

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh větrné elektrárny**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš DUDÍK**  
Osobní číslo: **E11N0111P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Návrh větrné elektrárny**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište technické vybavení větrné elektrárny.
2. Uveďte, jaké jsou možnosti připojení větrné elektrárny k síti.
3. Navrhněte konkrétní typ elektrárny pro průměrnou rychlost větru.
4. Posuďte ekonomickou návratnost této elektrárny.
5. Zhodnoťte pozitivní i negativní vlivy větrných elektráren na životní prostředí.

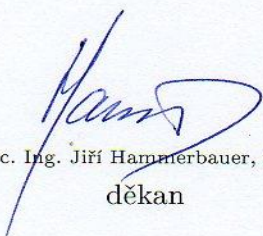


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


1. Mastný P., a kol. : Obnovitelné zdroje elektrické energie, ČVUT Praha, 2011
2. William D. Stevenson: Elements of power system analysis, McGraw-Hill Book Company, London, 1982
3. Další literatura dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem větrné elektrárny. Práce obsahuje popis technického vybavení větrné elektrárny. Jedna část se věnuje možnosti připojení k elektrické síti. Hlavním úkolem této práce je návrh konkrétního typu elektrárny pro průměrnou rychlost větru ve zvolené lokalitě. Pro navrženou elektrárnu je vypočtena roční energetická produkce a ekonomická návratnost. V poslední kapitole jsou uvedeny pozitivní a negativní vlivy na životní prostředí.

## **Klíčová slova**

Gondola, generátor, životní prostředí, ekonomická návratnost, Weibullovo rozdělení, výkonová křivka, roční energetický výnos.

## **Abstract**

This master thesis describes the design of wind power plant. Thesis contains description of the technical equipment of wind power plant. One part describes the possibility of connection to the electricity network. The main task of this thesis is to design a particular type of power plant for the average wind speed in the selected location. For designed power plant is calculated annual energy production and economic returns. The last chapter contains positive and negative effects on the environment.

## **Key words**

Nacelle, generator, environment, economic returns, Weibull distribution, power curve, annual energy yield.

## Prohlášení

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě svoji diplomovou práci, kterou jsem zpracoval na závěr magisterského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Dále prohlašuji, že jsem tuto práci zhotovil zcela samostatně, s použitím odborné literatury a dalších zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Prohlašuji, že veškerý software, který jsem použil při zpracování této práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 6. 5. 2013

Tomáš Dudík

## **Poděkování**

Před začátkem mé práce bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu práce Prof. Ing. Janu Mühlbacherovi, CSc. a technickému řediteli firmy Wikov panu Andreji Chrzanowskému za poskytnutí cenných rad, materiálů a konzultací při zpracovávání mé diplomové práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TECHNICKÉ VYBAVENÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY</b> .....	<b>11</b>
1.1 BETONOVÝ ZÁKLAD .....	12
1.2 STOŽÁR.....	13
1.3 GONDOLA A JEJÍ VYBAVENÍ.....	15
1.4 ROTOR .....	19
<b>2 MOŽNOSTI PŘIPOJENÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY K SÍTI</b> .....	<b>21</b>
2.1 SQUIRREL CAGE INDUCTION GENERATOR.....	21
2.2 WOUND-ROTOR INDUCTION GENERATOR WITH VARIABLE EXTERNAL ROTOR RESISTANCE.....	22
2.3 DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR.....	24
2.4 FULL-CONVERTER WIND TURBINE GENERATOR .....	25
<b>3 NÁVRH VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY</b> .....	<b>27</b>
3.1 REALIZACE VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY .....	27
3.2 PODMÍNKY PRO VÝBĚR VHODNÉ LOKALITY .....	28
3.3 NÁVRH VHODNÉ LOKALITY PRO VĚTRNOU ELEKTRÁRNU.....	31
3.4 POPIS VÝPOČTU A NÁVRHU .....	32
3.5 VÝPOČET.....	37
3.6 PARAMETRY NAVRŽENÉ ELEKTRÁRNY .....	41
<b>4 VÝPOČET EKONOMICKÉ NÁVRATNOSTI</b> .....	<b>44</b>
4.1 NÁKLADY .....	44
4.2 VÝNOSY .....	46
4.3 VÝPOČET.....	46
<b>5 POZITIVNÍ A NEGATIVNÍ VLIVY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ</b> .....	<b>48</b>
5.1 POZITIVNÍ VLIVY .....	48
5.2 NEGATIVNÍ VLIVY .....	49
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>53</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>54</b>



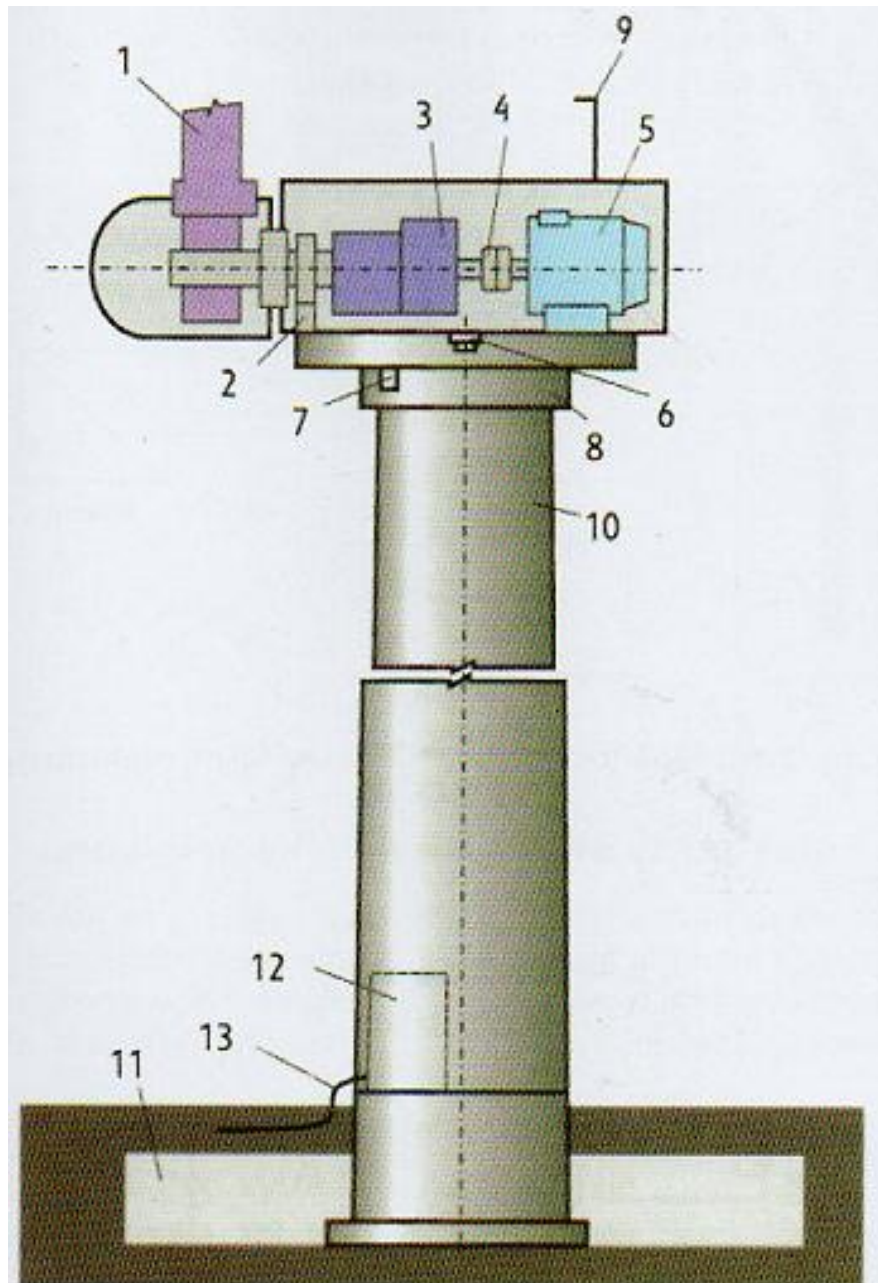
## **Úvod**

Předkládaná práce se zabývá návrhem větrné elektrárny. Text je rozdělen do pěti částí. První část se zabývá popisem technického vybavení větrné elektrárny. Druhá část se zaměřuje na možnosti připojení větrné elektrárny k síti. Ve třetí části je proveden návrh větrné elektrárny. Posouzení ekonomické návratnosti se řeší ve čtvrté části a pátá část popisuje pozitivní a negativní vlivy na životní prostředí.

## Seznam symbolů

$P$ [W].....	Výkon
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ].....	Hustota větru
$A_S$ [m <sup>2</sup> ].....	Plocha
$v$ [m/s].....	Rychlost větru
$c_p$ [-].....	Výkonový koeficient
$n$ [-].....	Drsnost povrchu
$v_r$ [m/s].....	Rychlost větru v referenční výšce
$A$ [-].....	Parametr velikosti
$k$ [-].....	Parametr tvaru
$h$ [m].....	Výška věže
$h_r$ [m].....	Referenční výška
$N_o$ [hod/rok].....	Počet hodin v roce
$T_z$ [let].....	Doba životnosti
$C_v$ [Kč/kWh].....	Výkupní cena
$f$ [-].....	Četnost větru
$E_r$ [kWh/rok].....	Roční energetický výnos
$E_t$ [kWh/rok].....	Teoretický roční energetický výnos
$N_t$ [Kč].....	Náklady na elektrárnu
$N_i$ [Kč].....	Náklady instalační
$N_p$ [Kč].....	Náklady na elektrárnu
$V$ [Kč].....	Výnosy

## 1 Technické vybavení větrné elektrárny



Obr. 1-1 Konstrukce větrné elektrárny (přejato z [6])

1 – list rotoru, 2 – rotorová brzda, 3 – převodovka, 4 – spojka, 5 – generátor, 6 – pohony k natáčení strojovny, 7 – brzda strojovny, 8 – ložiska, 9 – anemometr, 10 – stožár, 11 – betonový základ, 12 – elektrorozvaděč, 13 - přípojka

## 1.1 Betonový základ:

Betonový základ tvoří jednu z nejdůležitějších částí větrné elektrárny a současně se jedná i o nejtěžší díl stavby. Je na něm umístěna celá elektrárna, která má hmotnost stovky tun, proto musí být dostatečně těžký, poněvadž jeho hlavním úkolem je zajištění bezpečného upevnění celé stavby. Hmotnost betonového základu může dosáhnout i přes 1000 tun. Nicméně záleží na konkrétním typu větrné elektrárny.

Prvním úkolem, který musíme před začátkem plánované stavby realizovat, je zjistit stabilitu podloží. To má na svědomí geologický průzkum, který zjistí, zda je nutná úprava podloží. Poté je potřeba vytvořit pevný podklad pro ocelový kruh. To obstará několik centimetrů vysoká betonová deska. Na betonovou desku následně umístíme ocelový kruh (fundament), který je vybaven potrubím na kabely a zároveň otvory pro armování. Dalším krokem je přesné nastavení horního okraje do vodorovné polohy s malou tolerancí. Na řádu přichází armování pomocí ocelové výztuže a montáž trubek, skrz které povedou příslušné kabely. Armaturu je potřeba pospojovat a uzemnit.



*Obr. 1.1-1 Výztuha betonového základu (přejato z [www.csve.cz](http://www.csve.cz))*

Poté je nutné vybetonovat celý základ naráz. Vytvrzení betonu trvá několik týdnů. V poslední řadě přichází na řadu různé druhy nátěrů, protažení kabelů do základového kruhu a úprava okolí betonového základu pomocí zeminy.



## 1.2 Stožár

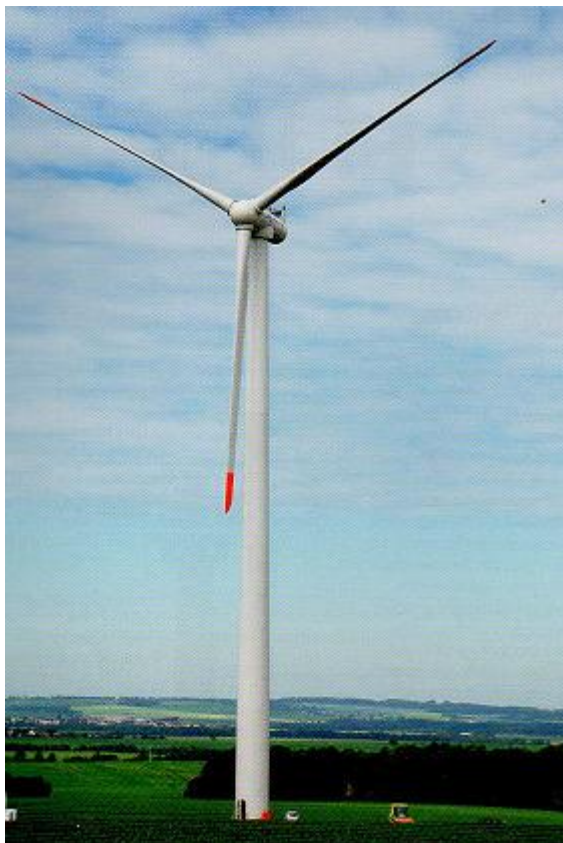
V dnešní době se můžeme setkat se třemi typy stožárů:

- *ocelovým tubusovým*
- *příhradovým*
- *betonovým (prefabrikovaným)*

Velikost stožárů je rozmanitá, nejčastěji nalezneme stožáry s výškou 30 – 115 m.

