



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

ACCUMULATION OF ELECTRICITY FROM RENEWABLE SOURCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ KRATOCHVÍL

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ POSPÉŠIL, Ph.D.

BRNO 2010







## **Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá problematikou akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů. V první části jsou popsány obnovitelné zdroje energie využívané v ČR a seznámení s principy akumulace elektrické energie. Ve druhé části jsou navrženy systémy akumulace do akumulátoru, pomocí stlačeného vzduchu a přečerpávací elektrárny. Tyto systémy jsou navrhnuty tak, aby docházelo k rovnoměrným dodávkám elektrické energie po celý den z fotovoltaické elektrárny do sítě. V závěrečné části jsou systémy srovnány z ekonomicko-technického hlediska.

## **Abstrakt:**

The diploma thesis is focused on problem of accumulating electric energy from renewable resources. The first section describes renewable energy sources, which are possible to use in the Czech Republic and principles of accumulating electric energy. In the following section are suggested systems of accumulating energy to accumulators by compressed air and pumped storage power station. These systems are proposed for uniform power supply from photovoltaic power station to electric power network all day. In conclusion, the suggested systems are compared from economic-technical perspective.

## **Klíčová slova:**

Obnovitelné zdroje energie, fotovoltaická elektrárna, akumulace energie ve stlačeném vzduchu, akumulátor

## **Key words:**

Renewable energy sources, photovoltaic power station, accumulation of energy in compressed air, accumulators



### **Bibliografická citace práce**

KRATOCHVÍL Tomáš. Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 80s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.





### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury uvedené v příloženém seznamu

V Brně dne 28. května 2010

Tomáš Kratochvíl



## **Poděkování**

Děkuji tímto za cenné rady, připomínky a věnovaný čas odborným konzultacím při vypracování mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D . Zároveň bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.



## Obsah

1.	ÚVOD.....	15
2.	OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE VYUŽÍVANÉ V ČR.....	16
2.1.	<b>Energie vody.....</b>	<b>16</b>
2.2.	<b>Energie slunečního záření.....</b>	<b>18</b>
2.3.	<b>Větrná energie.....</b>	<b>20</b>
2.4.	<b>Biomasa.....</b>	<b>22</b>
2.4.1.	Spalování biomasy.....	23
2.4.2.	Biomasa v ČR.....	24
2.5.	<b>Geotermální energie.....</b>	<b>25</b>
3.	MOŽNOSTI AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	26
3.1.	<b>CAES.....</b>	<b>27</b>
3.2.	<b>Přečerpávací vodní elektrárna.....</b>	<b>28</b>
3.3.	<b>Setrvačnick.....</b>	<b>29</b>
3.4.	<b>Olověné akumulátory.....</b>	<b>30</b>
3.5.	<b>Alkalické akumulátory.....</b>	<b>31</b>
3.5.1.	Nikl- kadmiové (Ni-Cd) akumulátory.....	31
3.5.2.	Ni-MH (Nikl Metal Hydriové) akumulátory.....	31
3.6.	<b>Další druhy.....</b>	<b>31</b>
3.6.1.	Lithium- Iontové(Li-ion) akumulátor.....	31
3.6.2.	NAS akumulátory.....	32
3.7.	<b>Supravodivé indukční akumulátory.....</b>	<b>33</b>
3.8.	<b>Superkondenzátory.....</b>	<b>34</b>
3.9.	<b>Vodíkové hospodářství.....</b>	<b>35</b>
4.	NÁVRH SYSTÉMU AKUMULACE.....	37
4.1.	<b>Výpočet slunečního záření.....</b>	<b>37</b>
4.1.1.	Výpočet teoretického záření.....	37
4.1.2.	Technický dopad slunečního záření.....	38
4.1.3.	Návrh úchytného systému panelů.....	39
4.1.4.	Slunečné dosažitelné množství energie.....	41
4.1.5.	Návrh panelů a úchytného systému.....	42

<b>4.2. Akumulace elektrické energie.....</b>	<b>44</b>
4.2.1 Akumulace elektrické energie do akumulátoru .....	44
4.2.2 Zapojení do sítě.....	45
4.2.3 Zapojení na akumulátor .....	45
4.2.4 Návrh akumulátoru .....	46
<b>4.3. Akumulace z fotovoltaických panelů pomocí stlačeného vzduchu .....</b>	<b>48</b>
4.3.1. Návrh systému akumulace .....	53
4.3.2. Návrh kompresoru a taverny .....	54
4.3.3. Návrh akumulčního zásobníku.....	56
4.3.4. Účinnost zapojení s rekuperátorem .....	57
4.3.5. Účinnost systému bez rekuperátoru.....	60
4.3.6. Shrnutí účinnosti akumulace.....	60
<b>4.4. Akumulace z fotovoltaických elektrárny pomocí přečerpávací elektrárny</b>	<b>62</b>
<b>4.4.1 Výpočet čerpadlové části .....</b>	<b>62</b>
<b>4.4.2 Výpočet turbínové části .....</b>	<b>63</b>
<b>5. TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....</b>	<b>65</b>
<b>5.1 Roční vyrobená elektrická energie .....</b>	<b>65</b>
<b>5.2 Výpočet tržby za vyrobenou elektrickou energii .....</b>	<b>66</b>
<b>5.3 Výpočet ekonomiky provozu fotovoltaické elektrárny s akumulací do akumulátoru a její návratnosti .....</b>	<b>68</b>
<b>5.4 Výpočet ekonomiky provozu fotovoltaické elektrárny s akumulací stlačeného vzduchu a její návratnost.....</b>	<b>71</b>
<b>5.5 Výpočet ekonomiky provozu fotovoltaické elektrárny s přečerpávací elektrárnou a její návratnosti .....</b>	<b>74</b>
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>76</b>

## 1. Úvod

V posledních desetiletích po celém světě stoupla spotřeba elektrické energie a to zejména v průmyslově a ekonomických vyspělých zemích. Tento trend je největší v asijských zemích a v Jižní Americe, kde se ekonomika velmi rychle rozvíjí a tím roste i samotná spotřeba. Dalším významným faktorem je zvyšování počtu obyvatelstva a zvyšující se životní úroveň, která souvisí s ekonomickým růstem.

V České Republice je nejvíce energie vyráběno z tepelných elektráren a tím tedy vzrůstá spotřeba uhlí a zemního plynu (fosilní paliva). Jelikož fosilní paliva nejsou obnovitelná, tak si lidstvo začíná uvědomovat rychlejší vytěžování těchto paliv a začíná hledat moderní alternativy výroby elektrické energie. Mezi moderní alternativy můžeme zařadit jadernou energii a energii získanou z obnovitelných zdrojů, tzv. čistá energie.

Jadernou energetiku můžeme pokládat též za čistý zdroj, jelikož do ovzduší nevypouští škodlivé plyny, které způsobují tzv. skleníkový efekt. Na druhou stranu pořád zůstává otázka, co se bude dít s vyhořelým palivem. Kdyby docházelo v větší míře ke zpracování paliva, tak by se jaderná energetika jevila jako nejlepší zdroj energie.

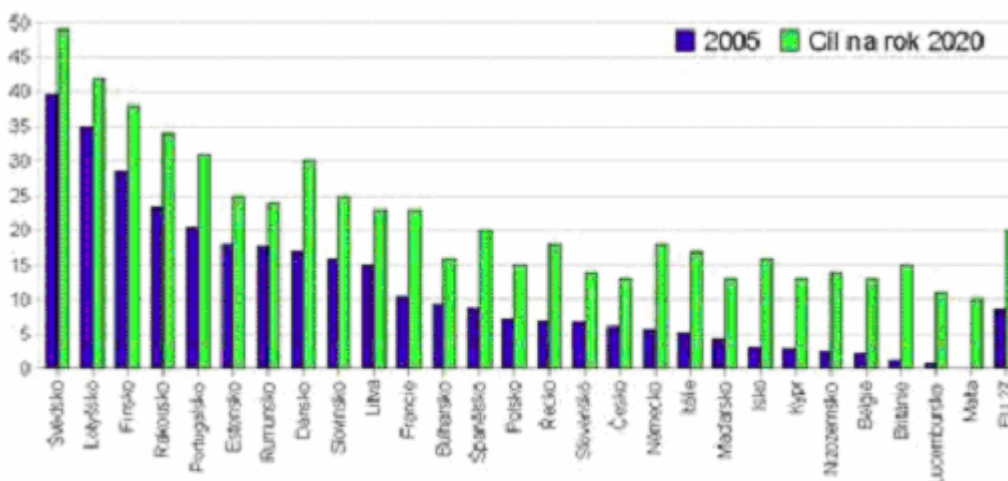
Obnovitelné zdroje energie mají stejnou výhodu jako jaderné elektrárny, protože neprodukují škodlivé plyny. Ale jejich výkony ve srovnání s jinými typy elektrárnami (na fosilní či jaderné palivo) jsou značně malé a nestabilní. Nestabilita je dána okolními podmínkami, a proto o nich říkáme, že jsou značně nestabilní v produkci elektrické energie.

Pro oba případy je nutné vyřešit problém s akumulací elektrické energie. U jaderné elektrárny je to nutné z hlediska obtížné regulace výkonu během dne, neboť spotřeba energie odběrateli není konstantní. U obnovitelných zdrojů se musí zase akumulovat z důvodů, jak už bylo zmíněno, jejich nestabilní produkce.

V této diplomové práci se v první části seznámíme s možnostmi obnovitelných zdrojů v České Republice a následně s různými druhy jejich akumulace. V druhé části se budeme podrobněji zabývat akumulací elektrické energie z fotovoltaické elektrárny o jmenovitém výkonu 1000 kW. Z této elektrárny část energie bude přiváděna přímo do sítě a druhá část bude akumulována, aby se zajistilo zrovnornění denní dodávky do elektrizační soustavy. Akumulaci energie budeme srovnávat ve třech systémech. První systém bude klasické zapojení na akumulátory, v další možnosti využijeme technologii pomocí stlačeného vzduchu a poslední možnost bude akumulace energií pomocí přečerpávací elektrárny. V poslední části diplomové práce srovnáme tři navržené systémy na základě ekonomického zhodnocení.

## 2. Obnovitelné zdroje energie využívané v ČR

Tato kapitola popíše zdroje energie, které se mohou využívat v ČR. Při vstupu ČR do Evropské Unie jsme se zavázali k plnění směrnic EU. Dle těchto směrnic má celá EU do roku 2020 vyrábět 20% energie z alternativních zdrojů.[6] Podle směrnic EU by měla ČR v roce 2010 splnit 8,9 % hrubé spotřeby z obnovitelných zdrojů, aby splnila závazek 13% do roku 2020. Výjimku má vyjednanou pouze Lucembursko (11%) a Malta (11%). EU bere v úvahu situaci v jednotlivých členských státech, a proto podíly na výrobě energie z obnovitelných zdrojů jsou různé. Což je logické, protože se nedá ovlivnit geografická poloha jednotlivých států. Následující obrázek (viz Obr. 2.1) popisuje jednotlivé státy EU, kde je vidět jejich cíl pro rok 2010 a hodnoty z roku 2005.



Obr. 2.1 Podíl obnovitelných zdrojů [6]

Jednotlivé kapitole budou popisovat princip a využití obnovitelných zdrojů, použitelných v ČR:

- Energie vody,
- Energie slunečního záření,
- Energie větru,
- Spalování biomasy,
- Geotermální energie.

### 2.1. Energie vody

Naše republika je řazena z hydroenergetického hlediska mezi velmi chudé země. V dnešní době jsou elektrárny s velkým výkonem na tocích s velkým spádem postaveny. Nyní už jen můžeme počítat s rozvojem zdrojů, které by měli výkon do 1 MW či rekonstrukcí starších elektráren na větší účinnost[7].



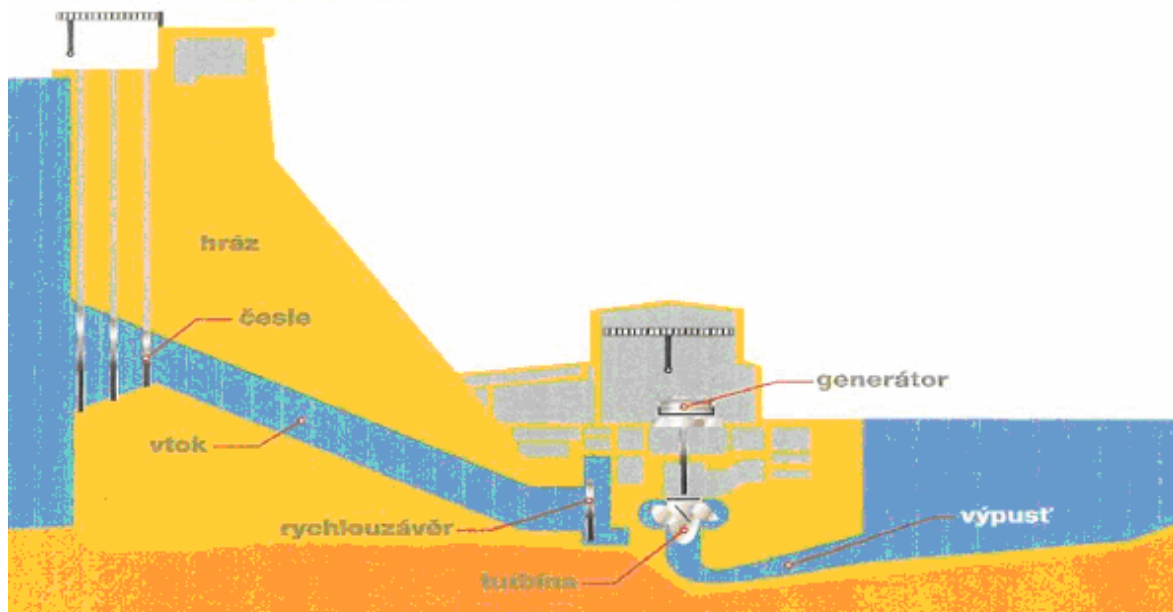
## Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů

V ČR jsou dva základní typy vodních elektráren a to přehradní a přečerpávací. Přehradní dále můžeme rozdělit na malé (do 10 MW) a velké (nad 10 MW).[6] Velkých vodních elektráren je v ČR 10 a to včetně dvou akumulčních (viz Tab. 2.1) O přečerpávacích nebo-li akumulčních elektrárnách se budeme podrobněji bavit v kapitole Akumulace elektrické energie.

Elektrárna	instalovaný výkon [MW]	rok uvedení do provozu
<b>Průtočná elektrárna</b>		
Lipno I	120	1959
Orlík	364	1961-1962
Kamýr	40	1961
Slapy	144	1954-1955
Štěchovice I	22,5	1943-1944
Vrané	13,88	1936
Střeliv	19,5	1936
<b>přečerpávací elektrárna</b>		
Štěchovice II	45	1948,1996
Malešice	450	1978
Dlouhé Stráně	650	1996

Tab. 2.1 Přehled elektráren nad 10 MW v ČR [8]

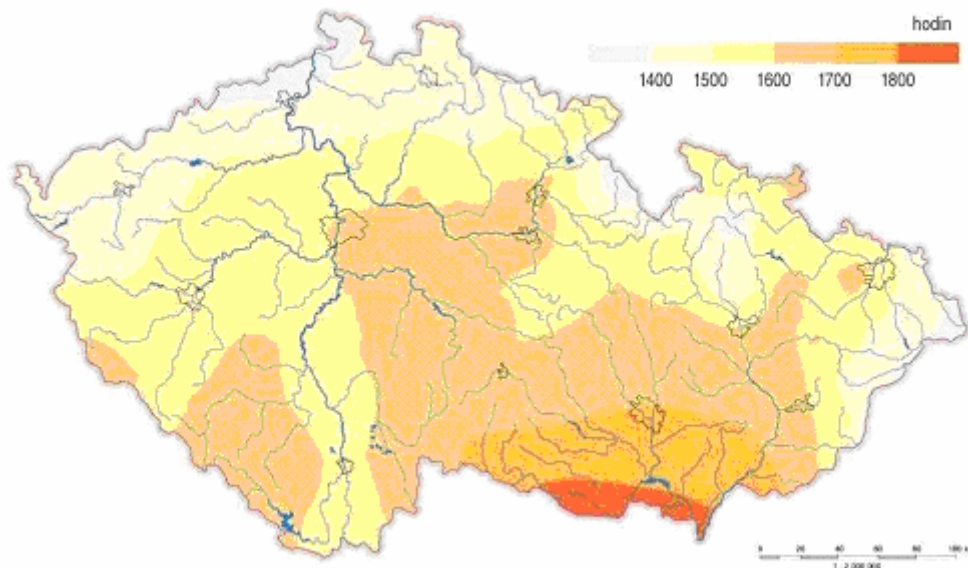
Vodní elektrárny se staví na řekách, kde je dostatečný spád, aby byla zajištěna potřebně velká měrná energie vody. Jak jde vidět na obrázku(viz Obr. 2.2), tak voda prochází vtokem a následně roztáčí turbínu, která je na společné hřídeli s generátorem. Na hřídeli díky spojení s generátorem se mění energie kinetická na energii elektrickou, která se transformuje a odvádí dále ke spotřebitelovi.



Obr. 2.2 Průřez vodní elektrárnou [13]

## 2.2. Energie slunečního záření

Sluneční energie dopadá všude na Zemi s rozdílnou intenzitou slunečního záření. Samozřejmě dále intenzitu značně ovlivňuje počasí (mlha, zataženo, atd.), roční období a v neposlední řadě den a noc. V ČR se uvádí průměrný roční úhrn trvání slunečního svitu asi 1500-1700 h. Z obrázku (viz Obr. 2.3) je patrné, že největší průměrný roční úhrn trvání slunečního svitu je na jihu Jižní Moravy, především na Hodonínsku a Znojemsku.



Obr. 2.3 Průměrný roční úhrn trvání slunečního svitu [h] [9]

Na přeměnu slunečního svitu na elektrickou energii se využívá fotovoltaických panelů, které jsou složeny s fotovoltaických článků. Jsou založeny na principu tzv. fotovoltaickém jevu.

Fotovoltaický (sluneční, solární) článek je v podstatě polovodičová dioda. Jeho základem je tenká křemíková destička s vodivostí typu P. Na ní se při výrobě vytvoří tenká vrstva polovodiče typu N, obě vrstvy jsou odděleny tzv. přechodem P-N. Osvětlením článku vznikne v polovodiči vnitřní fotovoltaický jev a v polovodiči se z krystalové mřížky začnou uvolňovat záporné elektrony. Na přechodu P-N se vytvoří elektrické napětí, které dosahuje u křemíkových článků velikosti zhruba 0,5 V. Energie dopadajícího světla se v článku mění na elektrickou energii. Připojíme-li k článku pomocí vodičů spotřebič (například miniaturní elektromotorek), začnou se kladné a záporné náboje vyrovnávat a obvodem začne procházet elektrický proud. Je-li třeba větší napětí nebo proud, zapojují se jednotlivé články sériově či paralelně a sestavují se z nich fotovoltaické panely.[10]

Fotovoltaické panely můžeme podle vývoje rozdělit do tří generací.

- První generace

První generací se nazývají články, které využívají základ křemíkové desky. Komerčně se začala využívat v 70 letech minulého století a v dnešní době je to nejrozšířenější technologie na trhu. Jejich účinnost v sériové výrobě je 16-19%. Největší zápor této generace je výroba, která je relativně drahá, jelikož využívá krystalický křemík. [11]

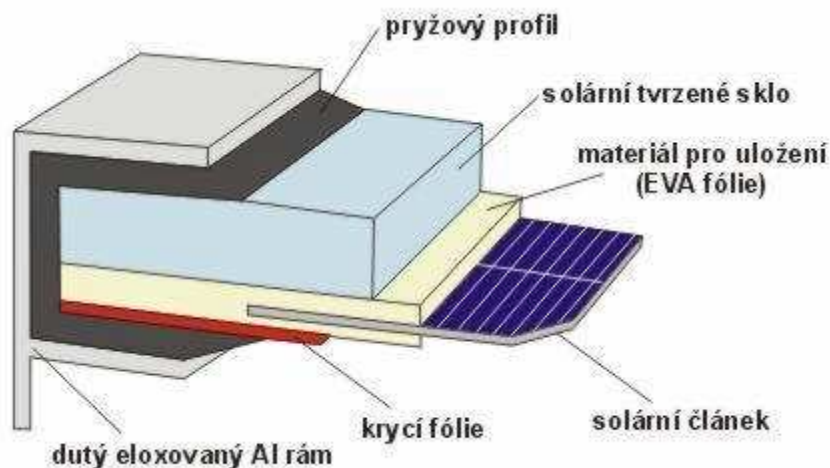
- Druhá generace

Na snížení ceny navazuje druhá generace, která se snažila, aby cena výrobku byla co nejlevnější. Snížení nákladu se povedlo úsporou drahého základního materiálu- křemíku. Místo křemíku se začali používat články z amorfního a mikrokrytalického křemíku. Tímto se snížila cena, ale bohužel je to vykoupené účinnosti, která se u druhé generace pohybuje pod 10%. [11]

- Třetí generace

Komerčním příkladem, který přímo navazuje na druhou generaci jsou vícevrstvé struktury (dvojvrstvé a trojvrstvé články), z nichž každá sub-struktura (p-i-n) absorbuje určitou část spektra a zvětšuje se tak energetická využitelnost fotonů a tím se zvýší účinnost. Příkladem dvojvrstvého solárního článku je struktura složená z p-i-n přechodu amorfního (hydrogenovaného) křemíku a p-i-n přechodu mikrokrytalického (hydrogenovaného) křemíku. Amorfní křemík dobře absorbuje v oblasti modré, zelené a žluté části spektra, mikrokrytalický křemík pak dobře absorbuje i v červené a infračervené oblasti. Aby vícevrstvé články dobře fungovali musí všechny články generovat stejný proud. Když tomu bude naopak, tak bude nižší účinnost. [11]

Samotné solární články jsou na sebe dále letovány a tím se vytvoří fotovoltaický panel. Panel je zakryt solárním tvrzeným sklem, které má nejen funkci ochranou např. před kroupy, ale i k pohlcení slunečního svitu a tím i zvýšení účinnosti. Následující obrázek (viz Obr. 2.4) můžeme vidět řez fotovoltaickým panelem.



Obr. 2.4 Řez fotovoltaickým panelem [12]

Podle využití můžeme fotovoltaický solární systém rozdělit na:

- Ostrovní solární systémy- jsou to systémy které nejsou připojeny do sítě. Využívá se v oblastech, kde není možnost připojit se z rozvodné sítě. Nevýhodou je, že musím akumulovat energii do baterii.
- Solární systém zapojený do sítě- fotovoltaický systém je zapojen přímo do sítě. Na rozdíl od ostrovního systému je výhoda, že v době kdy je přebytek energie, tak ji může dodávat do sítě(prodávát) a pokud je situace opačná, tak může ze sítě odebírat.

