

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh malé větrné elektrárny

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr BOUCHAL**
Osobní číslo: **E13B0005P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh malé větrné elektrárny**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

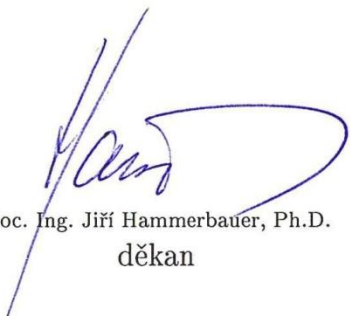
1. Zmapujte trh se zařízením pro malé či mikro větrné elektrárny.
2. Zpracujte návrh malé větrné elektrárny pro vybranou lokalitu a vypočtěte přibližné roční výnosy.
3. Proveďte ekonomické zhodnocení navrhovaného řešení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Viktor Majer, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh malé větrné elektrárny. V prvním bodě je obsažen průzkum trhu s malými a mikro větrnými elektrárnami. V bodě druhém je obsažen návrh malé větrné elektrárny a v posledním bodě je ekonomické zhodnocení navrhovaného zařízení.

Klíčová slova

Vítr, malá větrná elektrárna, rotor, turbína, energie

Abstract

The thesis is focused on small wind power station. The first part contains market research with small and micro wind power stations. The second part contains the design of small wind power station and the last point is the economic evaluation of the proposed device.

Key words

Wind, small wind power station, rotor, turbine, energy

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2015

Petr Bouchal

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Viktorovi Majerovi, Ph.D. za profesionální rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval rodině za podporu při studiu.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	11
1 ZMAPOVÁNÍ TRHU SE ZAŘÍZENÍM PRO MALÉ ČI MIKRO VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	12
1.1 PRINCIP ČINNOSTI A ÚČINNOST	12
1.2 TYPY VĚTRNÝCH TURBÍN	13
1.3 POPIS FIREM ZABÝVAJÍCÍ SE VÝROBOU A PRODEJEM MALÝCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA ČESKÉM TRHU	15
1.4 SEZNAM MALÝCH A MIKRO VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN POSTAVENÝCH V ČR.....	16
2 NÁVRH MALÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY PRO VYBRANOU LOKALITU A VÝPOČET ROČNÍCH VÝNOSŮ	18
2.1 VÝBĚR LOKALITY	18
2.2 NÁVRH MALÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	19
2.3 PŘIBLIŽNÉ ROČNÍ VÝNOSY	25
3 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NAVRHOVANÉHO ŘEŠENÍ	26
3.1 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NÁVRHU	26
3.2 POSTUP PRO ZHODNOCENÍ NÁVRHU	29
ZÁVĚR	31
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	32

Seznam symbolů a zkratk

E	Kinetická energie [J]
m	Hmota [kg]
v	Rychlost [$m * s^{-1}$]
ρ	Hustota vzduchu [$kg * m^{-3}$]
A	Plocha [m^2]
s	Dráha vzduchu [$m * s^{-1}$]
P_{vi}	Výkon vzdušného proudu [$W * m^{-2}$]
P_v	Předpokládaný výkon vzdušného proudu za 1 rok [$W * m^{-2}$]
E_{vi}	Energie vzdušného proudu [$W * m^{-2}$]
E_v	Předpokládaná energie vzdušného proudu za 1 rok [$W * m^{-2}$]
E_{pr}	Předpokládaná energie vyrobená za 1 rok [kWh]
C_p	Výkonový součinitel [-]
r	Poloměr rotoru [m]
$E_{objektu}$	Energie spotřebovaná objektem za 1 rok [kWh]
P_{ji}	Výsledný jmenovitý výkon vzdušného proudu [$W * m^{-2}$]
P_j	Výsledný jmenovitý výkon vzdušného proudu za 1 rok [$W * m^{-2}$]

E_{ji}	Výsledná jmenovitá energie vzdušného proudu [$W * m^{-2}$]
E_j	Výsledná jmenovitá energie vzdušného proudu za 1 rok [$W * m^{-2}$]
E_r	Výsledná energie vyrobená za 1 rok [kWh]
n_j	Jmenovité otáčky [min^{-1}]
λ_0	Rychloběžnost [-]
u	Obvodová rychlost 1 [$m * s^{-1}$]
π	Ludolfovo číslo 3,14 [-]
E_z	Zbývající výsledná energie vyrobená za 1 rok [kWh]

Úvod

Historie využívání větrné energie sahá daleko do minulosti, kde tato energie sloužila k pohonu mlýnů, pil, vodních čerpadel nebo obdobných zařízení vyžadující více energie, než bylo v tehdejší době možné dodat lidskou silou. [1]

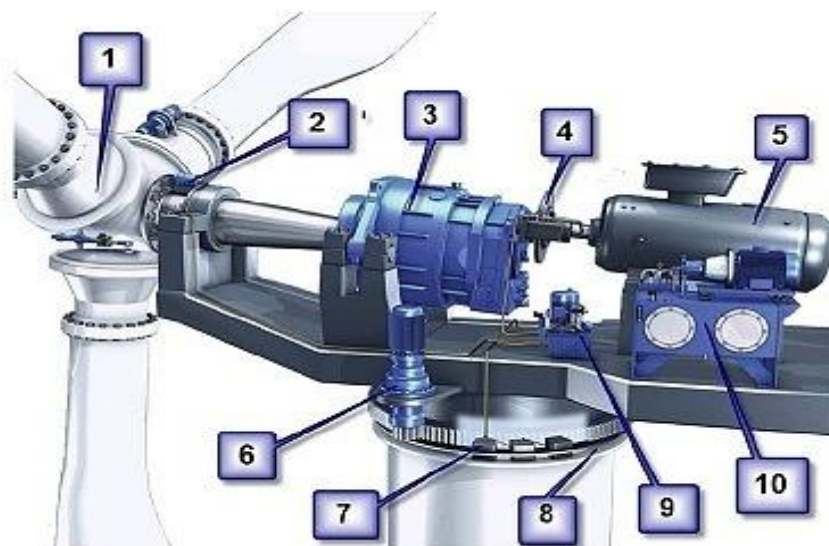
Po letech nízkého zájmu o využití malých větrných elektráren si lze v současné době povšimnout opětovného nárůstu zájmu o tato zařízení, jak v místech odlehlých bez možnosti odběru energie z elektrické sítě, kde je cílem energetická soběstačnost budovy, tak i tam, kde se lze k síti připojit. [2] Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh malé větrné elektrárny.