- ***Ocelový tubusový stožár***

Jedním z nejpoužívanějších stožárů je ocelový tubusový stožár. Tento typ je rozdělen na více segmentů různých délek, většinou od 10 do 30 m. Velikost jednoho segmentu závisí na velikosti větrné elektrárny. Segmenty jsou svařeny z ocelových plechů. Tloušťka plechů je dána polohou segmentu, čím výše je segment umístěn, tím menší je tloušťka plechů. Jako povrchová úprava segmentů se používá žárový zinek nebo barevný nátěr.



Obr. 1.2-1 Ukázka tubusového stožáru firmy Wikov (přejato z publikace ČEZ)

- **Příhradový stožár**

Příhradový stožár se používá při velkých výškách, nad cca 120 m. Z hlediska ekonomických nákladů je výhodnější než tubusový, protože nepotřebuje tolik materiálu na výrobu. Další výhodou je, že se montuje až na místě stavby, odpadá tedy složitá doprava rozměrných částí. Základ se zde netvoří celá betonová deska, ale pouze betonové patky. Tyto stožáry jsou sestaveny pomocí svařovaných ocelových profilů a jednotlivé části se spojují pevnostními šrouby.



Obr. 1.2-2 Příhradový stožár (přejato z [www.csve.cz](http://www.csve.cz))

- **Prefabrikovaný betonový stožár**

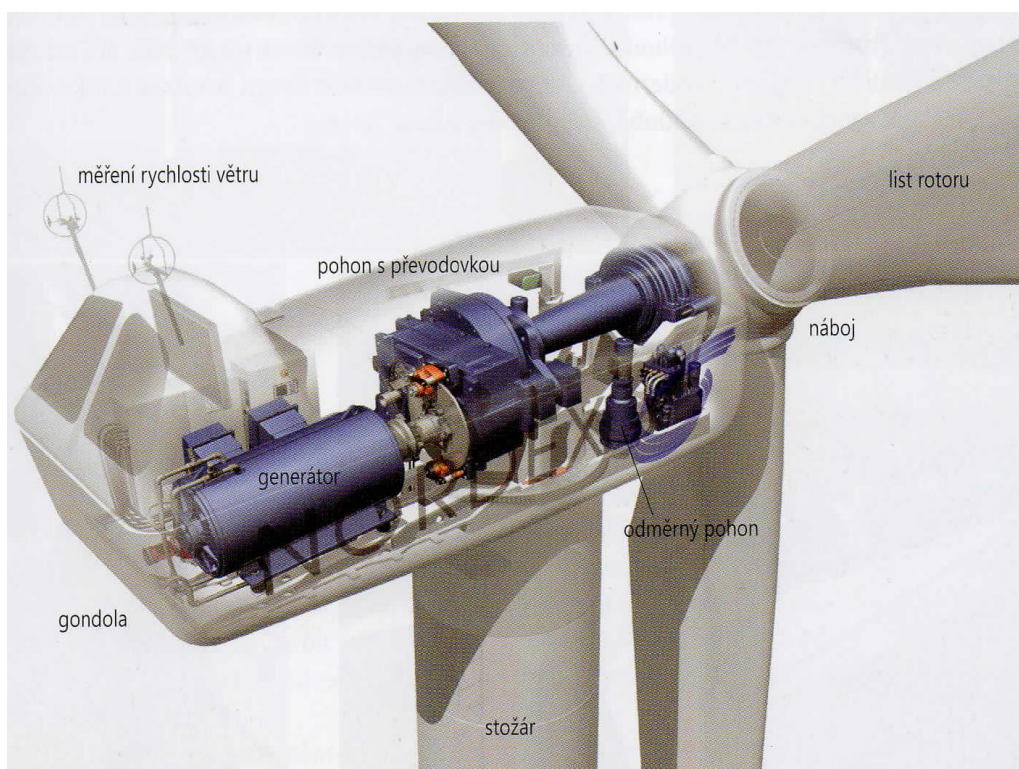
Věže se skládají z jednotlivých prefabrikovaných betonových segmentů, které jsou předem vyrobeny a dopraveny na místo stavby. Segmenty mají různý počet dílů betonové skořepiny (1, 2, 3 nebo 4), která je uvnitř vyztužena ocelí. Výhodou tohoto stožáru je dlouhá životnost, vysoká odolnost proti korozi, menší provozní hluk, velká variabilita z hlediska výšky větrné elektrárny. Nejčastěji můžeme tyto věže vidět u elektráren firmy Enercon.



Obr. 1.2-3 Prefabrikovaný stožár (přejato z [www.csve.cz](http://www.csve.cz))

### 1.3 Gondola a její vybavení

Gondola tvoří srdce větrné elektrárny. Je umístěna na vrcholu stožáru a slouží jako ochrana strojovny větrné elektrárny.



Obr. 1.3-1 Strojovna větrné elektrárny (přejato z[2])

V dnešní době můžeme vidět strojovny s rozdílným vybavením. Základem každé strojovny je nosný rám, což je ocelové těleso, na kterém jsou umístěna všechna zařízení, jako například generátor, převodovka a další. Najdeme zde také hlavní hřídel větrné elektrárny, která se vyrábí jako výkovek. V přední části se na přírubu usadí náboj rotoru, konec hřídele vede do převodovky větrné elektrárny.

- **Převodovka**

V současnosti se můžeme setkat s převodovkami různých druhů. Konstrukce závisí na každém výrobcu větrných elektráren. Zatížení rotoru neustále kolísá, proto jsou převodovky velmi namáhanou částí. Úkolem převodovky je přizpůsobit otáčky rotoru požadavku generátoru. Dalším požadavkem je tichý chod a schopnost pracovat v rozmezí teplot  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $+40^{\circ}\text{C}$ . Nejvíce se používají převodovky s čelním převodem se šikmými zuby, planetové nebo kombinované. Z převodovky se přenese kroutící moment na generátor pomocí pružné spojky.



Obr. 1.3-2 Převodovka (přejato z [www.csve.cz](http://www.csve.cz))



- **Generátor větrné elektrárny**

Generátor se nachází za převodovkou a slouží k přeměně kinetické energie na elektrickou. U větrných elektráren se můžeme setkat se dvěma typy generátorů – asynchronním nebo synchronním. Mezi asynchronní patří Squirrel Cage Induction Generator, Wound Rotor Induction Generator with Variable External Rotor Resistance a Doubly Fed Induction Generator. Jako synchronní generátor se používá Full-Converter Wind Turbine Generator. Konkrétní popis těchto generátorů naleznete v kapitole číslo 2.



Obr. 1.3-3 Synchronní generátor (přejato z [www.wikov.cz](http://www.wikov.cz))

- **System natáčení strojovny**

Abychom využili energii větru co nejefektivněji, musí být zajištěno natáčení celé strojovny při každé změně směru větru. System natáčení může být elektrický nebo hydraulický. Gondola je umístěna na otočném ložisku. Pomocí elektropohonů dojde k natočení celé strojovny na základě pokynu z kontrolního systému. Počet elektropohonů ve strojovně závisí na velikosti elektrárny, obvyklý počet je 2, 4 nebo 6 kusů. Součástí pohonu musí být také brzda, která má za úkol zajistit novou polohu.



Obr. 1.3-4 Elektropohon (přejato z [www.csve.cz](http://www.csve.cz))

- **Brzdy a hydraulické systémy**

Aerodynamické brzdy spočívají v natáčení lopatek a mají přednost před mechanickými, protože nejsou tolik namáhány.

Mechanická brzda se používá k úplnému zastavení. Může být umístěna mezi rotor a převodovku, nebo mezi převodovkou a generátorem. Jedná se o kotoučovou brzdu z oceli. Při poruše obě brzdy slouží jako bezpečnostní systémy.

Hydraulické systémy se mohou využívat například k natáčení rotorových listů nebo jako brzda rotoru. Mnohdy jsou tvořeny více okruhy.

- **Anemometr**

Anemometr je přístroj, který slouží k měření rychlosti větru. Umisťuje se na vrchol gondoly většinou společně s větrnou směrovkou, abychom zjistili směr větru. Jsou dostupné v mnoha provedeních, nejčastěji se používají miskové, dále se můžeme setkat s vrtulovými, ultrazvukovými a laserovými. Výhodou nemechanických anemometrů je, že jsou méně citlivé k námraze. Hodnoty z anemometru a směrovky zpracuje program elektrárny, který poté dá signál k natočení lopatek nebo celé strojovny. Důležitou vlastností je chyba měření, která se u lepších anemometrů pohybuje kolem 1%.



Obr. 1.3-5 Anemometr a signalizace (přejato z [www.vestas.com](http://www.vestas.com))

## 1.4 Rotor

Rotor se skládá z rotorového listu a náboje. Náboj spojuje lopatky turbíny s hlavní hřídelí. Lopatky jsou přišroubovány na náboj pomocí šroubů, které jsou zapuštěny v listu. Vysoké nároky jsou požadovány právě na náboj, protože požadujeme vysokou odolnost. Z tohoto důvodu se jako materiál používají speciální litiny.

V současnosti jsou nejpoužívanější třílisté rotory. Je to z důvodu optimálního poměru ceny rotoru a jeho výkonnosti, dále vyváženosti a menšímu mechanickému namáhání. Rotorové listy se dnes vyrábí kompozitních materiálů a jsou navíc vyztuženy nosníkem.



Obr. 1.4-1 Montáž rotoru ke gondole (přejato z [2])

- ***Námraza a ochrana před bleskem***

V zimních měsících se často můžeme setkat s namrzáním lopatek větrné turbíny. Jedná se o nepříznivý jev, který snižuje výkon celé elektrárny a mnohdy má za následek i její odstavení. Vyřešit tento problém můžeme pomocí ventilátorů s topným tělesem, které umístíme do lopatek.

Větrná elektrárna patří mezi vysoké stavby, musíme tedy mít na paměti možnost zásahu bleskovým výbojem. Množství bleskových výbojů závisí na geografických podmínkách. Ochrany před bleskem lze u větrných turbín dosáhnout mnoha způsoby. Nejčastěji je snaha vést blesk od špičky lopatky až do země. Lopatky jsou chráněny měděným vodičem, který se táhne až k rotorovému náboji. Z náboje je výboj veden přes zadní část gondoly. Poté postupuje měděnými dráty podél věže až k uzemňovací soustavě. Elektrické zařízení uvnitř elektrárny je chráněno pomocí přepětových ochran.

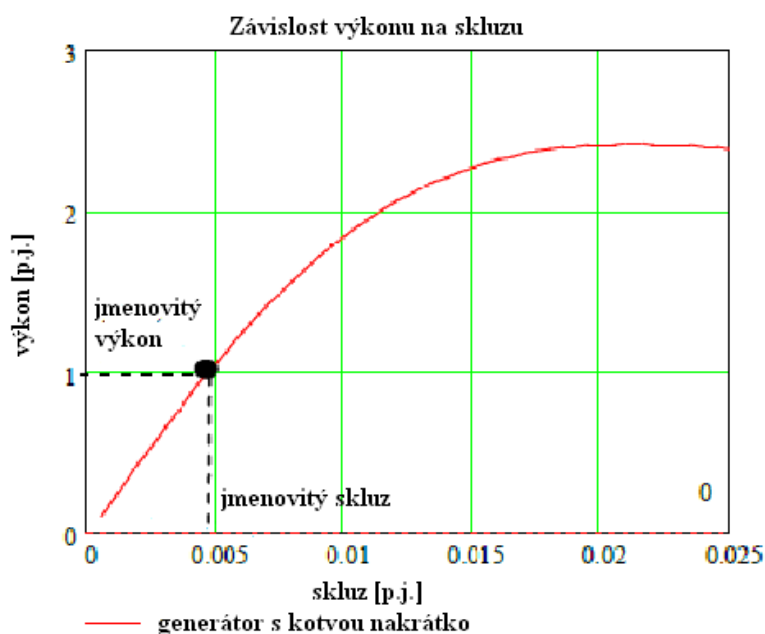


## 2 Možnosti připojení větrné elektrárny k síti

Tato kapitola se věnuje možnostmi připojení větrné elektrárny k síti. Připojení zcela závisí na typu použitého generátoru. Jednotlivé koncepty jsou zde postupně popsány.