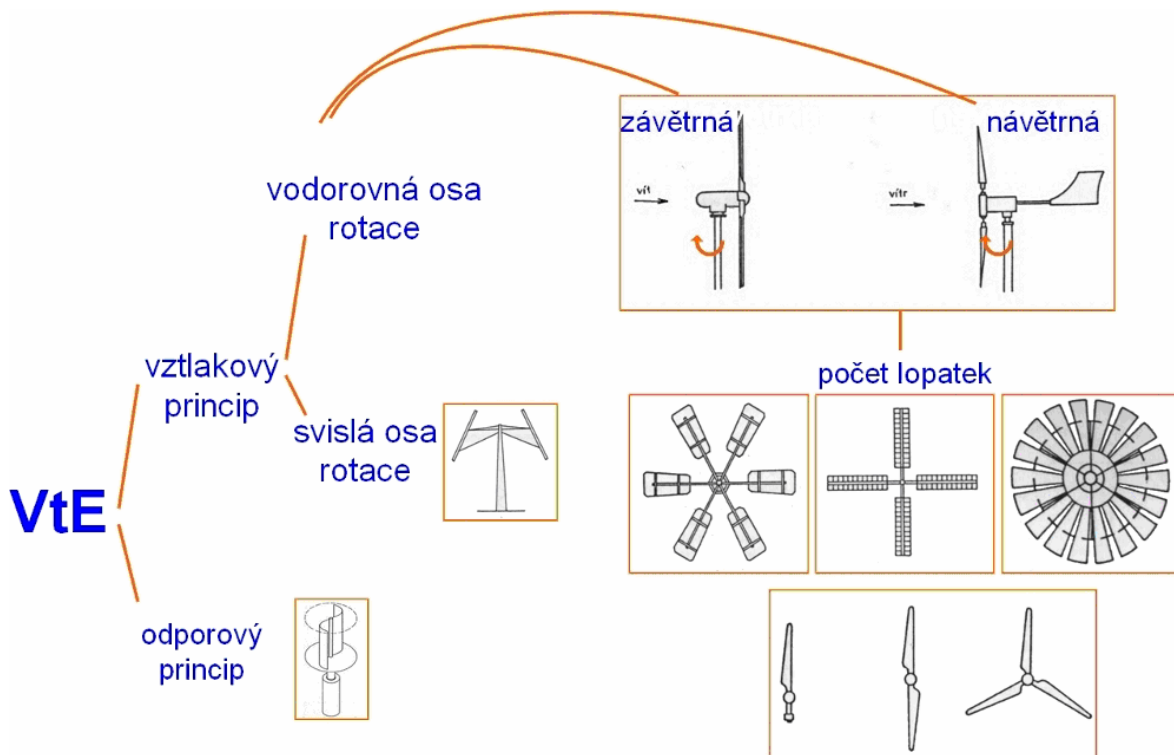
## 2.3. Větrná energie

Energie větru je výsledkem nepřímého působení sluneční energie. Vítr je proudění vzduchu, které vzniká v důsledku rozdílné komprese mezi ohřátými vrstvami vzduchu v zemské atmosféře. Proudění vzduchu je vždy turbulentní. Větrná energie je nestabilní stejně jako sluneční energie. Značně ji ovlivňují podmínky počasí, denní a roční doba. [13]

Sílu větru využíváme k roztočení vrtule, která je hlavní součástí větrné elektrárny. Na vrtuli je připojen generátor, který vytváří elektrickou energii. Energeticky využitelný vítr je v rozmezí 4 až 26 m/s. Pokud je vítr rychlejší než 26 m/s, tak se elektrárna z bezpečnostních důvodů odstaví. Moderní větrné elektrárny pracují při rychlostech kolem 13 m/s a mohou dosahovat jmenovitý výkon okolo 2-3 MW. Startovací rychlost větru je 3 m/s.

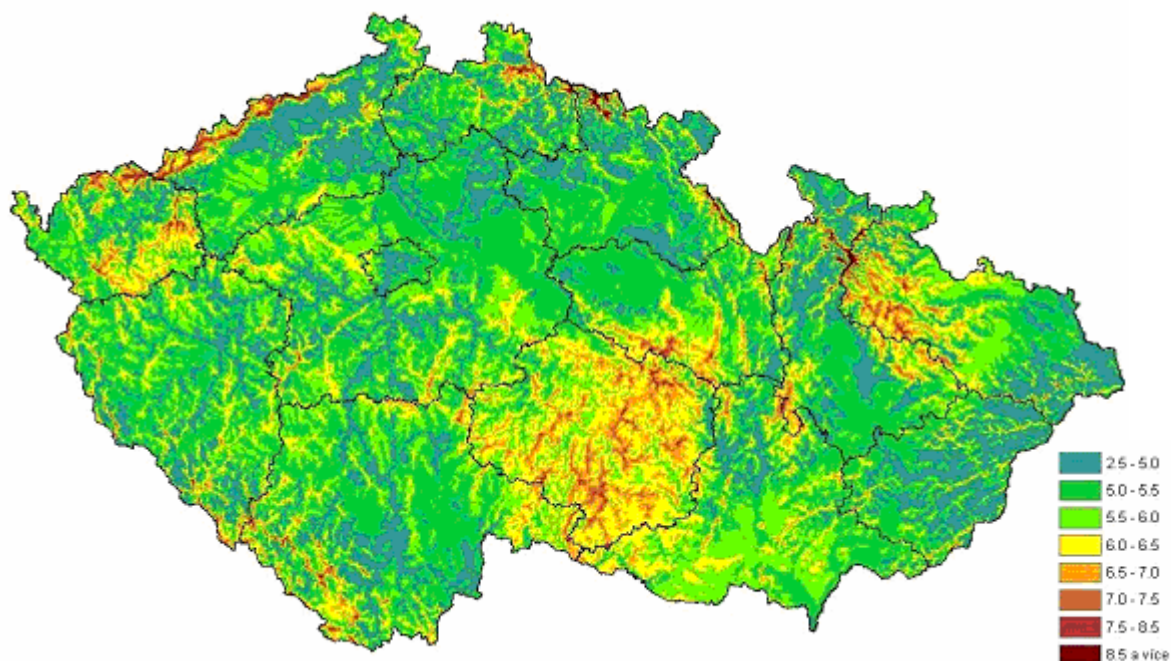
V ČR se začali stavět větrné elektrárny v 80. a 90. letech 20. století. Největší zájem o stavbu větrných elektráren byl mezi lety 1990- 1995. Elektrárny postavené do roku 1995 patřily z 1/3 do skupiny nevyhovujících nebo vysoce poruchových technologií. Po roce 1995 značně opadl zájem investorů o tyto elektrárny a to i díky nedostatečné legislativě, která ovlivňovala výkupní cenu energie. V této době se cena pohyboval v rozmezí 0,9 až 1,13 Kč za 1 kWh. Cena se zvýšila v roce 2001 a tím se zvětšil opět i zájem investorů. Od té doby se značně zvyšuje počet větrných elektráren. Koncem ledna 2010 byl instalovaný výkon kolem 190 MW a do budoucna se počítá s další výstavbou. Například ČEZ chce do roku 2020 investovat do větrných elektráren 20 miliard Kč.[14]

Obrázek (viz Obr. 2.5) shrnuje typy větrných elektráren. Základní dělení je na vztlakový a odporový princip. Nejrozšířenějším typem větrných elektráren jsou elektrárny s vodorovnou osou rotace a pracující na vztlakovém principu. V dnešní době je nejvíce rozšířen tento princip na rozdíl od odporového principu. Elektrárny na odporovém principu se moc neuplatnily, jelikož u nich dochází k mnohem vyššímu dynamickému namáhání, které značně snižuje jejich životnost. Další nevýhodou je malá výška rotoru nad terénem a tím tedy na ně působí menší rychlost větru.[13]



Obr. 2.5 Typologie větrných elektráren [14]

Nejlepší podmínky na stavbu větrných elektráren jsou na Krušnohorsku, Jesenicku a Českomoravské vrchovině (viz Obr. 2.6). Ne všechna místa je možné využít, protože některá místa z těchto oblastí se nachází v chráněné oblasti. A na zbytku plochy v ČR není rychlost větru moc velká, a proto se nemůžou stavět v tak hojném počtu jako v jiných státech. Například v Německu mají instalovaný výkon všech větrných elektráren kolem 24 000 MW. A to řadí Německo na první místo v EU v instalovaném výkonu u větrných elektráren. [14]



Obr. 2.6 Výsledné pole průměrné rychlosti větru v m/s ve výšce 100 m [14]

## 2.4. Biomasa

Za biomasu je v užším pojetí považována organická hmota rostlinného původu získaná na bázi fotosyntetické konverze sluneční energie. V souvislosti s energetikou jde o dřevo a dřevní odpad, slámu a jiné zemědělské zbytky včetně exkrementů užitkových zvířat. [2]

Jednou z nejdůležitějších vlastností je vlhkost biomasy. Pokud je obsah vody větší (více než 50%) než sušiny, tak se využívají mokré procesy a pokud je obsah vody menší než sušiny, tak se využívají suché procesy. Nejpoužívanějším suchým procesem je spalování biomasy a z mokrých procesů se nejvíce využívá anaerobní fermentace vlhké biomasy, při které vzniká bioplyn. Dále už jen dominuje výroba metylesteru kyselin bioolejů, které jsou získávány ze semen olejnatých rostlin v surovém stavu (viz Tab. 2.2)

typ konverze biomasy	způsob konverze biomasy	energetický výstup	odpadní materiál nebo druhotná surovina
termomechanická Konverze (suché procesy)	Spalování	teplo vázané na nosič	Popelovina
	Zplynování	generátorový plyn	dehtový olej, uhlíkaté pal.
	Pyrolýza	generátorový plyn	dehtový olej, pevné hoř. Zbytky
Biochemická konverze (mokré procesy)	Anaerobní fermentace	Bioplyn	Fermentovaný substrát
	aerobní fermentace	teplo vázané na nosič	Fermentovaný substrát
	Alkoholová fermentace	etanol, metanol	vykvašený substrát
Fyzikálně-chemická konverze	esterifikace bioolejů	metylester biooleje	Glycerin

Tab. 2.2 Způsoby využití biomasy k energetickým účelům [2]

Biomasa se podle původu dělí do dvou skupin:

Biomasa záměrně pěstována:[2]

- Energeticky plodiny lignocelulózy:
  - Energetické dřeviny (vrby, topoly, olše, akáty a další dřeviny),
  - Obiloviny (celé rostliny),
  - Travní porosty (sloní tráva, trvalé travní porosty, atd.),
  - Ostatní rostliny (konopí seté, čirok, atd.),
- Energetické plodiny olejnaté (řepka olejka, slunečnice, len),
- Energetické plodiny škrobnaté (brambory, cukrová řepa, cukrová třtina, atd.).

Biomasa odpadní:[2]

- Rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny (zbytky po likvidaci křovin, odpady z vinic, sláma obilná, kukuřičná, atd.),
- Odpady z živočišné výroby (odpady z mléčnic, exkrementy z chovu hospodářských zvířat),
- Komunální organické odpady (organický podíl tuhých komunálních odpadů, kaly z odpadních vod, atd.),
- Odpady z lesního hospodářství (větve, pařezy, kůra, kořeny po těžbě dřeva, manipulační odřezky),
- Organické odpady z potravinářských a průmyslových staveb (odpady z jatek, mlékáren lihovaru, vinařských provozoven).

### 2.4.1 Spalování biomasy

Spalování biomasy (suchý proces) probíhá v kotlích. Před tím než se začne spalovat, tak musíme upravit palivo na požadavky konkrétního spalovacího zařízení (např. na pelety, brikety či štěpky) Po úpravě materiálu může začít samotný proces spalování, který je rozdělen do čtyřech fází:

1. fáze- sušení: snížení obsahu vody a následného zahřívání,
2. fáze- pyrolýza: po dosažení zápalné teploty a s dostatečným přísunem kyslíku se uvolňuje spálené teplo a materiál se rozkládá a hořlavé plyny,
3. fáze- spalování plynné složky,
4. fáze- spalování pevných látek.[2]

Na rozdíl od spalování fosilních paliv, probíhá spalování biomasy s nulovou bilancí oxidu uhličitého  $\text{CO}_2$ , který je považován za tzv. skleníkový plyn. A jelikož biomasa má minimální obsah síry, tak je i menší produkce  $\text{SO}_x$ .

#### **Bioplyn**

Bioplyn vzniká mikrobiální rozklad organických látek bez přítomnosti kyslíku se současným vznikem bioplynu se nazývá anaerobní fermentace neboli metanogenní kvašení.[2]

Bioplyn je směs plynů jehož podrobné složení můžeme vidět v tabulce (viz Tab. 2.3) Jediná složka, která se mění je vodní pára  $\text{H}_2\text{O}$ , a proto není v tabulce.

Charakteristika	Metan	Oxid uhličitý	Vodík	Sulfan	Bioplyn
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	60%CH <sub>4</sub> 40%CO <sub>2</sub>
objemový díl (%)	55 až 70	27- 47	1	3	100
výhřevnost (MJ.m-3)	35,8	-	10,8	22,8	21,5
Hranice zápalnosti (%)	5 až 15	-	4 až 80	4 až 45	6 až 12
zápalná teplota (°C)	650 až 750	-	585	-	650 až 750
Hustota ( kg.m-3)	0,72	1,98	0,09	1,54	1,2

Tab. 2.3 Chemické složení a vlastnosti bioplynu

Bioplyn se nejvíce využívá na přímé spalování a ohřev teplotosného media (vaření, topení). Největší efektivitu, ale dosáhne u kogeneračních jednotek, kde slouží k výrobě elektrické energie a ohřevu teplotosného media.

### **Bionafta**

Bionaftu můžeme vyrábět rafinačním procesem (transesterifikace) z jakéhokoliv rostlinného oleje (řepkový, slunečnicový, atd.). [2] Od roku 2005 musí výrobci nafty přidávat 5 % bionafty do každého litru obyčejné nafty. Tím se snižují emise siry, oxidu uhličitého, atd., což je hlavní výhoda přidávání bionafty. Její nevýhodou zůstává, že výroba je ekonomicky nákladnější a při kontaktu s větším množstvím vody vznikají z bionafty mastné kyseliny, které mohou způsobit korozi palivového systému.[15]

## **2.4.2 Biomasa v ČR**

Jelikož ČR nemá volné velké spády řek či nemá povětrnostní podmínky jako přímořské státy, tak získávání energií z biomasy je pro ni velmi zajímavá. Tuto věc si uvědomuje i naše největší elektrárenská společnost, skupina ČEZ, která chce zvyšovat výrobu z tohoto zdroje. Následující tabulku popisuje výrobu v roce 2007 a 2008, jejich meziroční nárůstu u vybraných elektráren. Například v roce 2008 vyrobila z biomasy 327 GWh elektřiny, což bylo zvýšení meziročního nárůstu o 31,2% (viz Tab. 2.4) a tento trend je podobný i u jiných investorů. [8]

Elektrárna	Výroba 2008( MWh)	výroba 2007( MWh)	meziroční nárůst(%)
Tisová	44 407	41 249	7,7
Poříčí	120 250	79 247	51,7
Dvůr Králové	13 021	12 732	2,3
Hodonín	149 231	115 966	28,7
<b>Celkem ČR</b>	<b>326 910</b>	<b>249 239</b>	<b>31,2</b>

Tab. 2.4 Výroba v elektrárnách spalující biomasu [8]

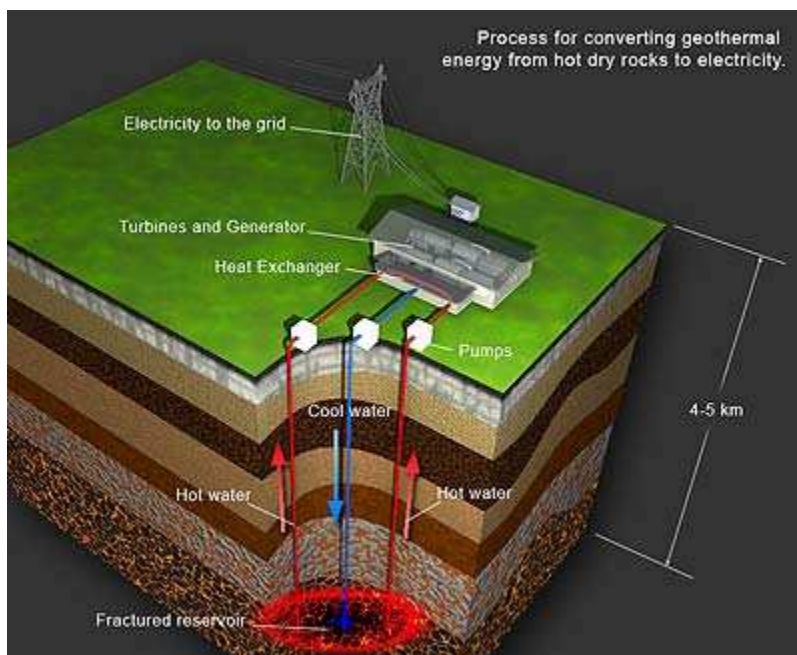
Z ekonomického hlediska a samotné účinnosti se spaluje biomasa s hnědým uhlím a z toho důvodu nemůžeme říci, že je to úplně čistý zdroj získávání elektrické energie. Jediná výjimka je jeden blok Hodonína, který spaluje od 31.12.2009 pouze biomasu.



## 2.5. Geotermální energie

Geotermální energie je projevem tepelné energie zemského jádra, která vzniká rozpadem radioaktivních látek a působením slapových sil. Jejimi projevy jsou erupce sopek a gejzíry, horké prameny či parní výrony. Využívá se pro vytápění a na výrobu elektrické energie. [13]

V ČR se má v budoucnu používat především princip HDR (hot dry rock). Tuto technologii využije při výstavbě v druhé polovině roku 2010 ČEZ v Liberci, kde by měla celá výstavba trvat cca 4 roky. [8] V principu jde o vytvoření podzemního výměníku. Hloubka výměníku je limitována teplotou (200 °C), což je v našich podmínkách asi ve hloubce 5000 m. [16] Výměník se bude skládat ze třech vrtů, které budou ukončeny ve vzdálenosti několika set metrů od sebe. Hornina na konci vrtu se uměle rozruší. Do prostředního (viz Obr. 2.7) se zavádí studená voda, která se na konci v uměle vytvořeném rezervoáru ohřívá a prostupuje dvěma produkčními vrty na povrch. Na povrchu předá teplotu svou energii do sekundárního okruhu (na turbínu) a tím se ochladí. Ochlazená voda se vrací prostředním vrtem do výměníku. [17] Následující obrázek popisuje princip



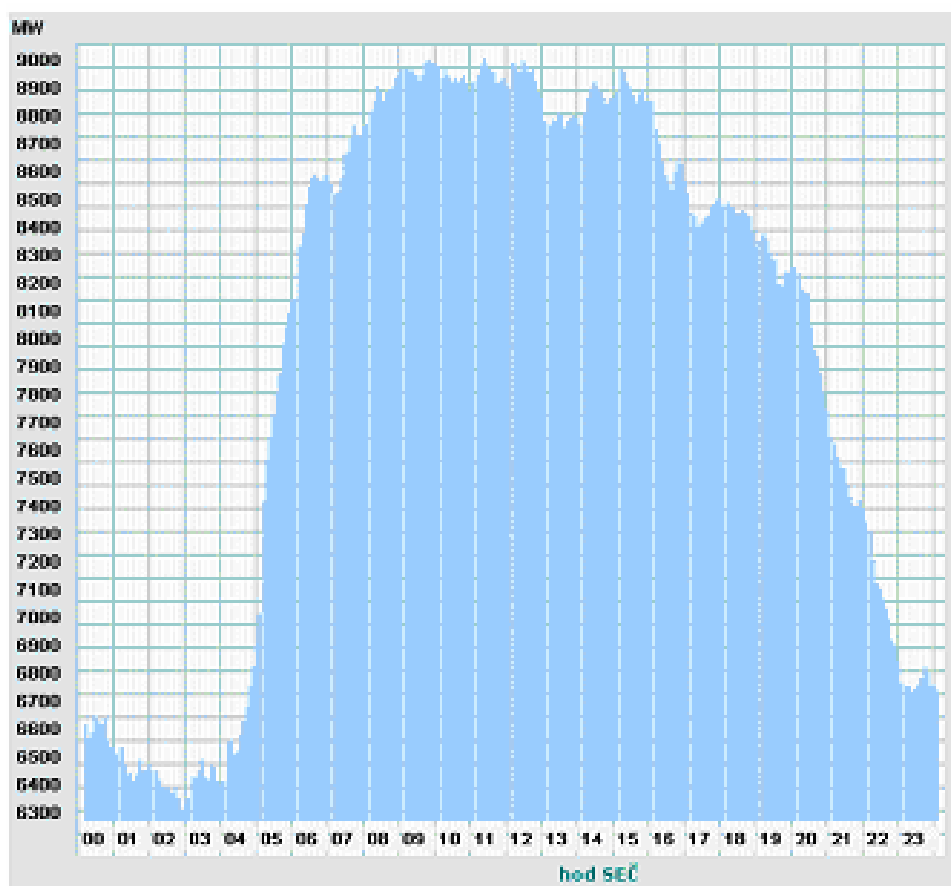
Obr. 2.7 Princip geotermální energie [17]

Výhodami jsou velmi malé vlivy na životní prostředí, nezávislost na dodávkách paliva a má stálý výkon. Nevýhodou je nejistota v geologických podmínkách. Nemáme totiž jistotu zda půjde horninu uměle rozrušit tak, aby vznikl dostatečně velký tepelný výměník. Další podstatnou nevýhodou jsou i pořizovací náklady, které se nyní pohybují v rozmezí 200-250mil Kč/ MWe. [8]

### 3. Možnosti akumulace elektrické energie

Diplomová práce se zabývá akumulací elektrické energie a tato kapitola nastíní principy akumulace.

Elektrická energie je nejvíce spotřebovávána třikrát denně (viz Obr. 3.1). A to kolem šesté hodiny ránní, kdy se rozjíždí továrny, pak kolem šesté hodiny večerní, kdy se zvětší nápor na elektrickou dopravu, rozsvítí se světla veřejného osvětlení a kolem desáté hodiny večerní, kdy se spustí ohřívače vody a v zimě elektrické či akumulární kamna.

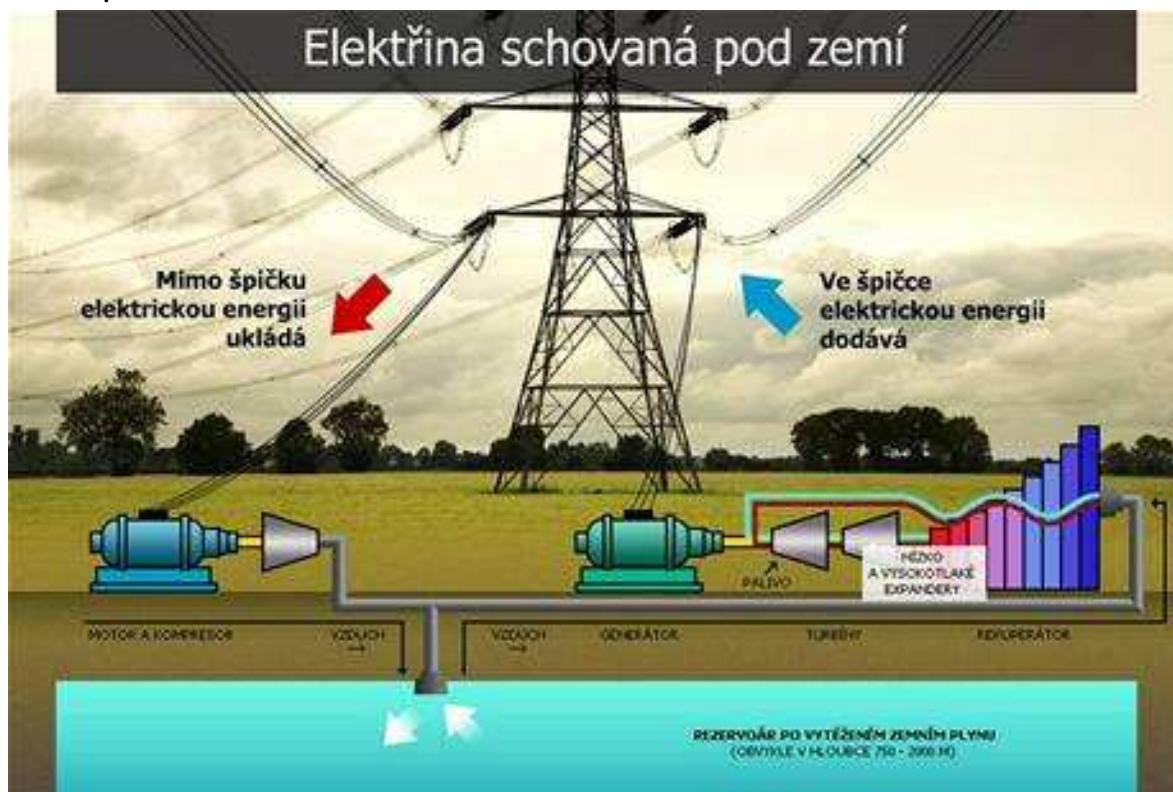


Obr. 3.1 Graf spotřeby elektrické energie ze dne 18.5.2010 [18]

Většina energie je kryta z jaderných elektráren, tepelných elektráren či vodních elektráren. Pokud ale energie chybí, tak je energie nakupována ze zahraničních sítí a tím je tedy energie značně dražší. Z tohoto důvodu se energie začala akumulovat. Akumulace tak velkého množství energie u velké energetiky nejlépe zvládají přečerpávací vodní elektrárny a v malých energetikách se používají např. olověné akumulátory. S vyšším využíváním obnovitelných zdrojů se začalo více mluvit o akumulaci elektrické energie. Je to hlavně z důvodů, že energie získána z obnovitelných zdrojů je závislá na podmínkách, které člověk nemůže ovlivnit. Např. u větrných elektráren, když nefouká dostatečně silný vítr, tak se energie nevyrábí a když je dostatečný, tak nemusí být energie potřebná. A proto se v posledních letech, s rozvojem využití obnovitelných zdrojů lidé začali více zabírat otázkou, jak co nejvýhodněji uložit energii.

