



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce**

Bakalářská práce

Malá větrná elektrárna feasibility study

Lenka Šterberová

Elektrotechnika, energetika a management

Květen 2018

Vedoucí práce: Ing. Karhan Marek

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šterberová** Jméno: **Lenka** Osobní číslo: **405364**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Malá větrná elektrárna feasibility study

Název bakalářské práce anglicky:

Small Wind Power Plant Feasibility Study

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište princip fungování větrné elektrárny
- 2) Popište současný stav větrných elektráren
- 3) Ekonomické zhodnocení využití malé větrné elektrárny

Seznam doporučené literatury:

- [1] CROME, Horst. Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení. Ostrava: HEL, 2002, ISBN 80-86167-19-4.
[2] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. Větrné motory a elektrárny: svépomocná stavba větrných zařízení. Praha: České vysoké učení technické, 1997, ISBN 80-01-01563-7.
[3] HALLENGA, Uwe. Malá větrná elektrárna: stavební návod s konstrukčními výkresy. 2., přeprac. a rozš. vyd. Ostrava: HEL, 2006, ISBN 80-86167-27-5.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Marek Karhan, ČEZ, a. s.

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Marek Karhan
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studentky

Poděkování / Prohlášení

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Markovi Karhanovi za profesionální rady, návrhy úprav a připomínky, a také za to, že mi umožnil navštívit a prohlédnout si větrnou elektrárnu ve Věžnici, což mi pomohlo lépe pochopit princip této elektrárny. Dále bych ráda poděkovala rodině za podporu při studiu.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 15. 05. 2018

.....

Abstrakt / Abstract

Cílem této bakalářské práce je co nejkomplexněji analyzovat malou větrnou elektrárnu. Nejprve se práce zaměřuje na popis výroby elektrické energie a současné možnosti jejího využití. Dalším bodem je detailní popis malé větrné elektrárny včetně různých variant provedení jejích jednotlivých součástí. Dále se práce zabývá řízením výkonu a také údržbou a bezpečností provozu. Závěrečná část se věnuje ekonomickému zhodnocení výstavby větrné elektrárny a době návratnosti.

Klíčová slova: malá větrná elektrárna; základy; stožár; gondola; rotor; výkon malé větrné elektrárny; Weibullovo rozdělení; návratnost malé větrné elektrárny.

The aim of this bachelor thesis is to provide a complex analysis of a small wind power plant. First of all, it describes the generation of the electricity along with all the current possibilities of its use. Another essential part is the description of the wind power plant design. Next part deals with the control of performance and also with the maintenance and safety. Last part is aimed at the economic evaluation of the wind power plant construction and the return of investments.

Keywords: small wind power plant; foundations; tower; nacelle; rotor; performance of a small wind turbine; Weibull distribution; return of investments.

Title translation: Small Wind Power Plant Feasibility Study

Obsah /

Úvod	1	Literatura	35
1 Definice a princip malé větrné elektrárny	2	Seznam zkratk	38
1.1 Princip větrné elektrárny	3		
2 Výkon a vyrobená energie	4		
2.1 Stanoviště a vliv na výkon	5		
2.2 Využití vyrobené energie	9		
2.2.1 Autonomní systémy	9		
2.2.2 Mikrozdroj – bez přetoků do sítě	10		
2.2.3 Výrobna pro vlastní spotřebu – s možnými přetoky do sítě	10		
2.2.4 Dodávání energie do sítě .	11		
2.2.5 Legislativa	11		
3 Schéma větrné elektrárny	13		
3.1 Základy	13		
3.2 Tubus	14		
3.3 Gondola	16		
3.4 Rotor	17		
3.4.1 Odporové rotory	17		
3.4.2 Vztlakové rotory	18		
4 Zajištění a řízení výkonu	20		
4.1 Natáčení na vítr	20		
4.2 Řízení výkonu	21		
4.3 Dálkové řízení a přenos dat ...	22		
5 Údržba a bezpečnost	24		
5.1 Bezpečnost	24		
6 Ekonomické zhodnocení	26		
6.1 Náklady	26		
6.2 Průměrné roční výnosy	26		
7 Modelový výpočet návratnosti ...	28		
7.1 Náklady	28		
7.2 Vyrobená energie	29		
7.3 Doba návratnosti	30		
7.3.1 Doba návratnosti ■ varianta A	30		
7.3.2 Doba návratnosti ■ varianta B	32		
Závěr	34		

Tabulky / Obrázky

2.1. Tabulka exponentů podle drsnosti povrchu.8	2.1. Ukázka výkonové křivky5
7.1. Tabulka Weibullova četnostního rozdělení rychlostí a vyrobené energie. 29	2.2. Větrná mapa ČR ve výšce 10 m nad zemským povrchem6
7.2. Tabulka nákladů..... 30	2.3. Ukázka grafu četnostního rozdělení rychlostí větru7
7.3. Tabulka spotřeby. 31	3.1. Schéma větrné elektrárny 13
7.4. Tabulka trvalé spotřeby. 31	3.2. Příhradová konstrukce a trubkový stožár 15
7.5. Spotřeba bojleru, topení a klimatizace..... 32	3.3. Rotor typu Savonius 18
	3.4. Nejběžnější třílistá vrtule a větrné kolo..... 19
	3.5. Rotory typu Darrieus 19
	4.1. Znázornění úhlu náběhu 21

Úvod

Zatímco ve světě podle Evropské asociace větrné energetiky [1] podíl elektrické energie vyráběné větrnými elektrárnami průběžně narůstá, například v sousedním Německu byl mezi roky 2016 a 2017 meziroční přírůstek instalovaného výkonu větrných elektráren asi 6 GW, v České republice tento trend neplatí, náš přírůstek byl pouze 26 MW. Tomu také odpovídá energetický mix republiky, kde větrná energie ve výrobě zastupuje pouze 1,9%. Ani malé větrné elektrárny netvoří výjimku, v ČR nejsou příliš k vidění a ani běžně na trhu.

Využití energie větru je však v mnoha ohledech velmi přínosné. Stejně jako ostatní obnovitelné zdroje energie je i vítr nevyčerpatelným a šetrným zdrojem k životnímu prostředí. Získávání elektrické energie z větru je navíc poměrně jednoduché a efektivní. Také z ekologického hlediska je větrná elektrárna (VtE) velmi výhodná. Nejen, že neprodukuje žádné emise zhoršující stav naší atmosféry a přispívající ke skleníkovému efektu, ale také se po skončení její životnosti dá většina součástí znovu použít nebo poměrně snadno recyklovat. Další výhodou je podle Karla Srdečného [2, s. 9] relativní rychlost výstavby, kdy například oproti i více než desetiletým stavebním procesům tepelných elektráren na uhlí nebo plyn, VtE lze po projektové přípravě a schvalovacím řízení vystavět už za několik týdnů až měsíců.

Naopak nevýhodou větrných elektráren je nestálost větru a jeho rychlosti, na větrnou elektrárnu se tedy jako na jediný zdroj energie spíše nedá spolehnout. Dalším minusem je bezpochyby zásah VtE do krajinného rázu, i ty nejmenší o výšce třeba pouze 10 m nelze přehlédnout a řada lidí se z tohoto důvodu staví proti nim. Pořízení VtE rovněž komplikuje vysoká počáteční investice stoupající s jmenovitým výkonem, což ale pravděpodobně platí pro všechny elektrárny.

Cílem této bakalářské práce je celková analýza malých VtE, konkrétně z pohledu jejich fungování a provozu, možností konstrukcí a také samozřejmě z ekonomického hlediska.

Kapitola 1

Definice a princip malé větrné elektrárny

Větrná elektrárna je zařízení, které mění kinetickou energii větru na energii elektrickou. Dělení větrných elektráren podle výkonů není nikde jednoznačně definováno a v různých zdrojích se můžeme setkat s různým rozdělením zařízení na malá, střední a velká. Horst Crome [3, s. 27] například uvádí, že malé větrné elektrárny jsou ty, jejichž instalovaný výkon je menší než 1 kW, naproti tomu Pavel Grozman [4] považuje za hranici malého zařízení 60 kW výkonu. Osobně jsem přesvědčena, že danou hranicí omezující definici malé VtE zdola je 2,5 kW a shora 100 kW. Tato práce se tedy bude nadále zaměřovat na malé větrné elektrárny vyrábějící energii právě v rozmezí 2,5–100 kW. Hranice 2,5 kW odděluje malé zdroje od mikro zdrojů využívaných pro napájení domácích spotřebičů – například ledniček, osvětlení, televizních a radiových přijímačů. Průměr rotoru těchto nejmenších elektráren bývá 0,5–3 m. Malé větrné elektrárny s průměrem 3–8 m a výkonem 2,5–10 kW obvykle slouží hlavně pro vytápění domů či ohřev vody. Větší zdroje asi do 20 kW už se využívají pro přímé zásobování domácností elektrickou energií. Elektrárny s výkonem do 100 kW a průměrem rotoru až 25 m jsou už schopny energií zásobovat větší stavby, třeba farmy či až 15 domácností.

Nejmenší malé elektrárny mívají obvykle větší počet listů rotoru, aby byly schopné využít co největší potenciál procházejícího větru a také kvůli tiššímu provozu. Větší malé elektrárny nad 10 kW už mají obdobnou konstrukci jako velké elektrárny, tedy rotor se třemi listy a gondolou umístěnou na stožáru, jehož výška podle webu Změnaklimatu [5] obvykle nepřesahuje 20 m. Méně početné jsou speciální konstrukce elektráren s rotory s vertikální osou otáčení – např. rotory typu Savonius či Darrieus, které budou rozebrány dále.

Výhodou malých elektráren oproti velkým je, že je lze použít i tam, kde větrné podmínky nejsou až tak příznivé, aby se vyplatila konstrukce mnohem dražšího velkého zařízení. Lokalita samozřejmě musí mít dobré větrné podmínky, avšak u malých VtE stačí k běhu i nižší rychlosti větru, než je zapotřebí k fungování velkých VtE. Na rozdíl od těch velkých tedy malé zdroje nevyžadují nákladné vykupování rozlehlých nezastavěných pozemků, nýbrž mohou být instalovány i na vlastním pozemku poblíž obydlí, pokud zde jsou příznivé větrné podmínky a zástavba to dovoluje. Oblasti, kde je lze instalovat jsou tedy početnější. Velkou výhodou je využití malých větrných elektráren v autonomním systému, tedy bez připojení k síti, na odlehlých místech, kde dodávka elektrické energie ze sítě není možná (například v horách mimo dosah rozvodné sítě). Dají se tedy použít například k zásobování odlehlých farem, letních domů či horských chat elektrickou energií. Vzhledem k menším rozměrům rotorů také malé VtE obvykle způsobují výrazně menší hluk, i když to není tak docela pravidlem, záleží na rychloběžnosti turbíny.

1.1 Princip větrné elektrárny

Základním předpokladem fungování větrné elektrárny je, jak už její název napovídá, vítr, který je důsledkem působení energie Slunce na Zemi. Vítr vzniká v atmosféře rozdílem atmosférických tlaků zapříčiněných nerovnoměrným ohříváním zemského povrchu, a to včetně moří a oceánů. Síla a rychlost větru je rovněž ovlivněna vertikálními pohyby vzduchu při jeho lokálním zahřívání či ochlazování, a také Coriolisovou silou (vlivem zemské rotace).

Zjednodušeně vypadá generování energie větrnou elektrárnou asi takto: proudění větru kolem listu rotoru turbíny vyvozuje na jeho povrchu vztlakovou sílu, která roztáčí rotor turbíny. Vzduchu proudícímu pracovní plochou turbíny je odebrána část energie a je proto zpomalen. Kinetická energie větru je tedy převedena na mechanickou rotační energii rotoru turbíny. Ten je mechanicky spojen s hřídelí, na jejímž opačném konci je instalován generátor, který tuto mechanickou energii převádí na energii elektrickou, která je z generátoru vyváděna k uživateli.

Kapitola 2

Výkon a vyrobená energie

Objem elektrické energie v kWh, který je malá VtE schopna ročně vyrobit, bývá zásadním činitelem při rozhodování o investování do tohoto zařízení. Je ale dán mnoha faktory a nelze jej předem přesně určit. Co se výkonnosti větrné elektrárny týče, výrobci často udávají hodnotu jmenovitého výkonu, která odpovídá výrobě energie při ideálních podmínkách (při konstantním větru o rychlosti, jejíž jmenovitou hodnotu výrobci také udávají) a také užitečnější teoretickou výkonovou křivku.

Větrná elektrárna je schopna využít pouze část kinetické energie větru, která prochází listy jejího rotoru. Pro kinetickou energii E_k větru v joulech [J] platí známý vzorec

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot u^2 \quad (1)$$

kde m je hmotnost prošlého vzduchu, ρ je jeho hustota a V objem, u je rychlost pohybu vzduchu (tedy rychlost větru). Teoretický výkon P_t větrné turbíny udávaný ve wattech [$W = J \cdot s^{-1}$] se spočítá jako podíl energie a času t .

$$P_t = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot V \cdot u^2}{t} \quad (2)$$

Tento vzorec budeme dále upravovat. Objem V větru prošlého listy rotoru za určitý čas získáme vynásobením plochy opisované těmito listy (S) dráhou (s) uraženou větrem za tento čas, která se určí jako součin rychlosti větru (u) a daného času (t).

$$V = S \cdot s = S \cdot u \cdot t \quad (3)$$

Dosazením vyjádření objemu (3) do vzorce pro výkon (2) získáme výsledný vzorec pro teoretický výkon.

