
8. vtokový objekt,
9. horní nádrž,
10. dolní nádrž,
11. přehradní hráz.

Obr. 5.9[21]: Modelace PVE Šumný důl (popis částí PVE)

5.5.3 Spálená

Horní nádrž přečerpávací vodní elektrárna by dle plánů mohla být postavena na hoře Spálený vrch, která leží v nadmořské výšce 1313 m n.m., nedaleko již fungující PVE Dlouhé stráně. PVE Spálená by také byla řešena stejným způsobem, to znamená, že horní nádrž by byla vyhloubena v hoře a spodní nádrž by byla řešena jako přehrada. Nádrže spojeny podzemním potrubím s převýšením cca 500 m, díky němuž by dosahovala výkonů 880 MW. Tato stavba by si vyžádala investici ve výši cca 27,5 mld. Kč. Výstavba přímo v centru Jeseníku se netěší oblibě ochráncům přírody, v blízkosti je totiž přírodní rezervace Šerák, a jedna PVE zde už stojí.

5.5.4 Červená jáma

Lokalita Červená jáma leží v Krušných horách, dle plánů by zde mohla být vybudována přečerpávací vodní elektrárna o výkonu 674 MW. Náklady spojené s výstavbou této PVE by se pohybovali kolem 23,5 mld. Kč.

5.5.5 Smědavský vrch

Smědavský vrch leží v Jizerských horách, mohla by zde být vybudována PVE o výkonu 620 MW. Výstavba této elektrárny by si vyžádala investici ve výši cca 21 mld. Kč. V případě zájmu investorů a odsouhlasení projektu by mohla být zprovozněna v roce 2025. Přestože by i podle odborníků mohla, zadržením vody, ochránit celou oblast před povodněmi, kterými je v posledních rocích postižena, i přes

tyto argumenty se výstavba nesetkala s kladnou odezvou u ochránců přírody a místních obyvatel.

5.5.6 Velká Morava

Velká Morava leží v masivu Králického Sněžníku a se Spáleným vrchem je druhým místem v Jeseníkách vhodným pro výstavbu PVE. Uvažovaná elektrárna o výkonu 536 MW a investicí ve výši 18.5 mld. Kč se nesetkává s kladným ohlasem. Kvůli stavbě elektrárny by se musel zrušit nedávno vybudovaný adrenalin park v nedaleké obci Dolní Morava a také nově vznikající horské středisko na pomezí pardubického a Olomouckého kraje.

6. Automobil na stlačený vzduch

Využití technologií rekuperace elektrické energie pomocí stlačeného vzduchu v praktickém životě máme hned několik, avšak nejzajímavější stojí určitě za zmínku pokus o standardizaci této technologie v automobilovém průmyslu. Hlavním představitelem této technologie je Lucemburská firma MDI (Motor Development International) která byla založena již v roce 1991. Od této doby proběhlo mnoho inovací, nejvíce však za přispění techniků z indické automobilky Tata motors s pomocí francouzských technologií. Výsledky možného použití jsou velice zajímavé pro svou jednoduchost a mobilitou řešení.

Vývojem automobilu poháněného stlačeným vzduchem se v Evropě zabývá například španělská společnost Air Car, nebo v jižní Africe společnost Phieco PTY. V Asii je to například firma Energine z Jižní Koreje, která nabízí hybridní vozidlo PMEV (Pneumatic Mobile Electric Vehicle), které využívá jak stlačeného vzduchu, tak elektrické energie k pohonu vozidla. V Severní Americe se na produkci automobilu podílí firma Scuderi z West Springfieldu v USA a uruguayská firma Regusci, která patentovala motor na stlačený vzduch ve spolupráci s University of Texas.

Firma MDI vyvinula nový motor schopný pohánět automobil rychlostí až 110 km/h. Dojezd takového auta je do 300 km na jedno natankování stlačeného vzduchu. Cena na jeden ujetý kilometr se pohybuje kolem 0,4 Kč, automobil při tom zároveň neprodukuje žádné výfukové zplodiny. Byl vyvinut také duální (hybridní) motor, který dokáže pohánět automobil rychlostí až 160 km/h a s dojezdem až 800 km. Cena těchto automobilů se pohybuje od 4 000 €. Palivo lze doplňovat v čerpacích-kompresních stanicích, nebo v domácnosti po připojení do elektrické sítě.

Vzhledem ke svým technickým parametrům a i k šetrnosti k životnímu prostředí, jsou tyto automobily vhodné především pro městský provoz a kratší cesty. V městských aglomeracích by tak tyto automobily pomohli ke zlepšení kvality ovzduší.

6.1 Princip funkce

Stlačený vzduch, zde považován jako „palivo“, je akumulován v nádobách z termoplastické vložky potažené uhlíkovým vláknem (obr. 6.1). Tyto nádoby, o celkovém objemu 300 litrů (dle typu vozidla), pojmou až 90 m^3 vzduchu stlačeného na 300 bar (30 MPa) [7]. Princip je tedy založen na stlačování vzduchu, a na rozpínání stlačeného vzduchu, který je „vstřikován“ do uzavřené oblasti válce. Rozpínání stlačeného vzduchu tlačí na píst a tím způsobuje pohyb automobilu.

