

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA SE SAVONIOVÝM
ROTOREM PRO VÝROBU ELEKTRICKÉ
ENERGIE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

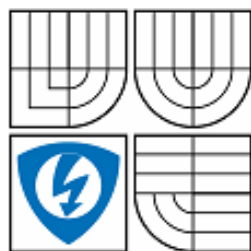
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BC. JIŘÍ KLEČKA

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Elektroenergetika

Student: Bc. Jiří Klečka

ID: 88824

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Větrná elektrárna se Savoniovým rotorem pro výrobu elektrické energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. funkce a konstrukce Savoniova rotoru
2. definice oblasti využití Savoniova rotoru
3. návrh konstrukce funkčního modelu Savoniova rotoru pro definovanou oblast použití
4. základní měření na sestaveném modelu
5. analýza naměřených hodnot a porovnání s předešlými výpočty
6. posouzení možnosti využití Savoniova rotoru pro výrobu el. energie

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 25.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Petr Mastný, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská právo třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

>>Vložit licenční smlouvu<<

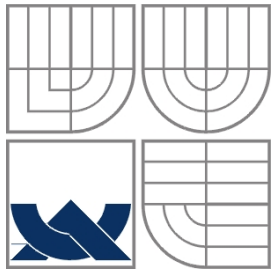
Bibliografická citace práce:

KLEČKA, J. Větrná elektrárna se Savoniovým rotorem pro výrobu elektrické energie. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009, 52 stran.

Prohlašuji, že jsem svou **diplomovou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Mastnému, Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé práci, Panu Rybanskému a Stanislavu Klečkovi, kteří se podíleli na realizaci modelu, jenž finančně zaštilil Ústav Elektroenergetiky, a také svým rodičům a přítelkyni za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

Větrná elektrárna se Savoniovým rotorem pro výrobu elektrické energie

Jiří Klečka

vedoucí: Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

Wind power station with Savonius rotor for production of electric power

by

Jiří Klečka

Supervisor: Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Brno University of Technology, 2009

Brno

ABSTRAKT

Využívání větrné energie patří k jednomu z nejrychleji se rozvíjejících segmentů ve výrobě energie z obnovitelných zdrojů, což také přináší nové studie a vývoj různých typů větrných elektráren i do oblastí malých větrných zdrojů. Do této oblasti můžeme zařadit také Savoniův rotor.

Tato práce se zabývá kompletním návrhem, realizací a zkušebním měřením jednostupňového modelu Savoniova rotoru. Úvodní část pojednává o základním rozdělení a využití rotoru. Návrhová část obsahuje jak návrh, tak výkresovou dokumentaci rotoru. V další části je vyhodnocení změřených dat, jež vede k jejich porovnání s teoretickými výpočty. Poslední část obsahuje posouzení možnosti využití Savoniova rotoru k výrobě elektrické energie.

KLÍČOVÁ SLOVA: Model rotoru; Přesazení lopatek; Savoniův rotor; Součinitel rychloběžnosti; Součinitel výkonu; Výkon turbíny.

ABSTRACT

Using of wind energy belongs to one of the fastest developing segments in the power production from renewable resources, which also relates to new studies and development of different types of power stations and brings new ideas to small wind sources spheres too. Savonius rotor is included in these spheres as well.

This thesis deals with a complete design, realization and trial measurement of single-step Savonius rotor model. Introduction part treats of basic division and rotor utilization. Design part includes the design as well rotor graphical documentation. In the following part there is data evaluation, which leads to comparison with theoretical calculations. The final part includes an examination of possible utilization of Savonius rotor for generation of electricity.

KEY WORDS: Aerodynamic power delivered by the rotor; Overlap ratio; Power coefficient; Rotor model; Savonius rotor; Velocity coefficient.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	13
SEZNAM TABULEK	15
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	16
1 ÚVOD.....	17
2 CÍLE PRÁCE	17
3 SAVONIŮV ROTOR.....	17
3.1 VOLBA VHODNÉHO STANOVIŠTĚ.....	18
3.2 TYPY ROTORŮ	18
3.3 VLASTNOSTI SAVONIOVA ROTORU	19
3.3.1 VÝHODY.....	19
3.3.2 NEVÝHODY	20
3.3.3 ORIENTACE VĚTRNÝCH MOTORŮ.....	20
3.4 VYUŽITÍ ROTORU	20
3.4.1 VYLEPŠENÍ KONSTRUKCE ROTORU	21
3.4.2 STOŽÁRY A VĚŽE PRO SAVONIŮV ROTOR	22
4 VÝPOČTOVÉ VZTAHY	23
4.1 VÝPOČET ROTORU	27
4.1.1 PŘESAZENÍ LOPATEK.....	27
4.1.2 OTÁČKY ROTORU.....	29
4.1.3 VÝPOČET VÝKONU.....	29
4.1.4 VÝPOČET KROUTÍCÍHO MOMENTU	31
5 VLASTNÍ KONSTRUKCE.....	31
5.1 KONSTRUKCE ROTORU	31
5.2 STOJAN ROTORU	33
5.3 SESTAVA KOMPLETNÍHO MODELU.....	33
5.4 BRZDA ROTORU.....	34
6 MĚŘENÍ NA MODELU	35
6.1 POSTUP MĚŘENÍ	35
6.2 NAMĚŘENÉ HODNOTY.....	35
6.2.1 DATA Z LABORATORNÍHO MĚŘENÍ	35
6.2.2 VÝPOČET NAMĚŘENÝCH HODNOT	36
6.2.3 DATA Z HODINOVÉHO VENKOVNÍHO MĚŘENÍ.....	38
6.2.4 DATA Z VENKOVNÍHO ZRYCHLENÉHO MĚŘENÍ.....	39
7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	41
7.1 POROVNÁNÍ OTÁČEK ROTORU	41
7.2 POROVNÁNÍ SOUČINITELE RYCHLOBĚŽNOSTI	42
7.3 POROVNÁNÍ VÝKONU ROTORU	42

7.4 ZHODNOCENÍ POROVNÁVANÝCH DAT	43
7.4.1 ZHODNOCENÍ POROVNÁNÍ OTÁČEK ROTORU	43
7.4.2 ZHODNOCENÍ POROVNÁNÍ VÝKONU ROTORU	43
7.5 PŘEDPOKLÁDANÝ DODÁVANÝ VÝKON.....	44
8 ELEKTRICKÉ ZAŘÍZENÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	44
8.1 GENERÁTORY STŘÍDAVÉHO PROUDU	45
8.2 GENERÁTORY STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU.....	46
8.3 AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	47
8.3.1 CHEMICKÁ AKUMULACE.....	47
8.3.2 TEPELNÁ AKUMULACE.....	48
8.4 PŘIPOJENÍ STEJNOSMĚRNÉHO GENERÁTORU	48
8.4.1 GENERÁTOR.....	48
8.4.2 PŘEVODOVÝ STUPEŇ.....	48
8.4.3 DOSAŽITELNÝ ELEKTRICKÝ VÝKON	49
9 ZÁVĚR.....	51
9.1 SOUČASNÝ STAV	51
9.2 ZÁVĚRY PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS.....	51
9.3 VÝZNAM A VYUŽITÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	52
9.4 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU	52
POUŽITÁ LITERATURA	53
PŘÍLOHA A KUSOVNÍK	54
PŘÍLOHA B VENKOVNÍ MĚŘENÍ.....	55
PŘÍLOHA C VENKOVNÍ ZRYCHLENÉ MĚŘENÍ	56
PŘÍLOHA D VLASTNOSTI CHEMICKÝCH AKUMULÁTORŮ	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Savoniův rotor.</i>	18
<i>Obr. 3-2 Volba stanoviště malé větrné elektrárny.</i>	18
<i>Obr. 3-3 Oboustranné uložení dvoustupňového rotoru.</i>	19
<i>Obr. 3-4 Dvoustupňový rotor.</i>	21
<i>Obr. 3-5 Spirálový rotor.</i>	22
<i>Obr. 4-1 Účinnost větrných elektráren.</i>	24
<i>Obr. 4-2 Teoretické účinnosti rotorů pracujících na odporovém principu.</i>	26
<i>Obr. 4-3 Geometrie lopatek s hřídely.</i>	28
<i>Obr. 4-4 Očekávaná výkonnost konvenčního Savoniova rotoru.</i>	29
<i>Obr. 4-5 Závislost otáček a výkonu na rychlosti větru.</i>	31
<i>Obr. 5-1 Ukončení pro lopatky rotoru.</i>	32
<i>Obr. 5-2 Lopatka rotoru.</i>	32
<i>Obr. 5-3 Rotor.</i>	32
<i>Obr. 5-4 Stojan rotoru.</i>	33
<i>Obr. 5-5 Celková sestava.</i>	33
<i>Obr. 5-6 Realizovaný model.</i>	34
<i>Obr. 5-7 Umístění klešťové brzdy a brzdící páčky.</i>	34
<i>Obr. 6-1 Naměřená data rychlosti větru a otáček rotoru z laboratorního měření.</i>	36
<i>Obr. 6-2 Obvodová rychlost rotoru.</i>	37
<i>Obr. 6-3 Účinnost rotoru.</i>	38
<i>Obr. 6-4 Závislost výkonu rotoru na rychlosti větru.</i>	38
<i>Obr. 6-5 Naměřená data rychlosti větru a otáček rotoru v hodinovém intervalu.</i>	39
<i>Obr. 6-6 Naměřená data rychlosti větru a otáček rotoru v 14 minutovém intervalu.</i>	40
<i>Obr. 7-1 Porovnání teoretických a skutečných otáček rotoru.</i>	41
<i>Obr. 7-2 Porovnání rychloběžnosti a součinitele výkonu.</i>	42
<i>Obr. 7-3 Porovnání skutečného a teoretického výkonu rotoru.</i>	43
<i>Obr. 7-4 Předpokládaný výkon rotoru v závislosti na rychlosti větru.</i>	44
<i>Obr. 7-5 Předpokládaný výkon rotoru v závislosti na otáčkách.</i>	44
<i>Obr. 8-1 Synchronní generátor pracující do baterie i zátěže.</i>	45
<i>Obr. 8-2 Základní zapojení.</i>	46
<i>Obr. 8-3 Zapojení se stabilizátorem.</i>	46
<i>Obr. 8-4 Zapojení s umělou zátěží a baterií.</i>	46

<i>Obr. 8-5 Paralelní zapojení FV a větrné elektrárny.</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 8-6 Roční průběh nabídky sluneční a větrné energie [2].</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 8-7 Výkonové a proudové parametry DC generátoru.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 8-8 Výkon DC generátoru a generátoru v závislosti na otáčkách.</i>	<i>50</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4-1</i>	<i>Odporový součinitel některých ploch těles při $Re = 10^4$.</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 4-2</i>	<i>Vypočtené hodnoty výkonu a otáček v závislosti na rychlosti větru.</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 6-1</i>	<i>Laboratorní měření.</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 6-2</i>	<i>Tabulka výpočtu rychloběžnosti a součinitele výkonu.</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 6-3</i>	<i>Meteorologická data v den měření.</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6-4</i>	<i>Průměrné hodnoty skutečného zrychleného měření.</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 6-5</i>	<i>Vzestupně seřazená data z venkovního zrychleného měření.</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 8-1</i>	<i>Řemenice.</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 8-2</i>	<i>Výkon generátoru a otáčky převodu.</i>	<i>49</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	čelní plocha rotoru
C_m	součinitel momentu
C_p	součinitel výkonu
D	průměr rotoru
d_l	průměr lopatky
d_{P1}	průměr hnací řemenice
d_{P2}	průměr hnané řemenice
E	kinetická energie
e	přesazení lopatek
h_a	průměr osy rotoru
H	výška rotoru
m	hmotnost
M_k	kroučící moment
n	otáčky rotoru
n_{P1}	otáčky rotoru
n_{P2}	otáčky generátoru
P	výkon větru
P_G	elektrický výkon generátoru
P_R	mechanický výkon rotoru
R	poloměr lopatek
S	čelní plocha rotoru
t	čas
u	okamžitá rychlost větru
v	střední rychlost větru
v_{ob}	obvodové rychlosti rotoru
β	účinnost rotoru
η_G	účinnost generátoru
λ	rychloběžnost
ω	úhlová rychlost
hustota vzduchu	$\rho = 1,2047 \text{ kg.m}^{-3}$
Ludolfovo číslo	$\pi = 3,141592$

1 ÚVOD

Využití větrné energie prochází v posledních letech velkým rozvojem a na našem trhu se začíná objevovat mnoho zahraničních i tuzemských výrobců větrných mikroelektráren do výkonu 1 kW. Mezi tyto mikrozdroje se může zařadit i Savoniův rotor se svou svislou osou a bez nutnosti natáčení do směru převládajícího větru.

Zejména, pro svou jednoduchou konstrukci a nenáročnou výrobu u jednostupňových či vícešupňových rotorů, se může stát levnou variátnou větrného zdroje. Nedosahuje sice takových výkonů jako vrtulové rotory, ale má vyšší točivý moment, což se výhodně využívá k pohánění vodních čerpadel nebo dalších druhů využití mechanické energie.

Pro své nízké otáčky při malých rychlostech větru se u aplikací pro výrobu elektrické energie využívá generátorů s permanentními magnety.

Své uplatnění najde tento zdroj v zástavbě nízkoenergetických staveb, kde bude tvořit energetickou zálohu ve větrnějších měsících. Bude brán v potaz, nejen pro svou nízkou hladinu hluku, ale také pro svůj estetický vzhled, který je méně rušivý než klasické vrtulové mikroelektrárny.

2 CÍLE PRÁCE

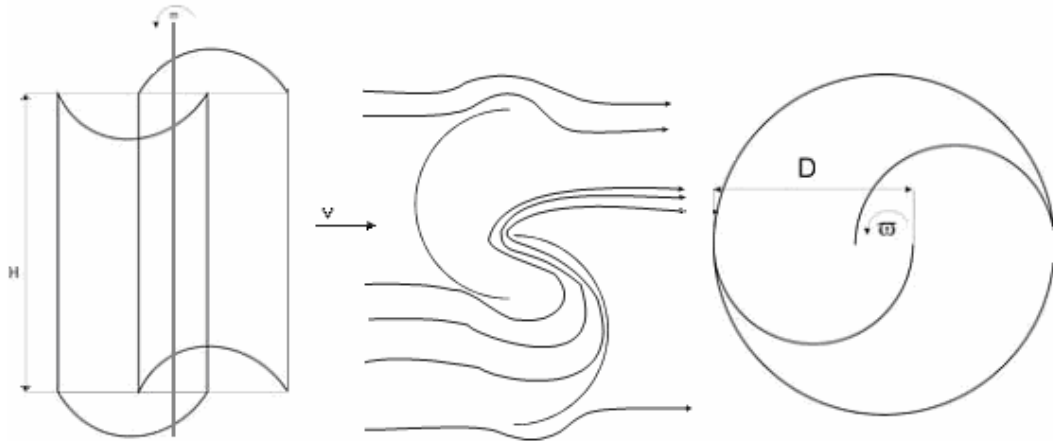
Cílem této diplomové práce je návrh konstrukce funkčního modelu Savoniova rotoru. Výpočet parametrů rotoru, zpracování ve výkresové dokumentaci a samotná realizace konstrukce.

Dále základní měření na sestaveném modelu, porovnání s předešlými výpočty a posouzení možnosti výroby elektrické energie.

3 SAVONIŮV ROTOR

Savoniův rotor si 12. prosince 1924 nechal patentovat finský lodní důstojník Sigurd J. Savonius. Tento rotor se skládá ze dvou navzájem opačně přesazených půl-válcových lopatek a osy, která mezi nimi prochází. Přesazení lopatek je mezi 20–30% průměru rotoru. Při provozu se část energie větru dostane z přední strany návětrné lopatky přes přesazení na zadní stranu závětrné lopatky (Obr. 3-1) [10].

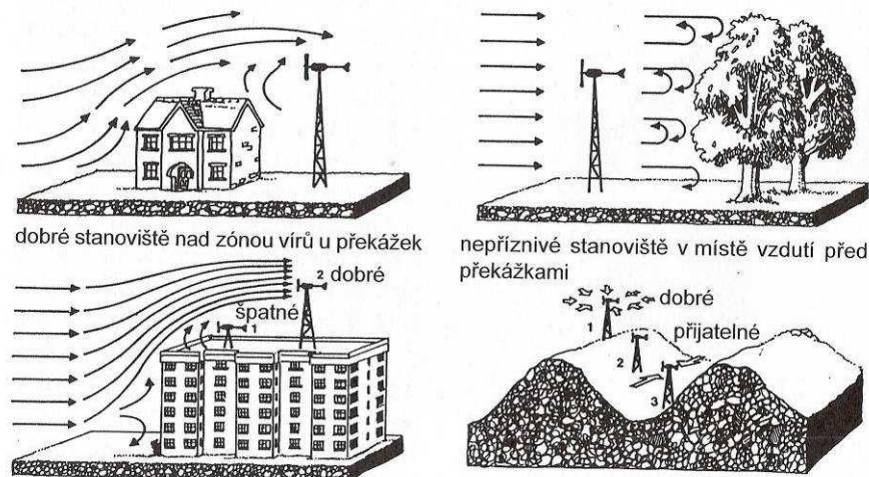
Větrná turbína pracuje na odporovém principu a využívá Robinsonův jev, podle něhož je odpor vyduté polokoule téměř čtyřnásobně větší než odpor polokoule vypuklé [12].