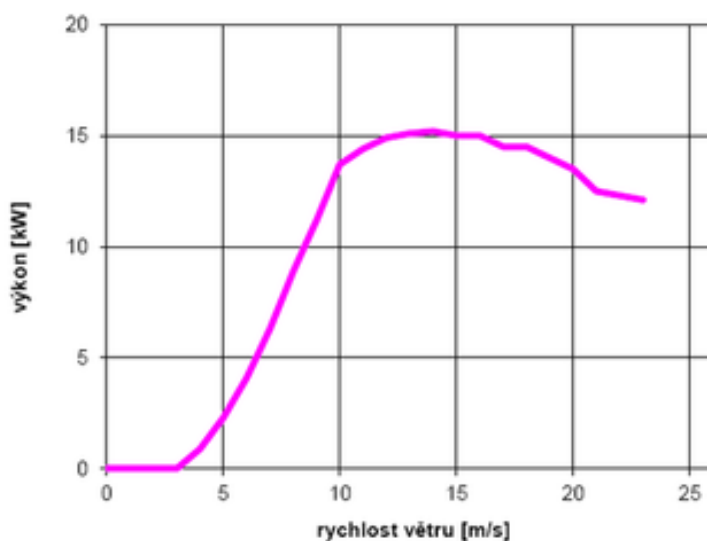
$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot u \cdot t}{t} \cdot u^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot u^3 \quad (4)$$

kde S je tedy plocha opisovaná listy rotoru (nejčastěji mezikruží, případně kruh). Vidíme, že výkon turbíny roste se třetí mocninou rychlosti větru a také, že je tím větší, čím větší je plocha rotoru. Vypočítaný výkon by bylo možno dosáhnout, pouze pokud by elektrárna pracovala se stoprocentní účinností, což však není reálné. Proto musíme pro získání jmenovitého výkonu takto získaný výsledek ještě vynásobit součinitelem výkonu c_p , který vyjadřuje celkovou účinnost přeměny kinetické energie na elektrickou energii a obvykle bývá menší než 0,5, což uvádí David Hanslian [6].

$$P = c_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot u^3 \quad (5)$$

Hodnota jmenovitého výkonu udávaná výrobcem se obvykle vztahuje k vyšším rychlostem větru, které se v dané lokalitě vyskytují jen zřídkakdy. Jmenovitého výkonu bývá tedy dosaženo jen někdy.

Co je však pro výpočet vyrobené energie důležitější je znalost výkonová křivka dané elektrárny – příklad je na obrázku 2.1. Tato křivka je definována jako závislost okamžitého výkonu na okamžité rychlosti větru. Můžeme v ní tedy nalézt, kolik kilowatt výkonu nám elektrárna při určité rychlosti větru vyrobí. Z grafu můžeme například vidět, že dané větrné zařízení při rychlosti $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bude vyrábět 15 kW výkonu. Podle D. Hansliana [6] běžné malé VtE najíždí již při rychlostech $2,5\text{--}4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a výkon s rostoucí rychlostí větru roste až k dosažení jmenovité hodnoty, kde u větších elektráren s možností natáčení listů zůstává konstantní, u menších elektráren s pevně nastavenými listy případně i trochu klesá. Výkonová křivka končí při rychlostech v rozmezí $20\text{--}25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, nad kterými by provoz elektrárny mohl vést k jejímu poškození. VtE tedy musí být nad těmito rychlostmi odstavena. Děje se tak aerodynamickým, či u velmi malých větrníků mechanickým zastavením rotoru.



Obrázek 2.1. Ukázka výkonové křivky malé VtE dostupné v článku D. Hansliana [6].

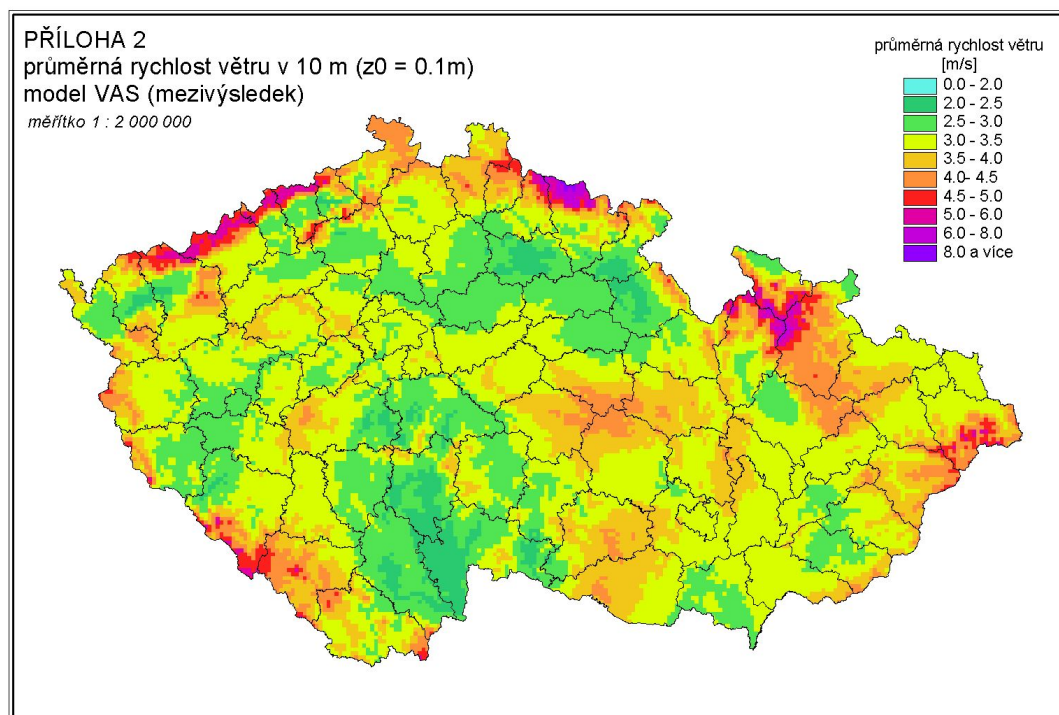
Při malých rychlostech větru tedy turbíny jmenovitého výkonu nedosahují. Jejich okamžitý výkon je dán jejich konstrukcí, aerodynamickou efektivitou rotoru a rychlostí vanoucího větru. Proto je pro výslednou energetickou výtěžnost podstatný nejen jmenovitý výkon generátoru, ale i průměr rotoru, aerodynamická účinnost rotorových listů a výška osy otáčení rotoru nad zemí, která má základní význam pro omezení turbulencí vzniklých orografií daného terénu i pro laminaritu proudění vanoucího větru.

2.1 Stanoviště a vliv na výkon

Pro dosažení co nejlepšího výkonu malé VtE je zásadní volba optimálního stanoviště s co nejlepšími větrnými podmínkami. Ty jsou podle D. Hansliana [6] dány na jedné straně obecnými větrnými poměry dané lokality a na druhé straně dalšími lokálními vlivy v konkrétním umístění.

Nejdůležitějším faktorem majícím vliv na okamžitý výkon je rychlost větru, neboť výkon stoupá s třetí mocninou této rychlosti, jak již bylo uvedeno. Při výběru lokality

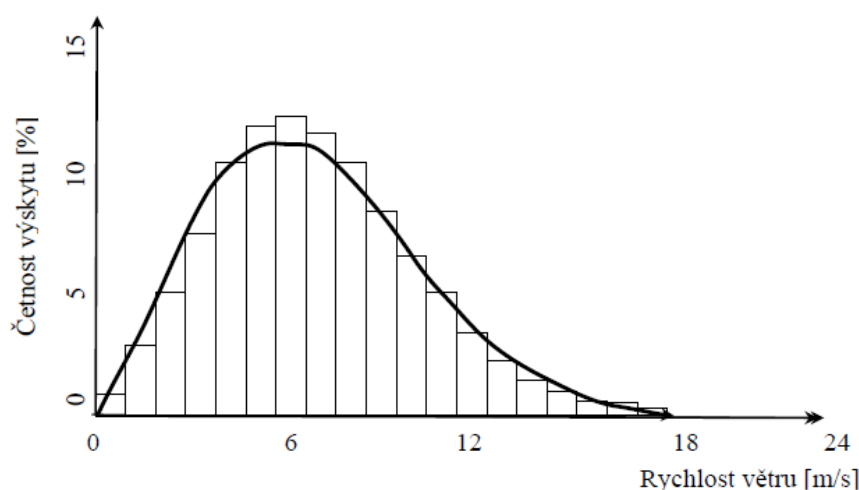
tedy může být základem větrná mapa získaná měřením během jednoho roku, která udává průměrné rychlosti větru v určité výšce nad povrchem – viz obrázek 2.2. Díky ní můžeme zvolit oblast s co nejlepší rychlostí větru. O rychlosti větru v dané oblasti nám na počátku plánování může napovědět i vegetace, zejména stromy a keře, které se vlivem dlouhodobého působení větru deformují. Nejpřesnější údaje však získáme měřením v konkrétní zamýšlené oblasti – a to měřením rychlosti, převažujícího směru větru, turbulencí, stříhu větru a teploty (kvůli potenciální námraze rotoru, při které by se měl zastavit). Podle skript Václava Rychetníka, Jiřího Pavelky a Josefa Janouška [7, s. 55] se využívání větrné energie vyplácí v oblastech s průměrnou rychlostí větru asi od $4,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a více. Z mapy je patrné, že typická průměrná rychlost na území ČR ve výšce 10 m nad povrchem je $3\text{--}3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ vyskytující se v nižších otevřených polohách. Je tedy patrné, že velká část našeho území není pro umístění malé VtE příliš vhodná, zejména pro ty o výšce menší nebo rovné 10 m. Dále můžeme vidět, že ve vyšších polohách, především v pohořích, bývá průměrná rychlost vyšší. Na horských hřebenech, kde proudění větru nebrání žádné okolní překážky a napomáhá nadmořská výška, je rychlost logicky nejvyšší. Ačkoliv by zde tedy zřejmě byly příznivé větrné podmínky pro stavbu malé VtE, nebude pravděpodobně možné získat povolení ke stavbě, a to jak z estetických důvodů (zachování krajinného rázu), tak z důvodu ochrany životního prostředí. Mnoho českých pohoří je součástí národních parků nebo alespoň chráněných krajinných oblastí, jsou tedy zákonem chráněna proti lidským zásahům, mezi které stavba elektrárny jistě spadá.



Obrázek 2.2. Větrná mapa ČR ve výšce 10 m nad zemským povrchem dostupná ze stránek Ústavu fyziky atmosféry [8].

Při volbě vhodné lokality pro malou VtE budou nápomocny větrné mapy ČR, které na svých stránkách uveřejňuje například Ústav fyziky atmosféry [9]. V těchto mapách lze získat při zadání souřadnic uvažovaného místa kromě průměrné rychlosti a směru větru ve výšce 10 nebo 100 m nad zemským povrchem i tabulku hodnot četnostního rozdělení rychlostí a její graf – viz obrázek 2.3. Tento sloupcový graf každé rychlosti větru přiřazuje údaj o době trvání dané rychlosti větru v průběhu doby měření. Získané informace budou klíčovým vodítkem při volbě místa pro stavbu a pomohou i při výběru vhodného typu větrné elektrárny. Nemá například význam pořizovat zařízení, které dosahuje jmenovitého výkonu při rychlosti větru $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ v oblasti, kde je nulová pravděpodobnost výskytu této rychlosti, naopak se vyplatí zvolit takové zařízení, jehož jmenovitá rychlost se co nejvíce blíží nejčastější rychlosti větru v dané oblasti. V našich podmínkách to však s malými VtE není tak docela možné, neboť většina malých elektráren jmenovitého, a tedy nejlepšího, výkonu dosahuje právě při rychlosti kolem $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, která však v běžných nadmořských výškách nebývá nejčastější.

Graf četnostního rozdělení je rovněž nepostradatelný pro předběžný výpočet vyrobené energie, a to za použití dříve zmíněné výkonové křivky zvolené VtE a vhodného softwaru pro výpočet energetické výtěžnosti. Často používané softwary jsou například WindPRO nebo Wind Farmer. Pomocí naměřených větrných dat, výkonové křivky a tohoto softwaru můžeme poměrně přesně vypočítat vyrobenou energii za předemné časové období.



Obrázek 2.3. Ukázka grafu četnostního rozdělení rychlostí větru ze skript Zbyszka Szeligy [10].

