



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

NETRADIČNÍ VYUŽITÍ ENERGIE VĚTRU

DIFFERENT USE OF THE WIND ENERGY.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN SUKUP

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV JÍCHA, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Sukup

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Netradiční využití energie větru

v anglickém jazyce:

Different use of the wind energy.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Literární rešerše, studie

Cíle bakalářské práce:

Druhy větrných elektráren v ČR.

Možnosti akumulace energie větru pro využití v energetických špičkách.

Návrh technologie.

Seznam odborné literatury:

1. Boeker, E. and Rienk van Grondelle, Environmental Physics, John Wiley & Sons, Chichester 1995
2. Horlock, J.H., Cogeneration – Combined Heat and Power (CHP) – thermodynamics and Economics, Krieger Publishing Co., Malabar, Florida 1997
3. van der Linden, S., The Commercial World of Energy Storage, 1st Annual Conference of the Energy Storage Council, Houston March 3, 2003
4. Anon., Application of Electricity Storage; Technologies; Technology Comparison, Electricity Storage Association, www.electricitystorage.org/technologies.htm
5. Kára, V., V. Šrámek, P. Hutla, F. Stejskal a A. Kopnická, Využití biomasy pro energetické účely, Vydává: Česká energetická agentura www.cea.cz

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 21.10.2008

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce popisuje základní druhy větrných motorů, princip jejich funkce, vlastnosti a možnost jejich použití k výrobě elektřiny. V druhé části jsou uvedeny možnosti akumulace energie z větrných elektráren. Popsána je akumulace energie stlačením vzduchu a kombinace této technologie se spalováním biomasy. Jako druhá možnost akumulace energie je zmíněn rozklad vody elektrolýzou a jsou popsány možnosti využití vodíku.

Abstract

This thesis describe main kinds of wind turbines, principle of their functions and their usage to electricity generation. The second part deals with ways to storing wind energy. There is description of compressed air energy storage technology and their combination with combustion of biomass. Second mentioned energy storage technology is electrolysis of water and possibility of usage hydrogen.

Klíčová slova

Větrné elektrárny, možnosti uchování energie, uchování energie kompresí vzduchu, uchování energie kompresí vzduchu v kombinaci se spalováním biomasy, elektrolýza vody, využití vodíku

Keywords

Wind power plants, energy storage, compressed air energy storage, compressed air energy storage combined with combustion of biomass, electrolysis of water, hydrogen usage

Bibliografická citace VŠKP dle ČSN ISO 690

SUKUP, J. Netradiční využití energie větru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 33 s.

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 21.5.2009

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji doc. Ing. Jaroslavu Jíchovi, CSc. za vedení a pomoc při tvorbě této bakalářské práce.

Obsah:

1. Úvod.....	8
1.1. Druhy obnovitelných zdrojů energie	8
1.1.1. Sluneční energie	8
1.1.2. Vodní energie	9
1.1.3. Biomasa	9
1.1.4. Geotermální energie	9
1.1.5. Energie větru	9
1.1.6. Tepelná čerpadla	10
1.1.7. Další druhy obnovitelných zdrojů energie	10
2. Větrné elektrárny.....	10
2.1. Větrné elektrárny podle maximálního výkonu	11
2.2. Druhy větrných elektráren podle dalších kritérií.....	11
2.3. Druhy větrných elektráren dle použitého větrného motoru.....	11
2.3.1. Větrná elektrárna s motorem s vrtulí.....	12
2.3.2. Větrná elektrárna s mnoholopátkovým větrným motorem	15
2.3.3. Větrná elektrárna s rotorem Darrieus	15
2.3.4. Větrné elektrárny s rotorem Savonius	17
2.3.5. Další typy větrných motorů.....	18
3. Možnosti akumulace energie větru.....	19
3.1. Uchování energie kompresí vzduchu	20
3.1.1. Princip funkce	21
3.1.2. Příklady využití systému uchování energie kompresí vzduchu	22
3.1.3. Uchování energie kompresí vzduchu v kombinaci se spalováním bioplynu	23
3.1.4. Uchování energie kompresí vzduchu v kombinaci se spalováním biomasy	24
3.1.5. Příklad zařízení kombinující uchování energie stlačením vzduchu se spalováním biomasy a bioplynu	25
3.2. Uchování energie rozkladem vody elektrolýzou.....	26
3.2.1. Výroba vodíku elektrolýzou vody.....	26
3.2.2. Využití vodíku.....	27
3.2.3. Konkrétní využití vodíku v současné době	28
4. Závěr.....	30
Použitá literatura:	31

1. Úvod

Využívání obnovitelných zdrojů energie je v dnešní době téma, o kterém se velmi mluví. Jak se objevují nové negativní vlivy oxidu uhličitého, oxidů dusíku či jiných produktů spalování, na životní prostředí a tedy i lidské zdraví, využívání způsobů výroby energie, při nichž se do ovzduší nedostávají tyto škodliviny, je stále rozšířenější. Je tomu tak nejen s rozvíjejícím se povědomím o ekologii a snaze neznečišťovat životní prostředí, ale i díky tomu, že se výroba „čisté“ energie začíná vyplácet. Využití obnovitelných zdrojů energie totiž s sebou ve většině případů nenese nutnost pořizování paliva, které je v tomto případě dodáváno zdarma okolím. Vzhledem k situaci na trhu s fosilními palivy, je tato výhoda velmi aktuální. Už v současné době se musíme zabývat i otázkou jejich zásob. Podle statistik společnosti BP vystačí zásoby ropy asi na 40 let, zásoby zemního plynu zhruba na 65 let a zásoby černého uhlí by měly pokrýt spotřebu ještě víc než 160 let [2]. I z tohoto hlediska má rozvoj obnovitelných zdrojů velký potenciál.

1.1. Druhy obnovitelných zdrojů energie

Obnovitelný zdroj energie je podle zákona o životním prostředí 17/1992 sb. takový, který má schopnost se při postupném spotřebování částečně nebo úplně obnovovat, a to sám nebo za přispění člověka.

1.1.1. Sluneční energie

Jde o přímé využití slunečního svitu k výrobě energie. To se může dít v různých zařízeních na základě různých principů. V současné době jsou nejrozšířenější tyto technologie:

- fotovoltaické články na bázi křemíku – slouží k přímé přeměně slunečního záření na elektřinu. V současnosti nejrozšířenější druh jsou články tzv. první generace, které dosahují účinnosti 16% až 19% [4]. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká cena. Je snaha tuto nevýhodu odstranit, a proto se neustále vyvíjejí levnější a účinnější články, se stále širší možností použití.



Obr.1. Příklad využití fotovoltaických panelů - EVALON-Solar Fotovoltaický systém pro rovné střechy [4]

- ohřev teplé užitkové vody – V kolektorech se ohřívá teplotnosné médium, které je následně využíváno k ohřevu vody ve výměnících tepla. U tohoto systému jsou

poměrně nízké pořizovací náklady, vysoká účinnost a nenáročnost instalace, díky čemuž je stále víc používán.

1.1.2. Vodní energie

Využívá se výškový rozdíl dvou vodních hladin, kdy proud mezi nimi vytváří dostatečný tlak pro pohon zařízení. Vodní elektrárny bychom mohli rozdělit do dvou skupin: malé vodní elektrárny a velké vodní elektrárny. Malé vodní elektrárny, s výkonem do 10MW, jsou schopny využívat i malé vodní spády, obvykle nevyžadují větší stavební úpravy (postačí jez nebo malá hráz). Většinou slouží jako sezónní zdroje, jelikož jsou závislé na aktuálním průtoku. Velké vodní elektrárny vyžadují velký rozdíl mezi spodní a horní hladinou. V našich podmínkách je k dosažení velkého rozdílu hladin nutno budovat velká a nákladná vodní díla. Velké vodní elektrárny mohou sloužit i jako přečerpávací a dokáží tedy akumulovat energii.

1.1.3. Biomasa

Jedná se o látky organického původu, získávané buď jako odpad ze zemědělské výroby (sláma, seno, atd.), živočišné výroby (hnůj, kejda, atd.), zpracování dřeva (piliny, kůra stromů, atd.) a komunální odpad, nebo materiál produkovaný přímo za účelem energetického využití (rychle rostoucí dřeviny, konopí, atd.). Biomasa je po úpravě spalována a využívána k výrobě tepla a elektřiny. Výhřevnost biomasy závisí na druhu dřeviny či rostliny a na vlhkosti paliva. V jednom kilogramu dřeva je za dosažitelných podmínek asi 4,3kWh až 4,5kWh energie. Při správném spalování biomasy unikají do ovzduší pouze oxidy dusíku (asi v 20x menším množství než při spalování hnědého uhlí) a CO₂, jehož množství je stejné, jaké rostlina za své vegetační období zpracovala. V moderních zařízeních lze dosahovat téměř dokonalého spalování, díky čemuž po spálení uniká do ovzduší jen malé množství škodlivin [3]. Při dopravě biomasy na velké vzdálenosti vytváří značné emise sama doprava, nejvýhodnější využití biomasy je proto spíše v zařízeních menších výkonů, zpracovávajících materiál z blízkého okolí.

1.1.4. Geotermální energie

Geotermální energie je tepelná energie vnitřních vrstev zemské kůry. Tato energie se využívá díky geotermálním vodám, což jsou přírodní vody, které se po ohřátí dostávají na povrch, kde je využíváno jejich teplo. Geotermální vody se získávají z hlubinných vrtů. V některých oblastech se geotermální vody ohřívají natolik, že jsou přeměňovány na páru. Využití takto vniklé páry k výrobě elektřiny se realizuje třeba na Novém Zélandu. Například elektrárna Wairakei využívá soustavu vrtů k získání geotermální páry o teplotě kolem 250°C, která je v turbínách přímo využívána k výrobě elektřiny. Tato elektrárna s výkonem 140MW pokrývá 4,7% spotřeby elektřiny na Novém Zélandu [14]. Jinou možností je využívání tepla suchých hornin. Teplo se získává buď z trubkových kolektorů osazených ve vrtu, nebo čerpáním povrchové vody několika vrty. Geotermální energie je využitelná pouze v některých oblastech.

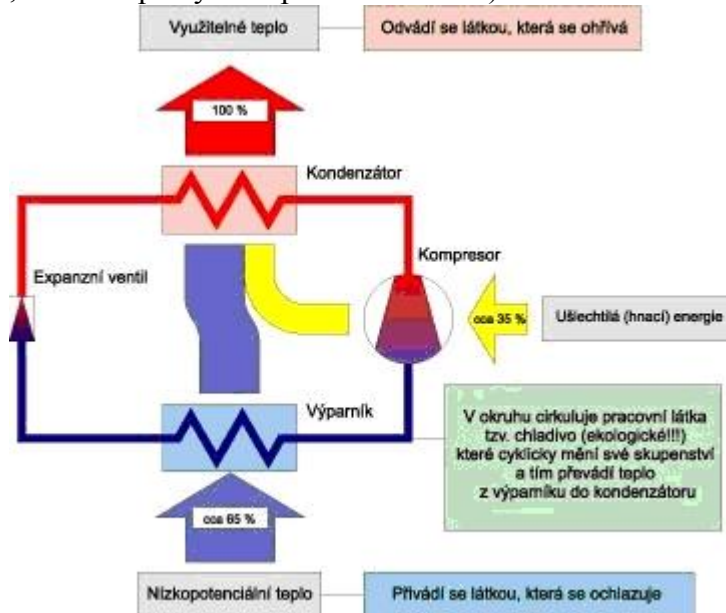
1.1.5. Energie větru

Vítr je proudění vzduchu vznikající v důsledku nerovnosti tlaku v atmosféře. Nerovnost tlaků je způsobena nerovnoměrným ohříváním zemského povrchu slunečním zářením. Toto proudění je využíváno větrnými turbínami k pohonu generátorů elektrické energie. Větrné elektrárny mohou být různých výkonů a konstrukcí, z nichž každá je vhodná pro jiné použití a jiné podmínky. Použití větrných elektráren je závislé na vhodnosti lokality, tedy aby v dané lokalitě byly dostatečně velké rychlosti větru (u vrtulových větrných elektráren používaných v současnosti alespoň 3m/s) a vítr o potřebné intenzitě se vyskytoval dostatečně často. U nás jsou tyto podmínky především v pohraničních horách. V zahraničí se často větrné elektrárny

umist'ují na pobřeží, kde není vítr zeslabován vlivem nerovnosti krajiny, stromů nebo zástavby. Výhodou větrných elektráren je provoz téměř bez dalších nákladů. Jejich velkou nevýhodou je ovšem nestálost výroby energie, to vede k nutnosti nahrazovat jejich výkon jinými zdroji v případě bezvětří, nebo naopak k problémům v přenosové soustavě v případě silného větru.

