



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

DOMÁCÍ MIKRO-VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA

HOME MICRO-WIND POWER PLANT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Šmol

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2023



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Vojtěch Šmol

ID: 211243

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Domácí mikro-větrná elektrárna

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s konstrukcemi mikro-větrných elektráren pro domácí účely nabíjení Li-ion baterií. Navrhněte a vyrobte generátor za pomoci FEM simulací. Navrhněte a vyrobte MPPT regulátor s obslužnou aplikací a dále provedte návrh turbíny. Elektrárnu sestavte a otestujte, provedte příslušná měření a vyhodnocení. Vytvořte výrobní dokumentaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucích práce.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 23.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá konstrukcí mikro větrné elektrárny v domácích podmínkách. Nejprve je pojednáno o větru, jeho vzniku a výkonu. Následně jsou uvedeny druhy používaných větrných turbín a jejich parametry. Dále je řešena konstrukce a výroba domácí mikro větrné turbíny, konstrukce lopatek, náboje, brzdy a senzoru otáček. Dále je proveden návrh a výroba synchronního generátoru s permanentními magnety vyrobeného pomocí 3D tisku. Jsou uvedeny výsledky z testování generátoru. V další části diplomové práce je řešena problematika MPPT regulátorů, je vysvětlen princip fungování, hardware i software a výsledky z testování. V poslední části je řešeno testování větrné elektrárny v simulovaných podmínkách a v reálném provozu.

Klíčová slova

Mikro větrná elektrárna, Synchronní generátor s permanentními magnety, MPPT regulátor, Větrná turbína

Abstract

The master's thesis deals with the construction of micro wind power plants in domestic conditions. Firstly, theory about wind is discussed. In next part, the types of wind turbines and their parameters are listed. Furthermore, the design and production of a domestic micro wind turbine, the design of blades, hubs, brakes and speed sensors are addressed. Furthermore, the design and production of a synchronous generator with permanent magnets produced using 3D printing is carried out. Results from generator testing are shown. In the next part of the thesis, the issue of MPPT controllers is solved, the principle of operation, hardware and software and the results of testing are clarified. The last part deals with the testing of wind power plants in simulated conditions and in real operation.

Keywords

Micro wind power plant, Synchronous generator with permanent magnets, MPPT regulator, Wind turbine

Bibliografická citace:

ŠMOL, Vojtěch. *Domácí mikro-větrná elektrárna* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152463>.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Vyroubal.

Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma Domáci mikro-větrná elektrárna jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petrovi Vyroubalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Vítr a proudění vzduchu.....	8
2.1	Vznik větru.....	8
2.2	Rychlost větru	9
2.3	Výkon větru.....	11
2.4	Vztlaková a odporová síla.....	13
2.5	Koeficient rychloběžnosti	14
3	Materiály používané pro FDM 3D tisk	15
4	Druhy větrných motorů	17
4.1	Odporové větrné motory	17
4.2	Větrné motory s vertikální osou otáčení (VAWT).....	18
4.3	Větrné motory s horizontální osou otáčení (HAWT).....	19
5	Generátory	20
5.1	Druhy alternátorů	20
5.2	Trojfázové soustavy	21
5.3	Permanentní magnety	24
6	Cíle diplomové práce	25
7	Koncepce domácí mikro větrné elektrárny	26
8	Konstrukce větrné turbíny	27
8.1	Lopatka.....	30
8.2	Konstrukce lopatky	31
8.3	Konstrukce osy a náboje	33
8.4	Převod	34
8.5	Brzda	35
8.6	Čidlo otáček	36
9	Konstrukce generátoru pro větrnou elektrárnu	37
9.1	Simulace.....	38
9.2	Návrh vinutí	39
9.3	Výroba generátoru.....	43
9.4	Testování generátoru.....	46
10	MPPT	50

10.1	DC-DC step down měnič.....	51
10.2	Popis hardwaru MPPT měniče	53
10.3	Popis softwaru MPPT měniče	55
10.4	Obslužná aplikace.....	57
10.5	Testování nabíjecí charakteristiky	58
10.6	Pomocná elektronika větrné elektrárny	60
11	Testování větrné elektrárny	62
11.1	Testování v simulovaném prostředí.....	62
11.2	Testování v reálném provozu	63
12	Náklady na stavbu větrné elektrárny	66
13	Porovnání s větrnou elektrárnou z bakalářské práce.....	67
14	Závěr	68
	Seznam příloh	70
	Literatura.....	71

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

VM ... větrný motor

VE ... větrná elektrárna

VVM ... vertikální větrný motor

ot./min ... otáčky za minutu

VAWT... vertical axis wind turbine (vertikální větrná turbína)

HAWT... horizontal axis wind turbine (horizontální větrná turbína)

FDM ... fused depositing modeling

PLA ... Polyactic acid

ABS ... Akrylonitrilbutadienstyren

PETG ... Polyethylen terephthalate glycol

PC ... Polycarbonate

PA ... Polyamid

UV ... ultraviolete (ultrafialové)

IoT ... internet of things (internet věcí)

DIY ... do it yourself (podomácku vyrobený)

MPPT... maximum power point tracker (hledáč bodu maximálního výkonu)

MPP... maximum power point (bod maximálního výkonu)

P&O... perturbation and observation (narušení a pozorování)

CC... constant current (konstantní proud)

CV... constant voltage (konstantní napětí)

4P... 4 paralelně

4S... 4 sériově

PM ... permanentní magnet

CSV ... comma-separated value (hodnoty oddělené čárkami)

AC ... alternating current (střídavý proud)

DC ... direct current (stejnsměrný proud)

A/D ... analog na digitál

Symboly větrná turbína:

P_t	výkon větru při úplném zbrzdění	[W]
P_{bk}	teoretický výkon větrného motoru	[W]
P_r	reálný vyrobený elektrický výkon	[W]
v	rychlost	[m/s]
ρ	hustota	[kg/m ³]
S	plocha	[m ²]
μ	účinnost	[-]
F_r	odporová síla	[N]
c_p	koeficient odporu	[-]
μ_v	účinnost větrné turbíny	[-]
μ_p	účinnost převodu	[-]
μ_c	celková účinnost větrné elektrárny	[-]
λ (TSR)	koeficient rychloběžnosti	[-]
D	průměr	[m]
n	otáčky	[ot./min.]
v_v	rychlost větru	[m/s]
v_t	obvodová rychlost lopatek turbíny	[m/s]
C_p	celková účinnost větrné turbíny	[-]

Symbole generátor:

U_i	indukované napětí	[V]
U_u, U_v, U_w	fázová napětí	[V]
U_s	sdrúžené napětí	[V]
U_f	fázové napětí	[V]
I	elektrický proud	[A]
I_f	fázový proud	[A]
B_r	remanentní indukce	[T]
H_c	koercivní síla	[A/m]
U_r	napětí při rozběhové rychlosti	[V]
n_r	otáčky při rozběhové rychlosti	[ot./min]
P	jmenovitý výkon	[W]
p	počet pólových dvojic	[-]
m	počet fází	[-]
Q	počet drážek statoru	[-]
Q_p	počet drážek na pól	[-]
q	počet drážek na pól a fázi	[-]
D_r	průměr rotoru	[mm]
D_s	průměr statoru	[mm]
l	délka aktivní části vinutí	[mm]
δ	délka vzduchové mezery	[mm]
τ_u	drážková rozteč	[mm]
d_c	šířka vinutí	[mm]
τ_p	pólová rozteč	[mm]
k_y	činitel kroku	[-]
k_r	činitel rozlohy	[-]
k_v	činitel vinutí	[-]
B	magnetická indukce	[T]
ϕ	magnetický indukční tok	[Wb]
U_{IR}	požadované napětí při rozběhové rychlosti	[V]
f_r	frekvence při rozběhové rychlosti	[Hz]
N	počet závitů jedné fáze	[-]

l_c	délka vodiče jednoho závitu cívky	[mm]
a_c	výška cívky	[mm]
b_c	šířka cívky	[mm]
c_c	hloubka cívky	[mm]
S_v	průřez vodiče	[mm ²]
r_v	poloměr vodiče	[mm]
l_{vf}	délka vodiče jedné fáze	[mm]
R_v	odpor vodiče jedné fáze	[Ω]
ρ_m	měrná rezistivita mědi	[Ω/m]
P_{zj}	ztráty vlivem Joulova tepla	[W]
P_{zu}	ztráty na usměrňovači	[W]
μ_G	účinnost generátoru	[%]