Obr. 3-1 Savoniův rotor.

3.1 Volba vhodného stanoviště

I když je Savoniův rotor vhodný pro nižší rychlosti větru, než využívají klasické větrné elektrárny, platí při volbě stanoviště stejná pravidla. Závětrí tvořené stromy nebo budovami je místem nevhodným [10]. Proto aby se docílilo dobrých výkonů, musí rotor vyčnívat ze zón vírů vznikajících u stromů a budov (Obr. 3-2) [1].



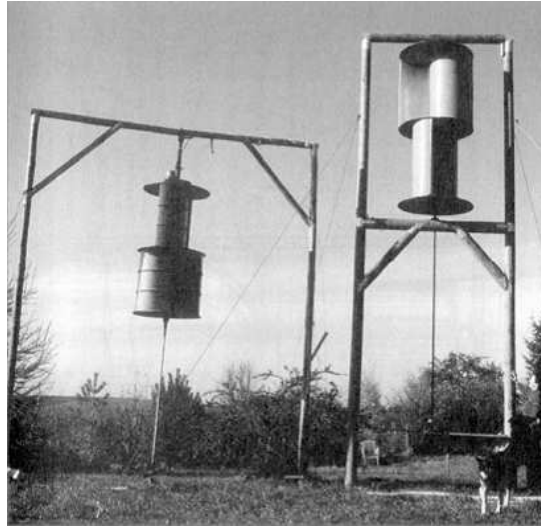
Obr. 3-2 Volba stanoviště malé větrné elektrárny.

3.2 Typy rotorů

Savoniovy rotory můžeme rozdělit do několik skupin:

- Dle využití druhu energie:
 - větrné
 - vodní
- Dle konstrukce:
 - jednostupňový
 - vícestupňový
 - spirálový
- Dle uspořádání lopatek :
 - levotočivé
 - pravotočivé

- Dle osy rotace : - vertikální
 - horizontální
- Dle uložení rotoru: - horní
 - dolní
 - oboustranné (Obr. 3-3)



Obr. 3-3 Oboustranné uložení dvoustupňového rotoru.

3.3 Vlastnosti Savoniova rotoru

3.3.1 Výhody

- jednoduchá konstrukce: stavba z různých druhů materiálů (barely, plechové roury, plastové trubky) tz. nízké pořizovací náklady a jednoduchá obsluha.
- nezávislost na směru větru, bez potřeby natáčení rotoru do směru větru.
- nízká hlučnost.
- přímý přenos kroutícího momentu na svislou hřídel, která může vést až k zemi a tam pohánět různé pracovní stroje podle potřeby v závislosti na síle větru. Pomocí jednoho zařízení lze např. za slabého větru čerpat vodu a při vyšší rychlosti větru ještě vyrábět stejnosměrný proud [10].
- využití širokého pásma síly větru, narozdíl od mnoha jiných větrných turbín, které jsou optimalizovány na určitou rychlost větru, mohou správně zkonstruované Savoniovy rotory využít vítr jak o rychlosti extrémně nízké (2 až 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), tak i o rychlosti střední (4 až 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a vysoké (15 až 25 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) [10].
- zvětšení plochy turbíny aniž by došlo k výraznému poklesu otáček, zatímco u větrných turbín s horizontální osou zvětšení průměru vrtule nebo kola nutně způsobuje snížení otáček a často i problémy s převody [10].
- vysoká odolnost vůči bouřím. Při správném provedení mají rotory zvláště sníženou citlivost vůči vírům a turbulencím.[10].

3.3.2 Nevýhody

- vysoká hmotnost rotoru, což sice díky použití levných materiálů neznamena vysoké náklady, avšak vyžaduje pečlivé vyvážení, aby se zabránilo kritickému kmitání při vysokých otáčkách. Vysoká hmotnost však je zejména při poryvech větru zároveň předností; stabilizuje otáčky, a při správné konstrukci rotoru zvyšuje jeho odolnost proti bouřím [10].
- malá rychloběžnost, relativně nízké otáčky a vysoké točivé momenty: je možno přímo pohánět vodní čerpadla, u generátorů je nutné použití převodu pro dosažení vyšších otáček [10].
- pro nabíhající proud vzduchu existují dva mrtvé úhly, pro které je točivý moment vznikající na stojícím rotoru malý a může být i záporný a jeho velikost závisí na velikosti přesazení válcových částí rotoru [12].
- relativně nízký součinitel využití energie větru (účinnost) z toho plynoucí i malý dosažitelný elektrický výkon: moderní lopatkové turbíny dosahují vyšších hodnot, ale jen za určitých rychlostí větru [10].

3.3.3 Orientace větrných motorů

Z odvozování aerodynamických poměrů na vrtulovém listu rotoru vyplývá, že podmínkou pro dosažení maximální účinnosti přeměny energie větru na mechanickou práci je orientace osy rotoru do směru větru. Při nedodržení této podmínky lze předpokládat poměrnou ztrátu výkonu v závislosti na odchylce směru větru. Vrtulové větrné motory se vyznačují vyšší citlivostí orientačního zařízení na směr větru. Natáčení se provádí poměrně rychle, zejména při velkých rychlostech větru a náhlých změnách jeho směru. To vyvolává velké gyroskopické momenty na rotoru a tím i zvýšené namáhání vrtulových listů, hřídele rotoru a celého jeho uložení [9].

U Savoniova rotoru, je-li uložen ve vertikální poloze, problém s měněním se směrem větru odpadá. Rychle se měnící směr větru ani větší větrné poryvy nezpůsobují rotoru větší gyroskopické momenty.

Savoniův rotor se vyznačuje vyšším kroutícím momentem, proto si rotor, při rychle se měnících poryvech větru, zachovává svou setrvačnost a jeho otáčky se tak skokově nemění, což je výhodnější pro průběh dodávaného výkonu z generátoru.

3.4 Využití rotoru

Pro svou jednoduchou konstrukci oproti vrtulovým rotorům je umístění generátoru elektrického proudu nebo jiného mechanického zařízení (vodní pumpa, kompresor na stlačený vzduch, transmise) ve spodní části konstrukce. Z toho plyne i jednodušší údržba generátoru než je tomu u klasických vrtulových elektráren.

Z rotoru se kroutící moment převádí přes jeho hřídel do spodní části konstrukce, kde je buď přímo, nebo přes převod předáván poháněnému zařízení.

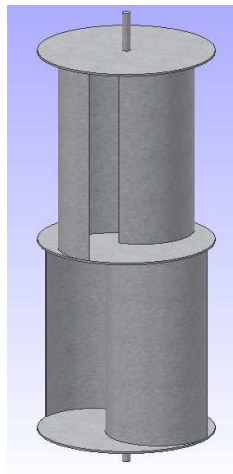
Pro svou menší účinnost je přidáním převodu pro zvýšení otáček nevhodné zejména pro vysokootáčkové generátory elektrického proudu (účinně pracují až od $1000 \text{ ot. min}^{-1}$), kde jednak dojde k snížení účinnosti vlivem převodu, nebo také nedosažení potřebných otáček při nižších rychlostech větru. Proto se u těchto nízkootáčkových rotorů využívá výhradně generátorů

s permanentními magnety nebo přímého přenosu kroutícího momentu na jiný mechanický pohyb.

3.4.1 Vylepšení konstrukce rotoru

Počáteční konstrukce Savoniova rotoru sestávala ze dvou opačně spojených půl-válcových lopatek. Zlepšením vlastností dosáhl Savonius vytvořením mezery mezi oběma lopatkami tak, že mezi nimi mohl proudit vzduch z návětrné na závětrnou lopatku.

Pro dosažení rovnoměrného točivého momentu se dalšího vylepšení docílilo konstrukcí dvoustupňového rotoru, kde stupně rotoru jsou pootočený proti sobě o 90° (Obr. 3-4). Pak bude jedno křídlo stát vždy plně ve větru a rotor se i při malé síle větru může snadno rozběhnout [10].



Obr. 3-4 Dvoustupňový rotor.

V 80. letech pak vývoj rotoru dospěl k průtažnému třílopatkovému rotoru, který byl samonosný, tuhý v ohybu a co do statiky koncipován jako prostorový nosník. Toto řešení dovolilo stavět mohutnější rotory s výkonem až 2 kW [10].

Inspirací pro další vylepšení Savoniova rotoru se stal vícestupňový rotor, jehož uspořádání stupňů pod sebou do šroubovice dospělo k vývoji spirálového rotoru. Tyto rotory dosahují lepších výkonů a to zejména proto, že lopatky jsou neustále v záběru a také jejich tvar klade menší odpor proti větru (Obr. 3-5).



Obr. 3-5 Spirálový rotor.

3.4.2 Stožáry a věže pro Savoniův rotor

Stožáry, na nichž bývají gondoly s větrným motorem umístěny, jsou různého provedení. Některé jsou z ocelových příhradových konstrukcí, jiné bývají řešeny jako tenké trubky s kotevními lany nebo samonosná trouba relativně velkého průměru. Hmotnost stožárů se příliš neliší od hmotnosti vlastního větrného motoru s celým příslušenstvím, a proto je snaha o maximální úspory tohoto relativně málo zhodnoceného materiálu. Ve světě se přechází od tuhých stožárů, jejichž vlastní frekvence je vyšší než frekvence daná součinem počtu vrtulových listů a otáček rotoru, ke stožárům středně tuhým (s vlastní frekvencí nižší než výše uvedenou a vyšší než je frekvence otáčení), a k měkkým (s vlastní frekvencí pod frekvencí otáčení) [9].

Ve své knize Savoniův rotor – návod na stavbu od Heinze Schulze jeho autor při stavbě pro Savoniův rotor použil dřevěných hloubkově impregnovaných kulatých trámů, které byly pospojovány spojkami ke spojování kulatiny a ještě ukotveny kotevními lany (Obr. 3-3) [10]. Dosáhl tak sice mnohdy předimenzované, ale velice levné konstrukce.

Pro stavbu stožáru pro malé větrné elektrárny se doporučuje nepřekračovat celkovou výšku včetně větrné turbíny nad 8 m, protože nad tuto výšku je již potřeba stavebního povolení, které by ne vždy mohlo být schváleno.

Při stavbě ocelového stožáru z dvou trubek je třeba dbát na provedení spoje mezi těmito díly. Tento spoj se musí překrýt buď delší silnostěnnou trubkou, nebo větší trubkovou spojkou. Taktéž pata stožáru, jeli zalita v betonu nebo pevněji uložena, by měla být zesílena. Kotevní lana by měla být upevněna ke stožáru v polovině horního dílu trubky a ukotvena pod úhlem 45°. Veškeré ocelové konstrukce stožáru, jakožto ocelové části rotoru musí být vodivě pospojovány a uzemněny, aby se zamezilo poškození generátoru v případě zásahu bleskem. Tato základní opatření by měla být dodržována při stavbě jakéhokoliv podobného stožáru, protože tvoří základ odolnosti konstrukce vůči bouři, která může dosahovat rychlosti větru kolem 25 m.s⁻¹.

4 VÝPOČTOVÉ VZTAHY

Vycházíme z přeměny kinetické energie větru [11]:

Kinetická energie E volně pohyblivého tělesa hmotnosti m , které se pohybuje rychlostí u , je přímo úměrná hmotnosti m a druhé mocnině rychlosti u .

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u^2 \quad (4.1)$$

kde:

$E[\text{J}]$	kinetická energie
$m[\text{kg}]$	hmotnost vzduchu
$u[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	okamžitá rychlost vzduchu

Obecný vztah platí i pro vzduchové těleso o hmotnosti m , pohybující se rychlostí u . Dosadíme-li za hmotnost vzduchu m , který proteče plochou S za jednu sekundu, dostaneme kinetickou energii vzdušného proudu procházejícího plochou S za sekundu, kterou nazveme

výkon větru P .

$$P = \frac{E}{t} \quad (4.2)$$

kde:

$P[\text{W}]$	výkon turbíny
$E[\text{J}]$	kinetická energie
$t[\text{m}]$	čas

Hmotnost vzduchu, který proteče za sekundu plochou S je roven součinu plochy S , rychlosti u a hustoty vzduchu ρ .

$$m = S \cdot u \cdot \rho \quad (4.3)$$

kde:

$m[\text{kg}]$	hmotnost vzduchu
$S[\text{m}^2]$	plocha rotoru
$\rho[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota vzduchu
$u[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	okamžitá rychlost vzduchu

Dosadíme-li za hmotnost m ve vztahu (4.1) výraz z pravé strany rovnice (4.3), dostaneme vzorec pro stanovení výkonu větru.

$$P = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \quad (4.4)$$

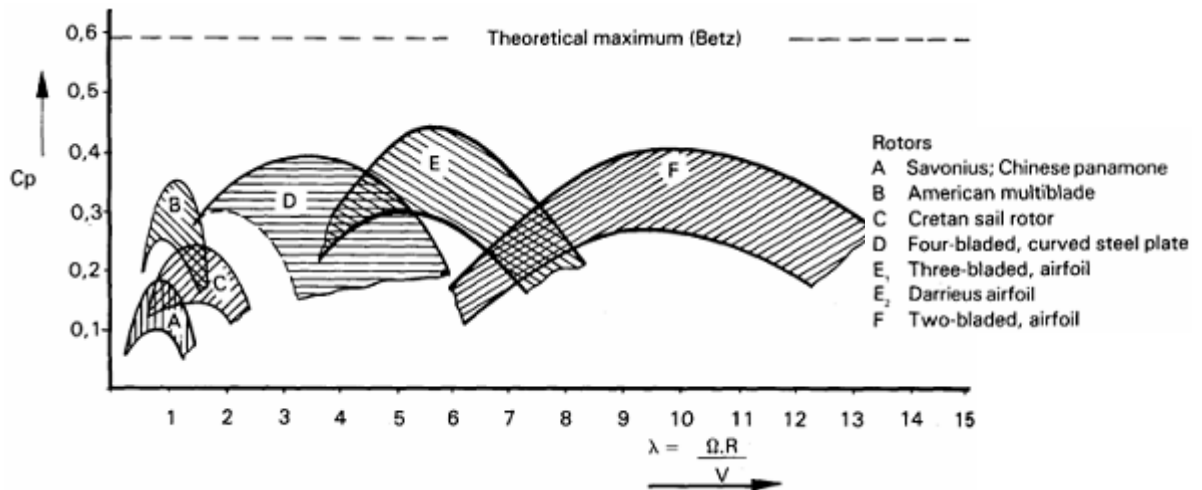
kde:

$P[\text{W}]$	výkon turbíny
---------------	---------------

$S[\text{m}^2]$	plocha rotoru
$\rho[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota vzduchu
$v[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	střední rychlost vzduchu

Ideální větrná turbína má podle Betze účinnost přeměny energie větru na mechanickou energii přibližně 59 % (Obr. 4-1). Na to, aby jí dosáhla, by měla zpomalovat vzduch na dvoutřetinovou rychlost proudění v místě rotoru a jednotřetinovou rychlost za rotorem [5].

Zavádíme proto výkonový součinitel C_p (tzv. Betzův limit), který udává jaká část energie obsažená ve vzdušném proudu je přeměňována v energii mechanickou.



Obr. 4-1 Účinnost větrných elektráren.

Výkon turbíny je potom:

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \quad (4.5)$$

kde:

$P[\text{W}]$	výkon turbíny
$C_p [-]$	výkonový součinitel
$S[\text{m}^2]$	plocha rotoru
$\rho[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota vzduchu
$v[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	střední rychlost vzduchu

Velikost výkonového součinitele je závislá na rychloběžném čísle lambda λ , které je dáno poměrem obvodové rychlosti rotoru v_{ob} , k rychlosti větru v .

$$\lambda = \frac{v_{ob}}{v} \quad \text{kde} \quad v_{ob} = \omega \cdot R \Rightarrow \lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (4.6)$$

kde:

$\lambda [-]$	rychloběžnost
$v_{ob}[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	obvodová rychlost rotoru
$\omega[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	úhlová rychlost
$R[\text{m}]$	poloměr rotoru

$v[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ střední rychlost vzduchu

Pro otáčky rotoru poté platí:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{v} \Rightarrow n = \frac{\lambda \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (4.7)$$

kde:

$n[\text{ot}\cdot\text{s}^{-1}]$ otáčky rotoru za sekundu
 $v[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ střední rychlost vzduchu
 $R[\text{m}]$ poloměr rotoru

Kroutící moment je daný vztahem

$$M_k = \frac{1}{16} \cdot C_m \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^3 \cdot v^2 \quad (4.8)$$

kde:

$M_k [\text{Nm}]$ kroutící moment
 $C_m [-]$ součinitel výkonu
 $D[\text{m}]$ průměr rotoru
 $v[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ střední rychlost vzduchu

Typickými vlastnostmi větrných motorů pracujících na odporovém principu je jejich velmi malá rychloběžnost i relativně nízký výkonový součinitel. Tento poznatek lze získat na základě jednoduché úvahy, že v proudu větru se pohybují dva prvky rotoru, jeden ve směru větru se součinitelem aerodynamického odporu c_1 a druhý proti větru se součinitelem odporu c_2 , přičemž je zanedbána jejich proměnlivost se změnou orientace prvku během otáčky rotoru. Pro odvození se předpokládá stejná velikost obou ploch vystavených proudu vzduchu [9].