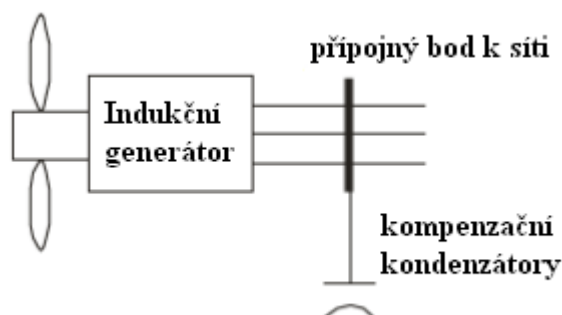
### 2.1 Squirrel Cage Induction Generator

Prvním typem je asynchronní generátor s kotvou nakrátko. Generátor pracuje v generátorickém stavu v nadsynchronních otáčkách soustrojí, v podsynchronních otáčkách pracuje jako motor. Rozdíl mezi synchronní rychlostí, která odpovídá frekvenci VN sítě, a provozní rychlostí soustrojí je skluz (v jednotkách nebo procentech). Záporný skluz znamená, že větrná turbína pracuje v režimu generátoru. Běžné provozní skluzy pro indukční generátor mají hodnotu mezi 0 % a -1 %. Točivý moment se téměř lineárně zvyšuje s rychlostí. Na obrázku 2.1-1 je vidět závislost výkonu na skluzu. Generátor dosahuje jmenovitých hodnot při skluzu 0,005 (0,5 %). Výstupní činný výkon se mění v úzkém rozsahu jmenovitého skluzu. Z přirozeného chování tohoto typu generátoru vyplývá, že jalová energie je spotřebována jak v generátorickém, tak v motorickém chodu a čím vyšší je výstupní výkon, tím více se spotřebuje jalového výkonu. Z tohoto důvodu je nutné připojit kompenzační kondenzátory. Tento typ generátoru se vzhledem ke své jednoduchosti používá pro malé a střední větrné elektrárny.



Obr. 2.1-1 Závislost výkonu na skluzu (přejato z [20])

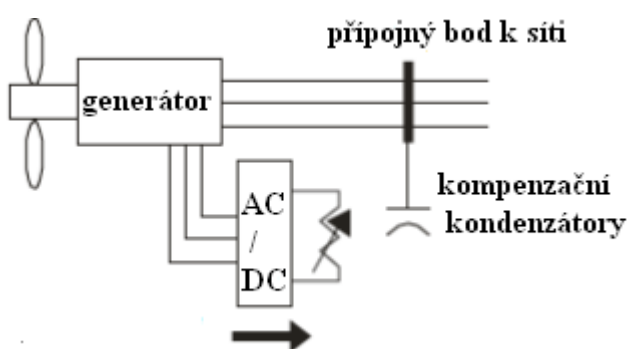
Na obrázku 2.1-2 je znázorněno připojení generátoru s kotvou nakrátko k síti přes transformátor, který je vybaven kondenzátory pro kompenzaci účinníku.



Obr. 2.1-2 Připojení generátoru s kotvou nakrátko k síti (přejato z [20])

## 2.2 Wound-Rotor Induction Generator with Variable External Rotor Resistance

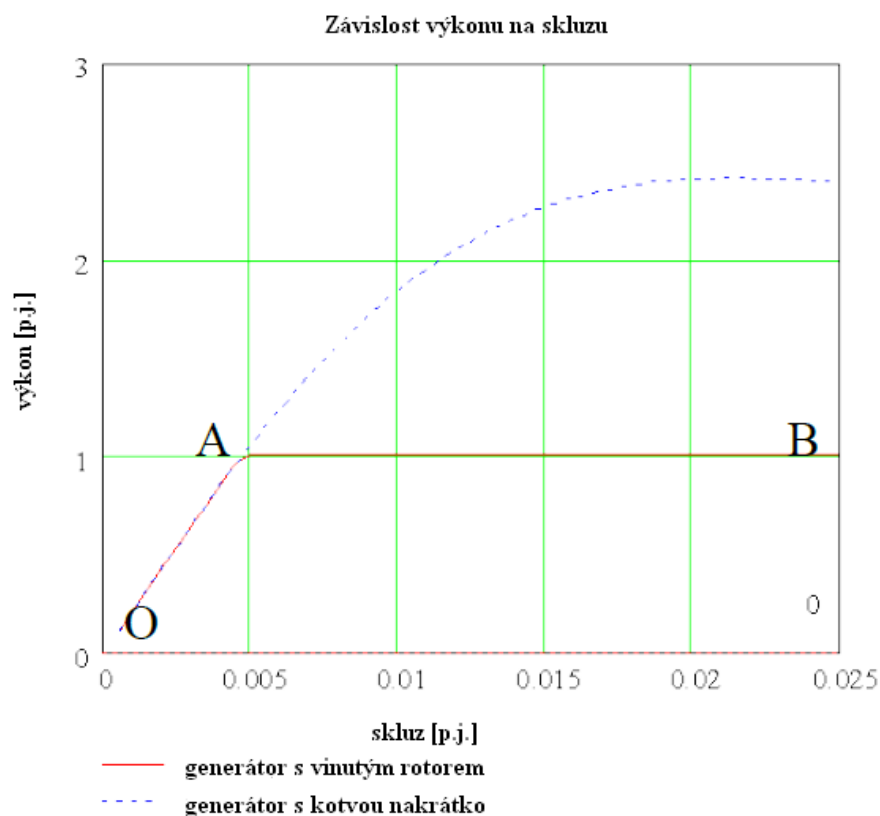
Dalším typem je asynchronní generátor s vinutým rotorem. Na třífázové vinutí rotoru jsou připojeny vnější třífázové odpory, které se postupně spínají a tím zajišťují proměnlivý skluz. Řídící jednotka odporů rotorového vinutí působí velmi rychle, takže umožňuje efektivní změnu odporu rotoru a tím i lepší řízení krouticího momentu. Tento koncept se používá pro elektrárny velkých výkonů. Schéma připojení tohoto typu generátoru je znázorněno na obrázku 2.2-1.



Obr. 2.2-1 Připojení generátoru s vinutým rotorem k síti (přejato z [20])

Generátor s vinutým rotorem je řízen podobným způsobem jako generátor s kotvou nakrátko. Při nízké a střední rychlosti větru je úhel listů rotoru nastaven na optimální hodnotu (např. 0 stupňů) a spínač vnějšího rotorového odporu udržuje minimální vnější odpor (např. 0  $\Omega$ ). To znamená, že v tomto rozmezí rychlosti větru je provoz 2. typu generátoru stejný jako u 1. typu.

Když výstupní výkon větrné turbíny dosáhne jmenovité hodnoty (při jmenovitém skluzu), řízení rotorového odporu je nastaveno tak, aby udrželo konstantní výstupní výkon. Je-li úhel lopatek udržován na konstantní hodnotě v nulové poloze, rychlost rotoru a tím i skluz se budou měnit v závislosti na rychlosti větru.



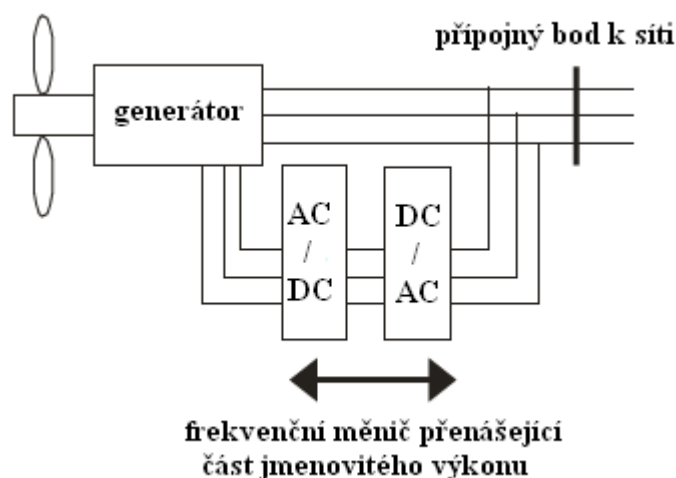
Obr. 2.2-2 Závislost výkonu na skluzu (přejato z [20])

Provoz však při vyšších hodnotách skluzu vytváří nadměrné tepelné ztráty z důvodu vysokého odporu vinutí. Ztráty v rotorovém odporu lze minimalizovat tím, že úhel natočení listů bude udržovat rychlost rotoru v malých odchylkách od jmenovité hodnoty skluzu. Jak je znázorněno na obrázku 2.2-2, mezi body 0A je větrná turbína provozována při optimálním natočení listů rotoru ( $0^\circ$ ). Mezi body AB je provozována s proměnlivým nastavením odporu vinutí rotoru tak, aby byl jmenovitý výkon konstantní, zatímco úhel natočení listů je řízen tak, aby byl minimalizován skluz (jeho hodnota by měla být co nejbližší bodu A).

Normální provozní skluz pro indukční generátor je mezi 0 % a -1 %, avšak u generátoru s vinutým rotorem se skluz pohybuje v -10 %.

### 2.3 Doubly Fed Induction Generator

V tomto případě se jedná o asynchronní generátor s dvojitým buzením. Tento typ generátoru byl speciálně vyvinut pro větrné elektrárny za účelem zvýšení produktivity elektrické energie. Rychlost rotoru se může měnit v závislosti na skluzu od 0,3 do -0,3, výstupní výkon je řízen přes frekvenční měniče, jejichž velikost se obvykle dimenzuje do 30 % jmenovitého výkonu větrné elektrárny. Pod jmenovitou rychlostí větru je větrná turbína provozována při optimálním koeficientu  $c_p$  a nad jmenovitou rychlostí větru při požadovaném  $P_{jmen}$ . Tím je dosaženo maximální výroby při nízkých až středních rychlostech větru. Když je rychlost větru větší než jmenovitá, tak je aerodynamika rotoru řízena regulací natočením listů rotoru tak, aby se omezila rychlost rotoru a tím rovněž přenášená mechanická zátěž na soustrojí.



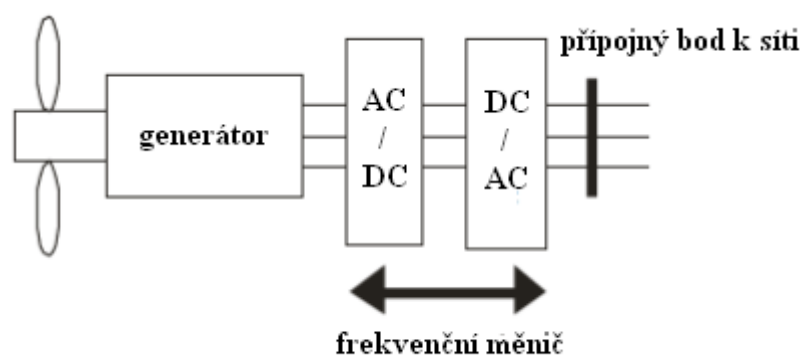
Obr. 2.3-1 Připojení dvojitě buzeného generátoru k síti (přejato z [20])

Činný a jalový výkon lze díky frekvenčním měničům řídit nezávisle a okamžitě v mezích konstrukčních limitů. Schopnost řízení činného výkonu je využita pro maximalizaci  $c_p$  pod jmenovitou rychlostí větru a k omezení výstupního výkonu nad jmenovitou rychlostí větru. Schopnost řízení jalového výkonu je využita k řízení vlastního jalového výkonu, účinníku nebo napětí. Použití frekvenčních měničů umožňuje provozovat rotor větrné elektrárny při různých oběžných rychlostech, různých od synchronní rychlosti sítě, tím že rychlost rotoru není synchronizována s rotujícím magnetickým polem statoru. Tento typ generátoru disponuje flexibilním připojením do sítě, dobrou kvalitou výkonu a napětí a splněním předpisů pro dodávky elektrické energie do VN sítě.



## 2.4 Full-Converter Wind Turbine Generator

V tomto případě se jedná o soustrojí integrující generátor s proměnnou rychlostí a frekvenční měniči o velikosti odpovídající celkovému jmenovitému výkonu větrné elektrárny. Díky technologickým pokrokům ve vývoji frekvenčních měničů a jejich sníženým výrobním nákladům v posledních letech bylo možné zkonstruovat tento typ větrné turbíny. Na obrázku 2.4-1 je zobrazeno připojení tohoto konceptu k síti.