Symbols MPPT:

C	kapacita	[mAh]
I_z	proud do zátěže	[A]
U_z	napětí na zátěži	[V]
P_z	výkon na zátěži	[W]
P_p	přepočtený výkon	[W]

Konstanty:

b_k	Betzův koeficient	0,5926
-------	-------------------	--------

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 Globální cirkulace atmosféry [2]	8
Obrázek 2-2 Ukázka kolísání rychlosti větru v čase [3]	9
Obrázek 2-3 Grafická závislost teoretického výkonu větru, maximálně dosažitelného výkonu větrného motoru a reálně vyrobitelného elektrického výkonu větrné elektrárny na rychlosti větru	12
Obrázek 2-4 Proudění vzduchu kolem křídla [3].....	13
Obrázek 2-5 Závislost součinitele výkonosti na koeficientu rychloběžnosti pro vybrané větrné turbíny [7]	14
Obrázek 4-1 Anemometr a Savoniův rotor [3]	17
Obrázek 4-2 VAWT domácí výroby autor Michael Klements [16]	18
Obrázek 4-3 Větrné "westernové" kolo [17]	19
Obrázek 4-4 Diy HAWT větrná elektrárna od autora Jamese Biggara [18].....	19
Obrázek 5-1 Základní uspořádání třífázového generátoru [26].....	21
Obrázek 5-2 Zapojení cívek generátoru do hvězdy [26]	22
Obrázek 5-3 Zapojení generátoru do trojúhelníka [26]	23
Obrázek 7-1 Blokové schéma koncepce větrné elektrárny	26
Obrázek 8-1 Závislost celkové účinnosti větrné elektrárny na koeficientu rychloběžnosti již zkonstruované větrné elektrárny typu Lenz2 [19].....	27
Obrázek 8-2 Závislost otáček větrné turbíny na rychlosti větru pro vybrané hodnoty TSR 0,8 a 1,6	28
Obrázek 8-3 Grafická závislost výkonu větrné turbíny na rychlosti větru pro C_p 0,38	29
Obrázek 8-4 Řez lopatkou a ztvárnění působících sil [20].....	30
Obrázek 8-5 Kostra lopatky	31
Obrázek 8-6 Oplechované lopatky.....	31
Obrázek 8-7 Lopatka pokrytá skelnou rohoží připravená k laminaci epoxidovou pryskyřicí	32
Obrázek 8-8 Náboj větrné elektrárny	33
Obrázek 8-9 Grafická závislost otáček generátoru na rychlosti větru	34
Obrázek 8-10 Řetězový převod	34

Obrázek 8-11 Mechanismus brzdy	35
Obrázek 8-12 Čidlo otáček	36
Obrázek 9-1 Průběh magnetické indukce v závislosti od osy rotoru.....	38
Obrázek 9-2 Průběh magnetické indukce skrz vinutí generátoru	38
Obrázek 9-3 Grafické vyjádření závislosti vypočteného napětí naprázdno na otáčkách generátoru	41
Obrázek 9-4 Osa generátoru s pojistným kolíkem.....	43
Obrázek 9-5 Zkompletovaný rotor generátoru	43
Obrázek 9-6 Ruční navíjení cívek	44
Obrázek 9-7 Zapojení cívek generátoru dle fází.....	44
Obrázek 9-8 Zkompletovaný generátor	45
Obrázek 9-9 Grafické porovnání závislosti vypočteného, simulovaného a změřeného sdruženého napětí na otáčkách generátoru	46
Obrázek 9-10 Grafické vyjádření závislosti proudu a výkonu na otáčkách při napájení 12 V autožárovky s nominálním výkonem 75 W.....	47
Obrázek 9-11 Grafické vyjádření závislosti proudu a výkonu na otáčkách generátoru při paralelním zapojení dvou 12 V autožárovek s nominálním výkonem 75 W	47
Obrázek 9-12 Grafické vyjádření závislosti proudu a výkonu na otáčkách generátoru při sériovém zapojení dvou 12 V autožárovek s nominálním výkonem 75 W.....	48
Obrázek 10-1 Ztvárnění principu fungování step down měniče.....	51
Obrázek 10-2 Schéma zapojení asynchronního buck měniče.....	52
Obrázek 10-3 Schéma zapojení synchronního buck měniče	52
Obrázek 10-4 Schéma zapojení obvodu měniče.....	53
Obrázek 10-5 Schéma napájecí části MPPT.....	54
Obrázek 10-6 Schéma zapojení převodníku USB/UART	54
Obrázek 10-7 Vývojový diagram softwaru MPPT.....	55
Obrázek 10-8 Vývojový diagram algoritmu MPPT hill-climb.....	56
Obrázek 10-9 Ukázka prostředí mobilní aplikace vytvořené pomocí Blynk IoT.....	57
Obrázek 10-10 Nabíjecí charakteristika baterie nabíjené solárním panelem o výkonu 40 W	58
Obrázek 10-11 Schéma trojcestného usměřovače	60
Obrázek 10-12 Přepětový ochranný obvod "crowbar"	61

Obrázek 11-1 Blokové ztvárnění uspořádání komponent během testování.....	62
Obrázek 11-2 Ukázka z testování větrné turbíny v reálném provozu.....	63
Obrázek 11-3 Ukázka kolísání rychlosti větru v m/s (Z vytvořené mobilní aplikace)	64
Obrázek 11-4 Závislost výkonu a otáček větrné elektrárny na rychlosti větru	64
Obrázek 11-5 Množství vyrobeného elektrického výkonu během testovacího provozu	65
Obrázek 11-6 Četnosti rychlosti větru ze dne 16.5.....	65
Obrázek 13-1 Větrná elektrárna z bakalářské práce [39].....	67

Seznam tabulek

Tabulka 1 Beaufortova stupnice rychlosti větru [1]	10
Tabulka 2 Hodnoty teoretického výkonu, teoreticky maximálně možného odebíraného výkonu a reálně vyrobitelného elektrické výkonu	12
Tabulka 3 Odporové koeficienty vybraných tvarů [6].....	13
Tabulka 4 Naměřené hodnoty napětí, proudu, výkonu a otáček při testování generátoru s různou zátěží	48
Tabulka 5 Vypočtené účinnosti generátoru při různém zatížení	49
Tabulka 6 Naměřené hodnoty při testování větrné turbíny pomocí ventilátoru	62
Tabulka 7 Souhrnné náklady na stavbu domácí mikro větrné elektrárny.....	66
Tabulka 8 Porovnání parametrů VE z bakalářské práce a VE z diplomové práce ...	67

1 ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá výrobou elektrické energie pomocí energie větru v domácích podmínkách. Vzhledem k stále rostoucí potřebě omezovat výrobu elektrické energie z fosilních paliv a přestupu k výrobě elektrické energie z obnovitelných zdrojů, je nutné hledat nejrůznější možnosti. Větrná energetika je jednou z nich, neboť skvěle doplňuje například výrobu elektrické energie z fotovoltaických panelů.

V rámci diplomové práce je řešen návrh větrné turbíny, návrh generátoru a konstrukce MPPT měniče.