1.1.6. Tepelná čerpadla

Tepelná čerpadla jsou zařízení, která z okolí odebírají nízkoteplotní teplo, které následně převádí na vyšší teplotní hladinu. Toto teplo je dále využíváno k vytápění nebo k ohřevu vody. Tepelná čerpadla pracují s uzavřeným chladicím cyklem, pracujícím s kondenzací a vypařováním chladicího média. Tepelná čerpadla mohou odebírat teplo z venkovního vzduchu, povrchových vod, podzemních kolektorů, podzemní vody atd. Velmi výhodnou možností je použití tepelných čerpadel v provozech, kde je potřeba chlazení, například chlazení mléka. Odpadní teplo potom může být účelně využito. Tepelná čerpadla ovšem sama energii nevytváří a ke svému chodu potřebují energii z jiných zdrojů (ta tvoří asi třetinu z množství energie, kterou tepelným čerpadlem získáme).



obr.2. Princip funkce tepelného čerpadla [4]

1.1.7. Další druhy obnovitelných zdrojů energie

Mezi obnovitelné zdroje energie by se dalo zařadit mnoho dalších způsobů výroby energie. V pobřežních oblastech lze stavět přílivové elektrárny, nebo elektrárny využívající energii vln. U pobřeží Havajských ostrovů se testuje zařízení OTEC, ve kterém ohříváním amoniaku dochází ke vzniku par, které pohání turbínu. Ke kondenzaci par slouží chladná voda čerpaná z velké hloubky moře.

2. Větrné elektrárny

Větrné elektrárny jsou zařízení, v nichž se působením aerodynamických sil uvádí do pohybu rotor, který dále pohání generátory elektřiny. Využití energie větru ke konání práce má poměrně dlouhou historii. Už v 7. století př.n.l. bylo energie větru užíváno ke mletí obilí. Na našem území je první existence větrného mlýna doložena roku 1277 v zahradě Strahovského kláštera. První použití větru k výrobě elektrické energie pochází z přelomu let 1887 a 1888, kdy Američan Charles F. Brush poprvé k větrné turbíně připojil elektrický generátor [6]. Ve větší míře se větrné elektrárny začaly využívat až v průběhu 70. let 20.

století. V ČR nastal velký rozvoj větrných elektráren mezi lety 1990 a 1995. Po té následovalo několik let útlumu a až od roku 2003 nastalo opět období rozvoje, které trvá až dodnes.

V současné době existuje mnoho druhů větrných elektráren. Můžeme je rozdělit podle výkonu a podle konstrukce.

2.1. Větrné elektrárny podle maximálního výkonu

Větrné elektrárny můžeme rozdělit podle maximálního výkonu, kterého dosahují při optimálních podmínkách (rychlosti větru, správnému natočení proti jeho směru...). Z tohoto hlediska máme tyto skupiny:

- mikroelektrárny – s výkonem od 1W do jednotek kW, slouží především k napájení jednotlivých zařízení s nízkým příkonem (osvětlení reklamních ploch, čerpání vody...).
- malé větrné elektrárny – jejich maximální výkon se pohybuje v rozmezí jednotek kW až desítek kW, slouží především k napájení větších zařízení či jejich soustav, případně jako zdroj energie rodinných domů nebo rekreačních chat v místech bez napojení na elektrickou síť
- střední a velké větrné elektrárny – s výkonem v řádů stovek kW, u největších současných větrných elektráren může maximální výkon dosahovat 5MW. Slouží především k dodávání elektrické energie do rozvodné sítě. Ekonomicky nejvýhodnější je sdružování elektráren středních výkonů (kolem 300kW) do tzv. větrných farem.

2.2. Druhy větrných elektráren podle dalších kritérií

Konstrukcí větrných motorů je velmi mnoho a můžeme je dělit podle různých hledisek. Podle aerodynamického principu na základě něhož větrný motor funguje, máme větrné motory odporové a vztakové. Vzhledem ke konstrukci máme větrné motory s vodorovnou osou rotace a se svislou osou rotace. Podle rychlosti rotace rotoru máme větrné motory rychloběžné, středně rychloběžné a pomaloběžné.

U odporových větrných motorů klade plocha lopatky nastavená proti větru aerodynamický odpor, kvůli tomu je na lopatku vyvozována síla, která je obvykle přeměňována na rotační pohyb. Mezi odporové motory patří např. Savoniův rotor.

Vztakové motory mají tvarové lopatky s profilem podobným listům letecké vrtule. Při jejich obtékání vzniká na lopatce vztaková síla, která roztáčí rotor. Mezi vztakové motory patří i vrtulové větrné elektrárny, které jsou v současné době nejpoužívanějším typem.

Rychloběžné a pomaloběžné motory rozlišujeme podle tzv. součiniteli rychloběžnosti λ , který se vypočte podle vztahu:

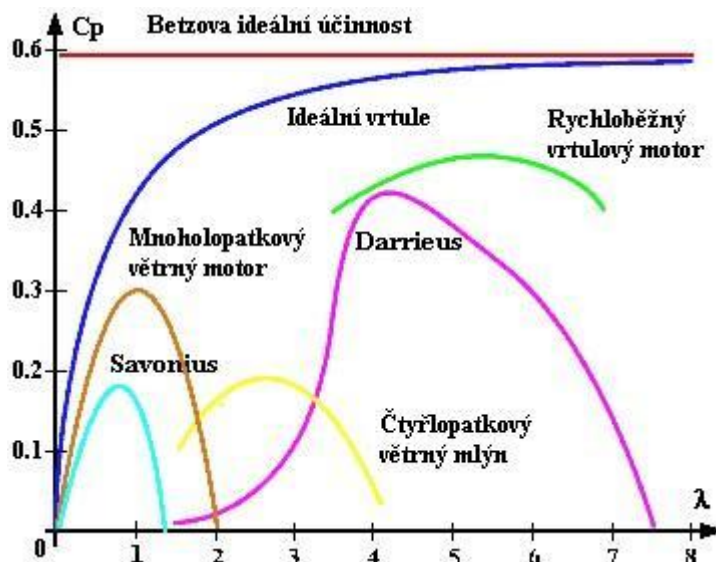
$$\lambda = \frac{u_R}{v} = \frac{2\pi Rn}{v} \quad [1]$$

kde: R...poloměr rotoru
n...otáčky rotoru [s^{-1}]
v...rychlost větru [$m \cdot s^{-1}$]

Pro pomaloběžné větrné motory je $\lambda < 1,5$, pro středně rychloběžné motory $\lambda = 1,5$ až $3,5$ a pro rychloběžné motory $\lambda > 3,5$.

2.3. Druhy větrných elektráren dle použitého větrného motoru

Použití konkrétního typu větrného motoru značně ovlivňuje konkrétní podmínky, při kterých bude pracovat. Účinnost jednotlivých typů je závislá především na součiniteli rychloběžnosti (viz. graf 1.).



graf 1. – porovnání závislosti účinnosti (v grafu C_p) na součiniteli rychloběžnosti λ u jednotlivých typů větrných motorů [10]

V grafu se objevují dvě křivky mezní účinnosti. Větrný motor odnímá kinetickou energii proudění vzduchu protékajícího jeho pracovní plochou, čímž proud vzduchu zpomaluje. Poměr výkonu větru a výkonu vypočteného ze změny kinetické energie potom nazýváme Betzovou ideální účinností, která má hodnotu 59,26% (uvažujeme-li, že poměr rychlosti vzduchu za rotorem a před ním je roven 1/3). Hodnota účinnosti ideální vrtule potom udává maximální účinnost, které lze dosáhnout při použití vrtule s nekonečným počtem lopatek s nulovým profilovým odporem.

2.3.1. Větrná elektrárna s motorem s vrtulí

Větrný motor s vrtulí je vztakový rychloběžný větrný motor s vodorovnou osou. Lze u něj dosáhnout největší teoretickou účinností. Je používán od mikroelektráren po elektrárny s výkonem až 5MW. V současnosti jsou u větrných elektráren používány hlavně tyto větrné motory.

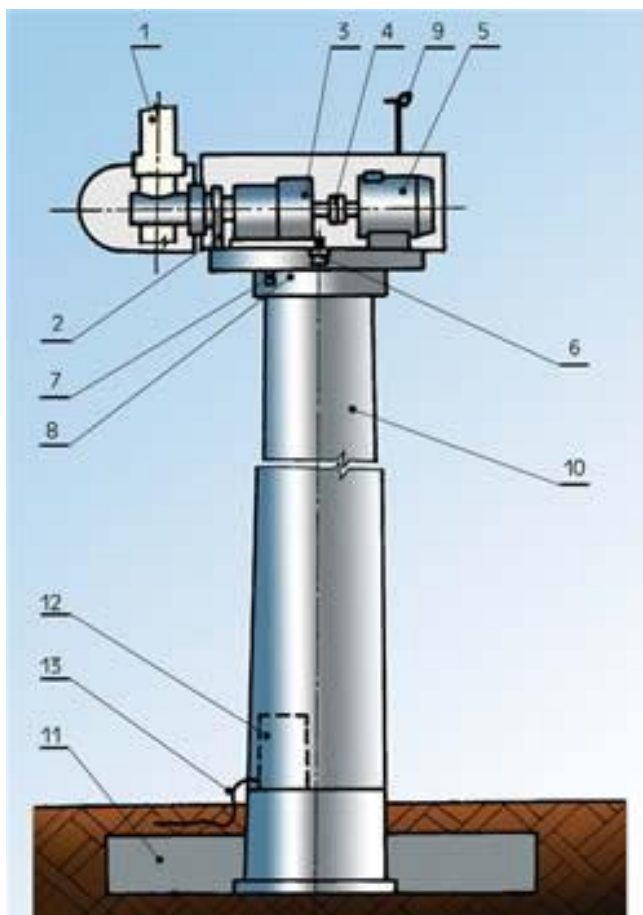
Vrtulové větrné motory mají většinou jeden až čtyři listy. U jednolistových se na opačné straně, než je list vrtule, nachází vyvažovací závaží. Dvou a třílisté jsou v současné době nejpoužívanější. Čtyřlisté vrtule se používají především z technologických důvodů výroby hlavy rotoru. U některých větrných motorů mohou být listy vrtule natáčivé. Díky tomu lze dosáhnout ideálních parametrů pro momentální rychlosti větru. Další výhodou je významná zvláště u velkých větrných motorů. Vzhledem k rychloběžnosti vrtulových motorů, je jejich rozběhový moment malý, kvůli čemuž je při rozběhu potřeba rotor roztočit elektromotorem. Další možností rozběhu je použití dvoustupňové regulace, kdy se listy motoru nejdříve nastaví do rozběhové polohy, vyvozuji největší kroutící moment, a až po dostatečném roztočení rotoru se listy nastaví do pracovní polohy. Natočením listů lze také dosáhnout odstavení větrného motoru.

Hlavní části větrné elektrárny s vrtulovým větrným motorem:

- betonový základ – slouží k ukotvení celé konstrukce
- tubus (věž) elektrárny – u malých elektráren jde jen o sloup malých průměrů, kterým vedou výkonové a signálové kabely. U větších elektráren je tvořeno příhradovou konstrukcí nebo jako samonosná trouba s relativně velkým průměrem (například ze sklolaminátu), mající uprostřed schodiště nebo výtah umožňující obsluhu dostat se do strojovny elektrárny. Výška věže závisí na výkonu elektrárny a tedy na její velikosti. Platí ale, že ve větších výškách je

větší intenzita větru. Naproti tomu s výškou věže roste její namáhání v důsledku zvětšení ramene, na kterém působí síly vyvozované větrem. Věže větších elektráren bývají dělené a sestavují se až na místě provozu elektrárny. Věže největších elektráren mohou dosahovat výšky až 100m.

- gondola – posazena na vrcholu věže otočně kolem svislé osy. U malých větrných elektráren obsahuje pouze generátor. V její přední části je otočně uložen rotor a na opačném konci pevně připojený ocas zajišťující natočení gondoly proti větru. Gondoly větších elektráren obsahují řadu dalších zařízení. Směr a rychlost větru je zjišťován čidly, a na základě signálu z nich rozhoduje řídicí jednotka o natočení gondoly (které je zajišťováno elektrickým pohonem) a nastavení listů vrtule. K převodu malých otáček vrtule na otáčky vhodné pro generátory slouží převodovka (u menších elektráren dvoustupňová, u větších je nejvhodnější třístupňová planetová převodovka). Mezi výstupem z převodovky a generátorem je umístěna mechanická brzda sloužící k odstavení a zajištění rotoru. V gondole se nachází i generátor. U větších elektráren jich může být víc, přičemž jsou zapojovány podle intenzity větru. Někdy se v gondole nachází i měniče nebo transformátory.
- rotor s vrtulí – hlavní část elektrárny, díky působení větru vznikají na listech vrtule aerodynamické síly roztáčející rotor. Průměr vrtule se pohybuje od necelého metru u mikroelektráren až po desítky metrů (v současné době největší elektrárna u nás u obce Pchery s výkonem 3MW má průměr rotoru 100m a výšku věže 88m [5]). V hlavě motoru se případně nachází mechanismus nastavování listů vrtule.