Relativní rychlost větru působícího na prvek, který se pohybuje v jeho směru, je $v - u_t$. Proti větru se pohybuje prvek rychlostí $v + u_t$, kde u_t je obvodová rychlost v místě působení síly větru na uvažovaný prvek. Protože odpor kladený tímto prvkem je úměrný druhé mocnině relativní rychlosti, pak

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot [c_1 \cdot (v - u_t)^2 u_t - c_2 \cdot (v + u_t)^2 u_t] \quad (4.9)$$

kde:

$\rho[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ hustota vzduchu
 $A[\text{m}^2]$ čelní plocha rotoru
 c_1 součinitelem odporu plochy po větru
 c_2 součinitelem odporu plochy proti větru
 $v[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ střední rychlost vzduchu
 $u_t [\text{ot}\cdot\text{s}^{-1}]$ obvodová rychlost

Uvažuje-li se výkon větru protékající plochou $2A$ jako vztažná hodnota, pak výkonový součinitel

$$C_p = \frac{c_2 \cdot (v + u_t)^2 u_t - c_1 \cdot (v - u_t)^2 u_t}{2 \cdot v^3} \quad (4.10)$$

Hodnoty součinitele odporu jsou pro některé tvary ploch v tab.4-1. U větrných motorů se zarytou částí rotoru se proti větru bude $c_2 = 0$.

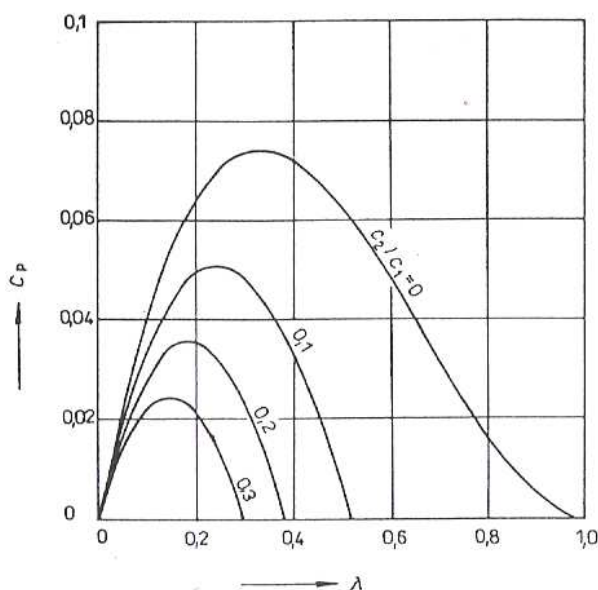
Průběh poměrného výkonového součinitele C_p/c_1 v závislosti na $\lambda_t = u_t/v$ pro různé poměry c_2/c_1 je na (obr.4-2), který byl vypočten z upraveného vztahu (4.11), získaného po dosazení za $u_t = \lambda_t \cdot v$

$$\frac{C_p}{c_1} = \frac{\lambda_t \cdot \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right) - 2\lambda_t^2 \cdot \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + 2\lambda_t^3 \cdot \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right)}{2} \quad (4.11)$$

Položením derivace $d C_p / d \lambda_t = 0$ lze zjistit polohu maxima funkce, která je dosažena pro

Tvar tělesa	c_x
Dutá polokoule	
– dutina po větru	0,39
– dutina proti větru	1,42
Válec	1,17
Polovina válce	
– vypuklá plocha po větru	0,69
– vypuklá plocha proti větru	1,2
Kruhová deska	1,17

Tab. 4-1 Odporový součinitel některých ploch těles při $Re = 10^4$.



Obr. 4-2 Teoretické účinnosti rotorů pracujících na odporovém principu.

Pro miskový anemometr například vychází optimum $C_P = 0,036$ při $\lambda_t = 0,148$. Neklade-li lopatka při zpátečním pohybu žádný odpor, je dosaženo maximální hodnoty C_P při $\lambda_t = 1/3$:

$$C_P = \frac{c_1}{2} (\lambda_t - 2\lambda_t^2 + 2\lambda_t^3) = \frac{2}{27} c_1 \quad (4.12)$$

Mění-li se při pohybu zpět kromě součinitele odporu i plocha lopatky, výraz (4.10) se musí upravit na tvar

$$C_P = \frac{A_1 \cdot c_1 \cdot (v - u_t)^2 u_t - A_2 \cdot c_2 \cdot (v + u_t)^2 u_t}{(A_1 + A_2) \cdot v^3} \quad (4.13)$$

Je samozřejmé, že tyto výrazy nevystihují skutečnost zdaleka tak přesně jako u větrných motorů s vodorovnou osou pracujících na vztlakovém principu. Přestože dávají výsledky lepší, než by byly získány pečlivějším propočtem celého rotoru ve všech jeho polohách v průběhu otáčky, je zřejmé, že dosažitelný výkonový součinitel bude výrazně nižší, než u větrných motorů pracujících na vztlakovém principu.

Výsledky tohoto odvození lze použít na větrné motory pracující na principu miskového anemometru, kde místo misek mohou být části válcových ploch nebo duté kužele, a na větrné motory, které mají část rotoru pohybující se proti větru zakrytou.

4.1 Výpočet rotoru

Při teoretických úvahách popisujících rychlost proudění větru se uvažuje s okamžitou rychlostí větru (označovanou u), při určování parametrů větrných zařízení se uvažuje se střední rychlostí proudění větru označovanou v [5].

4.1.1 Přesazení lopatek

Při výpočtu přesazení lopatek e vycházíme z toho, že největší účinnosti dosahuje Savoniův rotor při 20% až 30% přesazení lopatek a určuje jej β [3].

$$\beta = \frac{e}{d} \quad (4.14)$$

kde:

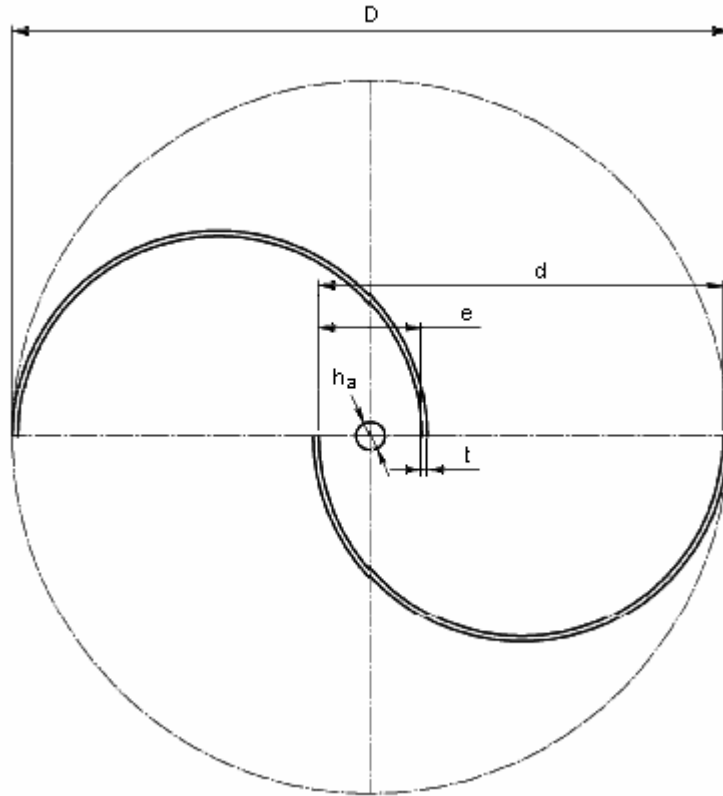
e [mm]	přesazení lopatek
d [mm]	vnitřní průměr lopatky

Pro zlepšení tuhosti rotoru a uložení ložisek je vhodné vést středem rotoru hřídel o průměru h_a (Obr.4-3). Průměr hřídele se objeví ve vztahu účinnosti.

$$\beta = \frac{e - h_a}{d} \quad (4.15)$$

kde:

h_a [mm]	průměr hřídele
------------	----------------



Obr. 4-3 Geometrie lopatek s hřídelí.

Při návrhu přesazení lopatek vycházíme z rozměrů lopatek, jež budou tvořit zahnuté měděné plechy o vnějším průměru 180mm. A středová osa o průměru 15 mm.

Rozměry jedné lopatky: $d_l = 180 \text{ mm}$

$t = 0,5 \text{ mm}$

Výpočet vnitřního rozměru:

$$d = d_l - t = 180 - 0,5 = 178 \text{ mm} \quad (4.16)$$

Výpočet přesazení lopatek získáme ze vztahu pro účinnost:

$$\beta = \frac{e - h_a}{d} \Rightarrow e = \beta \cdot d + h_a \quad (4.17)$$

volím účinnost rotoru $\beta = 25\% = 0,25$

$$e = \beta \cdot d + h_a = 0,25 \cdot 178 + 15 = 59,5 \text{ mm} \quad \text{volím} \rightarrow \underline{\underline{59 \text{ mm}}} \quad (4.18)$$

Výpočet průměru rotoru:

$$D = \left(d_l - \frac{e \cdot 2 \cdot t}{2} \right) \cdot 2 = \left(180 - \frac{59 \cdot 2 \cdot 0,5}{2} \right) \cdot 2 = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m} \quad (4.19)$$

kde:

$D[\text{mm}]$ průměr rotoru

Zvolená výška rotoru:

$$H = 1000 \text{ mm} = 1 \text{ m}$$

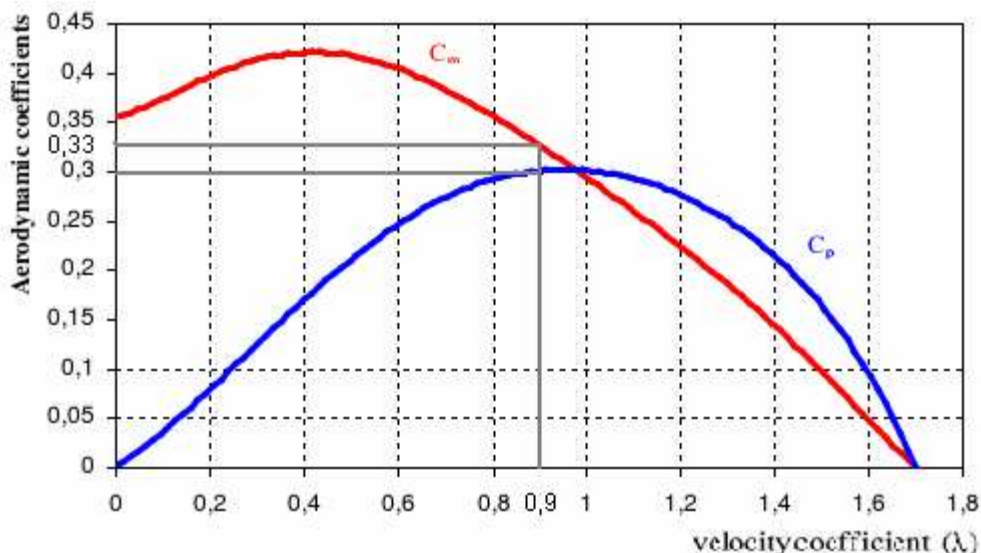
Čelní plocha rotoru:

$$S = H \cdot D = 1 \cdot 0,3 = 0,3 \text{ m}^2 \quad (4.20)$$

$$S = 0,3 \text{ m}^2$$

4.1.2 Otáčky rotoru

Počet otáček rotoru závisí na průměru rotoru, rychlosti větru a na součiniteli rychloběžnosti λ dle rovnice (4.6). Podle Betze pracuje Savoniův rotor ideálně při $\lambda = 0,9$ až $1,2$, což určují koeficienty výkonu a momentu z experimentálního grafu (Obr.4.4) [7]. Protože součinitel rychloběžnosti zjistíme až při měření prototypu rotoru, volím $\lambda = 0,9$.



Obr. 4-4 Očekávaná výkonnost konvenčního Savoniova rotoru.

Vynesením hodnoty $\lambda = 0,9$ do grafu (Obr. 4-4) získáme součinitel výkonu $C_p = 0,3$ a součinitel momentu $C_m = 0,33$.

Po dosažení součinitele rychloběžnosti λ do vztahu (3.7) pro střední rychlost větru $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$n = \frac{\lambda \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{0,9 \cdot 10}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,15} = 9,55 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1} \quad (4.21)$$

Závislost otáček na rychlosti větru je zobrazena v tabulce (Tab. 4-2) a grafu (Obr. 4-5).

4.1.3 Výpočet výkonu

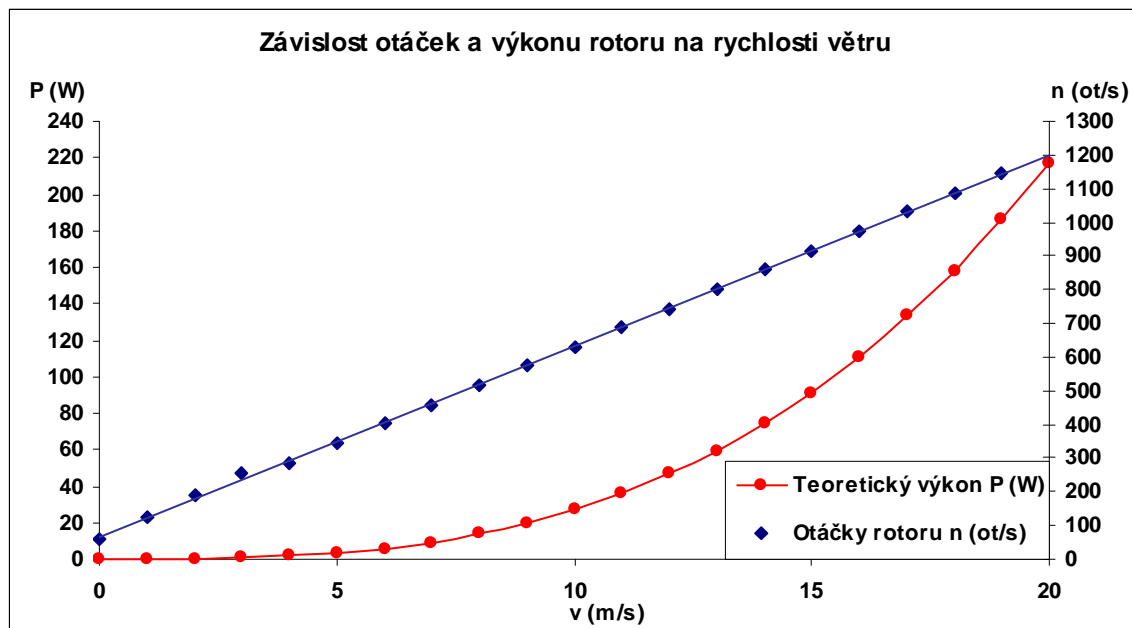
Výpočet výkonu provedeme pro nezatížený rotor a budeme uvažovat, že jeho obvodová rychlost je stejná jako rychlost větru. Skutečnou obvodovou rychlost zjistíme až z měření prototypu.

Protože se na účinné práci rotoru podílí pouze polovina plochy rotoru zohledníme toto při výpočtu výkonu a v rovnici (4.5.) zapíšeme plochu jako $S/2$. Výpočet teoretického výkonu nezátíženého rotoru provedeme pro střední rychlost větru $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \frac{S}{2} \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot \frac{0,3}{2} \cdot 1,2047 \cdot 10^3 = 27,11 \text{ W} \quad (4.22)$$

Střední $v \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$	Otáčky rotoru		Teoretický P (W)
	$n \text{ (ot}\cdot\text{min}^{-1}\text{)}$	$n \text{ (ot}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$	
0	0	0	0,00
1	57,30	0,95	0,03
2	127,32	2,12	0,22
3	190,99	3,18	0,73
4	254,65	4,24	1,73
5	286,48	4,77	3,39
6	343,77	5,73	5,85
6,1	349,50	5,83	6,15
7	401,07	6,68	9,30
8	458,37	7,64	13,88
9	515,66	8,59	19,76
10	572,96	9,55	27,11
11	630,25	10,50	36,08
12	687,55	11,46	46,84
13	744,85	12,41	59,55
14	802,14	13,37	74,38
15	859,44	14,32	91,48
16	916,73	15,28	111,03
17	974,03	16,23	133,17
18	1031,32	17,19	158,08
19	1088,62	18,14	185,92
20	1145,92	19,10	216,85

Tab. 4-2 Vypočtené hodnoty výkonu a otáček v závislosti na rychlosti větru.