Na úvod je uvedena nezbytná teorie o vzniku větru, jeho proudění a vlivu okolí na rychlost proudění větru v místě pozorování. Dále je pojednáno o výkonu větru a vzniku odporové a vztlakové síly. Jsou uvedeny druhy používaných větrných turbín a jejich vlastnosti. Jelikož je generátor větrné turbíny vyroben pomocí 3D tisku, je krátce pojednáno o materiálech používaných pro 3D tisk.

Kapitola číslo 8 pojednává o zvolené větrné turbíně typu LENZ2. Jedná se o vertikální větrnou turbínu pracující na principu vztlakové a odporové síly. Tato větrná turbína je zvolena z důvodu, že je schopna provozu při nižších rychlostech větru. Kapitola dále popisuje způsob výroby větrné turbíny, lopatek a uvedena je rovněž konstrukce osy a náboje větrné turbíny. Pro monitorování otáček je použit senzor otáček s magnetem a detektorem magnetického pole. Kvůli možnosti odstavení větrné turbíny je použita kotoučová brzda s ovládním pomocí servomotoru. Pro zvýšení otáček na generátoru je použit řetězový převod.

Pro přeměnu mechanické energie na energii elektrickou je použit synchronní třífázový generátor vlastní výroby s permanentními magnety. Je uveden návrh vinutí. Hodnota magnetické indukce permanentních magnetů byla stanovena pomocí magnetostatické simulace. Pro ověření návrhu je provedena simulace v programu ANSYS MAXWELL. Generátor je otestován a výsledky z měření jsou uvedeny v kapitole 9.

Jelikož generátor generuje střídavé napětí a MPPT měnič pracuje se stejnosměrným napětím, je nutné generované napětí usměrnit. K tomu je použit diodový trojfázový usměrňovač. Popis hardware a software synchronního MPPT měniče je uveden v kapitole 10.

Takto sestavená větrná elektrárna je testována nejprve pomocí stabilního zdroje proudění, poté v reálném provozu. Dále jsou uvedeny náklady na stavbu takovéto větrné elektrárny a je provedeno porovnání s větrnou elektrárnou vyrobenou v rámci bakalářské práce.

2 VÍTR A PROUDĚNÍ VZDUCHU

2.1 Vznik větru

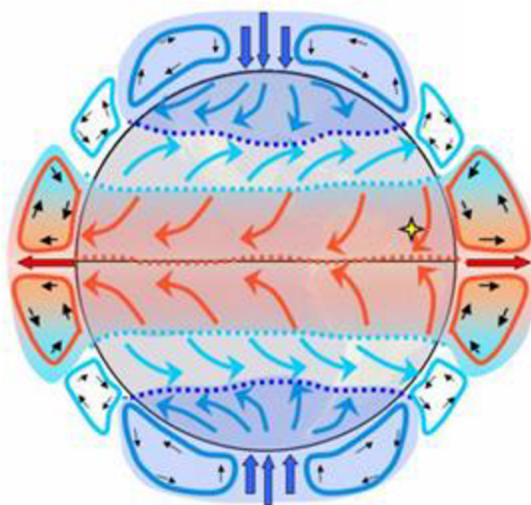
Vítr je pohyb vzduchu způsobený rozdíly hodnot atmosférického tlaku, které jsou důsledky různé teploty a různých hustot vzduchu. Proudění vzduchu probíhá z místa s větší hodnotou atmosférického tlaku do místa s menší hodnotou tlaku vzduchu. Rychlost větru je pak závislá na rozdílu velikosti hodnot tlaku v různých pásmech. Ve zjednodušeném modelu proudí teplý vzduch z rovníku směrem k pólům. Na jeho místo proudí naopak studený vzduch z pólů. Výsledný směr větru je ovlivněn rovněž rotací Země kolem své osy. Velikost a směr větru je poté výslednicí rozdílu tlaků vzduchu a rotace zeměkoule.

Protože zemská osa je odkloněna o $23,5^\circ$ od roviny, ve které zeměkoule obíhá slunce, mění se v průběhu roku množství tepla dopadajícího na dané místo povrchu a tím i teplota a hustota vzduchu a jeho proudění. Přesto nejde, zejména u směru větru, o nahodilé změny. Na zeměkouli lze označit dvě pásma vysokého tlaku, ležící mezi 30° a 40° severní i jižní šířky. Kolem rovníku se nachází pásmo nízkého tlaku. (Obrázek 2-1).

V tropických oblastech převládá převážně východní směr větru. V pásmech mezi 40° a 60° převládá převážně západní směr větru. Ve vyšších vrstvách atmosféry je směr proudění opačný, tedy do míst vysokého tlaku a směr větru se vychyluje obráceně. Kolem rovníků pak vzniká rovníkový pás bezvětří.

Větry v blízkosti povrchu, ve výšce do 150 m, které jsou zajímavé z důvodu možného energetického využití, jsou výrazně ovlivněny členitostí povrchu, která může významným způsobem působit na proudění vzduchu.

Nejdůležitějším údajem při využívání energie větru je jeho rychlost, protože má největší vliv na výkon větru. Údaje o směru větru jsou významné při výběru vhodných lokalit. Není výhodné umisťovat větrnou elektrárnu na místo, kde se ve směru působení větru nachází nějaká překážka [1] [39].



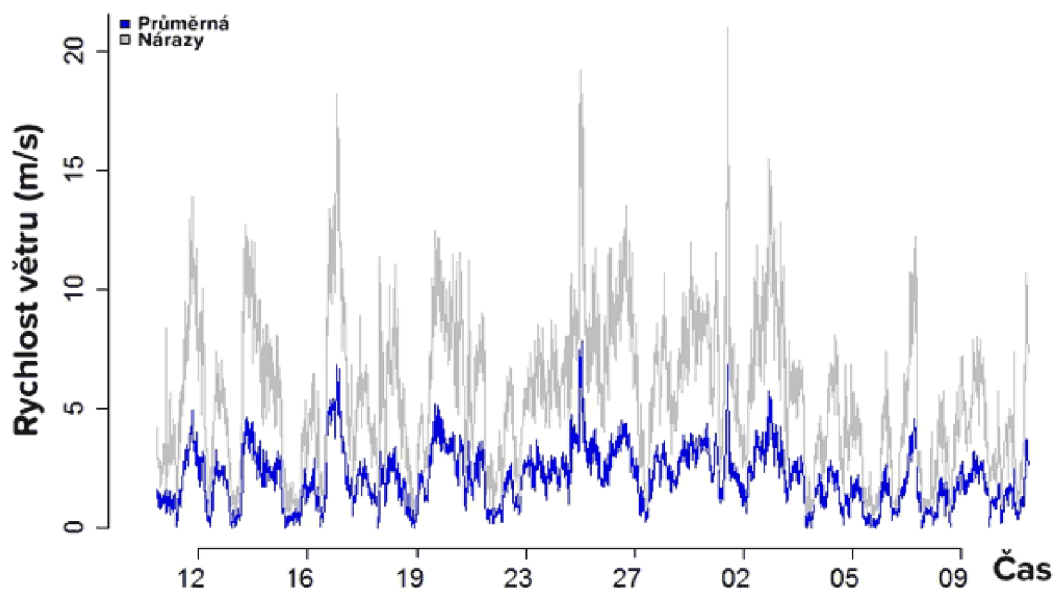
Obrázek 2-1 Globální cirkulace atmosféry [2]

2.2 Rychlost větru

Rychlost větru má rozhodující vliv na výkonnost větru. Rychlost větru se stále mění, a to nejen v rozmezí několika hodin, ale v daleko kratších intervalech, během několika sekund. Jelikož je rychlost větru významně ovlivňována reliéfem povrchu, měří se standardně ve výšce 10 m nad povrchem.