### 3.1. CAES

CAES funguje na principu stlačování vzduchu. Tato technologie by se měla využívat nejvíce v budoucnu, jako akumulátor u větrných elektráren. Větrné elektrárny nyní dosahují největších výkonů z obnovitelných zdrojů (USA, Německo). V době, kdy je energie v síti nepotřebná nebo-li nadbytečná, tak se používá na stlačování plynu do podzemních jeskyní pomocí kompresorů. Při pohonu alternátorů plynovou turbínou se až 2/3 energie uvolněné spalováním plynu spotřebovávají k pohonu kompresoru a jen jedna třetina se mění v energii elektrickou.[19] Proto bylo už před čtyřiceti 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. Účinnost u CAES je kolem 45 procent.[20] První přečerpávající elektrárna vzduchu byla spuštěna v roce 1974 v německém Hundorfu. Vzduch je zde čerpán do dvou hlubinných solných jeskyní o objemu 150 000 m<sup>3</sup> a plynová turbína v době potřeby je schopna po dobu tří hodin dodávat do sítě výkon 290 MW.[20]



Obr. 3.2 Zapojení systému CAES [8]

V poslední době se začíná mluvit o zlepšení dosavadního systému, který je nazván AACAES. Pracuje na stejném principu jako CAES, ale zde by se využívalo teplo, které je odebíráno při stlačování vzduchu a bylo by skladováno. Následně při opouštění vzduchu z tavny by se využil uložený teplý vzduch ze stlačování a tím by se zvýšila účinnost na 70%. [21]

### *Výhody a nevýhody*

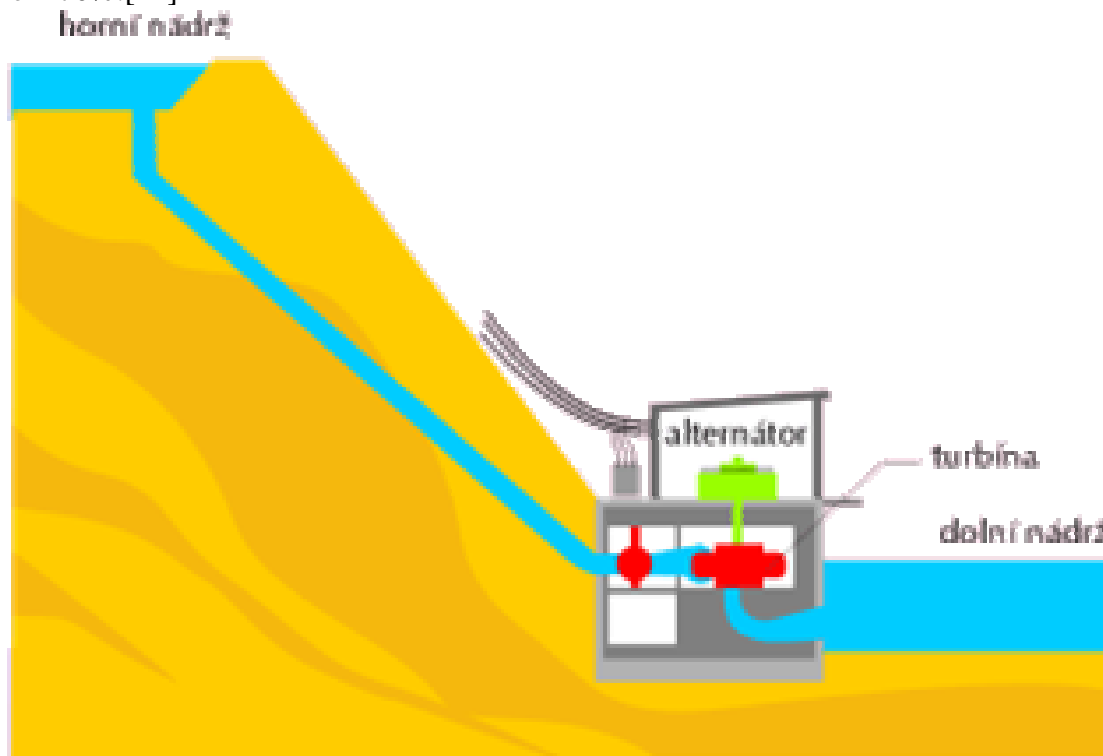
CAES může být použit na akumulaci velkého množství energie. Kromě přečerpávací vodní elektrárny není žádný jiný možný způsob. Typické skladovací kapacity jsou 50-300 MW. I doba skladování je vysoká a to hlavně z důvodu velmi malých ztrát vzduchu z taven. Může být použit pro uskladnění energie na víc než jeden rok. Dalším velkou výhodou je, že CAES může v nouzovém startování naběhnout asi do 9 minut a asi za 12 minut naběhne za normálních podmínek. Když toto srovnám s klasickou spalovací turbínou, která nabíhá po 20-30 minutách, tak systém CAES je opravdu velmi rychlý.

Hlavní nevýhodou je potřeba dostatečně velkých prostorů v podzemí, aby výstavba CAESu byla ekonomicky únosná.

## **3.2. Přečerpávací vodní elektrárna**

PVE byly první technologie na světě, které byly schopny ukládat velké množství energie. Tato éra začala ve 30- tých letech minulého století. A do sedmdesátých let to byl jediná komerčně nejvýhodnější technologie.[22]

PVE jsou založené na jednoduchém principu. Je složena ze dvou nádrží v různých výškách, které jsou spojené vysokotlakým potrubím, ve kterém je soustrojí (viz Obr. 3.3). V době kdy je potřeba energie, tak je puštěna voda z horní nádrže potrubím přes soustrojí. V soustrojí je turbína, která pohání alternátor a ten následně dodává energii do sítě. Naopak v době kdy není poptávka po energii, tak se voda čerpá čerpadlem z dolní nádrže do horní, kde je opět připravena na puštění dle potřeby. Účinnost dnešních PVE je kolem 70%.[22]



Obr. 3.3 Uspořádání přečerpávacích vodních elektráren. [22]

### Výhody a nevýhody

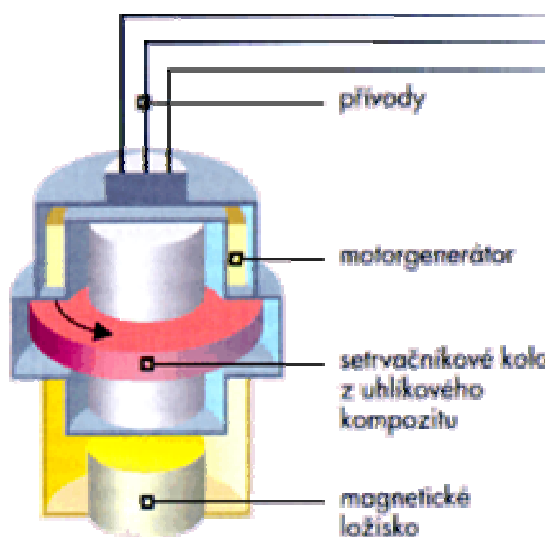
PVE je schopna uchovat největší množství energie a její skladování je nejučinnější. Největší ukládací kapacitu na světě má PVE Inorwic v britském Walesu, která má akumulární výkon ze 6 obrovských turbín (po 317 MW) dohromady až 1800 MW. Tento akumulární výkon je schopna PVE dodávat do sítě během 15 vteřin. Díky jejich jednoduchosti, jsou provozní náklady na 1 kW velmi nízké. [22]

PVE má i spoustu nevýhod. Nejzásadnější je najít v přírodě místo, kde by byla možnost postavit PVE. Kde by byly dvě velké nádrže, které by bylo možno spojit či kde by byla možnost výstavby těchto nádrží. A když už se povede najít vhodné místo, tak je to většinou v horách na odlehlém místě, kde je těžká dostupnost výstavby a nemožnost na napojení rozvodné sítě. Další problém je samotná cena výstavby PVE. I když provozní náklady jsou levné, tak samotná kapitálová cena PVE je obrovská, jelikož se jedná o výstavbu obrovských podzemních potrubí a občas i samotných přehrad.

### 3.3. Setrvačnick

Setrvačnick je nejstarší koncepce na ukládání mechanické energie. Dnes se například využívá při vyrovnávání chodů u všech spalovacích motorů či jiných strojů.

Setrvačnick funguje na principu uchování kinetické energie. Kinetickou energii získám pomocí elektrického příkonu, kterým se roztáčí rotor. V tuto chvíli se chová jako „motor“. Při potřebě energie se motor bleskově přemění na generátor a je vytvářena energie. Moderní setrvačnick jsou vyrobeny z uhlíkových kompozitů, které jsou lehké a rotor dosáhne s těmito kompozity větší rychlosti. Pro dosahování velkých rychlostí je důležité samotné uložení rotoru. Rotor je uložen ve vakuu, často v magnetických ložiskách, aby se snížil odpor vzduchu a samotné tření na ložiskách. [15] Setrvačnick se dodávají do průmyslu, kde i několikavteřinový výpadek elektřiny může způsobit škody na řídicích a počítačových systémech ve výrobě. Příkladem můžou být 70 kg vážící setrvačnick DYBAT, které dokážou po dobu 30 s dodávat výkon 70 kw. Následující obrázek (viz Obr. 3.4) zobrazuje řez setrvačnicku. [22]



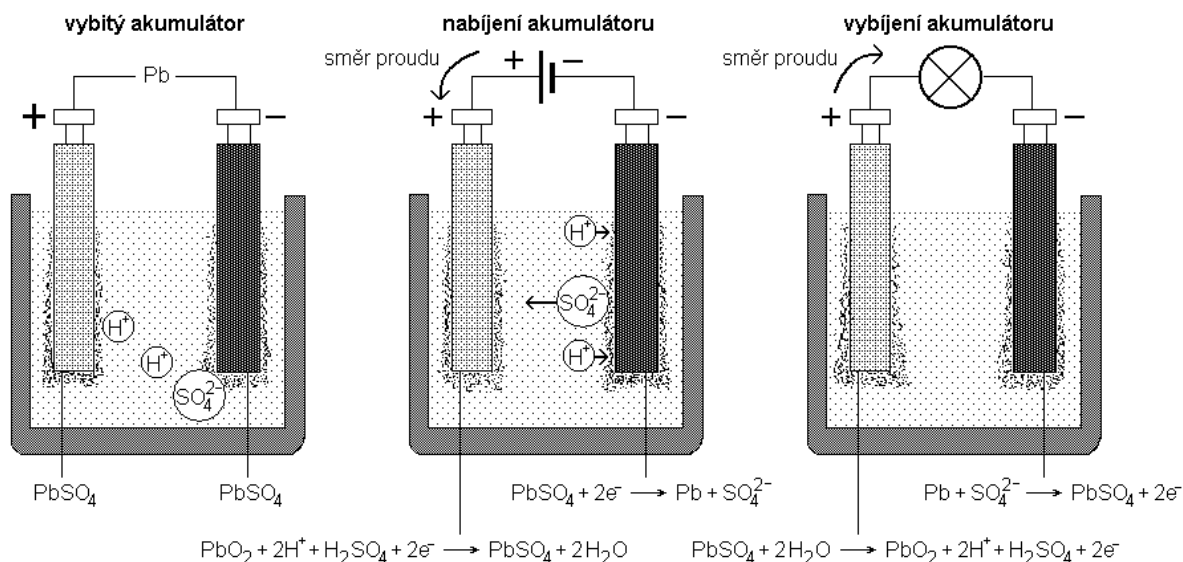
Obr. 3.4 Setrvačnickový akumulátor s rotorem z uhlíkového kompozitu zavěšeného v magnetických ložiskách, otáčejícím se rychlostí 100 000 otáček za minutu [22]

### Výhody a nevýhody

Setrvačníky nejsou ovlivňováni okolními extrémními teploty a jsou nenáročné na údržbu. Mají velkou účinnost (lepší než 80%) a mají schopnost mít větší měrný výkon na rozdíl od baterií. Na druhou stranu z jejich bezpečností jsou spojena určitá rizika a to díky tomu, že rychlost rotoru je obrovská a tím se zvětšuje možnost jeho rozbití a následném uvolnění veškeré energie. Jelikož vývoj setrvačnicku nejde tak rychle, jako například u chemických baterií, tak nynější cena setrvačnicku je vysoká a z tohoto důvodu není konkurenceschopná na trhu.

## 3.4. Olověné akumulátory

Olověné akumulátory pracují na principu, který je znám déle než 140 let. Byl vynalezen v roce 1859 Gastonem Plante a je to nejstarší typ baterie.[22] Akumulátor jsou složeny z olověných desek (anoda a katoda), které jsou v páru. Desky jsou ponořeny do nádoby, která obsahuje roztok kyseliny sírové. Při nabíjení se dodávaný nabíjecí proud z jiného zdroje se mění elektrická energie v chemickou energii a během vybíjení se akumulovaná energie mění na elektrickou a je dodávána zpět do elektrického odvodu, kde je akumulátor zapojen. Záporná elektroda je katodou během vybíjení a anodou během nabíjení. Při vybíjení reaktant oxiduje a volně elektrony předává záporné elektrodě. Kladná elektroda je anodou během vybíjení katodou během nabíjení. Při vybíjení zde dochází k redukci reaktantu volně elektrony reaktant přijímá z kladné elektrody.[23] Následující obrázek (viz Obr. 3.5) dokresluje slovní komentář.



Obr. 3.5 Schéma olověného akumulátoru [23]

Olověné akumulátory se dají rozdělit podle typu elektrod na akumulátory s deskovými elektrodami a akumulátory s elektrodami trubkovými. Deskové akumulátory se zaplavenou konstrukcí se vyznačují příznivou cenou, která je kolem 50 Euro/kWh. Nicméně u těchto akumulátorů je malá hustota energie na jednotku provozu (50 Wh/dm<sup>3</sup>) a životnost je také malá. Podle podmínek provozu se počítá pouze v rozmezí

0,5 až 3 roky.[24] Nicméně díky ceně se využívají v rozvojových zemích pro domácí solární systémy.

Trubkové olověné akumulátory se zaplavenou konstrukcí mají životnost asi 8 let při 50% DOD. Je to vykoupeno cenou, která se pohybuje kolem 150 Euro/kWh.[24] Tyto akumulátory se využívají u velkých, stacionárních PV aplikací.

### **3.5. Alkalické akumulátory**

Společným znakem této skupiny akumulátoru je použití elektrolytu, kterým je vodný roztok hydroxidu alkalického kovu, nejčastěji hydroxidu draselného (KOH).[1]

#### **3.5.1. Nikl- kadmiové (Ni-Cd) akumulátory**

Ni-Cd baterie pracují na podobném principu jako olověné baterie. Jen kladnou elektroda tvoří hydroxid niklu a zápornou elektrodu kadmium, které jsou nejčastěji v alkalickém elektrolytu (hydroxid draselný). Ni-Cd mají vysokou spolehlivost v extrémních podmínkách, mají vyšší hustotu energie na jednotku provozu ( $100 \text{ Wh/dm}^3$ ), dobrou toleranci na přebíjení a přebití (přepólování), malé samovybíjení a v neposlední řadě mají dobrou životnost. Životnost je více než 500 cyklů při 80% DDO.[24]

Jejich největší problém je jejich složení. Oba dva kovy (Ni, Cd) jsou jedovaté a Cd je ještě k tomu vysoce nebezpečný karcinogenní kov. Vzhledem k tomu, že tyto kovy tedy značně ohrožují život člověka a životní prostředí, tak se od tohoto typu akumulátoru v posledních letech upouští.

#### **3.5.2. Ni-MH (Nikl Metal Hydriové) akumulátory**

Mají přibližně třikrát větší objemovou koncentraci ( $300 \text{ Wh/dm}^3$ ) než Ni-Cd akumulátory. Jejich největší nevýhodou je jejich cena, která je 10- 12 větší než olověné baterie podobného výkonu.[24] Je to dáno cenou použitých slitin prvků titan- zirkon a samotnou současnou technologií, která je složitá a drahá.

### **3.6. Další druhy**

Mezi alkalické akumulátory jsou méně obvyklé systémy nikl-zinek, nikl-hybrid kovu a vzduch zinek, z dalších nealkalických akumulátorů jde o systém brom-zinek, síra-sodík, lithium-ion. V této podkapitole si podrobněji popíšeme princip Lithium-ion akumulátoru, NAS akumulátoru.[1]

#### **3.6.1. Lithium- Iontové (Li-ion) akumulátor**

Princip li-ion akumulátoru je závislý na iontu  $\text{Li}^+$ , který při nabíjení a vybíjení přechází z kladné elektrody a naopak. Po nabití mají jmenovité napětí 3,6 V. Elektrody těchto článků jsou z tzv. interakčních sloučenin (sloučeniny, které nemohou do své krystalové mřížky přijmout cizí atom nebo molekulu).[25] Princip dokresluje následující obrázek (viz Obr. 3.6)

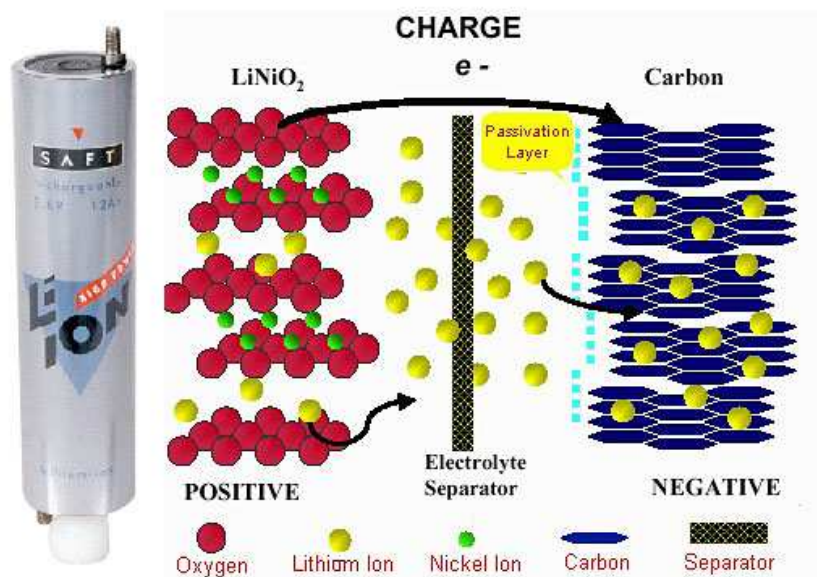


Photo Courtesy of SAFT America

Obr. 3.6 Princip Li-Ion akumulátoru [25]

Materiálem katody jsou tedy sloučeniny  $\text{LiNiO}_2$ ,  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , materiálem anody uhlíkové matrice. Matrice musí velmi dobře přijímat ionty lithia a opět je snadno uvolňovat, tj. interakční děj musí být vratný. Anoda a katoda jsou v elektrolytu, který je nejčastěji tvořen soli lithia (např.  $\text{LiPF}_6$ ) a rozpouštědla.

V porovnání s alkalickými akumulátory jsou li-ion akumulátory lepší v:

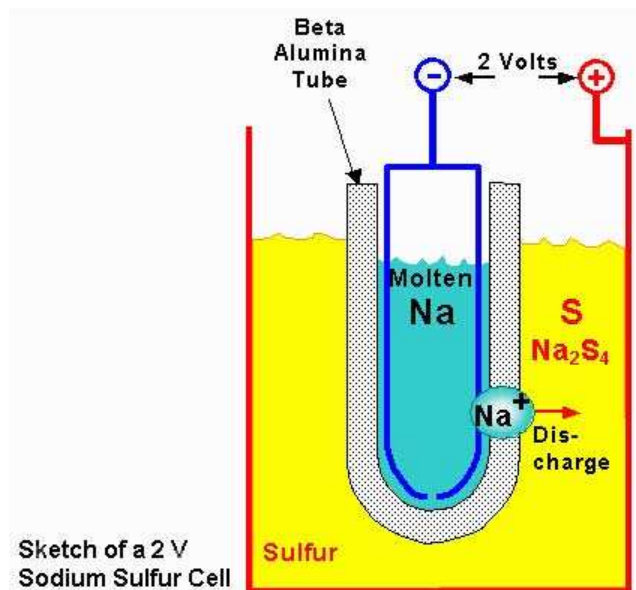
- Vysoká hustota energie (300- 400 kWh/m<sup>3</sup>)
- Vysoká účinnost (téměř 100%)
- Dlouhá životnost (cca 3000 cyklů při 80% DDO)

Nevýhodou je samovybíjení (ztráta výchozí kapacity), kdy se ztráta po měsíci pohybuje mezi 5 až 8%. Ale jako hlavní nevýhoda je cena, která se pohybuje okolo 600 dolarů/kWh, a proto se zatím používá jen v mobilních zařízeních.[25]

### 3.6.2. NAS akumulátory

Baterie NAS používá roztavený kov síry na kladné elektrodě, roztavený kov sodíku na záporné elektrodě a beta oxid hlinitý, který tvoří pevný elektrolyt (viz Obr. 3.7 ). Během vybíjení se roztavený sodík chová jako anoda a roztavená síra jako katoda. Hliník je dobrý vodič sodných iontů, ale špatný vodič elektronu a tím se zabrání samovybíjení.[25] Elektrolytem tedy projde kladný iont sodíku a spojí se ze sírou ( $2\text{Na} + 4\text{S} = \text{Na}_2\text{S}_4$ ) a vznikne jmenovité napětí 2V. Když se tedy baterie vybíjí, tak klesá množství sodíku. Během nabíjení probíhá proces naopak. Aby byl tento proces možný, tak akumulátory se udržují při teplotě kolem 300 °C.[1]





Obr. 3.7 Princip NAS akumulátoru [25]

Baterie NAS mají vysokou hustotu energie, vysokou účinnosti, která je přibližně 89%. Mezi její další přednosti patří, že jsou vyrobeny z levného a netoxického materiálu. Nicméně se ale musí provozovat při vysokých teplotách a jsou vhodné jen pro velké provozování. V dnešní době se s nimi hodně počítá v Japonsku, kde akumulují energii v celkové výši 270 MW a jsou schopny dodávat tuto energii po dobu 6-ti hodin do sítě.[25]

### 3.7. Supravodivé indukční akumulátory

Supravodivost byla objevena v roce 1911 Heikem Kamrlinghem Onnesem. Při jeho měření tepelné závislosti na elektrickém odporu použil smyčku pevné rtuti, kterou ponořil do kapalného helia. Při teplotě 4,2 K zjistil, že elektrický odpor náhle poklesne a má tak malé hodnoty, že se stane neměřitelně malým. V průběhu dalších let se přišlo ještě na další kovy, slitiny, u kterých také při velmi nízkých teplotách poklesne odpor na neměřitelné hodnoty. Značná nevýhoda byla, ale ve chlazení heliem. Chlazení heliem bylo velmi drahé a samotné chladičské systémy byly velmi poruchové. Z těchto důvodů se omezil jen na použití v experimentálních laboratořích. To se změnilo v roce 1986, kdy byly objeveny vysokoteplotní supravodiče. Ty už měli kritickou teplotu kolem 90 K, a proto už se nemusí chladit heliem, ale můžeme použít dusík (teplota varu 77 K). Dusík se může dobře vyrábět z venkovního vzduchu a tím je i tato varianta levnější.[15]

Zatím bylo realizováno několik menších supravodivých akumulátorů, určených k překonání krátkodobých výpadků proudu v závodech na výrobu polovodičů, čipů a filmů, kde i výpadek pouhé desetininy sekundy může způsobit velké škody a ochromit výrobu. První malé supravodivé akumulátory UPS (Uninterruptible Power Supplies) z USA pracují se supravodivou cívkou ponořenou do kapalného helia, která je nabíjena přes usměrňovač. Proud v ní cirkuluje s minimální ztrátou 0,3 kWh za 24 hodin. Už na první hlubší pokles napětí sítě na začátku výpadku reaguje akumulátor během 0,2 mikrosekundy a může dodávat po překlenovací dobu nejchoulostivějšímu uzlu v továrně výkon kolem 1 MW.[22]

Větší supravodivý akumulátor SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) o kapacitě 800 Wh stabilizuje spojovací vedení společnosti Bonneville Power v Oregonu