- 1 - rotor s rotorovou hlaví
- 2 - brzda rotoru
- 3 - planetová převodovka
- 4 - spojka
- 5 - generátor
- 6 - servo-pohon natáčení strojovny
- 7 - brzda točny strojovny
- 8 - ložisko točny strojovny
- 9 - čidla rychlosti a směru větru
- 10 - několikadílná věž elektrárny
- 11 - betonový armovaný základ elektrárny
- 12 - elektrorozvaděče silnoproudého a řídicího obvodu
- 13 - elektrická přípojka.

obr. 3 – základní části větrné elektrárny s větrným motorem s vrtulí [9]

Výkon, který bude elektrárna schopná vytvářet závisí především na rychlosti větru a na velikosti plochy rotoru, můžeme ho vyjádřit vztahem:

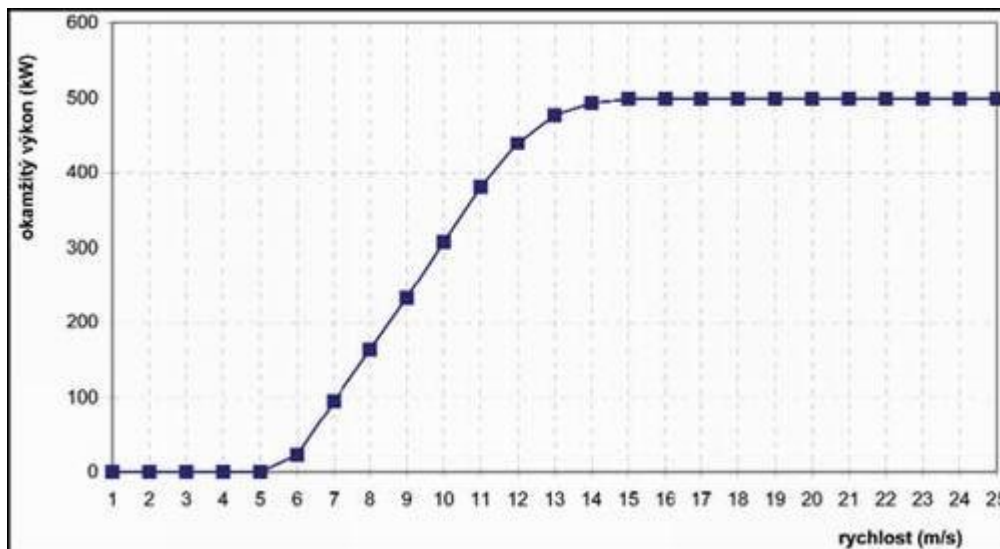
$$P_j = \frac{\rho}{2} \cdot C_p \cdot S \cdot v_j^3 \quad [1]$$

kde: ρ je hustota vzduchu
 C_p je výkonový součinitel
 S je plocha rotoru
 v_j je rychlost větru

Ze vzorce je zřejmé, že výkon větrné elektrárny roste nejrychleji se zvyšující se rychlostí větru. Tento růst ale má svou mezní hranici, kdy se zvyšující se rychlostí větru už neroste výkon elektrárny. To je hlavně u větších větrných elektráren zajišťováno elektronickou regulací výkonu, která v případě vysokých rychlostí větru zajistí přizdění nebo odstavení rotoru. Rychlost větru, po níž už nedochází k navyšování výkonu, se podle typu elektrárny pohybuje kolem $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hranice kritické rychlosti větru se u současných elektráren pohybuje nad $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Celková účinnost větrných elektráren u třílistých rotorů dosahuje hodnoty 39% a u dvoulistých až 48%. Větrný motor s vrtulí dosahuje při ideálních podmínkách nejlepší účinnosti. Vysoké účinnosti se u tohoto větrného motoru dosahuje i díky možnosti natáčení listů vrtule. Správné natočení listů umožňuje nejlepší využití energie větru při jeho konkrétní rychlosti.

Aby byla větrná elektrárna rentabilní, je nutná správná volba lokality. Nejdůležitějším hlediskem pro volbu umístění je průměrná rychlost větru v daném místě. Ta by měla být vyšší než $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Průměrná rychlost větru hraje hlavní roli v množství elektrické energie, kterou elektrárna vyrobí. Například větrná elektrárna s maximálním výkonem 65 kW vyrobí v místě s průměrnou rychlostí větru $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ asi 50 MW·h elektrické energie, při průměrné rychlosti $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je to 87 MW·h a při průměrné rychlosti větru $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je to už 126 MW·h [1]. Závislost okamžitého výkonu elektrárny je zobrazena v grafu 2. Odtud je patrné, že elektrárna nedodává žádný výkon do rychlosti kolem $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. S nárůstem rychlosti větru narůstá i okamžitý výkon elektrárny, který se při rychlosti větru kolem $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ustálí na maximální hodnotě a dál už s rychlostí větru neroste.



graf 2. Závislost okamžitého výkonu větrné elektrárny na rychlosti větru [9]

Průměrná rychlost větru je důležitým, ale ne jediným hlediskem pro volbu umístění větrné elektrárny. Další důležitou podmínkou, která platí hlavně u větších elektráren, je, aby

elektrárna byla umístěna na místě umožňujícím napojení na rozvodnou síť. Vhodné je také umístění větrné elektrárny dál od lidských sídel, kvůli hlukovým limitům nebo možnosti rušení signálu TV nebo rádia.

V současné době je snaha stavět stále větší elektrárny s co největším výkonem. Příkladem může být stavba největší větrné elektrárny u nás u obce Pchery. Jedná se o dvě turbíny, každá s výkonem 3MW. Tyto dvě větrné elektrárny mají ročně dodat 11GW·h elektrické energie a investice na realizaci byla 190 mil. Kč [5]. Ekonomicky nejvýhodnější se ale jeví stavba větrných farem složených z jednotlivých elektráren s výkonem kolem 300kW.

Větrné elektrárny mohou mít i více vrtulí, buď obě na jedné straně gondoly nebo na opačné. Pokud vrtule rotují opačnými směry, dochází k eliminaci gyroskopických momentů vznikajících při natáčení gondoly po větru.

2.3.2. Větrná elektrárna s mnoholopátkovým větrným motorem

Nejčastější použití mnoholopátkového větrného motoru je pro čerpání vody. Je to pomaloběžný vztlakový větrný motor s vodorovnou osou. Má velký počet lopatek (až 150). Jeho moderní náhradou pro čerpání vody jsou rotory s mnohem menším počtem lopatek (např. 6). Způsob použití mnoholopátkového větrného motoru je stejný jako u motoru s vrtulí.

Oproti větrnému motoru s vrtulí pracuje mnoholopátkový větrný motor s mnohem menšími rychlostmi větru (náběhová rychlost od $0,16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a ideální rychlost v rozmezí 3 až $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Pro výkon platí vztah:

$$P = 0,15 \cdot v_j^2 \cdot D^3 \quad [13]$$

kde: D je průměr rotoru
 v_j je rychlost větru

Výkon tedy v tomto případě je oproti větrnému motoru s vrtulí závislý pouze na druhé mocnině rychlosti větru. Velikost průměru rotoru je potom omezena jeho hmotností (velké množství lopatek). U mnoholopátkového větrného motoru je tedy značně omezen maximální výkon (nejvýš desítky kW). Použití tohoto typu větrného motoru pro větrné elektrárny tedy není příliš vhodné.

Nejlepší účinnosti je dosahováno při součiniteli rychloběžnosti λ blízkém 1. Při těchto nízkých rychlostech větru se účinnost blíží 35% [1].

2.3.3. Větrná elektrárna s rotorem Darrieus

Rotor Darrieus je vztlakový, rychloběžný větrný motor se svislou osou rotace. Princip práce motoru spočívá v tom, že na listech rotoru vzniká vztlaková síla, jejíž směr na každé z lopatek je takový, že vyvozuje kroučící moment působící stejným směrem. Proti momentům od vztlakových sil působí momenty od sil odporových. Velikost odporových i vztlakových sil je závislá na součiniteli odporu c_x a součiniteli vztlaku c_y , jenž jsou závislé na úhlu náběhu relativního proudu vzduchu a velikosti relativní rychlosti proudu vzduchu. Relativní rychlost je vektorovým součtem obvodové rychlosti na listu rotoru u a rychlosti vzduchu v . Velikost vztlakových a odporových sil, a tedy i kroučícího momentu generovaného rotorem, je závislá na poměru obvodové rychlosti u rychlosti větru v . Při malých hodnotách tohoto poměru není schopný rotor dávat větrný výkon. Minimální hodnota poměru u/v , při kterém motor začne generovat výkon, se v závislosti na konkrétním druhu motoru pohybuje kolem 3 a ideální hodnota kolem 6.

Z výše uvedeného plyne několik důsledků:

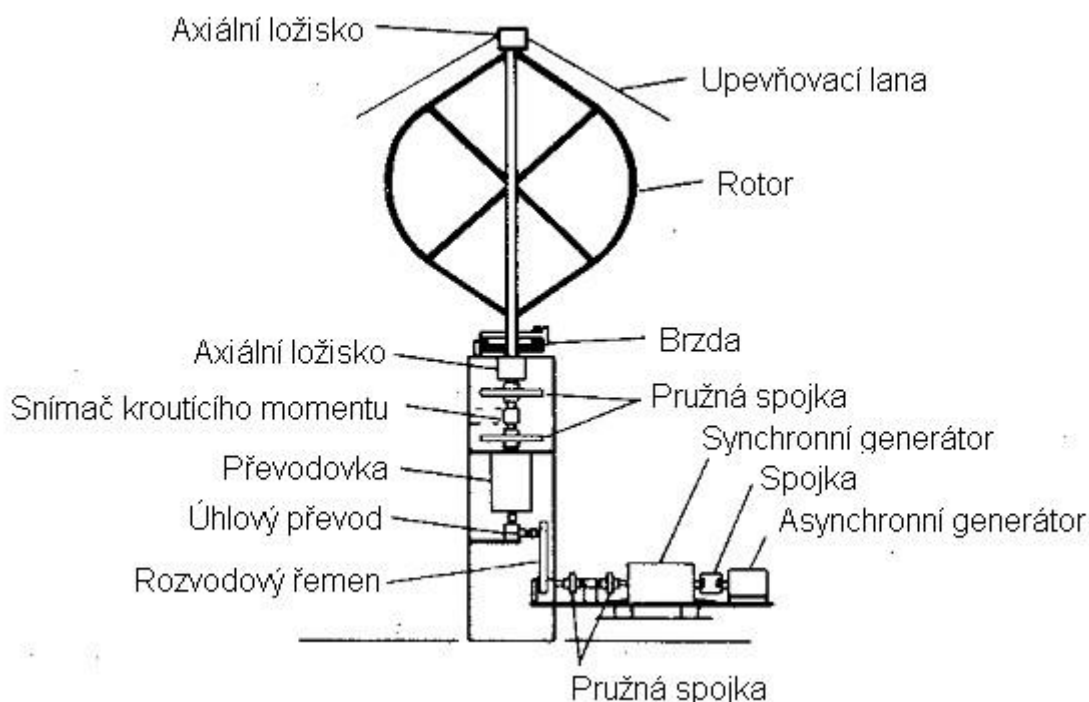
- Rotor se není z klidu schopný samostatně roztočit, jelikož za klidu je $\frac{u}{v} = 0$;
pokud tedy rychlost větru dosáhne dostatečné velikosti, je nutno rotor Darrieus

roztočit úhlovou rychlostí, jejíž velikost je závislá na rychlosti větru, aby rotor začal být schopný sám dodávat větrný výkon. Roztočení proběhne buď za použití generátoru elektrárny jako elektrického motoru, nebo jiným typem větrného motoru (např. Savoniovým rotorem). Výhoda této vlastnosti spočívá v tom, že ani při velkých rychlostech větru se rotor sám nerozběhne a není tedy potřeba velké brzdy zajišťující jeho odstavení.

- Otáčky větrného motoru se musí za provozu regulovat v závislosti na rychlosti větru tak, aby bylo dosaženo ideálního poměru u/v zajišťujícím maximální možnou účinnost. Za vyšších rychlostí větru je nutno rotor přibrzďovat, a tím vznikají další ztráty. Při odchylce od ideálního poměru u/v účinnost motoru rychle klesá. Maximální účinnost nedosahuje účinnosti větrných motorů s vrtulí.
- Vznik vibrací na listech v důsledku změn směrů aerodynamických sil.