Měření rychlosti větru se provádí například pomocí mističkového anemometru. Anemometr se skládá ze tří polokulových misek na krátkých ramenech, která se otáčejí kolem svislé osy. Při tomto uspořádání je závislost otáček anemometru a rychlosti vzduchu téměř lineární.

Při měření rychlosti větru nelze brát zřetel pouze na průměrnou naměřenou hodnotu. Během měření dochází k poryvům větru, které mohou dosahovat i 25 % rozdílu oproti průměrné hodnotě rychlosti větru. Větrné poryvy, jejichž rychlost je extrémně, tj. více než 1,75krát větší, než je průměrná rychlost mají většinou krátké trvání. Potřebují přibližně 2-3 sekundy na vzestup rychlosti a 9-15 sekund k odeznění. Nejvyšší rychlosti dosahují špičkové poryvy větru. Ty mohou dosahovat velmi vysokých hodnot (50 m/s a více). Takto velké poryvy větru nelze většinou efektivně energeticky využít. Jsou však významné tím, že mohou způsobit škody budovám či větrným strojům [1] [3].



Obrázek 2-2 Ukázka kolísání rychlosti větru v čase [3]

Pro určování rychlosti větru byla zavedena Beaufortova stupnice rychlosti větru (Tabulka 1). Rychlost větru se z ní odhaduje na základě běžně pozorovatelných jevů, jako je pohyb listů, stébel trávy či vodní hladiny. Tato stupnice slouží především pro odhad, jelikož rychlost větru je na povrchu země poměrně nárazová.

Tabulka 1 Beaufortova stupnice rychlosti větru [1]

Stupeň	Rychlost větru		Slovy	Znaky na souši
	m/s	km/h		
0	0,0 - 0,2	0 - 1	bezvětrí	Kouř stoupá svisle vzhůru.
1	0,3 - 1,5	1 - 5	vánek	Kouř už nestoupá úplně svisle, ale korouhev nereaguje.
2	1,6 - 3,3	6 - 11	větrík	Vítr je cítit ve tváři, listí šelestí, korouhev se pohybuje.
3	3,4 - 5,4	12 - 19	slabý vítr	Listy a větvičky v pohybu, vítr napíná prapory.
4	5,5 - 7,9	20 - 28	mírný vítr	Vítr zvedá prach a papíry, pohybuje větvičkami.
5	8,0 - 11,0	29 - 38	čerstvý vítr	Hýbe listnatými keři, malé stromky se ohýbají.
6	10,8 - 13,8	39 - 49	silný vítr	Pohybuje silnějšími větvemi, telegrafní dráty sviští, používání deštníku se stává obtížným.
7	13,9 - 17,1	50 - 61	mírný vichr	Pohybuje celými stromy, chůze proti větru se stává obtížná.
8	17,2 - 20,7	62 - 74	čerstvý vichr	Láme větve, vzpřímená chůze proti větru je již nemožná.
9	20,8 - 24,4	75 - 88	silná vichr	Vítr strhává komíny a shazuje tašky ze střech.
10	24,5 - 28,4	89 - 102	plný vichr	Vítr vyvrací stromy a ničí domy.
11	28,5 - 32,6	103 - 117	vichřice	Rozsáhlé zpustošení zasažené oblasti.
12	32,7 +	118 +	orkán	Ničivé účinky, vítr odnáší domy a pohybuje těžkými hmotami.

2.3 Výkon větru

Vítr protékající plochou má při úplném zbrzdění teoretický výkon (P_t) daný vztahem [1]:

$$P_t = \frac{1}{2} * \rho * S * v^3 \quad (2.1)$$

Ani nejmodernější větrné motory nemohou teoretický výkon převést stoprocentně. Protože vzduch za větrným motorem musí proudit dál určitou rychlostí, není možno vítr zcela zbrzdit, takže jistá část kinetické energie v něm zůstane zachována. Poměrem rychlostí před a za větrným motorem je možné stanovit optimum, kdy dojde k odebrání maximální energie větrným motorem. Maximální energetický výtěžek z proudění vzduchu nastává, když se rychlost proudění vzduchu za větrným motorem sníží o 59,26 %. Tato hodnota se nazývá Betzův koeficient (b_k).

K odebrání maximální energie by docházelo v případě, že by větrný motor měl ideální lopatky pro projektovanou rychlost. Prakticky není možné takové lopatky zkonstruovat. Nejlepší větrné motory jsou schopny odebrat přibližně 45 % energie větru, (μ_v).

Teoreticky maximální odebíraný výkon větrného motoru (P_{bk}) je dán rovnicí:

$$P_{bk} = \frac{1}{2} * b_k * \rho * S * v^3 \quad (2.2)$$

Dále je nutné uvažovat účinnost převodu rotační energie větrného motoru na generátor a účinnost přeměny kinetické energie na elektrickou v generátoru. Reálná účinnost tohoto převodu (μ_p) může být 72 % [3].

Celková účinnost přeměny energie větru na energii elektrickou se rovná:

$$\mu_c = \mu_p * \mu_v \quad (2.3)$$

$$\mu_c = 0,72 * 0,4 = 0,288 [-]$$

Reálný vyrobený elektrický výkon (P_r) odpovídá:

$$P_r = \frac{1}{2} * \mu_c * \rho * S * v^3 \quad (2.4)$$

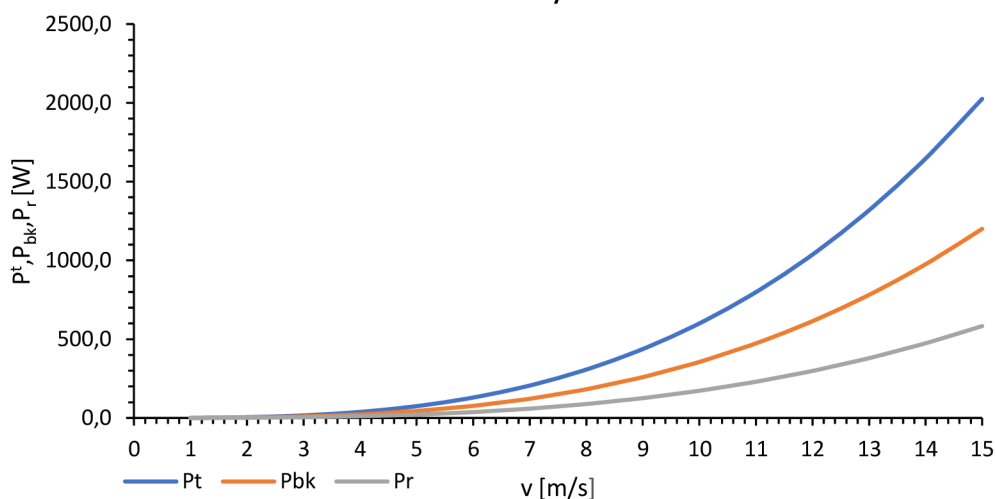
Tabulka 2 Hodnoty teoretického výkonu, teoreticky maximálně možného odebíraného výkonu a reálně vyrobitelného elektrické výkonu

v [m/s]	P_t [W]	P_{bk} [W]	P_r [W]
1	0,6	0,4	0,2
2	4,8	2,8	1,4
3	16,2	9,6	4,7
4	38,4	22,8	11,1
5	75,0	44,4	21,6
6	129,6	76,8	37,3
7	205,8	122,0	59,3
8	307,2	182,0	88,5
9	437,4	259,2	126,0
10	600,0	355,6	172,8
11	798,6	473,3	230,0
12	1036,8	614,4	298,6
13	1318,2	781,2	379,6
14	1646,4	975,7	474,2
15	2025,0	1200,0	583,2

$$\rho = 1,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$S = 1 \text{ [m}^2\text{]}$$