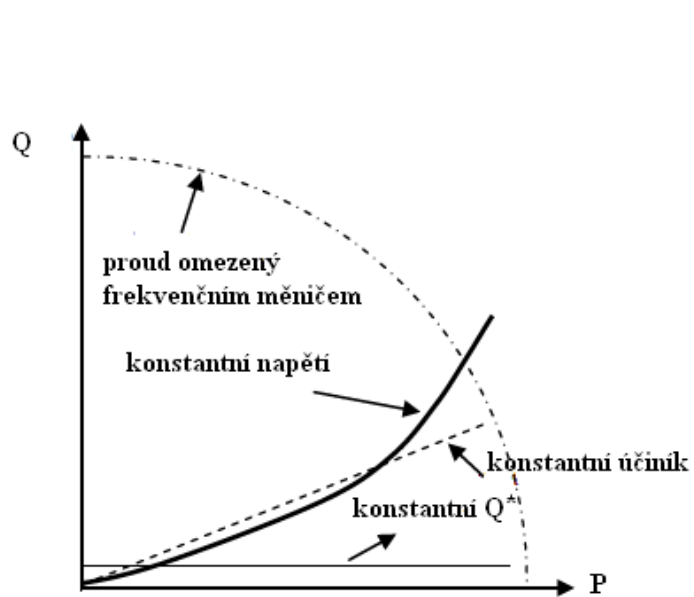


Obr. 2.4-1 Připojení synchronního generátoru k síti (přejato z [20])

Řídicí algoritmus je podobný jako u předchozího typu generátoru. Větrná turbína se opět provozuje při optimálním koeficientu  $c_p$  v provozních podmínkách pod jmenovitou rychlostí větru a nad jmenovitou rychlostí větru se provoz řídí na požadovaný jmenovitý výkon  $P_{jmen.}$ . Maximální výroba elektrické energie nastává při nízké a střední rychlosti větru. Pokud je rychlost větru větší než při jmenovitých podmínkách, zajistí regulace natáčení listů rotoru požadované nastavení lopatek, tím omezí rychlost rotoru a minimalizuje mechanické zatížení. Využití řízení činného a jalového výkonu je stejné jako u předchozího generátoru.

Frekvenční měnič umožňuje oddělení generátoru a rozvodné sítě, čímž lze využít tlumícího efektu mezi rotorem a vlastní sítí VN. Tím se zamezuje přenosu nechtěných zátěžových dynamických stavů na celé soustrojí. Pokud je frekvence rozvodné sítě 50 Hz nebo 60 Hz, vinutí statoru generátoru může pracovat při variabilní frekvenci. Dočasná nerovnováha mezi aerodynamickou energií a vyráběnou energií během přechodového jevu je regulována systémem natáčení listů lopatek, dynamickými brzdami a frekvenčními měniči.

Obrázek 2.4-2 ukazuje vztah mezi jalovým a činným výkonem. Je důležité respektovat proudové omezení frekvenčního měniče kvůli použití elektronických spínačů (IGBT).



Obr. 2.4-2 Vztah mezi jalovým a činným výkonem (přejato z [20])

## 3 Návrh větrné elektrárny

### 3.1 Realizace větrné elektrárny

Proces mezi plánováním a začátkem provozu větrné elektrárny je velmi dlouhý a trvá několik let. Vše začíná tím, že si developer nebo investor zvolí lokalitu pro výstavbu větrné elektrárny nebo větrné farmy. Následuje průzkum dané lokality z několika hledisek. Tím nejdůležitějším je to, zda vůbec má daná oblast dobrý větrný potenciál. Potřebná data lze například zjistit z okolních meteorologických stanic nebo z Českého hydrometeorologického ústavu. Dále se zkoumá, zdali je prostředí vhodné pro zástavbu; elektrárna se nesmí nacházet v chráněné oblasti, v blízkosti památek a obydlí. Důležitá je i možnost dopravy jednotlivých dílů elektrárny na příslušné místo a k dispozici musí být rovněž připojení k elektrické síti.

Shledá-li investor zkoumaná hlediska za vyhovující, předstupuje před obec, na jejímž katastru se stavba elektrárny plánuje, s cílem získat souhlas ke stavbě. Jednání o výstavbě většinou provází referendum mezi obyvateli uspořádané příslušnou obcí. V případě souhlasu obce začíná investor připravovat veškeré podklady a povolení. Musí si zajistit souhlas vlastníků pozemku, zjistit možnost připojení k elektrické síti a její současný stav, zahájit vlastní měření větrného potenciálu v dané oblasti minimálně po dobu jednoho roku a požádat určitou společnost o posouzení vlivu na životní prostředí (EIA).

Posouzení vlivu spočívá v hodnocení dopadu na okolní krajinu, faunu, flóru a obyvatele. Zde je největší rozdíl mezi výstavbou jedné elektrárny a výstavbou větrného parku, protože u jedné elektrárny je většinou dán souhlas k výstavbě již po prvním kole průzkumu EIA, kdežto u větrného parku je případně dán souhlas až po předložení dokumentace, což znamená po druhém kole. Po dobu studie EIA má investor dostatek času k získání příslušných pozemků. Dále je potřeba změnit územní plán obce. Jedná se o dlouhodobou záležitost, ale v určitých případech lze začít se změnou již při procesu EIA. Po vydání územního rozhodnutí a při pozitivním výsledku posudku EIA si investor nechá vypracovat studii připojitelnosti k elektrické síti a požádá o rezervaci kapacity sítě.

Poté je zahájeno územní řízení, které řeší konkrétní provedení, postupy a umístění stavby. Následuje stavební řízení, které se zabývá technickým provedením stavby. Výsledkem tohoto řízení je stavební povolení, jehož získání umožňuje zahájit stavbu větrné elektrárny. Před samotným započítáním stavby je ještě potřeba zajistit financování projektu. To je obvykle uskutečněno pomocí bankovního úvěru.

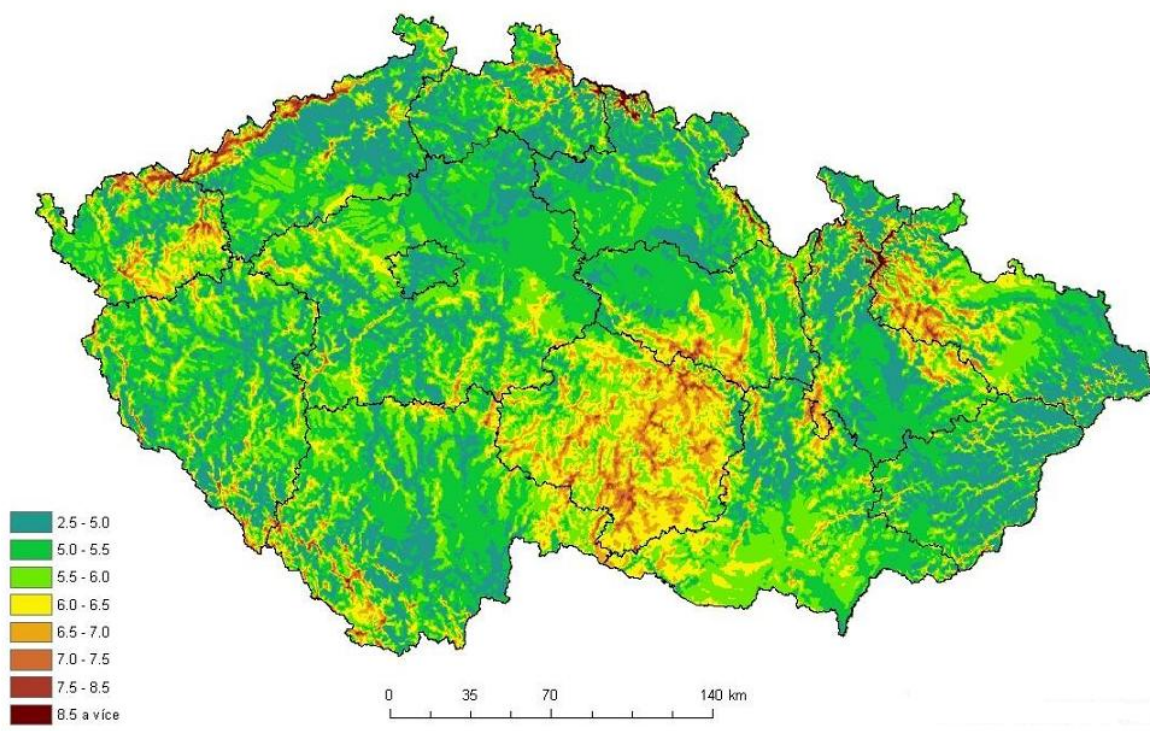
Stavba a montáž větrné elektrárny je záležitost několika týdnů. K doladění nastavení, odhalení a odstranění poruch poté dochází při zkušebním provozu. Ten může trvat týdny až měsíce. Před uvedením do ostrého provozu je rovněž potřeba vykonat kolaudační řízení. To provádí stavební úřad, který zkontroluje, zdali se stavba shoduje s dokumentací, a případně určí provozní podmínky. V případě úspěšného kolaudačního řízení již začíná provoz větrné elektrárny.

### **3.2 Podmínky pro výběr vhodné lokality**

- *Větrný potenciál*

Základním kritériem pro umístění větrné elektrárny jsou dobré větrné podmínky v dané oblasti. Teoretický výkon elektrárny nejvíce ovlivňuje právě vítr. Údaje o meteorologických podmínkách se v České republice zaznamenávají již po mnoho let. Samozřejmě se nejčastěji využívají k předpovědi počasí a pro letectví, ale jsou i dobrým počátečním východiskem pro návrh větrné elektrárny. Z údajů se sestaví mapa větrnosti, která je znázorněna na obrázku 3.1-1. Předpoklad dobrých povětrnostních a výrobních podmínek lze určit i z již provozovaných větrných elektráren v okolí. Ovšem ve většině případů je potřeba vykonat důkladné měření rychlosti větru minimálně po dobu jednoho roku na konkrétním místě. Hodnoty ze stanice vzdálené jen několik kilometrů mohou být totiž nepřesné, protože neberou v úvahu drsnost povrchu kolem plánovaného místa stavby. Z tohoto důvodu by mohlo dojít k podcenění skutečného potenciálu větrné energie v uvažované lokalitě. Nejlepší podmínky se obecně nacházejí v horských oblastech nebo na pobřeží.

Výsledné pole průměrné rychlosti větru v m/s ve výšce 100 m

Obr. 3.2-1 Mapa větrnosti České republiky (přejato z [www.ufa.cas.cz](http://www.ufa.cas.cz))

- **Umístění a drsnost povrchu**

Z hlediska umístění větrné elektrárny je nejvýhodnější široký a otevřený prostor ve směru převládajícího větru. Nejvhodnějšími místy jsou zaoblené kopce. Záleží na tom, jak velké jsou překážky a kolik se jich před větrnou elektrárnou nachází, protože drsnost povrchu ovlivňuje rychlost větru: čím je větší drsnost, tím více je vítr zpomalen. Nejvíce tedy rychlost větru ovlivňují vysoké překážky, jako jsou budovy nebo stromy. Nejmenší vliv má naopak vodní nebo písčité plochy. Drsnost povrchu je důležitý údaj, který se zahrnuje při přepočtu rychlosti větru a je označován jako koeficient drsnosti  $n$ .

Tab. 3.2-1 Tabulka drsnosti

Typ povrchu	$n$
hladký povrch (vodní hladina, písek)	0,14
louka s nízkým travnatým porostem	0,16
vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
porosty vysokých kulturních plodin	0,21
lesy	0,28
vesnice a malá města	0,48

Vzorec pro přepočet:

$$v = v_r * \left(\frac{h}{h_r}\right)^n$$

kde:  $v$  [m/s] je rychlost větru ve výšce věže

$v_r$  [m/s] je rychlost větru v referenční výšce

$h$  [m] je výška věže

$h_r$  [m] je referenční výška

$n$  [-] je drsnost povrchu

- ***Doprava materiálu a geologické podmínky***

Důležitými faktory při zkoumání lokality jsou také geologické podmínky a možnost dopravy materiálu. Je nutné vzít v úvahu, že v případě nedostatečně pevného a stabilního podloží musí dojít k jeho zpevnění, což má samozřejmě vliv na celkovou ekonomii stavby. Ekonomii ovlivní i případné budování silnice pro nákladní vozy, které budou dopravovat jednotlivé díly elektrárny.

- ***Připojení k síti***

Neméně významným aspektem je také možnost připojení větrné turbíny k elektrické síti. Výstavba nové sítě je velmi nákladná, takže bychom se měli snažit postavit výrobu poblíž vedení vysokého napětí. Síť, na kterou je větrná elektrárna připojena, by měla být také schopna přijmout dodávanou energii. V opačném případě je potřeba kapacitu elektrické sítě zvýšit.