Rotor Darrieus pracuje se svislou osou rotace. Kvůli tomu se jeho konstrukce odlišuje od výše zmíněných typů větrných motorů. Hlavní výhodou svislé osy rotace je možnost umístit veškeré zařízení na zem. Díky tomu jsou na věž elektrárny kladeny menší nároky, jelikož nemusí nést tíhu gondoly. Velkou výhodou tohoto uspořádání je také to, že není nutné celou konstrukci natáčet v závislosti na směru větru, protože tento typ větrného motoru pracuje nezávisle na směru větru. Tato výhoda se nejvíce projeví v oblastech, kde se směr větru často mění, jelikož u vrtulových elektráren natáčení gondoly za rotace vrtule způsobuje gyroskopický moment, který ještě víc namáhá věž elektrárny.

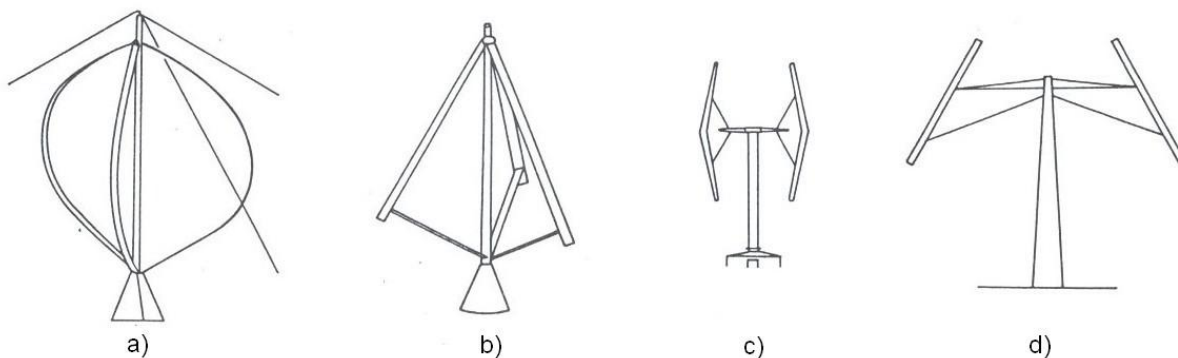
Samotný rotor může mít dva až čtyři listy uspořádané do několika tvarů. Původní tvar rotoru Darrieus připomíná řecké písmeno Φ , jiný má tvar řeckého písmene Δ nebo písmene H. Rotor s prizmatickými listy umožňuje regulovat výkon větrného motoru změnou sklonu listů a tím změnou velikosti pracovní plochy (viz. obr.6.).



obr.4. Možné uspořádání větrné elektrárny s rotorem Darrieus [11]

Účinnost je ve velké míře závislá na rychlosti vzduchu a obvodové rychlosti na listech rotoru. Za ideálních podmínek se maximální hodnota účinnosti pohybuje kolem 36%. Dosažnout této hodnoty je ale poměrně složité, protože to vyžaduje regulaci otáček rotoru.

Kvůli proměnným otáčkám je následně problém s připojením elektrárny s rotorem Darrieus do elektrické sítě.



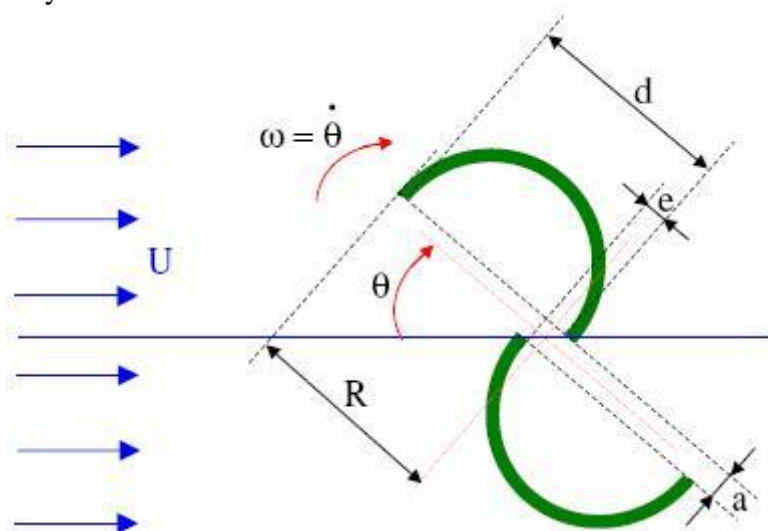
a) s lopatkami ve tvaru Φ ; b) s přímými lopatkami ve tvaru Δ ; c) tvar H; d) s prizmatickými listy

obr. 5. Různé tvary rotoru Darrieus [1]

Rotor Darrieus může být použit pro velký rozsah výkonů. Malé rotory tohoto typu mohou mít maximální výkon v řádech jednotek W, zatímco největší současná elektrárna tohoto typu, s výškou 100m a průměrem 40m nacházející se v Cap-Chat v Quebecu v Kanadě, je dimenzována na výkon 4MW, ale kvůli prodloužení její životnosti je maximální výkon snížen na 2,5MW [10].

2.3.4. Větrné elektrárny s rotorem Savonius

Větrný motor Savonius pracuje na odporovém principu se svislou osou rotace. Rotor se skládá z válcové plochy, která jakoby byla v ose rozpůlena a tyto poloviny byly navzájem posunuty.



obr.6. Řez Savoniovým rotorem [12]

Rotor se otáčí díky tomu, že odporový součinitel vypuklé části rotoru (dolní polovina obr.6) a tedy i síla působící na tuto polovinu, je menší, než odporový součinitel druhé poloviny rotoru. Momenty od těchto sil jsou také rozdílné, díky čemuž se rotor začne točit. Rozdílnosti těchto sil je dosaženo prakticky v každé poloze rotoru vůči větru, a proto rotor není závislý na směru větru.

Rotor Savonius pracuje na odporovém principu, a proto je jeho rozběhový moment poměrně velký. Díky této vlastnosti se hodí pro použití jako rozběhový motor pro rotor Darrieus. Jak rozběhový moment, tak celkový výkon lze zvýšit umístěním více navzájem pootočených Savoniových rotorů nad sebe.

Samotný rotor může být různých konstrukcí. Základním rozdílem je změna parametrů a a e na obr.6. Jestliže tyto parametry nejsou nulové, vytvářejí mezeru na vyrovnání rozdílů tlaků v jednotlivých částech rotoru. Další možné konstrukce mohou mít například více lopatek různých tvarů. Lopatky mohou být zkroucené, nebo mohou vytvářet šroubovici (takovéto rotory mají plynulejší chod, ale výroba lopatek je náročnější). Někdy se rotory umísťují nad sebe, kdy jednotlivé části jsou vůči sobě pootočené, díky čemuž je chod celého rotoru plynulejší.

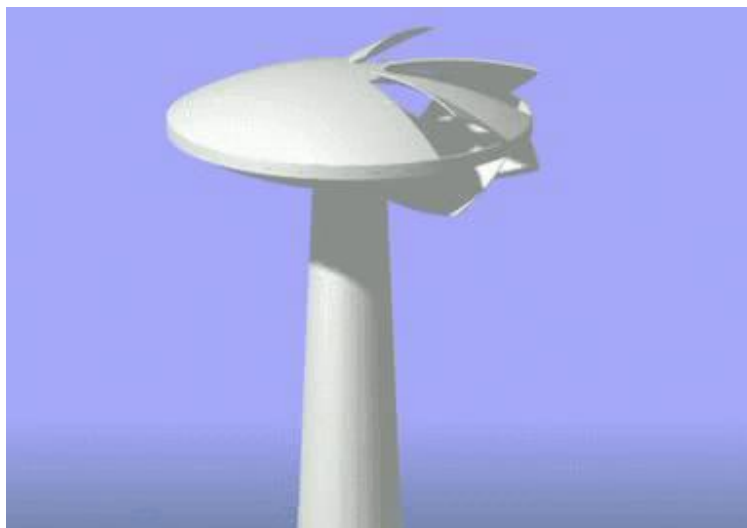


obr. 7. Dva Savoniovy rotory s lopatkami ve tvaru šroubovice [8]

Savoniův rotor dosahuje nejlepší účinnosti při malých rychlostech větru. Samotná velikost rotoru je omezena jeho hmotností. Kvůli tomu nedosahují větrné elektrárny s tímto rotorem velkých výkonů. Jeho největší výhodou je, že není závislý na směru větru.

2.3.5. Další typy větrných motorů

Konstrukcí větrných motorů je velká řada. Některé jsou pouze variací na výše zmíněné typy (například větrné elektrárny s několika vrtulemi atd.). Jiné typy jsou zcela novým konstrukčním řešením, jako například větrný motor ROOSWELL.



obr.8. Větrný motor Rooswell [15]

Základ této konstrukce tvoří těleso čočkovitého tvaru s malým odporem proti proudění vzduchu. Na tomto tělese se odklápí a zavírají klapky tak, aby docházelo k rotaci celého tělesa. Konstrukce tohoto motoru je patentem firmy Taawin [15] a informací o něm je velmi málo. Zůstává tedy otázkou, zda netradiční konstrukce větrných motorů (včetně motoru ROOSWELL) dokáží nabídnout oproti klasickým konstrukcím nějaké výhody a rozšíří se do běžného provozu, nebo zůstane jen u návrhu nebo prototypu.

3. Možnosti akumulace energie větru

Počasí na Zemi je velmi proměnlivé a proto i vítr, jako jeho projev, je velmi nestálý. Tato nestálost je velkým problémem ve využívání větru k výrobě elektrické energie. Za bezvětří je totiž potřeba dodávat chybějící energii klasickými zdroji energie. Druhý negativní jev, způsobený větrnými elektrárnami může nastat za extrémních povětrnostních podmínek, za velkých rychlostí větru. V takovém případě větrné elektrárny na velkém území dodávají svůj špičkový výkon. Tento náhlý, velký zdroj energie může potom ohrozit přenosovou soustavu nebo dokonce způsobit tzv. blackout, tedy výpadek přenosové soustavy v důsledku jejího přetížení.

Jako ideální se proto jeví možnost uchování elektrické energie z období, kdy je intenzita větru velká, a její využití za bezvětří. Uchování elektrické energie lze provádět mnoha způsoby, z nichž každý má své výhody a nevýhody.

Nejznámějším a nejrozšířenějším způsobem uchování elektrické energie jsou baterie a akumulátory, v nichž vzniká elektrická energie chemickou reakcí. Tato chemická reakce lze v některých případech obrátit za působení elektrického proudu, čímž dojde k uskladnění energie. Baterie a akumulátory pracují s různými látkami, kvůli čemu každý typ baterie dosahuje jiné účinnosti, jiných parametrů a ceny. Akumulátory využívající technologii Li-ion mají účinnost blízkou k 1.

Dalším způsobem uchování energie, jsou tzv. superkapacitory. Ty pracují na principu klasických kondenzátorů pouze ve větším měřítku. Oproti akumulátorům je jejich výhoda především v možnosti rychlého nabíjení a vybíjení.