Na objem vyrobené energie má navíc velký vliv volba výšky osy otáčení rotoru – prostřednictvím stožáru elektrárny, ale také struktura povrchu krajiny. Obecně platí, že v malých výškách je rychlost větru nižší než ve výškách velkých, pro které se obvykle konstruuji velké větrné elektrárny. Jen pro zajímavost, zatímco v roce 2010 byla výška věže velké VtE 80–100 m, v roce 2015 už to bylo 120–140 m a pro rok 2018 se připravují stavby věží o výšce 130–160 m s rotory o průměru 150 m. S rostoucí výškou nad zemským povrchem úměrně stoupá rychlost větru. Je to způsobeno tím, že proudění

vzduchu sice vzniká v celém objemu atmosféry, avšak v blízkosti zemského povrchu je intenzivně brzděno třením o tento povrch. V oblastech, kde je terén rovný bez vyšších překážek ovlivňuje rychlost větru pouze drsnost zemského povrchu. Pro výpočet rychlosti v určité výšce se podle V. Rychetníka, J. Pavelky a J. Janouška [7, s. 21-22] používá vzorec

$$v^* = \left(\frac{h}{h_{10}} \right)^n \cdot v_{h_{10}}^* \quad (6)$$

kde v^* je průměrná rychlost větru ve výšce h nad terénem, kterou chceme zjistit, $v_{h_{10}}^*$ je průměrná rychlost větru v referenční výšce, kterou můžeme zjistit ze zmíněné větrné mapy a za h_{10} potom dosadíme referenční výšku 10 m. Výška nad terénem není to samé jako výška nad zemským povrchem jako takovým. Za terén se považuje pomyslná hladina nulové rychlosti, pod kterou už je rychlost větru zanedbatelná. Pokud je tedy povrch země pokryt souvislou vegetací o určité výšce, neshoduje se tato hranice nulové rychlosti se zemským povrchem – v případě zemědělských kultur, kde porost přesahuje 3 m, se za výšku terénu považuje právě výška porostu, v případě hustého lesa je výškou terénu $0,75 \cdot h_v$, kde h_v je výška lesního porostu. Rozhodneme-li se například do lesního porostu o výšce 4 m umístit elektrárnu se stožárem výšky 15 m, musíme pro výpočet rychlosti větru v místě rotoru do vzorce dosadit za h 12 m ($0,75 \cdot 4m = 3m$ – hladina nulové rychlosti; $15m - 3m = 12m$). Hodnota exponentu n závisí na povrchu a můžeme ji najít v tabulce 2.1, převzaté ze skript V. Rychetníka, J. Pavelky a J. Janouška [7, s. 21-22]. Můžeme vidět, že nad hladkým povrchem rychlost větru sice s výškou roste, ale mnohem pomaleji než nad velmi drsným povrchem například vesnice, kde je v nízkých polohách vítr drsností intenzivně brzděn a ve vysokých polohách, kde ho nic nebrzdí, je tedy v porovnání s nízkou polohou mnohem silnější a rychlost roste prudce.

druh povrchu	n
hladký povrch – vodní hladina, písek	0,14
louka s nízkým travnatým porostem nebo oranice	0,16
vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
porosty vysokých kulturních plodin, nízké lesní	0,21
lesy s mnoha stromy	0,28
vesnice, malá města	0,48

Tabulka 2.1. Hodnoty exponentů podle drsnosti povrchu.

Důležitým faktorem ovlivňujícím větrné podmínky na lokální úrovni jsou různé překážky, jako například budovy či osamocené stromy, které mají na proudění větru negativní účinek. Za těmito překážkami může docházet k významnému snížení rychlosti větru (až o 40%) či ke změně jeho směru, nebo také ke vzniku turbulencí a škodlivých vírů, a k souvisejícímu poklesu výkonu elektrárny, což je samozřejmě nežádoucí. H. Crome [3, s. 35] uvádí, že by měl stožár stát buď daleko od překážky, alespoň ve vzdálenosti dvacetinásobku výšky překážky (budovy, skupiny stromů atd.) nebo by měl být postaven těsně vedle budovy, ale tak, aby vyčníval ze zóny vírů – vzdálenost mezi

vrcholem překážky a spodní hranou rotoru musí být rovna alespoň $\frac{1}{3}$ nejdelší vodorovné úhlopříčky překážky.

Z předchozího textu vyplývá, že je tedy obecně vhodné malou VtE umístit v otevřeném prostranství na vyvýšené místo a co nejdále od překážek, případně vysoko nad ně. Výšku nad zemí je nejlepší volit co největší, neboť výkon roste s třetí mocninou rychlosti větru a rychlost větru zase roste s výškou nad povrchem, ale tak aby to bylo z ekonomického a také z praktického hlediska (údržba, revize) reálné. Ve skutečnosti je však takové umístění často nemožné, neboť elektrárnu chceme konstruovat někde na vlastním pozemku, kde se musíme smířit s již existující zástavbou a překážkami okolní krajiny. Proto je pro co nejlepší využití potenciálu dané lokality nutné umístění malé VtE tak, aby nebyla za překážkou v převládajícím směru větru. Příklad uvádí H. Crome [3, s. 35] – vane-li vítr jen výjimečně od jihovýchodu, tak umístěním elektrárny severozápadně od budovy zajistíme nejnižší ztráty. Převažující směry větru je možno nejlépe zjistit alespoň ročním měřením větru v dané lokalitě, ale informativně je to možné ověřit například na již zmíněných stránkách Ústavu fyziky atmosféry [9], které nabízí větrné růžice mnoha lokalit.

2.2 Využití vyrobené energie

Z principu fungování VtE je zřejmé, že není vždy schopna dodávat energii úplně nepřetržitě – když nefouká vítr, rotor se netočí, když fouká příliš, rotor se nesmí točit. Tomu musí být přizpůsobeno využívání energie, a tedy i způsob zapojení elektrárny. V současnosti jsou možné následující varianty.

2.2.1 Autonomní systémy

Podle webu Zmenaklimatu [5] je možné malou VtE provozovat *zcela bez připojení k síti*, což je výhodné zejména na odlehlých místech, která nejsou v dosahu rozvodné elektrické sítě, nebo by jejich připojení bylo příliš nákladné. V takovém autonomním systému obnovitelné zdroje (VtE – neefektivnější od podzimu do jara, kdy nejvíce fouká, naopak fotovoltaika – vyrábí v opačné polovině roku, kdy méně fouká, zato více svítí slunce) obvykle doplňují diesellový generátor v samostatně pracující místní elektrické síti. Ne-spotřebovaná elektrická energie se usměrní a uloží v akumulátorech, z nichž je možno napájet buď nízkonapěťové spotřebiče přímo (jako elektrická osvětlení, radiopřijímače aj.) nebo ostatní přes střídač (např. pračka, lednička, počítač) v bezvětrných obdobích, a tím šetřit palivo generátoru. Akumulátory se obvykle dimenzují podle odhadnuté denní spotřeby všech elektrických zařízení v objektu a počtu dní, které by energie z akumulátorů měla v bezvětrném období pokrýt (obvykle 3–5). Čím větší bude kapacita akumulátoru, tím vyšší bude také cena. Uwe Hallenga [11, s. 21-22] uvádí, že každý systém s akumulátory musí být doplněn regulátorem nabíjení, který zajišťuje nabíjení pouze na určitou vhodnou úroveň, zabraňuje tedy přebíjení a nedobíjení, v nejlepším případě by měl brzdit či zastavit rotor při plném nabití akumulátorů.

Pavel Doucha [12] uvádí, že k autonomnímu systému majitel VtE logicky nepotřebuje nejen licenci na výrobu elektřiny, ale ani žádnou smlouvu s provozovatelem distribuční soustavy (PDS).

■ 2.2.2 Mikrozdroj – bez přetoků do sítě

Další možností je provozování tzv. *mikrozdroje*, což je podle P. Douchy [12] označení pro elektrárny do 10 kW, které sice jsou připojeny k distribuční síti (DS), ale zároveň jsou vybaveny zařízeními zamezujícími přetokům energie do této sítě. Objekt je v případě nedostatku energie z mikrozdroje napájen běžným odběrem ze sítě. Přebytky energie je výhodné akumulovat. Nejběžnější možností je střídavé přepínání mezi sítí a VtE, kde ovšem musíme zabránit možným přetokům do sítě. To je v současnosti možné pomocí výkonových měničů energie. Pokud by k dodávce do sítě přece jen došlo, může být vlastníkově provozovatelem distribuční soustavy uložena pokuta ve výši podle rozhodnutí Energetického regulačního úřadu (ERÚ).

Vlastníka mikrozdroje je PDS povinen připojit ve zjednodušeném procesu připojení. Pro provoz pak není zapotřebí nic jiného než dodatek ke stávající smlouvě o připojení odběrného místa.

■ 2.2.3 Výrobna pro vlastní spotřebu – s možnými přetoky do sítě

Web Zmenaklimatu [5] jako další uvádí možnost využití malé VtE *s připojením k síti* jako doplňkového zdroje energie. Výhodou tohoto druhu připojení je, že není zapotřebí drahých a neekologických akumulátorů s omezenou účinností. Energie vyrobená elektrárnou se pomocí regulačních zařízení přizpůsobí spotřebičům a majitel VtE ji tak využívá přímo. Pokud je vyrobeno větší množství energie, než majitel spotřebuje, přebytky se mohou dodávat do sítě. Typickým příkladem může být větrná noc, kdy se spotřebuje minimální množství energie a hodně vyrobí. Naopak při špatných větrných podmínkách či poruše, kdy VtE není schopna dodat potřebnou energii, je tento nedostatek nahrazen běžným odběrem ze sítě. V tomto režimu je potřeba obousměrného elektroměru, který měří jak odběr, tak dodávku do sítě. Majitel VtE potom dodavateli zaplatí pouze za energii tvořící rozdíl mezi odběrem a dodávkou.

Podle P. Douchy [12] majitel VtE v tomto režimu provozu nepotřebuje licenci pro výrobu elektřiny, zato však potřebuje smlouvu o připojení s PDS a také s obchodníkem s elektřinou, který bude přetoky odebírat a vyplácet za ně domluvenou náhradu.

Výkupní ceny elektřiny však nebývají nijak výhodné, proto je obvyklá snaha minimalizovat dodávání přebytků energie do sítě jejich přesměrováním do náhradních zátěží pomocí tzv. wattrouterů. Na tento druh regulátoru se obvykle připojují spotřebiče jako bojler, topná tělesa pro přitápění, klimatizace apod., které mohou být napájeny trvale. Princip spočívá v nastavení různé vysoké priority jednotlivým akumulacím spotřebičům, které se postupně podle této priority sepnou, pokud se vyrobí více energie, než se spotřebuje. Pokud naopak výkon poklesne nebo sepneme jiný spotřebič, který není připojen k regulátoru, jsou akumulacím spotřebiče postupně vypínány od těch s nejnižší prioritou. Tuto funkci plní například regulátor WATTrouter Mx společnosti Solar Controls s.r.o., který podle stránek výrobce [13] není schopen zajistit úplně nulovou dodávku energie do sítě, a proto k jeho využívání musíme mít smlouvu o připojení s PDS a také s obchodníkem s elektřinou.

■ 2.2.4 Dodávání energie do sítě

Výstavba malé VtE čistě pro dodávání energie do sítě, kdy tedy majitel veškerou vyrobenou energii prodává a energii pro svou vlastní spotřebu odebírá ze sítě, je také možná. U elektrárny s menším výkonem, kterou si postavíme na vlastním pozemku, se však tato možnost běžně nevyplatí vzhledem k velkým rozdílům výkupních a prodejních cen elektřiny. Za 1 kWh vyrobenou větrnou elektrárnou podle webu CSVE [14] dostaneme maximálně 1,93 Kč, zatímco při odběru za stejné množství energie zaplatíme průměrně 3,82 Kč, což uvádí web Energie123 [15]. Jiný případ ovšem je, pokud se rozhodneme stavět malou VtE pouze jako investici na zvlášť k tomu určenému a zakoupenému pozemku, kde tedy není možnost využití energie pro spotřebu majitele. V takovém případě volíme pozemek s co nejlepším větrným potenciálem, aby byly výnosy co nejvyšší, a také vybíráme výkonnější VtE. Porovnávat výkupní a prodejní cenu energie je v takovém případě bezpředmětné.

Podle P. Douchy [12] při této formě podnikání vlastníků VtE musí mít jak licenci, tak smlouvu s PDS i smlouvu s obchodníkem o dodávkách vyrobené elektřiny.

■ 2.2.5 Legislativa

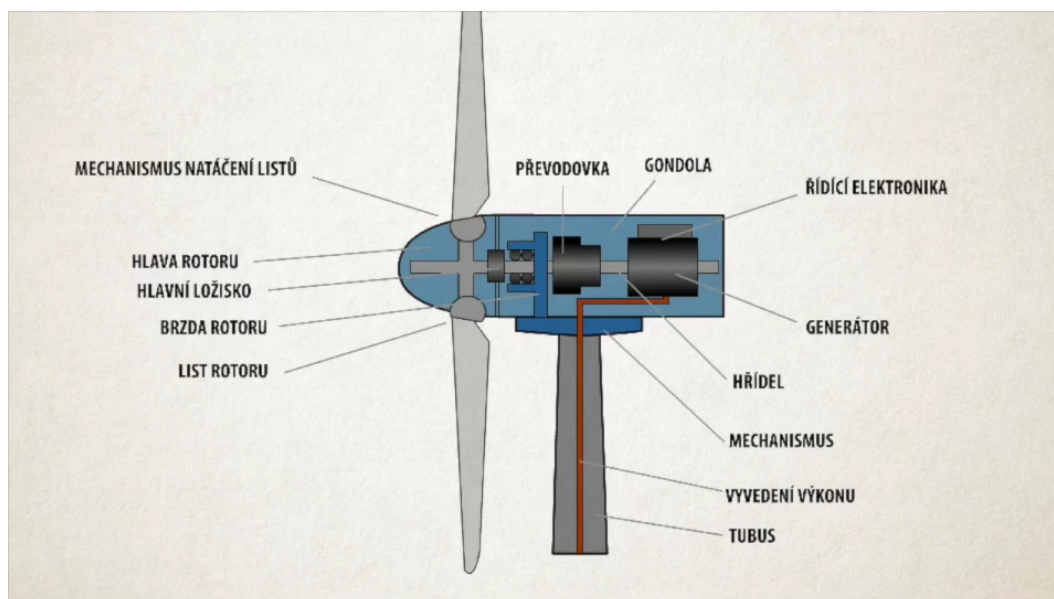
Podle Martina Šimůnka a Karla Srdečného z poradny Centra pro obnovitelné zdroje a úspory energie [16] je před vlastní stavbou VtE třeba zpracovat projektovou dokumentaci a podat na stavební úřad žádost o vydání územního rozhodnutí a stavebního povolení. Stavební úřad si pak může vyžádat například zpracování hlukové studie, také vyjádření dotčených úřadů státní správy, což se zejména týká ochrany přírody, a souhlas vlastníku dotčených pozemků a nemovitostí. Pro autonomní systém nejsou další administrativní úkony nezbytné.