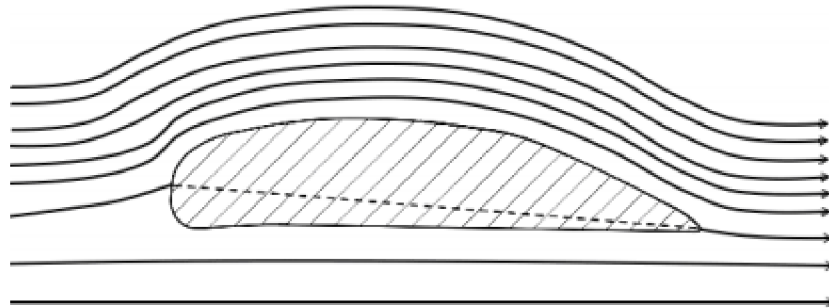
Grafické porovnání teoretického, maximálního a elektrického výkonu



Obrázek 2-3 Grafická závislost teoretického výkonu větru, maximálně dosažitelného výkonu větrného motoru a reálně vyrobitelného elektrického výkonu větrné elektrárny na rychlosti větru

2.4 Vztlaková a odporová síla

Vztlaková síla vzniká na lopatkách se speciálním aerodynamickým profilem (Obrázek 2-4). Díky tvaru a úhlu náběhu dochází nad tímto profilem k houstnutí proudnic, což má za následek větší rychlost proudění vzduchu a pokles tlaku. Naproti tomu pod profilem nastává opačný jev. Rozdíl hodnot takto vzniklých tlaků vyvolává vztlakovou sílu, která působí ve směru z místa s větší hodnotou tlaku do místa s menší hodnotou tlaku. Tyto zákonitosti vycházejí z Bernoulliho rovnice [5].



Obrázek 2-4 Proudění vzduchu kolem křídla [3]

Velikost odporové síly vychází ze zákona zachování kinetické energie. Proudící vzduch naráží na čelní stěnu tělesa, dochází k přeměně jeho kinetické energie v tlakovou potenciální energii, což se projeví zvýšením tlaku. Tato změna tlaku vyvolá na těleso odporovou sílu (F_r) ve směru proudění vzduchu. [5].

$$F_r = \frac{1}{2} * C_p * S * v^2 \quad (2.5)$$

Tabulka 3 Odporové koeficienty vybraných tvarů [6]

Tvar	Součinitel aerodynamického odporu
Dutá polokoule proti proudu	1,4
Rovinná deska kolmo k proudu	1,2
Koule	0,5
Dutá polokoule po proudu	0,4
Kapka	0,06

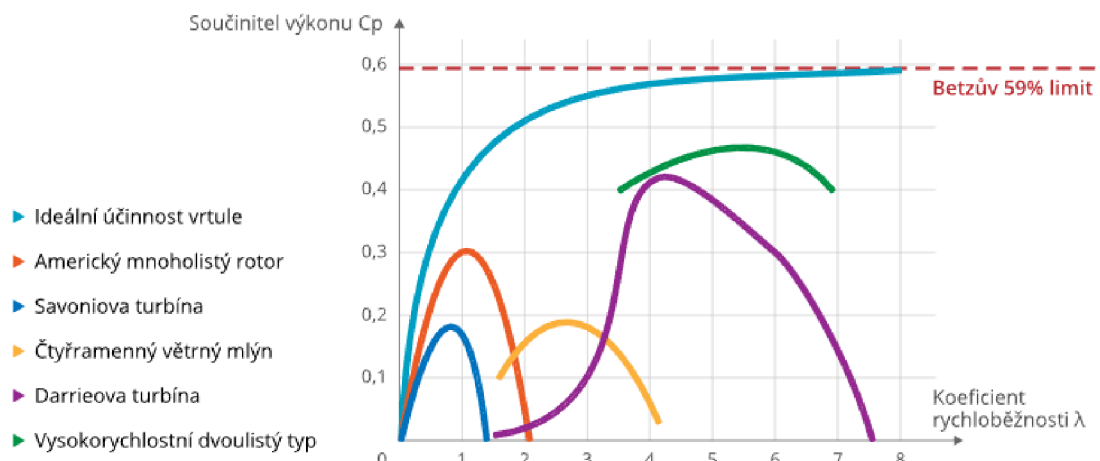
Výsledná síla vyvolaná prouděním na tělese je výslednicí síly vztlakové a odporové.

2.5 Koeficient rychloběžnosti

Koeficient rychloběžnosti udává poměr mezi rychlostí proudění větru (v_v) a obvodové rychlosti lopatek větrné turbíny (v_t).

$$\lambda = \frac{v_t}{v_v} = \frac{2 \times \pi \times D \times n}{v_v \times 60} \quad (2.6)$$

Koeficient rychloběžnosti je důležitý pro stanovení pracovních otáček větrné turbíny. Ze závislosti celkové účinnosti větrné turbíny (C_p) na koeficientu rychloběžnosti je patrné, že pro optimální využití větrné energie je nutné provozovat každý typ větrné turbíny při odlišných otáčkách (Obrázek 2-5). Koeficient rychloběžnosti rovněž udává maximální otáčky větrné turbíny bez zatížení. Obecně platí, že čím větší sledovanou plochu zabírají lopatky větrné turbíny, tím je optimální koeficient rychloběžnosti menší. Větrné turbíny s velkými lopatkami, nebo s velkým počtem malých lopatek brání proudění vzduchu více než lopatky, které zabírají menší plochu. Při dosažení určitých otáček začne plocha lopatek omezovat proudění do té míry, až rychlost větru za větrnou turbínou poklesne pod optimální hodnotu a účinnost odběru odebíraného výkonu začne klesat [7].



Obrázek 2-5 Závislost součinitele výkonosti na koeficientu rychloběžnosti pro vybrané větrné turbíny [7]

3 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO FDM 3D TISK

S rostoucí oblibou a dostupností 3D tisku roste i počet dostupných materiálů. Nejčastěji používané materiály jsou PLA, ABS a PETG. Každý výrobce tiskových materiálů však pracuje na zkvalitnění svých produktů různou modifikací, proto i základní materiály od různých výrobců mívají jiné vlastnosti či jiné podmínky tisku. Uvedené vlastnosti jednotlivých materiálů se tedy mohou lišit výrobce od výrobce. Obecné vlastnosti bývají většinou stejné. PLA, ABS a PETG jsou méně náročné na tisk, levnější, ale jejich mechanické a tepelné vlastnosti jsou horší než ostatní uvedené materiály. Obecně platí, že čím lepší teplotní odolnost, tím vyšší náročnost na tisk a vyšší cena materiálu [8].

PLA (Polyactic acid)

Jedná se o nejpoužívanější materiál pro 3D tisk. PLA má relativně nízkou teplotu tání kolem 175 °C, díky čemuž se velmi snadno tiskne i na neprofesionálních 3D tiskárnách. Je to velmi tvrdý, avšak křehký materiál. Materiál má však velmi malou teplotní odolnost, ztrácí svou mechanickou pevnost kolem 60 °C. PLA má i nízkou odolnost proti UV záření, proto ho není vhodné používat ve venkovním prostředí [9].

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)

ABS je velmi pevný a všestranně používaný materiál s velmi dobrou tepelnou odolností až do 98 °C. Tepelná odolnost však souvisí s nutnou teplotou trysky při tisku, která je výrazně vyšší než u PLA (255 °C). Tento materiál je i náročnější na tisk, neboť má velmi vysokou tepelnou roztažnost, díky čemuž se výtisky kroucí a mají tendenci se odlepovat od podložky. Materiál není příliš vhodný pro rozměrné díly. Pro úspěšný tisk je nutná vyhřívaná podložka a zakrytovaná tiskárna. Při tisku se uvolňuje nepříjemný zápach. Materiál je UV odolný a vhodný pro použití ve venkovním prostředí [10].

