

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE SE DARRIUSOVÝM
ROTOREM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN NOVOTNÝ

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE SE DARRIUSOVÝM ROTOREM

DESIGN OF DARRIUS ROTOR AS SOURCE OF ELECTRIC ENERGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN NOVOTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADEK VLACH, Ph.D.

BRNO 2008

Anotace

Tato bakalářská práce pojednává o možnostech využití alternativního zdroje energie – větru. Byl sestaven model Darrieusova rotoru pro výukové účely podle dostupných materiálů a možností. Pak bylo provedeno několik měření, kvůli zjištění funkčnosti a vlastností modelu.

Anotation

This bachelors thesis deals about possibilities to use alternative energy source – wind. Model of Darrieus rotor was built for learning purpose using accessible materials and tools. The build model was tested and measured to discover real functionality and characteristics.

Klíčová slova

Vítr, větrná elektrárna, Darrieus rotor, křídlo

Keywords

Wind, wind power plant, Darrieus rotor, wing

Bibliografická citace

NOVOTNÝ, M. Návrh zdroje elektrické energie se Darrieusovým rotorem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vlach Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma Návrh zdroje elektrické energie se Darrieusovým rotorem jsem vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího bakalářské práce a pomocí odborné literatury, kterou jsem citoval v seznamu použité literatury.

.....
Martin Novotný

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Radku Vlachovi Ph.D. za pomoc a dohled při vypracování bakalářské práce. Dále své rodině, přítelkyni, Milanu Šormanovi, Ing. Robertu Šošovičkovi Ph.D., Bc. Martinu Hruškovi, Bc. Jiřímu Konvičnému a Drahomírovi Příkrylovi za odbornou pomoc a morální podporu.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Motivace a stanovení cílů.....	11
3. Větrné elektrárny.....	12
3.1 Vítr.....	12
3.1.1 Princip fungování větrné elektrárny.....	12
3.2 Rozdělení větrných elektráren.....	13
3.2.1 Rozdělení podle aerodynamického principu.....	14
3.2.2 Rozdělení podle velikosti.....	15
3.2.3 Rozdělení podle osy rotace.....	17
4. Generátory.....	17
5. Darrieusův rotor.....	18
5.1 Historie.....	18
5.2 Konstrukce.....	19
5.2.1 Konstrukce lopatek.....	20
5.3 Návrh a realizace modelu.....	23
5.3.1 Návrh modelu.....	23
5.3.2 Realizace modelu.....	27
5.4 Návrh elektroniky.....	29
5.4.1 Jednocestný usměrňovač.....	29
5.4.2 Gretzův můstkový usměrňovač.....	30
5.4.3 Zdvojovač napětí.....	31
5.5 Matematický popis Darrieusova rotoru	32
5.6 Měření modelu.....	34
5.7 Naměřené hodnoty.....	36
6. Budoucnost.....	40
7. Závěr.....	41
Použitá literatura.....	42
Příloha 1.....	46
Příloha 2.....	46

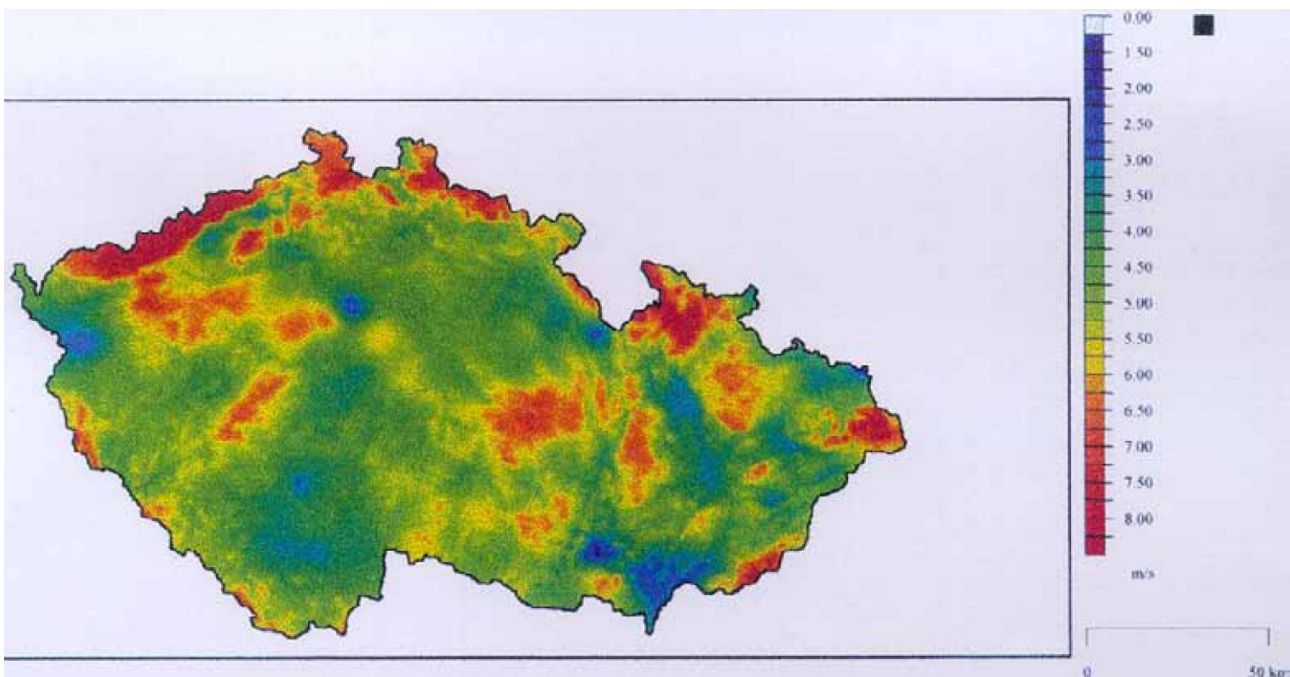
1. Úvod

Poslední dobou se lidstvo stále častěji zabývá myšlenkou obnovitelných zdrojů elektrické energie. V dnešní době se energie získává převážně z tepelných a také z jaderných elektráren, ale bohužel obě využívají vyčerpatelné zdroje energie. Mezi ně patří ropa, uhlí, zemní plyn nebo radioaktivní uran, s kterým jsou problémy s uskladněním po vyhoření. A protože spotřeba energie neustále roste, musíme hledat obnovitelné zdroje elektrické energie.

Mezi obnovitelné zdroje patří vodní energie (přehrady, příboj, příliv), větrná energie, energie slunečního záření, geotermální energie (termální prameny a teplo zemského jádra) a energie biomasy (dřevo, obilí). Lidé se už odedávna snaží využívat tyto zdroje energie (větrné mlýny, plachetnice) a v dnešní době se rozšiřují elektrárny, které využívají alternativní zdroje energie (vodní, větrné, solární, geotermální).

Ale ne všude se dají tyto elektrárny využít, protože jsou závislé na okolních podmínkách. Například pro výstavbu solární elektrárny potřebujeme hodně prostoru pro sluneční kolektory. V případě vodní elektrárny potřebujeme v blízkosti přehrady, která musí mít dostatečnou zásobu vody, což také není úplně bezpečné. Vodní elektrárny můžeme stavět také na vodních tocích, ale tam jsme omezeni silou a množstvím průtoku, proto výkon těchto elektráren bývá menší a nedostatečný. Vítr se využíval jako pohon lodí a dnes se k tomuto řešení opět vracíme, umístováním velkých draků na obchodní lodě, za účelem snížení spotřeby paliva. Dále se využíval na pohon větrných mlýnů a dnes se v krajině objevují větrné elektrárny. Právě kvůli závislosti na okolí musíme pečlivě zvážit, kde takovéto elektrárny budeme stavět.

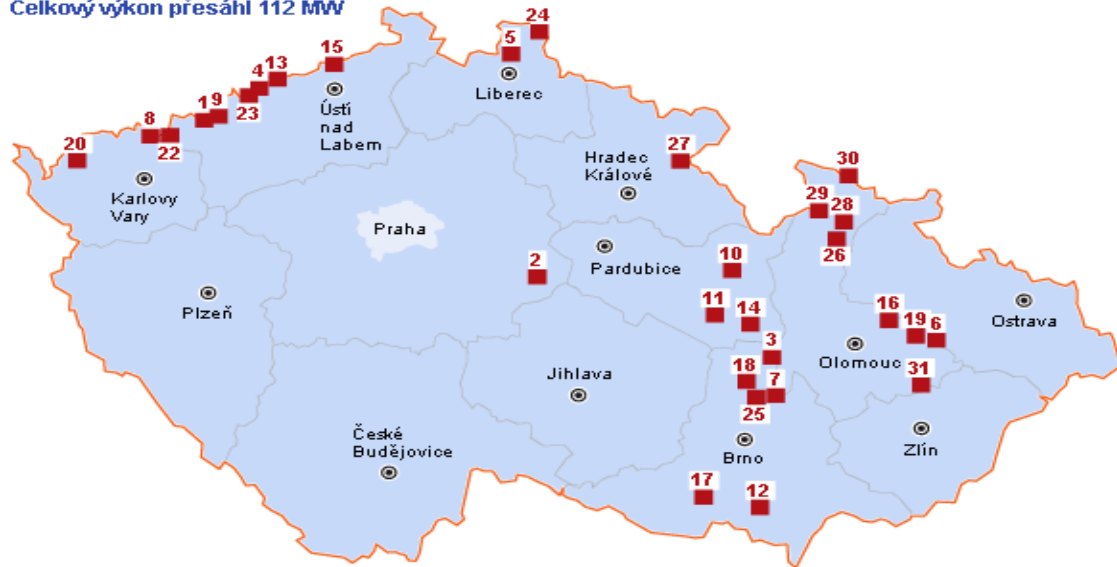
Nejobvyklejším využitím větrné energie v dnešní době jsou větrné elektrárny, které využívají síly větru k roztočení vrtule, k níž je pak připojen elektrický generátor. Potenciál využití této energie v České republice je ve vhodných lokalitách, kde je rychlost větru vyšší než 5 m/s. Tyto lokality jsou převážně v příhraničních horských oblastech, kde jsme ale často omezeni požadavky na ochranu přírody a svůj vliv mají také nepříznivé sezónní klimatické podmínky. Proto se stále snažíme hledat lepší a lepší řešení, jak energii využít.



Obr. 1: Větrná mapa České Republiky

Větrné elektrárny v Česku

Celkový výkon přesáhl 112 MW



1	Kryštofovy Hamry	(2 x 21 věží s celkovým instalovaným výkonem 42 MW)
2	Kámen	(od 2007 2 MW)
3	Brodek u Konice	(od 2007 2 x 600 kW, celkem 1,2 MW)
4	Klíny	(od 2007 2 x 2000 kW, celkem 4 MW)
5	Mníšek	(od 2007 2 MW)
6	Veselí u Oder	(od 2006/2007 2 x 2000 kW, celkem 4 MW)
7	Drahany	(od 2006 2 MW)
8	Boží Dar - Neklid	(od 2001 315 kW a od 2006 2 x 330 kW, celkem 975 kW)
9	Podmilevská výšina	(od 2006 3 x 2500 kW, celkem 7,5 MW)
10	Anenská Studánka	(od 2006 2 x 250 kW, celkem 500 kW)
11	Pohledy u Svitav	(od 2004 250 kW a od 2006 2 x 250 kW, celkem 750 kW)
12	Pavlov	(od 2006 2 x 2000 kW, 2 x 850 kW, celkem 5,7 MW)
13	Nové Město - Vrch Tří pánů	(od 2006 3 x 2000 kW, celkem 6 MW)
14	Žipotín	(od 2006 2 x 600 kW, celkem 1,2 MW)
15	Petrovice	(od 2005 2 MW)
16	Hraničné Petrovice	(od 2005 2 x 850 kW, celkem 1,7 MW)
17	Břežany u Znojma	(od 2005 5 x 850 kW, celkem 4,25 MW)
18	Protivanov II	(od 2005 2 x 1500 kW, celkem 3 MW)
19	Potštát	(od 2005 2 x 100 kW, celkem 200 kW)
20	Čížebná - Nový Kostel	(od 2004 315 kW & od 2005 3 x 500 kW, celkem 1,815 MW)
21	Lysý vrch u Albrechtic	(od 2004 5 x 500 kW & od 2006 500 kW, celkem 3 MW)
22	Loučná	(od 2004 3 x 600 kW, celkem 1,8 MW)
23	Nová Ves v Horách II	(od 2003 1,5 MW & od 2004 1,5 MW, celkem 3 MW)
24	Jindřichovice pod Smrkem	(od 2003 2 x 600 kW, celkem 1,2 MW)
25	Protivanov I	(od 2002 100 kW)
26	Mladoňov	(1992-2004 315 kW, od 2004 nahrazena 500 kW)
27	Nový Hrádek	(od 1995 4 x 400 kW, celkem 1,6 MW)
28	Mravenečník	(1993-2006 220 kW & 1995-2006 315 kW a 630 kW, celkem 1,165 MW)
29	Ostružná	(od 1994 6 x 500 kW, celkem 3 MW)
30	Velká Kraš	(od 1994 225 kW)
31	Hostýn	(od 1994 225 kW)

@aktuálně.cz

Obr. 2: Umístění větrných elektráren v České Republice

2. Motivace a stanovení cílů

Cílem této bakalářské práce je navrhnutí a sestavení funkčního modelu Darrieusova rotoru. Darrieus je hlavně větrná elektrárna, ale experimentuje se s jeho využitím také ve vodních tocích a mořském příboji. Pro výrobu elektrické energie se používá generátor propojený převodkou nebo řetězovým převodem.

Požadavky:

- velikost modelu
- jednoduchost a funkčnost

Hlavní problém: S využitím rešerše navrhnout a sestavit Darrieusův rotor pro školní využití.

Cíle:

- pomocí rešerše získat poznatky o využívání větrné energie
- navrhnout kompletní model Darrieusova rotoru
- otestovat vyrobený model

3. Větrné elektrárny

3.1 Vítr

Vítr je součástí života lidstva už od jeho vzniku. Vítr je výsledkem proudění vzduchu, které je způsobené nerovnoměrným zahříváním zemského povrchu. Teplý vzduch je lehčí a proto stoupá, zatímco studený je těžký a klesá k zemi, kde se následně zahřívá. Ale proudění je podmíněné také jinými elementy, jako například vlhkostí, odrazivostí od zemského povrchu, pohyby moře...

Vítr je určen dvěma veličinami: směr a rychlost. Směr nám udává z které světové strany nám vítr vane. Rychlost větru se měří pomocí anemometru. Naměřenou rychlost následně zaznamenáváme do tabulky a tak nám vznikne tzv. Beaufortova stupnice síly větru.