Obr. 6.1[6]: Nádrž na stlačený vzduch

6.2 Motor na stlačený vzduch

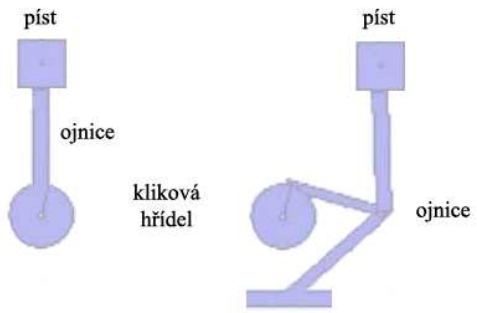
Společnost MDI uvádí, že v porovnání s většinou běžných automobilů poháněných spalovacími motory má vzduchový pístový motor daleko efektivnější termodynamiku a využívanou energii [6].

Motor ve fázi komprese nasaje prvním pístem profiltrovaný vzduch z okolí, stlačí jej na 20 bar, tímto tlakem se teplota stlačeného vzduchu ve válci zvýší na 400 °C. Ve fázi expanze, kdy je komora nejmenší, a píst ještě setrvává na místě, je do komory vstříknuto malé množství vzduchu z tlakových nádob. Vzduch z nádrží má venkovní teplotu (uvažujeme cca 20 °C). Stlačený vzduch ve válci se vzduchem z nádrží rychle ochladí a zvětší svůj objem. Před vypuštěním ochlazeného „spáleného“ vzduchu se otevře vysokorychlostní závěrka a nakrátko spojí komoru, kde proběhla komprese s komorou ve fázi komprese. Studený vzduch je vstříknut do horkého stlačeného vzduchu, rozdíl teplot je zde vyšší než ve fázi komprese, a cyklus se opakuje. Využívání tohoto tepla napomáhá k lepšímu využití energie stlačeného vzduchu a tím zlepšuje

účinnost a dojezd automobilu. V porovnání se spalovacími čtyřdobými motory, kde je polovina zdvihů využita na vtahování paliva a vzduchu do komory, je zde využit každý zdvih [8], viz příloha A.

Vzduchový motor využívá patentovaný systém přídavných ojnic, které dovolují pístu zastavit na určitou dobu, když dosáhne konce cyklu, zatímco se hřídel otočí o 70°. Tento systém tak umožňuje vytvořit expanzní komoru o konstantním objemu. Zvláštností tohoto motoru je také používání jedlého sójového oleje pro mazání motoru. Jelikož v motoru nedochází ke spalování, je jeho výměna nutná až po ujetí 50 000 km.

Obr. 6.2: Klikové mechanismy



6.2.1 Duální motor

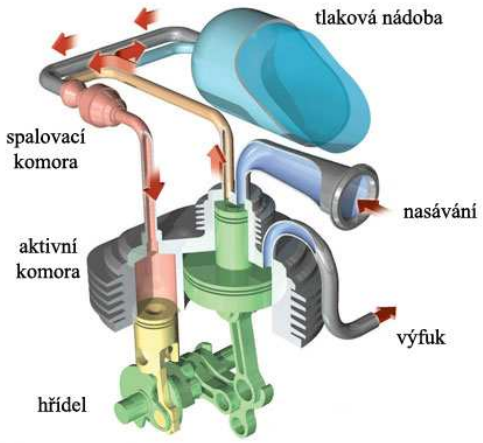
Pro zvýšení dojezdu automobilu, je využíváno systému duálního režimu motoru, který také umožňuje jízdu vozidla na fosilní, nebo bio paliva. Duální motor může pracovat ve čtyřech režimech.

- Pouze stlačený vzduch – do rychlosti 55 km/h je využíváno pouze stlačeného vzduchu z tlakových nádob. Do této rychlosti je nejmenší spotřeba stlačeného vzduchu vzhledem k ujetým kilometrům.
- Jednoduchý duální režim – ve spalovací komoře je předehříván stlačený vzduch, ještě před tím než je vstříknut do motoru.
- Autonomní duální režim – při rychlosti nad 55 km/h není vzduch v nádržích využíván. Motor vyrábí stlačený vzduch o pracovním tlaku. Tento vzduch je pak zahříván ve spalovací komoře, ještě před tím než je vstříknut do pracovního

válce. Systém může být využíván i při rychlostech pod 50 km/h, pokud jsou tlakové nádrže prázdné.

- Duální režim se zpětným plněním nádrží – část stlačeného vzduchu vyprodukovaného motorem, je využito k pohybu automobilu, jako v autonomním duálním režimu. Zbývajícím vzduchem se plní tlakové nádoby.

K popsání práce duálního motoru poslouží obr. 6.3. Po otevření přívodního ventilu, který je umístěn před spalovací komorou, tlačí vzduch o tlaku 30 bar na menší z obou pístů až do jeho dolní úvrati. Větší píst, díky systému přídavných ojnic, nadále setrvává v horní úvrati. Sací ventil je uzavřen. Stlačený vzduch je v horní části prvního pístu a v aktivní komoře, která je společná pro oba písty. Vzduch při expanzi tlačí na druhý, větší píst, který po dosáhnutí dolní úvrati vyfukuje, směrem nahoru, vzduch do atmosféry pod tlakem cca 1,2 bar.