Naproti tomu pro připojení malé VtE k distribuční síti je třeba dodržet podmínky pro připojení stanovené provozovatelem DS. Podle 4. přílohy Pravidel provozování distribuční soustavy, tj. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulacních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy [17, s. 11-14] (dále jen pravidla), je třeba možnost a podmínky připojení projednat a odsouhlasit s PDS, což by mělo probíhat už při přípravě a projektování výstavby. Projektování, výstavbu i připojení je v tomto případě nutno zadat odborné firmě. PDS může po posouzení předložené projektové dokumentace navrhnout a vyžadovat úpravy či doplnění zařízení tak, aby bylo bezpečné a vhodné pro paralelní provoz s DS. Následuje podání žádosti o připojení spolu s dalšími nezbytnými podklady, jako je katastrální mapa s vyznačením výroby a výpis z katastru nemovitostí, podrobná specifikace ochrany, údaje o zkratové odolnosti předávací stanice, u VtE dále ještě protokol a osvědčení k očekávaným zpětným vlivům elektrárny na síť. Náležitosti žádosti samotné jsou uvedeny ve vyhlášce č. 16/2016 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě [18], nezbytné je například vyplnění formuláře PDS o technických údajích projektovaného zařízení. O možnostech, podmínkách a nutných podkladech by měl žadatel na základě obecné technické konzultace informovat PDS. Podle vyhlášky č. 16/2016 Sb. [18] PDS ve lhůtě 90 dnů rozhodne, zda je možné VtE připojit a zda je nutné, aby žadatel nechal vyhotovit studii připojitelnosti. Podle pravidel [17, s. 11-14] tato studie u zdrojů do 30 kW obvykle nebývá vyžadována. V případě souhlasného

stanoviska PDS vyhotoví návrh smlouvy o připojení a smlouvu o smlouvě budoucí. Po realizaci projektu se na základě povolení PDS provede první paralelní připojení za účelem uskutečnění měření a potřebných zkoušek uvedených v pravidlech [17, s. 47-49] a ověřovací provoz. Jsou-li zkoušky a měření v pořádku, následuje uzavření smlouvy o připojení výrobního zařízení k DS a připojení samotné.

Kapitola 3

Schéma větrné elektrárny



Obrázek 3.1. Schéma větrné elektrárny podle Jiřího Studeníka a Michala Svitavského [19].

Jak je vidět na obrázku 3.1, na vrcholu tubusu, který je pevně ukotven v železobetonovém základu, případně ještě pomocí lan, se nachází gondola. V ní je masivní šasi, na kterém jsou za sebou generátor spojený rychloběžnou hřídelí s převodovkou, a z ní vede hlavní hřídel uložená v hlavním ložisku. Na hlavní hřídeli je nasazen obvykle třílistý rotor. Toto je v současnosti nejobvyklejší konfigurace, i když se čím dál častěji vyskytují i bezpřevodková řešení. V další části popíší jednotlivé části malé elektrárny a různé možnosti jejich provedení.

3.1 Základy

Tato část elektrárny je obvykle tvořena armovanou betonovou deskou dostatečných rozměrů, které jsou přímo úměrné průměru rotoru, výšce stožáru a místním půdním podmínkám. Tvar desky má obvykle kruhový, nebo vícehranný půdorys. U malých VtE do 5 kW může být i křížový, vytvořený ze samostatných bloků uspořádaných do kříže, kde do prostředního bloku se upevní stožár a do zbylých 4 kotvy pro lana. Úkolem základů je svou hmotností a konstrukcí zajistit stabilitu elektrárny, která je namáhána silou větru a také vlastní hmotností zařízení. Základová deska tedy musí primárně zabránit překlopení či vyvrácení VtE, neboť vítr působí na tubus s gondolou jako na

velmi dlouhou páku, a pokud by nebyl ukotven pevně v zemi, hrozilo by překlopení už při poměrně nízkých rychlostech větru. Zároveň musí základy rozložit tlakové síly působící na podloží tak, aby nedošlo k deformaci podkladové vrstvy. Do základů je zapuštěna základová patka tubusu, což bývá ocelový prstenec s přírubou, ke kterému je pomocí pevnostních šroubů přikotven tubus. V základech jsou otvory a průchodky pro kabely k vyvedení výkonu.

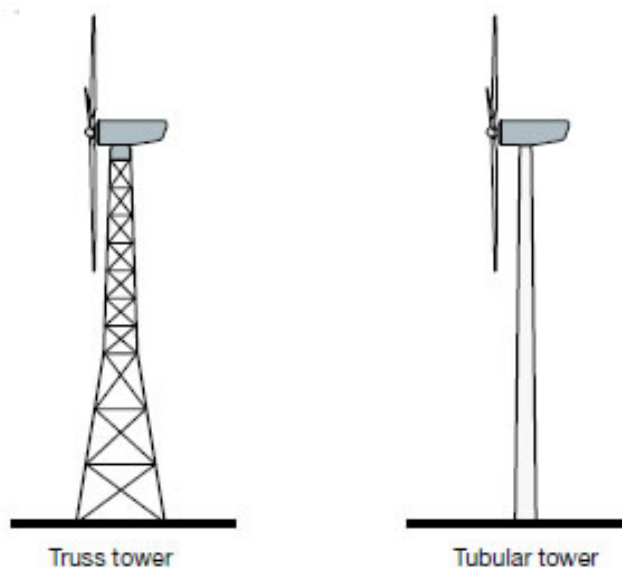
Některé malé VtE s nižším jmenovitým výkonem, a tedy také menší hmotností, se dají kotvit i například ke střešní konstrukci budov, kde však velké železobetonové základy kvůli svojí vysoké hmotnosti nemohou být. Tyto elektrárny jsou obvykle konstruovány s malými rotory, aby byla hlučnost co nejnižší, protože budova by fungovala jako velká rezonanční skříň. Podle U. Hallengy [11, s. 29] se však pro instalaci na střechy obydlí hodí pouze velmi malé zdroje do 100 W s velkým počtem rotorových listů kvůli větší tichosti chodu. Větší zařízení se nehodí nejen kvůli vysoké hmotnosti ohrožující stabilitu krovů, ale také kvůli vytrvalé hlučnosti nebezpečné lidskému sluchu i dlouhodobým jemným vibracím, které by mohly poškodit zdivo.

3.2 Tubus

Podle H. Cromea [3, s. 62] se tubus elektrárny skládá z již zmíněné základové patky. Na tu navazuje hlavní část nosné konstrukce – u malých VtE stožár, na jehož vnější části bývá žebříček pro přístup obsluhy. U větších elektráren se tato nosná část nazývá věž, vyznačuje se větším průměrem dostatečným k tomu, aby se obsluha do gondoly dostala vnitřkem tubusu. K vrcholu tubusu je přes přírubu upevněna gondola, opatřená systémem natáčení na vítr (otočný věnec).

Používané stožáry bývají podle webu CSVE [20] obvykle **trubkové** s kruhovým průřezem, nebo kónického tvaru (zúžující se směrem k vrchní části) tvořené zpravidla pozinkovanou ocelovou trubkou. Tento typ je konstrukčně nejjednodušší a bývá také nejlevnější. Trubkový stožár obvykle není tvořen jedinou trubkou, ale sestavuje se sešroubováním segmentů např. 3 nebo 6 m dlouhých, čímž je usnadněna jeho přeprava. Na stožáru bývá přivařen žebřík opatřený bezpečnostní lištou pro přístup obsluhy k turbíně. Další možnostmi jsou tři nebo čtyřboké **příhradové stožáry**, které bývají tvořeny segmenty svařenými z ocelových trubek. Pro velké VtE se od těchto konstrukcí v poslední době již ale upouští, a to především kvůli náročnosti výroby a s tím související vyšší ceně. Dalším minusem je, že proud větru procházející skrz stožár je narušován ocelovými příčkami, za kterými tedy vznikají turbulence. Ty mohou nepříznivě ovlivňovat výkony větrníků stojících dál po směru větru. U malých VtE však tyto nevýhody neplatí, obvykle se nestaví parky malých VtE, turbulence tedy ničemu nevadí. Naopak výhodou příhradového stožáru spočívá v tom, že má při nižší hmotnosti (tedy menší spotřebě materiálu) dobrou pevnost a také má řádově vyšší odolnost proti kmitání, vítr proudí skrz stožár a není zde žádná větší plocha, do které by se mohl opřít. Dalším plusem je jejich lepší splynutí s krajinou díky tomu, že je skrz příhradovou konstrukci vidět. Oba typy stožárů jsou na obrázku 3.2 převzatého z webu Cleanenergybrands [21].

U menších a subtilnějších konstrukcí je součástí stožáru také různý počet kotevních lan napnutých mezi jedním nebo několika místy na těle stožáru a kotvami v základech,



Obrázek 3.2. Příhradová konstrukce a trubkový stožár.

kteřá ještě zpevňují konstrukci elektrárny nejen proti překlopení, ale také výrazně snižují nebezpečí rozkmitání. Výšky, ve kterých se lana kotví, počítá software tak, aby působením větru nedošlo k rozkmitání stožáru na tzv. vlastní frekvenci, která by způsobila úplné rozlámání konstrukce a závisí na průměru i výšce stožáru. Tyto stožáry, které už se dnes moc nepoužívají, se nazývají **ukotvené**. Používaná ocelová lana musí mít v závislosti na velikosti elektrárny dostatečný průměr, aby zajistila potřebnou pevnost. Podle U. Hallengy [11, s. 58-59] se mezi lany a zemní kotvou ještě napínají nylonová lana za účelem tlumení vibrací. Druhou možností je stožár **neukotvený**, který se dnes používá převážně. Tyto stožáry nemají kotvicí lana, proto musí být jejich konstrukce samonosná, což zajišťuje odpovídající průměr. Nevýhodou je jejich vyšší cena. Podle U. Hallengy [11, s. 31] lze pro menší elektrárny s lehčími turbínami rovněž použít dřevěné stožáry, např. zachovalé staré telefonní sloupy.

Důležitým požadavkem kladeným na stožár je jeho dostatečná pevnost, aby byl schopen odolávat hmotnosti turbíny a také namáhání větrem. Projektanti musí tedy stožár materiálově, rozměrově a tvarově navrhnout tak, aby nedošlo k jeho zlomení, ohnutí, přílišnému rozkmitávání, a především k rozkmitání na vlastní frekvenci vedoucí k jeho úplnému zničení. Na druhou stranu jsou však limitováni cenovou stránkou návrhu. Je jasné, že čím silnější stožár nebo tlustší stěny věže, tím budou odolnější. Vzhledem k délce tubusu bude však také použito mnohem více materiálu, což se nepříznivě odrazí ve výsledné ceně. Důležité je tedy najít kompromis mezi těmito dvěma požadavky. Dalším důležitým parametrem je výška stožáru. Jak již bylo dříve zmíněno, ve větší výšce proudí vzduch rychleji, tím pádem by byl nejlepší stožár co nejvyšší. Přinejmenším by měl být alespoň tak vysoký, aby zůstala dostatečná bezpečnostní mezera mezi na zemi se pohybujícími lidmi či zvířaty a spodní úvratí listů rotoru. Jinak by rotor, který se rychle točí, mohl způsobit fatální poranění. Na druhou stranu vyšší stožár bude kvůli větší spotřebě materiálu a složitější dopravě jistě nákladnější na pořízení. Také je po-

třeba získat pro větrnou elektrárnu stavební povolení, což s větší výškou bude složitější. Dále musí být stožár dokonale uzemněn, protože toto uzemnění slouží zároveň jako uzemnění elektrárny (obvykle min. 2 ohmy). Vzhledem k umístění VtE co nejvýše nad okolním terénem jí také hrozí zasažení bleskem.

3.3 Gondola

Gondola obsahuje uvnitř samotnou výrobu. Je tedy klíčovou součástí celé VtE. Základním dílem je mohutný ocelový rám, ve kterém je pod pláštěm v přední části uloženo hlavní ložisko, kterým prochází hlavní hřídel, na které je přes unašeč přišroubována rotorová hlava. Zadní část hlavní hřídele navazuje na převodovku, která pomalé otáčky rotoru převádí poměrem zhruba 1:10 až 1:100 do rychla. Za převodovkou je také spojka s provozní brzdou a za ní rychloběžná hřídel vedoucí ke generátoru. Na spodní části nosného rámu bývá otočný věnec u větších VtE s pohony, které umožňují natáčení celé gondoly i s rotorem na vítr. U menších VtE k natáčení dochází pomocí jiného mechanismu, který bude probrán dále.

Kryt, nebo plášť gondoly bývá obvykle ze sklolaminátu, jeho úkolem je chránit vnitřní součásti, a to především před nepřízní počasí. Jak na obě hřídele, tak na ložiska i převodovku jsou kvůli vysokému namáhání kladeny vysoké nároky, a proto musí být vyrobeny z kvalitní, vysoce legované oceli. Pokud je rotor náhle zabrzděn, nesmí se hřídel zkroutit a zlomit v důsledku vysokého torzního namáhání. Hřídel se otáčí v ložiskách a v přední části je k ní pevně připojena hlava rotoru. Na hřídeli bývá instalována za převodovkou třecí brzda, jejímž úkolem je především v případě údržby zastavit dotáčeující se rotor. Samotné zastavení či rozběhnutí rotoru, stejně jako i změna jeho otáček se u většiny malých VtE dějí nastavováním úhlu náběhu rotorových listů.