Obr. 4-5 Závislost otáček a výkonu na rychlosti větru.

Do výpočtu nejsou zahrnuty ztráty třením v ložiscích, což se na měřeném modelu projeví snížením otáček a posunutím rozběhem rotoru do vyšších rychlostí větru.

4.1.4 Výpočet kroutícího momentu

Čím větší je průměr rotoru, tím menší je počet otáček a tím vyšší je kroutící moment.

Pro výpočet kroutícího momentu dosadíme do vztahu (4.8) součinitel momentu $C_m = 0,33$, který jsem vynesl v grafu (Obr. 4-4).

Výpočet kroutícího momentu pro střední rychlost větru $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$M_k = \frac{1}{16} \cdot C_m \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^3 \cdot v^2 = \frac{1}{16} \cdot 0,33 \cdot 1,2047 \cdot 3,14 \cdot 0,3^3 \cdot 10^2 = 0,21 \text{ Nm} \quad (4.23)$$

5 VLASTNÍ KONSTRUKCE

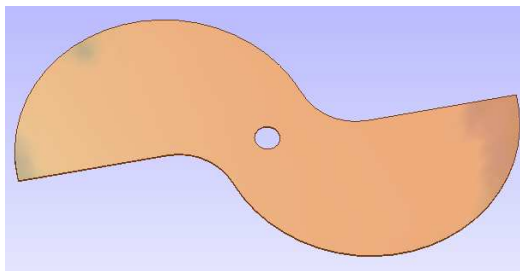
Konstrukční plány rotoru jsou přiloženy v příloze (Příloha A).

5.1 Konstrukce rotoru

Počáteční návrh rotoru jsem provedl v programu Autodesk Inventor 11, kde jsem si předem vyzkoušel spojení všech součástí rotoru.

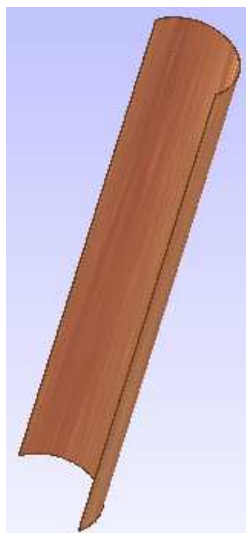
Rotor jsem navrhl jako jednostupňový s přesazením lopatek viz. Kap 4.1. Jako nejlehčí a nejdostupnější materiál pro konstrukci rotoru jsem zvolil měď, pro její snadné spojování pájením.

Samotný rotor sestává z měděné trubky o průměru 15 mm, která prochází rotorem a jejíž konce jsou uloženy ve výkyvných ložiscích. Konce samotného rotoru tvoří měděné plechy o šířce 1mm a průměru viz. Kap 4.1. Provedení konců rotorů je zobrazeno na obrázku (Obr. 5-1).



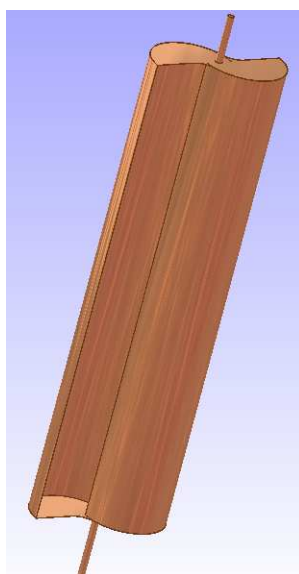
Obr. 5-1 Ukončení pro lopatky rotoru.

Lopatky rotoru (Obr.5-2) jsou vyrobeny z měděného plechu tloušťky 0,55 mm a rozměrů 1000 x 300 mm a zakřiveny do poloměru 180 mm.



Obr. 5-2 Lopatka rotoru.

Lopatky jsou připájeny „na tupo“ k hranám konců rotoru a spolu s připájenou osou procházející středem tvoří celou konstrukci rotoru (Obr. 5-3).

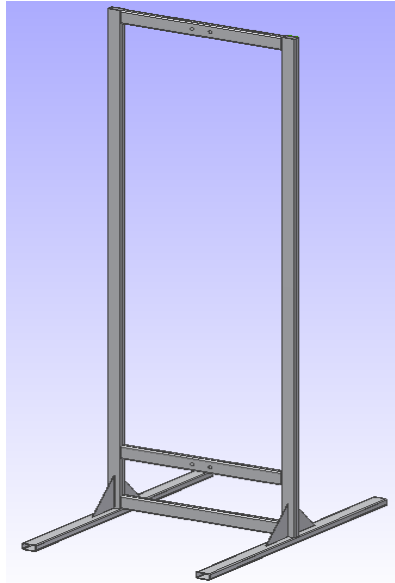


Obr. 5-3 Rotor.

5.2 Stojan rotoru

Pro uložení a zamezení nežádoucích vibrací rotoru jsem použil dvou výkyvných ložisek typu UCPA 202, které jsou upevněny šrouby na konstrukci typu H, svařenou z obdélníkových profilů 40 x 20 x 2 (Obr. 5-4). Konstrukce tvoří dvě části, kde je v horní části na ložiscích uložen rotor a ve spodní části místo pro využití osy.

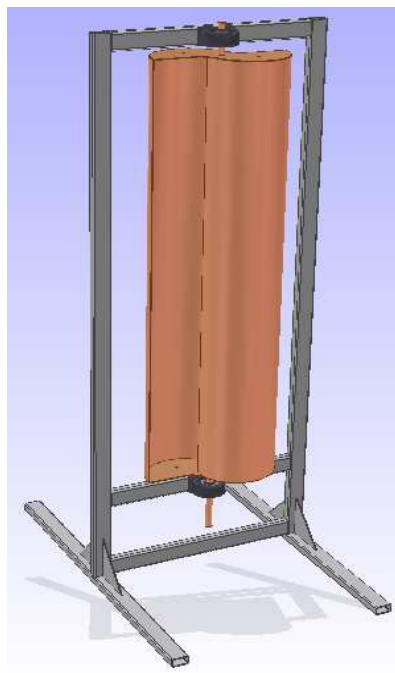
Konstrukce je zakončena trojúhelníkovými výztuhy a k nim přivařených obdélníkových profilů, které slouží pro stabilizaci celé konstrukce.



Obr. 5-4 Stojan rotoru.

5.3 Sestava kompletního modelu

Kompletní návrh konstrukce sestaveného rotoru uloženého ve stojanu (Obr.5-5) a samotná realizace projektu (Obr.5-6).



Obr. 5-5 Celková sestava.



Obr. 5-6 Realizovaný model.

5.4 Brzda rotoru

Protože, při měření bude potřeba rotor zastavit a zjistit rozběhové vlastnosti rotoru, vybavil jsem sestavu o dodatečnou brzdu.

Brzda se skládá z upravené klešťové cyklistické brzdy (Obr.5-7), kterou lze ovládat přes brzdné lanko pomocí páčky umístěné ve spodní části stojanu (Obr.5-8).

Samotná brzda by ovšem nestačila, pro úplné zastavení rotoru, při velkých rychlostech větru nad 10 m/s, kdy je rotor zatěžován velkými momenty vzniklými působením větru. Proto se jako nejrozumnější způsob brzdění předpokládá umístění klešťové brzdy na převodové řemenici umístěné na ose rotoru, která bude pohánět generátor.



Obr. 5-7 Umístění klešťové brzdy a brzdící páčky.

6 MĚŘENÍ NA MODELU

6.1 Postup měření

Měření otáček na modelu jsem prováděl v nezatíženém stavu rotoru na střeše Ústavu energetiky pomocí meteostanice Vaisala, která pro měření větru používá ultrazvuková čidla. Meteostanice byla umístěna na nosné konstrukci rotoru a pro měření byla nastavena v minutovém intervalu, kterým vyhodnocovala průměrnou hodnotu rychlosti větru po třívteřinových intervalech.

Pro měření otáček jsem použil bezkontaktní otáčkoměr Dual Digital Tachometer DT2L/K s displejem, kterým jsem snímal otáčky rotoru. Protože otáčkoměr zobrazoval pouze okamžité hodnoty otáček s dvouvteřinovým zpožděním, zapisoval jsem otáčky celkem čtyřikrát za minutu.

6.2 Naměřené hodnoty

Každý větrný rotor má své provozní vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti se řadí obvodová účinnost η_{ob} činitel momentu C_m , činitel výkonu C_p a rychlostní součinitel λ . Všechny tyto hodnoty jsou sestavovány pomocí bezrozměrných veličin charakterizujících realizovaný model větrného rotoru.

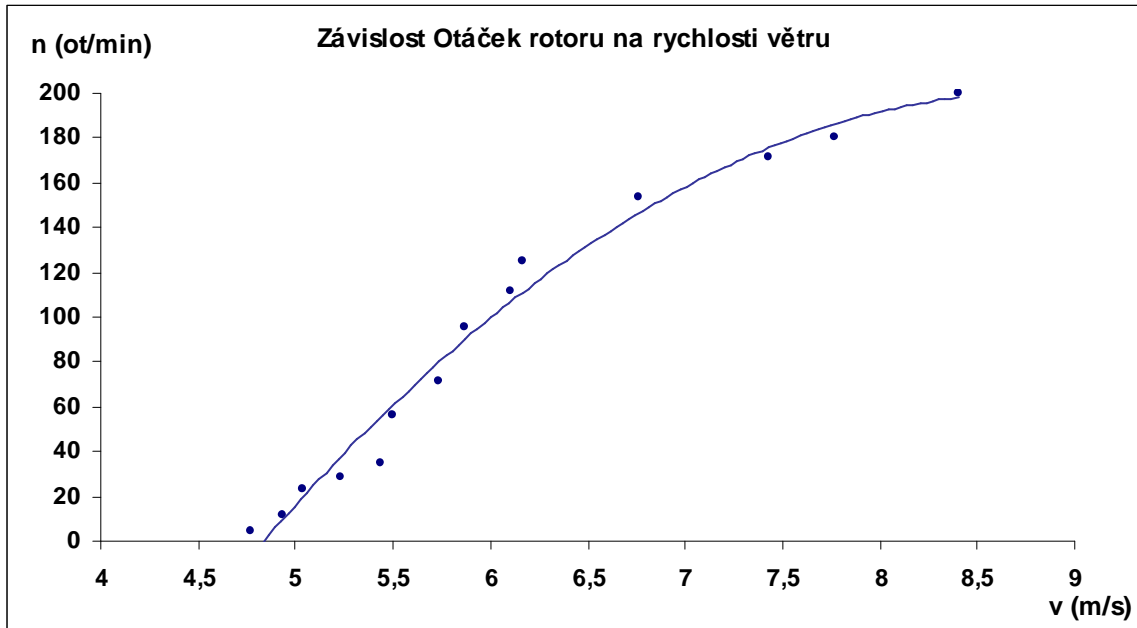
6.2.1 Data z laboratorního měření

Protože při měření rychlosti větru ve venkovních podmínkách nelze měřit exponenciálně se zvětšující rychlosti větru a od něj i zvyšující se otáčky, rozhodl jsem se k vytvoření provizorního větrného tunelu v laboratorních podmínkách.

Naměřené hodnoty byly změřeny v provizorním větrném tunelu, který se skládal z ventilátoru o průměru 0,4 m a z 1,5 m dlouhého papírového konfuzoru, který vytvořil rovnoměrný proud vzduchu vycházející na větrnou turbínu. Hodnoty rychlosti vzduchu a otáček rotoru jsem zaznamenával po vzdálenostech 0,2 m od konfuzoru, jak je patrné z (Tab. 6-1) a zobrazeno v grafu (Obr. 6-1).

l (m)	v (m.s ⁻¹)	n(ot.min ⁻¹)
2,6	4,77	4,5
2,4	4,93	11,2
2,2	5,03	22,9
2	5,23	29
1,8	5,43	35
1,6	5,50	56,5
1,4	5,73	71,8
1,2	5,87	95,6
1	6,10	111,8
0,8	6,17	125,2
0,6	6,77	154
0,4	7,43	176,7
0,3	7,83	180,6
0,2	8,40	200

Tab. 6-1 Laboratorní měření.



Obr. 6-1 Naměřená data rychlosti větru a otáček rotoru z laboratorního měření.

6.2.2 Výpočet naměřených hodnot

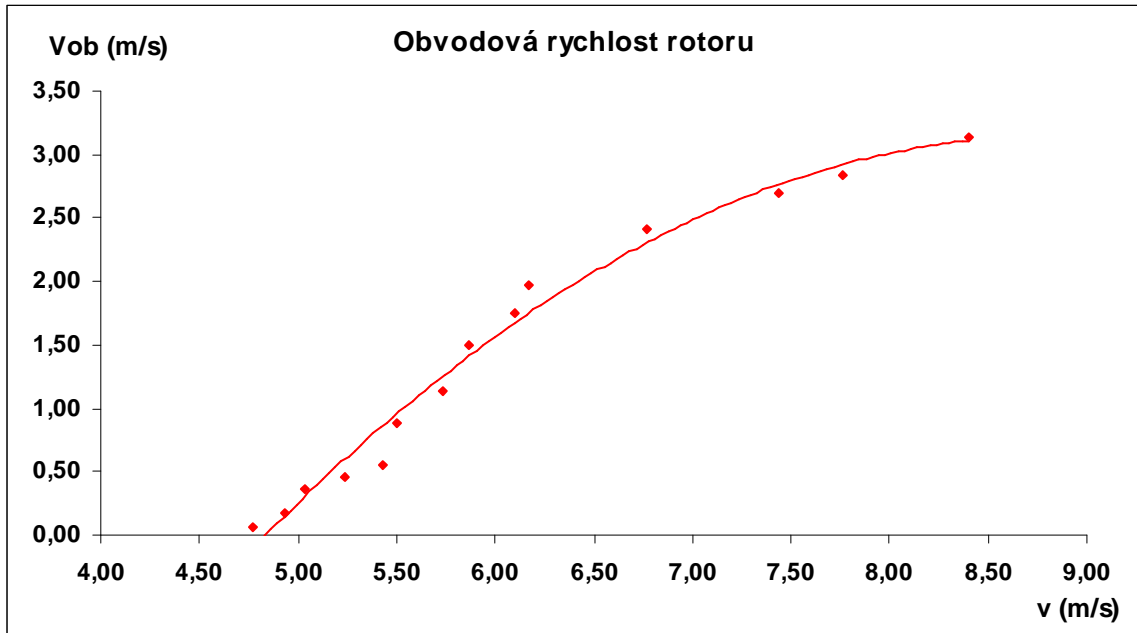
Vypočtené hodnoty obvodové rychlosti, rychloběžnosti, součinitele výkonu a výkonu rotoru jsou zaznamenány v (Tab.6-2) a zobrazeny v grafu (Obr. 6-2), (Graf.6-3), (Graf.6-4). Výpočty jsou provedeny pro vyznačený řádek tabulky (Tab.6-2) při rychlosti větru $6,1 \text{ m.s}^{-1}$.

l (m)	v (m.s ⁻¹)	n _s (ot.min ⁻¹)	n (ot s ⁻¹)	v _{ob} = u _t (m.s ⁻¹)	λ	C _p	P(W)
2,6	4,77	4,5	0,08	0,07	0,015	0,004	0,04
2,4	4,93	11,2	0,19	0,18	0,036	0,012	0,12
2,2	5,03	22,9	0,38	0,36	0,071	0,028	0,32
2	5,23	29	0,48	0,46	0,087	0,037	0,48
1,8	5,43	35	0,58	0,55	0,101	0,045	0,66
1,6	5,50	56,5	0,94	0,89	0,161	0,091	1,37
1,4	5,73	71,8	1,20	1,13	0,197	0,125	2,13
1,2	5,87	95,6	1,59	1,50	0,256	0,193	3,53
1	6,10	111,8	1,86	1,76	0,288	0,236	4,84
0,8	6,17	125,2	2,09	1,97	0,319	0,282	5,97
0,6	6,77	154	2,57	2,42	0,357	0,344	9,64
0,4	7,43	171,7	2,86	2,70	0,363	0,354	13,12
0,3	7,77	180,6	3,01	2,84	0,365	0,358	15,14
0,2	8,40	200	3,33	3,14	0,374	0,373	19,98

Tab. 6-2 Tabulka výpočtu rychloběžnosti a součinitele výkonu.

Po dosazení otáček z (Tab. 6-2) do vztahu (4.6) získáme obvodovou rychlost rotoru.

$$v_{ob} = \omega \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot 1,86 \cdot 0,15 = 1,76 \text{ m.s}^{-1} \quad (6.1)$$



Obr. 6-2 Obvodová rychlost rotoru.