Obr. 6.3[33]: Funkce duálního motoru

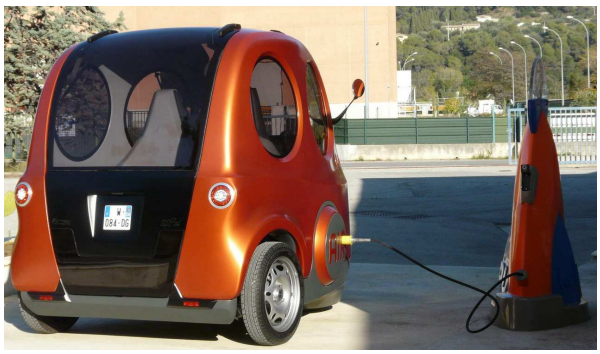
Velký píst je spojený s malým nástavcem na vrcholu. Tento nástavec funguje jako píst na stlačení vzduchu, který je využíván na výrobu části stlačeného vzduchu pro chod motoru. Tato část vzduchu pak expanduje přihříváním mimo motor. Pohybem většího pístu do dolní úvrati je nasáván vzduch, který je následně stlačen na 30 bar. Takto stlačený vzduch je tlačen přes spalovací komoru, kde je vyhříván při konstantním tlaku. Přivedená energie, v podobě tepla, způsobuje expanzi stlačeného vzduchu při konstantním tlaku, ještě před vstříknutím na horní stranu menšího pístu [6].

6.3 Možnosti tankování

Přestože je, dle odborníků, používání elektřiny ze sítě k dobíjení elektromobilů účinnější než používání elektřiny ke stlačování a skladování stejného množství energie v nádrži, lze účinnost celého systému zvýšit například využíváním odpadního tepla, vznikajícího při stlačování, k ohřevu vody v domácnosti. Další možností je naprogramování kompresorů tak, aby stlačovali a uskladňovaly vzduchu jen mimo špičku, popřípadě v době zvýšené dodávky energie z obnovitelných zdrojů [13].

6.3.1 Kompresní stanice

Nespornou výhodou, automobilu na vzduch, je rychlé doplnění tlakových nádrží ze zásobníků kompresní stanice, kde se doba plnění stlačeným vzduchem pohybuje kolem 3 minut [6].



Obr. 6.4[6]: Plnění z kompresní stanice

6.3.2 V domácnosti

Automobil je vybaven motor-alternátorem, který při jízdě využívá energii při brzdění a zpomalování. V domácnosti, po připojení do elektrické sítě (230 V), je motor-alternátor využíván k pohonu motoru na stlačený vzduch, který pak funguje jako kompresor pro plnění tlakových lahví vozidla. Doba plnění se pohybuje od 1,5 - 4,5 hodiny, dle typu automobilu.

Obr. 6.5[6]: Plnění z elektrické sítě

6.4 Konstrukce automobilu

Automobil je velice lehký a jednoduchý. Karoserie je vyrobena ze skelných vláken a vstřikované pěny. Podvozek je hliníkový, jednotlivé díly nejsou svařovány ale lepeny, tím je dosaženo jednodušší a rychlejší výroby. Šasi má válcovitý tvar, což dovoluje maximální tuhost karoserie při minimální váze. Pro snížení váhy vozidla je v automobilu jeden jediný kabel, tento patent je založen na využití malých rádiových vysílačů, jejichž signál je přijímán a transformován v každém elektrickém zařízení vozidla (ve světlech, ukazatelích směru, atd.). Tento systém redukuje váhu vozidla o cca 20 kg. Celková váha vozidla se pohybuje od 220 - 800 kg, dle typu. Na stránkách výrobce [6] jich můžete nalézt celkem 6, od malého městského typu pro 2 pasažéry až po vozidlo, které uveze až 6 pasažérů. Kvůli zvýšeným požadavkům na bezpečnost, vzhledem ke konstrukci vozidla, jsou záchranné pásy odlišné od těch, které známe u běžných vozidel. První fixní bod je na podlaze (jako u běžných vozidel), druhý fixní bod, je vzhledem ke konstrukci také na zemi (oproti běžným vozidlům, kde je uchycen na boční karoserii). V případě deformace vozidla není řidič, nebo pasažér stisknut-uvolněn pásem. U nejnovějších typů je implementován do sedadla, a podobá se tak uchycení bezpečnostního pásu jako u běžných vozidel.

Obr. 6.6[6]: Vozidlo MDI Airpod

6.5 Technické parametry automobilu

Zde uvedené technické parametry jsou pro automobil Airpod GT společnosti MDI dostupné z [6], kde je také další pět modelů aut na stlačený vzduch. Motor pro Airpod GT je 2 - válcový o objemu 430 ccm a hmotnosti nepřesahující 24 kg. Motor dokáže vyvinout 6 kW při 1 500 otáčkách za minutu. V rozmezí 200 – 1 500 ot/min disponuje konstantním točivým momentem 45 Nm. Automobil je také vybaven automatickou převodovkou, která reaguje na každou změnu rychlosti a zatížení, plynule přeřazuje, aby byl co nejefektivněji využit potenciál motoru a zároveň nízká spotřeba. Dojezd automobilu je velice závislý na rychlosti, viz tab. 6.5, čím vyšší rychlost tím kratší dojezd. Jedno naplnění nádrže vyjde na cca 50 Kč a koncová cena automobilu by se měla pohybovat kolem 175 000 Kč.

Tab. 6.1: Technické parametry automobilu Airpod GT

Technické parametry	jednotky
Objem palivové nádrže	200 l
Tlak skladovaného vzduchu	350 bar
Pracovní tlak motoru	20 bar
Min. Pracovní tlak motoru	10 bar
Délka	2.07 m
Šířka	1.60 m
Výška	1.75 m
Hmotnost [1]	330 kg
Užitečná hmotnost [2]	150 kg
Celková hmotnost	480 kg

Tabulka pokračuje na další straně.