Součástí většiny malých elektráren je i převodovka. Používají se různé konstrukce, je však důležité, aby tato součást nezpůsobovala přílišný hluk, také aby vydržela kolísavé namáhání dané změnami intenzity větru a aby byla schopna pracovat v širokém rozmezí teplot, kterému je během roku venku vystavena. Jak popisuje Yanlong Jiang [22], vlivem ztrát energie se v převodovce generuje teplo, které se absorbuje v jejím mazacím oleji. Obzvláště v létě, kdy bývají vysoké teploty vzduchu, může tento přírůstek tepla ze ztrát způsobit nárůst teploty oleje na nebezpečnou mez. Potom by došlo ke zhoršení jeho mazacích vlastností vlivem snižování viskozity a mohlo by dojít až k narušení olejového filmu a poškození ozubení nebo ložisek převodovky. Proto je nezbytné účinným chlazením udržovat nárůst teploty oleje pod bezpečnou mezí, zejména v létě. Naproti tomu v zimě, kdy teploty nezřídka bývají pod 0 °C, by vlivem příliš vysoké viskozity mohlo docházet k nedostatečnému mazání, a tak opět k poruše převodovky. Součástí převodovky proto bývá účinný chladicí, ale i ohřívací systém mazacího oleje, který zajišťuje bezporuchový provoz převodovky a její dlouhou životnost.

Nezbytnou součástí soustrojí je samozřejmě také generátor vyrábějící elektrickou energii, který může být nejen asynchronní obvykle používaný v uspořádání s převodovkou nebo synchronní obvykle bez převodovky, ale také dražší generátor s permanentními magnety.

Na vrcholu gondoly bývají za rotorem umístěny nezbytné senzory větru – tedy anemometr měřící rychlost a korouhvička zjišťující jeho směr. Dále zde u vyšších konstrukcí musí být jasně viditelná světelná signalizace důležitá pro bezpečnost leteckého provozu. Toto světlo vysoké intenzity nesmí být napájeno energií vytvořenou vlastní elektrárnou, neboť musí fungovat i v době, kdy je elektrárna zrovna mimo provoz.

3.4 Rotor

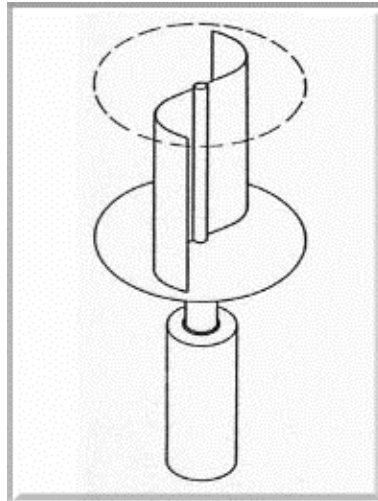
Asi nejdůležitější součástí každé větrné elektrárny je rotor, který část kinetické energie větru protékajícího jeho plochou přeměňuje na mechanickou práci. Konstrukce rotorů jsou velmi různorodé, stejně jako jejich rozměry. Rotor se skládá z listů – které jsou obvykle vyrobeny jako skořepina ze skelného laminátu. U velmi malých rotorů mohou být listy i z tvarovaného plechu, z plného dřeva, případně smíšené konstrukce. Rotorové listy musí být dostatečně pevné a tvarově stálé, aby se neměnily jejich aerodynamické vlastnosti a aby vydržely provozní namáhání. Současně musí mít nízkou hmotnost, a to nejen s ohledem na výrobní náklady, ale aby rovněž nedocházelo ke zbytečnému namáhání celé soustavy vlivem odstředivé síly.

Podle osy otáčení můžeme rotory dělit na **horizontální**, které mají tedy osu rovnoběžnou s povrchem země, a **vertikální** s osou kolmou k zemskému povrchu. Elektrárny s horizontální osou jsou běžnější a mají také vyšší účinnost. Tato zařízení obvykle mají stožár, gondolu a rotor. Menší nevýhodou je nutnost natáčení zařízení na vítr. Naproti tomu vertikální rotory není třeba natáčet a další výhodou je možnost jejich instalace bez stožáru, jsou tedy vhodnější například k upevnění na plochých střechách výškových budov. V porovnání s horizontálními také zabírají menší plochu a jsou méně hlučné. Jejich účinnost však bývá trochu nižší a ceny vyšší.

3.4.1 Odporové rotory

Dalším hlediskem dělení rotorů je jejich princip fungování, podle něj se rozdělují na odporové a vztlakové. Podle webu Oenergetice [23] byly rotory pracující na odporovém principu vynalezeny a používány dříve, jejich účinnost je však nižší, a proto se v současnosti tolik nepoužívají. Osa rotace těchto zařízení může být jak horizontální, tak vertikální. Podstata fungování spočívá v tom, že plocha nastavená proti větru klade jeho průchodu aerodynamický odpor, a tak je na ní vyvíjena síla, která rotorem otáčí.

Příkladem rotoru pracujícího na tomto principu, který se používá u malých VtE, je rotor typu Savonius s vertikální osou otáčení – viz obrázek 3.3. Ten je tvořen 2 přesazenými lopatkami válcového tvaru na společné svislé ose. Otáčení rotoru je zajištěno rozdílem odporů vypouklé a vyduté plochy. Vydutá lopatka orientovaná proti větru svojí dutinou klade větru podle skript V. Rychetníka, J. Janouška a J. Pavelky [7, s. 33] asi 3,5krát větší odpor než druhá lopatka nastavující větru svou vypouklou část. Síla působící na lopatku je tomuto odporu přímo úměrná, na dutinu proto bude působit větší síla než na vypouklou část. Během jednoho otočení rotoru se každá lopatka bude chovat polovinu doby jako vydutá a druhou polovinu jako vypouklá a díky tomu se bude rotor otáčet. Výhodou tohoto typu zařízení je, že se rozbíhá už při malých rychlostech větru.



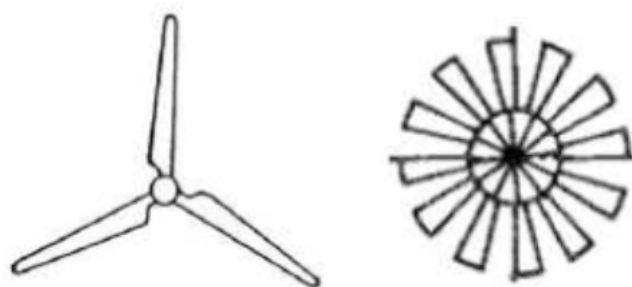
Obrázek 3.3. Rotor typu Savonius převzatý ze stránek The Renewable Energy [24].

■ 3.4.2 Vztlakové rotory

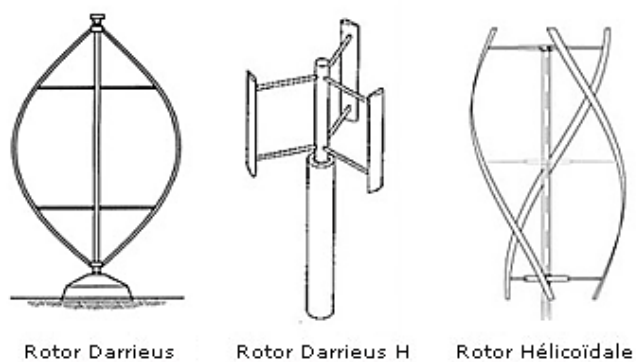
Druhým typem jsou rotory pracující na vztlakovém principu, které jsou účinnější, a proto v současnosti používanější. Osa rotoru může být opět horizontální i vertikální. Podstatou je vznik aerodynamické vztlakové síly na listu rotoru, který svým tvarem tvoří vztlakové těleso v řezu podobné křídlu letadla. Při jeho obtékání větrem pak výsledná aerodynamická vztlaková síla roztáčí rotor. Nevýhodou těchto zařízení je, že potřebují pro rozběh větší rychlost větru.

Na tomto principu pracují běžně používané vrtule a větrná kola s horizontální osou rotoru, jejichž rovina otáčení je kolmá na směr větru. Vrtule – viz obrázek 3.4, mívají obvykle 3 aerodynamicky vhodně tvarované listy o potřebné délce. Naproti tomu větrná kola (na stejném obrázku) mají větší počet jednoduchých menších listů vyrobených obvykle z plechu upevněných na kruhovém kovovém nosníku, které jsou natočeny tak, aby na nich vznikaly co největší vztlakové síly. Vertikální osu otáčení mají malé VtE se vztlakovými rotory typu Darrieus – viz obrázek 3.5. Svislé aerodynamicky tvarované lopatky bývají buď rovné upevněné rovnoběžně s osou rotoru na jednoduchých úchytech, nebo prohnuté do tvaru luku a uchycené k ose na obou koncích přímo.

Výjimkou nejsou ani konstrukce kombinující oba principy. Například firma Hi VAWT Technology Corporation dodává turbíny, které mají vnější rotor typu Darrieus, uvnitř něhož se nachází ještě Savoniův rotor. Podle výkonové křivky se však i tato kombinace stěží vyrovná běžným třílistým vrtulím, nehledě na závratné ceny.



Obrázek 3.4. Nejběžnější třílistá vrtule a větrné kolo ze skript V. Rychetníka, J. Pavelky a J. Janouška [7, s. 32-33].



Obrázek 3.5. Rotory typu Darrieus ze stránek Ecosources [25].

Kapitola 4

Zajištění a řízení výkonu

Je logické, že úkolem kladeným na malé VtE je vyrobit co nejvíce elektrické energie s co nejmenšími náklady. Proto jsou v současnosti úkony zajišťující co nejlepší výnosnost a optimální řízení výkonu automatizovány. Žádná lidská obsluha tedy není k běžnému chodu elektrárny zapotřebí a člověk zastává pouze funkci opraváře a dohlázele, zasahujícího pouze ve zvláštních případech. Současným trendem je, že větrná elektrárna má vlastní řídicí jednotku, která na základě impulsů přicházejících z různých senzorů, vydává pokyny akčním členům. Řídicí jednotka obvykle má alespoň malý displej, na kterém se zobrazují základní údaje, jako je momentální výkon nebo rychlost a směr větru. Mezi důležité senzory s ohledem na zajištění a řízení výkonu patří bezpochyby anemometr a korouhvička. Úkolem řídicí jednotky je zajištění co nejlepšího výkonu při různých rychlostech větru – pomocí natáčení celé gondoly na vítr a řízení úhlu náběhu listů. Dále má řídit úhel náběhu listů při rozběhu a při brzdění rotoru tak, aby to bylo pro elektrárnu bezpečné – obojí musí probíhat pozvolna, rotor se nemůže z plných otáček naráz úplně zastavit kvůli ohromné torzní síle, která by zkroutila hřídel. Na druhou stranu musí řídicí jednotka regulovat výkon tak, aby nebyly překročeny maximální bezpečné otáčky turbíny při přílišné rychlosti větru, případně otáčení rotorových listů úplně zabránit v případě jejich pravidelné údržby či kontroly, nebo v případě havárie.

4.1 Natáčení na vítr

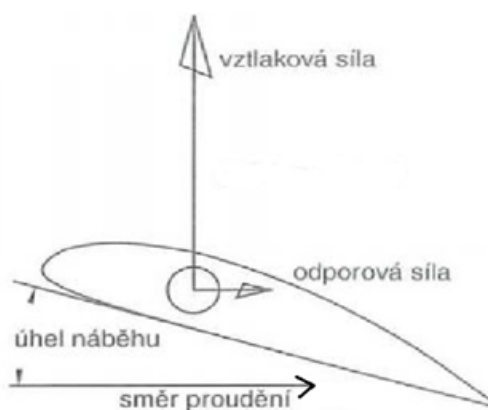
Cílem natáčení gondoly na vítr je udržovat rotor v takovém směru, aby jeho osa byla rovnoběžná se směrem větru, tak je totiž potenciál větru nejvíce využit a je zajištěn nejlepší výkon. U nejmenších malých VtE je natáčení zajišťováno pomocí regulačního kormidla podobného korouhvičce, které je pevně našroubováno na rám strojovny. Skládá se z nosného ramene vyrobeného z ocelových trubek nebo plochých profilů, na které je našroubována plocha kormidla. Ta musí být stabilní a dostatečně velká, ale zároveň ne příliš těžká, proto se obvykle vyrábí z hliníkového plechu a vyztužuje žebry nebo přehýbáním plechu. Vítr působením na toto rameno vyvozuje silový moment daný délkou a plochou kormidla. Tím dojde k natočení gondoly na otočném věnci do potřebného směru.

U větších malých VtE už běžně natáčení na vítr zabezpečuje zmíněná řídicí jednotka tím, že dá pokyn pomocným elektromotorům, které pozvolna natočí gondolu opět pevně spojenou s otočným věncem správným směrem. Řídicí jednotka porovnává údaje z anemometru a korouhvičky o směru větru se současným směrem osy rotoru. Tyto údaje jsou vždy za určitou dobu průměrovány, aby nedocházelo k otáčení gondoly při každém poryvu větru přicházejícím z jiného směru, což by nebylo příliš efektivní. Až pokud se

tento například pětiminutový (záleží na typu elektrárny) průměr liší od dosavadního směru osy rotoru, dojde k otočení. Není možné, aby se gondola otáčela stále pouze v jednom směru, neboť by tak došlo k překroucení kabelů vyvádějících výkon z generátoru. Obvykle bývají dovoleny maximálně 3 otáčky jedním směrem a potom musí elektromotory gondolu otáčet zase 3 otáčky směrem opačným. I tak by ale překroucení mohlo hrozit, proto nejsou kabely vedeny přímo rovně dolů tubusem, ale jsou ve vrchní části prověšeny. Pokud zrovna nedochází k natáčení gondoly, je otočný věnec zajištěn pomocí několika brzd, aby vlivem větru nedocházelo k náhodnému natáčení gondoly.