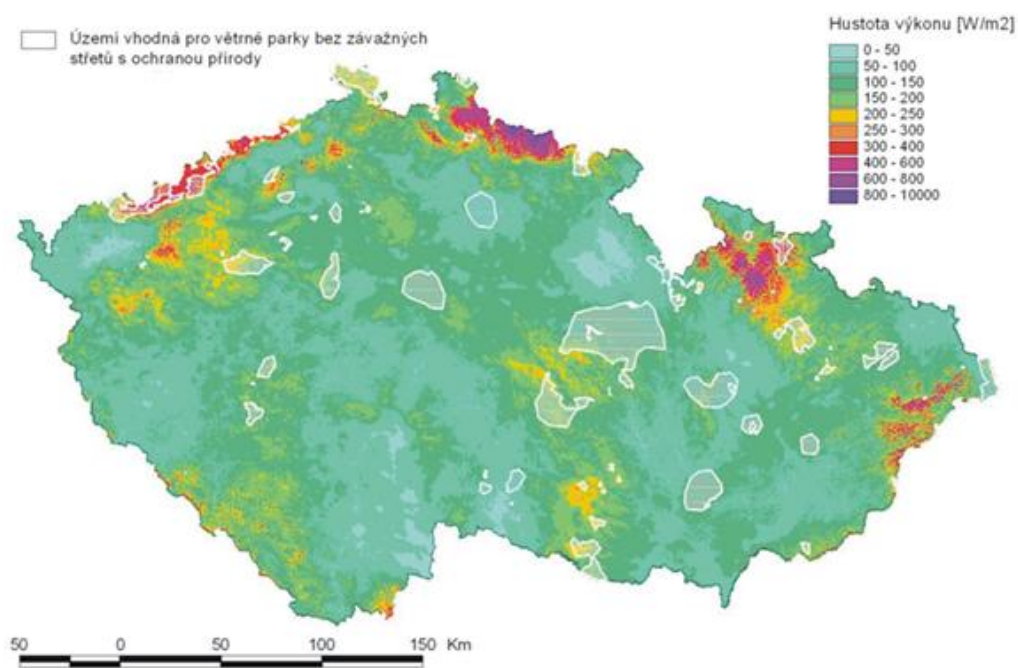
- ***Ostatní podmínky***

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, větrné turbíny se nesmí nacházet v chráněné oblasti a nesmí se budovat ani v blízkosti obydlí a napříč tahových cest ptactva. Tyto a další podmínky jsou popsány v kapitole číslo 5, která se zabývá vlivem na životní prostředí.



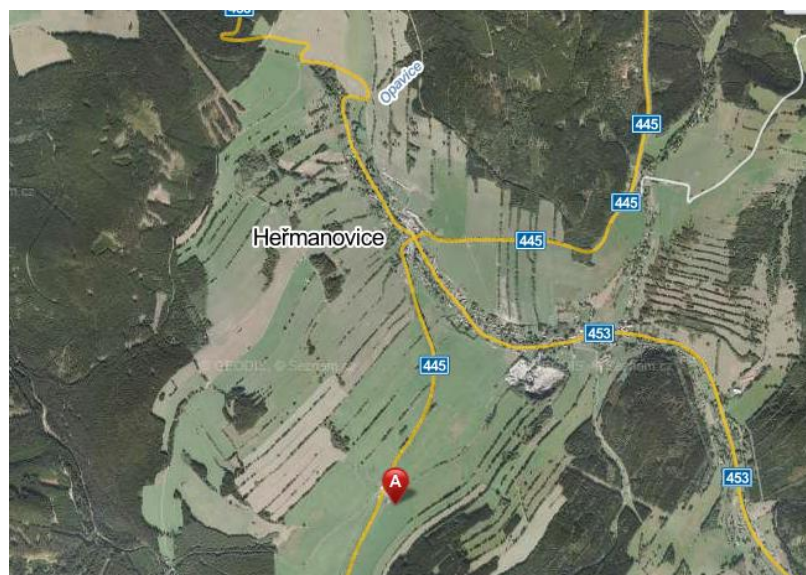
### 3.3 Návrh vhodné lokality pro větrnou elektrárnu

Při výběru lokality jsem nejprve bral v potaz území s dobrým větrným potenciálem v kombinaci s vhodným umístěním elektrárny v oblasti bez závažných střetů s ochranou přírody, jak je naznačeno na obrázku 3.3-1.



Obr. 3.3-1 Větrná mapa (přejato od firmy Wikov)

Zvolená oblast se nachází ve Slezsku v okrese Bruntál u obce Heřmanovice v nadmořské výšce 700 m. Umístění větrné elektrárny je znázorněno na obrázku 3.3-2.



Obr. 3.3-2 Umístění větrné elektrárny (přejato z [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz))

- ***Větrné podmínky***

V okolí elektrárny je průměrná rychlost větru přibližně 3,46 m/s v 10 m nad terénem. Tato rychlost tedy bude sloužit k návrhu a výpočtu dle zadání.

- ***Povrch a geologické podmínky***

Terén kolem obce Heřmanovice je tvořen hustými lesy a ornou půdou. Pro výpočet tedy budeme zohledňovat drsnost povrchu o hodnotě  $n = 0,28$ . Z hlediska geologie se v oblasti vyskytují zvrásněné a přeměněné horniny z období prvohor. Nalezneme zde fylity, břidlice, krystalické rudy s křemenem a místy vápenec. Můžeme tedy usoudit, že pravděpodobně nebude potřeba zpevnit podloží nebo provést změnu typu základu.

- ***Připojení k elektrické síti a dopravní dostupnost***

Vedení VN vede podél silnice č. 445, po které je možná doprava materiálu. Vzdálenost elektrické sítě od stavby je přibližně 150 m a vzdálenost vozovky zhruba 100 m.

- ***Vzdálenost od obce a přítomnost rezervace***

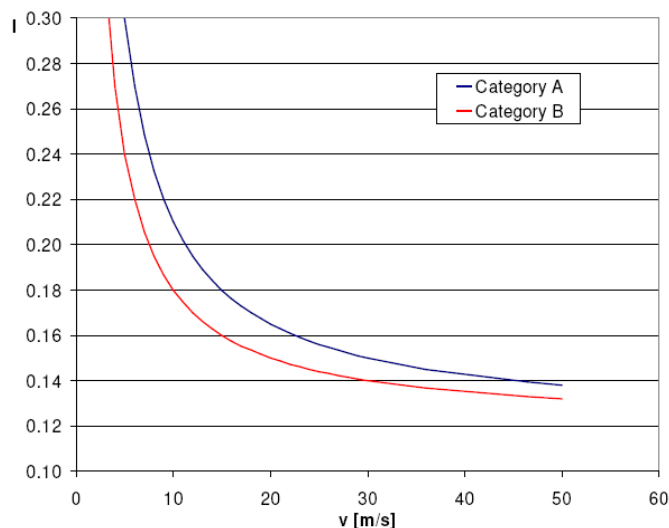
Větrná elektrárna je umístěna mimo Chráněnou krajinnou oblast Jeseníky a nachází se více jak 1 km od obce, čímž by neměla překročit hlukové limity.

### **3.4 Popis výpočtu a návrhu**

- ***Měření větru a určení třídy turbíny***

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, základem návrhu je měření rychlosti větru v dané lokalitě minimálně po dobu jednoho roku. Tato doba ale mnohdy nestačí k určení skutečného větrného potenciálu, protože nebereme v úvahu dlouhodobé chování klimatu. Z toho plyne, že čím delší dobu provádíme měření, tím větší představu získáme o skutečném potenciálu v konkrétním místě. Měření se provádí pomocí anemometrů, které jsou umístěny v různých výškách, a to v závislosti na výšce elektrárny.

Z naměřených hodnot získáme údaje o rychlosti větru a jeho nejčastějším směru, a tak můžeme stanovit kategorii intenzity turbulence. Intenzitou myslíme střední hodnotu rychlosti větru vůči maximu a získáme ji jako podíl odchylky větru k 10minutové průměrné rychlosti. Graf nám udává závislost intenzity na rychlosti větru; určíme v něm mezní kategorii turbulence, která může být v kategorii A nebo B.



Obr. 3.4-1 Kategorie intenzity turbulence (přejato od firmy Wikov)

Dalším důležitým faktorem je stanovení třídy větrné turbíny pro danou lokalitu. Třídy jsou rozděleny do tří kategorií dle průměrné roční rychlosti větru ve výšce gondoly, extrémních větrných rychlostí, které se v konkrétním místě mohou vyskytnout, a dle kategorií turbulence. Třída III odpovídá nízké průměrné rychlosti do 7,5 m/s, třída II střední rychlosti od 7,5 do 8,5 m/s a třída I vysoké rychlosti do 10 m/s.

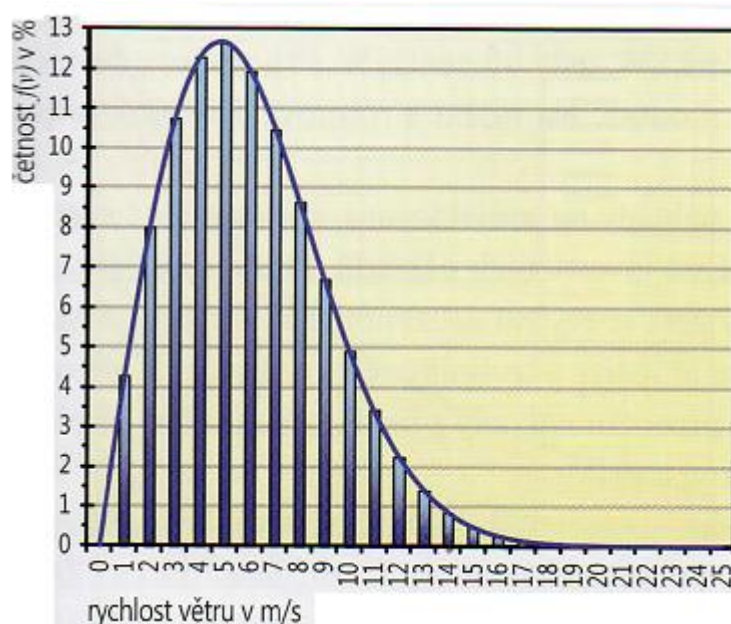
Tab. 3.4-1 Třídy větrné turbíny

Třída větrné turbíny	I	II	III
$v_{\text{ref}}$ [m/s]	50	42,5	37,5
$v_{\text{pr}}$ [m/s]	10	8,5	7,5
A, $I_{15}$	0,18	0,18	0,18
B, $I_{15}$	0,16	0,16	0,16

- **Weibullovo rozdělení**

Hodnoty z měření využívají jak projektanti, kteří vyžadují informace pro optimalizaci návrhu, aby tím minimalizovaly náklady na výrobu, tak investoři, kteří potřebují odhadnout své příjmy z výroby elektřiny. Musíme tedy popsat kolísání rychlosti větru a jeho četnost. To se provede pomocí Weibullova rozdělení, které nám znázorňuje hustotu rozdělení pravděpodobnosti rychlosti větru. Je to tedy závislost relativní četnosti větru na jeho rychlosti. Jelikož vítr fouká v každém okamžiku, tak plocha pod křivkou musí být vždy rovna 1.

Weibullovo rozdělení ovlivňují dva parametry: parametr velikosti ( $A$ ) a parametr tvaru ( $k$ ). Parametr velikosti označuje průměrnou sílu větru v daném místě. Parametr tvaru určuje, jak bude vypadat tvar vrcholu, a pokud nabývá hodnoty 2, nazývá se to Rayleighovým rozdělením. Rozdělení rychlostí není symetrické, protože převládají nízké hodnoty.



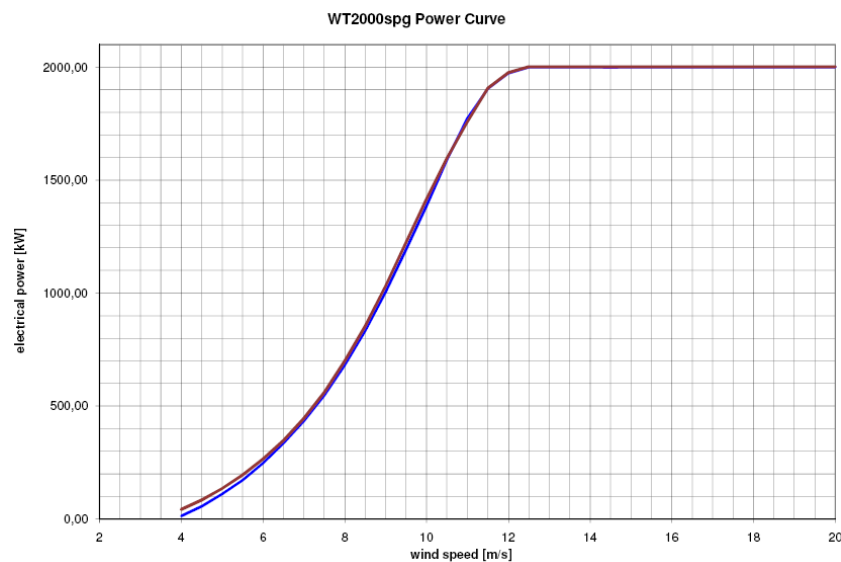
Obr. 3.4-2 Příklad Weibullova rozdělení (přejato z [2])

- **Výkonový koeficient**

Výpočet výkonu ovlivní výkonový koeficient  $c_p$ , který vyjadřuje, jak efektivně turbína přeměňuje energii větru na elektřinu. Ze zákona zachování energie víme, že energie se nemůže ztratit, ale pouze přeměnit na jiný druh energie. Vítr tedy předává kinetickou energii elektrárně, která ji přemění na mechanickou energii. Nemůžeme však využít veškerou energii větru. Znamenalo by to, že by vítr ztratil veškerou kinetickou energii a zůstal by za rotorem. Tím by se zamezilo vstupu dalšího vzduchu do turbíny. Ideální větrná elektrárna zpomalí vítr na  $11/27$  jeho původní rychlosti, což nám udává maximální hodnotu koeficientu  $c_p = 0,59$ .