Pokračování tabulky 6.1

Technické parametry	jednotky
Součinitel odporu	0.32
Valivý odpor [3]	0.011
Celková uskladněná energie	11.2 kWh
Využitelná energie [4]	10.8 kWh
Maximální výkon	6 kW
Spotřeba na volnoběh [5]	0 kW
Akumulovaná energie z brzdění [6]	0 %
Cena natankování [7]	0,5 - 0,8 €/100 km
Cena automobilu	7 000 €

Vysvětlivky k tab. 6.1:

1 – hmotnost s řidičem o váze 70 kg a s tlakovými nádobami naplněnými na 1/2,

2 – 2 spolujezdci o váze 70 kg + 10 kg zavazadlo,

3 – při použití nové „zelené“ pneumatiky se odpor sníží na 0.007,

4 – energie je vypočtena na základě pracovního tlaku motoru, pod hranicí využitelného tlaku, vzniká tato rezerva,

5 – při zastavení se zastaví i motor,

6 – při těchto výpočtech není počítáno s akumulovanou energii při brzdění,

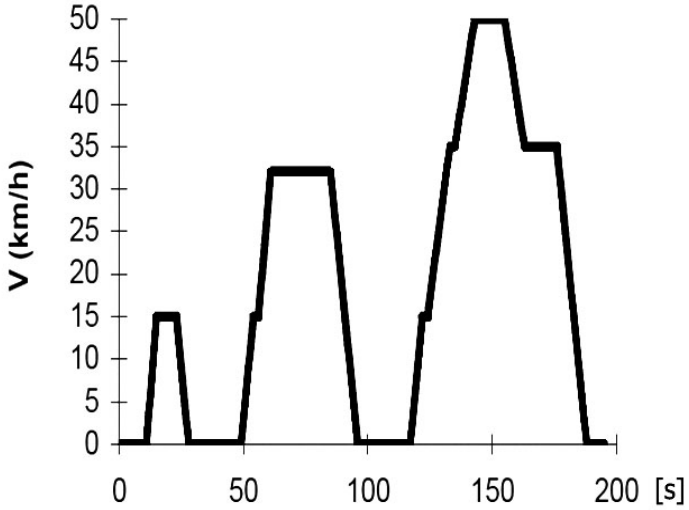
7 – při využití nočního proud.

6.5.1 Městský cyklus (CEE 195 s)

Test městského cyklu (CEE 195s) se skládá ze 4 shodných bloků. Každý je dlouhý 195 sekund a automobil během něj 3x akceleruje. Automobil akceleruje z klidu na 15 km/h, 32 km/h a 50 km/h. Celková délka městského cyklu je tedy 780 sekund. Během tohoto testu jede automobil nejvýše 50 km/h a ujede vzdálenost cca 4 km.

Tab. 6.2: Městský cyklus (CEE 195 s)

Průměrná rychlost	18.7 km/h	
Počet osob	1	3
Energie potřebná pro:		
Zrychlení	2.70 kW	3.92 kW
Valivý odpor	0.49 kW	0.72 kW
Aerodynamický odpor	1.18 kW	1.18 kW
Celková energie spotřebovaná v jednom cyklu	4.00 kW	5.30 kW



Obr. 6.7[6]: Městský cyklus (CEE 195 s)

6.5.2 Účinnost

Tab. 6.3: Účinnost systému

Účinnost kompresoru při plnění tlakových nádob	62 – 70 %
Hodnota skutečné účinnosti expanze v motoru	43 %
Mechanická účinnost	60 %
Celková účinnost na jedno naplnění tlakové nádoby	25 – 40 %

Tab. 6.4: Účinnost systému v praxi

Praktické výsledky	
Účinnost ve městě (pouze s řidičem)	45 – 71 %
Účinnost ve městě (plně naložený)	34 – 54 %

6.5.3 Dojezd automobilu

Jak bylo popsáno výše, dojezd automobilu je závislí na rychlosti. V následující tabulce je uveden dojezd při maximální rychlosti (81 km/h), konstantní (60 km/h) a ekonomické, kdy je dojez nejvyšší.

Tab. 6.5: Dojezd automobilu

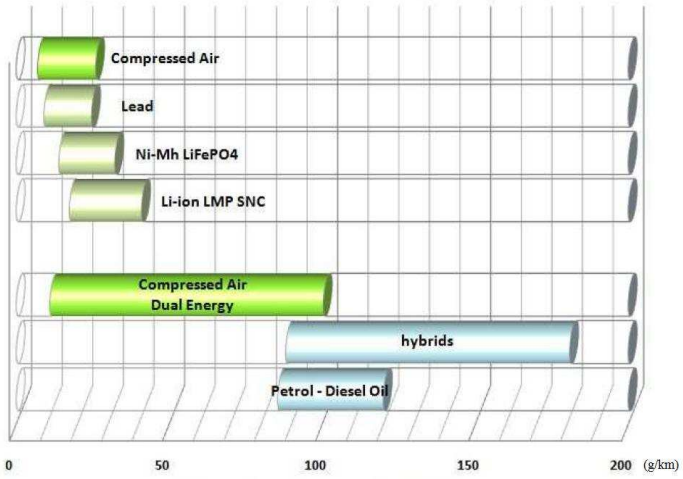
rychlost	dojezd
Automobil pouze s řidičem	
81 km/h	62 – 87 km
60 km/h	101 – 141 km
do 50 km/h (proměnlivá)	146 – 204 km
Automobil plně naložený	
do 50 km/h (proměnlivá)	112 – 156 km