4.2 Řízení výkonu

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, řízení výkonu, rozběh či zastavování rotoru bývají zabezpečovány řízením úhlu náběhu neboli natáčením listů – *variable pitch*. Úhel náběhu označuje úhel mezi vektorem proudu vzduchu a tětivou rotorového listu, jak ukazuje obrázek 4.1. Vztlaková síla, která je podle H. Cromea [3, s. 39] vždy kolmá na nabíhající proud vzduchu, je maximální při ofukování profilu listu pod jedním určitým úhlem náběhu, který je pro každý profil specifický. Pokud se úhel náběhu třeba jen trochu změní, tedy pokud profil trochu natočíme, mění se tedy odpovídajícím způsobem i velikost vztlakové a odporové síly. Je logické, že pokud na listy působí větší síla, rotor se bude otáčet rychleji.



Obrázek 4.1. Znázornění úhlu náběhu, které uvádí H. Crome [3, s. 39]. Výsledná síla působící na profil listu rotoru by se určila vektorovým složením vztlakové síly kolmé ke směru větru a menší odporové síly rovnoběžné s tímto směrem.

V praxi to znamená, že každý list musí být k hlavě rotoru připevněn pohyblivě tak, aby se mohl otáčet kolem vlastní podélné osy a zajišťovat tak optimální výkon. V době, kdy elektrárna není v provozu, jsou listy rotoru nastaveny tzv. „do praporu“, při čemž je rotor roztáčen pouze velmi slabě. Nepohyblivost rotoru v případě údržby rotorové hlavy nebo ložisek listů navíc bývá pojištěna provozní brzdou na hlavní hřídeli. V ostatních případech se rotor nechává pomalu protáčet, čímž se oproti úplnému zastavení snižuje jeho namáhání od větru. Pokud nastanou větrné podmínky vhodné k výrobě energie,

vydá řídicí jednotka pokyn k natočení listů, tedy ke zvětšování úhlu náběhu. K tomuto natáčení však musí docházet pozvolna a postupně, aby nedošlo ke zkroucení hřídele či utržení rotoru. Fouká-li tedy méně, mohou být listy natočeny na vítr s větším úhlem náběhu, tím se na nich vytváří vyšší vztlak, což vede k dosažení co nejlepšího výkonu. Naopak pokud bude rychlost větru velmi vysoká, což zjišťuje regulátor porovnáváním vyráběného výkonu se jmenovitým výkonem, řídicí jednotka vydá pokyn ke snížení úhlu náběhu. Listy se tedy natočí tak, aby byly obtékány pod menším úhlem, a budou tak blíže poloze „do praporu“. Tím dojde nejen ke snížení výkonu, ale i odporu a s tím poklesne zatížení větrem a otáčky generátoru budou opět v bezpečných mezích.

Popsaný systém však platí pouze u malých VtE větších výkonů (asi nad 10 kW). Menší elektrárny obvykle nemívají natáčecí, ale pevné listy – *fixed pitch*, neboť by to výrazně zvýšilo jejich cenu a ani to není vzhledem k menším průměrům rotorů tolik nutné. Řízení výkonu proto musí být zabezpečeno jinak. U elektráren s nepohyblivými listy obvykle funguje systém odtrhnutí proudu vzduchu, který popisuje web Větrná energie [26]. Listy rotoru jsou k jeho hlavě připevněny pod vhodně zvoleným, pevně nastaveným úhlem náběhu. Profily listů jsou potom vytvořeny speciálně tak, aby se při velkých rychlostech větru na odvrácené straně listů vytvářely turbulence. Ty způsobí tzv. odtržení proudnic, což vede k řádovému snížení velikosti vztlakové síly roztáčející rotor a ke snížení výkonu na bezpečnou mez. Rychlost otáčení je tedy snížena a rotor pak může být zcela zastaven brzdou na hřídeli. S ohledem na menší průměr rotoru hřídeli zkroucení nehrozí.

4.3 Dálkové řízení a přenos dat

Na chod malé VtE musí pro její bezpečnost vždy někdo dohlížet. U elektráren s většími výkony to bývá dispečerská služba, která funkci větrníku monitoruje 24 hodin denně pomocí specializovaných programů. Data o provozu se z řídicí jednotky elektrárny mohou přenášet například bezdrátově pomocí WiFi. Nastane-li nějaká situace, se kterou si automatická řídicí jednotka není schopna sama poradit, zasáhne dispečink odesláním potřebného příkazu řídicí jednotce (lze například vyřadit generátor z provozu či upravovat chod elektrárny) – elektrárna tedy může být lidskou obsluhou řízena dálkově prostřednictvím počítačových programů. V případě zjištění nějaké chyby, která se nedá vyřešit na dálku, vyšle dispečink servisní techniky za účelem analýzy poškození a případné opravy. Služba rovněž zabezpečuje ukládání dat a jejich pravidelné vyhodnocování, čímž umožňuje včasnou identifikaci chyb a jejich odstranění či prevenci, a tak zajišťuje trvalý provoz elektrárny. Dispečerské služby samozřejmě vyžadují pravidelné hrazení poplatků. Levnější, ale náročnější možností je monitorování chodu větrníku majitelem elektrárny samotným. K tomuto účelu mohou sloužit mobilní aplikace.

Pro elektrárny o menším výkonu (až 10 kW), které ještě nemají nastavitelný úhel náběhu a na vítr se natáčí pomocí větrného kormidla (nemívají tedy obvykle řídicí jednotku, neboť by neměla co řídit) nabízí například firma APRS World, LLC. měřící ústředny, které shromažďují data o větru, počasí a výkonu měřená ve volitelných intervalech (např. od 10 s). Ta je potom možno stáhnout do počítače a zobrazit prostřednictvím bezplatného softwaru, který firma na svých stránkách nabízí, nebo sledo-

vat prostřednictvím telefonní aplikace, do které jsou data přenášena opět bezdrátově pomocí WiFi.

Kapitola 5

Údržba a bezpečnost

Stejně jako například automobil i malá VtE je zařízení, které pro své bezproblémové fungování a dobrou životnost vyžaduje pravidelnou kontrolu a údržbu. Pravidelné servisní intervaly obvykle uvádí výrobce dané elektrárny. Jejich dodržováním majitel může předejít vzniku havárie, a tak si ušetřit nejen starosti, ale také finance. Pokud totiž dojde k nějaké havárii, elektrárna stojí a neprodukuje energii, čímž majitel trpí. Dále pak musí nahrazovat nebo opravovat poškozené části, což je samozřejmě nákladné. V nejhorším případě, pokud například dojde k poškození pouze části rotoru a zbytek se otáčí setrvačnými silami, může dojít vlivem nevyváženosti zbylé části rotoru k úplnému zhroucení celé elektrárny. Pravidelné kontroly a údržbu může provádět majitel sám (zejména u těch nejmenších elektráren), nebo existují specializované servisní společnosti. H. Crome [3, s. 133-135] uvádí, že zpočátku je lepší kontrolu provádět ve velmi krátkých intervalech (denně, týdně, měsíčně, čtvrtletně) a časem majitel získá zkušenosti, jak je to nezbytné.

Kontrola se provádí jednak vizuálně na stojícím zařízení, kdy je zjišťován technický stav všech vnějších i vnitřních komponent elektrárny a snímačů, dále pak monitorováním chodu elektrárny. Pravidelná údržba podle návodu H. Cromea [3, s. 133-135] zahrnuje jednak ochranu proti korozi, dále potom mazání a nahrazování opotřebených dílů. Koroze představuje vážný problém, neboť způsobuje degradaci materiálu vedoucí k oslabení stability a pevnosti. S ohledem na provozní životnost je nutné buď použít nerezavějící materiály, případně materiály opatřit antikorozními nátěry. Tyto je potom nutné pečlivě sledovat, aby se případné začínající korodování včas eliminovalo. Neméně důležité je mazání, které je nezbytné pro správné fungování všech ložisek a brzd, ale i pro převodovku, kde se olej musí pravidelně měnit (záleží opět na intervalech předepsaných výrobcem převodovky).

5.1 Bezpečnost

Při kontrolování nebo opravách malé VtE je samozřejmě nezbytné dodržovat daná pravidla bezpečnosti, ať už obsluhu vykonává zkušený placený pracovník nebo patřičně proškolený majitel. Kontroly se obvykle plánují předem podle předpovědi počasí, aby elektrárna nebyla mimo provoz v době, kdy jsou ideální větrné podmínky a zabránilo se tak nezanedbatelným ztrátám vyrobené energie. V případě havárií vyžadujících okamžitý zásah a následných oprav ovšem plánování není možné.

Před začátkem jakékoliv práce musí být elektrárna odstavena z provozu a rotor musí být zabrzděn, při kontrolách či opravách rotoru tento musí být navíc zajištěn aretačním čepem. U menších elektráren se stožárem, kde je přístup ke gondole možný pouze po

vnějším žebříku a jakákoliv obsluha se provádí zvnějšku na pracovní plošině se zábradlím, je nezbytná rovněž aretace gondoly proti natáčení na vítr. U elektráren větších, kde je přístup do gondoly možný vnitřkem věže, toto opatření není nezbytné, neboť pracovník uvnitř gondoly není jejím otáčením nijak ohrožen, ale pro přestup z věže do gondoly by mělo být otáčení také zastaveno. Na zařízení může pracovník vystupovat a zde pobývat pouze s jistěním proti pádu. K tomuto účelu slouží obvykle postroj s dvěma velkými připevňovacími závěsy, z nichž alespoň jeden musí být vždy připevněn ke konstrukci (žebřík, zábradlí atd.). Vhodná pevná obuv a oblečení, které se při výstupu po žebříku nebude nikam zamotávat, je samozřejmostí a stejně tak i bezpečnostní helma, případně rukavice zabraňující křehnutí rukou při kontaktu se studeným kovovým žebříkem.

Kapitola 6

Ekonomické zhodnocení

Protože investice do výstavby malé VtE není zrovna malá, bývá ekonomické vyhodnocení bezesporu klíčovým faktorem a prvním krokem při rozhodování o této výstavbě. Podle J. F. Manwella, J. G. McGowana a A. L. Rogerse [27, s. 452] lze pro přibližné stanovení ekonomického přínosu použít vzorec prosté doby návratnosti

$$SP = \frac{C_c}{AAR} \quad (1)$$

kde SP (simple payback period) je prostá doba návratnosti v rocích, C_c (capital cost) představuje celkové náklady v Kč a AAR (average annual return) značí průměrné roční výnosy z investice v Kč/rok.

6.1 Náklady

Celkové náklady podle V. Rychetníka, J. Janouška a J. Pavelky [7, s. 184-190] zahrnují investiční náklady, provozní náklady a v případě financování půjčkou také úrok. Do investičních nákladů je třeba zahrnout nejen cenu turbíny a stožáru, ale také cenu nutných stavebních úprav – především vybudování železobetonového základu a případných kotev pro lana, a také náklady na dopravu zařízení na místo jeho montáže, případně cenu práce při přenechání montáže odborné firmě. Další náklady závisí na způsobu využívání vyrobené energie. U VtE připojené k síti jsou to náklady na vybudování přípojky ke stávající síti – tedy cena potřebného kabelu a jeho položení, případně stavba transformátoru. U autonomních VtE musí být započítány náklady na akumulaci energie. Další, ačkoliv řádově nižší, náklady mohou být spojeny s poplatky za nutné administrativní úkony, jako je vyřízení stavebního povolení nebo žádosti o vydání územního rozhodnutí. Stanovit předem provozní náklady, které zahrnují výdaje na provoz, údržbu a obsluhu, je i pro odborníky náročný úkol. Podle skript V. Rychetníka, J. Janouška a J. Pavelky [7, s. 184-190] je lze zhruba určit jako poměrnou část z prvotních investičních nákladů, konkrétně 1. a 2. rok jako 1,4% původní investice, 3.–5. rok 2% a 6.–20. rok už jako 2,5% investice.

6.2 Průměrné roční výnosy

Abychom mohli stanovit, jaká suma se nám z investice ročně vrátí, musíme nejprve vypočítat, kolik energie v kWh VtE ročně přibližně vyprodukuje. Tento údaj poté vynásobíme částkou v Kč/kWh, která při dodávání do sítě odpovídá výkupní ceně elektřiny,

při vlastním spotřebování nákupní ceně, kterou vlastně ušetříme tím, že energii ze sítě neodebereme.