Stupeň	Typ větru	Rychlost v m.s ⁻¹
0.	Bezvětrí	0 až 0,2
1.	Vánek	0,3 až 1,5
2.	Slabý vítr	1,6 až 3,3
3.	Mírný vítr	3,4 až 5,4
4.	Dosti čerstvý vítr	5,5 až 7,9
5.	Čerstvý vítr	8 až 10,7
6.	Silný vítr	10,8 až 13,8
7.	Prudký vítr	13,9 až 17,1
8.	Bouřlivý vítr	17,2 až 20,7
9.	Vichřice	20,8 až 24,4
10.	Silná vichřice	24,5 až 28,4
11.	Mohutná vichřice	28,5 až 32,6
12.	Orkán	32,7 až

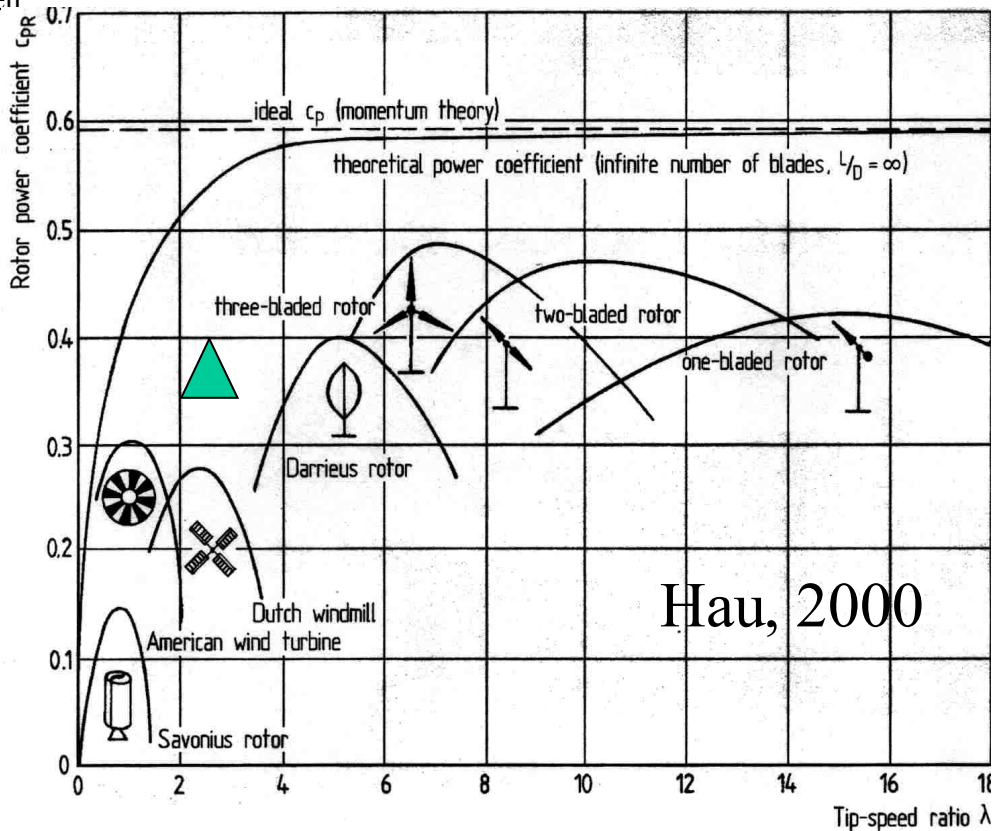
Tabulka 1: Beaufortova stupnice síly větru naměřená v 10 m nad zemí

3.1.1 Princip fungování větrné elektrárny

Proud větru proudící přes lopatky způsobuje jejich následné otáčení a nebo vznik vztlačových sil a tím vzniká rotační energie. Tato energie je následně přenášena přes hřídel na generátor, který z něj vyrábí elektrickou energii.

3.2 Rozdělení větrných elektráren

V současnosti vývoj umožňuje neustálé zvyšování účinnosti větrných elektráren a zároveň potlačování jejich negativních vlastností. Díky tomu dnes známe mnoho různých typů větrných elektráren



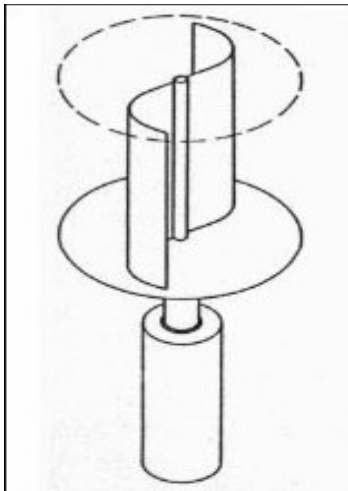
Obr. 3: Rozdělení rotorů podle účinnosti závislé na rychloběžnosti

Jak je patrné z grafu, tak Darrieusův rotor dosahuje téměř nejvyšší účinnosti při rychloběžnosti od tří do osmi. Vyšší účinnosti dosahuje pouze třílistý rotor, který je taky nejpoužívanější větrnou elektrárnou. Nejnižší účinnost nám vykazuje Savoniův rotor při nejmenší rychloběžnosti.

3.2.1 Rozdělení podle aerodynamického principu

Odporový princip

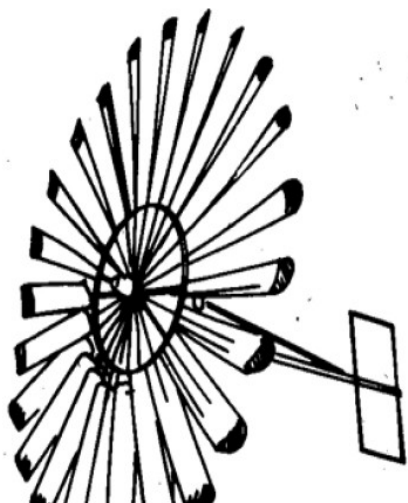
Je to první používaný systém (větrný mlýn). Tento způsob dosahuje maximální teoretické účinnosti kolem 20%. Dnes se však moc nepoužívají kvůli malé účinnosti. Typičtí zástupci jsou: větrný mlýn, větrné kolo, Savoniův rotor.



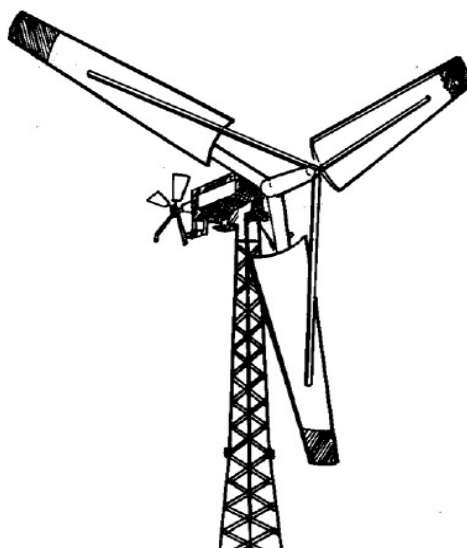
Obr. 4: Savoniův rotor

Vztlakový princip

Jde o novější koncept, který na přeměnu větrné energie využívá vztlak vznikající na aerodynamicky tvarovaných lopatkách rotoru. U těchto typů elektráren se předpokládá teoretická účinnost až kolem 60%, ale dnešní elektrárny dosahují kolem 45%. Typické příklady jsou: vrtulové a lopatkové rotory, Darrieusův rotor.



Obr. 5: Lopatkový rotor



Obr. 6: Vrtulový rotor

3.2.2 Rozdělení podle velikosti

Mikroelektrárny

Používají se jen odděleně a izolovaně od rozvodové sítě. Jejich maximální výkon je 1kW a výstupní napětí je 12 nebo 24 V. Slouží například na osvětlování reklamních panelů.



Obr. 7: Mikroelektrárna

Malé větrné elektrárny

Také se používají odděleně a izolovaně od rozvodové sítě, i když dokáží dodávat větší výkon (do 15 kW). Výstupní napětí bývá většinou 230 V a proto dokážou napájet menší chatky nebo rodinné domky.



Obr. 8: Využití soustavy malých větrných elektráren

Sřrednř vřtrnř elektrřrny

Tyto elektrřrny zpravidla dodřvají vřkon do rozvodovř sřř a pouřzřvají se přř vytvřřenř seskupenř vřtrnřch elektrřren tzv. vřtrnř farmy. Jednotlivř vřkon je do 100 kW.



Obr. 9: Sřrednř vřtrnř elektrřrna

Velkř vřtrnř elektrřrny

Tyto vřtrnř elektrřrny uř svojř povahou a koncepcř nedovolujř napřjet spotřebiře a tak je nutnř jejich připojenř do rozvodovř sřř. Vřkon mřže dosahovat ař MW.



Obr. 10: Velkř vřtrnř elektrřrna

3.2.3 Rozdělení podle osy rotace

Vertikální osa rotace

Při tomto systému je osa rotace uložena kolmo k zemi. Největší výhodou takového uložení je, že turbína funguje nezávisle na směru větru a konstrukčně je tento princip jednodušší. Nevýhodou je, že může nastat tzv. „mrtvý bod“ a vysoká hmotnost rotačních částí. Hlavní zástupci jsou Savoniův a Darrieusův rotor.

Horizontální osa otáčení

Při tomto systému je osa otáčení uložena vodorovně se zemí. Následkem toho je nutné natáčet elektrárnu do směru větru. Momentálně je to nejpoužívanější řešení, protože dosahuje nejvyšší účinnosti.

4. Generátory

Generátor je točivé zařízení sloužící k přeměně mechanické energie na energii elektrickou. Generátory rozdělujeme na střídavé a stejnosměrné, podle typu získávané energie a proudu. Hlavními částmi každého generátoru je rotor a stator. Základní princip je založen na Faradayově zákoně elektromagnetické indukce.

Faradayův zákon

Velikost elektromotorického napětí indukovaného ve vodivé smyčce je rovna rychlosti změny magnetického indukčního toku procházejícího touto smyčkou:

$$\varepsilon = \frac{-(d\Phi_B)}{dt} \quad [\text{V}] \quad (4.1)$$

kde:

ε – elektromotorické napětí [V]

Φ_B – magnetický indukční tok [Wb]

t – čas [s]

Magnetický indukční tok procházející plochou Φ je:

$$\Phi_B = \int B \cdot dS \quad [\text{Wb}] \quad (4.2)$$

kde:

Φ_B – magnetický indukční tok [Wb]

B – vektor magnetické indukce [T]

dS – vektor o velikosti dS , který je kolmý k ploše smyčky [m^2]

Pokud bude ale B kolmé na S a B bude homogenní, tak dostáváme zjednodušený vztah:

$$\phi_B = B \cdot S \quad [\text{Wb}] \quad (4.3)$$

kde:

Φ_B – magnetický indukční tok [Wb]

B – vektor magnetické indukce [T]

S – plocha cívky [m^2]

Jestliže měníme magnetický indukční tok procházející cívkou o N závitů, pak indukované elektromotorické napětí vzniká v každém závitě a celkové elektromotorické napětí indukované v cívkě je součtem těchto jednotlivých indukovaných napětí. Úpravou vztahu (4.1) dostaneme vztah:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad [\text{V}] \quad (4.4)$$

kde:

ε – elektromotorické napětí [V]

Φ_B – magnetický indukční tok [Wb]

N – počet závitů cívky

t – čas [s]

Generátor stejnosměrného proudu se nazývá dynamo a bývá nejčastěji tvořený ze statoru, rotoru a komutátoru. V současné době jsou nahrazovány jednoduššími alternátory, za které se následně připojí usměrňovač stejnosměrného proudu. Alternátor je generátor střídavého proudu. Tento proud se následně dodává do elektrické sítě. Alternátory bývají spojeny napřímo s hřídelí nebo pomocí převodovky. Alternátory se nejvíce používají v automobilovém průmyslu.

5. Darrieusův rotor

5.1 Historie

Darrieusův rotor byl vynalezen Francouzem Georgesem Jeanem Mariem Darrieusem (24.9.1888 – 15.7.1979) a patentovaný byl v roce 1931 v USA. Následně nato byl Darrieusův rotor 30 let zkoumán a testován. Avšak bezvýsledně. Proto byl jeho vývoj zastaven a už se jím více nikdo nezabýval.

5.2 Konstrukce

Známe více typů Darrieusova rotoru. Ale nejčastěji používanými jsou:

Darrieus typu H

U tohoto typu rotoru jsou listy rovnoběžně s osou rotoru. Podle počtu křídel se dělí na 2-listou nebo 3-listou variantu.



Obr. 11: H - typ Darrieusova rotoru

Darrieus typu fí

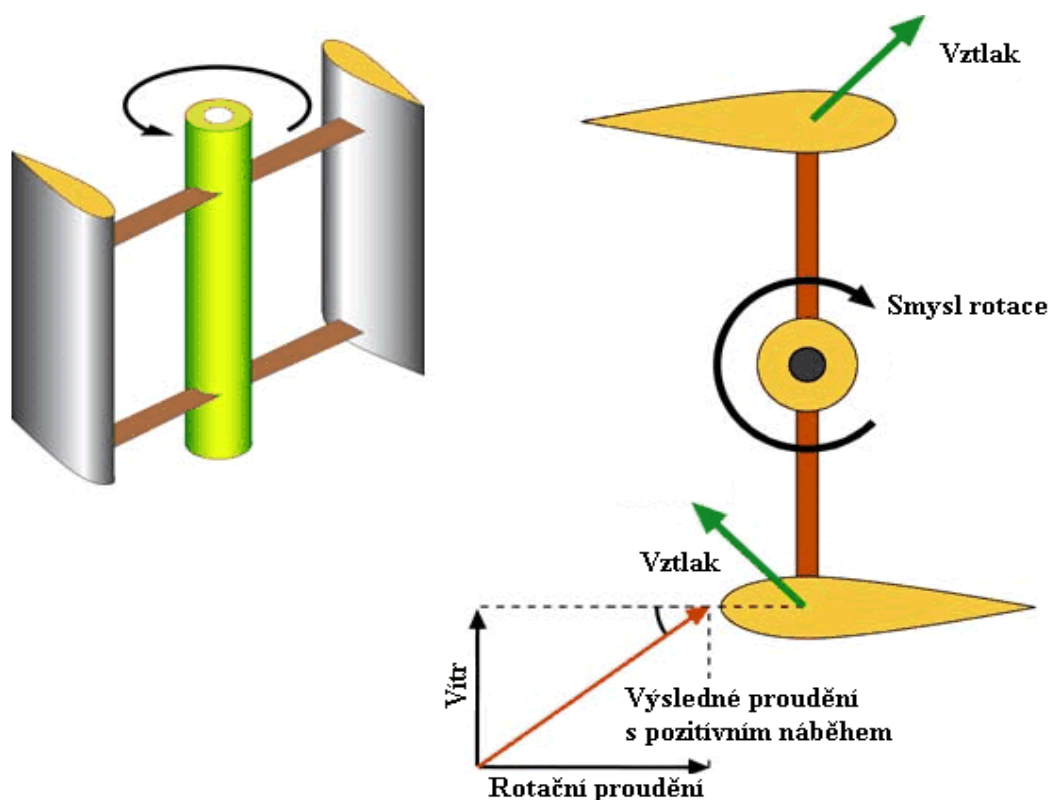
Listy tohoto typu rotoru mají tvar luku jehož tětívu tvoří právě osa rotoru.