V této práci jsem se v prvním bodě věnoval principu větrných elektráren, jejich typům a konstrukčním uspořádáním. Jsou zde také popsány již vystavěné malé elektrárny na území České republiky a popsány firmy zabývající se navrhováním a prodejem větrných elektráren v České republice. V bodě druhém jsem se zaměřil na samotný návrh malé větrné elektrárny a vypočetl jsem přibližné roční výnosy. Ve třetím bodě jsem vypracoval ekonomické zhodnocení návrhu.

1 Zmapování trhu se zařízením pro malé či mikro větrné elektrárny

1.1 Princip činnosti a účinnost

Proud vzduchu proudící přes větrnou turbínu, která je umístěná na stožáru, předá část své kinetické energie lopatkám rotoru, kde se přemění na mechanickou energii. Poté je za pomoci generátoru přeměněna na energii elektrickou. [3]



Obr. 1. 1 Komponenty větrné elektrárny [3]

1 – rotor, 2 – brzda rotoru, 3 – převodové ústrojí, 4 – spojka a brzda generátorového hřídele, 5 – generátor, 6 – servo motor pro otáčení turbíny, 7 – brzda otočného mechanismu, 8 – ložisko, 9 – hydraulický agregát brzd, 10 – hydraulický agregát pro ovládání natočení lopatek rotoru

Co se týče účinnosti, tak není možné, aby veškerá energie větru byla využita. Vzduch, který dopadne na lopatky rotoru, je musí také opustit. Podle Bentzova pravidla je maximální využití energie větru na větrnou turbínu 59% veškeré pohybové energie proudícího vzduchu skrz rotorové lopatky a k tomu se přičítají ztráty způsobené odporem lopatek rotoru, měničem, generátorem, převodem a ztráty třením. Současně se elektrárny pohybují okolo 75% - 80% účinnosti Bentzova limitu. [3]

1.2 Typy větrných turbín

- Podle principu fungování
 - Odporové turbíny

Využívá rozdílného koeficientu odporu proudícího větru působící na vydutou a vypuklou plochu lopatek rotoru (většinou 2-3 lopatky), které mají převážně polokruhový nebo ledvinovitý tvar, tyto plochy jsou vzájemně přesazeny. Využívají Robinsonův jev, podle něhož je odpor vyduté polokoule až 4x větší než odpor vypuklé polokoule. [3]

- Vztlakové turbíny

Pro vztlakové turbíny je typická vodorovná osa otáčení, která je svou rovinou otáčení kolmá ke směru větru. Při proudění vzduchu jsou speciálně tvarované listy rotoru obtékány a vznikají na nich aerodynamické vztlakové síly, které mají za následek rotační pohyb turbíny. V dnešní době jsou nejpoužívanějším typem. [3]

- Podle osy otáčení rotoru:
 - Horizontální turbíny (HAWK – horizontal axis wind turbine)

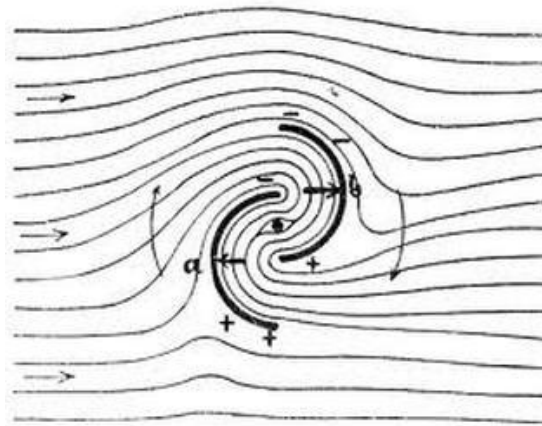
V dnešní době se jedná o nejčastěji používané turbíny, díky jejich vyšší účinnosti (okolo 48%) oproti turbínám vertikálním. Tyto turbíny musí vždy směřovat proti směru větru, a proto se k jejich natáčení používají směrové lopatky u menších turbín a větrného čidla se servomotorem u turbín větších. [3]

- Vertikální turbíny (VAWT – vertical axis wind turbine)

Tyto turbíny mají tu výhodu, že je nemusíme natáčet, protože zde nezávisí na směru větru. Generátor a převodové ústrojí lze ukládat na zemský povrch, což značně zjednodušuje údržbu. Nevýhodou je vyšší cena než u horizontálních turbín a nižší účinnost (okolo 38%). [3]

- Savoniova turbína

Tato turbína pracuje na odporovém principu. Nevýhodou je malá účinnost (20%) a malý dosažitelný výkon. Výhodou je jednoduchost a levná konstrukce. Používají se například na čerpání vody, protože nedosahují tolik otáček za minutu, nebo v kombinaci s Darrierovou turbínou, jelikož se rozbíhají již při malých rychlostech větru na rozdíl od Darrierovy turbíny. [3] [5]



Obr. 1.2 Savoniova turbína [4]

- Darrierova turbína

Tato turbína pracuje na vztlakovém principu. Většinou tyto turbíny mají 2-3 vertikální lopatky. Výhodou je lehká údržba, jelikož ovládací prvky jsou umístovány blízko země. K rozběhu potřebují tyto turbíny vnější zdroj například elektromotor, nebo jiný typ větrného rotoru s vertikální osou. Díky tomu nezávisí práce stroje na směru větru. [3] [5]



Obr. 1.3 Darrierova turbína [3]

1.3 Popis firem zabývajících se výrobou a prodejem malých větrných elektráren na českém trhu

V České republice jsou podmínky pro malé a mikro větrné elektrárny celkem dobré, a proto není divu, že je mnoho firem, které se zabývají prodejem a instalací jednotlivých dílů malé větrné elektrárny až po jejich kompletní sestavy. Zde je vypsáno několik firem pohybujících se na českém trhu.

AERPLAST s.r.o.

Tato firma má více jak dvacetiletou zkušenost ve vývoji a výrobě malých větrných elektráren jako jsou AP300, AP400, AP1200, AP2500, AP7, AP12 a AP22 (Stovky až tisíce za písmeny AP udávají jmenovitý výkon ve watech a jednotky až desítky jsou v kilowatech. Rozběhové rychlosti všech těchto větrných elektráren jsou 3 m/s). Jsou to třílisté horizontální turbíny. Tato firma se také zabývá výrobou a dodáváním hybridních ostrovních zdrojů. [6]

Solar Economic s.r.o.

Tato firma vznikla v roce 2009 se zaměřením na montáže fotovoltaických elektráren. V roce 2011 se tato firma zaměřila i na montáže malých větrných elektráren. Nabízejí prodej od baterií přes brzdící moduly, regulátory, střídače až po větrné turbíny, anebo kompletní sady. [7]

Alter-eko s.r.o.