Jelikož programy, které dokáží vypočítat objem vyrobené energie, nejsou zdarma přístupné, bude tento objem dopočítán alespoň přibližně pomocí údajů z větrné mapy a z výkonové křivky VtE. V mapě je možno najít průměrnou rychlost větru ve výšce 10 m nad povrchem, kterou musíme podle vzorce (6) na straně 8 přepočítat na plánovanou výšku a podle okolního terénu stožáru. Rozdělení četnosti rychlostí větru můžeme podle V. Rychetníka, J. Janouška a J. Pavelky [7, s. 19] aproximovat se znalostí průměrné rychlosti větru v požadované výšce Weibullovým rozdělením podle vzorce

$$f(x) = \frac{k}{a} \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^k\right] \quad (2)$$

kde $f(x)$ je relativní četnost výskytu rychlosti x v $m \cdot s^{-1}$, a je koeficient polohy maxima funkce, který lze určit z průměrné rychlosti větru jako $\frac{v_{prům}}{0,88}$, k je tvarový činitel, který je možno najít ve zmíněné větrné mapě. Celková vyrobená energie v kWh za 1 rok je potom rovna sumě součinů doby trvání rychlosti x větru v hodinách a výkonu $P(x)$ VtE při této rychlosti odečteného z výkonové křivky v kW.

$$E_{celk} = \sum_{x=0}^n f(x) \cdot 365 \cdot 24 \cdot P(x) \quad (3)$$

Vypočítaný výsledek bude zřejmě oproti realitě nadhodnocen, neboť nezapočítává žádné ztráty a počítá se stálým provozem v ideálních podmínkách. Abychom se přiblížili skutečně možnému výsledku, je třeba odečíst

- ztráty turbulencí 3–15% – i malá změna rychlosti a směru větru za překážkami způsobí velkou změnu výkonu, neboť ten je úměrný třetí mocnině této rychlosti. Budeme předpokládat, že jsme VtE umístili téměř na ideální místo s ohledem k překážkám a nerovnostem terénu, a proto započítáme ztrátu 5%.
- ztráty kvůli údržbě, ať už plánované nebo poruchové, které mohou tvořit 1–3% a budou se zvyšovat s délkou doby provozu
- ztráty způsobené degradací povrchu rotoru, například prachem, který zhorší obtékání rotoru větrem, mohou tvořit až 0,5–3%
- ztráty námrazou, které mohou být 0,5–5%. Ta opět zhoršuje obtékání listů, navíc při velké námraze musí být VtE odstavena, neboť odletující kusy ledu mohou být nebezpečné.
- ztráty způsobené nedokonalým natáčením na vítr, které mohou tvořit 0,5–5%
- odchylku 0,5–2% skutečného výkonu od výrobcem udávané výkonové křivky
- elektrické ztráty až 2%
- vlastní spotřebu energie, která může být 0,5–1,5%
- ztráty a vlastní spotřebu měniče až 8%.

Budeme-li uvažovat spíš nižší hodnoty všech ztrát, tedy ne příliš časté odstávky, spíš nižší míru prašnosti i námrazy, poměrně dobře prováděné natáčení na vítr a výrobce udávajícího téměř přesně výkonovou křivku, můžeme počítat s výslednými ztrátami asi 18%.

Kapitola 7

Modelový výpočet návratnosti

Pro představu o době návratnosti bude vytvořen následující modelový příklad. Malá VtE se bude instalovat v malém městě Kamenický Šenov v Libereckém kraji u domu obývaného běžnou čtyřčlennou rodinou (2 dospělí, 2 děti ve školním věku). Podle větrné mapy Ústavu fyziky atmosféry je průměrná rychlost větru v této obci a jejím okolí $4,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ve výšce 10 m nad povrchem, což je v našich podmínkách poměrně dobré, ale pro výstavbu VtE by to měla být spíše průměrná lokalita. Město se navíc nachází v poměrně otevřeném prostranství, nejbližší okolí tvoří pole a louky, je zde tedy minimum překážek bránících proudění větru či vytvářejících turbulence. Ve větrné mapě je rovněž možno najít, že převažující směr větru je z jihovýchodu, budeme tedy předpokládat, že bydlíme právě na jihovýchodním kraji obce a elektrárnu budeme navíc situovat na jihovýchod od našeho domu. Dodržíme také na začátku zmíněná pravidla o situování elektrárny ve vzdálenosti alespoň dvacetinásobku výšky překážky, což u jednopatrového domu (cca 5,5 m) odhadneme asi na 100 m. Tato vzdálenost je důležitá pro stanovení potřebné délky kabelů pro dovedení výkonu k domu.

7.1 Náklady

Pro výpočet návratnosti byla zvolena elektrárna americké společnosti Bornay, která se vývoji a výrobě malých VtE úspěšně věnuje již 45 let, předpokládám tedy, že jejich technologie je již za ta léta ověřená. Další důvod ke zvolení tohoto výrobce bylo, že jako jeden z mála byl ochoten poskytnout technickou specifikaci své turbíny a cenovou nabídku. Výhodou je i fakt, že Bornay má distributory po celém světě, konkrétně tedy i v sousedním Německu, což snad umožní cenově přijatelnou přepravu. Konkrétně byla zvolena třílístá vztlaková turbína s průměrem 4 m o jmenovitém výkonu 5 kW s názvem Wind 25.3+ vybavená třífázovým alternátorem s permanentními Neodymovými magnety, který je velmi nenáročný na údržbu a není třeba mu dodávat budící výkon, o který by se snížily výnosy. Jmenovité výstupní napětí je 220 V AC. Regulace turbíny je celkově pasivní, listy jsou k hlavě turbíny připevněny pod daným úhlem a nenatáčejí se, rovněž natáčení na vítr se děje pasivně působením větru na plochu regulačního kormidla.

Další zakoupenou položkou bude měnič Smart!wind 5,5 výrobce Smart Power Electronics [28] se zabudovanou řídicí jednotkou, který pro zvolenou VtE doporučuje výrobce. Řídicí jednotka kontroluje dle našeho výběru buď výstupní výkon generátoru, nebo přímo rychlost otáčení rotoru, při překročení bezpečných mezí potom vydá pokyn k zabrzdění VtE, a tedy odstavení z provozu. Úkolem měniče je upravovat proměnné vý-

stupní napětí elektrárny na úroveň vhodnou pro napájení spotřebičů, případně dodávání do sítě (400/230 V, 50 Hz).

Abychom dosáhli příznivějších rychlostí větru, pořídíme od firmy WFmetal příhradový stožár složený ze segmentů o celkové výšce 15 m [29], od kterých ale musíme odečíst 2 m, které je podle výrobce nutno založit do betonu. Stožár nebudeme kotvit lany. Průměrnou rychlost větru z větrné mapy přepočítáme na novou výšku 13 m. Za koeficient n dosadíme 0,16 pro louku s nízkým travnatým porostem.

$$v_{13} = \left(\frac{13}{10}\right)^{0,16} \cdot 4,58 = 4,78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

7.2 Vyrobená energie

Z průměrné rychlosti podle vzorce (2) na straně 27 stanovíme Weibullovo rozdělení četností větru, koeficient k je podle větrné mapy 2,07, koeficient a určíme jako $\frac{4,78}{0,88} = 5,43$. Naše VtE začíná vyrábět při rychlosti $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, při rychlostech nad $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ musí být zabrzděna, a tedy už nevyrábí. Z tohoto rozdělení potom podle vzorce (3) na straně 27 stanovíme celkovou vyrobenou energii, od které odečteme 18% ztrát. Výsledná vyrobená energie tedy bude asi 4860 kWh. V tabulce 7.1 můžeme také vidět, že jen 299 dní v součtu je VtE vzhledem k povětrnostním podmínkám schopna ročně vyrábět.

rychlost x [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	četnost $f(x)$	četnost [hod]	výkon VtE při rychlosti x odečten z výkonové křivky [W]	vyrobená energie [kWh]
0	-	-	-	0
1	-	-	-	0
2	-	-	-	0
3	0,15069	1320,04	100	132
4	0,16155	1415,18	200	283,04
5	0,1502	1315,75	400	526,3
6	0,12407	1086,85	750	815,14
7	0,0922	807,67	1250	1009,59
8	0,06209	543,91	1800	979,04
9	0,03806	333,41	2460	820,19
10	0,0213	186,59	3000	559,77
11	0,01091	95,57	4000	382,28
12	0,00511	44,76	5400	241,7
13	0,0022	19,27	5850	112,73
14	0,00087	7,62	6000	45,72
15	0,00031	2,72	5600	15,23
16	0,0001	0,88	5900	5,19
17	0,00003	0,26	5700	1,48
18	0,00001	0,09	5800	0,52
19	0	0	5750	0
20	0	0	5800	0
dní celkem		299,19	energie celkem [kWh]	5929,92

Tabulka 7.1. Weibullovo četnostní rozdělení rychlostí a vyrobená energie.

7.3 Doba návratnosti

Vyrobenou energii chceme primárně použít pro svou vlastní spotřebu v domácnosti, ale nechceme řešit nutnost bránění přetokům do sítě ani ukládání přebytků do neekologických a drahých akumulátorů, které mívají obvykle mnohem nižší životnost než VtE, nemůžeme tedy provozovat mikrozdroj. Budeme předpokládat, že jsme získali souhlas sousedů, stavební povolení i smlouvu o připojení s PDS a s lokálním obchodníkem s elektřinou. Budou porovnávány 2 případy, jejichž investiční náklady jsou uvedeny v tabulce 7.2:

- A) přebytky, které naše VtE vyrobí, budeme dodávat do sítě – především asi půjde o noční hodiny a část dne během pracovního týdne, kdy se obyvatelé domu nebudou zdržovat doma. Spotřeba bude tedy minimální, trvale bude energii odebírat lednice s mrazákem, ale také například televize nebo mikrovlnná trouba ve stand-by režimu.
- B) veškerou vyrobenou energii spotřebujeme v domácnosti díky dříve zmíněnému wat-trouteru, na který připojíme bojler pro ohřev teplé vody, v zimě navíc elektrický kotel pro vytápění domu a v létě klimatizaci.

varianta A	cena [Kč]	varianta B	cena [Kč]
turbína Wind 25,3+	178000	turbína Wind 25,3+	178000
provozní náklady celkem za 20 let životnosti-46,3%	82414	provozní náklady celkem za 20 let životnosti-46,3%	82414
doprava turbíny společností TNT	21000	doprava turbíny společností TNT	21000
měníč Smart!wind 5,5	105000	měníč Smart!wind 5,5	105000
doprava měniče společností UPS	2100	doprava měniče společností UPS	2100
příhradový stožár 15 m	52690	příhradový stožár 15 m	52690
doprava stožáru	1690	doprava stožáru	1690
betonový základ+práce	16000	betonový základ+práce	16000
100 m kabelu AYKY 4Bx25	6000	100 m kabelu AYKY 4Bx25	6000
		WATTrouter Mx + doprava	10300
náklady celkem	464894	náklady celkem	475194

Tabulka 7.2. Náklady pro obě varianty.

Pro stanovení poměru nespotřebované a spotřebované energie, a tedy i výpočet návratnosti, bude užitečné vyjádřit si spotřebu jednotlivých spotřebičů energie běžně používaných v domácnosti – orientační hodnoty v tabulce 7.3 jsou převzaty z energetického poradce společnosti PRE [30].

7.3.1 Doba návratnosti – varianta A

Naše VtE průměrně vyrobí asi 13,3 kWh za den. Budeme předpokládat, že se energie bude rovnoměrně vyrábět po celý den i rok, i když by samozřejmě bylo správnější na základě měření stanovit průměrný denní diagram výroby a ten porovnávat s průměrným denním diagramem zatížení. Předpokládáme, že během noci cca od 24:00 do 7:00 a v pracovních dnech od 8:00 do 16:00 v domě nikdo nebude. V této době budou energii

SPOTŘEBIČ	průměrná spotřeba za den [kWh]
chladnička s mrazničkou A+	0,6 (za 9 hodin 0,225 kWh)
menší myčka A+	0,75
pračka A++ 1x za 2 dny	0,3
rychlovarná konvice 2l denně	0,22
sklokeramická varná deska 2 plotýnky x 2hod denně	0,48
elektrická trouba cca 0,5h denně	0,4
kávovar 4 kávy denně	0,33
mikrovlnná trouba 10 min denně	0,2
vysavač 15min denně	0,3
žehlička 15min denně	0,05
fén cca 10min denně	0,22
LED TV 100cm 4hod denně	0,24
satelitní set 4hod denně	0,09
nabíječka mobilního telefonu 2x 1,5 hod denně	0,006
4x notebook 2hod denně	0,12
tiskárna 50stran za týden	0,002
rádio 1hod denně	0,01
osvětlení led žárovky 13x 10W 4hod denně	0,52
celkem	4,708

Tabulka 7.3. Spotřeba.

SPOTŘEBIČ	průměrná spotřeba za 15 hod [kWh]	průměrná spotřeba za 7 hod [kWh]
chladnička s mrazničkou A+	0,375	0,175
mikrovlnná trouby stand-by	0,045	0,021
LED TV 100cm stand-by	0,09	0,042
4 x notebook režim spánku	0,72	0,336
tiskárna stand-by	0,075	0,035
rádio stand-by	0,075	0,035
celkem	1,38	0,644

Tabulka 7.4. Trvalá spotřeba.

odebírat pouze spotřebiče s trvalou spotřebou uvedené v tabulce 7.4, zbytek budeme dodávat do sítě.

Nyní se tedy zaměříme na výpočet nevyužité energie, kterou budeme dodávat do sítě. V následujících výpočtech jsou dny a hodiny uvedeny pouze pro přehlednost, do rovností nepatří, neboť by pak nevycházely požadované kWh. Každý pracovní den z průměrného množství vyrobené energie (13,3 kWh) tedy nevyužijeme $\frac{15}{24}$ této energie, od které musíme odečíst uvedenou energii spotřebovanou za 15 hodin provozu spotřebičů z tabulky 7.4, to znamená $13,3kWh \cdot \frac{15}{24hod} - 1,38kWh = 6,9kWh$. Celkem za rok to potom bude $6,9kWh \cdot 365dní \cdot \frac{5}{7pracovníchdní} = 1807kWh$. O víkendech potom nevyužijeme nočních $\frac{7}{24}$ energie s odečtením 7 hodin trvalého provozu spo-

třebičů v tabulce 7.4, tedy $13,3kWh \cdot \frac{7}{24hod} - 0,644kWh = 3,2kWh$. Celkem za rok $3,2kWh \cdot 365dní \cdot \frac{2}{7dnívíkendu} = 337kWh$.