- **Výkonová křivka větrné turbíny**

Pro výpočet celkové energie potřebujeme znát výkon každé rychlosti větru. Grafickou závislost výkonu na rychlosti větru nám ukazuje výkonová křivka větrné turbíny. Příklad výkonové křivky pro 2MW elektrárnu je znázorněn na obrázku 3.4-3.



Obr. 3.4-3 Příklad výkonové křivky (přejato od firmy Wikov)

Výkonové křivky se získávají z měření, kdy je anemometr umístěn poblíž větrné elektrárny. Při měření nesmí být anemometr umístěn na turbíně nebo poblíž rotoru, protože by hrozilo naměření chybných hodnot. Rotor větrné elektrárny totiž vytváří turbulence. Výsledná čára křivky se získá jako průměr jednotlivých měření pro každou rychlost větru. Výkon elektrárny závisí na třetí mocnině rychlosti větru, takže pokud je chyba měření rychlosti 3 %, tak vyrobená energie může být o 9 % vyšší nebo nižší. Křivka je ohraničena dvěma parametry: rozběhem a zastavením turbíny. Rozběh začíná kolem rychlosti větru 3 – 5 m/s a zastavení turbíny při rychlosti větru 20 – 25 m/s. Výkon vypočítáme dle vzorce:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A_s * v^3 * c_p$$

kde: P [W] je výkon

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] je hustota větru

$A_s$  [m<sup>2</sup>] je plocha rotoru

v [m/s] je rychlost větru

$c_p$  [-] je výkonový koeficient

- **Roční energetický výkon z větrné elektrárny**

Z pohledu návrhu nás nejvíce zajímá, kolik ročně vyrobíme energie. Známe-li hustotu Weibullova rozdělení s parametry  $k$  a  $A$  a současně díky výkonové křivce turbíny výkony pro všechny rychlosti větru, pak můžeme určit roční produkci elektrické energie  $E_r$  (někdy AEY – Annual Energy Yield nebo AEP – Annual Energy Production). Tu využijeme zejména pro výpočet doby návratnosti. K výpočtu se používá vztah:

$$E_r = N_o * \int_{V_{start}}^{V_{stop}} P(v) f(v) dv$$

nebo pro obecný výpočet:

$$E_r = N_o * \sum_i P(v_i) * f(v_i)$$

kde:  $P$  [W] je výkon

$N_o$ [hod/rok] je počet hodin v roce

$f$  [-] je četnost větru

$E_r$  [kWh/rok] je roční energetický výnos

Roční energetickou produkci můžeme zhodnotit pomocí kapacitního faktoru, který u vlastní turbíny stanovíme jako podíl skutečné roční výroby a teoretického maximálního výkonu. Maximální výkon znamená, že by turbína pracovala při jmenovitém výkonu po celý rok. Výsledná hodnota se zpravidla pohybuje do 30 %.

- **Program ALWIN**

K technologickým návrhům a výpočtům se dnes ve většině případů využívá software. Nejinak je tomu i u větrné energie, kde se například využívá program ALWIN. Tento software nám dává možnost výpočtu rychlosti větru v jakékoliv výšce s uvažováním drsnosti povrchu, na základě průměrné rychlosti větru vyřeší pomocí Weibullova rozdělení tvarový parametr ( $A$ ), počítá celkovou roční energetickou bilanci na základě kombinace větrného potenciálu dané lokality a technických údajů o větrné elektrárně. Musíme zohlednit přesnost naměřených meteorologických hodnot, protože právě to je základem všech výpočtů.



### 3.5 Výpočet

- **Výpočet pomocí programu**

Výpočet nejprve provedeme s pomocí programu ALWIN ve společnosti Wikov, poté porovnáme výsledek s obecným výpočtem. Průměrná rychlost ve vybrané lokalitě je 3,46 m/s ve výšce 10 m. Do této oblasti budeme navrhovat větrnou elektrárnu o výkonu 2 MW, která má výšku 80 m.

**Rychlosti větru ve výšce náboje:**

- referenční rychlost  $v_r = 3,46$  m/s
- referenční výška  $h_r = 10$  m
- výška věže  $h = 80$  m
- drsnost povrchu  $n = 0,28$

$$v_h = v_r * \left(\frac{h}{h_r}\right)^n = 3,42 * \left(\frac{80}{10}\right)^{0,28} = 6,2 \text{ m/s}$$

Průměrná rychlost větru na úrovni gondoly je 6,2 m/s. Porovnáme-li vypočtenou hodnotu s tabulkou 3.4-1, tak zjistíme, že se jedná o třídu turbíny III ( $6,2 < 7,5$ ). Konkrétní typ větrné elektrárny tedy bude mít označení W2000SPG HH80 93TCIII.

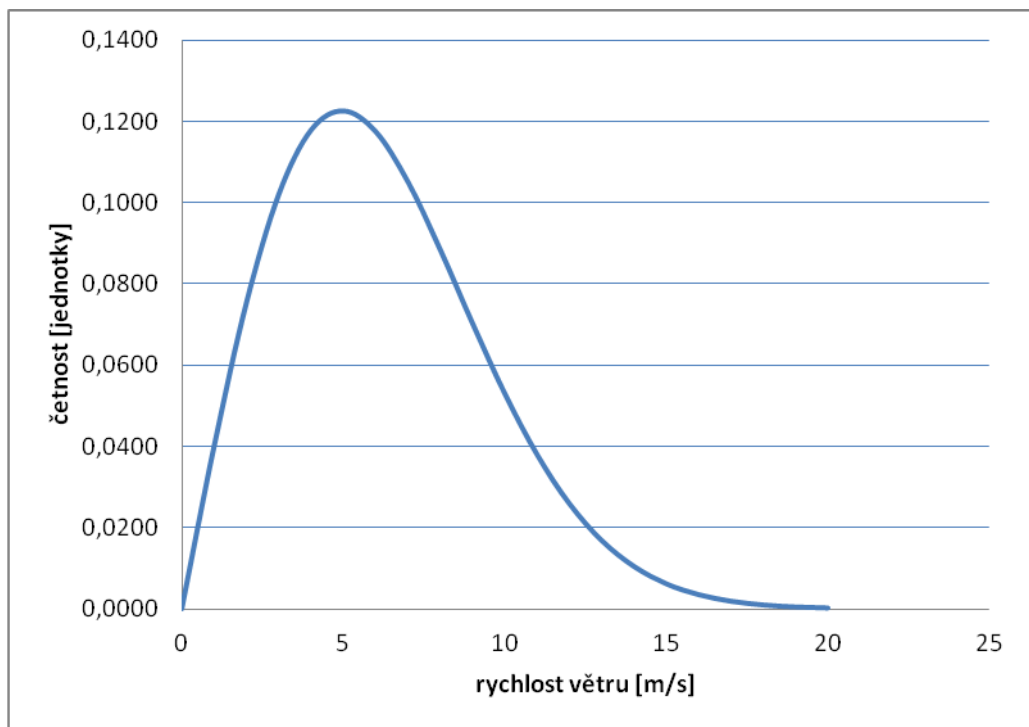
**Weibullovo rozdělení**

Dalším krokem je výpočet parametru velikosti A a Weibullova rozdělení pomocí programu ALWIN.

Zadané údaje:

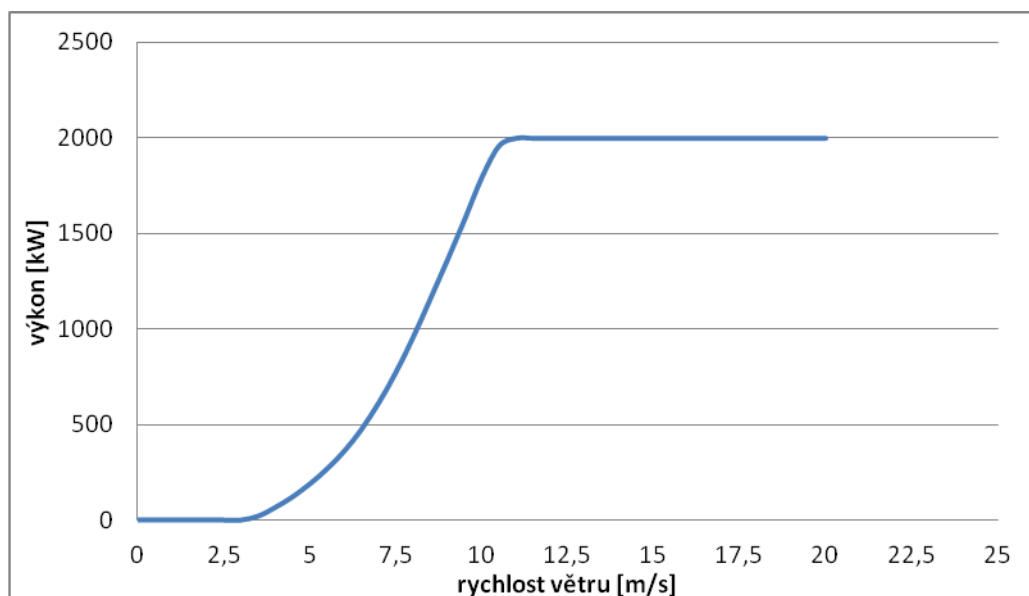
- průměrná rychlost v 80 m  $v = 6,2$  m/s
- zvolen parametr tvaru  $k = 2$

Program určil parametr velikosti  $A = 6,9962$ , křivka Weibullova rozdělení je znázorněna v grafu 3.4-1.



Graf 3.4-1 Weibullové rozdělení pro  $k=2$ ,  $A=6,9962$

K výpočtu celkové roční výroby musíme ještě znát výkonovou křivku zvolené elektrárny. Hodnoty této křivky jsou uvedeny přímo v programu. Znáznorněna je v grafu 3.4-2.



Graf 3.4-2 Výkonová křivka elektrárny W2000SPG

**Výpočet roční energetické produkce**

Pomocí programu ALWIN vypočteme kombinací Weibullova rozdělení a výkonové křivky roční energetické výnosy. Zároveň je zde nadefinován počet hodin za rok  $N_0 = 8766$ . Aplikace využívá vzorce:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A_s * v^3 * c_p$$

$$F(v) = \frac{k}{A^k} * v^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$$

$$E_r = N_0 * \int_{v_{start}}^{v_{stop}} P(v) * f(v) dv$$

Program vrátil výslednou hodnotu roční energetické produkce  $E_r = 5433$  MWh/rok. Musíme nicméně toto číslo považovat za hrubou hodnotu, protože neuvažujeme různé druhy ztrát.

**Kapacitní faktor**

Skutečný energetický výkon:

$$E_r = 5433 \text{ MWh/rok}$$

Teoretický jmenovitý výkon:

$$E_t = N_0 * P_j = 8766 * 2000 = 17532 \text{ MWh/rok}$$

$$\text{kapacitní faktor} = \frac{E_r}{E_t} * 100 = \frac{5433}{17532} * 100 = 30,9 \%$$

Kapacitní faktor vyšel 30,9 %, což je velká hodnota. Kdybychom počítali se ztrátami při roční energetické výrobě, vyšel by kapacitní faktor dle předpokladů (24 – 26 %).

- **Obecný výpočet**

Tento výpočet provedeme dle vzorce:

$$E_r = N_o * \sum_i P(v_i) * f(v_i)$$

V tabulce 3.4-1 jsou pro jednotlivé rychlosti větru zaznamenány hodnoty výkonové křivky a Weibullova rozdělení. Čtvrtý sloupec udává součin výkonu a četnosti větru.

Tab. 3.4-1 Hodnoty z výkonové křivky a Weibullova rozdělení

v [m/s]	četnost f [jednotky]	P [kW]	P * f [kW]
0	0,0000000	0	0,00
1	0,0400343	0	0,00
2	0,0753086	0	0,00
3	0,1019933	0	0,00
4	0,1178694	67	7,90
5	0,1225903	189	23,17
6	0,1174997	361	42,42
7	0,1051083	613	64,43
8	0,0884173	956	84,53
9	0,0702834	1362	95,73
10	0,0529697	1794	95,03
11	0,0379395	2000	75,88
12	0,0258706	2000	51,74
13	0,0168170	2000	33,63
14	0,0104320	2000	20,86
15	0,0061805	2000	12,36
16	0,0034994	2000	7,00
17	0,0018946	2000	3,79
18	0,0009813	2000	1,96
19	0,0004864	2000	0,97
20	0,0002308	2000	0,46

$$E_r = N_o * \sum_i P(v_i) * f(v_i) = 8766 * (7,9 + 23,17 + 42,42 + 64,43 + 84,53 + 95,73 + 95,03 + 75,88 + 51,74 + 33,63 + 20,86 + 12,36 + 7 + 3,79 + 1,96 + 0,97 + 0,46) = 8766 * 621,86 \doteq 5451 \text{ MWh/rok}$$

Při porovnání hodnot roční energetické produkce získané programem ALWIN a obecným výpočtem zjistíme rozdíl přibližně 18 MWh/rok. Chyba obecného výpočtu je dána násobením pouze čísel, kdežto program ALWIN počítá s plochou. Z tohoto důvodu vyjdou pomocí programu přesnější výsledky.