6.6 Porovnání hodnot automobilů

Vysvětlivky k následujícím grafům, na obr. 6.7 až obr. 6.11:

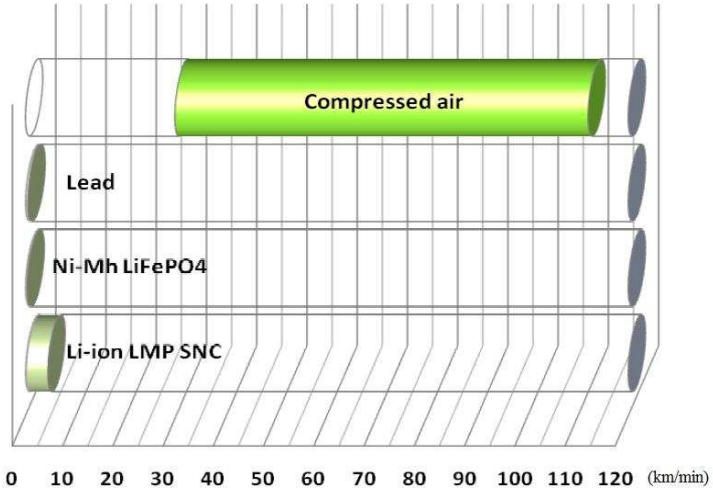
- compressed air – motor na stlačený vzduch,
- Lead, NiMH, LiFePO4, Li-ion – elektromobily využívající elektrické baterie,
- compressed air dual energy – duální motor na stlačený vzduch,
- hibrids – hybridní automobily využívající spalovací a elektrický motor
- petrol – diesel oil – zážehové a vznětové motory.

Následující graf zobrazuje vyprodukované emise CO_2, v gramech na ujetý kilometr. Pro automobil na vzduch, lze krátkodobě skladovat energii vyrobenou z obnovitelných zdrojů v kompresních stanicích, a tím napomáhat zvýšení účinnosti energie z obnovitelných zdrojů. Zvýšená produkce CO_2 u duálního motoru je dána přídavným předehříváním vzduchu předtím, než je vpuštěn do motoru.

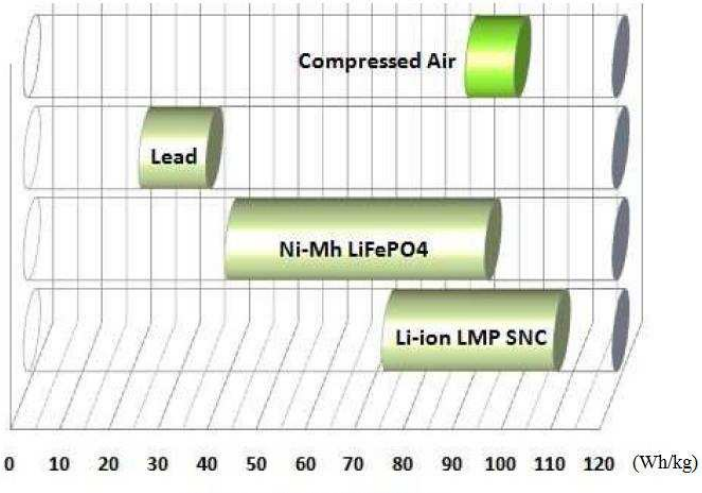


Obr. 6.7[6]: Vyprodukované emise CO_2

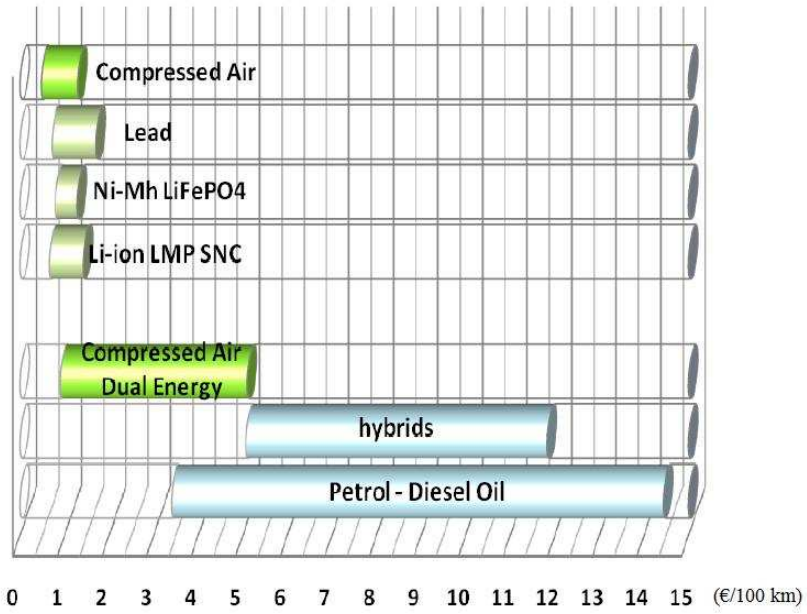
Graf na obr. 6.8 zobrazuje, jakou vzdálenost je možno ujet po jedné minutě tankování-nabíjení u ekologických vozů. U automobilu na vzduch je možné, pomocí kompresní stanice, naplnit celou nádrž během tří minut.