PETG (Polyethylen terephthalate glycol)

Materiál se skládá z běžného PET modifikovaného glykolem. Tato modifikace způsobuje menší křehkost materiálu a snadnější tisk. PETG má vyšší tepelnou odolnost než PLA, ale menší než ABS. Jedná se o poměrně houževnatý materiál. Tento materiál nalezne použití i v exteriéru, je UV odolný. Nevýhodou je jeho „stringování“ při tisku, během přejezdů tiskové hlavy tvoří drobné vlásečnice [11].

PC (Polycarbonate)

Tento materiál je vhodný pro vysoce odolné výtisky. Polykarbonát disponuje vysokou houževnatostí, pevností a mechanickou i tepelnou odolností (až do 113 °C). V porovnání s ABS se modely méně kroucí a jednotlivé vrstvy drží více při sobě i během teplotního namáhání. Materiál je velmi odolný vůči otěru, je tedy využíván pro teplotně namáhané mechanické díly jako jsou například ozubená kola převodovek. PC je však náročný na tisk, především na vysoké teploty trysky (275 °C) a podložky (110 °C). Na nejobyčejnějších tiskárnách nelze tyto teploty dosáhnout [12].

PA (Polyamid)

Polyamid neboli Nylon je materiál hojně používaný pro konstrukční díly. Má vynikající mechanickou i tepelnou odolnost (135 °C), je odolný proti nárazům a opotřebením. Materiál je však obtížně tisknutelný, neboť vyžaduje vysoké teploty tisku. Nylon je navlhavý, proto se filament musí před tiskem vysoušet [13].

Kompozitní materiály

Jedná se o výše uvedené materiály obohacené o příměsi, které zlepšují mechanické i tepelné odolnosti základních materiálů. Příměsí může být například uhlík či kevlar, které jsou v základním materiálu obsažené v podobě prachu či drobných vláken. Pro tisk kompozitních materiálů je nutné použít tvrzené trysky, neboť kompozitní materiál je silně abrazivní. Tisk kompozitních materiálů vyžaduje také vyšší teploty během tisku. Nevýhodou této skupiny materiálů je i vyšší cena [14].

4 DRUHY VĚTRNÝCH MOTORŮ

Jedním z parametrů větrných motorů je aerodynamický princip fungování. Dle tohoto parametru se větrné motory dělí na odporové a vztlakové. Reálné větrné elektrárny není možné rozdělit na čistě odporové či vztlakové, vždy používají kombinaci obou uvedených sil.

4.1 Odporové větrné motory

Odporové větrné motory pracují na principu aerodynamického odporu. Na ploše nastavené proti proudění vzduchu se vytváří síla, která se přetváří na rotační pohyb rotoru.

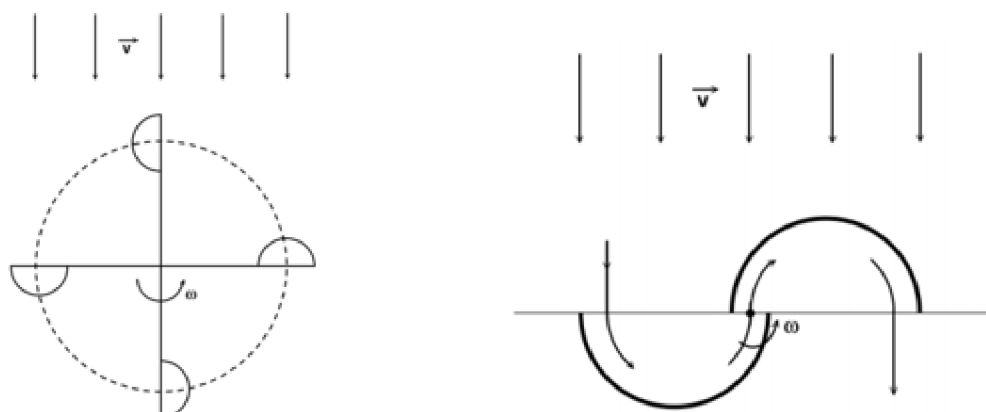
Prvním zástupcem této kategorie je mističkový anemometr (Obrázek 4-1). Na obvodu anemometru jsou umístěny 4 lopatky ve tvaru duté polokoule, které v orientaci dutinou proti proudění větru, kladou aerodynamický odpor. Tento odpor je přibližně 3,5krát větší než odpor mističky orientované obráceně. Tímto způsobem vzniká síla, která anemometr roztáčí [3] [39].

Mističkový anemometr slouží především k měření rychlosti větru přepočtem otáček na rychlost větru.

Dalším zástupcem této kategorie je Savoniův větrný motor. Tento motor se skládá ze dvou válcových dutin. Válcové dutiny jsou vzájemně propojeny, takže vítr působí na obě plochy současně (Obrázek 4-1). Tento větrný motor rotuje rovněž ve svislé ose.

Výhodou tohoto větrného motoru je malá rychlost větru potřebná k roztočení. Motor se rozbíhá od nuly. Savoniův motor lze díky tomu využít na většině míst. I když dochází k roztočení větrného motoru již při velmi malých rychlostech, je nutné stále myslet na vzorce uvedené v předchozí kapitole. To, že se větrný motor točí, samo o sobě neznamená, že generuje nějaký využitelný výkon.

Savoniův motor dosahuje malé účinnosti (max 20 %). Existuje značné množství modifikací Savoniova motoru, které jsou schopné pracovat i při vyšších rychlostech větru, takže jejich užitečný výkon roste [3] [39].



Obrázek 4-1 Anemometr a Savoniův rotor [3]

4.2 Větrné motory s vertikální osou otáčení (VAWT)

Předním představitelem této kategorie je Darrieusovův motor a jeho modifikace. Ačkoliv existuje vícero konstrukcí, princip fungování je pro všechny stejný. Lopatky rotoru tvoří aerodynamická křídla umístěná symetricky kolem osy otáčení. VVM pracují nezávisle na směru proudění větru. Při pohybu rotoru se křídla pohybují po kruhové trajektorii. Tento pohyb je výslednicí vztahové síly, ale také aerodynamického odporu křídla. Darrieusovův rotor se řadí do kategorie rychloběžných turbín.

Výhodou těchto větrných motorů je, že nevyžadují žádný mechanismus natáčení.

Rotory mají účinnost typicky 30 až 40 %. Díky tomu, že se jedná o rychloběžný rotor, jsou kladeny velké nároky na výběr materiálů a výrobu, což platí pro všechny rychloběžné rotory [15] [39].

VAWT jsou hojně používané pro konstrukci mikro-větrných elektráren. Díky tomu, že není nutné sledovat směr větru, mají tyto turbíny menší konstrukční nároky než větrné motory s horizontální osou otáčení. Elektrický generátor je umístěn v patě větrného motoru. Na rozdíl od VM s horizontální osou otáčení se tedy generátor nepohybuje a není nutné řešit přenos velkých elektrických výkonů přes flexibilní spoj, například komutátor.



Obrázek 4-2 VAWT domácí výroby autor Michael Klements [16]

4.3 Větrné motory s horizontální osou otáčení (HAWT)

Mezi tyto motory patří rychloběžné listové turbíny a větrná kola. HAWT mají rovinu otáčení kolmou na směr proudění větru. Aby docházelo k ideálnímu působení větru proti lopatkám, musí mít HAWT mechanismus natáčení. Natáčení je realizováno působením větru, či řízeno elektronicky. S rostoucí plochou lopatek vzhledem k ploše opsané lopatkami klesá rychlost lopatek, a tedy i otáčky větrné turbíny.