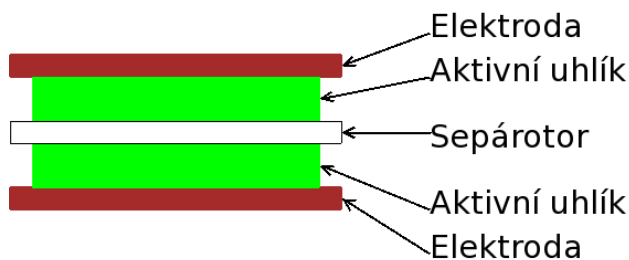
(USA). Obstál při několika milionech cyklů nabití-vybití. Doba nabíjení i vybíjení je extrémně krátká a účinnost lepší než 95 %.[22]

Existují i studie v nichž se mluví o energetických supravodivých akumulátorech s kapacitou až 4 000 MW, schopných nahradit přečerpávací akumulární elektrárny. Mají mít podobu prstence (případně umístěného v podzemí), v němž je v kapalném heliu ponořena smyčka z tlustého měděného vodiče. Ztráty se započtením příkonu kryogenní stanice udržující helium na teplotě pod minus 269 °C nemají být menší než 1 %.[22]

### 3.8. Superkondenzátory

Jako elektrický akumulátor může sloužit kondenzátor nebo cívka. Na rozdíl od malé kapacity kondenzátoru je kapacita soustav na principu cívky velká. Jejich nevýhodou jsou nákladné investice a to, že se nedají ekonomicky vyrobit v menších jednotkách. Jsou prostorově náročné, řádově více než převážná většina ostatních způsobů. Do budoucna by se, ale daly využít tzv. superkondenzátory (supercapacitors), někdy označovány i jako ultrakondenzátory (ultracapacitors) nebo EDLC (electric Double Layer Capacitor).[15]

Superkondenzátor(viz Obr. 3.8) se skládá z kladné a záporné elektrody z hliníkové fólie, dvou vrstev aktivního uhlíku a mezi nimi separátor. V nenabitém stavu jsou částice s nenulovým nábojem (ionty) rovnoměrně rozloženy ve vodivém tekutině, tekutém nebo gelovém elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a naopak kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří dvouvrstva se zrcadlovým rozložením elektrického náboje. Použitelné napětí je omezeno hodnotou disociačního napětí. Průrazné napětí elektrické dvouvrstvy je velmi nízké a tak typické provozní napětí superkondenzátorové buňky nepřesahuje 2,3 V.[26]



**Obr. 3.8 Základní struktura superkondenzátoru[26]**

Mezi jejich největší výhody patří[26]:

- Nízký vnitřní odpor a tím tedy vysoká účinnost (95% a více) a velmi malé vytápění
- Vysoká efektivita při nabíjení
- Možnost velmi častého nabíjení a vybíjení (mnoho cyklů)

Nevýhody:

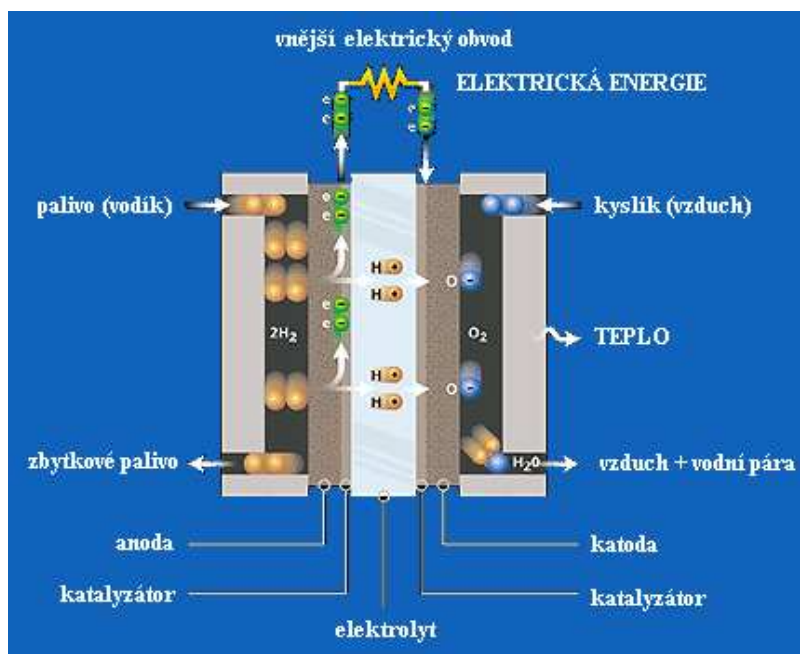
- Množství energie uložené na jednotku váhy je nižší než u elektrochemických článků (3-5 W.h/kg pro superkondenzátory v porovnání s 30-40 W.h/kg pro klasické baterie).
- Napětí se mění v závislosti na množství uložené energie (podobně jako u kondenzátorů).
- Mají nejvyšší dielektrickou absorpci ze všech typů kondenzátorů

I přes nevýhody se může říci, že superkondenzátory mají budoucnost. Vyplňují totiž místo mezi klasickými kondenzátory a nabíjecími akumulátory. Existuje opravdu mnoho aplikací, kde kondenzátory mají malou kapacitu, ale naopak akumulátory mají pomalé nabíjení, limitované zatížení a krátkou životnost. A proto se budou superkondenzátorů využívat nejpravděpodobněji k krátkodobému zálohování zdrojů při krátkých výpadcích napájení (hodiny, radiobudíky, stolní PC, rekordéry a vypalovací zařízení apod.), vyrovnávání a akumulaci el. energie pro malé větrné a solární elektrárny, hybridní automobily a napájení nízko příkonové kapesní elektroniky.

### 3.9. Vodíkové hospodářství

Tzv. vodíkovým hospodářstvím se začali vědci zabývat v 60. letech 20. století. Prvotně se jednalo o využití mimošpičkového výkonu z jaderných elektráren, jak tomu je u přečerpávacích elektráren. Teprve v posledních letech se začalo uvažovat o ukládání energie z PV systému a větrných elektráren.[4]

Asi nejperspektivnějším využitím vodíku je výroba elektrické energie v tzv. palivových článcích řízenou elektrochemickou reakcí- tzv. studenou oxidací vodíku nebo-li studeným spalováním. Palivové články jsou elektrochemická zařízení přeměňující chemickou energii v palivu během oxidačně- redukční reakce přímo na generaci elektrického proudu za vzniku jen menšího množství tepla. Kontinuálně musí být přiváděno palivo i okysličovadlo k elektrodám a odváděny spaliny. Nejjednodušším a nejpropracovanějším jsou palivové články založené na slučování vodíku s kyslíkem (viz Obr. 3.9) Porézní elektrody jsou odděleny elektrolytem, v oblasti póru vzniká třífázové rozhraní, kde dochází k elektrochemické oxidaci paliva a k redukci okysličovadla. Pórovitá elektroda umožňuje elektrolytu vlínat do póru, ale tlak plynu za elektrodou nedovoluje kapalině póry pronikat. Elektrody bývají z ušlechtilých materiálů i jako katalyzátory chemických reakcí.[4]



Obr. 3.9 Princip výroby elektřiny v palivovém článku

Vodík jako palivo má mnoho výhod. Jak je vidět v tabulce (viz Tab. 3.1), tak má ze všech paliv největší výhřevnost. Jeho spalováním vzniká pouze vodní pára a menší množství oxidu dusíku, nevznikají oxidy uhlíku, síry a ani jiné škodliviny. Největší slabinou vodíku je jeho výbušnost, což klade vyšší nároky na konstrukci zřízení z hlediska bezpečnosti. Dále je to skladování samotného vodíku. Vodík je lehký, má nízkou hustotu, a proto nádrž kapalný vodík musí být zhruba třikrát větší než nádrže na benzín se stejným obsahem energie. Plynný vodík snáze uniká netěsnosti a může difundovat do kovů, což způsobuje křehnutí ocelí. I přes tyto nevýhody se očekává, že význam vodíku jako paliva rychle poroste.

druh paliva	Výhřevnost[MJ/kg]
lignit jihomoravský	10
hnědé uhlí sokolovské	14
tvrdé dřevo	16
hnědé uhlí severočeské	16
Svítiplýn	19
černé uhlí kladenské	23
koks otopový	27-30
černé uhlí ostravské	28
Měrné palivo	29
čistý uhlík	33
Benzín	43
Methan	50
Vodík	96
jaderné palivo pro JE Temelín	$3,9 \cdot 10^6$
anihilace hmoty	$9,0 \cdot 10^{10}$

Tab. 3.1 Výhřevnost paliv[4]

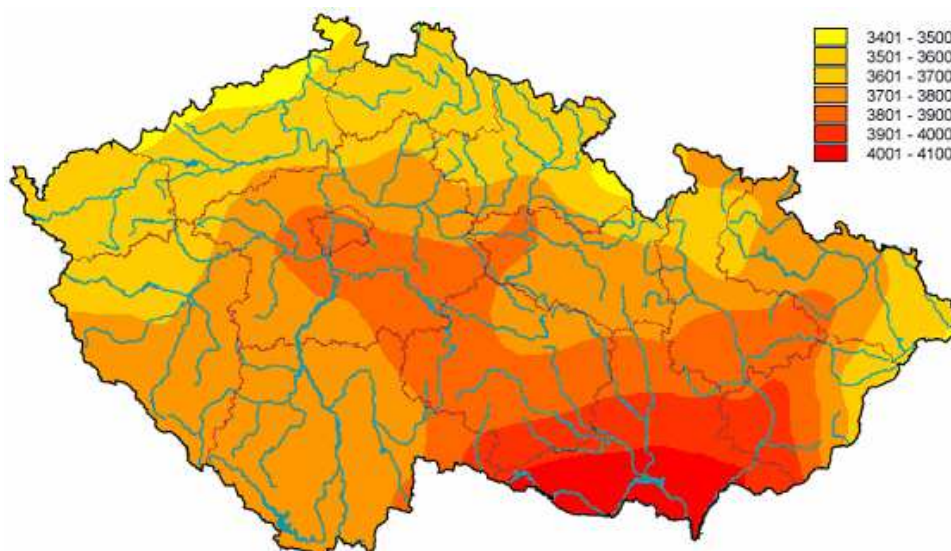
## 4. Návrh systému akumulace

Úkolem této práce je srovnat možnosti akumulace elektrické energie z fotovoltaické elektrárny o jmenovitém výkonu 1 000 kW. Fotovoltaická elektrárna bude ležet ve středních Čechách u obce Nový Dům, která leží v nadmořské výšce 355 m n.m. GPS souřadnice tohoto místa jsou 50°5'31''N, 13°50'1''E. Akumulace elektrické energie bude navržena a následně srovnána ve třech různých provedeních:

- Akumulace elektrické energie do akumulátoru
- Akumulace elektrické energie pomocí stlačeného vzduchu
- Akumulace elektrické energie v přečerpávací elektrárně

### 4.1. Slunečního záření v ČR

Základním parametrem pro návrh fotovoltaické elektrárny je dostupnost solárního záření. Záření závisí na mnoho parametrech, jako je geografická poloha (Obr. 4.1), roční období, oblačnost a úhel dopadajícího zření.



Obr. 4.1 Průměrný roční úhrn globálního záření[MJ/m<sup>2</sup>] [9]

#### 4.1.1. Výpočet teoretického záření

U solárního záření je tedy velmi důležitá intenzita solárního záření. Je to základní veličina pro všechny výpočty týkající se dopadání energetického účinku ze Slunce na povrch Země. Na vrchní část atmosféry dopadá sluneční konstanta  $I_0 = 1360 \text{ Wm}^{-2}$ . [3] Průchodem atmosférou se část záření odrazí, či pohltí. Záření je složeno z přímého záření a difúzního záření. Z následujících vztahů mohou vypočítat jednu část záření, která se nazývá přímé záření  $I_{pn}$ .

$$I_{pn} = I_0 \exp\left(\frac{-Z}{\varepsilon}\right)$$

$$\varepsilon = \frac{\{9,38076[\sin(h) + (0,003 + \sin^2(h))0,5]\}}{[2,0015(1 - H \cdot 10^{-4})] + 0,91018}$$

Kde  $\varepsilon$  závisí na nadmořské výšce místa (H)[m] a výšce slunce nad obzorem (h)[°] a Z je hodnota znečištění. U znečištění lze počítat s přibližnými hodnotami:

Z=2 pro místa nad 2000m n.m.,

Z=2,5 pro místa nad 1000m n.m.,

Z=3 pro venkov bez průmyslových exhalací

Z=4 pro města.

Druhá část záření je záření difúzní  $I_D$ . Difúzní záření je záření, které se při průchodu atmosférou rozptýlí odrazem od molekul plynů, částičky mraků a prachu a záření odražené od okolních ploch. [3] Můžeme ho vypočítat ze vztahu

$$I_D = 0,5[1 + \cos(\alpha)] \cdot I_{dh} + 0,5 \cdot r[1 - \cos(\alpha)](I_{ph} + I_{dh})$$

$$I_{ph} = I_{pn} \sin(h)$$

$$I_{dh} = 0,33(I_0 - I_{pn}) \cdot \sin(h)$$

kde  $\alpha$  je úhel sklonu oslněné plochy k vodorovné rovině [°],

$I_{dh}$  intenzita difúzního záření na vodorovnou plochu [ $\text{Wm}^{-2}$ ],

$I_{ph}$  intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu [ $\text{Wm}^{-2}$ ],

r je Albedo[-], což je míra odrazivosti povrchů vyjadřující poměr odraženého elektromagnetického záření ku dopadajícímu. Pro běžné výpočty difúzního záření se počítá s hodnotou 0,2.

Celkové solární záření se tedy skládá z přímého a difúzního záření. Výsledné záření je potom dáno součtem těchto dvou složek

$$I = I_{pn} + I_D$$

#### 4.1.2. Technický dopad slunečního záření

Budeme brát v úvahu, že největší dopad slunečního záření je v červenci, jelikož slunce dosahuje v tomto měsíci nevyšší výšky nad obzorem a je nejvíce hodin na obloze. Když dosadíme hodnoty výšky slunce nad obzorem pro určitý čas (viz Tab. 4.1)spolu s hodnotami známými z polohy plánované elektrárny do předešlých vztahů(viz Kap.4.1.1), tak vypočítáme celkové teoretické solární záření [ $\text{W.m}^{-2}$ ]za den i jednotlivé hodiny, které jsou v tabulce(viz Tab. 4.1)

hodina [t]	azimut slunce [°]	výška slunce nad obzorem [°]	$I_{PN}$ [W.m <sup>-2</sup> ]	$I_D$ [W.m <sup>-2</sup> ]	$I$ [W.m <sup>-2</sup> ]
5	-114,11	6,07	282,06	35,43	317,50
6	-103,17	15,19	559,89	66,83	626,73
7	-92,12	24,73	733,03	85,84	818,87
8	-80,23	34,33	840,04	98,34	938,37
9	-66,48	43,56	907,05	106,86	1013,91
10	-54,64	51,73	947,94	112,49	1060,44
11	-60,98	57,72	970,12	115,74	1085,86
12	63,45	60	977,15	116,80	1093,95
13	60,98	57,72	970,12	115,74	1085,86
14	54,64	51,73	947,94	112,49	1060,44
15	66,48	43,56	907,05	106,86	1013,91
16	80,23	34,33	840,04	98,34	938,37
17	92,12	24,73	733,03	85,84	818,87
18	103,17	15,19	559,89	66,83	626,73
19	114,11	6,07	282,06	35,43	317,50
		celkem za den	11457,44	1359,86	12817,30
		průměr za den	763,83	90,66	854,49

Tab. 4.1 Intenzita přímého a difúzního záření v měsíci červenec

Z tabulky (viz Tab. 4.1) je zřejmé, že poměr difúzního záření a přímého se mění během dne v závislosti na hodinách. Tabulka je počítána pro počasí, kdy je úplně jasná obloha a tím i maximální hodnota teoretického záření na m<sup>2</sup>. Pokud je, ale zataženo, tak na celkové záření působí pouze difúzní záření. Tím by se dalo říct, že můžeme vždycky vypočítat minimální dopadající záření na m<sup>2</sup>.

### 4.1.3. Návrh úchytného systému panelů

U přímého záření zaleží na úhlu dopadu záření na plochu. Jako dopadající plochu budeme brát fotovoltaický panel, který můžeme upevnit fixně nebo na natáčecích systémech. Úhel mezi plochou a vodorovnou rovinou bude 35°. Pouze systému, kde jsou natáčecí panely upevněny v jedné ose svírající s vodorovnou rovinou 45° bude úhel pro výpočet 45°. Přímé záření při dopadu na různé systémy upevnění se tedy mění dle vztahu

$$I_p = \cos(\gamma) I_{pn}$$

kde  $I_{pn}$  je hodnota přímého záření v jednotlivých hodinách (viz Tab. 4.1) kolmo na m<sup>2</sup> a  $\cos \gamma$  je úhel dopadu, který se pro jednotlivé systémy vypočítá následovně:

1) Systém pevných fotovoltaických panelů (fixní)

$$\cos(\gamma) = \sin(h)\cos(\alpha) + \cos(h)\sin(\alpha)\cos(a - a_s)$$

2) Systém natáčení fotovoltaických panelů v jedné svislé ose

$$\cos(\gamma) = \cos(h)$$

3) Systém natáčení fotovoltaických panelů v jedné ose svírající s vodorovnou rovinou 45°

$$\cos(\gamma) = \sqrt{1 - \{\cos(h - \alpha) - \cos(\alpha)\cos(h)[1 + \cos(a - a_s)]\}^2}$$

4) Systém natáčení fotovoltaických panelů kolem dvou os

$$\cos(\gamma) = 1$$

kde  $h$  je výška slunce nad obzorem [°]

$\alpha$  úhel mezi ozářeným panelem a vodorovnou rovinou [°]

$a$  azimut slunce [°]

$a_s$  azimut panelu (směr natočení) [°]

Celkové záření je tedy opět dáno součtem difúzního záření a přímým zářením na odlišné systémy

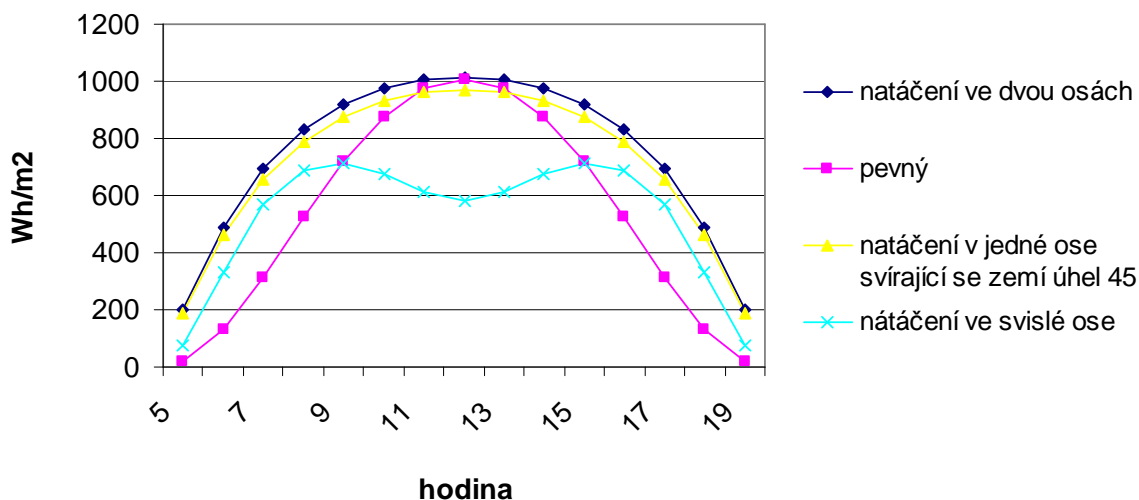
$$I = I_p + I_D$$

Po vypočítání celkového teoretického záření  $I$  na 1 m<sup>2</sup>, můžeme vidět v tabulce (viz Tab. 4.2) a na následujícím grafu (viz Obr. 4.2) rozdíl mezi jednotlivými uchyteními fotovoltaických panelů. Z grafu i tabulky jde vidět, že nejefektivnější systém, je systém, který se natáčí za sluncem kolem dvou os.

systém uchytení panelů	denní záření [W/m <sup>2</sup> ]
otočný 2 osy	12748,94
Pevný	8760,18
natáčejí v jedné ose svírající se zemí 45°	12111,80
natáčečí ve svislé ose	7621,31

Tab. 4.2 Teoretické dopadající denní záření na různé systémy uchytení ( červenec)





Obr. 4.2 Teoretické dopadající záření během dne na různé systémy uchycení(červenec)

#### 4.1.4. Slunečné dosažitelné množství energie

Zatím jsme uvažovali tzv. teoretickou dobu svitu  $\tau_{teor}$  (viz Tab. 4.3), která je určena krajními hodnotami  $\tau_1$  a  $\tau_2$  určující východ a západ Slunce. Tato hodnota svitu je stanovena za předpokladu, že obloha je nepřetržitě jasná, což v našich klimatických podmínkách je téměř nereálné. Skutečnou dobu slunečního svitu v jednotlivých měsících se zjišťuje z dlouhodobých klimatických dat. Jelikož naše fotovoltaická elektrárna bude stát na 50°severní šířky, stejně jako Praha, tak využijeme Skutečnou dobu slunečního svitu pro Prahu(viz Tab. 4.4.)

den	teoretická doba slunečního svitu $\tau_{teor}$ [h]
22.12.	7,85
22.11. a 21.1	8,26
23.10. a 20.2.	10,12
23.9. a 21.3.	12,00
23.8. a 21.4.	13,90
23.7. a 22.5.	15,70
22.6.	16,34

Tab. 4.3 Teoretická doba slunečního svitu pro charakteristické dny [3]

měsíc	leden	únor	březen	duben	květen	červen
skutečná doba slunečního svitu $\tau_{skut}$ [h]	53	90	157	187	247	266
měsíc	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
skutečná doba slunečního svitu $\tau_{skut}$ [h]	266	238	190	117	53	35

Tab. 4.4 Skutečná doba slunečního svitu jednotlivých měsíců [3]

Z tabulek můžeme vyjádřit tzv. poměrnou dobu slunečního záření svitu jako

$$\tau = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor} \cdot d}$$

Kde  $\tau_{teor}$  je teoretická doba slunečního svitu[h]

$\tau_{skut}$  je skutečná doba slunečního svitu[h]

$d$  je počet dnů v daném měsíci

Když známe teoretickou intenzitu přímého a difúzního záření(viz Tab. 4.1) a poměr doby slunečního svitu, tak můžeme skutečné dosažitelné množství vyjádřit vztahem

$$I_{skut} = \tau \cdot I_{Pden} + (1 - \tau) \cdot I_{Dden}$$

Kde  $\tau$  je poměrná doba slunečního svitu[-]

$I_{Pden}$  je teoreticky dosažitelné dopadající záření za den[W.m<sup>-2</sup>]

$I_{Dden}$  je teoreticky dosažitelné dopadající záření za den[W.m<sup>-2</sup>]

Po dosazení známých hodnot do vztahů na výpočet skutečného dopadajícího záření v červenci, nám vyjde opět, že systém natáčející se ve dvou osách bude nejlepší možným systémem. Je pravda, že tento systém je dražší než klasický fixní systém, ale samotné dopadající záření na panel o velikosti 1 m<sup>2</sup> je přibližně o 30% větší.

systém uchycení panelů	denní záření[W/m <sup>2</sup> ]
otočný 2 osy	6385,77
pevný	4489,84
natáčející v jedné ose svírající se zemí 45°	6068,78
natáčecí ve svislé ose	4102,15

Tab. 4.5 Skutečné dopadající denní záření na různé systémy uchycení( červenec)

#### 4.1.5. Návrh panelů a úchytného systému

Panely budou uchyceny na natáčecím systému, jak jsem si zvolili v předchozí kapitole. Plochy na usazení fotovoltaických panelů u natáčecích věží bývají ve velikostech od 10 do 80 m<sup>2</sup>. Pro naši elektrárnu využijeme věže, které mají velikost natáčecí plochy o ploše 40 m<sup>2</sup> a 60 m<sup>2</sup> (viz Obr. 4.3)



Obr. 4.3 Dvousá polohovací jednotka SF-60 [27]

Na tyto věže upevníme panely, které budou od firmy Sharp (viz Tab. 4.6). Jmenovitý výkon vybraných panelů je 180 W<sub>p</sub>. Při jmenovitém výkonu elektrárny 1000 kW, vypočítáme počet panelů dle vztahu

$$\text{Počet panelů} = \frac{\text{výkon elektrárny}}{\text{výkon panelu}} = \frac{1000}{0,18} \cong 5554 \text{ panelů}$$

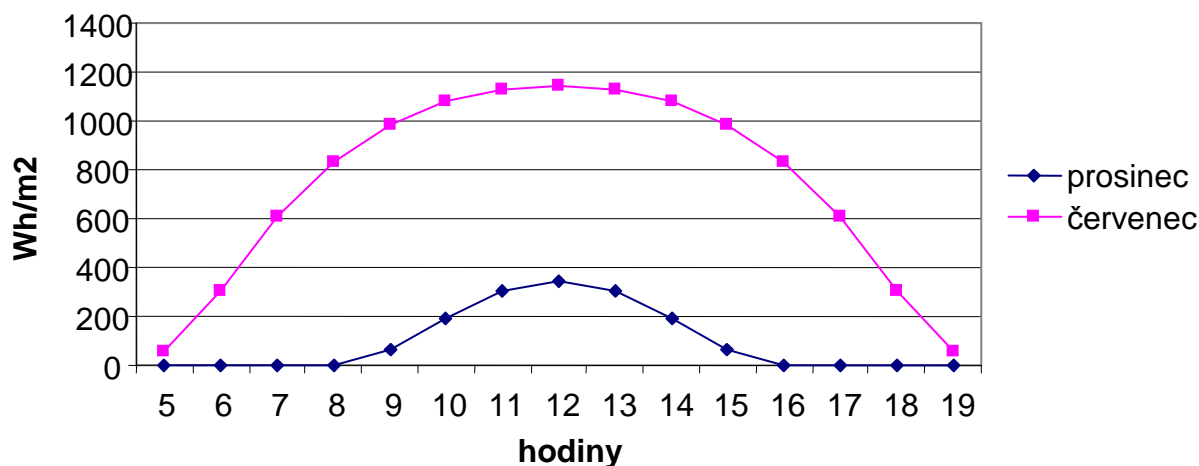
parametry	
rozměry	1318x994x46 mm
jmenovitý výkon	180 W
napětí při max. výkonu	23,7 V
proud při max. výkonu	7,6 A
účinnost modulu	13,70%
účinnost solárního článku	15,70%

Tab. 4.6 Parametry fotovoltaického modulu Sharp NUS0E3E 180 W [27]

## 4.2. Akumulace elektrické energie

### 4.2.1 Akumulace elektrické energie do akumulátoru

Jelikož akumulace elektrické energie do akumulátoru není u takového výkonů obvyklá, tak celý systém zapojení bude složen z mnoha sekcí a tím celá instalace bude dražší. Elektrická energie se bude akumulovat jen částečně. Když se podíváme na obrázek (viz Obr. 4.4), tak je vidět, že teoretický dopad slunečního záření je v letních měsících delší a několika násobně větší než v zimních měsících.