Obr. 12: Darrieusův rotor typu fí

Hlavní princip funkce Darrieusova rotoru ale zůstává u všech typů stejný. Lopatky rotoru tvoří aerodynamická křídla umístěná symetricky a jejich vzájemný náběžný úhel je 0. Výhodou tohoto návrhu je, že rotor může být uvedený do provozu bez ohledu na směr větru. Aerodynamické základy tohoto rotoru jsou ty samé, jako při konstrukci letadel a vrtulníků. Při pohybu rotoru se křídla pohybují po kruhové trajektorii. Tento pohyb se vektorově skládá se směrem proudění větru a tím vzniká výsledné proudění někdy nazývané také jako relativní vítr. Výsledné proudění vzduchu má pozitivní úhel relativně k náběhové hraně křídla. To umožňuje vznik vztlaku, ale zároveň také aerodynamického odporu. Výsledkem těchto dvou sil je síla, která způsobuje další otáčení rotoru. Rychlost otáčení rotoru je v případě Darrieusova rotoru větší než rychlost větru. Řadí se do kategorie rychloběžných turbín s koeficientem 3 - 8. Otáčení rotoru je přes centrálně vertikálně uloženou osu přenášeno na generátor uložený v základně, který točitou mechanickou energii přemění na energii elektrickou.

Konstrukce rotoru je stacionární. Ani v případě velmi silného větru nevznikají žádné síly, které by uvedly rotor do pohybu. Na to, aby vznikla na křídlech síla, je potřeba, aby se rotor už otáčel. Na spuštění rotoru je potřeba jeho roztočení pomocí externího zdroje otáčení. I přes to, že rotor se sám do pohybu nevede, je nutné, aby byl rotor v klidovém stavu zabrzděný, protože extrémní povětrnostní podmínky by mohli způsobit jeho rozběh a případné poškození.

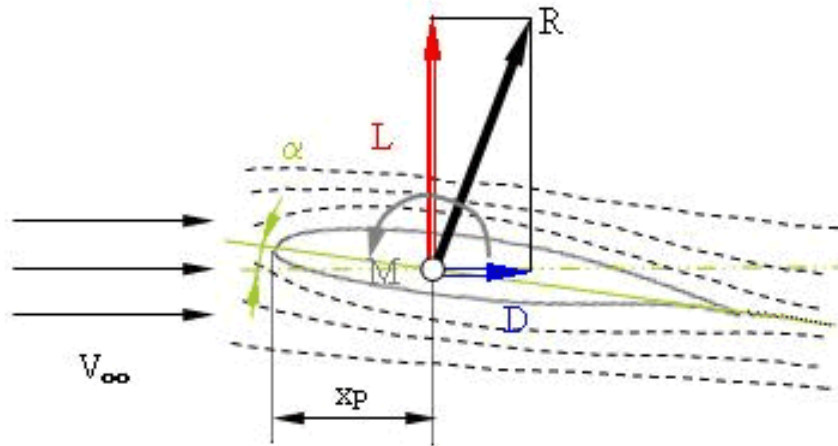


Obr. 13: Princip Darrieusova rotoru

5.2.1 Konstrukce lopatek

Základní variantou je použití symetrických křídel. Při obtékání asymetrického tělesa vůči nabíhajícímu proudu, nebo symetrického tělesa, které je asymetricky orientováno vůči proudu, je výsledná působící síla obecně orientována (značíme ji R) a lze ji rozložit do dvou složek, a to odporu D , který se promítá do směru rovnoběžného s nabíhajícím proudem a dále vztlaku L , který je složkou kolmou na směr nabíhajícího proudu.

V tomto případě se rovněž vzhledem k asymetrii proudu objevuje tzv. klopivý moment M . Ten je nutno vyvážit, jinak má těleso snahu otáčet se ve směru působícího momentu. Právě poloha tělesa vůči nabíhajícímu proudu má značný vliv na velikost a směr sil a momentů. Poloha vůči proudu je definována smluvně jako úhel mezi charakteristickou podélnou osou tělesa a směrem nabíhajícího proudu. Tento úhel se konvenčně označuje jako úhel náběhu - α .

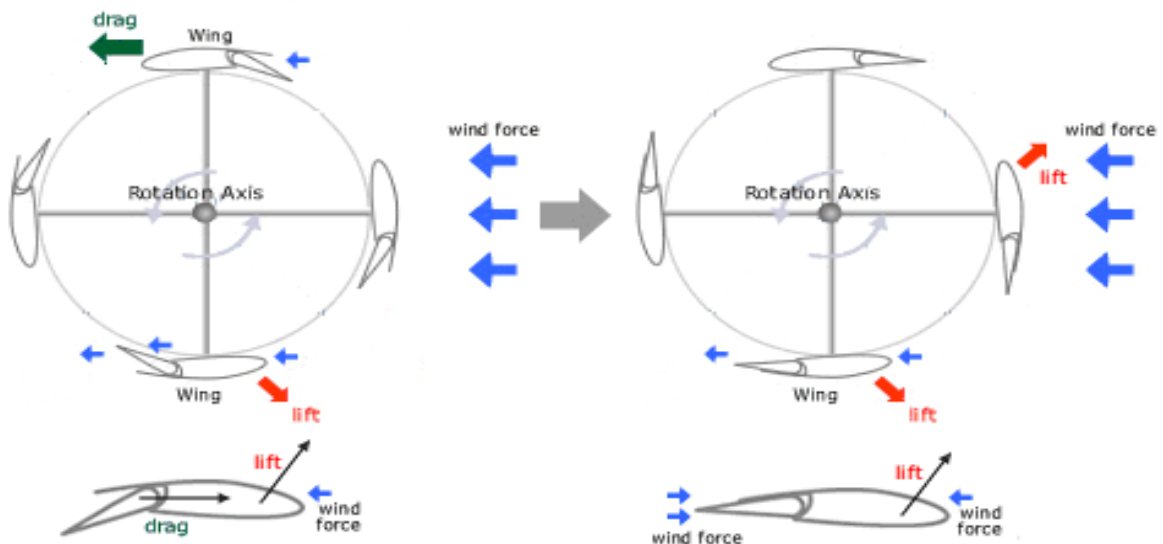


Obr. 14: Základní model křídla

Existují však další modifikace, které se snaží vylepšit tuto konstrukci na zvýšení účinnosti a to buď změnou tvaru křídel nebo jejich jiným umístěním. Další možností je však také využití proměnlivé geometrie křídel, což umožňuje lepší zachycení a využití větrné energie a napomáhá při rozběhu rotoru.

Start up - low wind speed

high wind speed



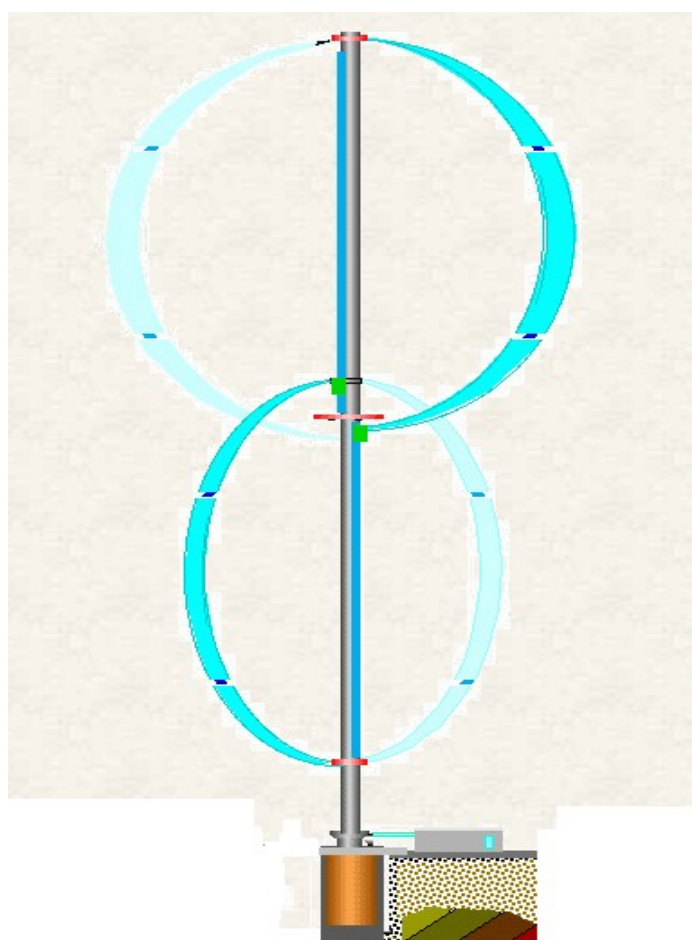
Obr. 15: Použití proměnlivé geometrie křídel

Výhody konstrukce Darrieusova rotoru

- u rotoru se svislou osou otáčení není potřeba natáčet rotor do směru větru
- na zvýšení výkonu se dá spojit více rotorů, které se nejčastěji umísťují nad sebe
- je odolný vůči velmi silným povětrnostním podmínkám

Nevýhody konstrukce Darrieusova rotoru

- velmi malá účinnost – 30 až 40 %
- při extrémně silném větru dochází k samonastartování
- vysoká rotující hmotnost, což má za následek nadměrné opotřebení ložisek a materiálu
- nezvykle objemný vzhled
- nutné velmi dobré opracování lopatek pro vznik následné vztlakové síly
- existence mrtvého úhlu, tento problém se však dá odstranit použitím dvou Darrieusových rotorů umístěných nad sebou a pootočených o 90°
- rotující hmota docela nízko nad zemí při použití Darrieusova rotoru typu f1
- vysoká citlivost na druh větru a na umístění
- Darrieusův rotor patří do skupiny rychloběžných, což znamená, že dosahuje velmi vysokých otáček, což zvyšuje nároky na výběr materiálů a výrobu
- nedokáže se samostatně rozběhnout, na jeho rozběh se používá externí generátor nebo se používá v kombinaci se Savoniovým rotorem umístěným na společné ose



Obr. 16: Návrh spojení dvou Darrieusových rotorů

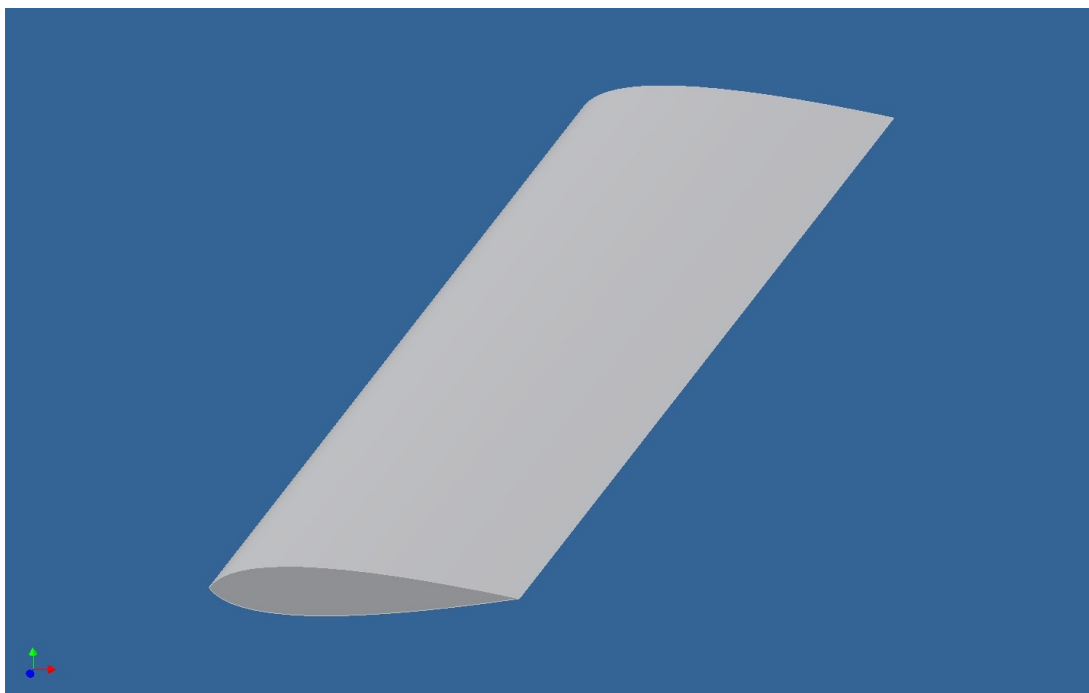
5.3 Návrh a realizace modelu

5.3.1 Návrh modelu

Při návrhu Darrieusova rotoru byl zadán požadavek na velikost a jednoduchost přenosu a sestavení následně vyrobeného rotoru. Proto návrh byl nejprve vytvořen v 3D počítačovém programu Autodesk Inventor Professional 2008, kde jsme si postupně vymodelovali jednotlivé díly rotoru s ohledem na zadané požadavky.

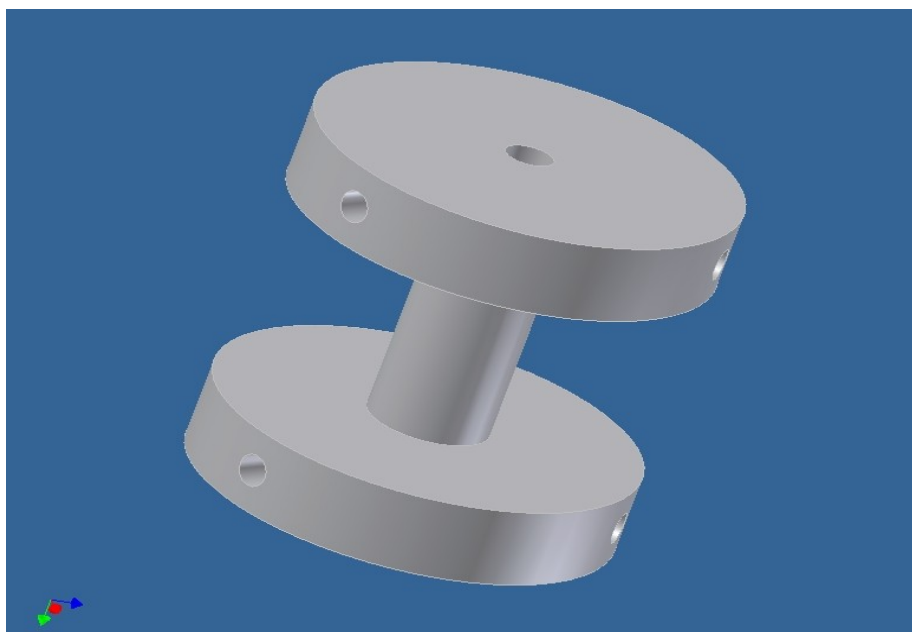
1. křídlo
2. horní uchycení
3. centrální část
4. základna
5. hřídel
6. rotor
7. stator

První bylo navrženo křídlo. Po konzultaci s několika modeláři a následně s leteckým inženýrem byl vybrán profil NACA 0015, který je symetrický a ideální pro náš požadavek na celkovou jednoduchost výroby. Křídlo má výšku 350 mm a jeho tětiva je dlouhá 70 mm.