Dále se podíváme na dobu, kdy se rodina bude zdržovat v domě a využívat vyrobenou energii, stand-by režim spotřebičů oproti celkové spotřebě zanedbáme. Dny a hodiny jsou opět uvedeny pouze pro přehlednost, ve skutečnosti ale do rovnic nepatří. V pracovních dnech elektrárna během zbývajících (24 - 15hod) 9 hodin vyrobí poměrnou část z průměrné denní výroby, tedy $\frac{9}{24hod} \cdot 13,3kWh = 4,99kWh$. S průměrnou denní spotřebou 4,33 kWh (lednice pouze 9 hod) ještě tedy do sítě denně dodáme $4,99 - 4,33 = 0,66kWh$. Celkem $0,66kWh \cdot 365dní \cdot \frac{5pracovních}{7} = 172kWh$. Dále budeme uvažovat, že o víkendu, kdy bude rodina většinu času doma a spotřeba tedy zřejmě bude vyšší než průměrná, všechnu energii vyrobenou přes den spotřebujeme.

Sečteme-li všechnu nespotřebovanou energii, získáme množství, které ročně dodáme do sítě. Bude to tedy asi $1807 + 337 + 172 = 2316 kWh$. Zbylou energii, tedy $4860 kWh - 2316kWh = 2544kWh$ spotřebujeme, o to nižší bude náš účet za elektřinu. Výkupní cena elektřiny z VtE je podle cenového rozhodnutí ERÚ [31] pro rok 2018 stanovena na $1,93 Kč/kWh$. Za našich dodaných 2316 kWh bychom tedy měli obdržet pouze 4470 Kč. Co se týká energie, kterou díky VtE neodebereme ze sítě, na té při průměrné ceně $3,82 Kč/kWh$ ušetříme dalších $2544kWh \cdot 3,82Kč/kWh = 9718Kč$. Celkový roční výnos z VtE získáme sečtením obou částek, $4470 + 9718 = 14188Kč$.

Nyní už tedy můžeme stanovit dobu návratnosti podle vzorce (1) na straně 26.

$$SP = \frac{464894}{14188} = 32,77let$$

7.3.2 Doba návratnosti – varianta B

V této variantě budeme díky wattrouteru schopni spotřebovat veškerou vyrobenou energii. Kromě spotřebičů z tabulky 7.3 na straně 31 budeme energii spotřebovávat především pomocí bojleru, v zimě pak navíc topením a v létě klimatizací. Průměrné spotřeby v tabulce byly zjištěny z webu Dodavatelelektřiny [32], spotřeba klimatizace pak z konfigurátoru firmy EnergySim [33]. Z tabulky 7.5 je patrné, že už tyto přídatné spotřebiče by byly schopny spotřebovat denně veškerou vyrobenou energii, energii ale budeme primárně využívat pro napájení spotřebičů z tabulky 7.3, jejichž spotřeba bude ročně asi $365dní \cdot 4,7průměrnádenníspotřeba = 1715kWh$.

SPOTŘEBIČ	průměrná denní spotřeba [kWh]
ohřev vody 4 osoby	10,96
vytápění 100 m ² – nižší teplota	21,1
klimatizace 100 m ²	1,5
celkem	33,53

Tabulka 7.5. Spotřeba bojleru, topení a klimatizace.

Pokud veškerou energii spotřebujeme sami, roční výnosy můžeme stanovit jako částku, kterou ušetříme díky nižší spotřebě energie ze sítě. Tedy jako součin množství

energie, kterou vyrobíme, a tedy neodebereme ze sítě, a ceny, kterou platíme za kWh. $4860kWh \cdot 3,82Kč/kWh = 18565Kč$. Doba návratnosti je potom opět určena podle vzorce (1) na straně 26.

$$SP = \frac{475194}{18565} = 25,6let$$

Závěr

Kratší doba návratnosti, i navzdory trochu vyšší vstupní investici, vyšla v souladu s očekáváním ve variantě B bez dodávání přebytků do sítě. Tato varianta by tedy měla být ekonomicky výhodnější. Nicméně ani v tomto případě není doba návratnosti nijak příznivá vzhledem k tomu, že uváděná doba životnosti větrné elektrárny je maximálně 25 let, častěji ale pouze 20 let. Pokud by elektrárna tedy skutečně vyráběla tolik, kolik by měla, a větrné podmínky by se za dobu jejího provozu nijak nezhoršily, vrátila by se nám naše investice až skoro 6 let po konci doby její životnosti. VtE však po této době nemusíme nutně rozebrat, pokud je stále v dobrém provozním stavu a správně funguje, stačí nahradit opotřebované díly a elektrárnu repasovat. Při dalším využívání by už výnosy mohly přesáhnout počáteční investici. Nicméně tato doba je velmi dlouhá, a pokud by někdo uvažoval o zakoupení malé VtE s motivací, že mu bude šetřit náklady na elektřinu, pravděpodobně se mu nebude chtít čekat skoro 26 let na to, až VtE začne plnit tento svůj účel.

Nepříznivý výsledek je pravděpodobně ovlivněn i výběrem lokality, kdy bylo pro ukázkou vybráno místo s průměrnou rychlostí větru v 10 m jen $4,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, která je uváděná jako hraniční pro výhodnost výstavby VtE. Toto tvrzení se tedy potvrdilo. Takováto lokalita byla ale zvolena záměrně, neboť odráží reálné možnosti obyvatel ČR, kde průměrná rychlost v 10 m je na většině území spíše nižší, vyšší bývá pouze v pohorích, která nejsou tolik obydlena. Dalším faktorem nepříznivě ovlivňujícím výsledek je podle mého názoru nedostatečná podpora tohoto druhu obnovitelného zdroje ze strany státu. Výkupní cena energie z VtE je velmi nízká a dotace na výstavbu žádné, proto si ji jako investici pro dodávání do sítě zřejmě nikdo nevybere, a pokud nám jde pouze o snížení nákladů na vlastní spotřebu energie, je zřejmě konstrukčně jednodušší nechat si na střechu nainstalovat fotovoltaické panely. Nezájem o VtE vede k tomu, že je na českém trhu jen velmi málo firem zabývajících se jejich vývojem a prodejem, mikroturbínu o výkonu pár set wattů je mnohem snazší sehnat i za přijatelnou cenu. Ani zahraniční výrobci malých VtE u nás nemají své distributory. Český zájemce je tedy nucen malou VtE shánět od prodejců nebo distributorů v zahraničí, kde jsou ovšem značnou nevýhodou vyšší náklady na přepravu, neboť rozměry a hmotnost takové zásilky nejsou zanedbatelné.

Na základě výsledků práce se domnívám, že v současné době se investice do malé VtE spíše nevyplatí. Bude-li však pokračovat současný trend růstu spotřeby a cen elektřiny a současně pokračující vyčerpávání zásob neobnovitelných zdrojů, může se v blízké budoucnosti situace změnit, a to nejen až stát začne malé obnovitelné zdroje energie znovu podporovat.

Literatura

- [1] Břetislav Koč. *Inventura větrné energetiky v Evropě a ve světě v roce 2017*. 2018.
<https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/17248-inventura-vetrne-energetiky-v-evrope-a-ve-svete-v-roce-2017>.
- [2] Karel Srdečný. *Obnovitelné zdroje energie*. Ministerstvo životního prostředí, 2009. ISBN 978-80-7212-518-0.
- [3] Horst Crome. *Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení*. Ostrava: HEL, 2002. ISBN 80-86167-19-4.
- [4] Pavel Grozman. *Malé větrné elektrárny by měly dostat šanci*. 2015.
<http://energie21.cz/male-vetrne-elektrarny-by-mely-dostat-vetsi-sanci/>.
- [5] Zmenaklimatu. *Malé větrné elektrárny*.
<http://www.zmenaklimatu.cz/cz/zapoj-se/159-male-vetrne-elektrarny>.
- [6] David Hanslian. *Větrné podmínky pro malé větrné elektrárny*. 2012.
<http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/8358-vetrne-podminky-pro-male-vetrne-elektrarny>.
- [7] Václav Rychetník, Jiří Pavelka a Josef Janoušek. *Větrné motory a elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
- [8] AV ČR Ústav fyziky atmosféry. *Větrná mapa ČR: průměrná rychlost větru v 10 m*.
<http://www.ufa.cas.cz/web-old/vetrna-energie/doc/vav/priloha02.jpg>.
- [9] AV ČR Ústav fyziky atmosféry. *Mapa všeobecných větrných podmínek či výroby energie malou větrnou elektrárnou ve výšce 10 m nad povrchem*.
<http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/>.
- [10] Zbyszek Szeliga. *Obnovitelné zdroje energie – energie větrná, větrné motory (vybrané kapitoly)*. Ostrava, 2012.
- [11] Uwe Hallenga. *Malá větrná elektrárna: stavební návod s konstrukčními výkresy, 2. přeprac. a rozš. vyd.* Ostrava: HEL, 2006. ISBN 80-86167-27-5.
- [12] Pavel Doucha. *Možnosti připojení domácí elektrárny v roce 2016*. 2016.
<https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13918-moznosti-pripojeni-domaci-elektrarny-v-roce-2016>.
- [13] Solar Controls s.r.o. *Wattrouter frequently asked questions*. 2013.
http://www.solarcontrols.cz/cz/wattrouter_faq.html.
- [14] Česká společnost pro větrnou energii. *Vývoj výkupních cen větrné energie a ostatních obnovitelných zdrojů*.

- <http://www.csve.cz/clanky/vyvoj-vykupnich-cen-vetrne-energie-a-ostatnich-obnovitelnych-zdroju/278>.
- [15] Energie123. *Aktuální (průměrná) cena 1 kWh elektřiny*. 2018.
<https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>.
- [16] Martin Šimůnek a Karel Srdečný. *Poradna I-EKIS*.
<http://ekowatt.cz/cz/poradna-ekis/poradna-i-ekis?tema=ae02cc88721e77af713d30c766834e9f&co>.
- [17] Provozovatelé distribučních soustav. *Pravidla provozování distribučních soustav - příloha 4 Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy*. 2017.
http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf.
- [18] *Vyhláška ERÚ č. 16/2016 Sb., ze dne 22.1.2016 o Podmínkách připojení k elektrizační soustavě*.
- [19] Jiří Studeník a Michal Svitavský. *Energie větru, vody, biomasy*. 2016.
<https://publi.cz/books/90/08.html>.
- [20] Česká společnost provětrnou energii. *Stožár*.
<http://www.csve.cz/cz/detail-kategorie/stozar/86>.
- [21] Cleanenergybrands. *Renewable - SMALL WIND TURBINES*.
<http://www.cleanenergybrands.com/shoppingcart/knowledgemanager/questions/157/101+renewable+-+small+wind+turbines>.
- [22] Yanlong Jiang. *Wind turbine cooling technologies*. WIT Press, 2010. ISBN 978-1-84564-205-1.
<http://library.witpress.com/viewpaper.asp?pcode=9781845642051-019-1>.
- [23] David Vobořil. *Větrné elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR*.
<http://oenergetice.cz/typy-elektraren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>.
- [24] The Renewable Energy Website. *Savonius Wind Turbines*.
<http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/savonius-wind-turbines/>.
- [25] Ecosources. *Darrieus vertical axis wind turbine*.
http://www.ecosources.info/en/topics/Darrieus_vertical_axis_wind_turbine.
- [26] Vetrna energie. *The Truth about Small Wind Turbines*.
http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/systemy-regulace_27.
- [27] J. F. Manwell, McGowan J. G. a Rogers Anthony L. *Wind energy explained: theory, design and application*. New York: Wiley, 2002. ISBN 04-714-9972-2.
- [28] BRAUN Windturbinen. *Wind-Inverter with highest quality*.
<http://www.braun-windturbinen.com/products/wind-inverter/>.
- [29] WF Metal s.r.o. *Sestava příhradového stožáru 15m*.
http://www.drzakanteny.cz/product.php?id_product=577&id_lang=1.

-
- [30] PRE. *Energetický poradce PRE - orientační hodnoty spotřeby*. 2013.
<https://www.premereni.cz/Files/sluzby/pujcovani-mericich-zarizeni/meric-spotreby-elektriny/orientacni-hodnoty-spotreby-domacich-spotrebicu/>.
- [31] Energetický regulační úřad. *Energetický regulační věštník, Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 3/2017, ze dne 26. září 2017, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie*.
<https://www.tzb-info.cz/docu/predpisy/download/CR3-2017.pdf>.
- [32] Dodavatelelektriny. *Jak odhadnout spotřebu elektřiny v domácnosti*.
<https://dodavatelelektriny.cz/uzitecne-informace/jak-odhadnout-spotrebu-elektriny>.
- [33] EnergySim. *Jak odhadnout spotřebu elektřiny v domácnosti*.
<https://www.bydlimesfilipem.cz/cs/kalkulacky/kalkulacka-klimatizace>.



Seznam zkratk

- DS ■ distribuční soustava
- ERÚ ■ Energetický regulační úřad
- PDS ■ provozovatel distribuční soustavy
- VtE ■ větrná elektrárna