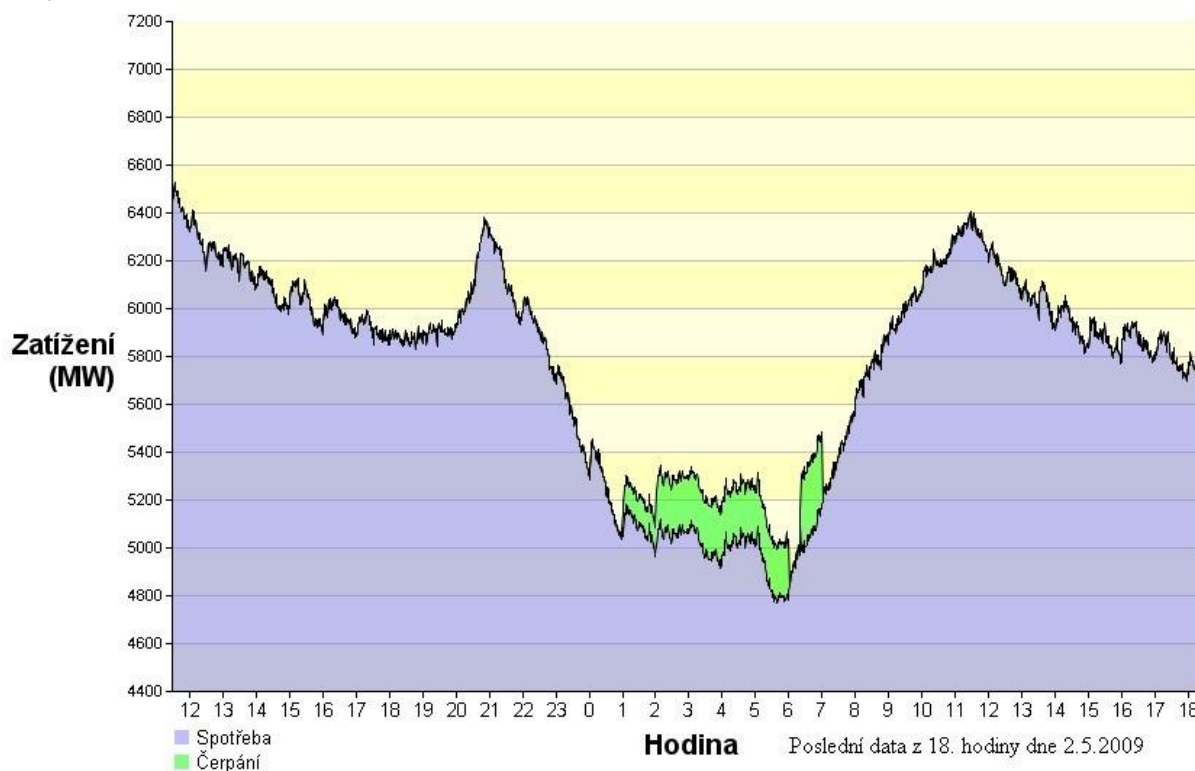
Mechanicky lze energii uchovávat například v setrvačnicích. Ty pracují tak, že se při přebytku roztočí hmotný kotouč, který tím získá pohybovou energii. V případě potřeby setrvačnický rotor roztáčí generátor elektrické energie a jeho pohybová energie se mění zpět na elektrinu. V moderních setrvačnicích je kotouč s hřídelí uložen na magnetických ložiscích a celý rotor se otáčí v pouzdře s nízkým vakuem, aby se snížily ztráty při uchování energie. Setrvačnický dokáží v určitém rozsahu svých otáček pracovat s účinností až 90%.

V současné době běžným způsobem uchování energie je princip, na kterém pracují přečerpávací vodní elektrárny. V době, kdy je energie nadbytek, je čerpadly čerpána voda do vysoko položené vodní nádrže. V době špičkové spotřeby energie voda z horní nádrže pohání turbíny s generátory, čímž se vrací elektrická energie do rozvodné sítě. Přečerpávací vodní elektrárny hrají důležitou roli v regulaci rozvodné soustavy. [16]

Dalšími způsoby uchování energie jsou například rozklad vody elektrolýzou nebo komprese vzduchu, ty budou popsány dále.

3.1. Uchování energie kompresí vzduchu

Distribuce elektrické energie rozvodnou sítí je velice náročné, jelikož v každém okamžiku se v celé síti musí vyrobit stejné množství energie, které se spotřebovává. Během dne se však v elektrické síti vyskytuje mnoho výkyvů v poptávce a tomu se musí přizpůsobovat i výroba elektřiny. Průběh denní spotřeby elektrické energie je na grafu 3 (den volna) a 4 (pracovní den).



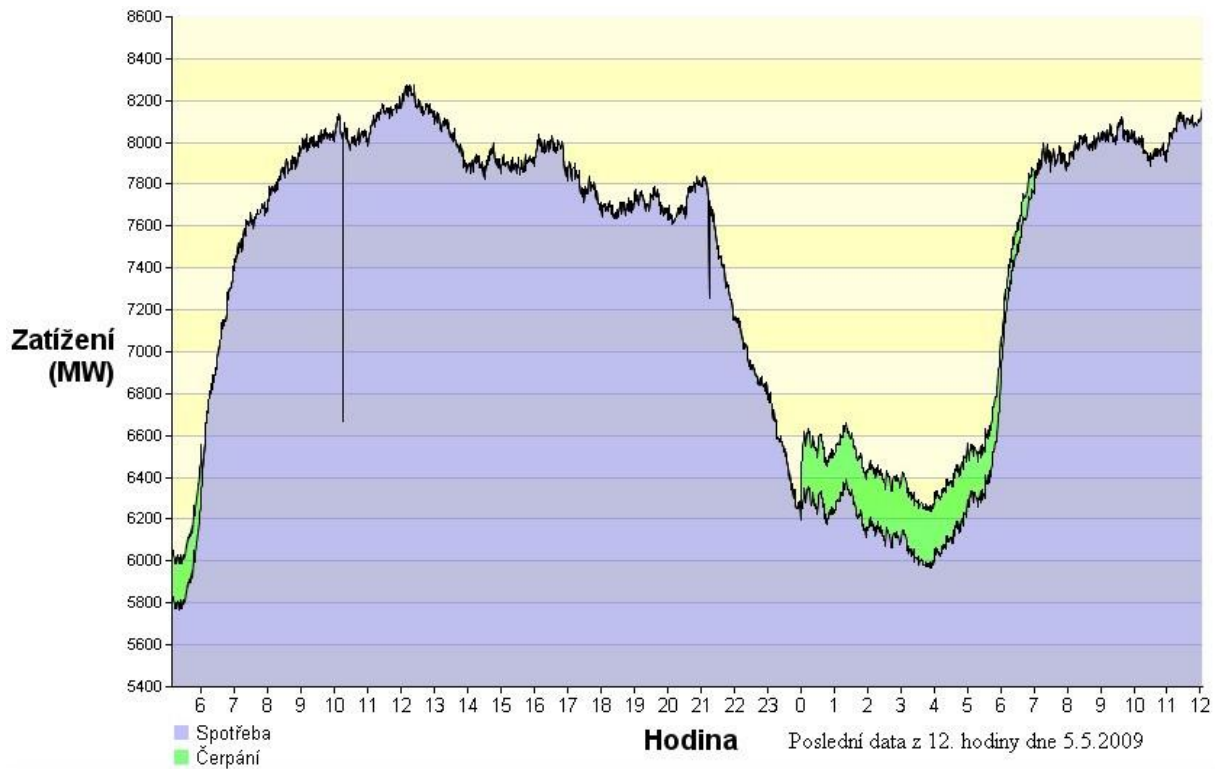
graf 3. Denní průběh spotřeby elektřiny v ČR v den volna [24]

Z grafu lze vidět, že spotřeba přirozeně značně kolísá. Velké zdroje, jako jaderné nebo tepelné elektrárny, však nedokáží rychle regulovat svůj výkon, jsou tedy potřeba zařízení, která by v případě přebytku energie v síti elektřinu spotřebovávala a v případě potřeby ji do rozvodné sítě zase vracela – uchovávala energii.

Uchování energie ve větším měřítku, které by umožňovalo regulaci v rámci přenosové soustavy, se v současné době provádí hlavně v přečerpávacích vodních elektrárnách. Stavba přečerpávací vodní elektrárny je však náročná a je možná pouze ve vhodných lokalitách, kterých není mnoho. Uchovávání energie můžeme vidět i na grafu 3 a 4, kdy zelená oblast představuje dobu, kdy přečerpávací elektrárny „uskładňovali“ energii čerpáním vody do horní nádrže.

Technologie uchování energie kompresí vzduchu umožňuje uchovávání poměrně velkého množství energie (srovnatelného s přečerpávacími vodními elektrárnami). Zařízení

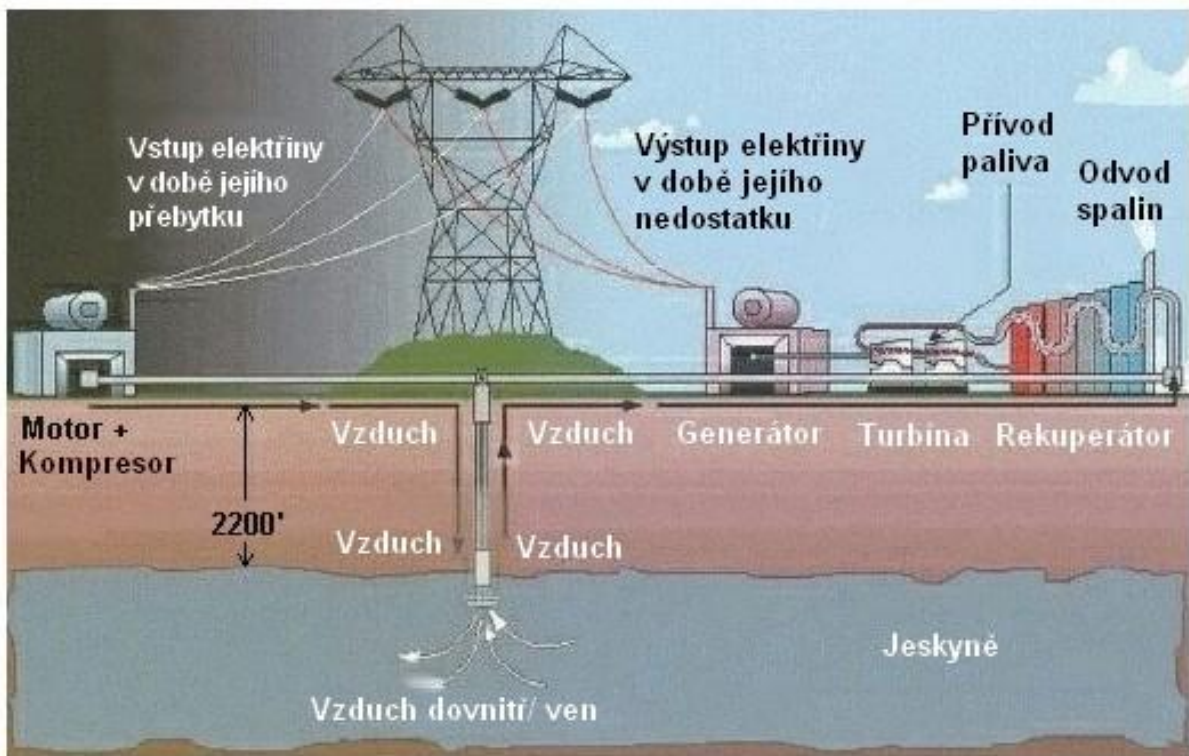
využívající energii stlačeného vzduchu může podle konkrétních podmínek generovat výkon v řádu desítek až stovek MW po dobu několika hodin.



graf 4. Denní průběh spotřeby elektřiny v ČR v pracovní den [24]

3.1.1. Princip funkce

Princip uchovávání energie kompresí vzduchu je zobrazen na obr.9.



obr.9. Princip funkce systému na uchování energie kompresí vzduchu [16]

popis funkce:

- Komprese vzduchu: V době přebytku energie začnou kompresory stlačovat vzduch do podzemního zásobníku. Kompresory jsou poháněny energií z rozvodné sítě, nemusí tedy stát přímo u nestálého zdroje energie. Jsou používány šroubové kompresory s mezichlazením.
- Uchování stlačeného vzduchu v podzemním zásobníku: Stlačený vzduch z kompresorů je veden potrubím do podzemního zásobníku. Zásobník je přírodní nebo uměle vytvořená jeskyně. Umělé jeskyně se vytváří v solných ložiscích rozpuštěním soli vodou a následným odčerpáním vody se solí. Podobné jeskyně se v současné době používají například jako podzemní zásobníky zemního plynu.
- Odebírání stlačeného vzduchu v případě potřeby: V případě nedostatku elektřiny v rozvodné síti, proudí stlačený vzduch zpět na povrch, kde se ohřeje. Ohřívání se provádí spaliny z turbíny.
- Hoření směsi stlačeného vzduchu a zemního plynu: Ohřátý stlačený vzduch se smíchá se zemním plynem a expanduje v turbíně, která pohání generátor.

Výhoda popsaného systému spočívá v tom, že v klasické plynové turbíně je velká část energie spotřebována na ohřívání a stlačování vzduchu. V tomto systému do turbíny vstupuje vzduch už ohřátý a stlačený, díky čemuž se ušetří až 2/3 energie vstupujícího paliva. Díky tomu můžeme získat stejný výkon jako v případě použití klasické turbíny s tím, že spotřebujeme jen 1/3 zemního plynu oproti klasické plynové turbíně.

Moderní systémy využívající stlačený vzduch k uchování energie spotřebují zhruba 0,7kWh elektrické energie a 4500kJ energie z paliva k výrobě jedné kWh elektrické energie v případě potřeby [23].

3.1.2. Příklady využití systému uchování energie kompresí vzduchu

Zařízení, využívající princip popsaný výše, už v současné době na světě pracují. Technické údaje dvou těchto zařízení (v německém Huntorfu a americkém McIntoshi) jsou zaznamenány v tabulce 1.