Nejstarším konstrukčním typem jsou větrná kola. Tato kola mají větší počet lopatek, od několika jednotek po několik desítek. Jedná se tedy o pomaloběžné motory. Více lopatkovým motorům se přezdívá westernová kola (Obrázek 4-3). Westernová kola pracují za malých otáček, dosahují však vysokého kroutícího momentu. Westernová kola mohou využít cca 20 až 30 % energie větru [39].



Obrázek 4-3 Větrné "westernové" kolo [17]

Druhým typem jsou rychloběžné listové HAWT (Obrázek 4-4). Tyto motory mají méně listů než westernová kola, typicky tři nebo čtyři listy. Oproti westernovým kolům mají vyšší účinnost (až 45 %), ale i vyšší rozběhovou rychlost (3 až 4 m/s). Rychloběžné HAWT se hojně používají při konstrukci větrných mikro-elektřáren i výkonných konvenčních větrných elektřáren. Jsou vhodné pro místa s vyšší rychlostí větru. [39]



Obrázek 4-4 Diy HAWT větrná elektrárna od autora Jamese Biggara [18]

5 GENERÁTORY

Generátory jsou elektrické točivé stroje, které přeměňují mechanickou energii na elektrickou. Generátory využívají Lenzova zákona o indukci elektrického napětí generované změnou magnetického toku v čase daného vztahem:

$$U_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (6.1)$$

Generátory se skládají z nehybného statoru a pohyblivého rotoru. Elektrické napětí se indukuje na cívkách, které jsou nejčastěji umístěny na statoru. Dle typu generovaného napětí se generátory rozdělují na stejnosměrná dynama, nebo střídavé alternátory [23]. Zdrojem magnetického toku může být elektromagnet, nebo permanentní magnet. Elektromagnetické buzení se hojně využívá u větších alternátorů. S rozvojem magnetických materiálů jako neodymové magnety, se začaly permanentní magnety stále častěji využívat. Dnes se běžně používají v generátorech malých elektrických výkonů používaných například v mikrozdrojích.

5.1 Druhy alternátorů

Dle počtu fází se alternátory rozdělují na jednofázové nebo trojfázové.

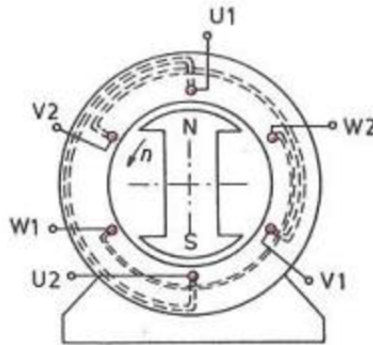
Dle závislosti výstupní frekvence na otáčkách se alternátory rozdělují na synchronní a asynchronní. Synchronní alternátory mají shodné otáčky rotoru s frekvencí výstupního napětí. Díky své konstrukci musí asynchronní alternátor dosahovat vyšších otáček rotoru, než je frekvence sítě. V opačném případě by fungoval jako spotřebič energie, nikoliv generátor.

Alternátory se dále dělí dle konstrukce rotoru, ten může být hladký, nebo s vyniklými póly. Hladký rotor se používá v turboalternátorech, které se obecně provozují při vysokých otáčkách (tisíce). Turboalternátory se používají ve spojení s parní turbínou. Díky tomu, že dosahují vysokých otáček, konstruují se tyto alternátory s větší délkou než šířkou. Turboalternátory mají typicky dva póly. Oproti tomu rotor s vyniklými póly se využívá v hydroalternátorech. Hydroalternátory se provozují v řádu stovek otáček za minutu, používají se typicky ve vodních elektrárnách. Tyto alternátory jsou širší než delší. Většinou jsou čtyř až šestipólové.

Dle konstrukce se alternátory rozdělují na radiální a axiální. Radiální alternátory se konstruují s válcovým rotorem, kolem kterého se nachází stator rovněž ve válcovém tvaru. Axiální alternátory jsou v základní konstrukci tvořeny deskovým rotorem a deskovým státorem [24][25].

5.2 Trojfázové soustavy

Trojfázová soustava má tři stejně velká napětí sinusového průběhu, která jsou vzájemně posunuta o 120° , tedy o $1/3$ periody. Taková trojfázová napětí vznikají v trojfázových generátorech, jejichž základní uspořádání vypadá takto:



Obrázek 5-1 Základní uspořádání třífázového generátoru [26]

Generátor se skládá ze dvou částí. První částí je stator, který je nehybný. Uvnitř statoru jsou drážky, v kterých jsou uloženy tři vinutí cívek. Začátky vinutí jsou označeny U1, V1, W1. Konce vinutí jsou označeny U2, V2, W2. Cívky ve statoru jsou vzájemně posunuty o 120° .

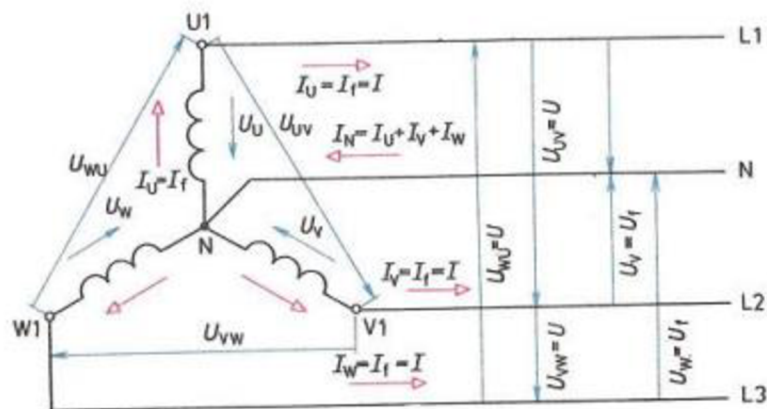
Druhou částí generátoru je rotor. V tomto případě je rotor dvoupólový. Rotor obsahuje budící vinutí, kterým protéká stejnosměrný proud. Protékající proud vytváří ve svém okolí magnetické pole, které se společně s rotorem otáčí, čímž vyvolává indukci střídavého elektrického napětí na cívkách statoru. V trojfázovém generátoru se indukují tři samostatná napětí U_u , U_v a U_w . Algebraický součet indukovaných napětí se v kterémkoli okamžiku rovná nule.

Existují dva druhy možných zapojení cívek třífázových generátorů, zapojení do hvězdy a zapojení do trojúhelníka [26].

Zapojení do hvězdy

Spojení fází do hvězdy se označuje Y. Vzniká spojením fází do jednoho bodu, tzv. uzlu. Cívky se spojují buď na začátku vinutí, nebo na konci.

Každá fáze generátoru má své fázové napětí U_u , U_v a U_w , které se měří mezi začátkem fáze a společným uzlem. Ze společného uzlu může být vytažen nulový vodič. Mezi začátky jednotlivých fází se měří sdružené napětí, které se značí U_{uv} , U_{vw} a U_{wu} . Sdružené napětí je dáno geometrickým součtem napětí dvou fází. Sdružené napětí se značí U_s , fázové napětí se značí U_f .