Tato společnost byla založena v roce 2005. Navrhují větrné elektrárny do jmenovitého výkonu 5kW. Podle specifikace spotřeby elektrické energie hrazené generátorem navrhují odpovídající zařízení, příslušenství a konzultují nejvhodnější umístění mikro elektrárny s ohledem na proudění větru a okolní prostředí. Mimo mikro elektráren se tato firma zabývá i fotovoltaickými panely, tepelnými čerpadly a solárními kolektory. [8]

B.B.B., s.r.o.

Společnost vznikla v roce 1996. Zařizují montáže prostřednictvím této firmy, nebo

doporučí jimi autorizované firmy. Mimo jiné se zabývají také solárními systémy, tepelnými čerpadly a fotovoltaikou. [9]

Energy ForEver s.r.o.

Tato firma nabízí mikro větrné elektrárny typu: Air breeze s výkonem 160 Watt, Aelos 500W streetlight s výkonem 500 Watt a větrné turbíny Windtronics o výkonu 1 500 Watt. Mimo jiné se zabývá také fotovoltaikou, solárními systémy a ostrovními systémy. [10]

1.4 Seznam malých a mikro větrných elektráren postavených v ČR

Zde jsou vypsány v přehledné tabulce 1.1 malé a mikro větrné elektrárny vyskytující se na území České republiky cca do 10kW (do 4kW se mluví o elektrárnách do domácnosti). [11]

Typ větrné elektrárny	Celkový instalovaný výkon (W)	Místo	V provozu od roku:	Majitel	Pořizovací náklady (Kč)
turbína AC 500	500	Táborské návrší 124, Bílovice nad Svitavou	1997	PhDr. Jiří Jaroš	40 000
horizontální VE 5000	5000	Nerudova 231/10, 405 01 Děčín 1	2008	Ing. Vlastimil Jiřík	neuveďeno
WT 7	7 000-8 000	Camp Bonanza, Chudčice 184	1998	Jiří Navráti	170 000
třílistá WT3500	3 500	Doubravice nad Svitavou	2000	Pan Dolák	neuveďeno
WT7 s kormidlem, třílistá	7 000	Dušná na Vsetínsku	2000	Karel Javorka	neuveďeno
neuveďeno	7 000	Gagarinova 292, 549 54 Police nad Metují	2004	Ctibor Frencl	neuveďeno
Horizontální, dvoulistý rotor	60	Kačerova 434/4, 141 00 Praha 4	1998	Jiří Balcer	neuveďeno
třílistá asynchronní WT7	7 000	Hranice u Aše	1999	Jiří Král	neuveďeno
třílistá, synchronní WT7	7 000	Hranice u Aše	1999	Jaroslav Motyčka	neuveďeno

třílistá asynchronní WT7	7 000	Janovice u Trutnova	1999	Pan Lindr	nevedeno
třílistá asynchronní WT7	7 000	Kanina	2001	Pan Laun	nevedeno
třílistá, TAAW IN 5/7 kW	7 000	Klenová 44, 340 21 Janovice nad Úhlavou	2002	Rostislav Trefanec	nevedeno
třílistá asynchronní WT7	7 000	Lipina u Šternberka	2001	Pan Kuča	nevedeno
třílistá Windtower WT10P	10 000	Malšice	2006	Martina Toufarová	nevedeno
AP2500	2 500	Oldříš	nevedeno	Kroutil Tomáš	nevedeno
ELWI 3	600	Koterovská 85, 326 00 Plzeň	2002	SPŠ a VOŠ Plzeň	nevedeno
třílistá, synchronní AC502	500	Univerzitní 26, 306 14 Plzeň	2008	ZČU v Plzni	nevedeno
třílistá asynchronní WT7	7 000	Prchalov u Příbora	2000	Josef Jahn	nevedeno
nevedeno	7 000	Příšov	2006	Ivan Ženíšek	nevedeno
nevedeno	4 500-5 000	Tvarožná (cca 7km za Brnem)	1987	Rohlenk a s.r.o.	nevedeno
třílistá, EOLICO 600	600	Rozseč 81, 588 66	2010	Dušan Tobolka	nevedeno
AC 500/24 V	500	Masarykova 260, 768 05, Koryčany	1996	Ing. Jan Blaša	60 000
dvoulístý, horizontální, TCD-1	100	Sídlíště 384, 382 32 Velešín	1989	Jan Štindl	nevedeno
třílistá, PMG konstrukce	1 000	552 24 Velká Jesenice	2005	Ondřej Lukášek	nevedeno
vlastní výroba (nevedeno)	150	Vsetín-Velký Skalník	2005	Antonín Juráň	nevedeno
TAAWIN Turbo 3,5	1 000	Dunajská 1, 664 51, Brno	1998	Miroslav Hubálek	80 000
vlastní výroba (nevedeno)	300	Žihobce č.p. 24, 342 01 Žihobce	Nevede no	Ing. Petr Mišák	nevedeno

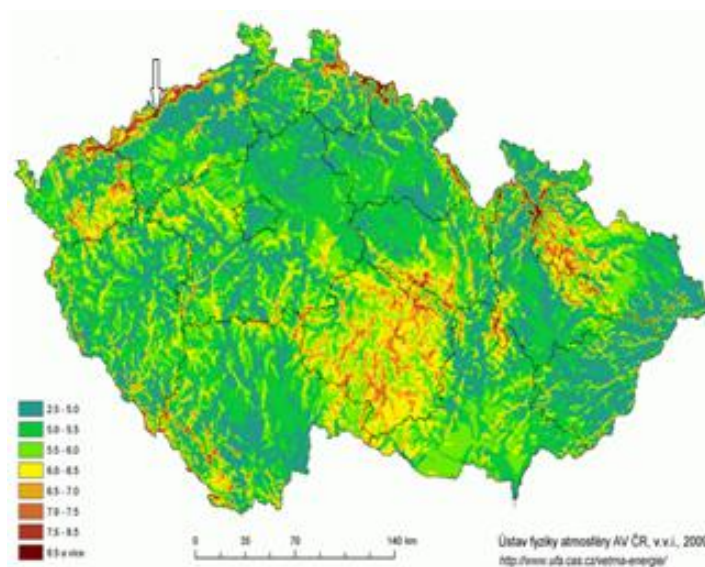
Tab. 1.1 Seznam větrných elektráren do 10 kW v ČR [12]