	Huntorf (Německo)	Macintosh (USA)
Výkon elektrárny [MW]	290	110
Doba generování [h]	2	26
Doba komprese/doba generování	4	1,6
Objem zásobníku [10^3m^3]	312	561
Výkon kompresorů [MW]	62	53
Palivo	Plyn	Plyn/nafta

Tabulka 1. Porovnání elektráren pracujících s uchováním energie kompresí vzduchu [17]

Z tabulky 1. lze vidět, že tato zařízení mají poměrně velký výkon. Díky relativně rychlé možnosti dosáhnouti maximálního výkonu komprese i generování (v řádech minut), jsou podobná zařízení ideální pro vyrovnávání špiček a propadů v elektrické rozvodné síti.

Potřeba akumulace energie stále roste, a proto se plánují nová zařízení, která by akumulaci umožňovala. Kvůli nedostatku vhodných míst pro stavbu přečerpávacích elektráren a vysokým nákladům na jejich budování se začínají objevovat další projekty zařízení, využívajících uchování energie kompresí vzduchu.

Jedním z připravovaných projektů je špičková elektrárna u slovenského města Báňská Štiavnica. Zde by mělo být využito prostor bývalého dolu, který nabízí kaverny s objemem přes 200 000 m³, ve kterých by měl být skladován vzduch o tlaku 60 barů. Díky kopcovitému

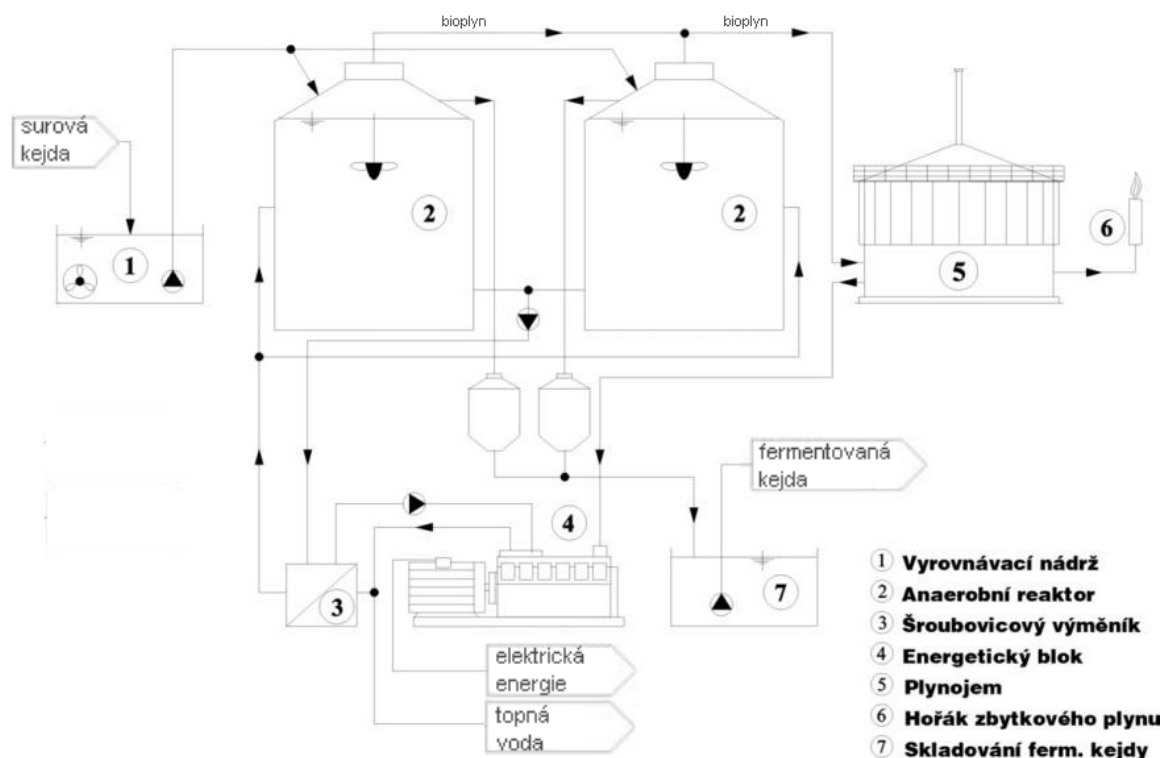
terénu jsou v okolí vhodné podmínky pro vybudování větrných elektráren. Stát by zde mělo až 16 větrných elektráren, každá o maximálním výkonu 5MW. Celkový maximální výkon bude tedy 80MW a průměrný výkon všech elektráren by měl být 33,2MW. Větrné elektrárny budou hlavním zdrojem energie pro kompresory vhánějící vzduch do prostoru bývalého rudného dolu. Pro výrobu elektřiny by potom měly sloužit čtyři expanzní plynové turbíny, každá s výkonem 30MW (celkový výkon tedy 120MW), z nichž každá turbína má vlastní generátor. Palivem pro turbíny má být zemní plyn nebo bionafta [25].

Zařízení podobného typu by se daly postavit i u nás. Hlavním hlediskem pro umístění je možnost použití vhodné podzemní dutiny pro uchovávání stlačeného vzduchu. Takové prostory se u nás vyskytují. Ať už jde o prostory, které jsou v současné době využívány ke skladování zemního plynu, nebo o prostory dnes nevyužívaných dolů. V případě zájmu by tedy bylo možné realizovat zařízení využívající stlačeného vzduchu k uchování energie i u nás.

3.1.3. Uchování energie kompresí vzduchu v kombinaci se spalováním bioplynu

Hlavní nevýhodou výše popsaného systému je, že ke zpětné výrobě elektřiny v případě potřeby je nutná dodávka zemního plynu. Možné problémy s dodávkou plynu, jeho rostoucí cena a fakt, že se jedná o fosilní palivo, vedou ke snaze nahradit zemní plyn v tomto systému jiným druhem paliva. Jako vhodná náhrada může posloužit biomasa.

Možné je například použití stlačeného vzduchu z kombinaci s bioplynem. Ten vzniká mikrobiálním rozkladem organické hmoty za nepřítomnosti kyslíku. Bioplyn se může získávat různými způsoby. Jeho jímání je možné na skládkách, čistírnách odpadních vod a nebo v tzv. bioplynových stanicích. V bioplynových stanicích vzniká bioplyn v anaerobních reaktorech, což jsou uzavřené velkoobjemové nádoby, převážně ze zbytků rostlinné nebo živočišné výroby. Výstupem je nejen energeticky využitelný bioplyn, ale i tuhé zbytky, které se dají využít jako hnojivo [4]. Navíc dochází k bezpečné likvidaci mnohdy nebezpečných látek. Schéma výroby bioplynu je zobrazeno na obr. 10.



obr.10. Schéma výroby bioplynu [31]

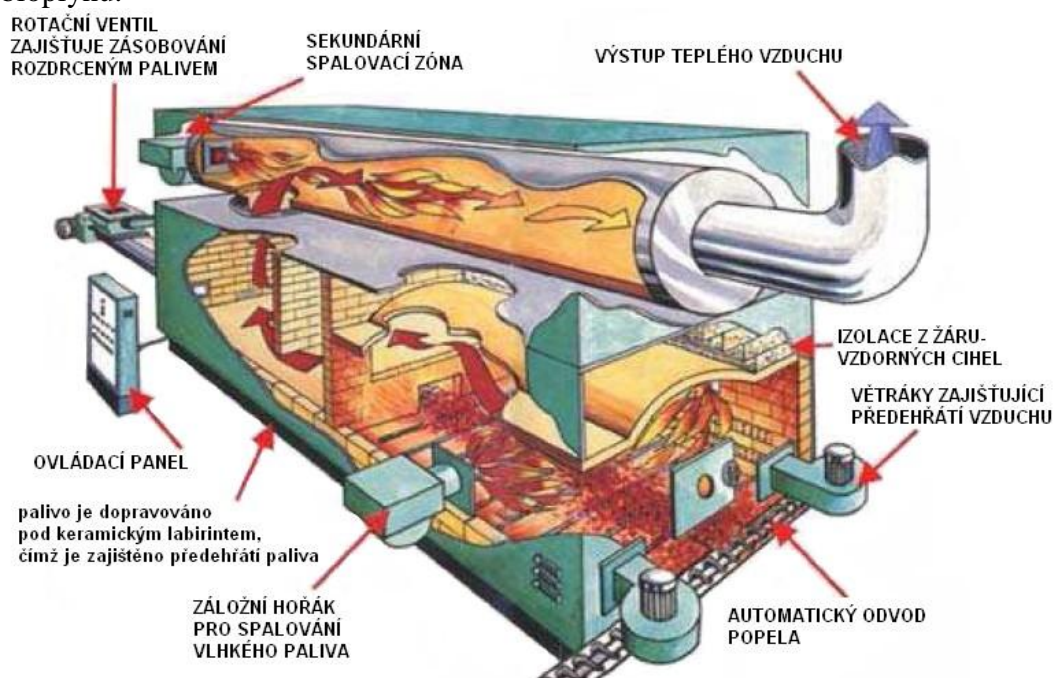
Při použití biomasy v pevném skupenství (energetické plodiny jako konopí, šťovík nebo sláma apod.) je možné toto palivo opět zpracovat do podoby plynu. Toho může být dosaženo zplynováním, což je proces, kterým se z pevných paliv získává směs hořlavých plynů (H_2 , CO , CH_4 , C_2H_4). Základem zplynování je zahřívání dřeva nebo energetických plodin na vysokou teplotu ($750^\circ C$ až $1000^\circ C$) za nepřítomnosti kyslíku, což vede k jeho rozkladu na hořlavé plyny a pevný zbytek [26].

Plyn vzniklý anaerobní fermentací i zplynováním je po úpravě vhodný k využití v plynových turbínách a tedy dokáže v systému popsaném v kapitole 3.1.1. nahradit zemní plyn.

3.1.4. Uchování energie kompresí vzduchu v kombinaci se spalováním biomasy

K zpětnému získání energie ze stlačeného vzduchu lze využít i přímého spalování biomasy. Stlačený vzduch z podzemního zásobníku nevstupuje spolu se zemním plynem do plynové turbíny, ale je ohříván v zařízení spalujícím biomasu. V současné době existuje mnoho zařízení, které zajišťují téměř dokonalé spalování biomasy. Jedno z nich je na obr.11. Jde o schéma zařízení C Range společnosti Talbott.

Rozdrcené palivo (biomasa) v tomto zařízení vstupuje do spalovací komory šroubovými dopravníky vedenými pod komorou, kterou se odvádějí spaliny, čím je zajištěno předehřátí paliva. Samotné spalování probíhá v komoře obložené žáruvzdornými cihlami. Mezi komorou z cihel a vnějším pláštěm zařízení cirkuluje vzduch, který se tímto ohřívá a následně je vháněn do spalovací komory. Spaliny jsou vedeny keramickým labyrintem ven ze spalovací komory. Na schématu je za labyrintem umístěn přídatný hořák, umožňující spalování bioplynu.