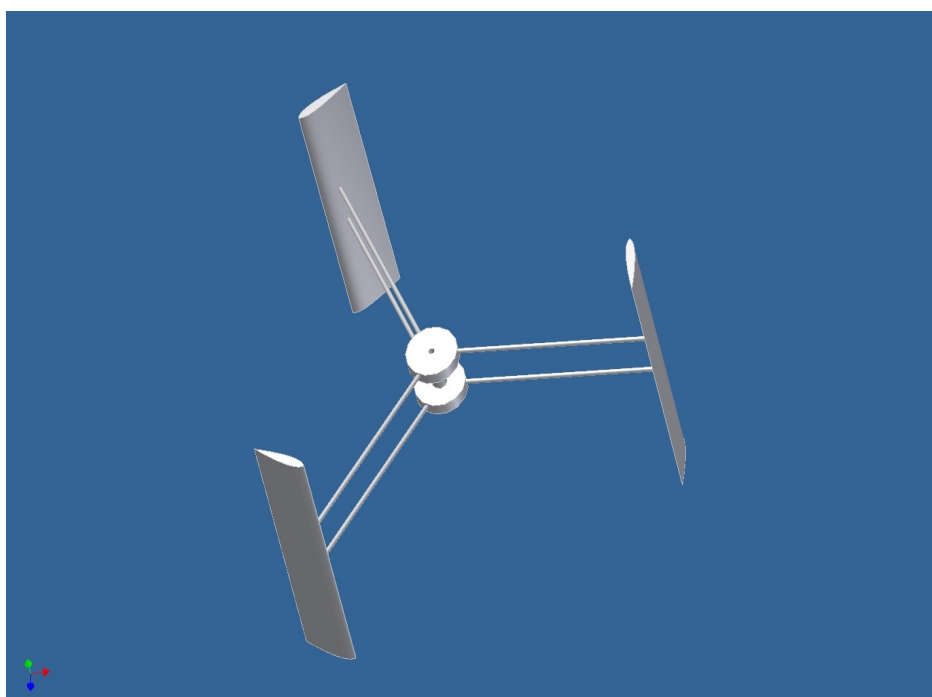
Obr. 17: Počítačově vymodelované křídlo

Následně byla zvolena ramena o délce 275 mm. Tahle délka byla zvolena z důvodu snížení počtu otáček. Pak byla vymodelována vrchní část rotoru, která bude přenášet energii na hřídel. Její celková výška je 70 mm, vnější průměr 70 mm a vnitřní průměr je 20 mm. Podél osy byla vyvrtána díra o průměru 8 mm, do které bude následně nasunuta vrchní část hřídele.



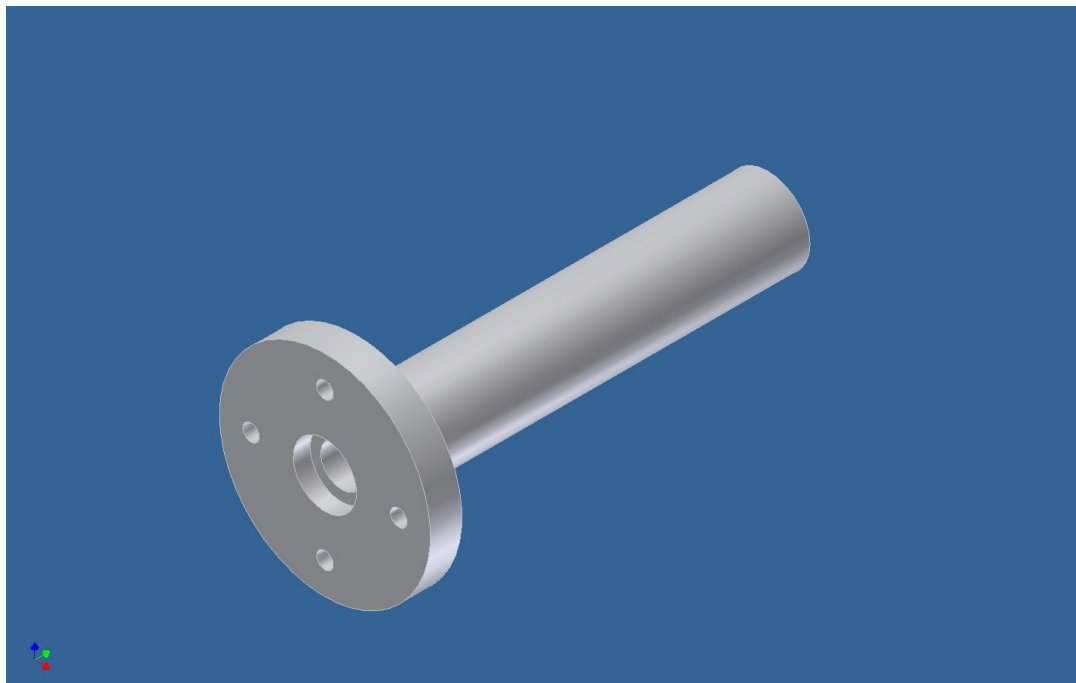
Obr. 18: Vrchní část rotoru

Poté byly všechny tři komponenty spojeny, aby byla vytvořena kompletní horní část rotoru. Do horní a spodní části byly vyvrtány tři díry pod úhlem 120° . Do těchto děr byl vyřezán závit M6x20 mm a našroubována ramena. Zvolili jsme tři lopatky, aby se zvýšila účinnost a využití větrných podmínek. Při vyšším počtu lopatek, by docházelo k tomu, že by další křídlo vstupovalo do turbulentního proudění.



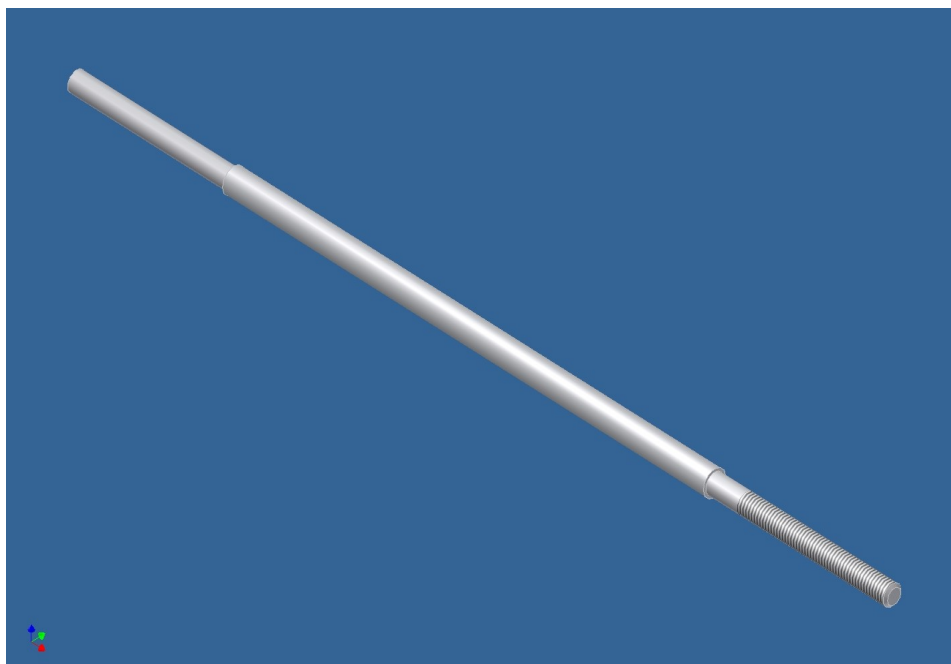
Obr. 19: Kompletní vrchní část rotoru

V následující fázi byla vymodelována centrální část rotoru. Její celková výška je 210 mm, vnější průměr 100 mm a vnitřní průměr je 40 mm. Do vrchní části přišlo vložit pouzdro s ložiskami a jedno ložisko se bude nacházet na spodní části. Podél osy je vyvrtána díra o průměru 20mm, kterou povede hřídel.



Obr. 20: Centrální část rotoru

Poslední byla vymodelována hřídel procházející celým rotorem. Na její spodní část byl vyřezaný závit M8.



Obr. 21: Model hřídele

Elektrická část rototu

Tady byl zadán požadavek, že generátor musí být umístěný na stejné hřídeli, to znamená, že převodovka nesměla být použita. Po dohodě s vedoucím práce bylo domluveno, že na hřídel se připojí disk, na kterém budou připevněny magnety a naproti tomu budou na statoru, který bude připevněn pevně na konstrukci, navinuty a uloženy cívky. Počet magnetů odpovídá počtu cívek a tím pádem dostaneme diskový alternátor buzený permanentními magnety. Z toho vyplývá, že výstupní napětí je přímo úměrné otáčkám rotoru. Pro tento projekt byly poskytnuty magnety o rozměrech 23 x 13 x 6 mm a o magnetické indukci $B = 1,15 \text{ T}$. Výstupní napětí bylo stanoveno na $U = 6 \text{ V}$. Poté použijeme vztah:

$$U = N \cdot S \cdot R \cdot X \cdot (B/2) \quad [\text{V}] \quad (5.1)$$

kde:

U – napětí [V]

N – počet závitů statoru

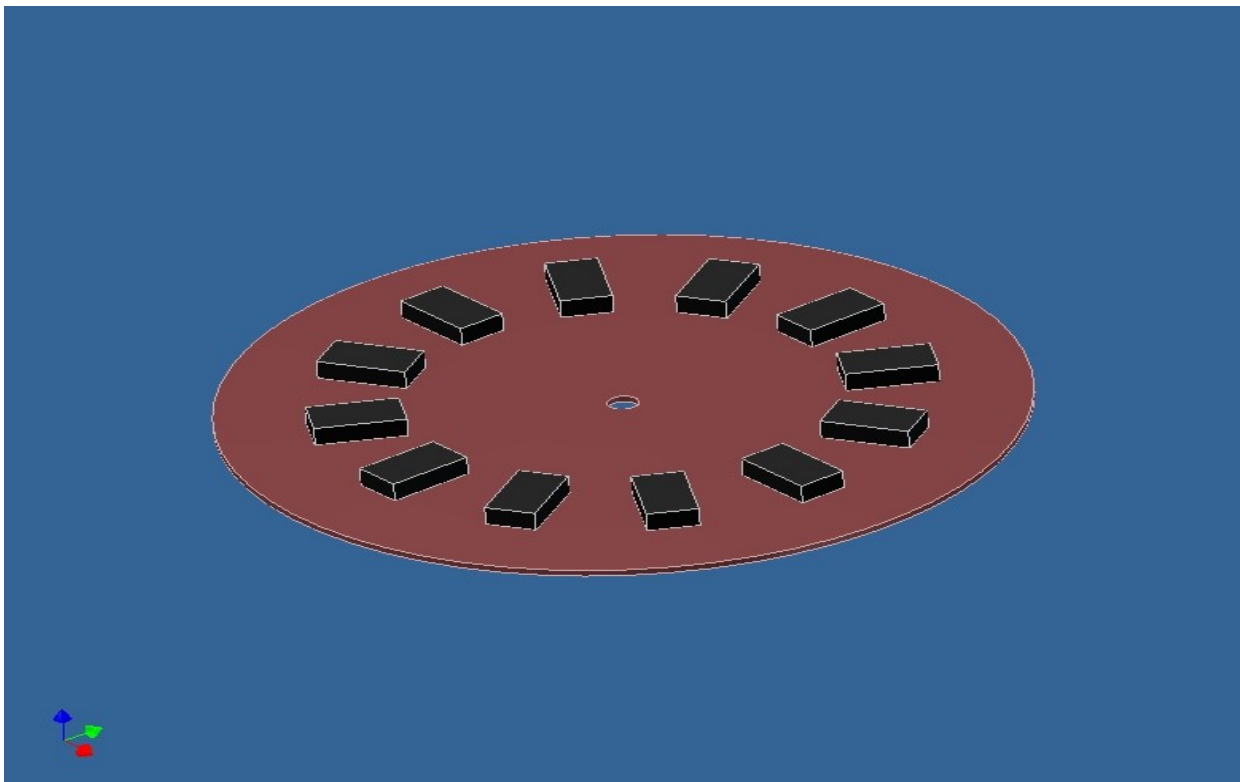
S – plocha cívky [m^2]

R – počet otáček [ot/s]

X – počet magnetů

B – magnetická indukce [T]

Po spočítání několika rovnic s využitím různého počtu magnetů docházíme k vhodnému poměru mezi počtem magnetů a závitů. Také musíme brát v úvahu to, že čím je počet otáček vyšší, tím je počet magnetů menší, ale zase čím je vyšší počet pólů (magnetu), tím větší výstupní napětí dostaneme. Proto bylo zvoleno, že na rotor použijeme 12 magnetů, což znamená navinutí 12 cívek na statoru.



Obr. 22: Model rotoru s dvanácti magnety

5.3.2 Realizace modelu

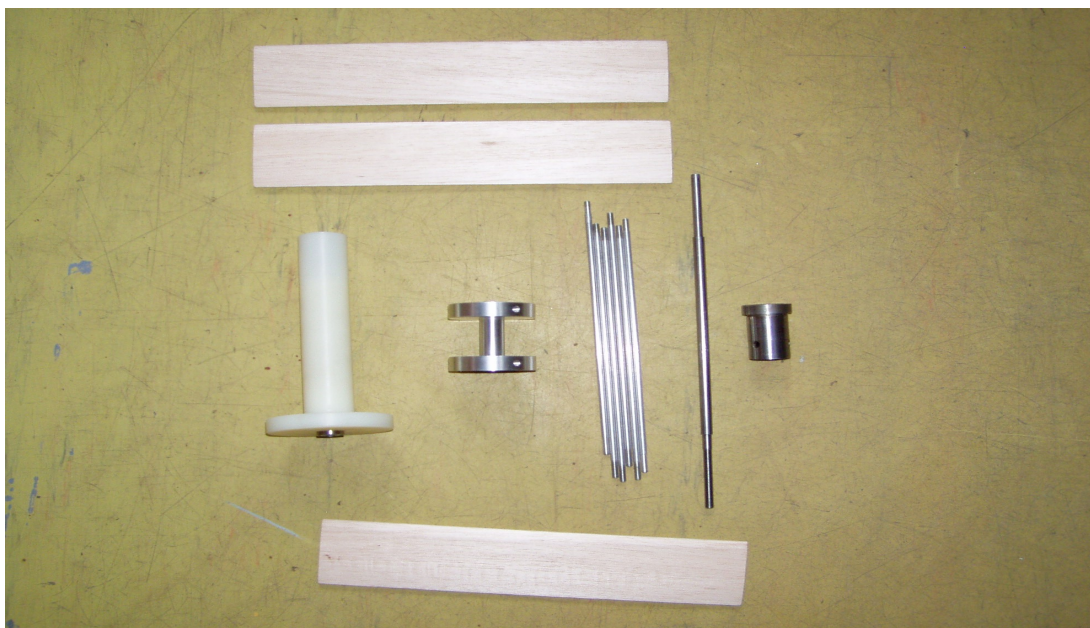
Od předchozího vymodelování modelu jsme přešli k realizaci. Na výrobu křídel byl použit materiál balza, zakoupený v hranolech o rozměrech 1200 x 70 x 20 mm. Balza byla zvolena kvůli malé hmotnosti a velmi lehké možnosti opracování. To se nám výborně hodilo, protože hranoly bylo třeba rozřezat a opracovat do profilu NACA 0015. Potom jsme tato křídla nechali zvážít, aby všechny byly stejné hmotnosti 31 g, abychom předešli nežádoucím vibracím. Tato křídla byla provrtána dírami o průměru 6 mm, aby mohla být nasazena na ramena o stejném průměru. Křídla byla natřena bezbarvým lakem na dřevo a po zaschnutí vybroušena a vyleštěna. Tento proces jsme třikrát zopakovali, aby jsme dostali velice hladký, lesklý a rovný povrch, který je důležitý pro vznik vztlačových sil. Křídla na ramenech upevnily z obou stran matky M6. Na vnější straně byla ještě použita podložka, kvůli snížení ničení a opotřebení křídel.