2 Návrh malé větrné elektrárny pro vybranou lokalitu a výpočet ročních výnosů

2.1 Výběr lokality

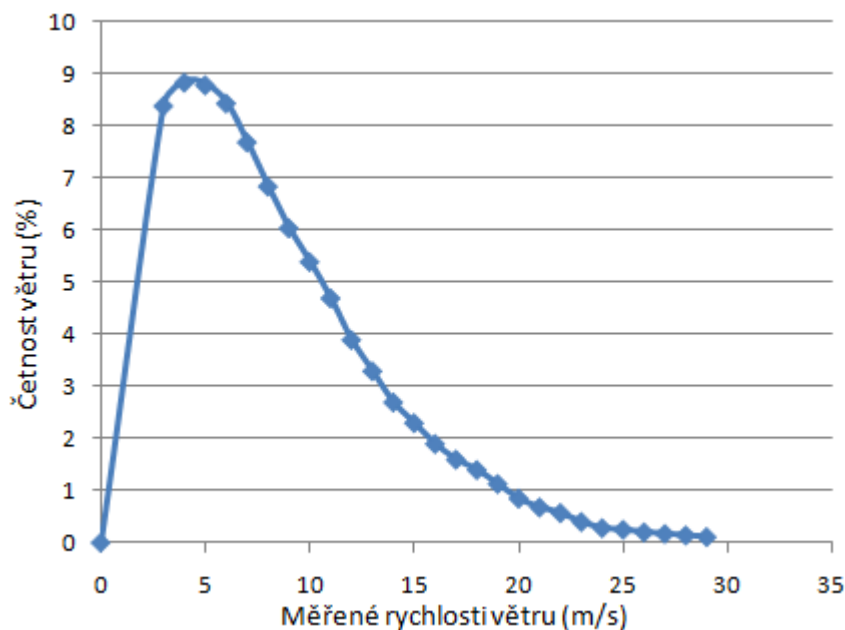
Je jedním z nejdůležitějších rozhodnutí před postavením větrného zařízení. Využití větrné energie se vyplácí v oblastech s ročním průměrem rychlosti větru od 3 m/s, kdy dochází k roztočení lopatek rotoru. Důležité je také dbát na okolí, aby například vysoké stromy nebo stavby nevytvářely větrné víry a ty nebránili plynulému proudění větru na rotor. Pro určení lokality se používá větrná mapa (Obr. 2.1), která nám udává průměrnou roční rychlost větru na území ČR ve výšce cca 10 metrů nad povrchem. [13]

Pro tento návrh jsem vybral lokalitu u hranice s Německem Nová Ves v Horách v Krušných horách cca 23 km od Města Most. Se souřadnicemi GPS: 50.596508, 13.485078 (označeno bílou šipkou na Obr. 2.1), kde je průměrná roční rychlost větru 8 m/s.



Obr. 2.1 Větrná mapa [14]

Z tabulky 2.2 je vynesena distribuční charakteristika (Obr. 2.2). Tato charakteristika znázorňuje četnost rychlosti větru v dané lokalitě. Pro každou rychlost větru je přiřazen podíl z celkové roční výroby v procentech.



Obr. 2.2 Distribuční charakteristika

2.2 Návrh malé větrné elektrárny

- Určení spotřeby elektrické energie

Navrhovaná malá větrná elektrárna se bude využívat po celý rok a bude počítáno se spotřebiči, které jsou dostupné běžně v rekreačním zařízení. Bude počítáno se spotřebou elektrické energie na osvětlení a zatížení spotřebiči, jež jsou shrnuty v tabulce 2.1.

Spotřebič	Doba provozu za 1 den (h)	spotřeba energie (kWh/24 hodin)	spotřeba energie (kWh/1 rok)
kombinovaná chladnička s mrazničkou (A++)	24	0,6	219
mikrovlnná trouba (ohřev potravin)	0,25	0,189	68,985
TV-LCD (80cm)	4	0,36	131,4
rychlovarná konvice (3 litry denně)	0,167	0,33	120,45
Notebook	2	0,03	10,95
Nabíječka chytrého mobilního telefonu	0,5	0,00133	0,48545
Set-top-box	4	0,032	11,68
Varná deska – litinové plotýnky (2 plotýnky)	0,75	1,8	657
Žárovka (5ks)	4	0,8	292
Součet_{objektu}	39,667	4,14233	1511,95045

Tab. 2.1 Příkony spotřebičů a jejich roční spotřeba v kWh [15]

- **Výpočet energie a výkonu větru**

Vztah vyjadřující energii pohybující se hmoty vzduchu. [16]

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 = \frac{1}{2} * \rho * V * v^2 = \frac{1}{2} * \rho * A * s * v^2 \quad (2.1)$$

m	hmota [m/s]
V	objem [m/s]
v	rychlost větru [m/s]
ρ	hustota vzduchu je 1,2 [$kg * m^{-3}$]
A	plocha, kterou daný objem protéká [m/s]
s	dráha, kterou urazí pohybující se vzduch

- **Výpočet výkonu větrného motoru**

Zprv je důležité vypočítat přibližný výkon proudu vzduchu, který bude působit na plochu rotorových lopatek $1m^2$, přičemž jsou zanedbány rychlosti větru menší jak 3 m/s, protože většina větrných elektráren se rozbíhá při 3m/s a vyšších podle vztahu (2.2). Vypočítané hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 2.2. [16]

$$P_{vi} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 = \frac{1}{2} * 1,2 * v^3 \text{ [W]} \quad (2.2)$$

ρ	hustota vzduchu je 1,2 [$kg * m^{-3}$]
v	rychlost větru [m/s]

Dále si spočítáme předpokládanou vyrobenou energii tak, že odečteme výkon P_{vi} z tabulky 2.2 při jednotlivých rychlostech větru vi a ten vynásobíme dobou t_{vi} která nám udává, jak dlouho vítr vane, v našem případě jej vynásobíme četností výskytu průměrné rychlosti větru uvedenou v procentech podle vzorce (2.3). Vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 2.2. [16]

$$E_{vi} = t_{vi} * P_{vi} \quad (2.3)$$

Pro předpokládanou energii E_{pr} vyrobenou za 1 rok sečteme všechny tyto energie E_{vi} a jejich součet vynásobíme počtem hodin v roce a vydělíme stem podle vzorce (2.4).