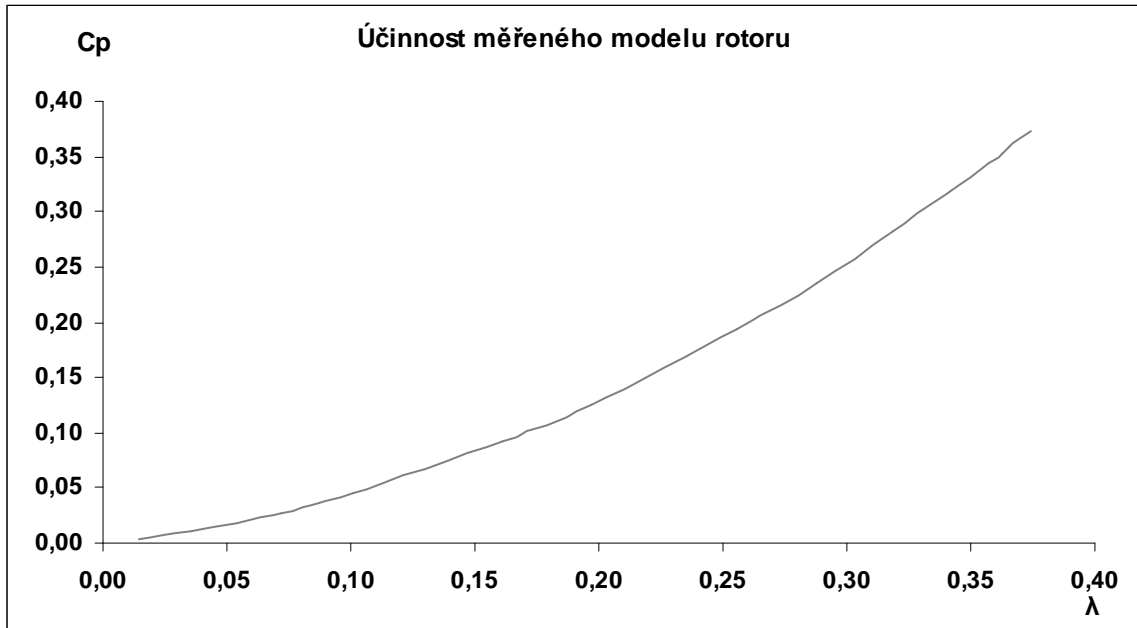
Pro výpočet rychloběžnosti rotoru dosadíme do vztahu (4.7) obvodovou rychlost a rychlost větru z (Tab. 6-2).

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,86 \cdot 0,15}{6,1} = 0,288 \quad (6.2)$$

Součinitel výkonu získáme dosazením do vztahu (4.11). Obvodovou rychlost rotoru a rychloběžnost dosadíme z tabulky (Tab. 6-2) a odporové součinitele pro půlválec z (Tab. 4-1) Odporové součinitele jsou označeny jako (c_1) pro vypuklou plochu po větru a (c_2) pro vypuklou plochu proti větru.

$$C_p = \frac{c_2 \cdot (v + u_t)^2 u_t - c_1 \cdot (v - u_t)^2 u_t}{2 \cdot v^3} \quad (6.3)$$

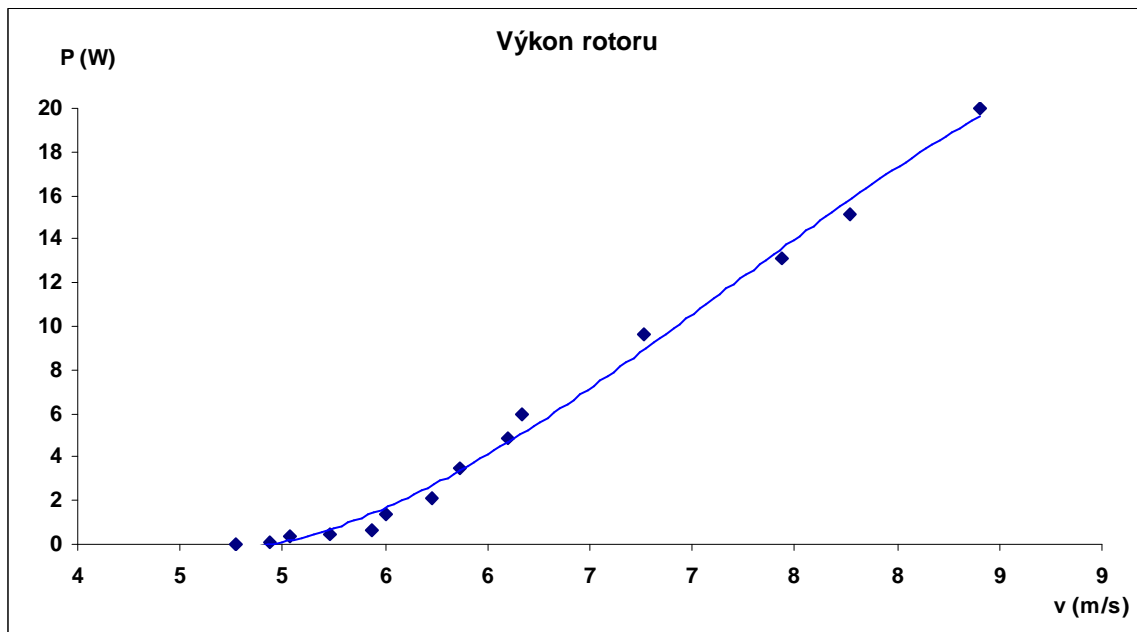
$$C_p = \frac{1,2 \cdot (6,1 + 1,76)^2 1,76 - 0,69 \cdot (6,1 - 1,76)^2 1,76}{2 \cdot 6,1^3} = 0,236$$



Obr. 6-3 Účinnost rotoru.

Pro výpočet výkonu nezátíženého rotoru dosadíme za (C_p) z (Tab. 6-2) do upraveného vztahu (4.22).

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \frac{S}{2} \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 0,236 \cdot \frac{0,3}{2} \cdot 1,2047 \cdot 6,1^3 = 4,87 \text{ W} \quad (6.4)$$



Obr. 6-4 Závislost výkonu rotoru na rychlosti větru.

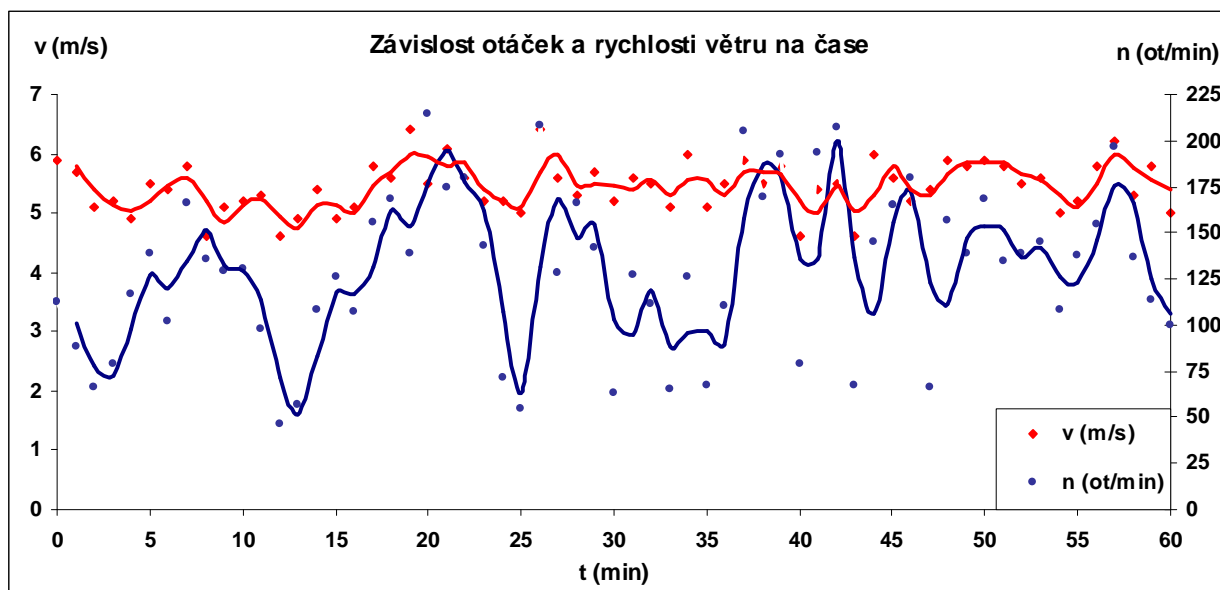
6.2.3 Data z hodinového venkovního měření

Provedl jsem celkem pět měření ve venkovních podmínkách. Pro zpracování dat jsem vybral data změřena v nejméně vhodný den měření (Tab. 6-3). Naměřená data byla měřena po dobu

jedné hodiny. Zaznamenané hodnoty z jednodenního měření jsou přiloženy v příloze viz. (Příloha B) a zobrazeny v grafu (Obr. 6-5).

Datum:	28.4.2009
Čas:	10h 50min
Teplota:	14,8°C
Vlhkost:	38,20%
Tlak:	972,8 hPa

Tab. 6-3 Meteorologická data v den měření.



Obr. 6-5 Naměřená data rychlosti větru a otáček rotoru v hodinovém intervalu.

Z tabulky (Příloha B) a grafu je patrné, že průměrná rychlost větru dosahovala $5,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a průměrná hodnota otáček byla $120 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Rozmezí rychlosti větru se pohybovalo od $4,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Velké výkyvy otáček rotoru byly způsobovány většími porывy větru, které anemometr nezobrazoval v reálném čase, proto také nebyly zaznamenávány.

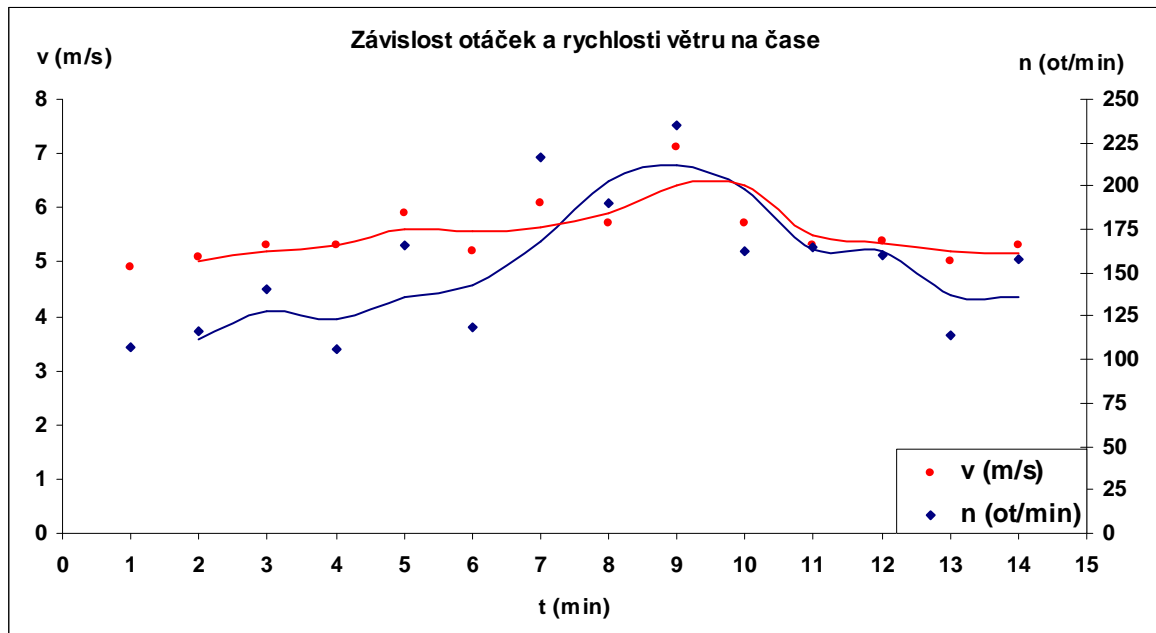
Při tomto měření jsem také zaznamenal maximální náraz větru o velikosti $20,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a otáčky rotoru, jež dosáhly rychlosti až $348 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, ty musely být ve skutečnosti mnohem vyšší s ohledem na zpoždění rozběhnutí rotoru a záznamovou schopnost otáčkoměru, který má dvouvteřinové zpoždění.

6.2.4 Data z venkovního zrychleného měření

Data byly měřeny po dobu 14 minut za podmínek dle (Tab. 6-3). Zaznamenané hodnoty ze zrychleného měření jsou přiloženy v tabulce viz. (Příloha C). Průměrné hodnoty jsou zpracovány v tabulce (Tab. 6-4) a zobrazeny v grafu (Obr. 6-6).

t (min)	n (ot.min ⁻¹)	n (ot.s ⁻¹)	v (m.s ⁻¹)
1	107,07	1,78	4,9
2	116,34	1,94	5,1
3	140,13	2,34	5,3
4	106,27	1,77	5,3
5	166,06	2,77	5,9
6	119,16	1,99	5,2
7	216,12	3,60	6,1
8	190,38	3,17	5,7
9	234,69	3,91	7,1
10	162,25	2,70	5,7
11	164,40	2,74	5,3
12	160,67	2,68	5,4
13	114,58	1,91	5
14	157,50	2,63	5,3

Tab. 6-4 Průměrné hodnoty skutečného zrychleného měření.



Obr. 6-6 Naměřená data rychlosti větru a otáček rotoru v 14 minutovém intervalu.

Pro zobrazení v grafech jsem vybral z (Tab. 6-4) vybrané hodnoty a vzestupně seřadil hodnoty rychlosti větru a otáček rotoru v (Tab. 6-5). V tabulce je dále proveden výpočet obvodové rychlosti dle vztahu (6.1) součinitele výkonu dle (6.3) a výkonu rotoru podle rovnice (6.4).

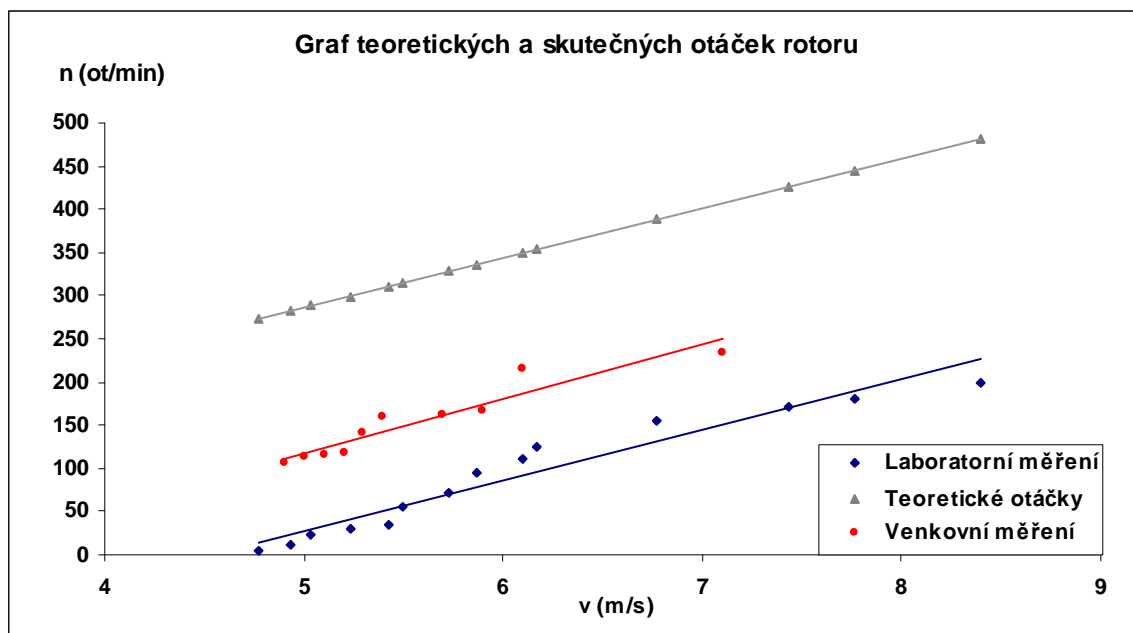
v (m.s ⁻¹)	n (ot.min ⁻¹)	n (ot.s ⁻¹)	u_t (m.s ⁻¹)	λ	C_p	P (W)
4,9	107,07	1,78	1,68	0,343	0,320	3,41
5	114,58	1,91	1,80	0,360	0,349	3,94
5,1	116,34	1,94	1,83	0,358	0,346	4,14
5,2	119,16	1,99	1,87	0,360	0,349	4,43
5,3	140,13	2,34	2,20	0,415	0,450	6,05
5,4	160,67	2,68	2,52	0,467	0,558	7,94
5,7	162,25	2,70	2,55	0,447	0,515	8,61
5,9	166,06	2,77	2,61	0,442	0,504	9,36
6,1	216,12	3,60	3,39	0,557	0,771	15,82
7,1	234,69	3,91	3,69	0,519	0,678	21,91

Tab. 6-5 Vzestupně seřazená data z venkovního zrychleného měření.