Na ramena byl použit dural, kvůli jeho vysoké pevnosti a odolnosti. Byla použita tyč o délce 500 mm a průměru 6 mm, kterou jsme rozpůlili na délku 250 mm. Na každém konci tyče byl následně vyroben závit M6 na snadné uchycení do horní části rotoru a také snažší uchycení křídel.

Vrchní část rotoru byla vyfrézována z duralu stejně jako ramena, protože bylo potřeba udržet těžiště co možná nejvíce při zemi. Do horní a spodní části byly vyvrtány díry a do nich následně vyřezán závit M6, aby se dali do nich uchytit ramena. Mezi dírami je úhel 120°, aby byly lopatky ve stejné vzdálenosti od sebe a navzájem se neovlivňovali.

Střední část byla vyfrézována z nylonu, kvůli lehkosti. Do této části byla vsazena tři ložiska, nahoře, ve středu a dole, aby držely hřídel na správném místě a zabránily nežádoucím nepřesnostem na jejich celé délce. Na spodní části jsme vyvrtali čtyři otvory o průměru 8 mm, které sloužili na uchycení částí k podložce.

Na vyfrézování hřídele bylo použito železo, kvůli jeho pevnosti. Na jejím dolním konci pak byl vyřezán závit M8 na délce 6 mm. Na tento závit byl uchycen rotor za pomoci dvou matic s podložkami, aby se s ním dalo posouvat.

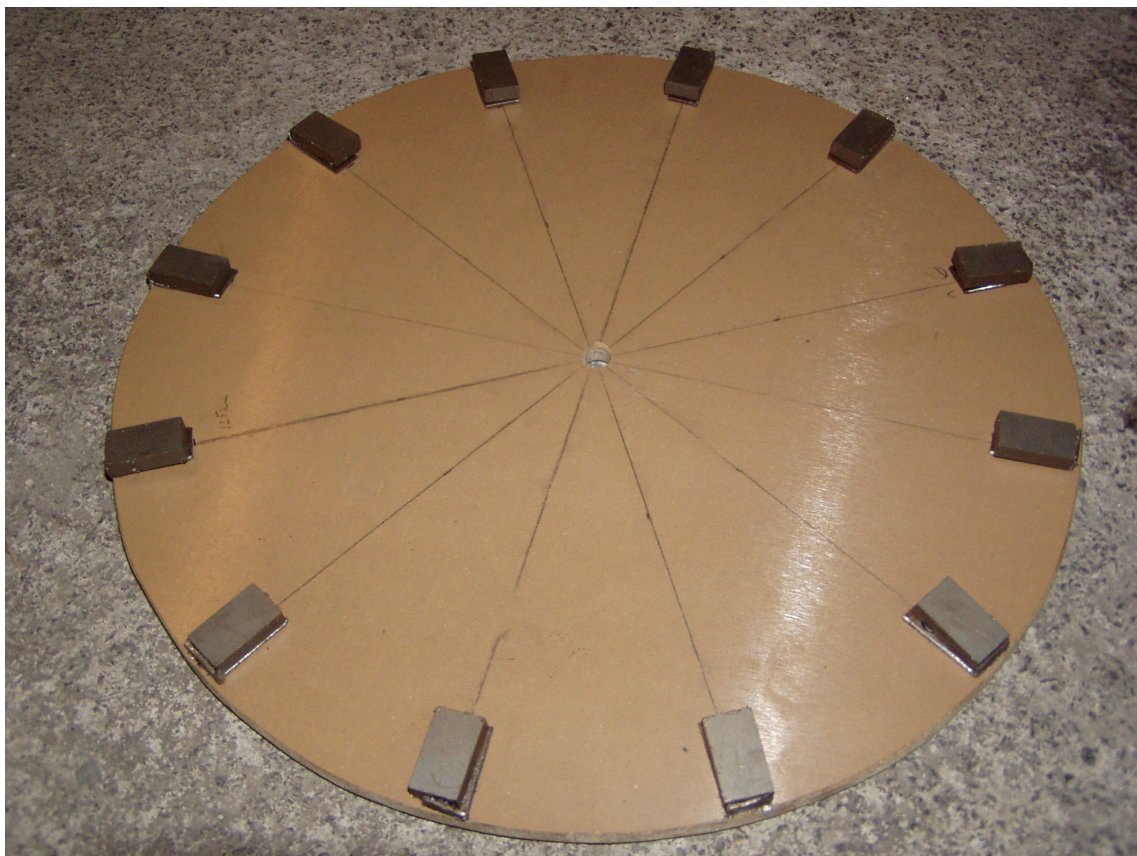


Obr. 23: Součásti pro sestavení horní části rotoru

Jako podložku pro rotor jsme použili lisovanou dřevotřísku, aby byla co možná nejtěžší a pevná. Ta byla vybroušena do kruhového tvaru o průměru 500 mm. Na ni byly přišroubované pomocí tří šroubů čtyři výškově nastavitelné plastové nohy, které zaručují dostatečnou stabilitu a je možno s nimi vyrovnávat nerovnosti v terénu.

Elektrická část rotoru

Nejprve byl vytvořen rotor, na který jsme použili jako základ dřevo na parkety. Z něho jsme vyřezali kruh o průměru 250 mm. Na něj byly na poloměru 125 mm umístěny magnety. Tato vzdálenost byla zvolena z důvodu, aby se magnety navzájem neovlivňovali. Následně nastal problém, jak magnety přichytit ke dřevu. Proto jsme vyrobili železné podložky o rozměrech 23 x 13 mm (stejná velikost jakou mají magnety), které byly na konci zahnuté. Do těchto podložek jsme vyvrtali dvě díry a zapustili šrouby, aby nenadzvedávaly magnety a ty mohli být dobře usazeny na podložku. Takto tam drží vlastní přitažlivou silou a zahnutý konec zabraňuje jejich samovolnému pohybu nebo ulétnutí z podložky díky vzniku odstředivých sil vznikajících při vysokých otáčkách rotoru. Tento způsob uchycení magnetů byl vybrán po dohodě s vedoucím bakalářské práce, aby bylo možné magnety následně sundat nebo nahradit. Magnety jsme všechny otočili stejným pólem nahoru, abychom mohli navinout všechny cívky jedním směrem. Rotor byl uchycen na hřídel dvěma matkami M8 s podložkami. Tento způsob jsme zvolili kvůli snadnému nastavování velikosti vzduchové mezery mezi magnety a cívkami.



Obr. 24: Rotor s dvanácti magnety

Cívky byly navinuty na balzové jádro o rozměrech 20 x 10 x 4 mm. Na navinutí byl použit měděný lakovaný drát o průměru 0,1 mm. Poté jsme podle již zmiňovaného vzorce vypočítali, že bude navinuto 145 závitů na každé cívce, tj. 1740 závitů statoru. Měděný drát byl na jádro uchycen pomocí silikonu, který nám nijak neovlivňoval jejich vlastnosti a také zvenčí chránil drát před poškozením. Stejným způsobem byly přichyceny cívky k dřevěné podložce. Následně byly všechny cívky zapojeny do série, čímž jsme získali jednofázové vinutí.



Obr. 25: Cívky statoru na podložce

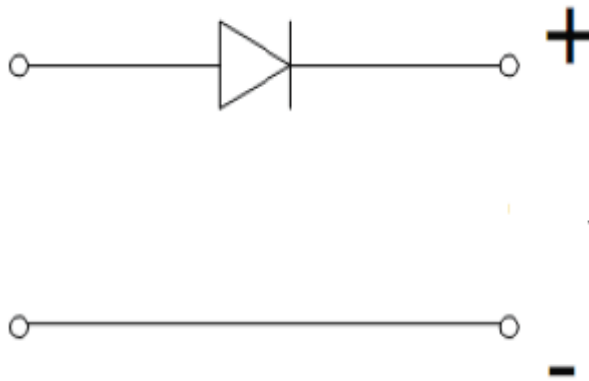
5.4 Návrh elektroniky

Tato část byla navrhnutá ve spolupráci s M. Hruškou, jehož práce má stejný základ a využívá stejné elektronické principy.

Z generátoru získáváme střídavé napětí, které je vhodné například na napájení žárovky. Ale na připojení supersvítivé LED diody to vhodné není, z důvodu, že dioda propouští pouze kladnou polovlnu. To nám způsobuje blikání diody. Proto jsme vyzkoušeli několik obvodů pro usměrnění napětí.

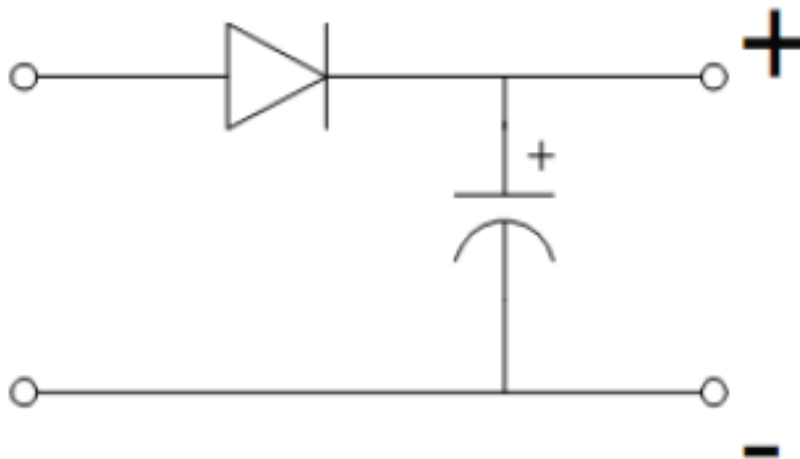
5.4.1 Jednocestný usměrňovač

Začali jsme nejjednodušším typem usměrňovače. Existuje jich několik typů, ale nejjednodušší je jednocestný.



Obr. 26: Jednocestný usměrňovač

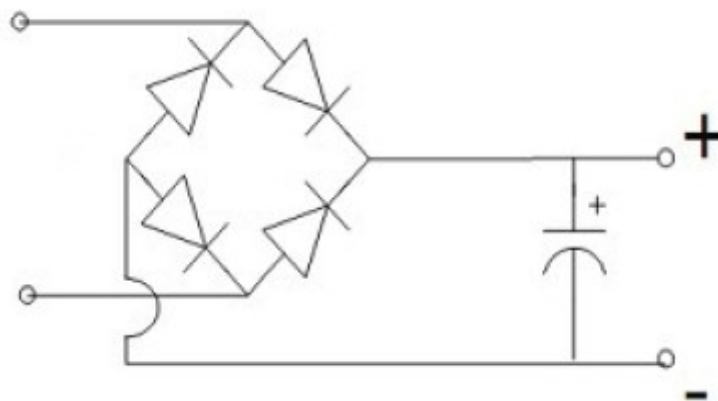
Bohužel na výstupu z tohoto usměrňovače pořád dostáváme pulzující napětí. Proto se na výstup připojuje filtrační kondenzátor. Tohle zapojení nám částečně vyhlazuje výstupní napětí. Musíme však počítat s úbytkem napětí na diodě: 0,6V.



Obr. 27: Jednocestný usměrňovač s filtračním kondenzátorem

5.4.2 Gretzův můstkový usměrňovač

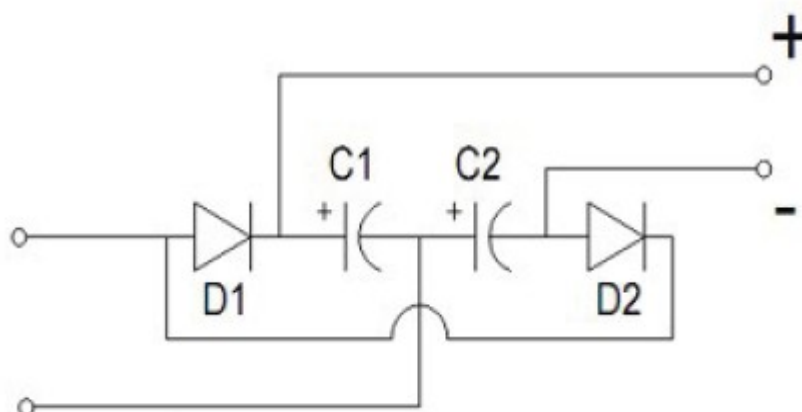
Pravděpodobně nejpoužívanější usměrňovač. Na usměrnění nám slouží čtyři diody. Dá se samostatně vyrobit nebo také koupit zapouzdřený v obalu. Na výstupu dostáváme pulzující napětí. Pouze výkyvy jsou menší, protože filtrace je mnohem účinnější.



Obr. 28: Gretzův můstkový usměrňovač s filtračním kondenzátorem

5.4.3 Zdvojovač napětí

Na jeho výstupu získáváme dvojnásobné napětí. Je tvořen ze dvou diod a dvou filtračních kondenzátorů zapojených do série. Napětí pak získáváme na jejich výstupech.



Obr. 29: Zdvojovač napětí

Následně byly vyrobeny všechny výše popsané typy usměrňovačů. Postupně jsme je zapojovali a zkoušeli jeden po druhém při stejných podmínkách. Z měření jsme zjistili, že bude nejlepší pokud použijeme jednocestný usměrňovač s více filtračními kondenzátory. Čím více kondenzátorů použijeme, tím dostaneme výstupní napětí hladší, ale výrazně nám poklesne hodnota proudu.



Obr. 30: Vyrobený jednocestný usměrňovač s filtračními kondenzátory

5.5 Matematický popis Darrieusova rotoru

Při výpočtech Darrieusova rotoru jsme použili několik různých vztahů.

Výkon větru:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad [W] \quad (5.2)$$

kde:

P – výkon větru působícího na rotor [W]

ρ – hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

S – plocha rotoru [m^2]

v – rychlost větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Při výpočtech Darrieusova rotoru se S vypočítá tímto vztahem:

$$S = D \cdot H \quad [\text{m}^2] \quad (5.3)$$

kde:

D – průměr rotoru [m]

H – výška rotoru (výška křídla) [m]

a hustota vzduchu byla stanovena na hodnotu $1,28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Výkon větrného rotoru:

$$P_r = \frac{S}{4} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 - v_2) \quad [W] \quad (5.4)$$

kde:

P_r – výkon rotoru [W]

S – plocha rotoru [m^2]

ρ – hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v_1 – rychlost větru před rotorem [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

v_2 – rychlost větru za rotorem [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Účinnost větrného rotoru:

je dána poměrem výkonu větrného rotoru k výkonu větru. Je závislá také na poměru rychlosti větru před a za rotorem: $\frac{v_1}{v_2}$. Ideální poměr těchto rychlostí byl stanoven na hodnotu 3 a jedná se o tzv. Betzovu účinnost a vypočte se jako:

$$\mu_{max} = \frac{P_r}{P_v} \quad [\phi] \quad (5.5)$$

kde:

μ_{max} – účinnost větrného rotoru naprázdno [-]

P_r – výkon rotoru [W]

P_v – výkon větru [W]

Betzova účinnost je teoreticky vypočtená účinnost, které lze dosáhnout. Jde o to, že nemůžeme z pohybuujícího se vzduchu odebrat veškerou energii. Kdybychom to udělali, tak by se vzduch za rotorem zastavil a začal se hromadit, proto je teoretická účinnost stanovena na hodnotu 0.6.