Výsledek poté vyjde v kilowatthodinách. [16]

$$E_{pr} = \sum_{29}^3 E_{vi} \frac{365 \cdot 24}{100} \quad (2.4)$$

Předpokládaná výroba elektrické energie za 1 rok			
Měřené rychlosti větru v_i (m/s)	Četnost výskytu rychlosti větru 8 m/s [%]	Přibližný výkonu proudu vzduchu P_{vi} [W/m ²]	E_{vi} [W/m ²]
3	8,4	16,2	136,08
4	8,85	38,4	339,84
5	8,8	75	660
6	8,45	129,6	1095,12
7	7,7	205,8	1584,66
8	6,85	307,2	2104,32
9	6,05	437,4	2646,27
10	5,4	600	3240
11	4,7	798,6	3753,42
12	3,9	1036,8	4043,52
13	3,3	1318,2	4350,06
14	2,7	1646,4	4445,28
15	2,3	2025	4657,5
16	1,9	2457,6	4669,44
17	1,6	2947,8	4716,48
18	1,4	3499,2	4898,88
19	1,13	4115,4	4650,402
20	0,85	4800	4080
21	0,68	5556,6	3778,488
22	0,57	6388,8	3641,616
23	0,4	7300,2	2920,08
24	0,28	8294,4	2322,432
25	0,25	9375	2343,75
26	0,2	10545,6	2109,12
27	0,17	11809,8	2007,666
28	0,14	13171,2	1843,968
29	0,11	14633,4	1609,674
$E_{v} = \sum_{29}^3 E_{vi}$ [W/m ²]			78648,066
E_{pr} [kWh]			6889,6

Tab. 2.2 Výpočet přibližného výkonu větru

Z výsledku vyplývá, že v navrhované lokalitě lze teoreticky získat $E_{pr} = 6889,6$ kWh elektrické energie za rok a z předchozích výpočtů známe roční spotřebu navrhovaného objektu, která je $E_{objektu} = 1511,95045$ kWh.

Nyní si vypočítáme výkonový součinitel C_p , který vyjadřuje účinnost z energie větru na energii elektrickou pomocí vzorce (2.5) [16]

$$C_p = \frac{E_{\text{objektu}}}{E_{\text{pr}}} = \frac{1511,95045}{6889,6} = 0,21945 \quad (2.5)$$

Objekt vyžaduje rotor o výkonovém součiniteli $C_p = 0,21945$, proto podle tabulky 2.3 vybereme nejvhodnější typ rotoru.

Typ rotoru	$C_{p \text{ opt}}$	λ_{opt}	λ_{max}
Mnoholopátkový (americký)	0,35	1,1	2
Třílístý rotor	0,18 – 0,39	2,5 – 6	-
Dvoulístý rotor	0,20 – 0,48	6 – 10	-
Savonius, dělený	0,23	0,85	1,8
Rotor Darrieus třílístý	0,362	4,66	6,76
Rotor Darrieus jednolístý	0,236	6,1	10
Miskový kříž	0,0195	0,14	0,31

Tab. 2.3 Výkonový součinitel některých typů větrných motorů [16]

Výkonový součinitel vyšel $C_p = 0,219$. Lze tedy vybrat hned z několika možností. Buď dvoulístý rotor, nebo třílístý rotor. Z důvodu rozběhových vlastností jsem vybral pro tento návrh třílístý rotor, který se oproti dvoulístému rozbíhá při nižších rychlostech větru. Průměr rotoru je zvolen 1,5m.

Pro představu jakého jmenovitého výkonu bude větrný motor zvoleného typu rotoru dosahovat a kolik je možné získat energie za 1 rok, dosadíme do vzorce (2.6) a (2.7). Výsledky jsou zapsány do tabulky 2.4. [16]

$$P_{ji} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * A * C_p = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * \pi * r^2 * C_p \quad (2.6)$$

ρ hustota vzduchu $1,2 [kg * m^{-3}]$
 v rychlost větru [m/s]
 A velikost plochy rotoru, která se vypočítá $\pi * r^2 [m^2]$
 r poloměr rotoru zvolen 1m

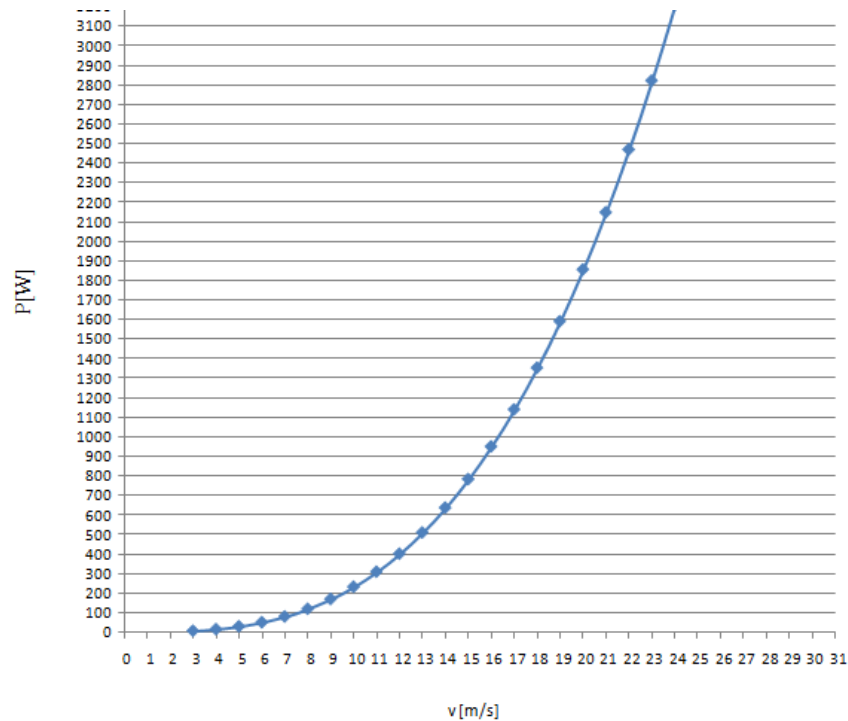
$$E_{ji} = t_{vi} * P_{ji} \quad (2.7)$$