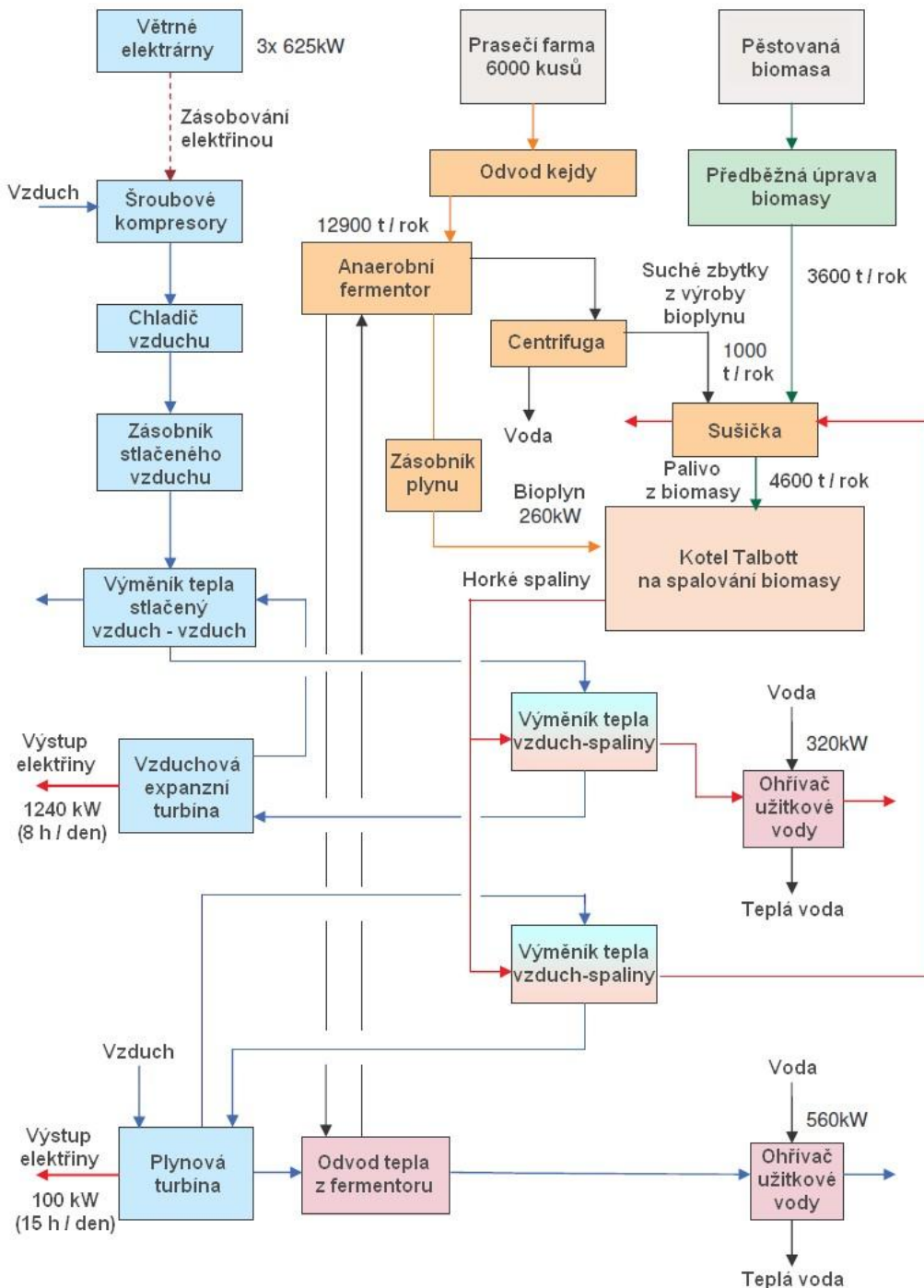
obr.11. Zařízení na spalování biomasy firmy Talbott [27]

Teplu spalin, které vychází ze spalovací jednotky, je ve výměnících tepla předáváno stlačenému vzduchu ze zásobníku. Stlačený a ohřátý vzduch je přiváděn na expanzní turbínu, kde se z něj redukcí jeho tlaku získává energie, kterou turbína předává elektrickému generátoru. Jako turbínu lze v tomto případě použít například radiální turbíny odvozené z turbodmychadel velkých dieselových motorů [25].

Hlavní výhodou použití biomasy v kombinaci s uchováním energie stlačením vzduchu je, že se tímto celý systém zbaví závislosti na fosilních palivech, konkrétně zemním plynu. Při dokonalém spalování biomasy v moderních zařízeních se navíc výrazně zmenšuje množství škodlivin, které při spalování vzniká.

3.1.5. Příklad zařízení kombinující uchování energie stlačením vzduchu se spalováním biomasy a bioplynu

Sestava zařízení kombinující akumulaci energie stlačením vzduchu se spalováním biomasy, může být realizována podle schématu na obr.12.



obr. 12. Schéma možného uspořádání zařízení pro akumulaci energie stlačením vzduchu v kombinaci se spalováním biomasy [27]

Na obr.12. je konkrétní možnost využití akumulace energie stlačením vzduchu. Jedná se o použití v kombinaci se zemědělskou výrobou. Jako vstup energie jsou zde větrné elektrárny, které zajišťují dodávku energie pro šroubové kompresory, bioplyn získaný z odpadů z chovu prasat a biomasa pěstovaná pro energetické účely.

Část tohoto zařízení, která pracuje se stlačeným vzduchem, zůstává z velké části i v tomto případě stejná. Stlačený vzduch je v tomto případě ohříván teplem vznikajícím v kotli na biomasu (výkon kotle Talbott je 2MW). Ohřátý stlačený vzduch odevzdává hlavní část své energie v expanzní turbíně, která pohání elektrický generátor, zbytek potom ve výměníku tepla přehřívá stlačený vzduch přicházející ze zásobníku. Tato část zařízení pracuje hlavně při špičkové spotřebě elektrické energie.

Druhým zařízením vyrábějícím elektrickou energii je modifikovaná plynová turbína. U této turbíny se teplo vznikající v kotli na biomasu opět využívá k ohřevu vzduchu vstupujícího do turbíny. Tepelná energie části vzduchu vystupujícího z turbíny se ještě využívá k ohřevu užitkové vody.

Další části se nepodílejí přímo na výrobě energie, ale slouží především k úpravě vstupních surovin do použitelné formy. Odpad z chovu prasat se zpracovává anaerobním fermentorem. Zde nejenže vzniká dále využitelný bioplyn, ale také dochází k likvidaci tohoto odpadu. Bioplyn je po úpravě použit jako přídatné palivo k biomase, případně jako palivo pro plynovou turbínu. Tuhé zbytky z fermentoru mohou být použity jako hnojivo, nebo z nich v centrifuze může být odstraněna voda a po následném vysušení je možné použít je jako palivo v kotli.

Biomasu, používanou jako hlavní palivo v kotli, je před spálením nutno upravit. Jednou z těchto úprav je její vysušení. K vysušení biomasy i zbytků z fermentoru se používají spaliny, které před tím předaly své teplo vzduchu vstupujícímu do plynové turbíny. Zbytkové teplo spalin, použitých pro ohřev stlačeného vzduchu, slouží k dalšímu ohřevu užitkové vody.

Tento systém je tak prakticky soběstačný. Energie, potřebná k jeho chodu, se získává v průběhu výroby elektřiny. Palivo pak tvoří hlavně rostliny pěstované k tomuto účelu nebo zbytky při pěstování klasických zemědělských plodin (necelé 4/5 celkového množství paliva). Zbytek pak jsou právě vysušené zbytky z výroby bioplynu.

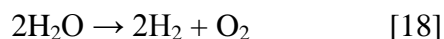
Tento systém se tak jeví zcela ideální pro zemědělce. Při podobně velkém chovu zemědělských zvířat a při možnosti získat rostlinnou výrobou dostatečné množství biomasy přináší toto zařízení značné výhody. Kromě možnosti prodeje elektrické energie a tedy přímého finančního zisku navíc dochází k ekologické likvidaci zbytků ze živočišné výroby, které může být také doplněné likvidací jiných druhů živočišných odpadů jiných subjektů, což přináší další finanční zisk. Zvláště pak pro zemědělce se tak objevuje možnost získání nových příjmů.

3.2. Uchování energie rozkladem vody elektrolýzou

Elektrolýza vody je jeden ze způsobů výroby vodíku. Vodík je přitom nositel energie, který by měl v blízké době nahradit fosilní paliva, především v dopravě. V souvislosti s tím se mluví o tzv. vodíkovém hospodářství, ve kterém by právě vodík hrál hlavní roli.

3.2.1. Výroba vodíku elektrolýzou vody

Elektrolýza je proces, při kterém stejnosměrný proud při průchodu vodným roztokem štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem. Lze ji popsat chemickou reakcí:



Energii k této reakci dodává stejnosměrný zdroj. Ke každému pólu zdroje se připojí elektroda a obě elektrody se ponoří do vodní lázně. Na elektrodě připojené k zápornému pólu

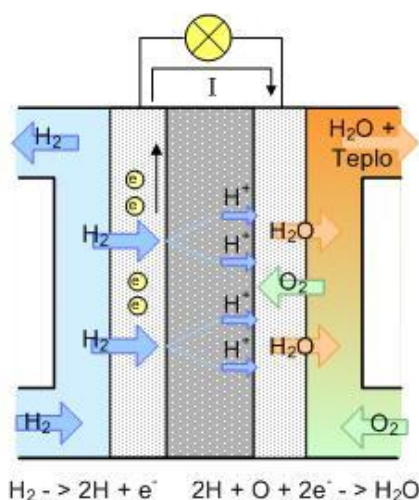
zdroje (katodě) se začne voda redukovat na vodík a hydroxylové ionty. Vodík stoupá z lázně ven, kde je jímán, a ionty se přesouvají k elektrodě připojené ke kladnému pólu zdroje (anodě), kde jsou vypuštěny kyslík a voda. Kyslík následně stoupá z lázně[19]. Schéma zařízení pro elektrolýzu vody je na obr.10.

Účinnost samotné elektrolýzy je poměrně vysoká (až 85%) a lze ji ještě zvýšit přidáním elektrolytu (solí, nebo kyselin), který zvýší vodivost vody (účinnost až 92%) [20]. Pokud se však k elektrolýze používá elektřina z klasických zdrojů, celková účinnost je značně nižší. Elektrolýza se tedy vyplácí hlavně v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie. U větrných elektráren je dále výhodou, že když jsou využívány k výrobě vodíku, odpadá problém s regulací přenosové soustavy.

3.2.2. Využití vodíku

Využití vodík získaný elektrolýzou lze mnoha způsoby. Díky jeho čistotě dosahované při jeho výrobě elektrolýzou může být použit i v chemickém průmyslu. V současné době se ale nejvíc mluví o jeho použití v kombinaci s palivovými články jako mobilní zdroj nejen v dopravě, ale i u přenosných zařízení jako jsou mobilní telefony, fotoaparáty, notebooky a podobně.

Vodíkový palivový článek je zařízení, které přímou cestou získává energii slučováním kyslíku a vodíku. Princip jeho funkce je obrácený procesu elektrolýzy. V palivovém článku se nachází dvě elektrody, na jejichž povrchu je slabá vrstva uhlíku obsahující malé množství platiny (sloužící jako katalyzátor). Elektrody jsou odděleny membránou, která propouští jen kladně nabité ionty. Na anodu je následně přiváděn vodík, kde dochází k jeho disociaci na kladné ionty (protony) a elektrony. Protony procházejí přes membránu k druhé elektrodě, ale elektrony nejsou membránou propuštěny a jsou nuceny procházet vnějším okruhem (vnějším okruhem začne procházet elektrický proud), kde konají práci. Na katodě se potom elektrony, vodíkové ionty, sloučí s atomy kyslíku za vzniku vody. Schéma palivového článku je na obr. 11. [20]



obr.14. Princip funkce palivového článku [20]

Z principu funkce palivového článku je zřejmé, že palivo (vodík) je v něm spotřebováváno pouze pokud je vnější okruh uzavřen, tedy pokud je k němu připojeno nějaké zařízení, čímž dochází k úspoře například oproti klasickým spalovacím motorům.

Díky přímé výrobě elektrické energie mají palivové články poměrně velkou účinnost. Účinnost palivových článků dosahuje v laboratorních podmínkách 60%, v praktickém užití se tato účinnost pohybuje v rozmezí 35% až 50%. Kombinace výroby vodíku elektrolýzou a využití vodíku v palivových článcích může teoreticky dosahovat účinnosti až 84,2% [22], v reálných podmínkách bude tato účinnost nižší.

Proces výroby vodíku elektrolýzou a jeho přeměna zpět na elektrickou energii se dá využít v jakémkoli měřítku. Vedle použití u mobilních zařízení lze stejného principu použít i u větších zařízení, například pro nouzové zásobování důležitých zařízení (nemocnic, apod.). Možné by bylo i použití tohoto principu u velkých zařízení pracujících s velkými výkony sloužících k regulaci rozvodné sítě. Tomu však zatím brání absence vhodného způsobu uskladnění vodíku a také cena palivových článků.

3.2.3. Konkrétní využití vodíku v současné době

V současné době se začíná vodík využívat především v dopravě, kdy se začínají objevovat například autobusy využívající k pohonu elektrickou energii z palivových článků v kombinaci se superkapacitami.

Návrhem vodíkového autobusu se zabývá například projekt, jehož koordinátorem je Ústav jaderného výzkumu Řež. Autobus kombinuje výrobu elektrické energie v palivových článcích s bateriemi a superkapacitami, ve kterých se uchovává energie z brzdění a spotřebovává se v případě zvýšené potřeby při rozjezdech. Zásoba vodíku pro palivové články je uchovávána ve čtyřech tlakových lahvích při tlaku 350 barů. Díky kombinaci se superkapacitami a chemickými akumulátory je možné použití palivových článků s menším výkonem, jelikož špičková potřeba energie je z části pokrývána právě z akumulátorů a superkapacitorů. Tento autobus by se měl v blízké době objevit ve zkušebním provozu [18].



obr.15. Vodíkový autobus na první pohled vypadá jako klasický autobus [18]

Využití vodíku, jako pohonu svých vozidel, už zkoušejí i někteří automobiloví výrobci. Příkladem může být první sériově vyráběný automobil s vodíkovým pohonem od automobilky Honda. Jde o model Honda FCX Clarity. Tento automobil využívá palivových článků s výkonem až 100kW. K pohonu se také využívá energie z brzdění, která je uchovávána v bateriích. Maximální rychlost tohoto automobilu je 160 km/h a jeho dojezd je 620 km.