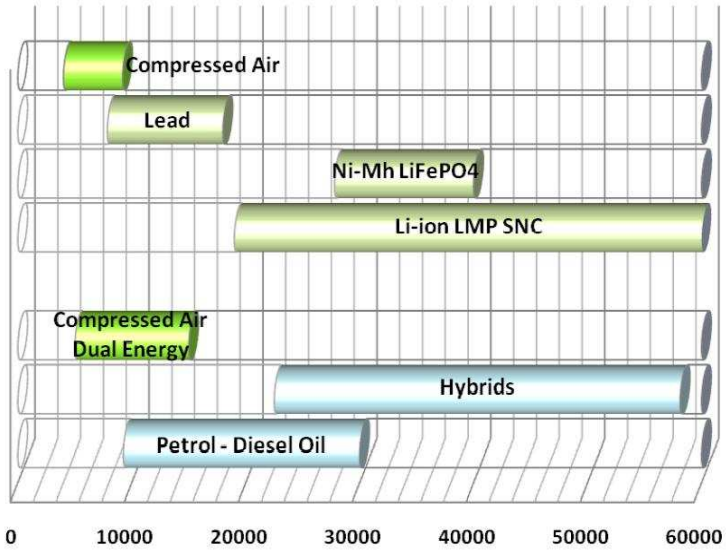
Obr. 6.8[6]: Vzdálenost, která je možná ujet po jedné minutě čerpání



Obr. 6.9[6]: Hustota energie na 1 kg



Obr. 6.10[6]: Náklady vynaložené na městský cyklus CEE 195s



Obr. 6.11[6]: Pořizovací náklady automobilů v eurech

7. Závěr

Akumulace elektrické energie by měla být nedílnou součástí její výroby, jelikož nemáme tak dokonalé zdroje energie, které by dokázali rychle a efektivně regulovat svůj výkon, dle potřeb odběratelů. Tím v době energetických odběrových špiček dochází k nedostatku elektrické energie, protože elektrárny velkých výkonů (v řádech 100 MW) nedokážou skokově, nebo v jednotkách minut měnit svůj výkon. Dochází tak k nedostatku energie, která musí být kompenzována – dodána jinými prostředky. Zde je tedy prostor pro využití naakumulované energie z dob jejího přebytku, jelikož elektrárny nedokážou rychle zvýšit svůj výkon ale ani snížit. Není tak, především v nočních hodinách, využit jejich potenciál, část výkonu a celý systém je tak méně efektivní.

Dalším důvodem, proč akumulovat, je energie z obnovitelných zdrojů. Jsou to například větrné, nebo fotovoltaické elektrárny, které vyrábějí elektřinu převážně, když je jí nejméně potřeba, nebo v důsledku nevyzpytatelného počasí, dochází k masivním výpadkům této energie. Například větrná farma o výkonu v řádech 10 až 100 MW, přestane tento výkon náhle dodávat, protože, jednoduše řečeno, přestal foukat vítr. Tento výkon se musí kompenzovat záložními zdroji, nebo akumulovanou energií z dob jejího přebytku.

Z přehledu, v kapitole 3., je vidět, že možností akumulace elektrické energie je celá řada a o ukládání elektrické energie je dlouhodobý zájem. Zároveň je ale také vidět, že žádná z těchto možností zatím není vhodná pro dlouhodobé a především levné akumulování velkého množství energie. Jednou z možností akumulace velkého množství energie je ve stlačeném vzduchu, tedy systém CAES. Tento systém má nízké náklady na výstavbu akumulačních rezervoárů, velké množství vhodných lokalit pro výstavbu a všudypřítomnost vzduchu, který je zde akumulačním médiem. Ovšem největší nevýhodou této technologie je nízká účinnost, která se pohybuje kolem 54%. Zlepšení účinnosti, až na 70%, nabízí nový typ technologie využívající stlačeného vzduchu, a to systém AA-CAES. Tento systém je prozatím ve fázi výstavby (projekt ADELE), a měl by být dokončen v roce 2013. Nejlepším způsobem tedy zůstává využívání přečerpávacích vodních elektráren. Vzhledem k nedostatku vhodných lokalit

pro výstavbu, je jejich počet velice omezený a stavba nových je velice problematická. Zbylé možnosti akumulace energie z přehledu v kapitole 3. nejsou vhodné pro akumulování velkého množství energie, nebo zatím fungují v laboratorních podmínkách, jsou ve fázi funkčního vzorku, nebo prototypu.

Součástí práce mělo být navrhnutí vlastní instalace akumulace energie pomocí stlačeného vzduchu. I přes nepřeberné množství možností využití stlačeného vzduchu, jsem si vybral využití stlačeného vzduchu pro pohon automobilu, který se jeví jako levná funkční konkurence elektromobilů. Tato technologie je velmi atraktivní pro krátké, pomalé a přerušované jízdy. Například v pro cestování ve městě, ale i na golfových hřištích, uvnitř velkých areálů a všude tam, kde se tyto automobily budou stále pohybovat kolem kompresních stanic. Naplnění nádrže stojí cca 50 korun, i když budeme brát v úvahu reálný - poloviční dojezd automobilu, tedy 100 km, myslím si, že je to levná a vhodná alternativa pro cestování po městě, nebo denní dojíždění do práce. Jde především o to, aby se cestovalo co nejlevněji a automobil přitom také produkoval co nejméně zplodin.