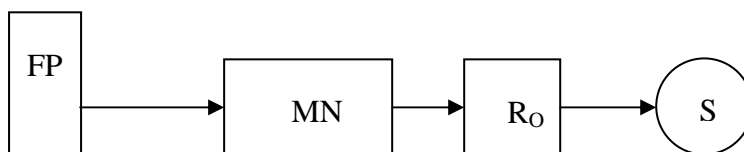


Obr. 4.4 Teoretické dopadající denní záření ( prosinec, červenec)

Aby sluneční elektrárna dodával přibližně stejné množství energie do rozvodné sítě celodenně, tak v létě by měla 1/2 fotovoltaických panelů dodávat přímo přes měnič do sítě a druhá 1/2 by se měla akumulovat do akumulátoru. Akumulovaná energie by byla vypouštěna v době kdy nebude možnost vyrábět sluneční energii (noc, zataženo). Tento model by, ale nemohl pracovat v zimních měsících, jelikož denní sluneční svit je cca o šest hodin kratší a tím by se nestihla naakumulovat energie na noční provoz. Dále si musíme uvědomit, že při akumulaci není 100 %-tní zpětná přeměna energie do elektrické sítě. Z toho důvodu změníme celkový poměr panelů, které jsou zapojeny do sítě a panelů, které jsou zapojeny na akumulátory a z nich následně do sítě. A to tak, že z 1/3 panelů půjde energie přímo do sítě a 2/3 panelů budou napojeny do akumulátoru. Podle této úvahy rozdělím celkových 5554 panelů na 1858 panelů, které budou připojeny do sítě a 3696 panelů, které připojím na akumulátory a následně budou připojeny do sítě.

### 4.2.2 Zapojení do sítě

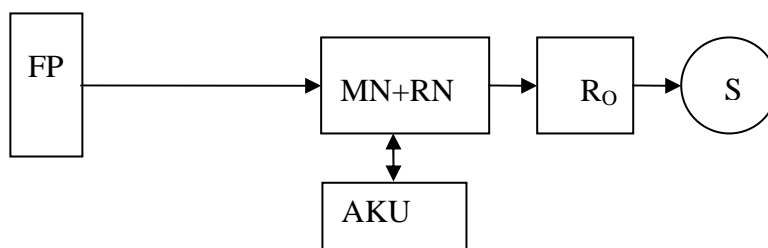
Toto zapojení můžeme vidět na obrázku (viz Obr. 4.5). Celkový počet 1858 panelů určených k zapojení do sítě se rozdělí na 45 věží s plochou  $60 \text{ m}^2$  a 2 věže s plochou  $40 \text{ m}^2$ . Na věže o ploše  $60 \text{ m}^2$  upevním 40 panelů, respektive 29 panelů, které budou zapojeny v sérii. Napětí u fotovoltaických panelů je jednosměrné, ale do sítě se musí dodávat střídavé napětí. K tomuto slouží měnič napětí, které budou upevněny u každé natáček věže. U všech věží použijí měnič Pesos PVI 8000[27], který má dostatečné parametry pro zapojené panely a má vysokou účinnost (96%). Elektrická energie je z měničů následně přivedena na rozvaděč a odtud už půjde energie rovnou do sítě.



Obr. 4.5 Zapojení na přímo do sítě

### 4.2.3 Zapojení na akumulátor

U tohoto zapojení nemohou být panely zapojeny do série, jako v předešlém zapojení, ale musíme je zapojit paralelně. Paralelní zapojení nemění napětí na výstupu, ale mění proud. A proto toto zapojení volíme z důvodů, že baterie pracují na napětí 12,24,48V. Zvolené fotovoltaické panely mají maximální výstupní napětí 24 V a z toho důvodu bude dále pracovat s akumulátory o napětí 24 V. Aby nedocházelo například k přebití akumulátoru či nadměrnému vybití akumulátoru, což jsou jevy, který značně snižují životnost baterie, tak musí být zapojen před akumulátorem nabíjecí regulátor. Nabíjecí regulátor u naší elektrárny bude nainstalován přímo v měniči napětí (viz Tab. 4.7). Jelikož náš zvolený měnič s nabíjecím regulátorem má vstupní proud 70 A, tak nemůžeme zapojit do paralelní větve více než 8 panelů. Tato skutečnost nás značně eliminuje, a proto zapojení musíme rozdělit do sekcí. Každá sekce bude složena z panelů, měniče napětí s nabíjecím regulátorem, akumulátoru (viz Obr. 4.6). Všechny sekce budou připojeny k rozvaděči a z nich půjde elektrina do sítě.



Obr. 4.6 Zapojení do akumulátoru

Sunny Island Si2224	
jmenovité napětí(AC)	230 V
jmenovitý proud	9,6 A
trvalý výkon	2200 W
Max. účinnost	93,60%
Max. parametry akumulátoru:	
Napětí baterie	24 V
efektivní nabíjecí proud	70 A

Tab. 4.7 Parametry měniče napětí [28]

#### 4.2.4 Návrh akumulátoru

Celkový počet 3696 panelů rozdělíme do 528 sekcí po 7 panelech. Panely upevníme na 88 věží, které budou mít úložnou plochu po 60 m<sup>2</sup>. Tzn., že na jedné otáčecí věži bude upevněno 6 sekcí (42 panelů). Uvažujeme, že kapacita připojených baterií na jednu sekci by měla pokrýt dodávku elektrické energie po dobu, kdy není sluneční svit(cca 15 hodin). Akumulátory budeme dimenzovat na nejvyšší možnou vyrobenou energii, což je v měsíci červenec. V tomto měsíci je z jedné sekce vyrobeno v průměru 933,22 W/h. Za předpokladu, že napětí na vstupu z fotovoltaických panelů je 24 V, bude hodnota stejnosměrného proudu a kapacita baterií:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{933,22}{24} = 38,8 \text{ A}$$

$$C = I \cdot t = 38,8 \cdot 15 = 583,27 \text{ Ah}$$

Vypočtenou kapacitu musíme vynásobit koeficientem 1,3, což je bezpečnostní faktor na dimenzování akumulátorů.

$$C_{bez} = C \cdot 1,3 = 583,27 \cdot 1,3 = 1\,206,24 \text{ Ah}$$

Pro vypočítanou kapacitu zvolím akumulátory od firmy Schüco. Tato společnost má ve své nabídce baterii s dostatečnými kapacitami a specializuje se na akumulátory pro fotovoltaické elektrárny. Pro náš případ vybereme akumulátor s technologií olovokyselina(viz Tab. 4.8), která má kapacitu 1210 Ah. Tento typ baterie má vysokou spolehlivost, odolnost vůči cyklickému nabíjení

Schüco 12 OPzS 1200	
nominální napětí	2 V
Kapacita	1210 Ah
stabilita cyklů(50% DOD)	3000
stabilita cyklů(80% DOD)	1500
hmotnost(vč.elektrolytu)	88 kg
rozměry(d x š x v)	215x277x710 mm
Cena	15 120 Kč

Tab. 4.8 Parametry akumulátoru [28]

Jelikož zvolené akumulátory mají nominální napětí 2 V a na výstupu z fotovoltaických panelů máme 24 V, tak je musíme zapojit do sériových bloků. Když zapojíme 12 akumulátorů Schüco do série, tak dostaneme napětí na požadovanou hodnotu 24 V a kapacita zůstane nezměněna (1210 Ah).

### 4.3. Akumulace z fotovoltaických panelů pomocí stlačeného vzduchu

#### *Možnosti při akumulaci stlačeným vzduchem<sup>[5]</sup>*

Plyny jsou mnohem více stlačitelné než kapalina nebo pevné látky, a proto se využívají při akumulaci elektrické energie. Na skladování menšího množství plynu mohou použít ocelové kontejnery jako se používají na stlačený vzduch. Na skladování většího množství se používají jeskyně. Pokud uvažujeme, že vzduch je ideální plyn, tak tlak  $P$  a teplota  $T$  vychází ze stavové rovnice

$$PV = nRT \quad (4-1)$$

Kde  $V$  je objem vyplněný vzduchem,  $n$  je látkové množství v objemu a  $R$  je molární plynová konstanta, která je pro vzduch  $8,315 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Funkci kompresoru si můžeme představit na válci s pístem, který je uzavřen daným množstvím molů plynu, tedy vzduchu, a stlačený vzduch je vytvořený stlačováním uzavřeného prostoru tlakem. Rostoucí síla  $f_x$  působí na píst, zatímco co dochází ke snížení objemu z  $V_0$  do  $V$ . Množství uskladněné energie je

$$W = A \int_{x_0}^x f_x dx = - \int_{V_0}^V P dV \quad (4-2)$$

kde  $A$  je plocha průřezu válce,  $x$  a  $x_0$  jsou plochy pístu, které odpovídají  $V$  a  $V_0$  a  $P$  je tlak uzavřeného vzduchu.

#### *Adiabatická akumulace*

Pokud budeme uvažovat systém s proměnným tlakem, tak potom se komprese okolního vzduchu uskutečňuje přibližně jako adiabatický děj. Adiabatický děj je děj bez tepelné výměny s okolím. Zavedeme  $\kappa$  koeficient a vynásobíme parciální derivaci tlaku s ohledem na objem v konstantní entropii a v konstantní teplotě.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_S = \kappa \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T \quad (4-3)$$

Při uvažování v ideálním plynu dosadíme do(4-1) dostaneme

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = -P/V, \text{ nebo} \quad (4-4)$$

$$PV^\kappa = P_0 V_0^\kappa \quad (4-5)$$



Konstanty na pravé straně jsou vyjádřeny tlakem  $P_0$  a objemem  $V_0$  daném okamžiku. Poissonova konstanta  $\kappa$  vzduchu má velikost 1,4. Hodnota se snižuje s narůstající teplotou a narůstá se zvyšujícím tlakem, tak  $PV^\kappa = P_0^\kappa V_0^\kappa$  není zcela platná pro vzduch. Nicméně v teplotním a tlakovém intervalu, které jsou důležité pro praktické použití stlačeného vzduchu při skladování, tak se hodnota  $\kappa$  mění o méně než  $\pm 10\%$  od průměrné hodnoty. Vložením(4-2) do(4-5)dostaneme množství akumulované energie,

$$W = -\int_{V_0}^V P_0 \left(\frac{V_0}{V}\right) dV = \frac{P_0 V_0}{\kappa - 1} \left( \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\kappa - 1} - 1 \right) \quad (4-6)$$

nebo jinak

$$W = \frac{P_0 V_0}{\kappa - 1} \left( \left(\frac{P}{P_0}\right)^{(\kappa - 1)/\kappa} - 1 \right) \quad (4-7)$$

Přesněji řečeno, tohle je požadována práce pro adiabatickou kompresi počátečního objemu vzduchu. Tento proces ohřívá vzduch z počáteční teploty  $T_0$  na teplotu  $T$ , kterou můžeme napsat z rovnice(4-1) do formy

$$\frac{T}{T_0} = \frac{PV}{P_0 V_0} \quad (4-8)$$

A spojit s adiabatickou podmínkou (4-5),

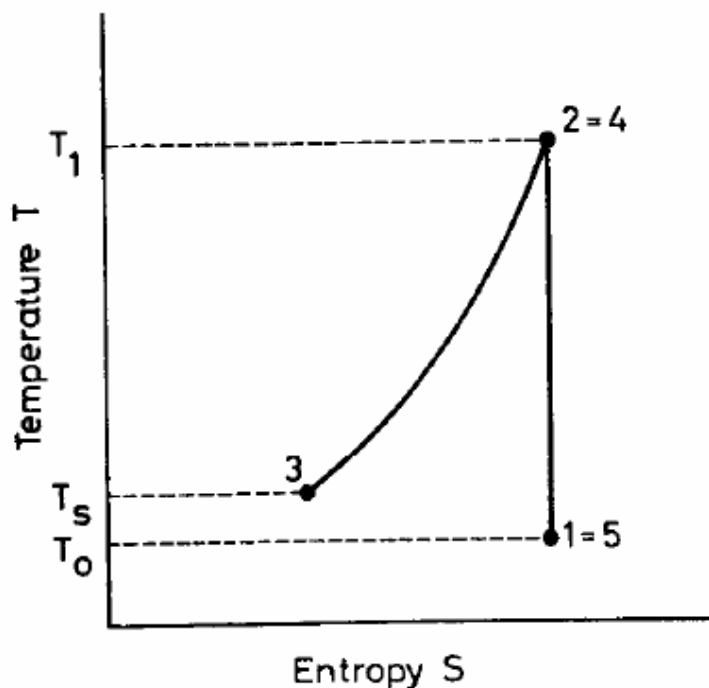
$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{(\kappa - 1)/\kappa} \quad (4-9)$$

Vzhledem k tomu, že žádoucí tlaky pro praktické aplikace mohou mít poměr  $P/P_0 = 70$ , tak můžeme očekávat teploty vyšší než 1000 K. Takové to velké teploty by byly, ale nepříjemné pro většinu dutin, a proto je vzduch ochlazován již před ukládání do dutiny. Okolní teploty pro podzemní akumulaci jsou okolo 300 K. Tato teplota je označena  $T_s$  a po odstranění tepla dostaneme

$$Q = c_p (T - T_s) \quad (4-10)$$

kde  $c_p$  je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku. V ideálním případě může být odstraněné teplo ze vzduchu uchováno v dobře izolovaném tepelném zásobníku energie a následně může být použit pro regeneraci vzduchu, který je pak použit k vykonání práce

v expanzní turbíně. Vidět to můžeme jako termodynamický proces v T-S diagramu (viz Obr 4.7), ve kterém je zobrazena akumulace energie v ideálním případě. Kde kroky 1-2 jsou adiabatická komprese a 2-3 jsou izobarické chlazení do jeskynní teploty. Při zpětném ději dochází k izobarickému ohřívání (3-4) a adiabatické expanzi přes turbínu (4-5).  $T_0$  je povrchová okolní teplota,  $T_1$  je teplota po stlačení a  $T_s$  je jeskynní teplota.



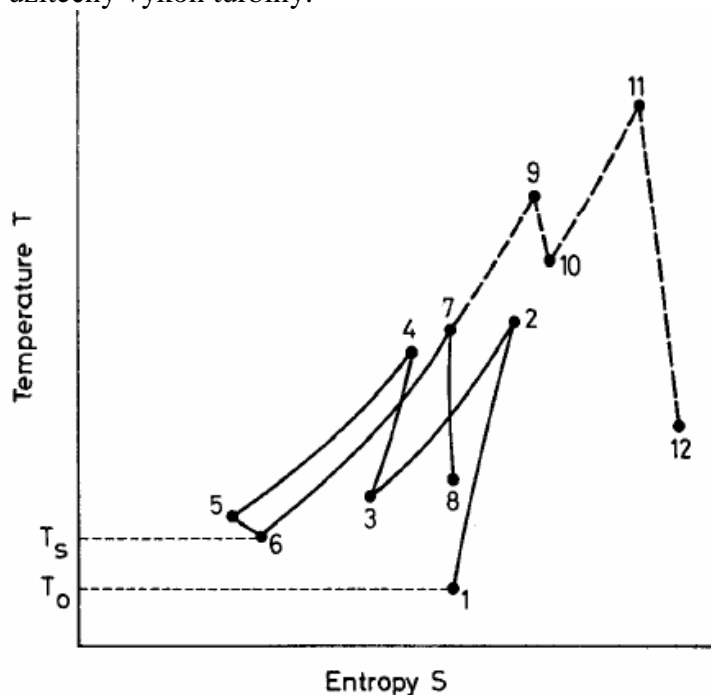
Obr. 4.7 Průběh komprese a expanze vzduchu [5]

### *Průběh komprese a expanze*

V praxi má kompresor ztrátu (cca 5-10%), což znamená, že ne všechna energie (elektrická, mechanická) je použita ke kompresní práci na vzduch. Dochází zde totiž ke ztrátám tepla, které vzniká třením apod. Bohužel ne všechno odstraněné teplo při chladícím procesu může být použito k rekuperaci vzduchu. Tepelné výměníky mohou být ztrátové během akumulace energie z hlediska časového intervalu mezi chlazením a znovu ohříváním. Typické ztráty na turbíně jsou kolem 20% z energetických vstupů. Pokud bychom, ale dosáhli tepelných ztrát pod 10%, tak by mohl mít celý skladovací cyklus účinnost asi 65%.

Skutečný proces může vypadat, jak je uvedeno na obrázku (viz Obr. 4.8), pokud jde o teploty a entropické změny. Kompresní ztráta mezi body 1 a 2 se změní na vertikální linii, aby byla zahrnuta zvýšená entropie. Potom byla komprese rozdělena do dvou kroků (1-2 a 3-4), aby se snížila maximální teplota. Dále tam jsou dva chladící kroky (2-3 a 4-5) a následuje mírné ochlazení v dutině okolní teplotou (5-6). Práci získávaný postup zahrnuje v tomto případě jediný krok 6-7, regenerace použitím akumulace tepla z chladících procesů (v některých případech je použito více, než jeden krok regenerace). A poslední je krok 7-8, což je turbínová etapa, která nezobrazuje otevřený cyklus dosahující počáteční teploty (a tlaku) vzduchu při opuštění turíny a smícháním se s okolní atmosférou.

Současné době existuje pouze několik rozsáhlých akumulacních zařízení. První bylo postaveno v roce 1978 ve německém Hunterfu. Toto zařízení je dimenzováno na 290 MW a vzduch skladuje ve třech podzemních jeskyních, kde každá jeskyně má cca objem  $3 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ . Nemá žádnou tepelnou regeneraci, ale má dvě plynové turbíny, což naznačuje, že konečná expanze se uskutečňuje s teploty vyšší, než jakékoliv z předchozích zapojení a také vyšší tlak. To je zobrazeno na obr. v krocích (7-9-10-11-12), kde kroky (9-10) a (11-12) ukazují expanzi prostřednictvím turbíny. Jestliže je přidán do systému rekuperátor tepla, jako je tomu na zařízení v McIntochu v Alabamě, která byla vybudována v roce 1991, tak se bod 7 posune nahoru směrem k bodu (9) a bod (8) se bude pohybovat ve směru (12), což ukazuje zvětšený užitečný výkon turbíny.



Obr. 4.8 Průběh komprese a spalování [5]

Účinnost zařízení se změní případně dodatečného spalování paliva. Dodatečný přírůstek je z rovnice  $Q = c_p(T - T_s)$  s vhodnými teplotami a primární přírůstek tepelného obsahu  $Q_0$  je získán přidělením  $Q$  paliva k tepelné účinnosti směšovače. Vstupní práce  $W_{in}$  kompresoru se mění v případě určité účinnosti kompresoru  $\eta_k$

$$W_{in} = \frac{P_0 V_0}{\kappa - 1} \left( \left( \frac{P}{P_0} \right)^{(\kappa-1)\kappa\eta_k} - 1 \right) \quad (4-11)$$

Práce dodána turbínou, do které vstupuje vzduch o tlaku  $P_1$  a objemu  $V_1$  a výstupní vzduch má hodnoty  $P_2$  a  $V_2$  s danou účinností turbíny  $\eta_T$  je

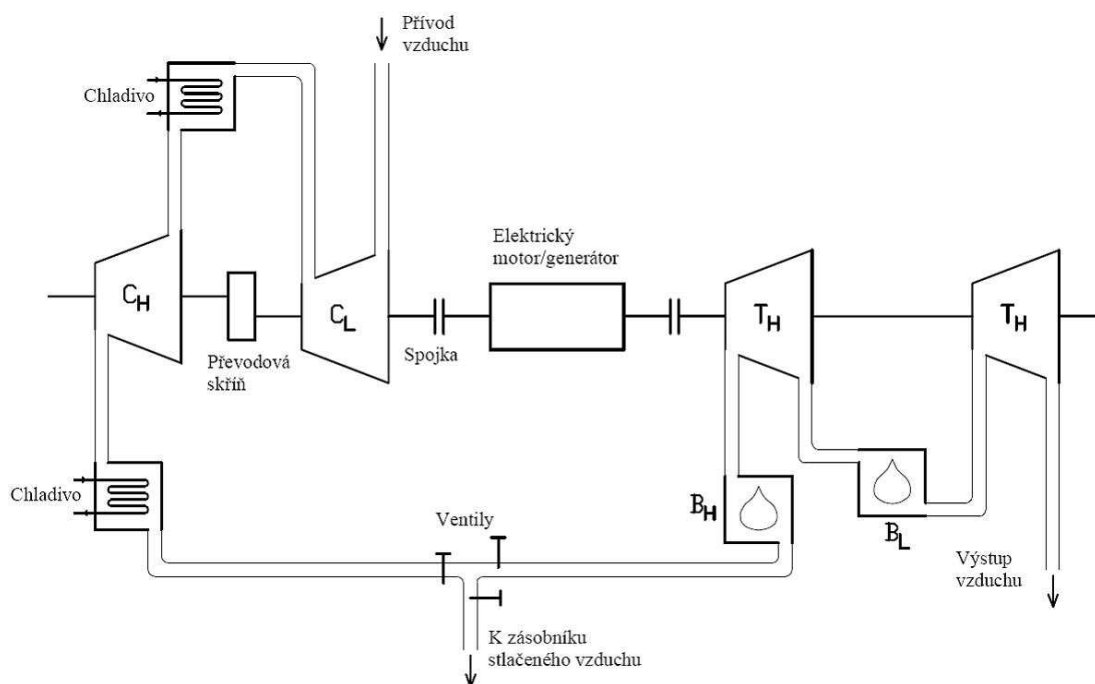
$$W_{out} = \frac{P_1 V_1}{\kappa - 1} \left( 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\eta_T (\kappa-1)/\kappa} \right) \quad (4-12)$$

V případě, že je pouze jeden kompresor a jednostupňová turbína, tak celková účinnost cyklu je dána

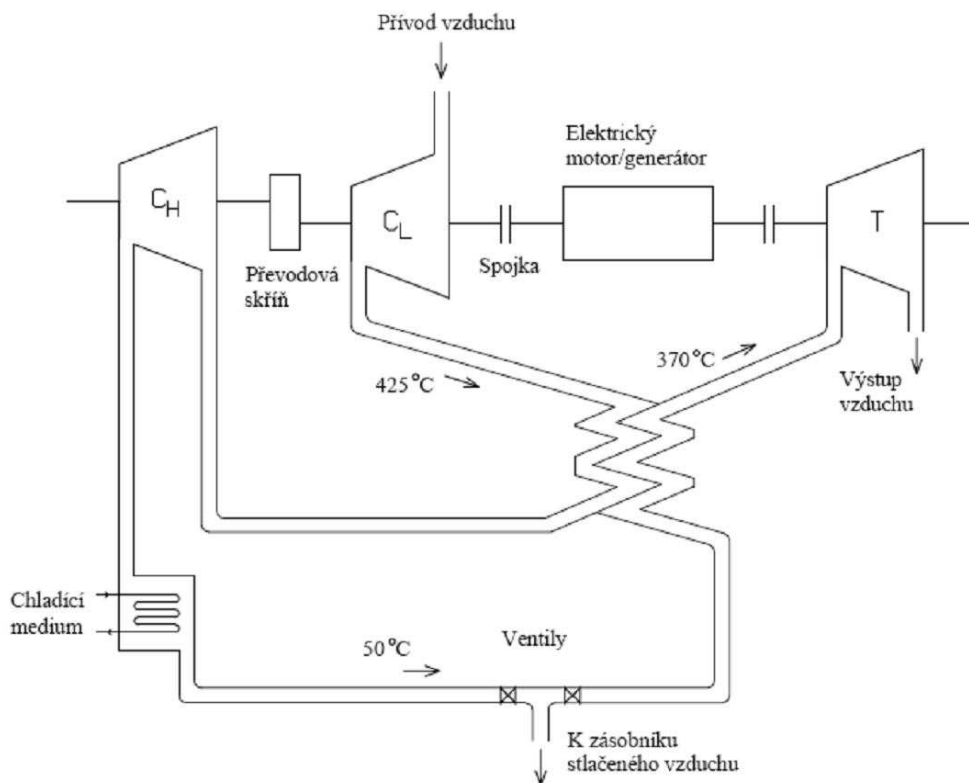
$$\eta = \frac{W_{out}}{(W_0 + Q_0)} \quad (4-13)$$

Pro zařízení v německém Hunterfu (viz Obr. 4.9) je účinnost soustrojí  $\eta=0,41$ . Je používáno pro poskytování špičkového výkonu ve všední dny a nabíjí se během noci a o víkendy.