Hlavní problém při používání vodíku jako paliva pro dopravní prostředky je jeho uskladnění. Vodík může být uchováván v tlakových lahvích o různých tlacích. Platí ovšem, že při nižších tlacích je zapotřebí větší objem tlakových nádrží, zatímco u větších tlaků vystačí pro stejné množství menší objem. Stlačování vodíku na vyšší tlaky je ale energeticky

náročnější, čímž rostou celkové náklady. Vodík lze také uchovávat v kapalném stavu (teplota -253°C), při tomto způsobu však vznikají poměrně velké ztráty.

U paliv pro dopravní prostředky se k popsání vlastností paliva používá parametr nazývaný hustota energie. Ta vyjadřuje množství energie, které můžeme z paliva získat, na jeho daný objem. Porovnání několika druhů paliv vzhledem k jejich hustotě energie je v tab. 2.

Palivo (20 °C) druh/skupenství	Hustota [kg/m ³]	Měrný Objem [l/kg]	M.O. vzt. k benzínu	Výhřevnost [MJ/kg]	Hustota Energie [MJ/l]	H.E. vzt. k benzínu
Vodík 1 bar	0.084	11939	8354.7	119	0.01	0.0003
Vodík 250 bar	17	58.8	41.15	119	2.024	0.065
Vodík 350 bar	22.2	45.2	31.6	119	2.64	0.085
Vodík 700 bar	39	25.9	18.14	119	4.6	0.15
Vodík kapalný (-253 °C)	71.08	14.1	9.85	119	8.46	0.27
Propan kapalný	498	2	1.4	46.3	23.08	0.74
Benzín kapalný	700	1.43	1	44.5	31.15	1

tab. 2. Porovnání hustoty energie vodíku, propanu a benzínu [20]

Z tab.2. jde vidět, že hustota energie vodíku je oproti benzínu menší. Pro získání stejného množství energie z vodíku je tedy potřeba jeho větší objem než u benzínu. Z toho vyplývá hlavní problém s využitím vodíku – problém s jeho skladováním. Tímto problémem se však v současné době zabývá mnoho výzkumů.

Nižší hustotu energie u vodíku ale částečně kompenzuje fakt, že palivové články v kombinaci s elektromotorem mají vyšší účinnost než spalovací motor. U vodíkového automobilu Honda FCX Clarity výrobce uvádí, že jeho hmotnost je o 180 kg menší, než u klasických automobilů, což by dále ovlivnilo porovnání vodíku s benzínovým motorem.

4. Závěr

Obnovitelné zdroje energie mají do budoucna určitě velký potenciál. S rozvojem světových ekonomik je stále větší poptávka po energiích. Oproti klasickým elektrárnám mají obnovitelné zdroje jednu velkou výhodu – palivo pro ně nikdy nedojde. Kromě biomasy navíc není energie dodávána palivem v klasickém slova smyslu, ale za vhodných podmínek je sama dodávána okolím.

Příkladem můžou být právě větrné elektrárny, které mění energii proudění vzduchu na elektrickou „zdarma“ – jediné náklady jsou na pořízení a údržbu. To je značná výhoda oproti klasickým zdrojům energie. Velké větrné elektrárny navíc mohou dosahovat značných špičkových výkonů a mohou tedy být poměrně velkým zdrojem energie. To však sebou nese jedno z jejich hlavních úskalí – přetížení rozvodné sítě při silných větrech a následně kolaps, tzv. blackout. V našich podmínkách není blackout možný kvůli malému instalovanému výkonu (v roce 2008 byl instalovaný výkon větrných elektráren u nás 145 MW) a také díky rovnoměrnému rozmístění větrných elektráren. To ovšem není případ Německa. Celkový instalovaný výkon větrných elektráren byl právě v Německu v minulém roce 24 000 MW [7]. Pokud nastanou takové povětrnostní podmínky, že větrné elektrárny na velkém území vyrábí elektřinu, objeví se v rozvodné síti velký zdroj energie, který může způsobit značné problémy. Příkladem může být situace, která právě v Německu nastala koncem minulého roku. Větrné elektrárny v té době vyráběly nadbytek elektrické energie, která pak proudila přes hranice až k nám.

Jednou z možností, jak předcházet podobným situacím, je právě akumulace energie. Systémy s uchováním energie stlačením vzduchu se jeví jako ideální pro použití právě v kombinaci s větrnými elektrárnami. Nejenže v případě přebytku elektřiny z větrných elektráren tuto energii spotřebovávají, ale odstraňují i další nevýhodu větrných elektráren, a to nestálost dodávek. Elektrárna využívající stlačený vzduch tak může zajišťovat pravidelnou dodávku energie nezávisle na počasí a v porovnání s klasickými tepelnými elektrárnami navíc s minimálním množstvím vypouštěných škodlivin. Tato zařízení by mohla v budoucnu doplňovat kapacity přečerpávacích elektráren při regulaci rozvodné soustavy.

Oproti tomu se využití elektrolýzy k výrobě vodíku předpokládá spíše jako lokální zásoba energie na odlehlých místech. Příkladem může být norský ostrov Utsira. Na tomto ostrově jsou instalovány větrné elektrárny s dostatečným výkonem pro pokrytí potřeby dvou set obyvatel ostrova. Zásobování elektřinou v době bezvětří tu dříve zajišťovaly naftové generátory. Nyní však je přebytečná energie z větrných elektráren využívána k výrobě vodíku elektrolýzou a vodík následně slouží jako zdroj energie v době bezvětří. Díky tomuto projektu se norský ostrov stal energeticky nezávislým [30].

V našich podmínkách by se vodík vyrobený energií z větrných elektráren, ale i jinak, mohl uplatnit spíše jako zdroj energie pro mobilní zařízení, jelikož uskladňování energie ve vodíku ve velkém měřítku by oproti jiným možnostem nebylo příliš ekonomické. Stále však chybí uspokojivý způsob skladování vodíku, který by umožnil jeho výhodný a bezpečný transport se zařízeními a zároveň by jeho výroba nebyla nákladná.

Všechny zmíněné technologie tak určitě do budoucna mají co nabídnout. Větrné elektrárny už nyní zažívají období velkého rozvoje, oproti tomu uchovávání energie kompresí vzduchu zatím v povědomí příliš není, ačkoli potřeba uchování energie určitě poroste. Rozvoj vodíkových technologií pak zřejmě brzdí stále vysoká cena palivových článků a stále poměrně levná a dostupná ropa. Větší rozvoj je tak zřejmě pouze otázkou času.

Použitá literatura:

- [1] RYCHTENÍK, Václav, PAVELKA, Jiří, JANOUŠEK, Josef. *Větrné motory a elektrárny*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1997. 199 s. ISBN 80-01-01563-7.
- [2] BP. BP Global [online]. 1999-2009 [cit. 2009-02-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.bp.com/statisticalreview>>.
- [3] Alternativní zdroje energie [online]. 2007 [cit. 2009-02-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.alternativni-zdroje.cz/>>.
- [4] Czech RE Agency. Czech RE Agency [online]. 2003-2007 [cit. 2009-02-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.czrea.org/>>.
- [5] Větrná elektrárna Pchery [online]. 2007 [cit. 2009-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.vtepchery.cz/>>.
- [6] KOČ, Břetislav. Z historie větrných elektráren. Elektro [online]. 2005, č. 12 [cit. 2009-02-28], s. 34. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26559>.
- [7] Česká společnost pro větrnou energii [online]. 2007- [cit. 2009-02-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.csve.cz/>>.
- [8] Soluciones Energéticas S.A. : SOLÉNER [online]. 2003 [cit. 2009-02-28]. Dostupný z WWW: <http://www.solener.com/novedad_d.html>.
- [9] EkoWATT : obnovitelné zdroje energie [online]. 2007 [cit. 2009-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-vetru>>.
- [10] CHUA, Kah Liang. Darrieus wind turbine analysis [online]. 2002 [cit. 2009-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.windturbine-analysis.netfirms.com/>>.
- [11] ROBINSON, M. L. THE DARRIEUS WIND TURBINE FOR ELECTRICAL POWER GENERATION. In Aeronautical Journal. [s.l.] : [s.n.], 1981. s. 244-255. Dostupný z WWW: <<http://dSPACE.dsto.defence.gov.au/dSPACE/bitstream/1947/8795/1/WSRL-0255-EX%20PR.pdf>>.
- [12] Small VAWT project [online]. 2009 [cit. 2009-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.hobbithole.net/Default.aspx?tabid=453>>.
- [13] JIŘÍČEK, I., RÁBL, V. Zdroje energie : Větrná energie. [s.l.] : [s.n.], 2005. Dostupný z WWW: <http://www.vscht.cz/ktt/zdrene/3.0_V%ectrn%e1_energie.pdf>. s. 1-22.
- [14] New Zealand Geothermal Association [online]. 2005- [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.nzgeothermal.org.nz/>>.

- [15] Větrné elektrárny Taawin [online]. 2005- [cit. 2009-03-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.taawin.cz/>>.
- [16] Electricity storage association [online]. 2003 [cit. 2009-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.electricitystorage.org/>>.
- [17] Ridge Energy Storage & Grid Services L.P.. The Economic Impact of CAES on Wind in TX, OK, and NM. [online], 2005. Dostupný z WWW: <http://www.seco.cpa.state.tx.us/zzz_re/re_wind_projects-compressed2005.pdf>.
- [18] Vodíkový autobus s palivovými články : vodík, palivo budoucnosti [online]. 2008 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.h2bus.cz/>>.
- [19] Získávání vodíku z obnovitelných zdrojů. In Energie z biomasy V. Brno : [s.n.], 2006. s. 37-42. Dostupný z WWW: <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_v/papers/08-Brandejska.pdf>. ISBN 80-214-3310-8.
- [20] Česká vodíková technologická platforma [online]. 2006 [cit. 2009-04-13]. Dostupný z WWW: <<http://hytep.cz/>>.
- [21] Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku. Technet.cz [online]. 2008 [cit. 2009-04-13]. Dostupný z WWW: <http://technet.idnes.cz/jak-se-vyrabi-palivo-budoucnosti-vodik-pro-auta-i-elektroniku-p6d-tec_technika.asp?c=A080127_234744_tec_technika_vse>.
- [22] GREGOR, Jan, RADIL, Lukáš, UHER, Jiří. Nové možnosti akumulace velkých objemů elektrické energie. [s.l.] : [s.n.], 2008. 5 s. Dostupný z WWW: <http://www.k-report.net/discus/messages/28/61_2008-146922.pdf>.
- [23] DENHOLM, Paul. Improving the technical, environmental and social performance of wind energy systems using biomass-based energy storage. Renewable Energy. 2006, vol. 31, no. 9, s. 1355-1370. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4S-4GY870M-1&_user=640830&_coverDate=07%2F31%2F2006&_alid=904913380&_rdoc=42&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5766&_sort=d&_docanchor=&view=c&_ct=73&_acct=C000032308&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640830&md5=c9ba344cde4b05c32438b9da560e01f9>.
- [24] ČEPS, a.s. [online]. 2009 [cit. 2009-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.ceps.cz/>>.
- [25] LUŤCHA, Josef. Stlačený vzduch v kaverně – zásobník elektrické energie. [s.l.] : [s.n.], 2009. 33 s.
- [26] MOTLÍK, Jan. Obnovitelné zdroje energie : a možnosti jejich uplatnění v České republice. [s.l.] : [s.n.], 2007. 186 s. Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vzdelavani/publikace/10.html>>.
- [27] Blackstone Global Ventures. INDIRECTLY FIRED GAS TURBINES WITH BIODIGESTER, WIND ENERGY STORAGE AND BIOMASS INCINERATION IN RENEWABLE ENERGY COGENERATION SYSTEM. [s.l.] : [s.n.], [200-]. 36 s.

- [28] HORČÍK, Jan. Honda ohlašuje vodíkový model FCX Clarity v Japonsku. Hybrid.cz [online]. 2008 [cit. 2009-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.hybrid.cz/novinky/honda-ohlasuje-vodikovy-model-fcx-clarity-v-japonsku>>.
- [29] Honda FCX Clarity : Hydrogen Fuel Cell Vehicle [online]. 2009 [cit. 2009-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/>>.
- [30] Norsko bude skladovat vítr. 21. století. 2008, č. 9, s. 62.
- [31] Via Rustica [online]. 2007 [cit. 2009-05-11]. Dostupný z WWW: <http://www.profesni-vzdelavani.viarustica.cz/moduly_vyuky_detail.php?modul=47&kapitola=4>.