7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

7.1 Porovnání otáček rotoru

Teoretický výpočet otáček jsem provedl pomocí rovnice (4.21), kde jsem dosadil zvolený součinitel rychloběžnosti $\lambda = 0,9$. V grafu jsou vyneseny hodnoty teoretických otáček z (Tab. 4-2) a skutečných otáček z laboratorního měření (Tab. 6-2) a venkovního zrychleného měření (Tab. 6-5).

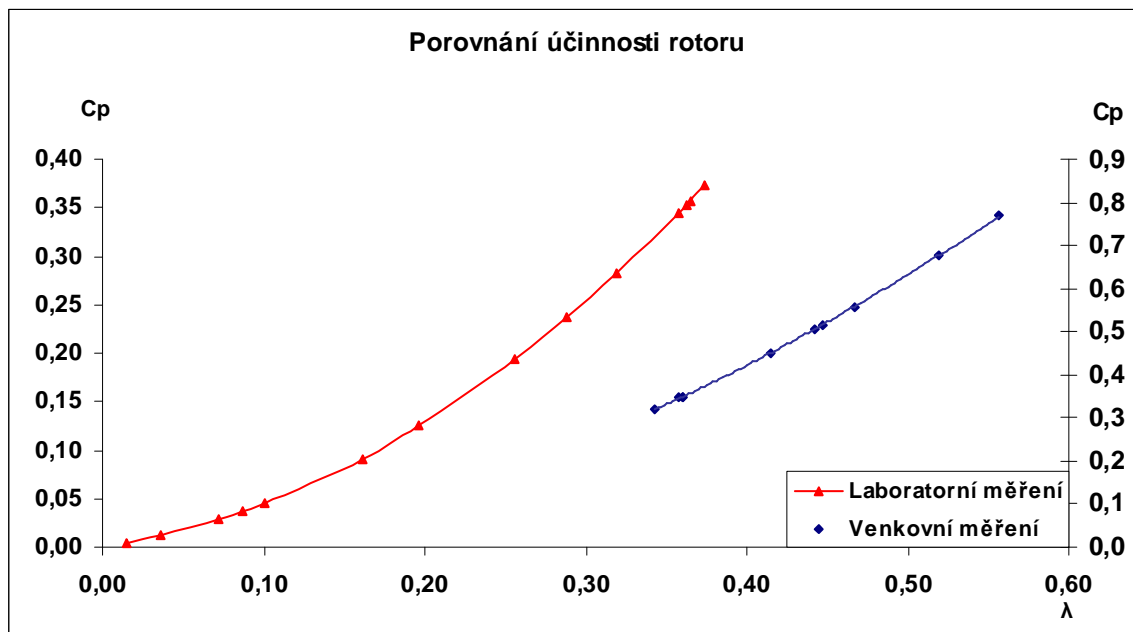


Obr. 7-1 Porovnání teoretických a skutečných otáček rotoru.

7.2 Porovnání součinitele rychloběžnosti

Pro určení základní charakteristiky rotoru závislosti otáček na rychlosti větru jsem nejprve musel stanovit součinitel výkonu a zněj součinitel rychloběžnosti. Pro zjištění součinitele rychloběžnosti jsem vycházel z experimentálního grafu pro Savoniův rotor, kde při maximálním součiniteli výkonu $C_p = 0,3$ je součinitel rychloběžnosti $\lambda = 0,9$.

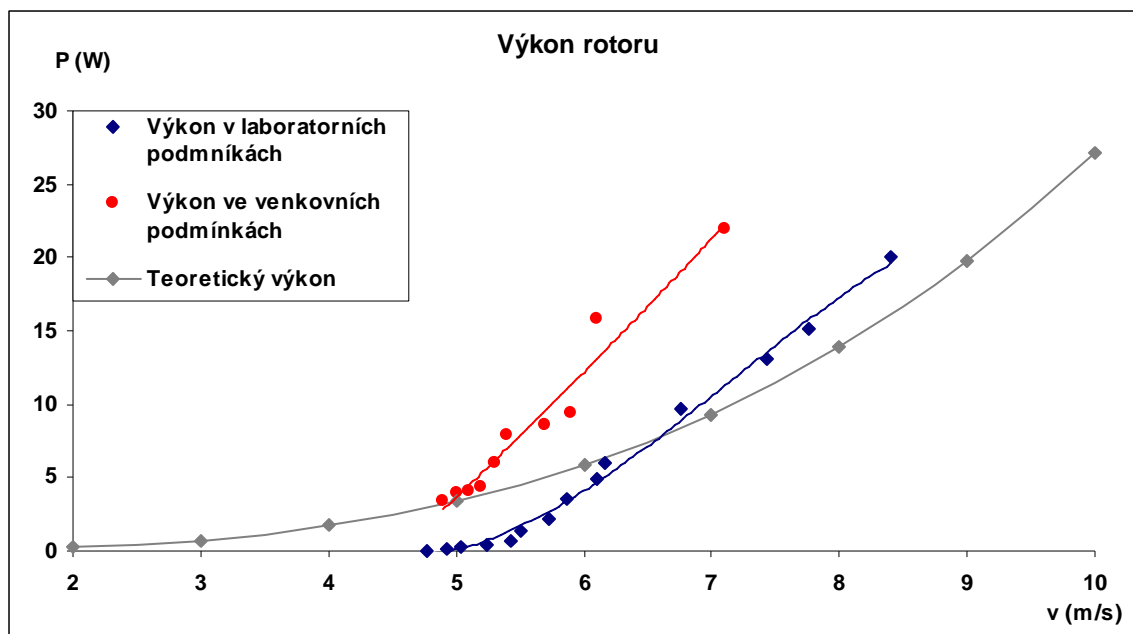
Pro porovnání jsem do grafu (Obr. 7-2) vynesl hodnoty z tabulek (Tab. 6-2) a (Tab. 6-5).



Obr. 7-2 Porovnání rychloběžnosti a součinitele výkonu.

7.3 Porovnání výkonu rotoru

Při porovnávání výkonu jsem vycházel z laboratorního měření naměřených hodnot v provizorním vzduchovém tunelu (Tab. 6-2), dále z upravených hodnot získaných při venkovním zrychleném měření (Tab. 6-5) a nakonec z teoretických výpočtů výkonu rotoru (Tab. 4-2). Porovnání těchto hodnot je zobrazeno v následujícím grafu.



Obr. 7-3 Porovnání skutečného a teoretického výkonu rotoru.

7.4 Zhodnocení porovnávaných dat

Porovnávaná data jsou v tabulkách (Tab. 4-2) (Tab. 6-2) a (Tab. 6-5) vyznačena zvýrazněným řádkem, pro rychlost větru $6,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

7.4.1 Zhodnocení porovnání otáček rotoru

V grafu (Obr. 7-1) je znatelný rozdíl mezi zkušebními otáčkami a otáčkami venkovními. Při laboratorním měření (Tab. 6-2) dosáhly otáčky rotoru $112 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. U skutečného zrychleného měření viz.(Tab. 6-5) se dosáhlo $216 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Tento rozdíl je dán tím, že větrný tunel měl plochu vyústění na rotor menší než čelní plochu rotoru, proto se nedocílilo vhodných aerodynamických podmínek pro celkové ofukování rotoru, jak tomu bylo u venkovního zrychleného měření.

Teoretické otáčky byly vypočítány na $350 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Při výpočtu teoretických otáček se neuvažovalo se ztrátami. Pro určení přesnějších teoretických hodnot otáček by se musely vzít v potaz ztráty v ložiscích, ztráty turbulentním prouděním rotoru a vliv turbulentního proudění držáku rotoru. Tyto vlivy na ztráty se liší u každého typu rotoru a musela by mu být věnována samostatná studie.

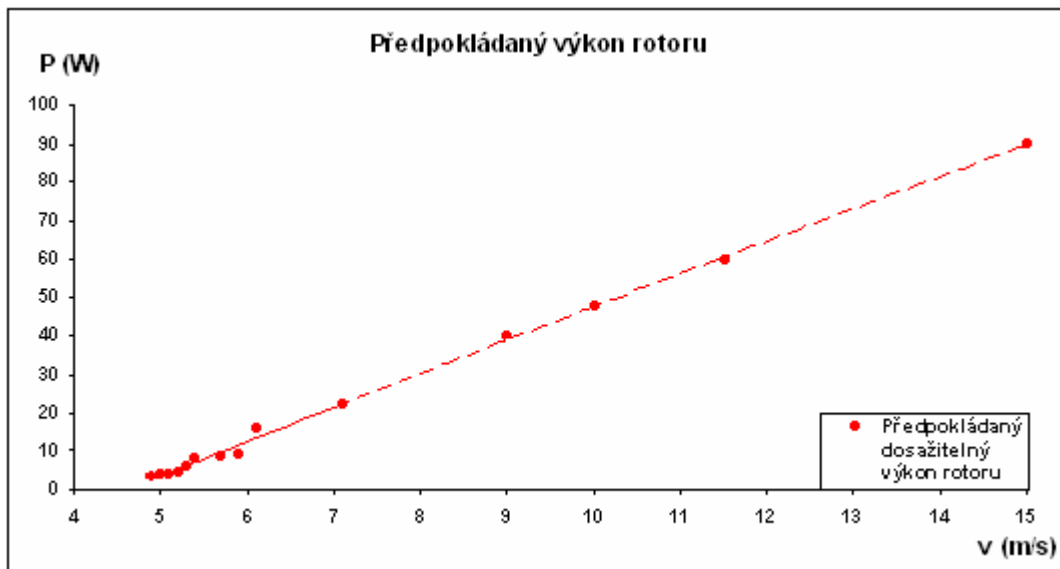
7.4.2 Zhodnocení porovnání výkonu rotoru

Z porovnání výkonu z grafu (Obr. 7-3) vyplývá, že největšího výkonu dosáhl rotor měřený ve venkovních podmínkách, kde dosahoval $15,81 \text{ W}$. Pro laboratorní měření vyšel výkon menší než teoretický ($6,15 \text{ W}$) a to $4,84 \text{ W}$, ovšem jen do hodnoty rychlosti větru kolem $6,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kde jej překročil, jak je patrné z grafu.

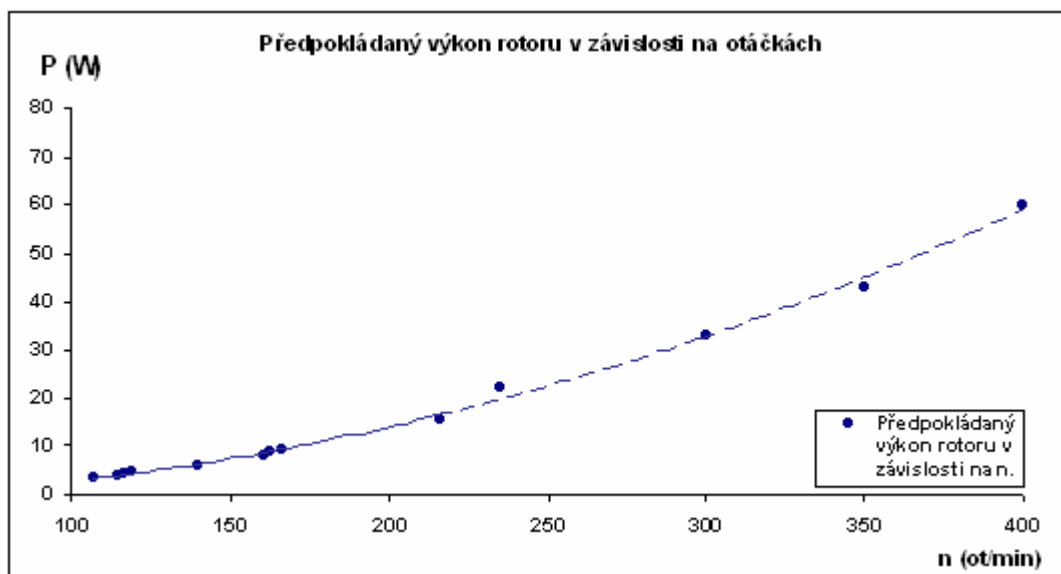
Domnívám se ovšem, že i skutečně naměřený výkon rotoru se protne s teoretickým výkonem při rychlosti větru kolem $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a otáčky rotoru se začnou ustalovat od $300 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$.

7.5 Předpokládaný dodávaný výkon

Poněvadž jsem neměl možnost při svém měření zaznamenat hodnoty otáček při vyšších rychlostech větru, vykreslil jsem v grafu (Obr. 7-4) a (Obr. 7-5) hodnoty předpokládaného výkonu rotoru (čárkovaná oblast) v závislosti na rychlosti větru (do $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a otáčkách.



Obr. 7-4 Předpokládaný výkon rotoru v závislosti na rychlosti větru.



Obr. 7-5 Předpokládaný výkon rotoru v závislosti na otáčkách.

8 ELEKTRICKÉ ZAŘÍZENÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Pro Savoniovy rotory o malých velikostech se nejvíce uplatní výroba stejnosměrného napětí pro dobíjení baterií. Výroba střídavého napětí za účelem dodávky výkonu do sítě by se dala využít pouze u rotorů s velkou čelní plochou. Naproti tomu výroba neupraveného střídavého napětí pro účely vytápění může být ekonomicky výhodnější, než dodávka upraveného napětí do sítě.

8.1 Generátory střídavého proudu

Použití generátorů s buzením permanentními magnety získává u větrných elektráren na významu pro nabíjení baterií a výrobu topného proudu [10].

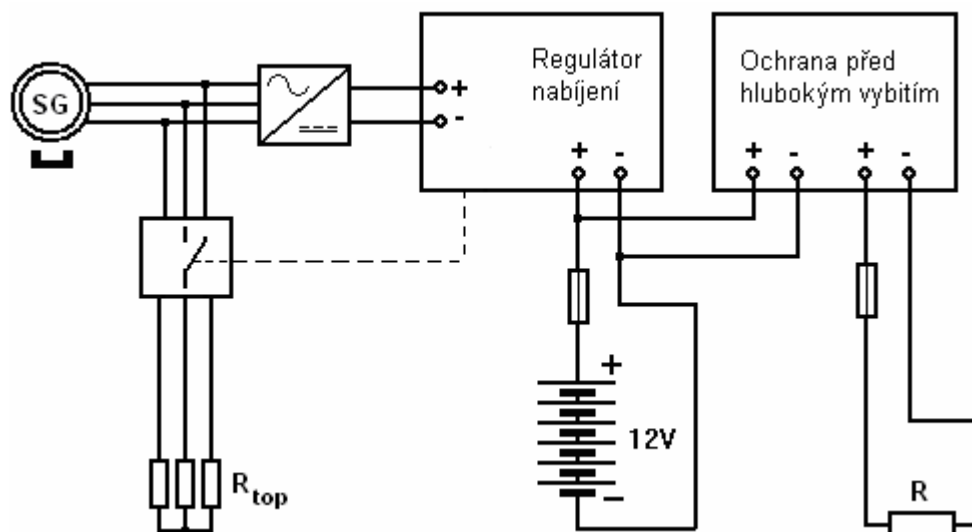
U synchronních generátorů s permanentními magnety není magnetické pole nutné pro výrobu proudu generováno vinutím protékáním proudem, ale právě permanentními magnety. Tím odpadá spotřeba proudu vinutím magnetů, která při nízkých otáčkách generátoru může být vyšší než vyráběná užitečná energie. Používání generátorů s permanentními magnety dostalo na významu s příchodem nových slitin materiálů jako NdFeB (Neodym-železo-bor) označované jako neodymové permanentními magnety. Tyto neodymové magnety mají třikrát větší intenzitu magnetického pole než feritové permanentní magnety, proto se uplatňují ve stejnosměrných i střídavých motorech a generátorech.

Napětí a intenzita proudu závisí kromě otáček také na intenzitě magnetického pole ve vzduchové mezeře, počtu pólů a délce vinutí na němž se indukuje proud. Abychom už při nízkých otáčkách mohli vyrábět dostatečně vysoké napětí a obešli se bez vysokého, více stupňového a výkon snižujícího převodu, použijí se generátory s větším počtem pólů.

Je-li dáno určité minimální napětí, například při nabíjení baterie, může generátor přivádět do baterie proud a nabíjet ji přirozeně jen do určitého počtu otáček. Při zvýšení otáček se pak zvětšuje jen intenzita proudu, zatímco baterie v závislosti na stavu nabíjení a vnitřním odporu nadále udržuje generátorové napětí na konstantní úrovni. Musí ovšem dbát na to, aby nebyla překročena přípustná intenzita nabíjecího proudu a nedošlo k přebití baterie.

Větrná turbína, generátor a baterie proto musejí být vzájemně sladěny co do výkonu a kapacity. Jestliže proud není spotřebováván průběžně a trvá nebezpečí přebití, musí být instalován regulátor nabíjení, který při dosažení horního mezního napětí odpojí baterii od generátoru a znovu ji připojí teprve po poklesu jejího napětí vybitím.