Rychloběžnost λ :

je dána poměrem obvodové rychlosti rotoru v_{ob} k rychlosti větru v . Rychloběžnost je ovlivňována:

- počtem otáček
- dosažitelnou celkovou účinností
- počtem křídel rotoru
- profilem, šířkou a úhlem náběhu křídla
- osovým tlakem

$$\lambda = \frac{v_{ob}}{v} = \frac{(2 \cdot \Pi \cdot R \cdot r)}{v} \quad [\Phi] \quad (5.6)$$

kde:

λ – rychloběžnost [-]

v_{ob} – obvodová rychlost lopatek [$m \cdot s^{-1}$]

v – rychlost větru [$m \cdot s^{-1}$]

R – počet otáček [$ot \cdot s^{-1}$]

r – poloměr rotoru [m]

Darrieusův rotor dosahuje maximální účinnosti kolem 30 až maximálně 45% a rychloběžnosti kolem 3 až 5,5.

Elektrický výkon:

$$P_{el} = U_o \cdot I_z \quad [W] \quad (5.7)$$

kde:

P_{el} – elektrický výkon [W]

U_o – napětí naprázdno [V]

I_z – zkratový proud [A]

Celková účinnost rotoru:

$$\mu_{celk} = \frac{P_{el}}{P_v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.8)$$

kde:

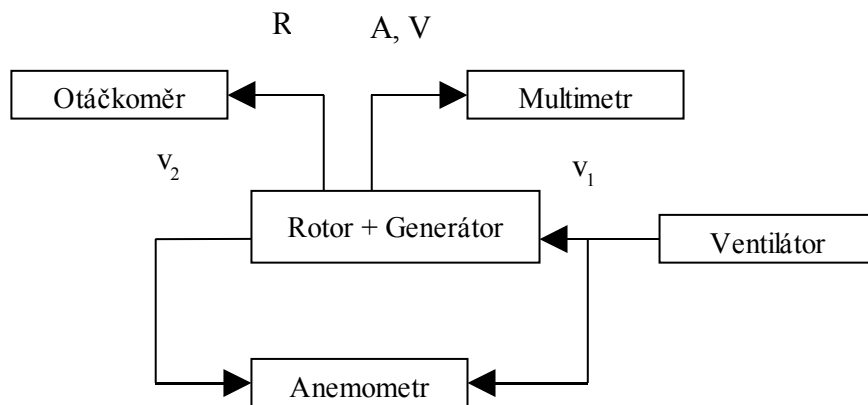
μ_c – celková účinnost rotoru [%]

P_{el} – elektrický výkon [W]

P_v – výkon větru [W]

5.6 Měření modelu

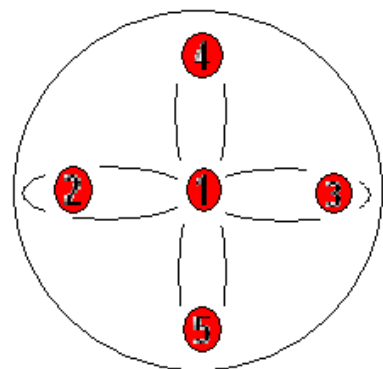
Měření modelu probíhalo v laboratoři. Jako zdroj vzdušného větru jsme použili stolní ventilátor se třemi stupni rychlosti. Pak jsme měřili hodnoty.



Obr. 31: Schematické uspořádání součástí

Rychlost proudění vzduchu:

Rychlost vzduchu jsme měřili na pěti místech před rotorem a na stejných pěti místech za rotorem, abychom získali průměrné hodnoty rychlosti proudění větru.



Obr. 32: Znáornění míst měření na ventilátoru

Ventilátor jsme zapnuli na nejvyšší rychlostní stupeň. Na měření byl použit anemometr Lutron AM – 4203. Rotor byl umístěn do následujících vzdáleností:

- I. 350mm
- II. 450mm
- III. 550mm



Obr. 33: Anemometr Lutron AM-4203

Otáčky rotoru

Otáčky jsme měřili až po ustálení rotoru s pomocí digitálního otáčkoměru Photo type CB-2234B.



Obr. 34: Otáčkoměr Photo type CB-2234B

Proud a napětí

Vzduchová mezera byla nastavena na hodnotu 5 mm.

Na měření proudu a napětí byl použit digitální multimetr Metex M – 3270D. Měřili jsme napětí U generátoru naprázdno. Měření probíhalo jak s usměrňovačem tak bez něj. Při měření bez usměrňovače nám však vycházely různé hodnoty z důvodu pulzujícího napětí. Proto jejich výsledná hodnota je hodnotou průměrnou.

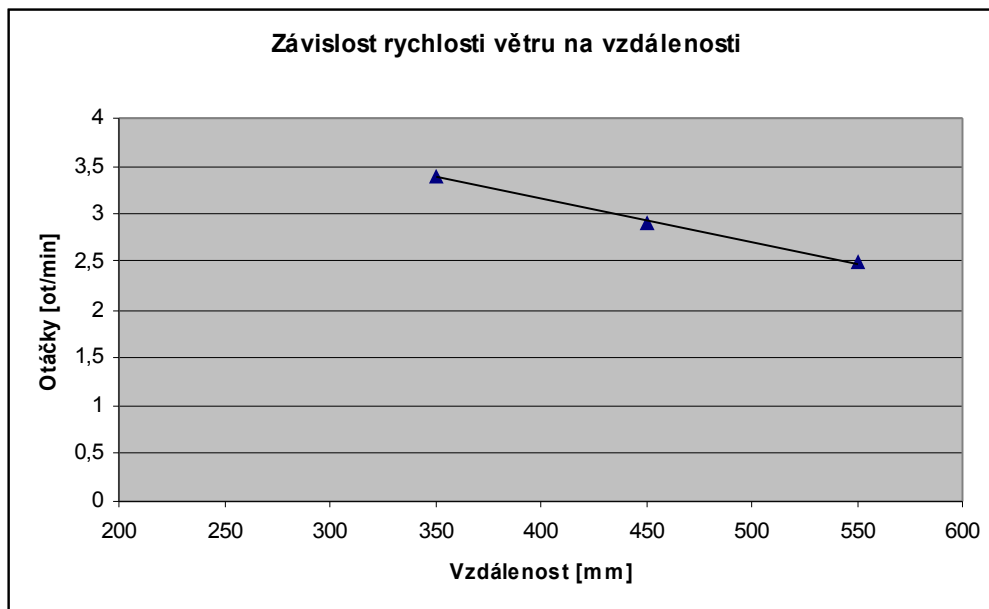
Následně byl změřen i proud I generátoru naprázdno. Po zapojení se nám však snížila hodnota počtu otáček. Tento jev způsobil vznik elektromagnetického pole v cívkách vlivem přechodu proudu.



Obr. 35: Multimetr Metex M-3270D

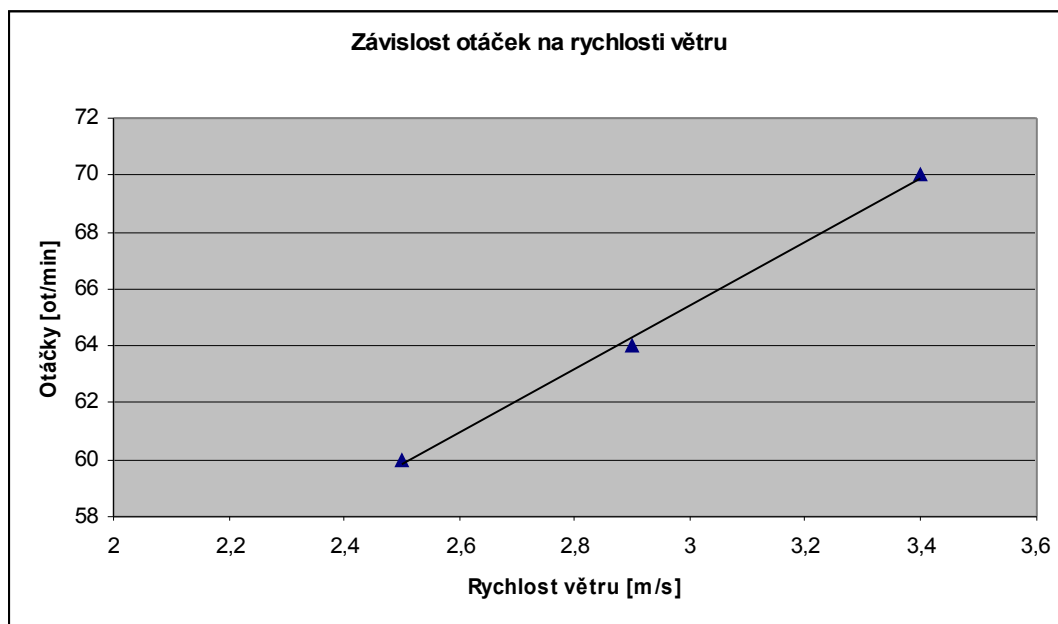
5.7 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty jsme si zapisovali a převedli do tabulek viz. Příloha 1. Z těchto hodnot jsme pak získali různé závislosti zobrazené níže:



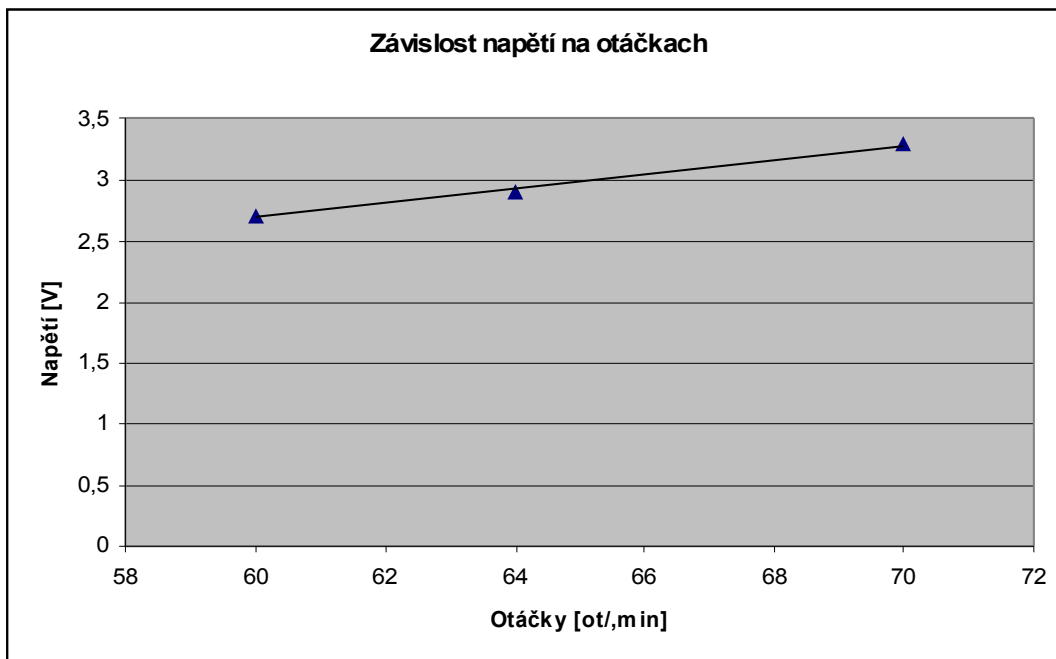
Obr. 36: Graf znázorňující závislost rychlosti větru na vzdálenosti od ventilátoru

Otáčky nám vzhledem ke vzdálenosti od zdroje větrné energie klesají lineárně, jak nám znázorňuje předchozí graf.

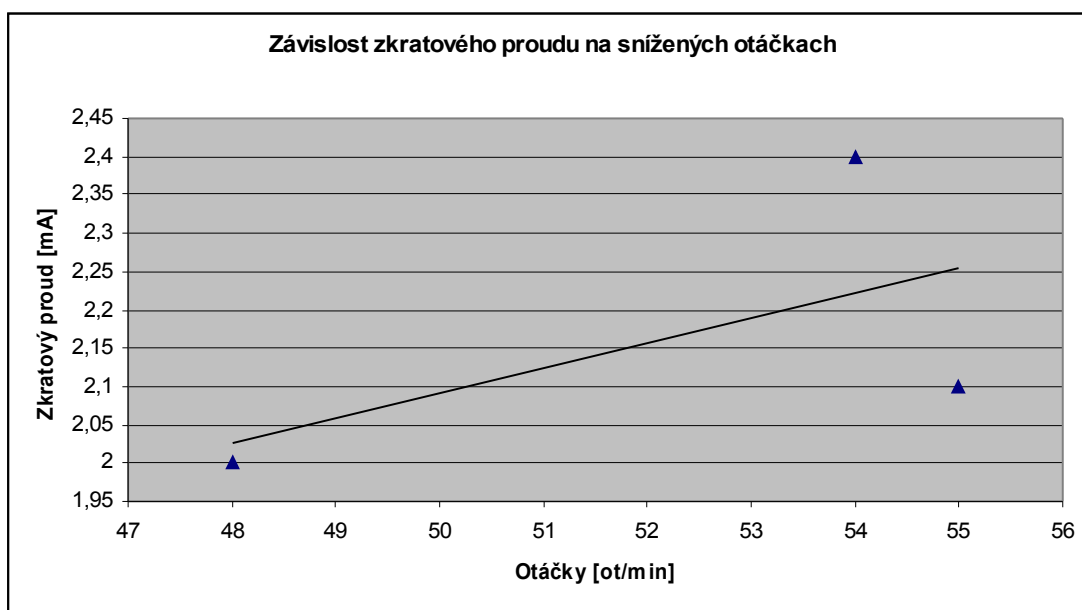


Obr. 37: Graf znázorňující závislost otáček na rychlosti větru

Z grafu je patrné, že otáčky nám rostou lineárně s rychlostí větru.