Výsledné hodnoty návrhu malé větrné elektrárny				
Měřené rychlosti větru (m/s)	Četnost výskytu rychlostí větru 8 m/s [%]	P_{ji} [W/m ²]	E_{ji} [W/m ²]	
3	8,4	6,26630175	52,6369347	
4	8,85	14,853456	131,4530856	
5	8,8	29,01065625	255,293775	
6	8,45	50,130414	423,6019983	
7	7,7	79,60524075	612,9603538	
8	6,85	118,827648	813,9693888	
9	6,05	118,827648	1023,600391	
10	5,4	169,1901473	1253,26035	
11	4,7	232,08525	1451,855698	
12	3,9	308,9054678	1564,068917	
13	3,3	401,043312	1682,641271	
14	2,7	509,8912943	1719,4732	
15	2,3	636,841926	1801,561753	
16	1,9	783,2877188	1806,18025	
17	1,6	950,621184	1824,375733	
18	1,4	1140,234833	1894,929649	
19	1,13	1353,521178	1798,816185	
20	0,85	1591,87273	1578,1797	
21	0,68	1856,682	1461,55222	
22	0,57	2149,3415	1408,608933	
23	0,4	2471,243742	1129,512495	
24	0,28	2823,781237	898,3370189	
25	0,25	3208,346496	906,5830078	
26	0,2	3626,332031	815,8260708	
27	0,17	4079,130354	776,5827759	
28	0,14	4568,133976	713,2629571	
29	0,11	5094,735408	622,6359878	
$E_j = \sum_{j=29}^3 E_{ji}$ [W/m ²]			30421,7601	
E_r [kWh]			2664,946185	

Tab. 2.4 Výsledné hodnoty návrhu malé větrné elektrárny

Z tabulky 2.4 je patrné, že výsledná roční vyrobená energie $E_r = 2664,946185$ [kWh], která je cca 1,76 násobkem spotřebované energie objektem, bez problému pokryje energii spotřebovanou spotřebiči v navrhovaném objektu. Přebytečná vyrobená energie se může prodávat do sítě.

Z výsledné tabulky 2.4 můžeme vynesť graf výkonu v závislosti na rychlosti větru



Obr. 2.3 Závislost výkonu na rychlosti větru

Z obrázku 2.3 lze určit jmenovitý výkon větru. Při rychlosti větru 8 m/s dosahuje přibližně 100 W.

Dalším důležitým údajem pro posouzení a provedení koncepce větrného motoru jsou otáčky při jmenovitém výkonu, které odpovídají rychlosti větru předpokládané při jeho návrhu podle vzorce (2.8). [16]

$$n_j = \frac{60 \cdot \lambda_0 \cdot v_j}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot \lambda_0 \cdot v_j}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{60 \cdot 5 \cdot 8}{2 \cdot \pi \cdot 0,75} = 509,296 \text{ ot/min}^{-1} \quad (2.8)$$

. Kde λ_0 je rychloběžnost zvolená z tabulky 2.3, která je u třílistého rotoru v rozmezí (2,5-6) a pro návrh jsem zvolil 5, protože u menších rotorů je rychloběžnost větší. Rychloběžnost udává poměr mezi rychlostí konců lopatek a rychlostí větru, to nás přivádí k poslednímu důležitému výpočtu (2.9) a to je obvodová rychlost konců lopatek. [16]

$$u = \frac{\pi \cdot n_j}{30} \cdot r = \frac{\pi \cdot 509,296}{30} \cdot 0,75 = 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.9)$$

Všechny vypočítané hodnoty pro navrhovaný větrný rotor jsou zahrnuty v tabulce 2.5.

Navrhovaný rotor	
Při rychlosti větru [m/s]	8
Jmenovitý výkon [W]	100
Počet listů	3
průměr rotoru [m]	1,5
Výkonový součinitel	0,219
Rychloběžnost	5
otáčky motoru při jmenovitém výkonu [ot/min]	509,296
obvodová rychlost konců lopatek [m/s]	40

Tab. 2.5 Výsledné hodnoty navrhovaného rotoru

2.3 Přibližné roční výnosy

Přibližné roční výnosy lze spočítat pomocí hodnot, jež jsou vidět na obrázku 2.4.

Srovnání výkupních cen elektrické energie z obnovitelných zdrojů v ČR v CZK/kWh*									
Zdroj	Cena 2007	Cena 2008	Cena 2009	Cena 2010	Cena 2011	Cena 2012	Cena 2013	Cena 2014	Cena 2015
Fotovoltaika**	13,46	13,46	12,79	12,15	5,5	6,16	2,83	0	0
VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	2,46	2,46	2,34	2,23	2,23	2,23	2,12	2,014	1,980
Malé vodní elektrárny	2,39	2,6	2,70	3,00	3,00	3,19	3,23	3,23	3,23
Biomasa	3,37	4,21	4,49	4,58	4,58	4,58	3,73	3,335	3,263
Bioplyn z BPS	3,04	3,9	4,12	4,12	4,12	4,12	3,55	0	0

Obr. 2.4 Srovnání výkupních cen elektrické energie z obnovitelných zdrojů v ČR [17]

Z námi navrhované malé větrné elektrárny vyplývá, že roční vyrobená energie je $E_r = 2664,946185$ [kWh] a spotřebovaná roční energie pro navrhovaný objekt je $E_{objektu} = 1511,95045$ [kWh]. Proto si můžeme spočítat zbývající vyrobenou roční

energii, kterou lze odprodat do sítě pomocí vzorce (2.10).

$$E_z = E_r - E_{\text{objektu}} = 2664,946185 - 1511,95045 = 1152,995735[\text{kWh}] \quad (2.10)$$

Podle obrázku 2.4, kde máme udanou výkupní cenu elektrické energie z větrné elektrárny v korunách za 1kWh lze spočítat přibližné roční výnosy v roce 2015 podle vzorce (2.11).

$$\text{Roční příjem}(2015) = \text{cena}(2015) * E_z = 1,98 * 1152,995735 = 2282,93155 \text{ Kč} \quad (2.11)$$

3 Ekonomické zhodnocení navrhovaného řešení

Rozvoj větrné energetiky je velmi úzce svázán právě s ekonomickou problematikou, přestože samotný zdroj energie, kterým je vítr, je zadarmo. Na rozdíl od tepelných motorů odpadají veškeré náklady na palivo a tím jsou nízké provozní náklady. Malá koncentrace větrné energie však vyvolává relativně vysoké investiční náklady. Jak je známo, tak faktorem, který přispěl k rozvoji větrných motorů, bylo vědomí omezení zásob fosilních paliv a jejich negativního vlivu na životní prostředí při jejich spalování. [14]

3.1 Ekonomické zhodnocení návrhu

Navrženou malou větrnou elektrárnu budu porovnávat s podobnou elektrárnou typu Black Wind Generator 600 a SUNNILY V-400 podobných technických parametrů, které jsou uvedeny v tabulce 3.1 a 3.2.