8. Použitá literatura – zdroje

[1] MAREŠ J., LIBRA M., POULEK V.: *Akumulace elektrické energie*[online], poslední změna 20.3.2012 [cit. 2012-3-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42869>

[2] KŘIVÍK, P., BAČA, P.: *Současné možnosti akumulace elektrické energie ve fotovoltaických aplikacích. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE*. Rožnov pod Radhoštěm: SŠIEŘ Rožnov pod Radhoštěm, 2007. s. 39-45. ISBN: 978-80-02-01961- 9

[3] LIBRA, M. – POULEK, V.: *Fotovoltaika, teorie i praxe využití solární energie.* ILSA, Praha, 2009, ISBN 978-80-904311-0-2.

[4] MARTINÁK R.: *Využití stlačeného vzduchu* [online], poslední změna 9.2.2012 [cit. 2012-2-9]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27235>

[5] SUCCAR S., WILLIAMS H. R.: *Compressed air energy storage: Theory, Resources and application for wind power; Princeton Environmental Institute* [online], poslední změna 13.4.2012 [cit. 2012-4-13]. Dostupné z: <http://www.princeton.edu/pei/energy/publications/texts/SuccarWilliams_PEI_CAES_2008April8.pdf>

[6] *MDI, Motor Development International* [online], poslední změna 13.4.2012 [cit. 2012-4-13]. Dostupné z: <http://www.mdi.lu/english/index.php>

[7] *MDI, Auto na vzduch* [online], poslední změna 23.3.2012 [cit. 2012-3-23]. Dostupné z: <http://www.autonavzduch.cz/>

[8] Kuchařík, M. *Auto, které tankuje vzduch* [online], poslední změna 26.3.2012 [cit. 2012-3-26]. Dostupné z: <http://21stoleti.cz/blog/2005/05/20/auto-ktere-tankuje-vzduch/>

[9] BAČA P., DVOŘÁK P.: *Akumulace elektřiny* [online], poslední změna 18.3.2012 [cit. 2012-3-18]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>

[10] BAČA P.: *Možnosti akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů* [online], poslední změna 18.3.2012 [cit. 2012-3-18]. Dostupné z: <http://actamont.tuke.sk/pdf/2010/s2/2baca.pdf >

[11] DEPRAG, *pneumatické nářadí* [online], poslední změna 11.3.2012 [cit. 2012-3-11]. Dostupné z: <http://www.deprag.com/index.php?id=vorteile_eigenschaften_drw>

[12] LaMONICA M.: *Compressed-air storage coming to wind power* [online], poslední změna 12.3.2012 [cit. 2012-3-12]. Dostupné z: < http://news.cnet.com/8301-11128_3-10026958-54.html>

[13] *Auto na vzduch míří na trh* [online], poslední změna 25.3.2012 [cit. 2012-3-25]. Dostupné z: <http://tech.ihned.cz/c6-10053280-23262430-i00000_d-auto-na-vzduch-miri-na-trh>

[14] TŮMA J.: *Hledá se kýbl na elektřinu* [online], poslední změna 23.4.2012 [cit. 2012-4-23]. Dostupné z: <http://vtm.zive.cz/clanek/hleda-se-kybl-na-elektrinu>

[15] *Tématický informační server* [online], poslední změna 15.2.2012 [cit. 2012-2-15]. Dostupné z: <http://www.az-kompresory.cz/pistove-kompresory.html>

[16] NEJEDLÝ P., *Přečerpávací elektrárny v nedohlednu* [online], poslední změna 3.4.2012 [cit. 2012-4-3]. Dostupné z: <http://nejedly.blog.idnes.cz/c/203118/Sumne-precerpavaci-elektrarny-v-nedohlednu.html>

[17] *Černé jezero* [online], poslední změna 3.4.2012 [cit. 2012-4-3]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/cerne-jezero.html>

[18] *Dlouhé stráně* [online], poslední změna 3.4.2012 [cit. 2012-4-3]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/dlouhe-strane.html>

[19] *Štěchovice* [online], poslední změna 3.4.2012 [cit. 2012-4-3]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/stechovice.html>

[20] *Výstavba nových PVE* [online], poslední změna 4.4.2012 [cit. 2012-4-4]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/vodni-energie/vystavba-novych-vodnich-elektraren-v-cr-jake-jsou-plany.aspx>

[21] *Výstavba PVE v Meziboří* [online], poslední změna 4.4.2012 [cit. 2012-4-4]. Dostupné z: <http://www.mezibori.cz/e_download.php?file=data/editor/412cs.pdf&original=PVE%20%C5%A0umn%C3%BD%20d%C5%AFl%20Basic%20info1.pdf>

[22] *MDI Entreprises SA* [online], poslední změna 19.3.2012 [cit. 2012-3-19]. Dostupné z: <http://users.telenet.be/sarahgrimonprez/didier/aircars/html/modellenENG.html/>

[23] *Jezdí to na vzduch* [online], poslední změna 19.3.2012 [cit. 2012-3-19]. Dostupné z: < http://www.dfens-cz.com/view.php?cisloclanku=2009030801>

[24] *Airpod, auto s pohonem na stlačený vzduch* [online], poslední změna 9.4.2012 [cit. 2012-4-9]. Dostupné z: <http://www.naseekonomika.cz/airpod-auto-s-pohonem-na-stlaceny-vzduch/>

[25] *Fotovoltaické elektrárny* [online], poslední změna 21.3.2012 [cit. 2012-3-21]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/fotovoltaika.htm>

[26] MURTINGER K., *Ukládání elektřiny z FVE* [online], poslední změna 16.3.2012 [cit. 2012-3-16]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elektriny-z-fotovoltaickych-a-vetrnych-elektraren.aspx>