Obrázek ukazuje náčrt německého zařízení a obrázek zobrazuje pokročilejší instalaci s regenerací a bez dodávky paliva, což odpovídá dvěma trasám zobrazených na obrázku (viz Obr. 4.10). Na obrázcích (viz Obr. 4.9a Obr. 4.10) jsou kompresory označeny C, turbíny T a hořáky jsou B. Indexy H/L popisují vysoký/nízký tlak.



Obr. 4.9 Náčrt zařízení v Hunterfu. Akumulace pomocí stlačeného vzduchu [5]

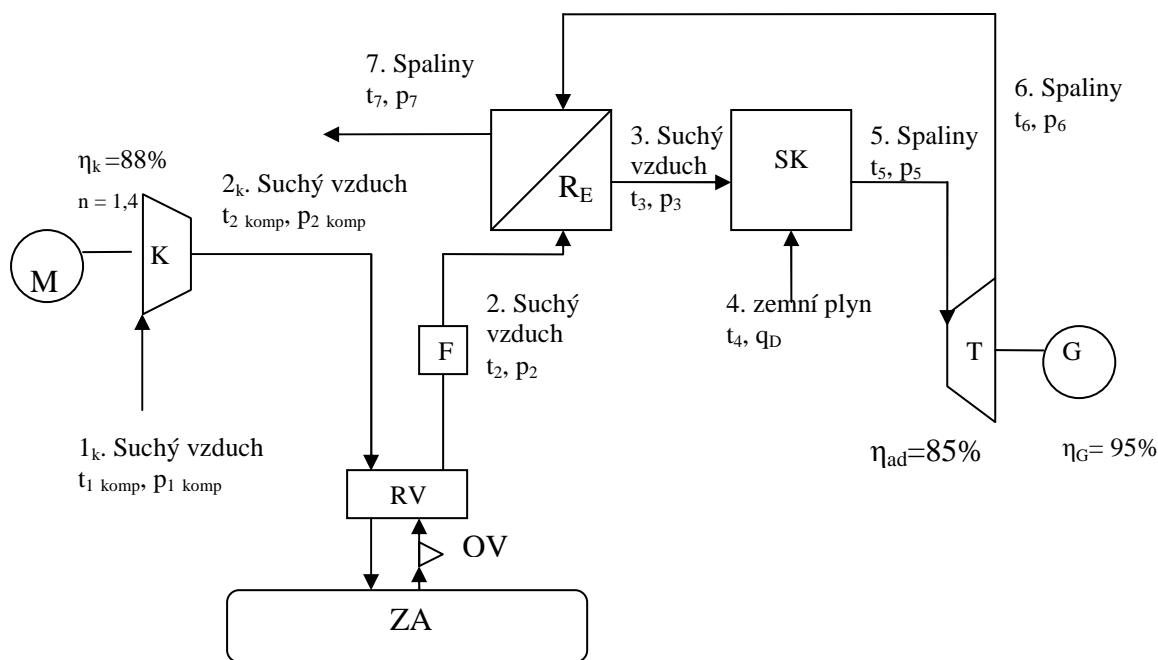


Obr. 4.10 Nákres pokročilého zařízení akumulace stlačeného vzduchu s regenerací tepla a s žádným palivovým příkonem [5]

#### 4.3.1. Návrh systému akumulace

Akumulace elektrické energie z fotovoltaické elektrárny bude opět probíhat ve stejném poměru jako tomu bylo v předešlé kapitole. Tzn., že z 1/3 panelů bude dodána energie hned do sítě (viz Obr. 4.5) a z 2/3 panelů se bude akumulovat na noční provoz. Energie z fotovoltaických panelů půjde přes měnič napětí (pesos PVI 8000) a rozvaděč na motory jednotlivých kompresorů.

Budeme uvažovat dva návrhy, abychom si ukázali výhody zvoleného zapojení. První část, kdy kompresory přemění elektrickou energii na stlačený vzduch do kaverny, bude vždy stejná. Druhá část od kaverny k turbíně bude už odlišná, jelikož si na ni ukážeme, jak se může změnit účinnost celého zařízení, když vynecháme rekuperátor. Napřed si vypočítáme účinnost zapojení, které je na obrázku. Na obrázku jde vidět, jak stlačený vzduch pokračuje z kaverny přes odlučovač vlhkosti, filtr pevných částic, regenerační výměník, rekuperátor a spalovací komoru na turbínu. Turbína následně roztočí generátor a vyrobí se elektřina (viz Obr. 4.11)



Obr. 4.11 Návrh systému akumulace stlačeného vzduchu s rekuperátorem

### 4.3.2. Návrh kompresoru a taverny

Stlačení vzduchu budeme zajišťovat 3 šroubovými kompresory od firmy Prusko. Parametry jednoho kompresoru jsou v následující tabulce (viz Tab. 4.9)

Typ	max. tlak [bar]	výkon[m/hod]	příkon[kW]	Rozměry ŠxHxV[mm]	hmotnost[kg]
DRF 220	13	1476	160	3100x1690x2100	4000

Tab. 4.9 Parametry šroubového kompresoru Prusko [30]

Kompresory budou zapojeny paralelně a tím se tedy nezmění jejich výstupní parametry, ale budou moc pracovat s celým příkonem z elektrárny. A v zimě, kdy nebude příkon z elektrárny tak veliký, tak nemusí pracovat všechny najednou, ale například jen jeden.

Opět budeme muset dimenzovat podzemní kavernu na největší možnou přeměněnou elektrickou energii. Nejvíce vyrobené energie budeme opět předpokládat za nejintenzivnějšího a nejdelšího svitu, což je měsíc červenec. Abychom mohli vypočítat celkové vyprodukované množství vzduchu, tak se musí nejprve vypočítat průměrný denní výkon 2/3 panelů. Průměrný denní výkon z těchto panelů je 474,52 kW/h. Když tento výkon bude přivádět na kompresory po dobu celého slunečného dne v červenci (15 hodin) tak vyprodukují

$$V = \frac{P_{denní}}{P_{komp}} \cdot V \cdot \tau = \frac{474,52}{480} \cdot 1476 \cdot 15 = 21\,887 \text{ m}^3$$

Z výpočtu jde vidět, že budeme potřebovat taveru minimální o velikosti 21 887 m<sup>3</sup>.

Parametry pro kompresy

Kompresorová účinnost 85%. Nasátý vzduch do kompresoru má parametry o velikosti tlaku 101,325 kPa a teploty 15°C. Komprese vzduchu je 1,4. Tlak vzduchu na výstupu z kompresoru bude 1300 kPa.

Kompresse:

$$K = \left( 1 + \frac{\frac{n-1}{\varepsilon_K^n} - 1}{\eta_K} \right) = \left( 1 + \frac{13^{\frac{1,4-1}{1}}}{0,85} \right) = 2,27$$

Výstupní teplota vzduchu

$$T_{2komp} = (T_{1komp} + 273,15) \cdot K = (15 + 273,15) \cdot 2,27 = 654,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

nebo

$$t_{2komp} = T_{2komp} - 273,15 = 654,6 - 273,15 = 381,45 \text{ }^\circ\text{C}$$

Rozdíl teplot

$$\Delta T = t_{2komp} - t_{1komp} = 381,45 - 15 = 366,45 \text{ }^\circ\text{C}$$

Měrná tepelná kapacita

$$c(t) = a_1 + a_2 \cdot t + a_3 \cdot t^2$$

$$\text{kde: } a_1 = 906,423, a_2 = 0,604, a_3 = 1,991 \cdot 10^{-4}$$

$$c(t_1) = 1018,329 \text{ J / kg} \cdot \text{K}$$

Práce kompresoru na 1 kg vzduchu

$$a_t = c \left( \frac{t_{2komp} + t_{1komp}}{2} \right) \cdot \nabla T = c \left( \frac{381,45 + 15}{2} \right) \cdot 366,45 = 3,73 \cdot 10^5 \text{ J / kg}$$

Rychlost proudění vzduchu

$$v_{vzd} = \frac{P_{kompresse, \max}}{a_t} = \frac{160 \cdot 10^3}{3,73 \cdot 10^5} = 0,43 \text{ kg / s}$$

Průtok vzduchu skutečný

$$Q_v = \frac{v_{vzd}}{\rho_{vzd}} = \frac{0,43}{1,225} = 0,35 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\text{kde: } \rho_{vzd} = \frac{p}{0,287 \cdot (273,15 + t)} = \frac{101,325}{0,287 \cdot (273,15 + 15)} = 1,225 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Průtok za hodinu

$$Q_h = Q_v \cdot 3600 = 0,35 \cdot 3600 = 1259,79 \text{ m}^3 / \text{h}$$

### 4.3.3. Návrh akumulčního zásobníku

Stlačený vzduch pokračuje z kompresoru do taverny, která slouží jako objemná nádrž. Jelikož je taverna v podzemí, tak nemá pro tento akumulční proces příznivé podmínky. V podzemí jsou nízké teploty (cca 10°C) a v tavernách je i značná vlhkost. Vlhkost se pohybuje kolem 100%. Proto před vstupem do taverny vybudujeme teplotní výměník. Vzhledem k tomu, že akumulční stanice bude stát na rozsáhlém pozemku, tak se nám nabízí akumulace do štěrku. Štěrka má totiž vhodné vlastnosti, neboť dokáže pracovat s teplotami nad 100 °C. Další výhodou je, že se nemusí řešit složitý tepelný výměník (voda-voda, voda-vzduch). Nevýhodou štěrku je jeho nízká tepelná kapacita. Tzn., že zásobník bude větších rozměrů.

Zásobník tepla bude navržen na maximální objem vzduchu, tak aby byl schopný akumulovat všechno teplo:

Výkon chlazení

$$P_{chl} = v_{vzd,den} \cdot c \left( \frac{t_{2komp} + t_s}{2} \right) \cdot (t_{1komp} - t_s) = 1,69 \cdot c \left( \frac{381,45 + 20}{2} \right) \cdot (381,45 - 20) =$$

$$= 1,69 \cdot 1035,68 \cdot 361,45 = 634 \text{ kW} / \text{h}$$

kde je rychlost vzduchu přepočtena na maximální denní výkon:

$$v_{vzd,den} = \frac{P_{max}}{a_t} = \frac{468,36 \cdot 10^3}{3,73 \cdot 10^5} = 1,69 \text{ kg} / \text{s}$$

a počáteční teplota štěrku je  $t_s = 20^\circ\text{C}$

Pro výpočet velikosti tepelného výměníku použijí kalorimetrickou rovnici

$$Q = m_s \cdot c \cdot \Delta T$$

$$Q_{chl} = m_s \cdot c_s \cdot (t_2 - t_s), \text{ kde měrná tepelná kapacita štěrku je } c_s = 800 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$



Potřebná hmotnost šterku bude

$$m_s = \frac{P_{chl} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{c_s \cdot (t_2 - t_s)} = \frac{634 \cdot 3,6 \cdot 10^6}{800 \cdot (381,45 - 20)} = 7\,893,12 \text{ kg}$$

Objem šterku

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{7\,893,12}{1550} = 5,09 \text{ m}^3$$

kde  $\rho_s$  je hustota šterku

### **Rozměry akumulčního zásobníku**

Půdorys výměníku bude čtvercového základu o rozměru 2,2x2,2 m

$$\text{výška tedy bude } h_v = \frac{V_s}{a^2} = \frac{5,09}{4,84} = 1,05 \text{ m}$$

### **4.3.4. Účinnost zapojení s rekuperátorem**

Jelikož v taverně je velká vlhkost, tak po čerpání vzduchu z taverny se vzduch odvlhčí v odvlhčovači a přes tepelný výměník jde vzduch do rekuperátoru. Účinnost výměníku bude 80%. Z toho lze odvodit, že teplota vzduchu za tavernou bude přibližně 310°C a tlak se sníží na 1050 kPa.

Dále pokračuje vzduch do rekuperátoru, kde se vzduch ohřeje horkými spalinami vystupujícími z expandéru. Ztráta tlaku stlačeného vzduchu v rekuperátoru bude 50 kPa a po ohřátí v něm pokračuje do spalovací komory, kde spolu se spalovaným zemním plynem (výhřevnost 34,26 MJ/Nm<sup>3</sup>) vzniknou spaliny o teplotě 1250 °C. Ztráta tlaku ve spalovací komoře je 30 kPa. Horké spaliny následně přichází na turbínu, kde expandují na tlak 105 kPa a kde adiabatická účinnost expanze spalin bude 85%. Účinnost přeměny energie v generátoru bude 95% a celková účinnost turbokompresoru 88%. Pro zjednodušení výpočtu budeme uvažovat, že  $c_p$  spalin je jako 1,03 násobek  $c_p$  suchého vzduchu při daných teplotách.  $\kappa=1,32$  platí pro spaliny

Napřed si zvolíme, že spaliny budou 1 kmol a vypočítáme

$$T_{6,ad} = \frac{T_5}{\left(\frac{p_5}{p_6}\right)^{\frac{\kappa-1}{\chi}}} = \frac{1523}{\left(\frac{970}{105}\right)^{1,32}} = 888,51 \text{ K}$$

Entalpický obsah spalin by byl po adiabatické expanzi

$$H_{6,ad} = n_6 \cdot c_p (T_{6,ad} - T) = 1 \cdot 1,03 \cdot 30,35 \cdot (888,51 - 273,15) = 19\,236,45 \text{ kJ}$$

Kde jsme dosadili 1,03 násobek střední molové tepelné kapacity suchého vzduchu. Práce získaná při adiabatické expanzi by byla:

$$w_{ad} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot n \cdot R \cdot T_{6,ad} \left[ \left( \frac{p_5}{p_6} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] = \frac{1,32}{0,32} \cdot 1 \cdot 8,314 \cdot 888,51 \cdot \left[ \left( \frac{970}{105} \right)^{\frac{0,32}{1,32}} - 1 \right] = 21\,765,15 \text{ kJ}$$

Využijeme toho, že práce získaná při adiabatické expanzi ze stavu 5,6<sub>ad</sub> je rovna práci komprese ze stavu 6<sub>ad</sub> do 5. Z této práce, ale získáme 85%, jak jsme si zvolili.

$$w_{real} = w_{ad} \cdot \eta_{ad} = 21\,765 \cdot 0,85 = 18\,500,38 \text{ kJ}$$

Rozdíl mezi reálnou a získanou prací při adiabatické expanzi se projeví ve zvýšení entalpie výstupních paliv

$$H_6 = H_{6,ad} + (w_{ad} - w_{real}) = 19\,236,45 + (21\,765,15 - 18\,500,38) = 22\,501,22 \text{ kJ}$$

Této entalpii spalin připadá teplota 718 °C.

Takže teplota spalin při vstupu do rekuperátoru je 718°C a tam se následně ochladí na teplotu 450°C. Odevzdává při tom teplo

$$H = H_6 - H_7 = 22\,501,22 - 1 \cdot 1,03 \cdot 30,35 \cdot (7233,15 - 273,15) = 8\,433,99 \text{ kJ}$$

Vzduch, který jde z kaverny přes teplotní výměník má teplotu 310°C a entalpie tohoto stlačeného vzduchu bude tedy

$$H_2 = n_2 \cdot c_{p,2} \cdot (T_2 - T) = 0,97 \cdot 30,35 \cdot (583,15 - 273,15) = 9\,126,25 \text{ kJ}$$

Přitom předpokládáme, že  $n_2$  je 0,97 a to si také ověříme u energetické bilance a molekulové bilance spalovací komory. Entalpie vzduchu po průchodu rekuperátorem bude

$$H_3 = H_2 + (H_6 - H_7) = 9\,126,25 + 8\,433,99 = 17\,560,24 \text{ kJ}$$

Této hodnotě entalpie odpovídá teplota přibližně 596°C

Entalpie hořících spalin za spalovací komorou je

$$H_5 = n_5 \cdot c_5 \cdot (T_5 - T) = 1 \cdot 1,03 \cdot 32,143 \cdot (1523,15 - 273,15) = 41\,384,11 \text{ kJ}$$

Rozdíl entalpie  $H_5 - H_3$  je potřeba do systému dodat spálením zemního plynu. Musíme tedy dodat  $(41\,384,11 - 17\,560,24) = 23\,823,87 \text{ kJ}$ , což po přepočtu je  $0,695 \text{ Nm}^3$  zemního plynu. Normální molový objem plynu ze stavové rovnice ideálního plynu je 0,02364, což je

po přepočtu zjistíme, že potřebujeme spálit 29,4 mol zemního plynu. Předpokládejme, že když se spaluje methan tak se nemění látkové množství a platí  $n_3 + n_4 = n_5$ . Jelikož jsme za základ výpočtu zvolili 1 kmol spalín a přitom jsme uvažovali  $n_2 = 970 \text{ mol}$ , tak rozdíl 30 mol se dobře shoduje s vypočítanou spotřebou ZP 29,4 mol.

Pro výpočet množství zemního plynu na jeden den v měsíci červenec, kdy je vyprodukované množství vzduchu z kompresoru  $21\,887 \text{ m}^3$ , budeme vycházet ze stavové rovnice. Stavovou rovnici upravíme na tvar

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p} = \frac{1000 \cdot 8,315 \cdot 1\,523,15}{970\,000} = 13,07 \text{ m}^3$$

Na ohřátí plynu na požadovanou teplotu  $1\,250 \text{ °C}$  je potřeba plynu

$$V_{pot} = \frac{21\,887}{13,07} \cdot 0,695 = 1\,163,85 \text{ m}^3$$

Při ceně 13 Kč za  $\text{m}^3$  by byla cena využitelného zemního plynu 15 130 Kč.

Pro výpočet účinnosti musíme vypočítat kompresní práci kompresoru

$$w_{komp} = \frac{n}{n-1} \cdot n_2 \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{1,4}{0,4} \cdot 0,97 \cdot 8,314 \cdot 288,15 \cdot \left[ \left( \frac{1050}{101,325} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} - 1 \right] = 7\,730,33 \text{ kJ}$$

$$P_{komp} = \frac{w_{komp}}{\eta_{komp}} = \frac{7\,730,33}{0,85} = 9\,094,51 \text{ kJ}$$

Čistá získaná elektrická energie z turbíny se vypočítá jako rozdíl získané expanzní práce a spotřebované kompresní práce:

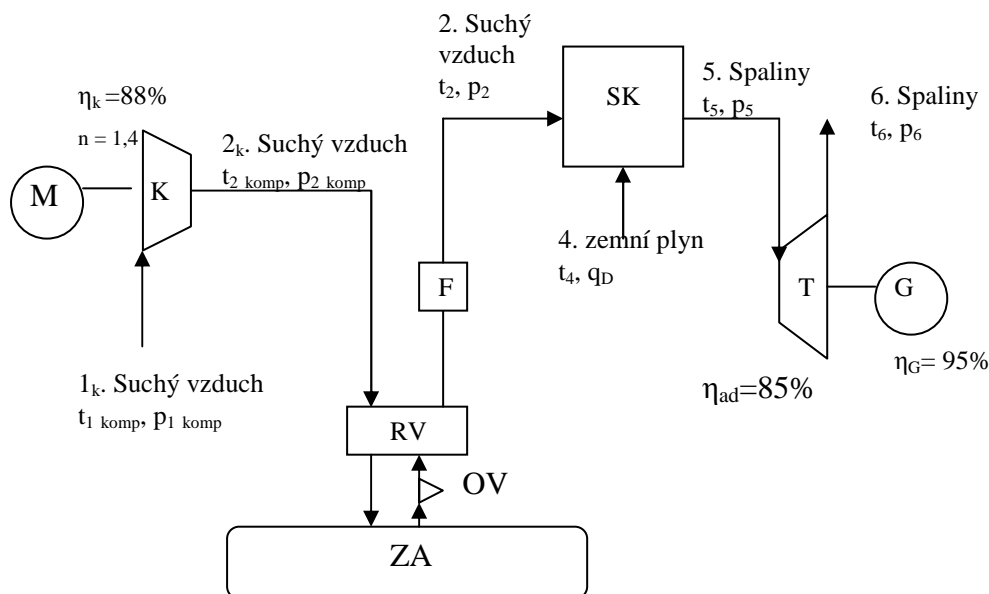
$$Q_{el} = (w_{real} - P_{komp}) \eta_g = (18\,500,38 - 9\,094,51) \cdot 0,95 = 8\,935,578 \text{ kJ}$$

Výslednou elektrickou účinnost rekuperované spalovací turbíny získáme jako

$$\eta_{el} = \frac{Q_{el}}{(H_3 - H_5)} = \frac{8\,935,58}{23\,823,87} = 0,38 \Rightarrow 38\%$$

### 4.3.5. Účinnost systému bez rekuperátoru

Pokud vyjmemme ze systému rekuperátor, tak spaliny, které využíváme v předešlém systému půjdou do komína a tím nám klesne i teplota suchého vzduchu, která jde do spalovací komory (viz Obr. 4.12)



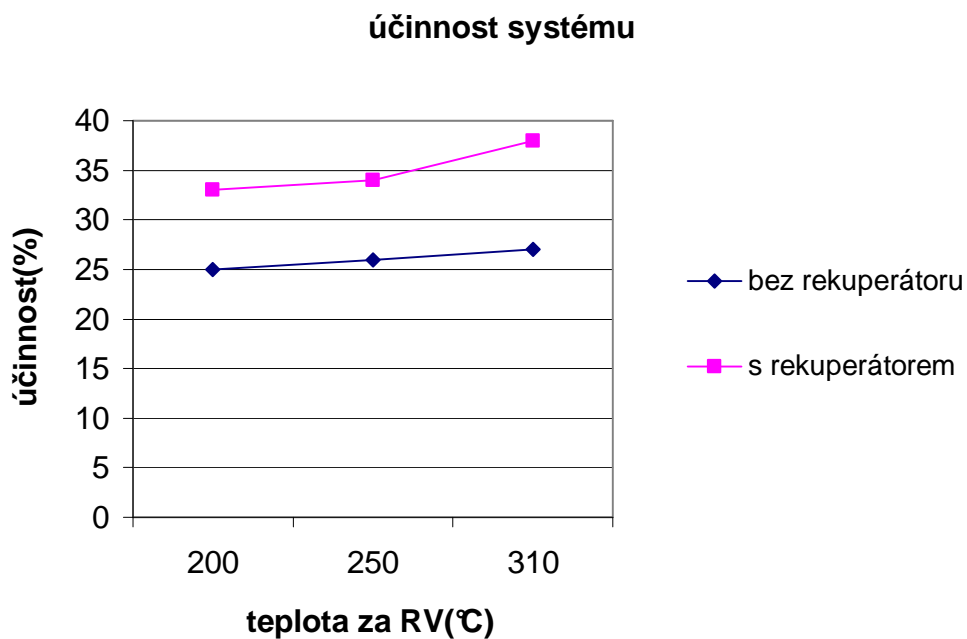
Obr. 4.12 Návrh systému akumulace stlačeného vzduchu bez rekuperátoru

Rozdíl entalpie  $H_5 - H_2$  je třeba dodat do systému. Budeme muset dodat  $41\,384,11 - 9\,126,25 = 32\,257,87$  kJ, což je tedy  $0,942$  Nm<sup>3</sup> zemního plynu. Jak vidíme rozdíl v dodání je o 8 434 kJ a to je práce, kterou dodal rekuperátor. Kompresní práce bude stejná jako v předešlém modelu, jelikož ty dělají pořád stejnou práci a to tedy 9 094,1 kJ. Další nezměněná hodnota bude rozdíl mezi expanzní prací a spotřebovanou kompresní prací (8935,578 kJ). Výsledná účinnost systému bez rekuperace tedy bude:

$$\eta_{el} = \frac{Q_{el}}{(H_3 - H_5)} = \frac{8\,935,58}{32\,257,87} = 0,27 \Rightarrow 27\%$$

### 4.3.6. Shrnutí účinnosti akumulace

Jak jsme si dokázali výpočtem, tak rozdíl účinností mezi systémem s rekuperací a bez něj je opravdu velký. 11 % totiž není zanedbatelná ztráta při tak malé účinnosti celého systému. Další faktor, který ještě ovlivňuje celý systém je regenerační výměník. Ale změna teploty ve výměníku ovlivní celou účinnost řádově v jednotkách procent (viz Obr. 4.13).