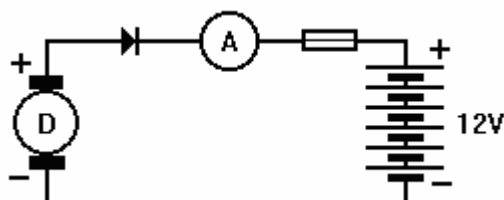
Chceme-li zabránit tomu, aby větrná turbína po odpojení od baterie běžela naprázdno a aby při vysokých rychlostech větru dosahovala příliš vysokých otáček, měli bychom na místo baterie připojit dostatečně silný zatěžovací odpor (řízený paralelním regulátorem nabíjení), například topné odpory (topná spirála), které energii generátoru přemění na teplo (Obr. 8-1) [10].



Obr. 8-1 Synchronní generátor pracující do baterie i zátěže.

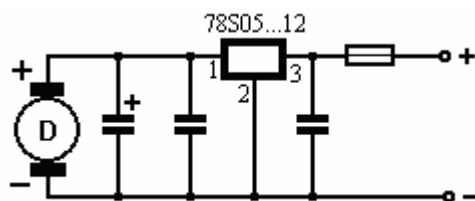
8.2 Generátory stejnosměrného proudu

Malé generátory stejnosměrného proudu se skládají z miskových permanentních magnetů upevněných na stabilním krytu. Proud je indukován v rotoru a odváděn přes komutátor na uhlíkové kartáče ke spotřebiči. Stejně jako u střídavých generátorů i zde se uplatní pro menší otáčky vícepólové (např. 12-pólové) provedení generátoru. Základní zapojení stejnosměrného generátoru pro nabíjení baterie je na obrázku (Obr. 8-2) [6]. Obvod obsahuje diodu, která brání motorickému režimu generátoru.



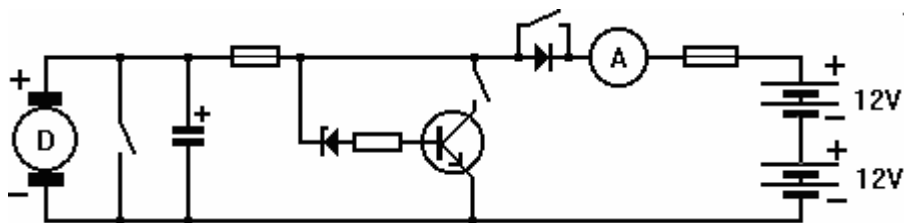
Obr. 8-2 Základní zapojení.

Pokud vznikne potřeba dodávky stejnosměrného napětí bez zapojeného akumulátoru, musí se napětí stabilizovat pro daný spotřebič stabilizátorem. Při chodu stejnosměrného generátoru vzniká rušivé jiskření kartáčů na komutátoru, proto je vhodné zapojení odrušovacího kondenzátoru co nejbližší ke kartáčům (Obr. 8-3) [6].



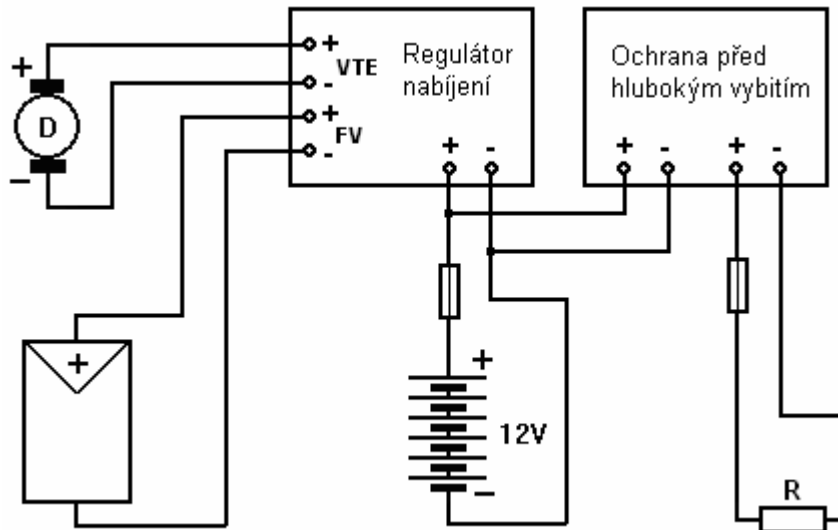
Obr. 8-3 Zapojení se stabilizátorem.

Umělá zátěž použitá při nabíjení, zamezí nežádoucímu přebíjení akumulátoru tak, že se přebytečná energie na výkonovém tranzistoru přemění na teplo (při sepnutém kolektorovém vypínači) (Obr. 8-4). Jestliže přemostíme diodu a rozepneme kolektorový vypínač můžeme motoricky rozběhnout rotor a elektrárna se udrží v chodu i za slabšího větru. Při zkratování vypínače mezi uhlíky můžeme elektrárnu zabrzdít [6].



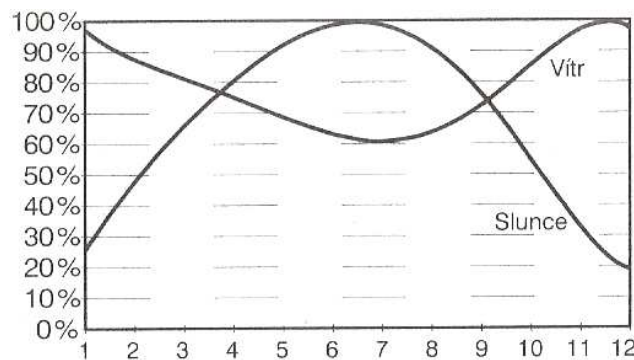
Obr. 8-4 Zapojení s umělou zátěží a baterií.

Nejvýhodnější využití stejnosměrných generátorů najdeme v paralelním provozu ve spojení s fotovoltaickými panely, při akumulaci elektrické energie do baterií (Obr. 8-5).



Obr. 8-5 Paralelní zapojení FV a větrné elektrárny.

Takto zapojený systém pokryje celoroční potřebu elektrické energie v málo větrných a slunečných měsících (Obr. 8-6).



Obr. 8-6 Roční průběh nabídky sluneční a větrné energie [2].

8.3 Akumulace elektrické energie

8.3.1 Chemická akumulace

Při akumulaci elektrické energie z menších zdrojů energie se ve většině případů používají chemické akumulátory.

K akumulaci elektrické energie je nejvýhodnější použití dvou základních typů akumulátorových baterií: olověné nebo alkalické (niklkadmiové, niklželezné). Pro tyto účely je vhodné použít trakční a napájecí baterie [4]. Každý z těchto druhů akumulátorových baterií má své specifické vlastnosti, jejich porovnání je uvedeno v příloze (Příloha D).

Olověné akumulátorové baterie poskytují vyšší napětí pro jednotlivé články, mají menší pořizovací náklady a větší energetickou účinnost. Pro dlouhodobější provoz jsou však klasické startovací baterie vzhledem k nutnosti udržování hladiny elektrolytu nevhodné. Proto jsou vhodnější bezúdržbové, ventilem řízené baterie, ve kterých je elektrolyt ve formě gelu a které se nemusejí po dobu své životnosti doplňovat.

Niklkadmiové a niklželezné akumulátorové baterie, patřící většinou k trakčním bateriím, mají delší životnost a snadno se udržují, jsou provozně spolehlivější, méně náročné v provozu

z hlediska přebíjení a hloubky vybití. Z ekologického hlediska kladou niklželezné akumulátory minimální nároky na jejich provoz a recyklaci.

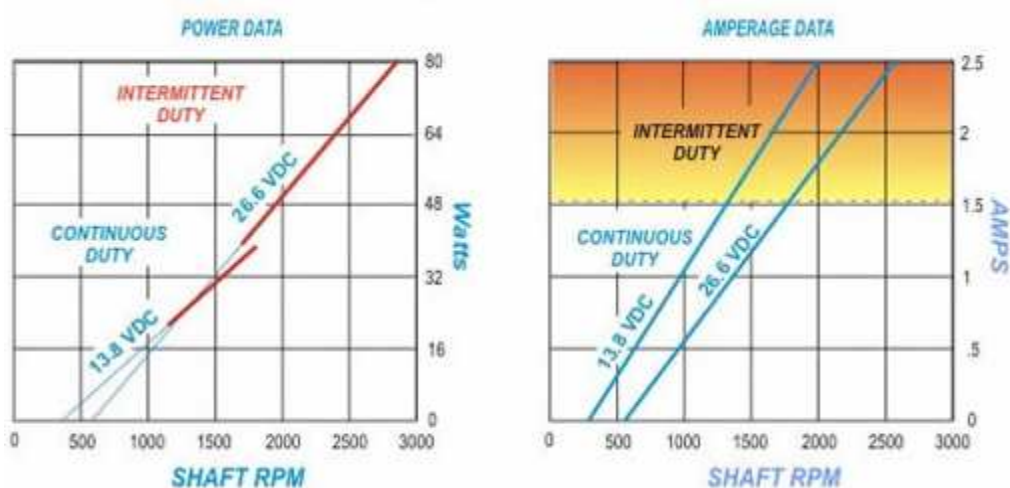
8.3.2 Tepelná akumulace

Pro tepelnou akumulaci lze využít ohřev vhodné látky (nejčastěji vody), kdy množství akumulovaného tepla je přímo úměrné změně teploty, měrné tepelné kapacitě látky a její hmotnosti [9]. Nejčastější využití takto akumulované energie najde uplatnění při ohřevu TUV (teplé užitkové vody).

8.4 Připojení stejnosměrného generátoru

8.4.1 Generátor

Pro možnou výrobu elektrické energie jsem vybral stejnosměrný elektrický generátor s permanentními magnety ve statoru (Typ: DC Generator (443540)). Výkonové a proudové parametry generátoru v závislosti na otáčkách jsou uvedeny v grafech (Obr. 8-7) [14]. Pro vyšší výstupní výkon volím napájení do dvou sériově zapojených 12V baterií (viz. Obr. 8-4) výstupní napětí 26,6 V.



Obr. 8-7 Výkonové a proudové parametry DC generátoru.

8.4.2 Převodový stupeň

Protože zvolený generátor začíná dodávat proud až při 600 ot.min⁻¹, je nutné zařazení převodu mezi rotor a generátor. Výpočet otáček převodu pro rychlost větru 5 m.s⁻¹ z tabulky (Tab. 6-5) tak, aby při této rychlosti začal generátor vyrábět proud. Volím si převod ozubeným řemenem šířky 10 mm a normované řemenice (Tab. 8-1)[8].

	Typ	Výpočtový průměr (mm)
d _{P2}	21 T 5/18	28,65
d _{P1}	31 T 10/48	152,78

Tab. 8-1 Řemenice.

Výpočet převodu do rychla pro otáčky generátoru:

$$n_{P2} = \frac{n_{P1} \cdot d_{P1}}{d_{P2}} = \frac{114,58 \cdot 152,78}{28,65} = 611 \text{ ot. min}^{-1} \quad (8.1)$$

Kde: n_{P1} [ot.min⁻¹]otáčky rotoru
 n_{P2} [ot.min⁻¹]otáčky generátoru
 d_{P1} [mm] průměr hnací řemenice
 d_{P2} [mm] průměr hnané řemenice

8.4.3 Dosažitelný elektrický výkon

Pro výpočet výkonu generátoru zanedbávám ztráty převodem a v ložiscích a uvažuji pouze účinnost generátoru $\eta = 85\%$

Potom:

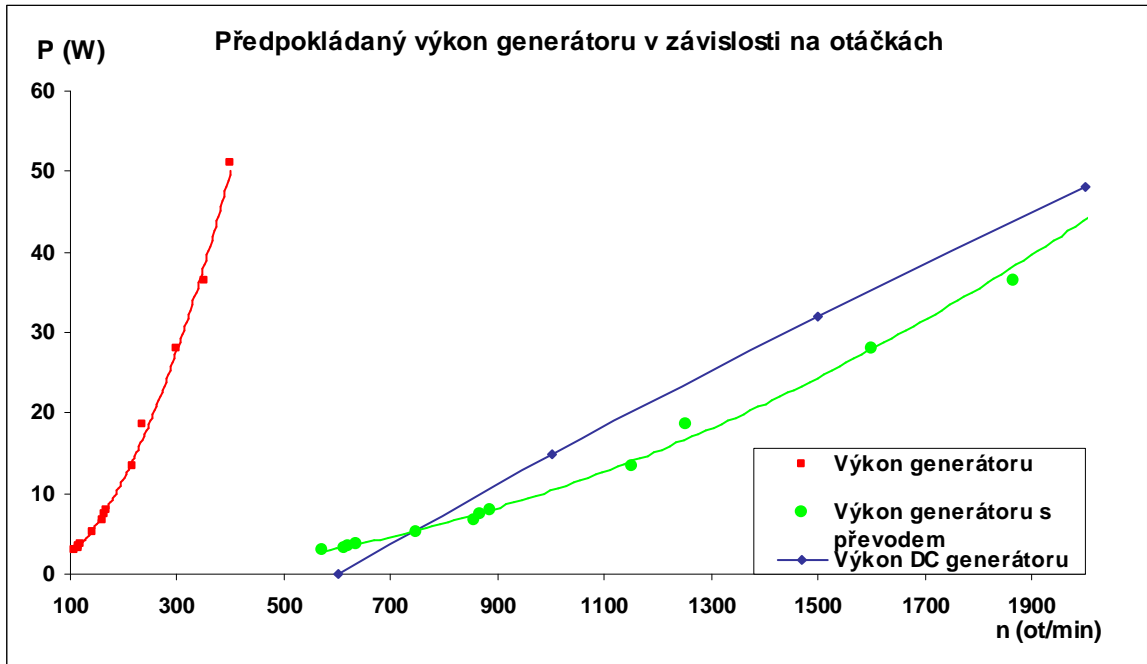
$$P_G = P_R \cdot \eta_G = 3,94 \cdot 0,85 = 3,35 \text{ W} \quad (8.2)$$

Kde: P_G [W] elektrický výkon generátoru
 P_R [W] mechanický výkon rotoru
 η_G [mm] účinnost generátoru

v (m.s ⁻¹)	n (ot.min ⁻¹)	P (W)
4,90	570,9475	2,90
5	611,0077	3,35
5,1	620,3906	3,52
5,2	635,4256	3,76
5,3	747,2355	5,15
5,4	856,7767	6,75
5,7	865,2201	7,32
5,9	885,5137	7,95
6,1	1152,477	13,44
7,1	1251,528	18,63
9	1599,791	28,05
10	1866,422	36,55
11,5	2133,054	51,00

Tab. 8-2 Výkon generátoru a otáčky převodu.

Vypočtené otáčky a výkon generátoru s převodem i výkon samostatného DC generátoru jsou zobrazeny v následujícím grafu.



Obr. 8-8 Výkon DC generátoru a generátoru v závislosti na otáčkách.

Z grafu je patrné, že zvolený generátor by mohl dodávat elektrický výkon již při 600 ot.min^{-1} což odpovídá 5 m.s^{-1} rychlosti větru. Maximální dosažitelný výkon by pak byl při 2000 ot.min^{-1} a to 49 W.

9 ZÁVĚR

9.1 Současný stav

V poslední době výrazně zpopularizované využívání větrné energie vede zahraniční i tuzemské výrobce k zvýšení výroby malých větrných elektráren. Začínají se prosazovat různé typy větrných elektráren a mezi tyto typy se může zařadit i Savoniův rotor se svou svislou osou a bez nutnosti natáčení do směru převládajícího větru.

Savoniův rotor prodělal od svého vzniku mnoho konstrukčních změn vedoucích k zvýšení účinnosti. Tyto změny se projevily od zlepšování rozběhových vlastností u vícestupňového rotoru, až po skroucené lopatky u spirálového rotoru, jenž se stal zřejmě posledním vývojovým stupněm Savoniova rotoru.

9.2 Závěry práce a její přínos

Cílem diplomové práce bylo navrhnutí a zhotovení funkčního modelu Savoniova rotoru, provedení základního měření na modelu a zjištění možnosti výroby elektrické energie.

V úvodní části jsem uvedl princip, rozdělení a vyžití Savoniova rotoru, jakožto i vhodné umístění takového zdroje v krajině. Popsal jsem také základní typy rotoru a používané stožáry.

Ve výpočtové části jsem se věnoval výpočtu jednostupňového Savoniova rotoru. Zde jsem se zabýval přesazením lopatek a průměrem rotoru při největší dosažitelné účinnosti, které rotor dosahuje přesazením lopatek. Vypočetl jsem také otáčky rotoru, výkon a kroutící moment. Pro výpočet těchto hodnot jsem určil potřebné koeficienty z experimentálního grafu (Obr. 4-4).