### 3.6 Parametry navržené elektrárny

<b>Provozní data</b>	
Model	W2000
Zapojovací rychlost větru	3,5 m/s
Jmenovitá rychlost větru	11 m/s
Odpojovací rychlost větru	20 m/s
Výpočetní směrnice	Germanichen Lloyd
Třída	TC IIIA
Životnost	20 let

<b>List rotoru</b>	
Délka listu	45,3 m
Materiál	epoxidový sklolaminát
Bleskosvod	integrovaný

<b>Pohon natáčení listů rotoru</b>	
Maximální rychlost natáčení	7 °/s
Typ ložiska uložení listu	dvouřadé kuličkové
Dodavatel pohonu natáčení	WINDTEC

<b>Rotor</b>	
Počet listů rotoru	3
Osa rotoru	horizontální
Poloha vůči věži	proti větru
Průměr rotoru	93,02 m
Plocha rotoru	6793 m <sup>2</sup>
Rozsah otáček	11 - 18,1 ot./min
Jmenovité otáčky	15,7 ot./min
Způsob regulace výkonu	natáčením listů
Úhel kůžele	- 2°
Sklon osy rotoru	4,5°

<b>Převodovka</b>	
Jmenovitý moment	1350 kNm
Typ převodu	planetový/čelní převod
Převodový poměr	1 : 136 - 1 : 83
Mazání převodovky	nucený oběh
Engineering převodovky	ORBITAL2
Výrobce převodovky	Wikov MGI
Spojení převodovka/generátor	elastická spojka
Řízení momentu	elektro-hydraulický princip

<b>Hlavní součásti</b>	
Typ náboje	tuhý
Materiál náboje	litina
Materiál hlavního rámu	litina

<b>Teploty</b>	
Teplota okolí pro odstavené soustrojí	- 20°C až 40°C
Teplota okolí při provozu	- 10°C až 30°C

<b>Maximální okamžitý výkon (<math>P_{max}/P_{rated}</math>)</b>	
$P_{okamžitý}$	1,1
$P_{1min}$	1,05
$P_{10min}$	1,05

<b>Těleso gondoly</b>	
Typ konstrukce	uzavřená
Materiál	polyesterová pryskyřice / skelné vlákno

<b>Směrovací systém</b>	
Typ směrovacího nastavení	aktivní
Typ ložiska směrování	kluzné
Pohonná jednotka	servomotor
Počet jednotek	4
Brzda	třením v kluzném ložisku plus motorová brzda



<b>Brzdový systém</b>	
Provozní brzda	individuální natáčení listů
Aktivace	aktivní při provozu
Typ	ozubení/servomotor
Mechanická brzda	kotoučová
Aktivace	při odstavení
Dodavatel	Svendborg Brakers

<b>Generátor</b>	
Typ generátoru	synchronní
Jmenovitý výkon	2000 kW
Krytí	IP 54
Jmenovité napětí	6,3 nebo 11 kV
$\cos \varphi$	standart $0,95_{\text{ind}} - 0,95_{\text{kap}}$

<b>Řídicí systém</b>	
Typ	PLC, volně programovatelný
Dálkové monitorování	přes modem
Dodavatel	WINDTEC

<b>Věž</b>	
Konstrukce	kuželový tubus z oceli
Výška osy rotoru	80 m
Protikorozní ochrana	ochranný nátěr

Koeficient flikru $c_{\psi}$ během provozu	5
Flikr během spínacího procesu	špičkové proudy při synchronizaci nepřekračují proudy jmenovité

## 4 Výpočet ekonomické návratnosti

V této kapitole se budeme zabývat výpočtem ekonomické návratnosti. Každý projekt je vždy posuzován z hlediska ekonomie. U navržené větrné elektrárny budeme zkoumat ekonomickou návratnost, tedy dobu, za jakou se nám investice vrátí. Návratnost závisí na mnoha faktorech, jako například na době životnosti, technologii, kolísání ceny za kilowatthodinu, rychlosti větru, poruchovosti elektrárny, nákladech na instalaci nebo na velikosti projektu.

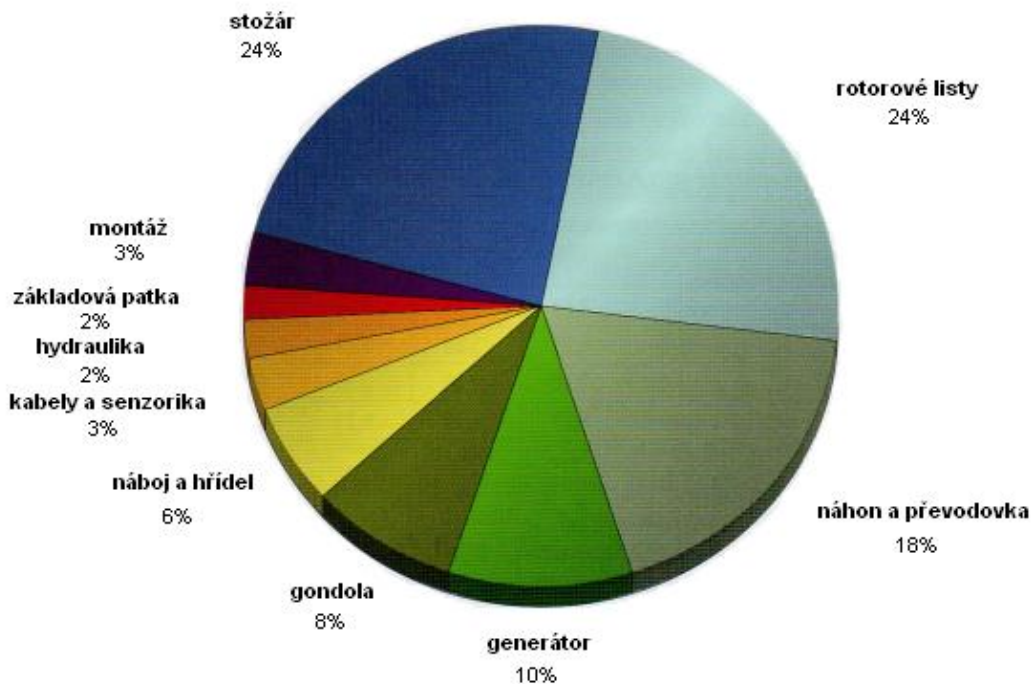
### 4.1 Náklady

Celkové náklady můžeme rozdělit na několik částí:

- *Náklady na technologii větrné elektrárny*
- *Náklady na instalaci a dopravu*
- *Náklady na provoz a údržbu*

- *Náklady na technologii větrné elektrárny*

Výrobci větrných elektráren dnes nabízejí velký sortiment svých výrobků o různé cenové dostupnosti. Obecně samozřejmě platí, že s rostoucím instalovaným výkonem roste i cena elektrárny, která například závisí na výšce věže nebo průměru rotoru. Z důvodů určitých úspor ale neplatí, že by turbína s výkonem 1500 kW byla tři krát dražší než turbína o výkonu 500 kW. Úspory jsou ale možné pouze do určité míry. Zahrnují například elektroniku, ochranné prvky nebo různé další komponenty, jejichž počet se s rostoucím výkonem nemění. Průměrná cena turbíny se pohybuje přibližně kolem 20 – 30 tisíc korun za kilowatthodinu instalovaného výkonu. Náklady na technologii 2 MW elektrárny firmy Wikov vychází na 50 milionů korun.



Obr. 4.1-1 Příklad rozdělení nákladů na větrnou elektrárnu (přejato z [2])

- **Náklady na instalaci**

Náklady na instalaci zahrnují výstavbu silnic, transformátor, vybudování betonového základu nebo například rozšíření elektrické sítě. Velikost nákladů zcela záleží na umístění elektrárny. Stavbu betonového základu nám ovlivní půdní podmínky. Velkou roli také hraje vzdálenost od nejbližší vozovky, tzn. čím odlehlejší bude silnice od elektrárny, tím větší úsek budeme muset dostavět. Dalším významným faktorem je vzdálenost od elektrické sítě, do které bude připojena větrná turbína. Zde velmi závisí na velikosti projektu, protože se více vyplatí vybudovat připojení pro větrný park než pro jednu větrnou elektrárnu. Při připojení větrné farmy (někdy i jedné turbíny) však může nastat další problém, a tím je nedostatečná kapacita sítě. V takovém případě je potřeba elektrickou síť vyztužit. Jedná-li se o velmi vzdálenou lokalitu, do nákladů se výrazně promítnou i výdaje na přepravu. Vysoké instalační výdaje ovšem nemusí vždy představovat problém. To platí pro oblast s vysokým větrným potenciálem. Díky dobrým větrným podmínkám totiž budeme mít levné výrobní náklady, takže se nám vyplatí postavit silnici do těžko přístupné oblasti, zpevnit podloží pod navrhovanou elektrárnou a rozšířit nebo vyztužit elektrickou síť. Výlohy na instalaci dosahují přibližně 30 % nákladů na větrnou elektrárnu. V našem případě je hodnota realizace rovna 15 milionům korun.

- **Náklady na provoz a údržbu**

Údržba a provoz zahrnuje doplňování mazacích olejů, doplňování vody, výměnu, opravu a kontrolu technických systémů. Náklady se mohou stanovit jako určitá procentuální část z nákladů na větrnou elektrárnu (ročně 1 % – 3 % z nákladů na turbínu) nebo se mohou udávat jako pevně stanovená částka za rok. Ročně budeme uvažovat náklady na provoz ve výši 1,3 milionů korun.

## 4.2 Výnosy

Z ekonomického pohledu pro nás výnosy tvoří nejdůležitější část. Určíme je jako součin roční produkce energie a ceny za kilowatthodinu. Výkupní cenu elektrické energie za kilowatthodinu stanoví každý rok Energetický regulační úřad. Pro rok 2013 byla výkupní cena pro větrné elektrárny stanovena na 2,12 Kč/kWh. Roční energetický výnos závisí na rychlosti větru. Velkou roli hraje životnost větrné turbíny a také doba ročního provozu. Elektrárna vyrábí energii až od zapojovací rychlosti větru, která má hodnotu 3 – 5 m/s. Naopak při rychlosti větru větší než 20 – 25 m/s se musí větrná turbína odpojit. Aby elektrárna pracovala spolehlivě, nesmíme opomenout provádět servis a revizi. Navíc musíme brát v úvahu možnost náhlé poruchy, která by zařízení vyřadila na určitou dobu z provozu. Životnost větrné elektrárny je přibližně 20 let.

## 4.3 Výpočet

Rekapitulace hodnot:

- náklady na elektrárnu  $N_t = 50$  milionů Kč
- náklady na instalaci  $N_i = 15$  milionů Kč
- náklady na provoz a údržbu za rok  $N_p = 1,3$  milionů Kč
- roční energetický výnos  $E_r = 5433$  MWh/rok
- výkupní cena elektřiny z větrné elektrárny  $C_v = 2,12$  Kč/kWh
- doba životnosti větrné elektrárny  $T_z = 20$  let

Pro výpočet doby návratnosti  $T_n$  [roky] použijeme vzorec:

$$T_n = \frac{N_t + N_i}{E_r * C_v - N_p}$$

$$T_n = \frac{50 * 10^6 + 15 * 10^6}{5433 * 10^3 * 2,12 - 1,3 * 10^6} = \frac{75 * 10^6}{10217960} = 7,34 \text{ let}$$

Pro výpočet poměru výnosů  $V$  [Kč] a investic  $N_c$  [Kč] použijeme vzorec:

$$\frac{V}{N_c} = \frac{E_r * C_v * T_z}{N_t + N_i + N_p * T_z}$$

$$\frac{V}{N_c} = \frac{5433 * 10^3 * 2,12 * 20}{50 * 10^6 + 15 * 10^6 + 1,3 * 10^6 * 20} = \frac{230359200}{101 * 10^6} = 2,28$$

Doba návratnosti vyšla 7,34 let a poměr mezi výnosy a náklady 2,28. Výsledky jsou pouze orientační, protože neuvažujeme spoustu faktorů.