Obr. 4.13 Účinnost systém při změně teploty RV

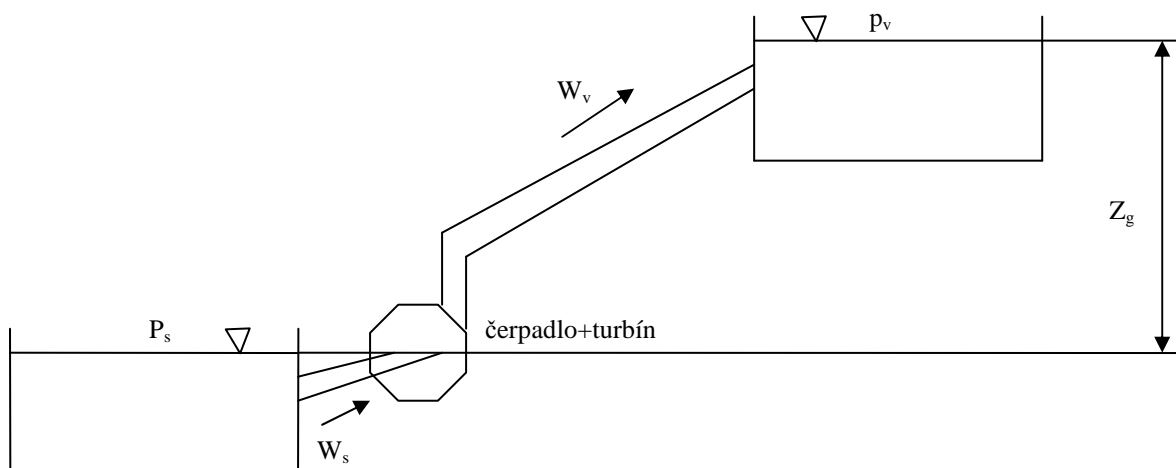
Účinnost celého systému mohou zvýšit teplotou spalin na vstupu na turbínu a zvyšováním účinnosti na regeneračním výměníku.

## 4.4. Akumulace z fotovoltaických elektrárny pomocí přečerpávací elektrárny

Akumulace elektrické energie pomocí vody se děje v přečerpávacích elektrárnách, které jsou dnes nejvíce rozšířené na akumulování velkoobjemové energie. Mezi jejich největší přednosti patří jejich účinnost, která se pohybuje okolo 70%.

### 4.4.1 Výpočet čerpadlové části

U naší fotovoltaické elektrárny využijí řeku vedle elektrárny, kterou přehradíme a vznikne spodní nádrž. Vodu do horní nádrže budeme čerpat pomocí soustrojí (čerpadlo, turbína). Čerpadlo ( $\eta_c = 78\%$ ) bude pohánět motor připojen na rozvaděč, do kterého přichází energie z panelů, které jsou určené na akumulování energie na noční provoz. Výkon z elektrárny bude největší opět v červenci, a proto čerpadlo budeme dimenzovat na tento příkon. Průměrný denní výkon v červenci ze stejného systému zapojení, jako v předešlých systémech je 474,52 kW/h. Jelikož maximální rozdíl nadmořských výšek mezi dvěma nádržemi může být 32 m, tak možná dopravní výška bude tedy 32 m. Rychlost proudění v potrubí pro napájecí čerpadla se udává 2 m/s



Obr. 4.14 Návrh přečerpávací elektrárny

V obrázku (viz Obr. 4.14) je  $p_s, p_v$  [ $N/m^2$ ] tlak na dolní, horní hladinu,  $W_s, W_v$  [ $m/s$ ] je rychlost proudění v sacím a výstupním průřezu,  $Z_g$  [ $m$ ] rozdíl nadmořských výšek horní a spodní hladiny. Hydraulické ztráty se rozdělují na ztráty v sacím potrubí  $Y_{zs}$  a výtlačným potrubím  $Y_{zv}$ . Z těchto známých veličin můžeme vypočítat měrnou energii

$$Y_d = \frac{p_v - p_s}{\rho} + g \cdot Z_g + \frac{W_v^2 + W_s^2}{2} + Y_{zs} + Y_{zv} \quad [J/kg]$$

Pro zjednodušení budeme počítat, že součinitele ztrát sacího a výtlačného potrubí jsou přibližně podobně, a proto pro ztráty platí

$$Y = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \xi_v \right) \frac{W_v^2}{2}$$

kde  $\lambda$  je součinitel tření, jehož hodnota dle diagramu je 0,02 v potrubí, které má vnitřní průměr 0,8 m.  $\xi$  je součinitel vnitřních ztrát v jednotlivých vložených prvcích, který po součtu prvků z tabulky (viz Tab. 4.10) zvolíme 14

Vložený prvek	$\xi$
ostrohané koleno	1,3
obloukové koleno	0,2
šoupátko( otevřené)	0,1
sací koš se zpětnou klapkou	9

Tab. 4.10 Místní ztráty

takže

$$Y_d = \frac{P_v - P_s}{\rho} + g \cdot Z_g + \left( \lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \xi_v \right) \frac{W_v^2}{2} = 9,81 \cdot 32 + \left( 0,02 \cdot \frac{50}{0,8} + 13 \right) \frac{2^2}{2} = 370,91 \text{ J / kg}$$

Průtok Q vypočítám pomocí příkonu čerpadla

$$Q = \frac{P_{\text{čerp}} \cdot \eta_{\text{č}}}{Y_d \cdot \rho} = \frac{4474,52 \cdot 0,78}{370,91 \cdot 1000} = 0,985 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Pokud bude čerpadlo čerpat vodu po dobu 15 hodin, tak budeme muset vybudovat horní nádrž, jejíž objem vypočítáme

$$V_{\text{den}} = Q \cdot 3600 \cdot \tau = 0,984 \cdot 3600 \cdot 15 = 53186,7 \text{ m}^3$$

Budeme tedy potřebovat nádrž o minimálním objemu 53 186,7 m<sup>3</sup>.

#### 4.4.2 Výpočet turbínové části

Při potřebě energie budeme tedy vypouštět horní nádrž a voda půjde stejným potrubím na turbínu, která bude vyrábět elektrickou energii pomocí generátoru. S generátoru půjde dále energie už do rozvodné sítě. Výkon turbíny vypočítáme

$$P_{\text{turb}} = \rho \cdot Y_d \cdot Q \cdot \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g$$

kde  $\rho$  je hustota vody [kg / m<sup>3</sup>],

$Y_d$  je měrná energie [J / kg],

$Q$  je průtok [m<sup>3</sup> / s],

$\eta_t, \eta_p, \eta_g$  jsou účinnosti turbíny, převodu a generátoru (viz Tab. 4.11)

Účinnost( $\eta$ )	Udávaná $\eta$ [%]	zvolená $\eta$ [%]
Účinnost turbíny	85-92	90
Účinnost převodu	94-100	100
Účinnost generátoru	88-94	90

**Tab. 4.11 Účinnost prvků**

Po dosažení známých hodnot z tabulky a dalších známých hodnot z výpočtu čerpadla bude výkon turbíny 301,87 kW. Účinnost celého systému vypočítáme podílem příkonu čerpadla a výkonu turbíny

$$\eta_{celk} = \frac{P_{turb}}{P_{čerp}} = \frac{301,87}{474,52} = 0,64 \Rightarrow 64\%$$



## 5. Technicko-ekonomické zhodnocení

### 5.1 Roční vyrobená elektrická energie

Pro stanovení ekonomiky provozu je třeba znát množství vyrobené elektrické energie naší navržené fotovoltaické elektrárny o instalovaném výkonu 1000 kW. Je třeba nezapomenout, že jedna část energie je vedena přímo do rozvodné sítě, při níž budeme počítat pouze se ztrátami v kabelech a měničích. Tyto ztráty budou 10%-tní z celkové vyrobené energie. Druhá část bude akumulována a díky tomu budeme počítat nejen se ztrátami v kabelech a měničích, ale i s účinnostmi jednotlivých možností akumulace.

V následujících tabulkách (viz Tab. 5.1 a Tab. 5.2) je znázorněna vyrobená elektrická energie v jednotlivých měsících a dále průměrná denní  $E_d$ , měsíční  $E_m$ , měsíční ze ztrátou  $E_z$  a celková roční. Výpočet byl proveden v Excelu dle výpočtových vztahů z kapitoly.

FV panely zapojené přímo do sítě			
Měsíc	$E_d$ [kWh]	$E_m$ [kWh]	$E_z$ [kWh]
Leden	468,79	14 063,60	12 657,24
Únor	888,38	24 874,58	22 387,12
Březen	1 640,75	49 222,36	44 300,13
Duben	1 768,29	54 816,85	49 335,17
Květen	2 159,63	64 788,87	58 309,99
Červen	2 196,36	68 087,04	61 278,34
Červenec	2 258,90	67 766,94	60 990,24
Srpen	1 967,23	60 984,18	54 885,76
Září	1 603,04	48 091,06	43 281,95
Říjen	938,32	29 087,95	26 179,15
Listopad	453,12	13 593,57	12 234,22
Prosinec	309,58	9 596,91	8 637,21
<b>Průměr za rok</b>	1 387,70	42 081,16	37 873,04
<b>Součet za rok</b>		504 973,90	492 349,55

Tab. 5.1 Měsíční výroba FV panelů zapojených přímo do sítě

<b>FV panely zapojené na akumulární jednotky</b>			
Měsíc	Ed [kWh]	Em [kWh]	Ez [kWh]
Leden	932,53	27 975,81	25 178,23
Únor	1 767,19	49 481,40	44 533,26
Březen	3 263,83	97 914,88	88 123,39
Duben	3 517,54	109 043,65	98 139,28
Květen	4 296,01	128 880,34	115 992,31
Červen	4 369,07	135 441,17	121 897,05
Červenec	4 493,48	134 804,41	121 323,97
Srpen	3 913,29	121 311,90	109 180,71
Září	3 188,82	95 664,45	86 098,01
Říjen	1 866,54	57 862,78	52 076,50
Listopad	901,36	27 040,82	24 336,74
Prosinec	615,82	19 090,51	17 181,46
<b>Průměr za rok</b>	<b>2 760,46</b>	<b>83 709,34</b>	<b>75 338,41</b>
<b>součet za rok</b>		<b>1 004 512,13</b>	<b>904 060,92</b>

Tab. 5.2 Měsíční výroba FV panelů zapojených do akumulárních systémů

Jak můžeme vidět z tabulek, tak předpokládané množství roční vyrobené energie z panelů zapojených přímo do sítě je 492 349,55 kWh a z panelů zapojeným k akumulárním jednotkám je 904 060,92 kWh. Jelikož u akumulárních jednotek není účinnost 100%-tní, tak musíme přepočítat vyrobenou elektrickou energii z těchto panelů dle účinnosti a přičíst ji k panelům zapojených na přímo a tím nám vyjde roční vyrobená energie z fotovoltaické elektrárny (viz Tab. 5.3)

akumulace( účinnost)	roční vyrobená energie [kWh]
Akumulátory (90%)	1 306 004,38
stalčený vzduch (38%)	835 892,70
přečerpávací el. (64%)	1 070 948,54

Tab. 5.3 Přivedená elektrická energie z akumulárních systému do sítě

## 5.2 Výpočet tržby za vyrobenou elektrickou energii

Při stanovení výkupních cen vychází ERU ze zákona č. 180/2005 Sb. Podle tohoto zákona nesmí hodnota výkupní ceny meziročně klesnout o více než 5% a musí být zachován základní princip podpory obnovitelných zdrojů energie, což je jejich návratnost.

U naší fotovoltaické elektrárny jsme se rozhodli pro státní výkup. V tomto případě veškerou vyrobenou energii budeme prodávat distributorovi, který je povinen ji od nás odebrat. Výkupní cena pro rok 2010 na instalace nad 30 kWp je 12,15 Kč/kWh. Jakmile dostaneme licenci, jako výrobci zelené elektřiny, tak aktuální výkupní cena 12,15 Kč/hWh se nám zafixuje na 20 let( 15 let zákonem, 5 let vyhláškou). Jednou ročně se naše výkupní cena bude navyšovat o tzv.“inflační doložku“, která je stanovena na 2-4%. Ve výpočtech

budeme uvažovat s minimálním zvýšením o 2%. Roční výnos fotovoltaické elektrárny v následujících letech vypočítáme

$$V_{FV} = \text{roční vyrobena energie} \cdot \text{pevná cena} \cdot \left(1 + \frac{\text{min. zvýšení}}{100}\right)$$

Musíme samozřejmě počítat s provozní náklady, které budou u všech systému 280 000 Kč/rok. Tyto peníze budou sloužit na odměnu dvěma oprávněným osobám, které budou během roku kontrolovat a udržovat elektrárnu v chodu.

Po odečtení provozních nákladů  $N_{PFV}$  od výnosu  $V_{FV}$  nám vyjde Cash flow(CF), který udává čistý roční zisk z výkupu

$$CF = V_{FV} - N_{PFV}$$

Pro přesnou dobu návratnosti budeme počítat s diskontní sazbou, která udává pokles ceny peněz. Podle České národní banky je diskontní sazba 0,25 % k 07.05.2010. Cash flow s uvažováním diskontní sazby se vypočítá

$$CF_{DIS} = \frac{CF}{\left(1 - \frac{D_s}{100}\right)^n}$$

Kde  $D_s$  je diskontní míra  
n je rok provozu

Návratnost investice NIV vypočítám dle vztahu

$$NIV = \sum_{i=1}^n CF_{DIS} - Ni_{FV}$$

Kde  $i$  je rok, pro který se NIV počítá.

$Ni_{FV}$  jsou celkové náklady na realizaci fotovoltaické elektrárny s akumulací jednotkou. Návratnost systému bude v tom roce provozu, kdy  $NIV \geq 0$ .

### 5.3 Výpočet ekonomiky provozu fotovoltaické elektrárny s akumulací do akumulátoru a její návratnosti

Investiční náklady na systém(viz Tab. 5.4 a Tab. 5.5):

FV panely zapojené přímo do sítě, $N_{iFVS}$					
	Položka	popis	množství	cena	celkem
1	Modul	SHARP NUS0E3E, monokrystalický, 180 W, 25 let výrobce na výkon	1858	20 392,00 Kč	37 888 336,00 Kč
2	Měnič	PESOS PVI 8000, jmenovitý výkon 9600 W	47	104 580,00 Kč	4 915 260,00 Kč
3	konstrukce	PESOS Sun flex SF 40 SD, dvouosá polohovací jednotka včetně nosného sloupu, řídicí elektronika a montážního systému, max.40m <sup>2</sup>	2	167 677,00 Kč	335 354,00 Kč
		PESOS Sun flex SF 60 SD, dvouosá polohovací jednotka včetně nosného sloupu, řídicí elektronika a montážního systému, max.60m <sup>2</sup>	45	181 695,00 Kč	8 176 275,00 Kč
4	Mont. práce	Montáž polohovací jednotky a uvedení do provozu	47	17 000,00 Kč	799 000,00 Kč
5	Elektro práce	elektroinstalační a elektromontážní práce , slaboproudé i silnoproudé rozvody až po výstupní rozvaděč( za 1 kWp	335	12 000,00 Kč	4 020 000,00 Kč
6	stavební práce	stavební práce( výkopy a zabetování nosného sloupu)	47	37 000,00 Kč	1 739 000,00 Kč
				<b>investiční náklady <math>N_{iS}</math></b>	57 873 225,00 Kč

Tab. 5.4 Investiční náklady na část FE zapojené přímo do sítě

FV panely zapojené do akumulátoru $Ni_{FVA}$					
	Položka	popis	množství	cena	Celkem
1	Modul	SHARP NUS0E3E, monokrystalický, 180 W, 25 let výrobce na výkon	3696	20 392,00 Kč	75 368 832,00 Kč
2	Měnič	Sunny Island Si2224, jmenovitý výkon 2200W	528	55 972,00 Kč	29 553 216,00 Kč
3	konstrukce	PESOS Sun flex SF 60 SD, dvouosá polohovací jednotka včetně nosného sloupu, řídicí elektronika a montážního systému, max.60m <sup>2</sup>	88	181 695,00 Kč	15 989 160,00 Kč
4	Mont. práce	Montáž polohovací jednotky a uvedení do provozu	88	17 000,00 Kč	1 496 000,00 Kč
5	Elektro práce	elektroinstalační a elektromontážní práce , slaboproudé i silnoproudé rozvody až po výstupní rozvaděč( za 1 kWp	665	20 000,00 Kč	13 300 000,00 Kč
6	stavební práce	stavební práce( výkopy a zabetonování nosného sloupu	88	37 000,00 Kč	3 256 000,00 Kč
7	akumulátor	Schüco 12 OPzS 1200, kapacita 1210 Ah, nominální napětí 2V	6336	15 120,00 Kč	95 800 320,00 Kč
				<b>investiční náklady <math>Ni_A</math></b>	234 763 528,00 Kč

Tab. 5.5 Investiční náklady na část FE zapojené do akumulátoru

Celkový investiční náklad je

$$Ni_{FV} = Ni_A + Ni_S = 58\,873\,225 + 234\,763\,528 = 292\,636\,753\,k$$

Vstupní údaje pro výpočet návratnosti jsou uvedeny v následující tabulce(viz Tab. 5.6)

Doba provozu	25 let
Investiční náklady	292 636 753 Kč
Roční vyrobená energie	1 306 004 kWh
Náklady na údržbu	280 000 Kč
inflační doložka	2%
pevná výkupní cena	12,15
diskontní míra	0,25

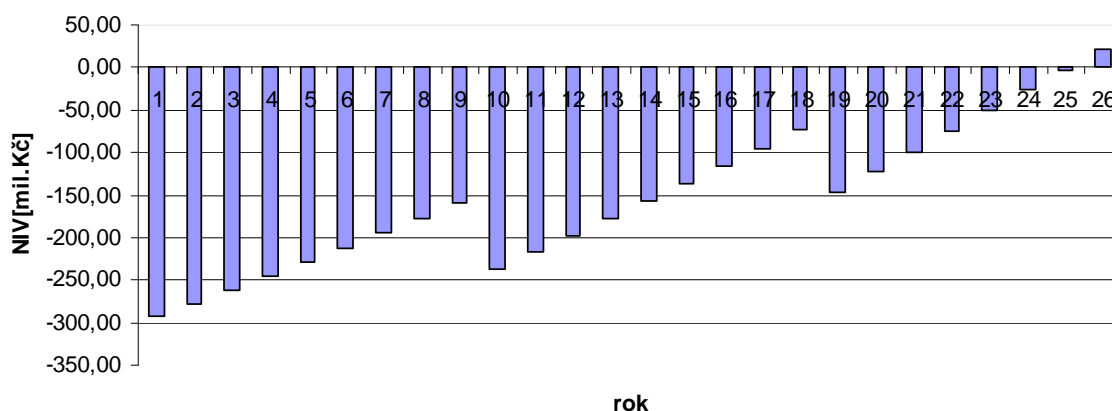
Tab. 5.6 Vstupní údaje pro výpočet ekonomiky provozu FV elektrárny s akumulací do akumulátoru

V následující tabulce(viz Tab. 5.7)je proveden výpočet návratnosti pro fotovoltaickou elektrárnu s akumulací do akumulátoru. Vypočet je proveden z teoretických výpočtů, které jsou v předcházející kapitole( viz Kap. 5.2)

## Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů

n	$Ni_{FV}$	CF	$CF_{DIS}$	NIV
rok	( tis. Kč)	( tis. Kč)	( tis. Kč)	( tis. Kč)
0	292 636,70	-292 636,70	-292 636,70	-292 636,70
1	0	15 407,42	15 446,04	-277 190,66
2	0	15 715,57	15 794,44	-261 396,22
3	0	16 029,88	16 150,71	-245 245,52
4	0	16 350,48	16 515,01	-228 730,51
5	0	16 677,49	16 887,53	-211 842,98
6	0	17 011,04	17 268,45	-194 574,53
7	0	17 351,26	17 657,96	-176 916,56
8	0	17 698,28	18 056,26	-158 860,30
9	95 800 320	18 052,25	18 463,55	-236 196,75
10	0	18 413,29	18 880,02	-217 316,73
11	0	18 781,56	19 305,88	-198 010,85
12	0	19 157,19	19 741,36	-178 269,50
13	0	19 540,33	20 186,65	-158 082,85
14	0	19 931,14	20 641,99	-137 440,86
15	0	20 329,76	21 107,60	-116 333,26
16	0	20 736,36	21 583,71	-94 749,56
17	0	21 151,09	22 070,56	-72 679,00
18	95 800 320	21 574,11	22 568,39	-145 910,61
19	0	22 005,59	23 077,45	-122 833,16
20	0	22 445,70	23 597,99	-99 235,17
21	0	22 894,62	24 130,28	-75 104,89
22	0	22 895,03	24 191,19	-50 913,69
23	0	22 895,03	24 251,82	-26 661,87
24	0	22 895,03	24 312,61	-2 349,26
25	0	22 895,03	24 373,54	22 024,28

Tab. 5.7 Výpočet ekonomiky provozu FV elektrárny s akumulací do akumulátoru



Obr. 5.1 Návratnost FV elektrárny s akumulací do akumulátoru

Z tabulky (viz TAB. 5.7) a grafu (viz Obr. 5.1) jde vidět, že návratnost investice do systému s akumulací do akumulátoru bude až v 25-tém roce. Je to dáno především životností

akumulátoru. Akumulátory zvolené do tohoto systému se budou měnit v 9-tém a 18-tém roce a tím i přes velkou účinnost akumulátoru je návratnost tak dlouhá.