[27] *Přečerpávací vodní elektrárna* [online], poslední změna 25.3.2012 [cit. 2012-3-25]. Dostupné z: <http://ok1zed.sweb.cz/img/ev-precerp.png >

[28] *Dlouhé stráně* [online], poslední změna 4.3.2012 [cit. 2012-4-9]. Dostupné z: <http://www.realit.cz/files/imagecache/dust_filerenderer_normal/files/upload/story_online/p_e_erp_vac__elektr_rna_dlouh__str_n__4dff07282d.JPG >

[29] *Google mapy* [online], poslední změna 4.3.2012 [cit. 2012-4-9]. Dostupné z: <http://maps.google.cz/ (+50° 4' 36.01", +17° 9' 38.14")>

[30] *Dalešice* [online], poslední změna 4.3.2012 [cit. 2012-4-9]. Dostupné z: <http://www.elektrarny.xf.cz/images/dalesice.jpg>

[31] *Štěchovice II.* [online], poslední změna 4.3.2012 [cit. 2012-4-9]. Dostupné z: <http://www.vyletnik.cz/images/profily/users/1972/vodni-elektrarna-stechovice-informacni-centrum-ec0637f448.jpg>

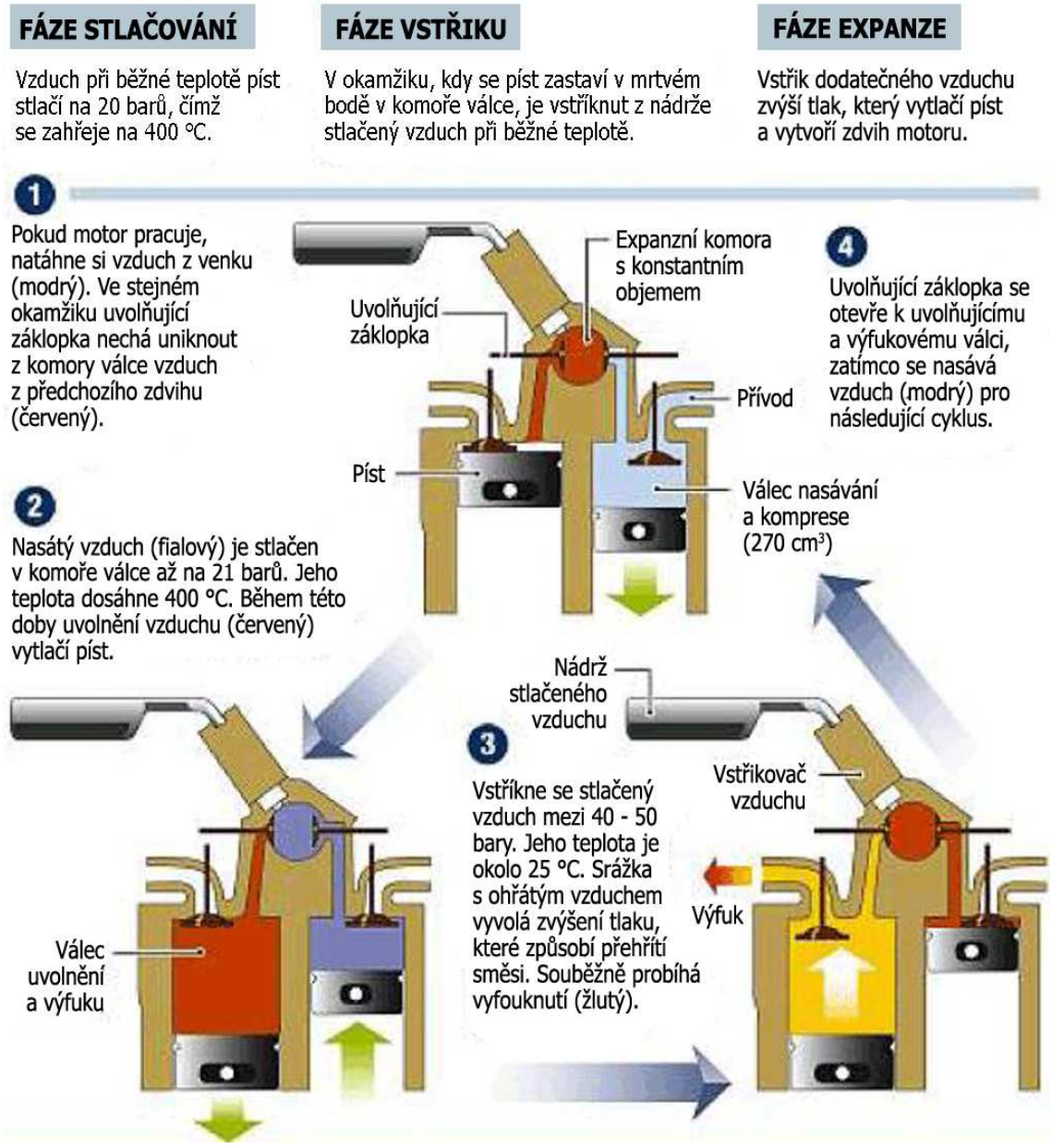
[32] *Složení vzduchu* [online], poslední změna 16.3.2012 [cit. 2012-3-16]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm#slozeni-vzduchu>

[33] *Duální motor* [online], poslední změna 16.3.2012 [cit. 2012-3-16]. Dostupné z: <http://aleeco.multiply.com/video/item/230>

Seznam příloh

Příloha A – Funkce motoru na stlačený vzduch

Příloha A



Obr. A.1[13]: Funkce motoru na stlačený vzduch