Obr. 38: Graf znázorňující závislost napětí na otáčkách

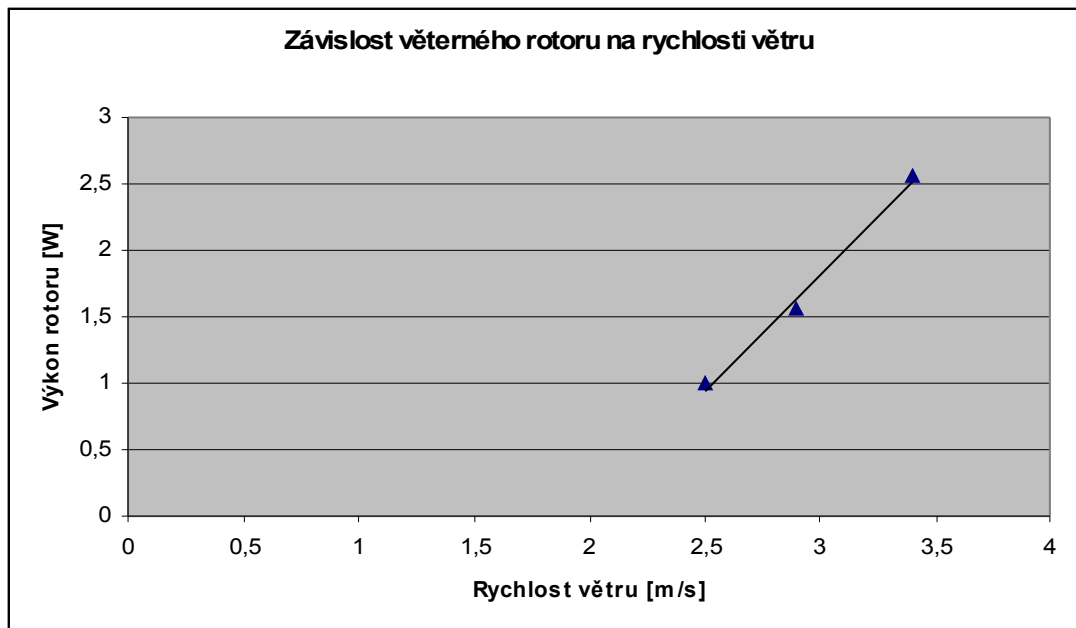


Obr. 39: Graf znázorňující závislost zkratového proudu na snížených otáčkách

Jak můžeme vidět z grafu i z tabulky, tak zkratový proud je velice malý. Při zatížení docházelo ke snížení počtu otáček. Z toho můžeme usuzovat, že se nejedná o tvrdý zdroj.

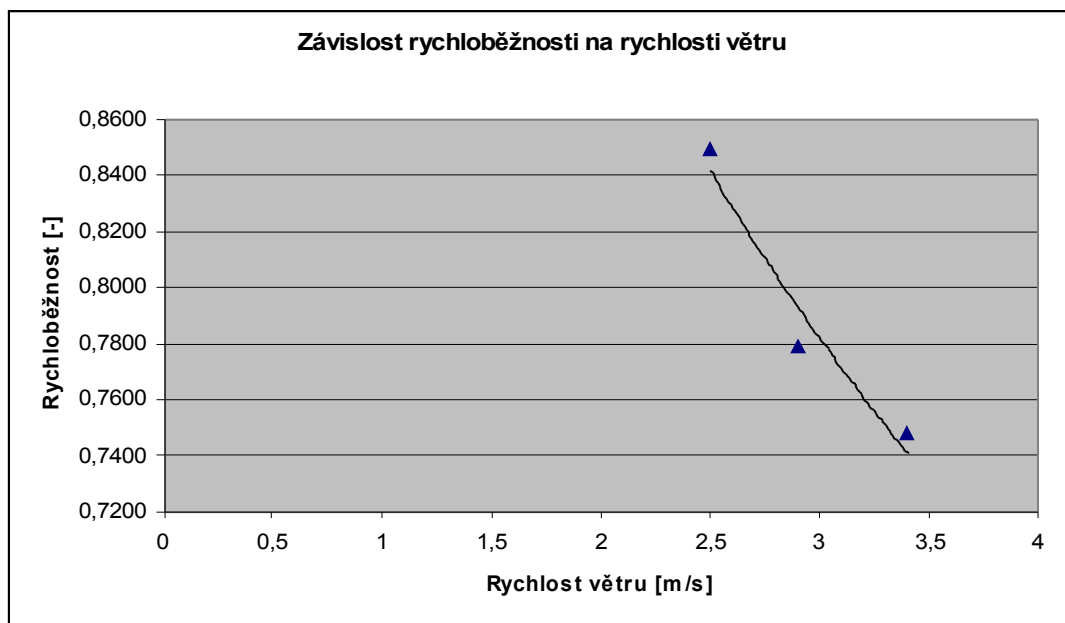
Vypočítali jsme si celkovou účinnou plochu S rotoru (5.3) a z rychlosti větru výkon větru P_v (5.2), výkon větrného rotoru P_r (5.4), účinnost větrného rotoru μ_{\max} (5.5) a rychloběžnost λ (5.6). Tyto vypočítané hodnoty jsme zapsali do tabulky v Příloze 1. Jak z nich můžeme vidět, tak účinnost naprázdno nám dosahuje téměř Betzovy účinnosti. Ale při zatížení nám účinnost výrazně poklesne.

Účinnost při zatížení závislou na rychlosti větru nám zobrazuje Obr. 43. Uvedená účinnost je celková účinnost Darrieusova rotoru.

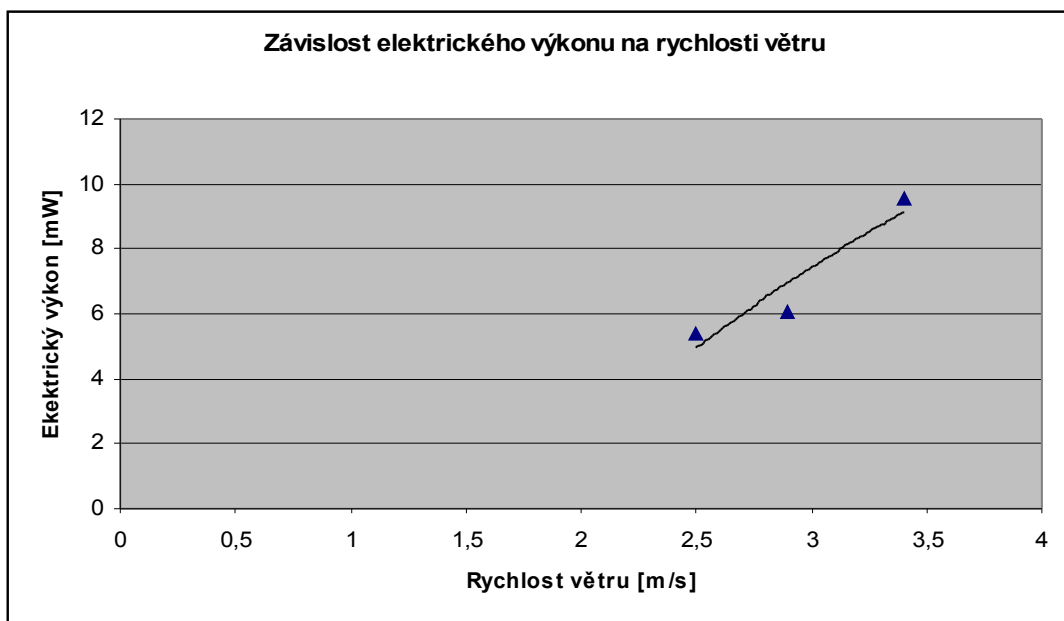


Obr. 40: Graf znázorňující závislost větrného rotoru na rychlosti větru

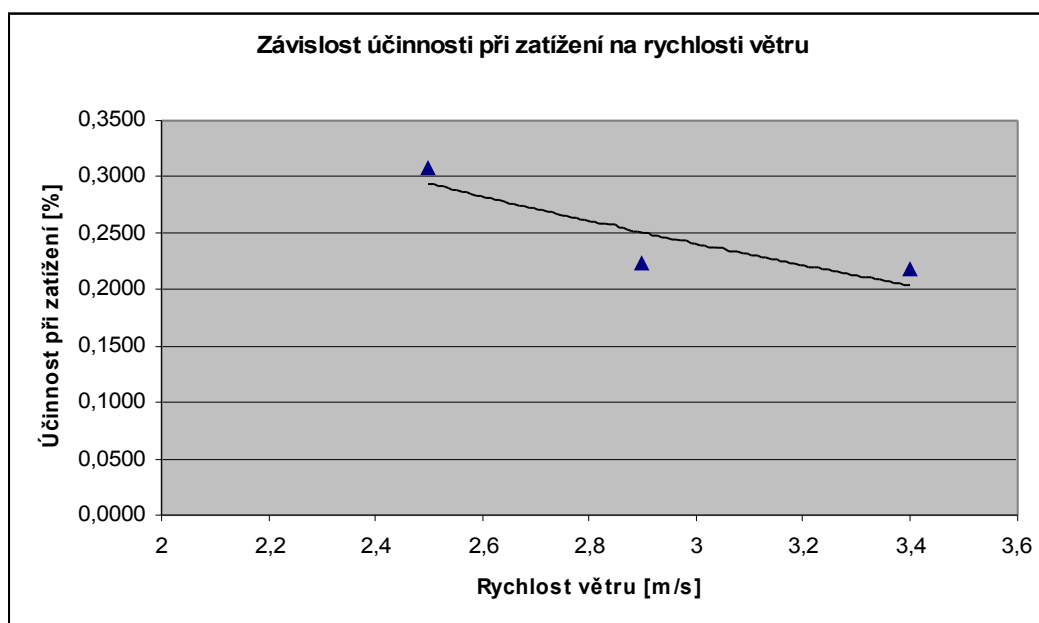
Větrná rychloběžnost se nám pohybuje od 0,7480 až po 0,8491. A její závislost na rychlosti větru můžeme vidět v následujícím grafu:



Obr. 41: Graf znázorňující závislost rychloběžnosti na rychlosti větru



Obr. 42: Graf znázorňující závislost elektrického výkonu na rychlosti větru



Obr. 43: Graf znázorňující závislost účinnosti při zatížení na rychlosti větru

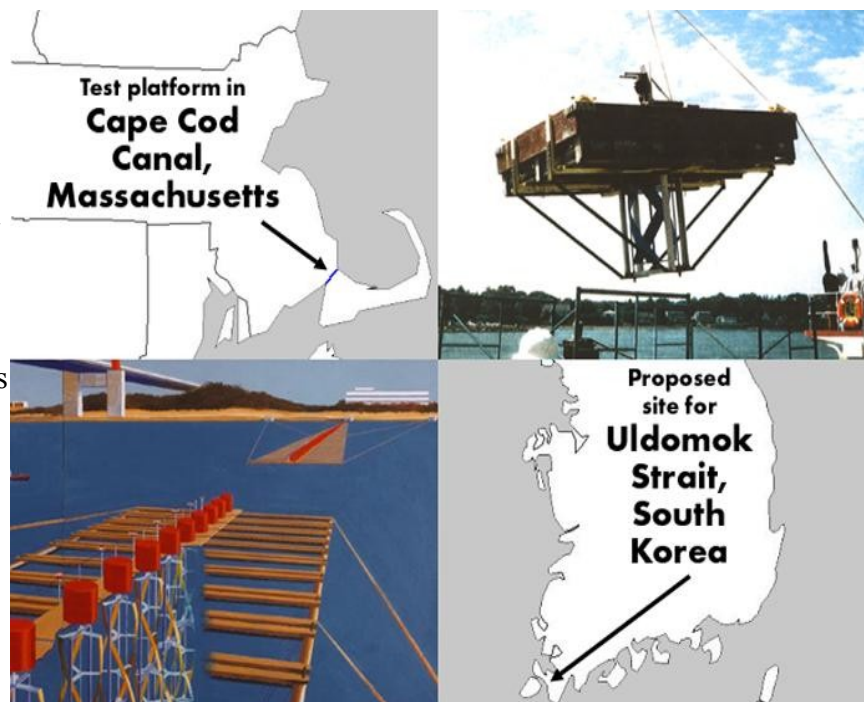
Bohužel ale výsledky nejsou až tak přesné. Lepší výsledky bychom dostali například při měření v aerodynamickém tunelu, kde je možné vytvořit lineární proudění s větší plochou záběru a větším rozsahem větrných rychlostí. Nepřesnosti v měření mohly být způsobeny nepřesným navinutím cívek statoru. Také jejich výška nebyla úplně přesně stejná. A při neschopnosti uchytit podložku rotoru na hřídel dokonale rovně, což způsobovalo její házení, nebylo možné nastavit všude stejně velkou vzduchovou mezeru.

6. Budoucnost

Kdysi byl Darrieusův rotor odložen jako nevhodný zdroj na získávání elektrické energie z větru a do dnešní doby bohužel nebyl zatím ani jeden rotor postaven pro komerční účely. Byl postaven jen jeden, který sloužil na napájení malé vesnice, ale i ten byl začátkem roku 2000 demontovaný kvůli vysokým provozním nákladům. Proto zatím stojí pouze jako testovací modely nebo jako rotory na vysokých budovách, kde mají téměř lineární proudění. Tyto rotory slouží například na osvětlování reklam nebo billboardů.

Dnes se opět začíná experimentovat s různým natáčením křídel nebo různými tvary rotoru. Jeho využití se začíná uplatňovat v řekách a mořích, kde je spouštěn do proudu a tím vytváří elektrickou energii. Ve vodním proudu je zabezpečeno lineární proudění, na které je velice citlivý.

Také se začíná experimentovat s umístěním na velké obchodní lodě. Tak, jak jsme to už viděli ve filmu Vodní svět, kde sloužil k pohonu lodě. Takto by bylo možné ušetřit spoustu paliva.



Obr. 44: Využití Darrieusova rotoru v budoucnu

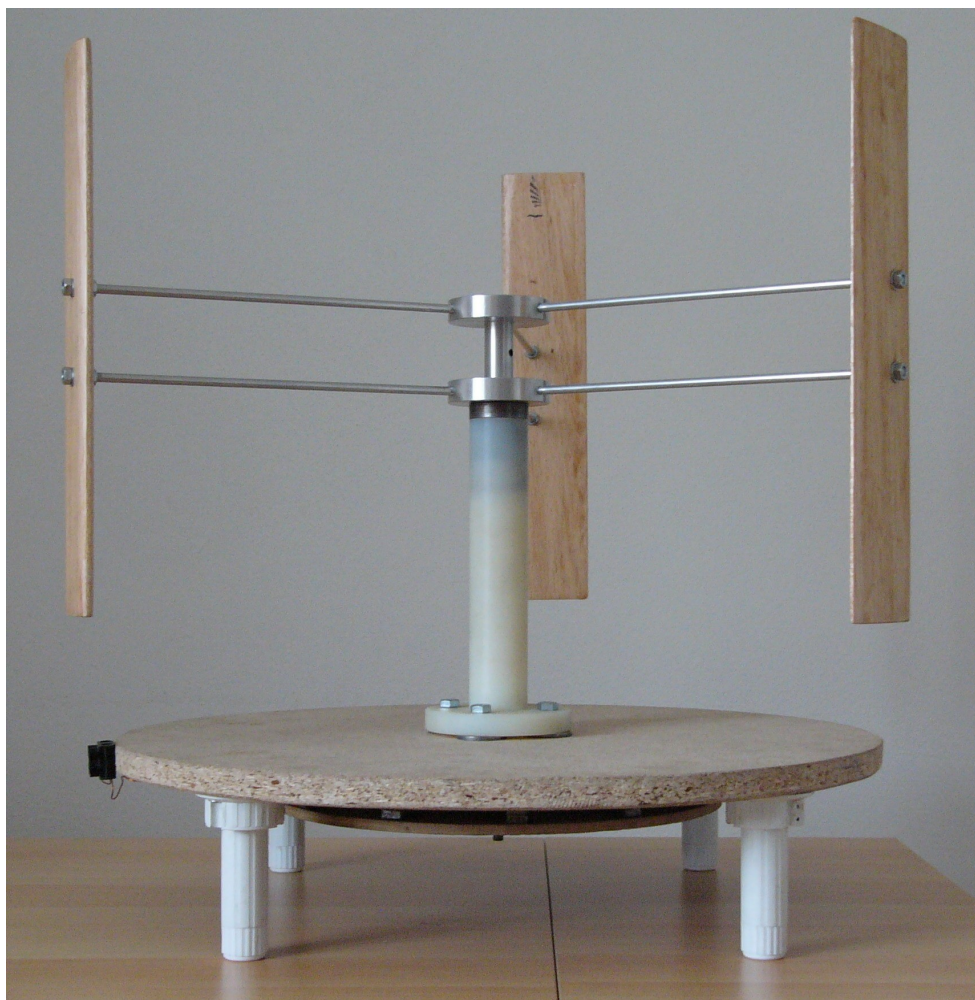
Kvůli výše zmíněným nevýhodám a příliš vysokým nákladům, Darrieusův rotor nebude nikdy masově rozšířen. Jeho relativně dobrá účinnost stále vede ke snaze ho oživit a pokoušet se o vylepšení. Avšak příliš vysoké provozní náklady mu nedávají moc velkou šanci do budoucna. Ale nechme se překvapit jak to dopadne.....