## 5 Pozitivní a negativní vlivy na životní prostředí

Vliv na životní prostředí se hodnotí u větrných elektráren, stejně jako u každé továrny nebo výroby elektrické energie. Proces stavebního řízení podléhá všem požadavkům dle EIA. Doposud ale bohužel neexistuje žádná technologie výroby, která by byla bez negativních vlivů na prostředí kolem nás. Větrné elektrárny patří mezi obnovitelné zdroje elektrické energie a v porovnání s neobnovitelnými zdroji vyvolávají minimální vlivy na životní prostředí. O větrných elektrárnách existuje stále řada mýtů, které poukazují na jejich negativní vlivy, ovšem množství z těchto záporných působení se dá vyřešit například správným projektováním.

### 5.1 Pozitivní vlivy

- ***Žádné odpadní látky při výrobě***

Obnovitelné zdroje energie jsou prakticky nevyčerpatelné, takže větrná energie je neustále dostupná, a na rozdíl od neobnovitelných zdrojů produkuje větrná energetika čistou energii. Tepelné elektrárny při spalování uhlí zatěžovaly životní prostředí vypouštěním velkého množství oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) a oxidu siřičitého ( $\text{SO}_2$ ). Po zavedení odsíření a dalších ochranných prvků se hodnota produkovaného  $\text{SO}_2$  a  $\text{CO}_2$  výraznou měrou snížila, ale úplně se těchto emisí bohužel zbavit nelze. Větrné elektrárny při svém provozu neprodukují žádný oxid uhličitý ani oxid siřičitý a nepotřebují vodní hospodářství, tím pádem nemají negativní dopad na klima a ovzduší. Zároveň výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů šetří fosilní paliva, která se mohou později lépe využít.

- ***Demontáž a likvidace po skončení životnosti***

Větrná elektrárna je dominantní stavbou, která zabírá jen minimální plochu; jedná se však pouze o stavbu dočasnou. Životnost elektráren je přibližně 20 – 25 let. Po uplynutí základní životnosti může být tato buď prodloužena na základě revizního oprávnění, nebo je provedena demontáž, kdy je provozovatel povinen elektrárnu průkazně zlikvidovat. Likvidace je velmi výnosná, protože řadu materiálů je možno recyklovat, jako např. sklolaminát, měď a ocel. Poté následuje uvedení místa do původního stavu, což je výhoda oproti jiným výrobnám elektrické energie.



- ***Lokality s nestabilní nebo žádnou dodávkou elektrické energie***

Ve světě existuje mnoho oblastí, kde je možno použít pouze tento konvenční typ elektrárny. Je to například z finančních důvodů, protože výstavba tepelné nebo jiné elektrárny by byla náročná. V oblasti také nemusí být přítomny energetické zdroje, jako například uhlí, případně může být špatný potenciál vody nebo slabá sluneční aktivita.

## **5.2 Negativní vlivy**

- ***Stroboskopický efekt a odrazy slunce od lopatek***

Nachází-li se větrná elektrárna mezi námi a nízkým sluncem, vzniká problém s kmitajícím stínem, který může být rušivý. Tomuto jevu se říká stroboskopický efekt. Lopatky se ale otáčejí pomalu, takže kmitání stínu není tak intenzivní. Přesto je nutné tento efekt zohlednit už při projektování. Při vyčíslení celkové doby trvání tohoto jevu musí platit, že větrná elektrárna pracuje, slunce není překryto mraky a pozorovatel je kolmo k rotoru elektrárny. Bylo zjištěno, že doba působení stroboskopického jevu je přibližně 6 hodin za rok. Dalším faktorem, který ovlivňuje tento efekt, je již zmíněné projektování. Dnes se větrné elektrárny projektují nejméně 1 km od obytných míst a tento efekt se projevuje do vzdálenosti 0,6 – 0,7 km. V případě, že by přeci jen hrozilo kmitání stínu, může ovládací program v dotčené době elektrárnu odstavit z provozu.

V dřívějších dobách se rovněž stávalo, že se slunce odráželo od listů rotoru a záblesky působily rušivě. Tomuto jevu se říká diskoeffekt. Tento problém však brzy vyřešili výrobci, kteří začali používat matné barvy na lopatky a tím zamezili odrazům slunce.

- ***Vliv na šíření radiového a televizního signálu***

Z technického hlediska je možné, že by větrná elektrárna mohla rušivě působit na elektromagnetické záření. Díky odrazu a rozptylu elektromagnetického toku by mohla klesnout kvalita přijímaného signálu. Hodnota ale především závisí na technických parametrech dané elektrárny, jako například na konstrukci lopatek, rotoru nebo věže. Stožár elektrárny je stejnou překážkou, jakou je například rozhledna nebo komín. Rušení by přicházelo v úvahu, kdyby byl kovový stožár umístěn přímo mezi blízkou anténou a vysílačem. Tento problém ovšem nastat nemůže, poněvadž se větrné elektrárny nestaví v blízkosti obydlí. Pro případ rušení se ale již v projektu zajistí umístění zesilovače signálu.

- **Hluk větrných elektráren**

Při provozu větrné elektrárny vznikají hlukové emise, na které vždy poukazovali ochránci přírody. Z tohoto důvodu je nutné dodržet hlukové limity. Hluk elektrárny se šíří v závislosti na rychlosti a směru proudění vzduchu, na tvaru krajiny, a s rostoucí vzdáleností se jeho intenzita snižuje. Vliv na okolní prostředí je předmětem zájmu již v projekční fázi, kdy se provádí hluková studie, která závisí na umístění větrné elektrárny a vzdálenosti od obydlení. Dále se během zkušebního provozu elektrárny provádí kontrolní měření, jež má vliv na konečné povolení provozu. Můžeme se setkat se dvěma druhy hluku: aerodynamickým a mechanickým. Aerodynamický hluk vzniká při proudění vzduchu kolem lopatek vrtule a při uvolnění vírů vzduchu hranami jednotlivých listů. Mechanický hluk je celkem ustálený a je dán provedením jednotlivých mechanismů (převodovka, generátor) a celku. Snižování hluku bylo dosaženo úpravou povrchu a tvaru listů. Může nastat nečekaná situace, během které by mohlo dojít k překročení hygienických limitů. V tom případě lze parametrizovat program elektrárny, a tím změnit výkonové a hlukové parametry. V případě větrných farem se hluk jednotlivých elektráren nesčítá, protože se zde řídíme logaritmickou stupnicí.

Dalším diskutovaným tématem byl infrazvuk. Jak se ukázalo při různých měřeních, hodnoty infrazvuku u větrných elektráren jsou podlimitní (jsou tedy nižší, než je práh vnímání). Infrazvuky se mohou vyskytnout pouze v jediném případě, a to při poruše. Působení je však pouze výjimečné a dočasné. Při správném projektování by tedy nemělo dojít k překročení hlukových limitů.



Obr. 5.2-1 Větrné elektrárny u obce Pavlov

- ***Vliv na krajinný ráz***

Velice diskutovaným tématem je vliv větrných elektráren na krajinný ráz. Jedná se totiž o nejcitlivější hledisko při návrhu, a to z toho důvodu, že krajinný ráz hodnotí každý člověk subjektivně. Výstavba elektrárny naruší krajinu v každém případě, ale naruší ji stejně, jako například vedení velmi vysokého napětí nebo komín továrny. Větrné elektrárny se staví tam, kde jsou dobré větrné podmínky. Existují však místa, kde se nesmí nacházet. Patří sem například rezervace, památková území a národní parky. V jiných místech už možnost stavby závisí na posouzení a případném postoji obce a obyvatelstva, které může v referendu vyjádřit svůj názor.

Již ve fázi projektování probíhá hodnocení vlivu na krajinný ráz, kdy se formou vizualizací, map viditelnosti a odborných posudků vytvoří pohledová studie, která bere v úvahu počet větrných elektráren, další větrné farmy nebo jiné dominantní stavby v okolí. Posudek vytvoří EIA. Doposud neexistuje žádný jednoznačný postup, podle kterého by se měl hodnotit vliv na ráz krajiny. Výhodou je, že elektrárna zabírá jen malý prostor, takže není problém nadále provozovat například zemědělskou činnost. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, jedná se o dočasnou stavbu, takže po skončení životnosti se díky demontáži krajina vrací do původního stavu.



*Obr. 5.2-2 Větrné elektrárny na hoře Mravenečník*

- ***Vliv na ptactvo a zvěř***

Větrným elektrárnám se často přisuzovalo, že zabíjejí velké množství ptactva. Pokud jsou ovšem dobře navrženy, tak pro ptáky neznamení výrazné nebezpečí. Elektrárna je pro ně viditelná překážka, takže ji mohou buď obletět, nebo proletět. Přes den je tedy možnost střetu velmi malá. Jiná situace ale nastává v noci nebo za mlhy, kdy je možnost kolize větší. Nemusí však dojít ke střetu přímo s lopatkami, protože točící se lopatky mají kolem sebe vzduchový polštář, který zvíře neusmrtí, nýbrž jen odmrští. Největší pravděpodobnost kolize je na podzim, kdy velké množství ptactva putuje do teplých krajín. Větrné turbíny se proto nesmí budovat tam, kde by narušily jejich tahové cesty a v místech hojného soustředění ptáků. Na to opět dohlíží EIA. Dosud bylo vytvořeno několik studií a průzkumů, avšak nebyl zjištěn žádný prokazatelný vliv větrných elektráren na ptactvo. Více úmrtí mají na svědomí například automobily nebo dráty elektrického vedení.

Byla také provedena studie, která se zabývala vlivem na zvěř žijící kolem větrné elektrárny. Pomocí různých pozorování se zjistilo, že elektrárny zvěř neruší, protože před výstavbou a během provozu bylo množství zvěře v okolí stejné.

## Závěr

V mé diplomové práci jsem měl za úkol vypracovat návrh větrné elektrárny a vypočítat přibližnou dobu návratnosti investic.

První část jsem věnoval popisu technického vybavení, které můžeme najít ve větrné elektrárně.

Ve druhé části jsem uvedl typy generátorů, podle nichž se určují možnosti připojení k elektrické síti.

Třetí část pojednávala o návrhu vhodné lokality pro výstavbu větrné elektrárny a výpočtu roční produkce elektrické energie. Ten jsem provedl pomocí programu ALWIN a obecného výpočtu. Výsledné hodnoty jsem porovnal. Pro další výpočty jsem uvažoval výsledek z programu ALWIN, který byl přesnější.

Čtvrtá část řeší ekonomickou návratnost. Zde jsou spočteny veškeré náklady a výnosy. Výsledná doba návratnosti vyšla 7,34 let. Je to přirozeně hrubý odhad, protože uvažujeme stálou roční produkci elektrické energie a pevné provozní náklady. Naopak neuvažujeme ztráty při výrobě, platby za úroky nebo například diskontování. To má také velký vliv, protože počítáme s dnešními cenami. V budoucnu bychom měli předpokládat pokles cen. Doba návratnosti tedy může být 11 – 12 let.

V závěrečné části jsem se zabýval posouzením vlivu větrných elektráren na životní prostředí. Zde jsem popsal pozitivní a negativní vlivy.

## Použitá literatura

- Knihy

- [1] Sequens, E., Holub, P.: *Větrné elektrárny: mýty a fakta*, Vydalo Sdružení Calla a Hnutí DUHA, České Budějovice - Brno 2004
- [2] Quasching, V.: *Obnovitelné zdroje energií*, Grada Publishing a.s., Praha 2010
- [3] Rychetník, V., Janoušek, J., Pavelka, J.: *Větrné motory a elektrárny*, Vydavatelství ČVUT, Praha 1997
- [4] Škorpil J., Mertlová, J., Willmann, B.: *Obnovitelné zdroje a jejich začleňování do energetických systémů*, Západočeská univerzita, Plzeň 2008
- [5] Cetkovský, S., Frantál, B., Štekl, J. a kolektiv: *Větrná energie v České republice*, Ústav genetiky Akademie věd ČR, v.v.i., Brno 2010
- [6] Mastný, P., Drápela, J. a kolektiv: *Obnovitelné zdroje elektrické energie*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2011

- Internetové stránky

- [7] <http://www.windpowerengineering.com/>
- [8] <http://www.csve.cz/>
- [9] <http://www.wikov.cz/>
- [10] <http://www.enercon.de/en-en/>
- [11] <http://www.vestas.com/>
- [12] <http://www.bermanovice.cz/>
- [13] <http://www.geologicke-mapy.cz/>
- [14] <http://www.ufa.cas.cz/>
- [15] <http://www.mapy.cz/>
- [16] <http://www.wind-power-program.com/>

- Publikace

- [17] *Obnovitelné zdroje a možnost jejich uplatnění v České republice*, ČEZ
- [18] *Obnovitelné zdroje energie a skupina ČEZ*, ČEZ
- [19] *Vítr - energie budoucnosti*, 2011, CSVE



- Elektronické soubory

- [20] Muljadi, E., Gevorgian, V. a kol.: *Short Circuit Current Contribution for Different Wind Turbine Generator Types*, Minnesota 2010
- [21] Ahlström, A.: *Simulating Dynamical Behaviour of Wind Power Structures*, Stockholm 2002
- [22] Prezentace firmy Wikov