Návrhovou, jakož-to i výkresovou dokumentaci jsem provedl v programu Autodesk Inventor 11, skládá se z návrhu samotného rotoru a stojanu. Materiál pro rotor jsem vybral z mědi, nejenom proto, že jako osu jsem použil měděnou trubku, ale také pro jednoduchost spojování pájením. Pro uložení rotoru jsem zvolil dvou výkyvných ložisek připevněných na kovové konstrukci svařených z ocelových profilů. Při měření na sestaveném modelu se projevil požadavek na brzdění rotoru. Model byl proto dodatečně vybaven upravenou cyklistickou brzdou. Veškerá výkresová dokumentace je přiložena v příloze.

Měření na modelu jsem prováděl v nezatíženém stavu rotoru na střeše Ústavu energetiky a v laboratoři. Pro měření rychlosti větru jsem měl k dispozici meteostanici s ultrazvukovými čidly a pro měření otáček bezkontaktní otáčkoměr. Provedl jsem dva typy měření. První typ měření jsem provedl v laboratoři, po sestavení provizorního větrného tunelu sestaveného z větráku a konfuzoru. V tomto měření jsem docílil průběžné změny otáček a rychlosti větru oddalováním měřeného modelu od vyústění větrného tunelu. Z takto získaných hodnot jsem zjistil součinitel výkonu, rychloběžnost a výkon rotoru. Druhý typ měření probíhal ve venkovních podmínkách při různých rychlostech větru po dobu jedné hodiny. Z tohoto měření, jsem vypočetl taktéž hodnoty součinitel výkonu, rychloběžnosti a výkon rotoru.

V další části své práce jsem se věnoval porovnávání výsledků teoretických výpočtů, laboratorního měření a venkovního měření. Zde jsem porovnával otáčky, součinitele výkonu s rychloběžností a výkon. Také jsem odhadl předpokládaný dodávaný výkon rotoru v závislosti na rychlosti větru a otáčkách rotoru.

V poslední části se zabývám možnostmi výroby elektrické energie pomocí střídavých a stejnosměrných generátorů a popisem jejich základních zapojení. Pro posouzení možnosti

výroby elektrické energie jsem také uvedl možnost agregace Savoniova rotoru se stejnosměrným generátorem s permanentními magnety, pro něhož jsem vypočetl potřebný převod a výsledný možný dosažitelný výkon.

9.3 Význam a využití dosažených výsledků

Při měření ve venkovních podmínkách se rotor konstrukčně osvědčil a dokázal odolat i nárazu větru až 20 m.s^{-1} . Rozběh rotoru začínal až při 4 m.s^{-1} a to hlavně kvůli použitým kuličkovým ložiskům, které ještě nebyly dostatečně rozběhlé. Rovněž jednostupňové provedení, pro něž existovaly dva mrtvé úhly náběhu vzduchu, mělo vliv při rozběhu rotoru. Proto, by bylo vhodnější koncipovat model jako dělený s přesazenými lopatkami o 90° , kvůli zlepšení rozběhových vlastností. Rovněž použití stojanu rotoru by bylo vhodnější provést ze tří nebo čtyř ocelových trubek jako na obrázku (Obr. 3-5). Tím by se docílilo menšího turbulentního proudění v okolí rotoru.

Zhotovený model rotoru svými parametry patří mezi rychloběžnější odporové rotory a to hlavně díky malému průměru rotoru a tím větší obvodové rychlosti. Tento rotor se proto hodí spíše v agregaci se stejnosměrným generátorem pro napájení baterií, než ve spojení se střídavým generátorem, pro který má menší točivý moment jež je dán účinnou plochou rotoru.

Jako nejvýhodnější využití Savoniova rotoru, se zdá paralelní provoz s fotovoltaickými panely pro nabíjení baterií u nízkoenergetických či pasivních domů.

9.4 Návrh dalšího postupu

Při výpočtu přesazení lopatek se vycházelo z experimentálního grafu, tento graf ovšem sám o sobě podává údaje pro určitý rozměrový typ rotoru. Bylo by vhodné stanovit aerodynamické vlastnosti, pro různé tvary a přesazení lopatek, stejně jako je to u profilů leteckých křídel. Při takto stanovených hodnotách součinitele výkonu a rychloběžnosti by se již teoretické výpočty tak nelišily od skutečných.

Pro další zpřesnění využitelného výkonu, by měl být změřen výstupní moment na hřídeli rotoru, jež by vedl k optimálnímu návrhu použitého generátoru. Také by mělo být provedeno kontinuální měření rychlosti větru v závislosti na otáčkách rotoru ve vhodně umístěné lokalitě.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HALENGA UWE, Malá větrná elektrárna. Ostrava: nakladatelství HEL, s.r.o., 2006. 95s. ISBN: 80-86167-27-5
- [2] HENZE, Andreas, HILLEBRAND, Werner. Elektrický proud ze slunce. Ostrava : HEL, 2000. 130 s. ISBN 80-86167-12-7.
- [3] J.-L. Menet, "A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study," Renewable Energy vol.19 September 2004, page 1843-1862, ScienceDirect. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4S-4C2R1JJ-4&_user=640830&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000032308&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640830&md5=3c31eee95ea1c6d23920b021c996ab91
- [4] Kolektiv autorů. Obnovitelné zdroje energie. 2. dopl. vyd. Praha : FCC PUBLIC , 2001. ISBN 80-901985-8-9. Akumulace el.energie, s. 117-124.
- [5] KUDELAS, Dušan, RYBÁR , Radim. Technická analýza vhodnosti využitia rôznych typov veterných rotorov pre pohon kompresora akumuláčného systému umožňujúceho využitie nízkopotenciálnej veternej energie . Acta Montanistica Slovaca [online]. 2005 [cit. 2008-12-10], s. 1-2. Dostupný z WWW: <actamont.tuke.sk/pdf/2005/n1/8Kudelas.pdf ->.
- [6] LAIKA, Viktor. Malá voda. Malá voda [online]. 2006 [cit. 2009-05-09]. Dostupný z WWW: <http://mve.energetika.cz>
- [7] LUC MENET, Jean, BOURABAA, Nachida. INCREASE IN THE SAVONIUS ROTORS EFFICIENCY VIA A PARAMETRIC INVESTIGATION. [online]. 2002 [cit. 2008-12-10], s. 3-4. Dostupný z WWW: <www.2004ewec.info/files/23_1400_jeanlucmenet_01.pdf ->.
- [8] Ozubené řemenice. [cit. 2009-05-05]. Dostupný z WWW: <www.retezyolomouc.cz>.
- [9] RYCHETNÍK, V, JANOUŠEK, J, PAVELKA, J. Větrné motory a elektrárny. Praha : ČVUT, 1997. 199 s. ISBN 80-01-01563-7.
- [10] SCHULZ, H. Savoniův rotor. Ostrava: nakladatelství HEL, s.r.o., 2005. 77 s. ISBN: 80-86167-26-7
- [11] SLÁDEK, Ivan, HOSTÝNEK, Jiří. Větrná energie : Vítr a jeho energie. In PALEČEK, Roman. Energie 21-časopis o alternativních zdrojích energie. 1. vyd. Praha : Profi Press, s. r. o., 2008. Vítr a jeho energie. s. 36-37.
- [12] V Ě T R N Á E N E R G I E, EOLICKÁ ENERGIE . Zdroje Energie [online]. 2005 [cit. 2008-11-23], s. 13-14. Dostupný z WWW: <<http://www.vscht.cz/ktt/zdrene/>>.
- [13] Wikipedia The Free Encyclopedia : Savonius wind turbine [online]. 2008 [cit. 2008-11-23]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Savonius_wind_turbine>.
- [14] Windstream power LLC : Inovation in renewable energy since 1974 [online]. 2009 [cit. 2009-05-05]. Dostupný z WWW: <www.windstreampower.com>.

Příloha A Kusovník

Použitý ocelový materiál firma - Ferona

Materiál	Množství (kusů)	Označení	Rozměr (mm)	Délka (mm)	Cena za kus s (DPH)	Cena s (DPH)
Uzavřený obdélníkový profil – tažený	2	40 x 20 x 2		1300	93,28 Kč	186,56 Kč
Ocelová trubka hladká válcovaná za studena	2	40 x 20 x 2		800	49,75 Kč	99,50 Kč
Cu plech tloušťky 0,55 mm	3	40 x 20 x 2		450	27,98 Kč	83,94 Kč
Cu plech tloušťky 1 mm	1	15 x 1,25		4000		500,00 Kč
Ocelový plech válcovaný za studena	1		1200 x 1000 x 0,55			500,00 Kč
Metrický šroub DIN933, ISO4017	1		400 x 200 x 1			800,00 Kč
Závrtová tyč	4	M10 x 1,5	210 x 110 x 2			25,00 Kč
Matice	2	M6 x 1,5		10	0,50 Kč	2,00 Kč
Vějířová podložka	8	M6 x 1,5		1100	25,00 Kč	50,00 Kč
Litnový domek včetně ložiska UPCA 202	4	M10 x 1,5			0,35 Kč	2,80 Kč
	4	M10 x 1,5			0,50 Kč	2,00 Kč
	2	UPCA 202			0,40 Kč	1,60 Kč
					397,00 Kč	794,00 Kč
					Cena celkem:	3 047,40 Kč

Příloha B Venkovní měření

28.4.2009		Záznam otáček (ot/min)				Průměrné hodnoty	
t (min)	v (m/s)	15s	30s	45s	60s	n (ot/min)	n (ot/s)
0	5,9	224,3	108,7	125,2	104,2	112,70	1,88
1	5,7	95,7	75,2	75	108,4	88,58	1,48
2	5,1	83,5	56,6	72,3	52,3	66,18	1,10
3	5,2	122,8	54	80,2	59,7	79,18	1,32
4	4,9	130,7	114	63,3	158,2	116,55	1,94
5	5,5	165,7	77,2	145	167,2	138,78	2,31
6	5,4	137,9	92	117	59,9	101,70	1,70
7	5,8	65,2	170,3	252,2	178,7	166,60	2,78
8	4,6	92,6	237,8	184,4	26,3	135,28	2,25
9	5,1	100,9	199,2	164,4	51,9	129,10	2,15
10	5,2	50,6	185,7	122,8	161,9	130,25	2,17
11	5,3	120,7	104	123,7	43,1	97,88	1,63
12	4,6	53,8	63,9	39,4	26,4	45,88	0,76
13	4,9	15,7	33,7	84,6	94,8	57,20	0,95
14	5,4	88,6	164,5	89,2	92,8	108,78	1,81
15	4,9	88,5	68,9	205,7	142,4	126,38	2,11
16	5,1	109,6	103,2	133,9	83,1	107,45	1,79
17	5,8	49,9	161,5	207,6	201,7	155,18	2,59
18	5,6	184,9	285,5	90,9	110,8	168,03	2,80
19	6,4	167,2	125	134,7	128	138,73	2,31
20	5,5	280	158,3	250	168,6	214,23	3,57
21	6,1	178	236,5	151	134,5	175,00	2,92
22	5,6	287,3	121	103,7	207,8	179,95	3,00
23	5,2	127,6	112,8	106,8	226	143,30	2,39
24	5,2	49	32,3	59,9	145	71,55	1,19
25	5	43,3	35,2	43,8	98	55,08	0,92
26	6,4	166	287,4	229	148,8	207,80	3,46
27	5,6	161	79	89,4	182	127,85	2,13
28	5,3	207,8	145	127	186	166,45	2,77
29	5,7	158,8	150,9	157,4	102,3	142,35	2,37
30	5,2	89	61,8	67,4	33	62,80	1,05
31	5,6	31,9	132,4	155,6	190	127,48	2,12
32	5,5	78,1	118	131,2	116,6	110,98	1,85
33	5,1	118,5	46,3	6	88,4	64,80	1,08
34	6	218	133,5	53,5	98,2	125,80	2,10
35	5,1	71,5	53,4	77	69	67,73	1,13
36	5,5	65,4	68,2	167,3	140,9	110,45	1,84
37	5,9	249	249,6	147	174	204,90	3,42
38	5,5	233	228,5	106,5	110	169,50	2,83
39	5,8	198,6	246	169	156	192,40	3,21
40	4,6	88,5	87,9	52,9	85	78,58	1,31
41	5,4	161,3	223,4	228	162	193,68	3,23
42	5,5	241,9	323	174,7	87,5	206,78	3,45
43	4,6	84	64	45,3	75,6	67,23	1,12
44	6	149,5	125,5	146,2	159,2	145,10	2,42
45	5,6	136,9	234	136,4	153,4	165,18	2,75
46	5,2	219,4	280	90,4	128	179,45	2,99
47	5,4	93,3	97,1	33,4	43,2	66,75	1,11
48	5,9	129,2	152,8	202,9	140,2	156,28	2,60
49	5,8	209,4	189	76	80,9	138,83	2,31
50	5,9	250	82,8	127	213,4	168,30	2,81
51	5,8	117	126,4	170,8	122,4	134,15	2,24
52	5,5	55,4	119,4	219	161,2	138,75	2,31
53	5,6	202,4	140,6	139	99	145,25	2,42
54	5	84	101,7	126,2	120,5	108,10	1,80
55	5,2	34	176,3	214,7	125,4	137,60	2,29
56	5,8	88	108	315	106	154,25	2,57
57	6,2	169	210	240,4	167,7	196,78	3,28
58	5,3	137,8	203,7	143,2	60,2	136,23	2,27
59	5,8	61,1	87,1	157,7	147,7	113,40	1,89
60	5	36,1	84,4	103,9	173,2	99,40	1,66
	5,45	Průměrné hodnoty rychlosti větru a otáček				129,85	2,16

Příloha D Vlastnosti chemických akumulátorů

		Olověný akumulátor		Ni-Cd akumulátor		Ni-Fe akumulátor	
Optimální kapacita		150	300	120	250	120	250
Typ		85000	85000	KPM120P	KPM250P	KPM120P	KPM250P
Počet kusů		1	2paralelně	10 sériově	10 sériově	10 sériově	10 sériově
Předpokládané vyčerpání	%	60		80		80	
	A.h	90	280	96	200	96	200
	W.h	1080	2160	1152	2400	1152	2400
Doba provozu při odběru 60W		18	36	19,2	40	19,2	40
		7,2	14,4	7,7	16	7,7	16
		denně	denně	denně	denně	denně	denně
Hmotnost (kg)		40,5	81	81,7	130	81,7	130
Objem (dm ³)		21,6	43,2	62,8	104	62,8	104
Půdorys (dm ²)		9,6	19,0	18,2	21,8	18,2	21,8
Samovybíjení (%)		Rovnoměrná ztráta energie asi 1% denně, úplná ztráta za 3 měsíce, se stářím baterie se samovybíjením zvyšuje		Po 1 dnu 6,6 Po 3 dnech 9,0 Po 7 dnech 12,4 Po 6 měsících 23,5 Po 12 měsících 33,1	Počátek po 600 cyklech Po 1 dnu 13 Po 3 dnech 21 Po 7 dnech 22,5 Po 14 dnech 54,5 Po 28 dnech 54,7		
Život		350-500 cyklů, 5 let		500-1000 cyklů, 10let		1000-1500 cyklů, 15let	
Údržba		1. dolévání destilované vody					
		2. očištění povrchu a konzervace baterie					
		3. výměna elektrolytu po 2-3 letech					
Indikace stavu nabití		Dosažení napětí 14,5 V při nabíjení, doporučuje se korekce na velikost nabíjecího proudu (s klesajícím proudem napětí snižovat)		Dosažení napětí v rozmezí 15 V pro C ₅₀ A až 16,5 V pro C ₅ A při nabíjení, doporučuje se korekce na velikost nabíjecího proudu (s klesajícím proudem napětí snižovat)		Dodání 150% jmenovité kapacity v A.h pro C ₅ A pomocí měřiče stavu nabití s korekcí 23% kapacity na samovybíjení po 7 dnech klidu při použití intervalového nabíjení	
Zvláštnosti podmínek provozu		A)přebíjení škodí, celková doba přebíjení, tj.napětí nad 13,2V za celý život baterie nemá přesáhnout 600h B)hluboké vybíjení pod 60% C _n škodí C)dlouhodobé stání v částečně nebo zcela vybitím stavu škodí D)lze provozovat od -15 do +60 °C		A)přebíjení škodí, vyvolá však nutnost dolévat destilovanou vodu B)hluboké vybíjení neškodí C)dlouhodobé stání v částečně nebo zcela vybitím stavu neškodí D)bez omezení lze provozovat při teplotách od -40 do +40 °C		A)přebíjení škodí, vyvolá však nutnost dolévat destilovanou vodu B)hluboké vybíjení neškodí C)dlouhodobé stání v částečně nebo zcela vybitím stavu neškodí D)bez omezení lze provozovat při teplotách od -15 do +40 °C	
Energetická účinnost při nabíjení proudem C ₁₀ A do počátku intenzivního plynování		91 až 82 %, 2,2 až 2,45 V, Průměr 87 %, tj. 2,3V		89 až 75 %, 1,35 až 1,6 V, Průměr 83 %, tj. 1,45V		87 až 73 %, průměr při nabití C ₅ A po dodání 150% jmenovité kapacity	