Technické parametry Black Wind Generator 600	
průměr rotoru:	1,6 m
rozběhová rychlost:	1,8 m
napětí:	12V, 24V DC
nominální výkon:	600 W (při 11m/s)
počet listů	3
cena s DPH	26 420 Kč

Tab. 3.1 Technické parametry Black Wind Generator 600 [18]

Technické parametry větrné elektrárny SUNNILY V-400	
průměr rotoru:	1,33 m
rozběhová rychlost:	2,5 m
napětí:	12V, 24V DC
nominální výkon:	400 W (při 11 m/s)
počet listů	3
Typ generátoru	3-fázový s permanentním magnetem
uchycení	Pozinkovaná trubka, vnější průměr 48 mm
cena s DPH	16 802 Kč

Tab. 3.2 Technické parametry SUNNILY V-400 [19]

V tabulce 3.3 a 3.4 jsou uvedené výsledné hodnoty malé větrné elektrárny typu Black Wind Generator 600 a SUNNILY V-400 počítané obdobně jako pro navrhovaný objekt.

Výsledné hodnoty malé větrné elektrárny Black Wind Generator 600			
Měřené rychlosti větru (m/s)	Četnost výskytu rychlostí větru 8 m/s [%]	P _{ji} [W/m ²]	E _{ji} [W/m ²]
3	8,4	7,12965888	59,88913459
4	8,85	16,89993216	149,5643996
5	8,8	33,00768	290,467584
6	8,45	57,03727104	481,9649403
7	7,7	90,57307392	697,4126692
8	6,85	135,1994573	926,1162824
9	6,05	192,5007898	1164,629778
10	5,4	264,06144	1425,931776
11	4,7	351,4657766	1651,88915
12	3,9	456,2981683	1779,562856
13	3,3	580,1429837	1914,471846
14	2,7	724,5845914	1956,378397
15	2,3	891,20736	2049,776928
16	1,9	1081,595658	2055,031751
17	1,6	1297,333855	2075,734168
18	1,4	1540,006318	2156,008845
19	1,13	1811,197417	2046,653081
20	0,85	2112,49152	1795,617792
21	0,68	2445,472996	1662,921637
22	0,57	2811,726213	1602,683941
23	0,4	3212,83554	1285,134216
24	0,28	3650,385347	1022,107897
25	0,25	4125,96	1031,49

26	0,2	4641,143869	928,2287739
27	0,17	5197,521324	883,578625
28	0,14	5796,676731	811,5347423
29	0,11	6440,19446	708,4213906
$E_j = \sum_{j=29}^3 E_{ji} \text{ [W/m}^2\text{]}$			34613,2026
$E_r \text{ [kWh]}$			3032,116548

Tabulka 3.3 Výsledné hodnoty Black Wind Generator 600

Výsledné hodnoty malé větrné elektrárny SUNNILY V-400			
Měřené rychlosti větru (m/s)	Četnost výskytu rychlostí větru 8 m/s [%]	$P_{ji} \text{ [W/m}^2\text{]}$	$E_{ji} \text{ [W/m}^2\text{]}$
3	8,4	4,926427185	41,38198835
4	8,85	11,67745703	103,3454947
5	8,8	22,80753326	200,7062927
6	8,45	39,41141748	333,0264777
7	7,7	62,58387127	481,8958088
8	6,85	93,41965624	639,9246453
9	6,05	133,013534	804,7318806
10	5,4	182,4602661	985,2854369
11	4,7	242,8546142	1141,416687
12	3,9	315,2913398	1229,636225
13	3,3	400,8652046	1322,855175
14	2,7	500,6709702	1351,811619
15	2,3	615,8033981	1416,347816
16	1,9	747,3572499	1419,978775
17	1,6	896,4272873	1434,28366
18	1,4	1064,108272	1489,751581
19	1,13	1251,494965	1414,189311
20	0,85	1459,682129	1240,729809
21	0,68	1689,764524	1149,039877
22	0,57	1942,836913	1107,417041
23	0,4	2219,994058	887,9976231
24	0,28	2522,330719	706,2526012
25	0,25	2850,941658	712,7354145
26	0,2	3206,921637	641,3843274
27	0,17	3591,365418	610,532121
28	0,14	4005,367761	560,7514866
29	0,11	4450,02343	489,5025773
$E_j = \sum_{j=29}^3 E_{ji} \text{ [W/m}^2\text{]}$			23916,91175
$E_r \text{ [kWh]}$			2095,121469

Tabulka 3.4 Výsledné hodnoty SUNNILY V-400

3.2 Postup pro zhodnocení návrhu

Podstatou zjišťování ekonomické efektivity je porovnání průměrných ročních nákladů s ročními příjmy. Jestliže jsou roční náklady menší, než roční příjmy je akce ekonomicky efektivní. Abychom určili tyto hodnoty je důležité stanovit investiční náklady, provozní náklady a ceny produkce větrného soustrojí. Dobu návratnosti spočítáme pomocí hodnotícího kritéria K vyjadřující poměr celkových nákladů N na jednotku produkce P podle vzorce (3.1). [16]

$$K = \frac{N}{P} \quad (3.1)$$

Kde N jsou náklady vynaložené za stejné časové období na tuto produkci složené z položek:

- Měrné investiční náklady

Tyto náklady zahrnují ceny větrného motoru včetně pracovního stroje, stožáru, ceny nutných stavebních prací tj. kotevní lana pro stožáry a jejich základů. U elektráren pracujících samostatně musí být započítány i náklady na akumulaci elektrické energie. Podíl hlavních skupin na ceně větrné elektrárny řádově o výkonu 100 až 1000 kW se odhaduje cca.: rotor (35-40%), převod (7-8%), elektrické zařízení (11-12%), regulace (3-5%), stožár (16-25%) [16]

- Měrné provozní náklady

Zahrnují náklady na údržbu, provoz a obsluhu. Podle různých pramenů jsou odhadovány v různé výši. Ve starších pramenech jsou odhady pro menší větrné elektrárny kolem 1% investičních nákladů. Podle rozsáhlejších průzkumů v Dánsku to je však 1,4-2,5% s přibývajícím roky provozu. [16]

- Měrný úrok

Relativně vysoké investiční náklady, které představují téměř dvojnásobek všech provozních nákladů za celou dobu životnosti větrné elektrárny. Týká se větších větrných elektráren, kde provozovatel provede výstavbu na základě bankovního úvěru. [16]

Pro přibližné ekonomické zhodnocení navrhnuté malé větrné elektrárny postačí vypočítat přibližnou dobu návratnosti K_n ze vztahu (3.1) při použití porovnávané malé elektrárny Black Wind Generator 600 a SUNNILY V-400 u které předpokládáme připevnění ke střešnímu štítu pomocí pozinkované trubky o vnějším průměru 48mm, které si teoreticky můžeme připevnit sami, a proto nám odpadnou náklady na výstavbu, které by si případně účtovala firma za montáž. Také známe pořizovací cenu a dosadíme jí za N a za P pak roční výnos spočítaný podle vzorce (2.10), (2.11) a obrázku 2.4. Za rok 2015, který pro Black Wind Generator 600 činí 3009,92887Kč a 1154,68 Kč pro SUNNILY V-400.