## 5.4 Výpočet ekonomiky provozu fotovoltaické elektrárny s akumulací stlačeného vzduchu a její návratnost

Investiční náklady na systém:

Investiční náklady budou opět součet dvou částí fotovoltaické elektrárny. Jedna část jsou FV panely zapojeny přímo do sítě(viz Tab. 5.4) a druhá část jsou FV panely zapojeny na akumulací systém stlačeného vzduchu(viz Tab. 5.8)

FV panely zapojeny na systém stlačeného vzduchu					
	Položka	popis	množství	cena	Celkem
1	Modul	SHARP NUS0E3E, mono krystalický, 180 W, 25 let výrobce na výkon	3696	20 392,00 Kč	75 368 832,00 Kč
2	Měnič	PESOS PVI 8000, jmenovitý výkon 9600 W	88	104 580,00 Kč	9 203 040,00 Kč
3	konstrukce	PESOS Sun flex SF 60 SD, dvouosá polohovací jednotka včetně nosného sloupu, řídicí elektronika a montážního systému, max.60m2	88	181 695,00 Kč	15 989 160,00 Kč
4	Mont. práce	Montáž polohovací jednotky a uvedení do provozu	88	17 000,00 Kč	1 496 000,00 Kč
5	Elektro práce	elekroinstalační a elektromontážní práce , slaboproudé i silnoproudé rozvody až po výstupní rozvaděč( za 1 kWp	665	12 000,00 Kč	7 980 000,00 Kč
6	stavební práce	stavební práce( výkopy a zabetonování nosného sloupu	88	37 000,00 Kč	3 256 000,00 Kč
7	kompresor	kompror Prusko DRF 220, příkon 160 kW, max. tlak 13 bar	3	1 900 000,00 Kč	5 700 000,00 Kč
8	výměník	vybetonovat, objem šterku 5,09 m3	1	60 000,00 Kč	60 000,00 Kč
9	spojovací materiál				30 000 000,00 Kč
10	turbína		500	10 100,00 Kč	5 050 000,00 Kč
				investiční náklady $N_{iST}$	154 103 032,00 Kč

Tab. 5.8 Investiční náklady na část FE připojenou na systém akumulace stlačeným vzduchem

Celkový investiční náklad je

$$N_{i_{FV}} = N_{i_A} + N_{i_S} = 58\,873\,225 + 154\,103\,032 = 211\,976\,257k$$

Vstupní údaje pro výpočet návratnosti jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 5.9).

Doba provozu	25 let
Investiční náklady	211 976 257 Kč
Roční vyrobená energie	835892,7 kWh
Náklady na údržbu	280 000 Kč
inflační doložka	2%
pevná výkupní cena	12,15
diskontní míra	0,25

**Tab. 5.9 Vstupní údaje pro výpočet ekonomiky provozu**

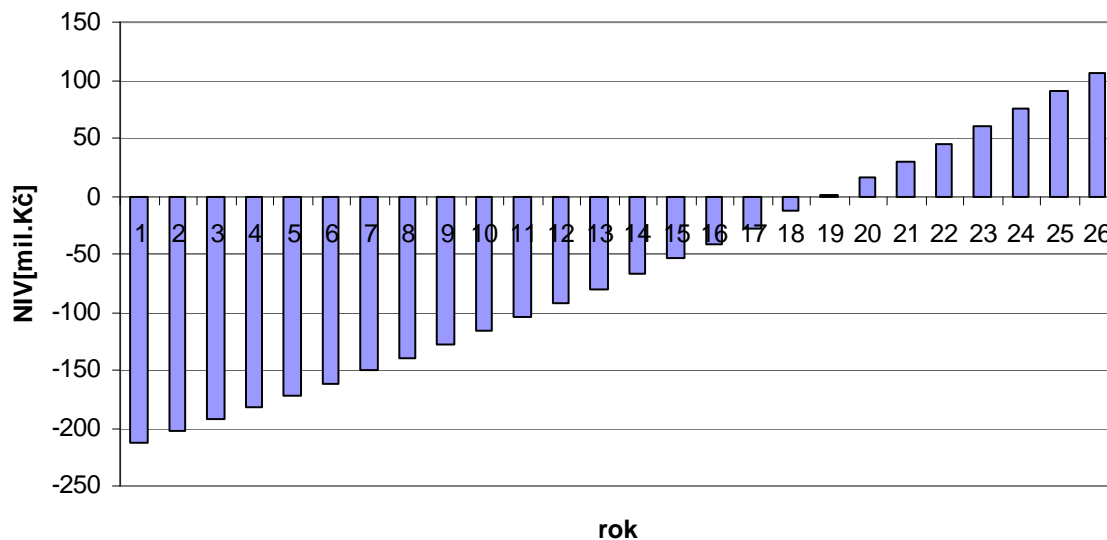
FV elektrárny s akumulací pomocí stlačeného vzduchu

V následující tabulce (viz Tab. 5.10) je proveden výpočet návratnosti pro fotovoltaickou elektrárnu s akumulací stlačeného vzduchu. Výpočet je proveden z teoretických výpočtů, které jsou v předcházející kapitole (viz Kap. 5.2)

n	$N_{iFV}$	CF	$CF_{DIS}$	NIV
rok	( tis. Kč)	( tis. Kč)	( tis. Kč)	( tis. Kč)
0	211 976,20	-211 976,20	-211 976,20	-211 976,20
1	0	9 695,68	9 719,98	-202 256,22
2	0	9 889,59	9 939,23	-192 316,99
3	0	10 087,39	10 163,42	-182 153,57
4	0	10 289,13	10 392,67	-171 760,90
5	0	10 494,92	10 627,09	-161 133,81
6	0	10 704,81	10 866,80	-150 267,01
7	0	10 918,91	11 111,92	-139 155,09
8	0	11 137,29	11 362,56	-127 792,53
9	0	11 360,03	11 618,86	-116 173,67
10	0	11 587,24	11 880,94	-104 292,73
11	0	11 818,98	12 148,93	-92 143,80
12	0	12 055,36	12 422,97	-79 720,83
13	0	12 296,47	12 703,18	-67 017,65
14	0	12 542,40	12 989,72	-54 027,93
15	0	12 793,24	13 282,72	-40 745,21
16	0	13 049,11	13 582,33	-27 162,87
17	0	13 310,09	13 888,70	-13 274,17
18	0	13 576,29	14 201,98	927,81
19	0	13 847,82	14 522,33	15 450,14
20	0	14 124,77	14 849,90	30 300,03
21	0	14 407,27	15 184,86	45 484,89
22	0	14 407,60	15 223,26	60 708,15
23	0	14 407,60	15 261,42	75 969,57
24	0	14 407,60	15 299,67	91 269,23
25	0	14 407,60	15 338,01	106 607,25

**Tab. 5.10 Výpočet ekonomiky provozu FV elektrárny s akumulací pomocí stlačeného vzduchu**





**Obr. 5.2 Návrhovatnost FV elektrárny s akumulací pomocí stlačeného vzduchu**

Z grafu (viz Obr. 5.2) a tabulky (viz Tab. 5.10) jde vidět, že návratnost fotovoltaické elektrárny s akumulací pomocí stlačeného vzduchu je 19 let. Tento stav je daný menší účinností.

## 5.5 Výpočet ekonomiky provozu fotovoltaické elektrárny s přečerpávací elektrárnou a její návratnosti

*Investiční náklady na systém* (viz Tab. 5.11 a Tab. 5.4):

	Položka	popis	množství	cena	Celkem
1	Modul	SHARP NUS0E3E, monokrystalický, 180 W, 25 let výrobce na výkon	3696	20 392,00 Kč	75 368 832,00 Kč
2	Měnič	PESOS PVI 8000, jmenovitý výkon 9600 W	88	104 580,00 Kč	9 203 040,00 Kč
3	konstrukce	PESOS Sun flex SF 60 SD, dvouosá polohovací jednotka včetně nosného sloupu, řídicí elektronika a montážního systému, max. 60m <sup>2</sup>	88	181 695,00 Kč	15 989 160,00 Kč
4	Mont. práce	Montáž polohovací jednotky a uvedení do provozu	88	17 000,00 Kč	1 496 000,00 Kč
5	Elektro. práce	elektroinstalační a elektromontážní práce, slaboproudé i silnoproudé rozvody až po výstupní rozvaděč( za 1 kWp)	665	12 000,00 Kč	7 980 000,00 Kč
6	stavební práce	stavební práce( výkopy a zabetonování nosného sloupu	88	37 000,00 Kč	3 256 000,00 Kč
7	Přečerpávací elektrárna	stavební práce, potrubí, čerpadlo+turbína, 1 kW	500	180 000,00 Kč	90 000 000,00 Kč
				<b>investiční náklady <math>Ni_{FV}</math></b>	<b>203 293 032,00 Kč</b>

Tab. 5.11 Investiční náklady na část FE s přečerpávací elektrárnou

Celkový investiční náklad je

$$Ni_{FV} = Ni_A + Ni_S = 58\,873\,225 + 203\,293\,032 = 261\,166\,257$$

Vstupní údaje pro výpočet návratnosti jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 5.12)

Doba provozu	25 let
Investiční náklady	261 166 257 Kč
Roční vyrobená energie	1 070 948,54 kWh
Náklady na údržbu	280 000 Kč
inflační doložka	2%
pevná výkupní cena	12,15
diskontní míra	0,25

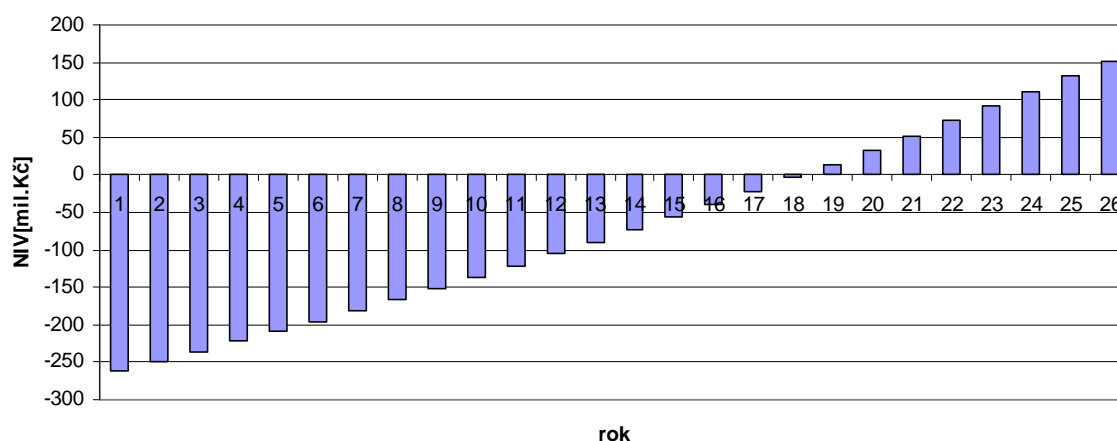
Tab. 5.12 Vstupní údaje pro výpočet ekonomiky provozu FV elektrárny s přečerpávací elektrárnou

V následující tabulce (viz Tab. 5.13) je proveden výpočet návratnosti pro fotovoltaickou elektrárnu napojenou na přečerpávací elektrárnu. Výpočet je proveden z teoretických výpočtů, které jsou v předcházející kapitole (viz Kap 5.2)

## Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů

n	$Ni_{FV}$	CF	$CF_{DIS}$	NIV
rok	( tis. Kč)	( tis. Kč)	( tis. Kč)	( tis. Kč)
0	261 166,30	-261 166,30	-261 166,30	-261 166,30
1	0	12 551,68	12 583,14	-248 583,16
2	0	12 802,71	12 866,97	-235 716,19
3	0	13 058,77	13 157,20	-222 558,99
4	0	13 319,94	13 453,98	-209 105,01
5	0	13 586,34	13 757,45	-195 347,56
6	0	13 858,07	14 067,77	-181 279,79
7	0	14 135,23	14 385,09	-166 894,70
8	0	14 417,93	14 709,56	-152 185,14
9	0	14 706,29	15 041,36	-137 143,78
10	0	15 000,42	15 380,64	-121 763,14
11	0	15 300,43	15 727,57	-106 035,57
12	0	15 606,44	16 082,33	-89 953,24
13	0	15 918,57	16 445,09	-73 508,15
14	0	16 236,94	16 816,03	-56 692,13
15	0	16 561,68	17 195,34	-39 496,79
16	0	16 892,91	17 583,20	-21 913,59
17	0	17 230,77	17 979,82	-3 933,77
18	0	17 575,38	18 385,38	14 451,60
19	0	17 926,89	18 800,08	33 251,69
20	0	18 285,43	19 224,15	52 475,83
21	0	18 651,14	19 657,77	72 133,60
22	0	18 651,46	19 707,38	91 840,99
23	0	18 651,46	19 756,77	111 597,76
24	0	18 651,46	19 806,29	131 404,05
25	0	18 651,46	19 855,93	151 259,98

Tab. 5.13 Výpočet ekonomiky provozu FV elektrárny s přečerpávací elektrárnou



Obr. 5.3 Návrhnost FV elektrárny s přečerpávací elektrárnou

## 6. Závěr

Diplomová práce se zabývala, jak dodávat rovnoměrně elektrickou energii do elektrizační soustavy z fotovoltaické elektrárny o výkonu 1000 kW. Navržená elektrárna se bude nacházet ve středních čechách u obce Nový Dům, jejíž GPS souřadnice jsou 50°5'31''N, 13°50'1''E. Po zjištění polohy nově budované elektrárny jsem vypočítali dopadající záření na m<sup>2</sup>. Pro výkon celé elektrárny je důležité systém uložení fotovoltaických panelů. Aby fotovoltaické panely pohltily, co nejvíce slunečního záření, tak budou uloženy na natáčecích systémech. Díky tomuto uložení bude vyrobená energie přibližně o 30 % větší než by tomu bylo při stejných typech panelů na fixním systému. Aby mohla fotovoltaická elektrárna splňovat rovnoměrné dodávání elektrické energie do sítě, tak musí být část energie akumulována. Elektrárna byla rozdělena na dvě části (1/3 a 2/3). Z 1/3 byla energie dodávána během dne přímo do rozvodné sítě a ze zbylých 2/3 byly akumulovány na noční provoz.

Akumulace byla srovnávána mezi akumulátory, stlačeným vzduchem a přečerpávací elektrárny. U těchto tří možností bylo navrženo nejlepší možné zapojení s ohledem na účinnost přeměny elektrické energie. Po navržení zapojení akumulčních systému a vypočítání celkově dodané elektrické energie do sítě jsme vypočítali jejich návratnost.

Systém u kterého docházelo k akumulaci do akumulátoru by se zdál vzhledem k samotné účinnosti (90%), jako velmi zajímavá alternativa. Akumulátory mají, ale jednu značnou nevýhodu. A to jejich životnost. U zvolených akumulátoru, určených přímo k fotovoltaickým elektrárnám, se životnost pohybuje kolem 9 let. Když následně budeme přidávat k počáteční investici 292 636 753 Kč, každých 9 let nezanedbatelnou částku 95 800 320 Kč, tak dojde k návratnosti až v 25-tém roce funkčnosti. Vzhledem k tomu, že fotovoltaické panely mají garantovanou dobu 25 let, tak varianta s akumulátory s elektrolytem není ekonomicky únosná.

Dalším akumulčním systémem byla akumulace pomocí stlačeného vzduchu. Tato metoda je relativně mladá. První komerční akumulace byla spuštěna v Německu (1974) u města Huntorf a druhá byla spuštěna v USA (1991). Účinnost těchto funkčního zařízení je kolem 45%. Fungují na principu uskladňování stlačeného vzduchu do taveren pomocí kompresoru, který je napájen z obnovitelných zdrojů. V době špičky je stlačený vzduch puštěn na turbínu, která přes generátor vytváří elektrickou energii. V této diplomové práci jsme navrhli a vypočítali účinnost systému, kde v jednom obvodu byl zapojen rekuperátor a ve druhém nebyl. Rekuperátor měl důležitou úlohu v ohřívání přivedeného vzduchu z taverny do spalovací komory se spaliny z turbíny. Díky tomu účinnost byla 38% oproti 27 % u systému bez rekuperátoru. Počáteční investice systému s rekuperátorem je 154 103 032 Kč a jeho návratnost byla spočítána až po 19 letech funkčnosti. Nejmenší dobu návratnosti měla poslední možnost akumulace, což je přečerpávací elektrárna. Při účinnosti naší modelové elektrárny 64 % a počáteční investice fotovoltaické elektrárny společně s akumulací 261 166 257 Kč byla návratnost už 18- tím roce funkčnosti.

Návratnost byla počítána s výkupní cenou pro rok 2010, což bylo 12,15 Kč. Tzn., že naše systémy byly připojeny do elektrizační soustavy v první čtvrtině roku, kdy byly vydány povolenky na připojení a cena výkupu byla příznivá. Pokud by systém elektrárny s akumulací byly připojeny později, tak by se návratnost značně prodloužila. Jelikož se plánuje, že výkupní cena energie z fotovoltaické elektrárny bude až o 20 % nižší. Už jenom z tohoto předpokladu by se návratnost zapojených systému značně zvýšila.

Závěrem už lze jen říci, že akumulace elektrické energie je důležitá a to z důvodů zrovnnoměrnění dodávek elektrické energie do sítě. Samotná akumulace z obnovitelných zdrojů je však finančně nákladné řešení a jak jsme zjistili výpočty, tak návratnost elektráren se systémy akumulace není příliš zajímavá.

## POUŽITÁ LITERATURA

Knižní zdroje:

- [1] Cenek M.: Akumulátory- od principu k praxi, FCC Public, 2003
- [2] Cenek M.: Obnovitelné zdroje energie, FCC Public, 2001
- [3] Cihelka J.: Solární tepelná technika. Nakladatelství T. Malina, 1994
- [4] Libra M., Poulek V.: Solární energie, Česká zemědělská univerzita v Praze 2006
- [5] Soren B.: Renewable energy sources, Elsevir, 2004

Elektronické zdroje – www stránky:

- [6] [www.nalezeno.cz](http://www.nalezeno.cz)
- [7] [www.alternativni-zdroje.cz](http://www.alternativni-zdroje.cz)
- [8] [www.cez.cz](http://www.cez.cz)
- [9] [www.chmi.cz](http://www.chmi.cz)
- [10] [www.micronix.cz](http://www.micronix.cz)
- [11] [www.czrea.org](http://www.czrea.org)
- [12] [www.fotovoltaika.falconis.cz](http://www.fotovoltaika.falconis.cz)
- [13] [www.svetfyziky.souepl.cz](http://www.svetfyziky.souepl.cz)
- [14] [www.csve.cz](http://www.csve.cz)
- [15] [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)
- [16] [www.cvevl.cz](http://www.cvevl.cz)
- [17] [www.worldofenergy.com.au](http://www.worldofenergy.com.au)
- [18] [www.ceps.cz](http://www.ceps.cz)
- [19] [www.proatom.luksoft.cz](http://www.proatom.luksoft.cz)
- [20] [www.tretipol.cz](http://www.tretipol.cz)
- [21] [www.rwe.com](http://www.rwe.com)
- [22] [www.simopt.cz](http://www.simopt.cz)
- [23] [www.etext.czu.cz/img/skripta/64/tf\\_4413-1.pdf](http://www.etext.czu.cz/img/skripta/64/tf_4413-1.pdf)
- [24] <http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2007/11/Krivak.pdf>
- [25] [www.electricitystorage.org](http://www.electricitystorage.org)
- [26] [www.dedalebeda.wz.cz](http://www.dedalebeda.wz.cz)
- [27] [www.cz/elektronika.cz](http://www.cz/elektronika.cz)
- [28] [www.becc.cz](http://www.becc.cz)
- [29] [www.spvez.cz](http://www.spvez.cz)
- [30] [www.dls.cz](http://www.dls.cz)

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Význam
a	[°]	azimut slunce
A	[m <sup>2</sup> ]	plocha
AKU		akumulátor
$\alpha$	[°]	úhel sklonu plochy od vodorovné roviny
a <sub>s</sub>	[°]	azimut panelu
a <sub>t</sub>	[J.kg <sup>-1</sup> ]	technická práce
C	[Ah]	kapacita
c	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita
C <sub>bez</sub>	[Ah]	kapacita s bezpečnostním faktorem
CF	[Kč]	tok peněz
CF <sub>DIS</sub>	[Kč]	tok peněz s diskontní sazbou
c <sub>S</sub>	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita šterku
d	[m]	průměr potrubí
DS	[-]	diskontní míra
E <sub>d</sub>	[kW.h]	výrobená elektrická energie za den
E <sub>m</sub>	[kW.h]	vyrobená elektrická energie za měsíc
$\varepsilon_K$	[-]	kompresní poměr
E <sub>z</sub>	[kW.h]	vyrobená elektrická energie se ztrátou
F		filtr pevných částic
FP		fotovoltaický panel
G		generátor
h	[°]	výška slunce na obzorem
H	[J]	entalpický obsah spalin
H <sub>nad</sub>	[m]	nadmořská výška místa
h <sub>v</sub>	[m]	výška výměníku
I	[W.m <sup>-2</sup> ]	celkové záření
I <sub>0</sub>	[W.m <sup>-2</sup> ]	sluneční konstanta
I <sub>D</sub>	[W.m <sup>-2</sup> ]	difúzní záření
I <sub>dden</sub>	[W.m <sup>-2</sup> ]	teoreticky dosažitelné difúzní dopadající záření za den
I <sub>dh</sub>	[W.m <sup>-2</sup> ]	intenzita difúzního záření na vodorovnou plochu
I <sub>pden</sub>	[W.m <sup>-2</sup> ]	teoreticky dosažitelné dopadající záření za den
I <sub>ph</sub>	[W.m <sup>-2</sup> ]	intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu
I <sub>pn</sub>	[W.m <sup>-2</sup> ]	přímé záření
K		kompresor
$\lambda$	[-]	součinitel tření
$\xi$	[-]	součinitel vnitřních ztrát
l	[m]	délka potrubí
M		motor
MN		měníč napětí
m <sub>S</sub>	[kg]	hmotnost šterku
n	[mol]	látkové množství
$\eta_\varepsilon$	[-]	účinnost čerpadla
$\eta_{el}$	[-]	účinnost elektrická
N <sub>iFV</sub>	[Kč]	investiční náklady
$\eta_g$	[-]	účinnost generátoru
$\eta_K$	[-]	účinnost kompresoru
$\eta_p$	[-]	účinnost převodu
NIV	[Kč]	návratnost investice
NP <sub>FV</sub>	[Kč]	provozní náklady

## Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů

OV		odlučovač vzduchu
$P_{\text{čerp}}$	[W]	výkon čerpadla
$P_{\text{den}}$	[W]	denní výkon fotovoltaických panelů
$P_{\text{FVA}}$	[W]	výkon fotovoltaických panelů zapojených na akumulátory
$P_{\text{chl}}$	[W]	výkon chlazení
$P_{\text{komp}}$	[W]	výkon kompresoru
$p_s$	[N.m <sup>-2</sup> ]	tlak na dolní hladinu
$P_{\text{turb}}$	[W]	výkon turbíny
$p_v$	[N.m <sup>-2</sup> ]	tlak na horní hladinu
$Q_v$	[m <sup>3</sup> /s]	průtok vzduchu
$r$	[-]	albino
R		rozvodna
$R_E$		rekuperátor
R	[J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup> ]	plynová konstanta
RN		regulátor napětí
$\rho_s$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota šterku
$\rho_{\text{vzd}}$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu
RV		regenerační výměník
S		sít'
SK		spalovací komora
T		turbína
$\tau_k$	[h]	čas komprese
$\tau_{\text{skut}}$	[h]	skutečná doba svitu
$\tau_{\text{teor}}$	[h]	teoretická doba svitu
$T_n$	[K]	teplota
$t_n$	[°C]	teplota
U	[V]	napětí
V	[m <sup>3</sup> ]	objem
$V_{\text{FV}}$	[Kč]	výnos
$V_s$	[m <sup>3</sup> ]	objem šterku
$v_{\text{vzd}}$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost vzduchu
$w_{\text{ad}}$	[J]	adiabatická práce
$w_{\text{komp}}$	[J]	kompresní práce
$w_{\text{real}}$	[J]	realná práce
$W_s$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudění v sacím průřezu
$W_v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudění na výstupním průřezu
$Y_d$	[J.kg <sup>-1</sup> ]	měrná energie
Z	[-]	znečištění
ZA		zásobník
$Z_g$	[m]	rozdíl nadmořských výšek