7. Závěr

Hlavní požadavky na model Darrieusova rotoru byly velikost modelu, konstrukční jednoduchost a neméně důležité minimální finanční náklady. Proto jsme při konstrukci vybírali pouze materiály a komponenty běžně dostupné a jednoduché na opracovávání. Po sestavení jsme dostali rotor, který ve spojení s ventilátorem slouží jako názorný model k ověření si principu funkce Darrieusova rotoru. Na tomto modelu jsme si vyzkoušeli možnost získávání elektrické energie z větrné energie a také výrobu elektrického generátoru. Vzhledem k tomu, že jsme umístili rotor i generátor na jednu společnou hřídel, tak jsme mohli zanedbat mechanické ztráty způsobené převodovkou.

Celková účinnost našeho modelu se pohybuje kolem 0,21%. Tuto malou účinnost má za následek pravděpodobně špatně zvolený zdroj větrné energie. Na její tvorbu jsme totiž používali stolní ventilátor, jenž generuje velice turbulentní a spirálovité proudění. Toto proudění je absolutně nevhodné pro Darrieusův rotor. Také rozměry ventilátoru neodpovídaly rozměrům rotoru a tak nebylo možné pokrýt celou aktivní plochu rotoru.

paI přes složité a nejednoznačně definované aerodynamické podmínky jsme dosáhli při rychlosti proudění vzduchu 3,4 m/s rychlost otáčení 70 ot/min. Při těchto otáčkách jsme naměřili hodnotu napětí generátoru 3,3 V. Pro názornou demonstraci tvorby elektrického napětí je připojena LED dioda.



Obr. 45: Kompletní model Darrieusova rotoru

Použitá literatura:

- (1) Schulz, H. Savoniův rotor – návod na stavbu. Ostrava: nakladatelství HEL, 2005. 77s. ISBN: 80-86167-26-7
- (2) Halliday, D. - Resnik, R. - Walker, J. Fyzika – část 3. - Elektřina a magnetismus. Brno: nakladatelství VUTIUM, 2003. 1198s. ISBN: 80-214-1868-0
- (3) Hoření, B. - Lněnička, J. Letecké modelářství a aerodynamika. Praha: nakladatelství Naše vojsko, 1977. 296s. ISBN: 28-110-77 05/02
- (4) Musil, M. Aerodynamika moderních leteckých modelů. Praha: nakladatelství Naše vojsko, 1978. 276s. ISBN: 28-070-78 05/112
- (5) Rychteník, V. - Janoušek, J. - Pavelka, J. Větrné motory a elektrárny. Praha: nakladatelství ČVUT, 1997. 199s. ISBN:80-01-01563-7
- (6) Aerodynamika [online] [cit. 1.7.2008]
URL: <<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>>
- (7) Aerodynamika a mechanika letu (1. - 4. díl) [online] [cit. 1.7.2008]
URL: <<http://www.4000.cz/jak-na-to/aerodynamika-a-mechanika-letu-1.-dil.html>>
- (8) Another approach to Wind [online] [cit. 3.7.2008]
URL:
<<http://www.memagazine.org/backissues/membersonly/jun04/features/apptowind/apptowind.html>>
- (9) Basic Principles of Wind Resource Evaluaton [online] [cit. 3.7.2008]
URL: <<http://www.awea.org/faq/basicwr.html>>
- (10) Encyklopedie energie [online] [cit. 1.7.2008]
URL:
<http://www.simopt.cz/energyweb/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=vetrn_turb_dar.html>
- (11) Darrieus type [online] [cit. 7.7.2008]
URL: <http://www.windstuffnow.com/main/darrieus_type.htm>
- (12) Darrieus wind turbine – Wikipedia [online] [cit. 7.7.2008]
URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine>
- (13) Darrieus rotor / Wind energy – Economy point [online] [cit. 7.7.2008]
URL: <<http://www.economy-point.org/d/darrieus-rotor.html>>
- (14) Georges Jean Marie Darrieus – Wikipedia [online] [cit. 1.7.2008]
URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Georges_Jean_Marie_Darrieus>
- (15) Kinematika hmotného bodu [online] [cit. 10.7.2008]
URL: <http://www.sweb.cz/radek_jandora/f01.htm>
- (16) Jsou lepší horizontální nebo vertikální větrné elektrárny? [online] [cit. 10.7.2008]
URL: <<http://cappytech.blogspot.com/2007/04/jsou-lep-horizontln-nebo-vertikln-vtrn.html>>

- (17) Větrův zápisník – Kde brát energii v budoucnosti? [online] [cit. 3.7.2008]
URL: <<http://www.kalista.cz/lukas/blog/komentare.php?id=18>>
- (18) Problematika připojování větrných elektráren do distribuční sítě [online] [cit. 10.7.2008]
URL: <<http://elektro.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4279>>
- (19) Basic Aerodynamic Operating Principles of Wind Turbines [online] [cit. 16.7.2008]
URL: <<http://www.awea.org/faq/vawt.html>>
- (20) Rotory s vertikální osou rotace – VAWT [online] [cit. 16.7.2008]
URL: <<http://www.ekodum.cz/energy/wind/vertikal.php>>
- (21) Větrná energie [online] [cit. 17.7.2008]
URL: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/vetrna-energie>>
- (22) Větrná energie [online] [cit. 16.7.2008]
URL: <<http://sf.zcu.cz/rocnik07/cislomm/1-4def.html>>
- (23) Větrné elektrárny – mikro, malé i velké – princip, provedení, realizace [online] [cit. 17.7.2008]
URL: <<http://automatizace.hw.cz/vetrne-elektrarny-mikro-male-i-velke-princip-provedeni-regulace>>
- (24) Větrná elektrárna [online] [cit. 21.7.2008]
URL: <<http://www.quido.cz/objevy/vitr.htm>>
- (25) Malé větrné elektrárny (základy, aerodynamika, výběr profilu, délka tětiny, zjednodušení, natáčení, regulace, postup výpočtu) [online] [cit. 21.7.2008]
URL: <<http://www.ve.ic.cz/index.php?id=2>>
- (26) Darrieus wind turbine analysis [online] [cit. 1.7.2008]
URL: <<http://windturbine-analysis.netfirms.com>>
- (27) Advanced Wind Power Turbine [online] [cit. 22.7.2008]
URL: <<http://www.pages.drexel.edu/~garfinkm/WindGen.html>>
- (28) Větrná turbína [online] [cit. 22.7.2008]
URL: <http://wikipedia.infostar.cz/w/wi/wind_turbine.html>
- (29) Seznam Encyklopedie – Nerovnoměrný pohyb po kružnici [online] [cit. 3.7.2008]
URL:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Nerovnom%C4%9Brn%C3%BD_pohyb_po_kru%C5%BEnici>
- (30) Seznam encyklopedie – Savoniova turbína [online] [cit. 25.7.2008]
URL: <<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/497819-savoniuova-turbina>>
- (31) Picoturbine Windmill Science Fair Kit Wind Turbine [online] [cit. 25.7.2008]
URL: <<http://www.picoturbinesite.com>>
- (32) Pohyb po kružnici [online] [cit. 21.7.2008]
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Pohyb_po_kru%C5%BEnici>

- (33) MF WEB: Rovnoměrný pohyb po kružnici [online] [cit. 25.7.2008]
URL: <<http://mfweb.wz.cz/fyzika/5.htm>>
- (34) Der Darrieus rotor [online] [cit. 30.7.2008]
URL: <www.ifb.uni-stuttgart.de/~doerner/eDarrieus.html>
- (35) darrieus-rotor [online] [cit. 30.7.2008]
URL: <<http://www.economy-point.org/d/darrieus-rotor.html>>
- (36) Alternativní zdroje energie [online] [cit. 30.7.2008]
URL: <<http://www.alternativni-zdroje.cz/>>
- (37) Větrná energie [online] [cit. 7.7.2008]
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_energie>
- (38) Obnovitelný zdroj energie [online] [cit. 7.7.2008]
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Obnoviteln%C3%BD_zdroj_energie>
- (39) apptowind [online] [cit. 4.8.2008]
URL:
<<http://www.memagazine.org/backissues/membersonly/jun04/features/apptowind/apptowind.html>>
- (40) vertikál [online] [cit. 4.8.2008]
URL: <<http://www.diebrennstoffzelle.de/alternativen/wind/vertikal.shtml>>
- (41) darrieus_type [online] [cit. 4.8.2008]
URL: <http://www.windstuffnow.com/main/darrieus_type.htm>
- (42) windkraftwerke [online] [cit. 10.7.2008]
URL: <http://www.gymnasium-glinde.de/files/pk_energie/pk_energie/windkraftwerke.htm>
- (43) 8Kudelas.pdf [online] [cit. 1.7.2008]
URL: <<http://actamont.tuke.sk/pdf/2005/n1/8Kudelas.pdf>>
- (44) wind_power_german.pdf [online] [cit. 4.8.2008]
URL: <http://www.gymtce.cz/Projekty/math/Projectweb/Mathematica/Second_year/Leibnitz/wind_power_german.pdf>
- (45) 503_Gyulai.pdf [online] [cit. 7.7.2008]
URL: <http://www.mec.upt.ro/~mh/Conferinta_MH/503_Gyulai.pdf>
- (46) 3.0_Větrná_energie.pdf [online] [cit. 25.7.2008]
URL: <http://www.vscht.cz/ktt/zdrene/3.0_V%ectrn%e1_energie.pdf>
- (47) finalreport.pdf [online] [cit. 21.7.2008]
URL: <<http://www.webalice.it/acecere48/finalreport.pdf>>
- (48) 861085.pdf [online] [cit. 21.7.2008]
URL: <<http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/1986/861085.pdf>>

- (49) Butler – 2006.pdf [online] [cit. 1.7.2008]
URL: <<https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1692/1/Butler-2006.pdf>>
- (50) 800179.pdf [online] [cit. 4.8.2008]
URL: <<http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/1980/800179.pdf>>
- (51) Vertical%20Axis%20Wind%20Turbines.pdf [online] [cit. 4.8.2008]
URL:
<<https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20498WP%20Wind%20Power%20System/s/Vertical%20Axis%20Wind%20Turbines.pdf>>
- (52) 004TISECDeviceReportFinal111005.pdf [online] [cit. 16.7.2008]
URL:
<<http://oceanenergy.epri.com/attachments/streamenergy/reports/004TISECDeviceReportFinal111005.pdf>>
- (53) Turby-DE-Anwendung-V3.0.pdf [online] [cit. 10.7.2008]
URL: <<http://www.turby.nl/99-downloads/Turby-DE-Anwendung-V3.0.pdf>>
- (54) houston.pdf [online] [cit. 4.7.2008]
URL: <<http://www.lpi.usra.edu/publications/reports/CB-979/houston.pdf>>
- (55) 1414.pdf [online] [cit. 25.7.2008]
URL:
<<http://www.iranenergy.org.ir/library/articles/5%20articles%20national%20energy%20congress/pdf/1414.pdf>>
- (56) 1148632218_elektrarna-vetrna.jpg [online] [cit. 21.7.2008]
URL: <www.financninoviny.cz>
- (57) 120463m-mapa-vetrne-elektrarny-v-cesku.png [online] [cit. 30.7.2008]
URL: <www.aktualne.centrum.cz>
- (58) aerovironment-vetrne-turbiny-01.jpg [online] [cit. 8.8.2008]
URL: <www.ekobydleni.eu>
- (59) vetrna_elektrarna_1.jpg [online] [cit. 8.8.2008]
URL: <www.mesto-moroslav.cz>
- (60) vetrna-elektrarna-sumava-3s.jpg [online] [cit. 8.8.2008]
URL: <www.alter-eko.cz>
- (61) vetrne-elektrarny-cina.jpg [online] [cit. 25.7.2008]
URL: <www.ekobydleni.eu>
- (62) Wind_Turbines_Blue_Mountains.jpg [online] [cit. 30.7.2008]
URL: <www.freedomenergysystems.com>
- (63) wind_turbines_offshore_Danish_farm.jpg [online] [cit. 1.7.2008]
URL: <blog.mlive.com>

Příloha 1

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot.

Měření bez usměrňovače:

Vzdálenost od ventilátoru	Rychlost větru před rotorem	Rychlost větru za rotorem	Otáčky	Napětí	Proud	Snížený otáčky
[mm]	[m.s-1]	[m.s-1]	[rpm]	[V]	[mA]	[rpm]
350	3,4	1,5	70	1,8	3,4	54
450	2,9	1,4	64	1,7	3,3	55
550	2,5	1,2	60	1,5	3	48

Výkon větru	Výkon rotoru	Účinnost naprázdno	Rychloběžnost	Elektrický výkon	Účinnost při zatížení
[W]	[W]	[-]	[-]	[mW]	[%]
4,4020	2,5545	0,5803	0,7480	6,12	0,1390
2,7316	1,5532	0,5686	0,7793	5,61	0,2050
1,7500	0,9966	0,5695	0,8491	4,5	0,2571

Měření s usměrňovačem:

Vzdálenost od ventilátoru	Rychlost větru před rotorem	Rychlost větru za rotorem	Otáčky	Napětí	Proud	Snížený otáčky
[mm]	[m.s-1]	[m.s-1]	[rpm]	[V]	[mA]	[rpm]
350	3,4	1,5	70	3,3	2,4	54
450	2,9	1,4	64	2,9	2,1	55
550	2,5	1,2	60	2,7	2	48

Výkon větru	Výkon rotoru	Účinnost naprázdno	Rychloběžnost	Elektrický výkon	Účinnost při zatížení
[W]	[W]	[-]	[-]	[mW]	[%]
4,4020	2,5545	0,5803	0,7480	9,57	0,2174
2,7316	1,5532	0,5686	0,7793	6,09	0,2229
1,7500	0,9966	0,5695	0,8491	5,4	0,3086

Příloha 2

CD s následujícím obsahem:

- I. elektronická podoba této práce ve formátu pdf
- II. fotodokumentace stavby
- III. uložené internetové stránky a soubory pdf