Pro Black Wind Generator 600:

$$K_{n1} = \frac{N}{P} = \frac{26\,420}{3009,92887} = 8,776 \text{ let} \quad (3.2)$$

Pro SUNNILY V-400:

$$K_{n2} = \frac{N}{P} = \frac{16\,802}{1154,68} = 14,55 \text{ let} \quad (3.3)$$

Jak je z výsledků patrné, tak co se týče doby návratnosti je Black wind Generator 600 i při vyšších pořizovacích nákladech určitě lepší volbou než SUNNILY V-400, což je dáno především větším průměrem rotoru a nižší rozběhovou rychlostí, kterou můžeme vidět v tabulce 3.1 a 3.2.

Tato doba návratnosti je pouze hrubý odhad a je spíše orientační, protože se musí počítat s tím, že podmínky pro provoz nebudou tak idealizované jako v tomto návrhu.

Závěr

V této bakalářské práci jsem nejprve popsal princip činnosti a účinnost větrných elektráren. Dále jsem uvedl, jak lze větrné elektrárny dělit podle principu, nebo podle osy otáčení, a jednotlivé části jsem zjednodušeně popsal. Hlavním bodem první části této práce bylo prozkoumat trh se zařízeními malých a mikro větrných elektráren, jež jsem uvedl do přehledné tabulky. Zde je vypsáno například o jaký typ větrné elektrárny se jedná, jejich jmenovitý výkon, kdo zařízení provozuje a kde je umístěné. Nadále jsem zmínil několik firem sídlících v České republice zajímající se o výrobu, instalaci a prodej zařízení týkajících se této práce.

Asi nejdůležitější a nejobsáhlejší bodem této práce je návrh malé větrné elektrárny, pro kterou jsem zvolil umístění v Krušných horách, kde jsou pro větrné elektrárny velmi dobré podmínky. Pro instalaci zařízení jsem uvažoval malý rekreační objekt, který se využívá celoročně. Do tohoto objektu jsem vybral typické spotřebiče pro takovéto zařízení a přiřadil jim přibližnou dobu provozu. Podle větrné mapy jsem zvolil průměrnou roční rychlost větru pro danou oblast a vypočetl jsem výkon větrného motoru a jeho přibližné roční výnosy. Z výsledků vyplývá, že tento objekt lze energeticky pokrýt navrhovanou větrnou elektrárnou, avšak se musí brát ohled na to, že výpočet je pro roční průměrnou rychlost větru a lze tedy předpokládat nestálost tohoto živlu. Je nutné tedy zajistit pro objekt náhradní energetický zdroj pro případ významného poklesu rychlosti větru, například akumulátorové články, které v případě přebytku výkonu budou nabíjeny a v opačném případě budou dodávat energii.

V posledním bodě této práce jsem měl provést ekonomické zhodnocení daného návrhu. To jsem provedl pomocí přirovnání vypočteného návrhu k větrné elektrárně Black Wind Generator 600 a SUNNILY V-400 dostupné na českém trhu a vypočetl jsem přibližnou dobu návratnosti investice, která je 8,776let a 14,5 let. Tato doba však může být ovlivněna kolísáním výkupní ceny větrné energie v budoucích letech a proměnlivými klimatickými podmínkami. Proto je nutné zajistit vykrytí výpadků instalací akumulátorů, nebo připojením do rozvodné sítě, povoluje-li to stávající infrastruktura.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Historie* [online]. [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektren--13364>
- [2] *Úvod* [online]. [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/8358-vetrne-podminky-pro-male-vetrne-elektrarny>
- [3] *Princip činnosti* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/typy-elektren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- [4] *Savoniova turbína* [online]. [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.savonius.net/savonius-principle.html>
- [5] *Ddworld: Turbíny v elektrárnách* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.ddworld.cz/clanky/clanky/vyroba-el.energie-turbiny-v-elektarnach-2.html>
- [6] *O společnosti* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.vetrne-elektrarny.eu/>
- [7] *O společnosti* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.solareconomic.cz/solarec/1-O-NAS/8-HISTORIE-FIRMY>
- [8] *O společnosti* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.alter-eko.cz/index.php?page=vetrne-elektrarny/vetrne-informace>
- [9] *O společnosti* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.dasty.eu/o-nas>
- [10] *O společnosti* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.energyforever.cz/cz/o-spolecnosti/>
- [11] ŠKORPÍK, Jiří. *Transformační technologie: Využití energie větru* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/vyuziti-energie-vetru.html>
- [12] *Calla.ecn: Větrné elektrárny* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://calla.ecn.cz/atlas/list.php?type=4>
- [13] HALLENGA, Uwe. *Malá větrná elektrárna: návod ke stavbě s konstrukčními výkresy*. 2. přepr. a rozš. vyd. Ostrava, : HEL, 2006, 95 s. ISBN 80-861-6727-5.

- [14] *Větrná mapa* [online]. [cit. 2015-05-31]. Dostupné z:
<http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/vetrna-mapa.html>
- [15] *Orientační hodnoty spotřeby* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z:
<http://www.energeticky poradce.cz/Files/poradenske-centrum/nase-sluzby-zdarma/pujcovani-mericich-zarizeni/orientacni-hodnoty-spotreby-domacich-spotrebicu>
- [16] RYCTELÍK, V., J. JANOUŠEK a J. PAVELKA. *VĚTRNÉ MOTORY a ELEKTRÁRNY*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
- [17] *Výkupní ceny elektrické energie* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z:
<http://www.csve.cz/clanky/graf-vyvoje-vykupnich-cen/278>
- [18] *Black Wind Generator 600* [online]. [cit. 2015-05-31]. Dostupné z:
<http://www.solareconomic.cz/solarec/eshop/18-1-Vetrne-elektrarny/0/5/360-Mala-vetrna-elektrarna-Black-Wind-Generator-600-12-24-V>
- [19] *SUNNILY V-400* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z:
<http://www.solareconomic.cz/solarec/eshop/18-1-Vetrne-elektrarny/0/5/380-Vetrna-elektrarna-SUNNILY-V-400>