Obrázek 5-2 Zapojení cívek generátoru do hvězdy [26]

Pro sdružené napětí U_s platí:

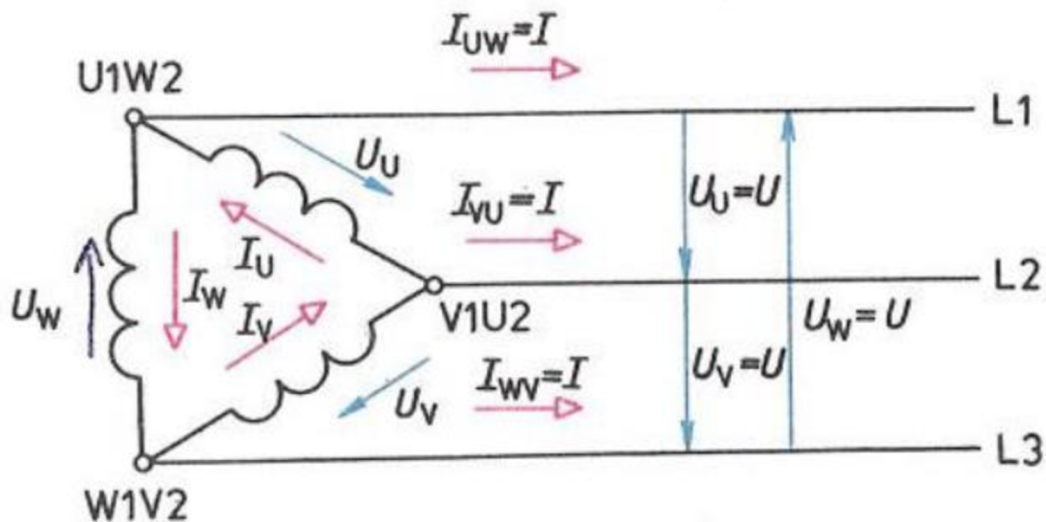
$$U_s = \sqrt{3} \times U_f \quad (6.2)$$

Sdružený proud I poté odpovídá fázovému proudu I_f .

Zapojení do trojúhelníka

Při spojení trojfázového vinutí do trojúhelníka je vždy jeden konec jedné fáze spojen se začátkem fáze následující, takže vinutí tvoří uzavřený obvod. Toto zapojení neobsahuje nulový vodič, rozvodná síť je tedy tří vodičová. Mezi fázovými vodiči je vždy napětí jedné fáze generátoru, takže se fázové napětí U_F rovná síťovému U i sdruženému napětí U_S .

Fázemi generátoru prochází při zatížení fázový proud I_u , I_v a I_w , u každé fáze je kladný směr proudu od konce fáze k jejímu začátku. Fázový vodič je vždy připojen ke společné svorce dvou fází, proto je síťový proud I proud sdružený I_S . Jeho kladný směr je od svorky generátoru ke spotřebiči (Obrázek 5-3).



Obrázek 5-3 Zapojení generátoru do trojúhelníka [26]

Sdružený, a tedy i síťový proud je dán geometrickým součtem proudů dvou fází. Z toho vyplývá:

$$I = I_F \times \sqrt{3} \quad (6.3)$$

5.3 Permanentní magnety

Permanentní magnety se vyrábějí z magneticky tvrdých feromagnetických materiálů s širokou hysterezní smyčkou. Mezi běžně používané materiály patří následující čtyři skupiny materiálů.

Ferity

Ferity patří mezi nejdostupnější materiály permanentních magnetů. Ferity jsou obvykle elektricky nevodivé. Jsou tvořeny sintrací oxidu železa, a oxidy stroncia či oxidy barya. Ferity jsou tvrdé a křehké. Mohou být izotropní i anizotropní. Mohou dosahovat maximální provozní teploty až 250 °C. Jejich výhodou je rovněž odolnost proti korozi.

$$B_r = 0,2 - 0,42 \text{ T}$$

$$H_c = 125 - 235 \text{ kA/m}$$

AlNiCo

Tyto magnety jsou vyráběny sléváním nebo spékáním ze směsí hliníku, niklu, kobaltu, železa, mědi a titanu. Magnetované mohou být pouze v axiálním směru. AlNiCo magnety mají vysokou remanenci, ale malou koercivitu. Jsou vysoce odolné vůči kyselinám a rozpouštědlům. Jejich pracovní teplota dosahuje až 500 °C, což je největší přednost těchto materiálů.

$$B_r = 0,6 - 1,16 \text{ T}$$

$$H_c = 40 - 120 \text{ kA/m}$$

SmCo

Samarium kobaltové magnety jsou prvním zástupcem magnetických materiálů ze vzácných zemin. Vyrábí se lisováním v magnetickém poli, následně se spékají. Jsou dostupné pouze v anizotropním provedení. Nevýhodou těchto materiálů je vysoký obsah kobaltu, což výrazně zvyšuje cenu. Mají vysokou provozní teplotu až 300 °C. Nejsou odolné vůči kyselinám a rozpouštědlům.

$$B_r = 0,9 - 1,10 \text{ T}$$

$$H_c = 680 - 835 \text{ kA/m}$$

Neodymové magnety

Jedná se o nejsilnější typ permanentních magnetů. Patří do skupiny magnetů obsahujících prvky vzácných zemin. Jejich hlavní složkou je železo s příměsí neodymu a boru. Při vysoké vlhkosti vzduchu oxidují, proto se v závěrečné fázi výroby galvanizují. Jejich nevýhodou je vysoká cena a malá teplotní odolnost, která klesá s rostoucí remanencí a koercivní silou. Nejsilnější neodymové magnety mají maximální provozní teplotu pouze 60 °C [27].

$$B_r = 1,08 - 1,51 \text{ T}$$

$$H_c = 796 - 939 \text{ kA/m}$$

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je navrhnout, sestavit a otestovat domácí mikro větrnou elektrárnu. Dílčím úkolem je navrhnout pomocí FEM simulace „core less“ třífázový generátor s permanentními magnety, který lze vyrobit pomocí 3D tiskárny. Generátor sestavit a otestovat.

Dále je cílem vyrobit MPPT měnič pro nabíjení Li-ion baterií, součástí kterého bude monitorovací systém pro měření rychlosti větru a otáček větrné turbíny. Požadavkem na MPPT měnič je možnost online monitoringu dat.

Cílem diplomové práce je navrhnout a zkonstruovat větrnou turbínu typu LENZ2.

Větrnou elektrárnu skládající se z výše uvedených komponent sestrojít a otestovat nejprve v simulovaných podmínkách, poté v reálném provozu.

7 KONCEPCE DOMÁCÍ MIKRO VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Domácí mikro větrná elektrárna, která je konstruována v rámci této diplomové práce, se skládá z vertikální větrné turbíny typu LENZ2, která pracuje převážně na odporovém principu. Z rotoru větrné turbíny je mechanický výkon přenášen na hřídel generátoru pomocí řetězového převodu. Převod je v poměru 1:13. Na větrné turbíně je umístěn senzor měření otáček, který využívá Hallovu sondu snímající přítomnost magnetu. Odstavení větrné turbíny je možné pomocí kotoučové brzdy, která je ovládána buď ručně, nebo pomocí servomotoru.

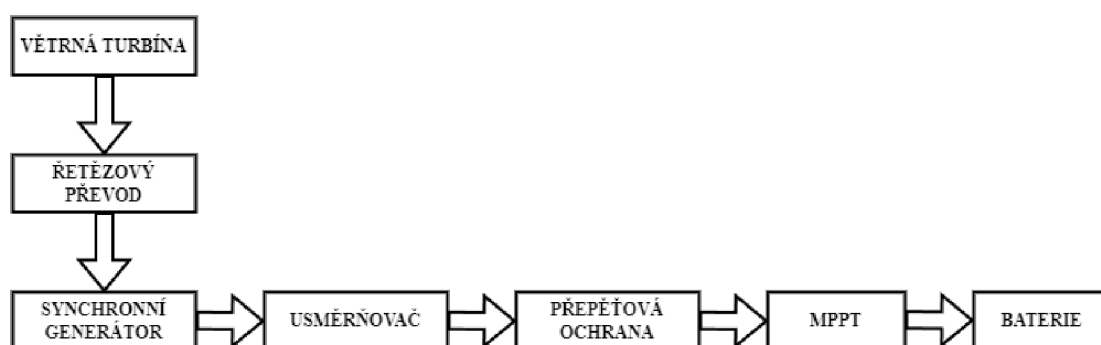
Mechanický výkon z větrné turbíny se mění na elektrický pomocí synchronního generátoru s permanentními magnety. Jedná se o třífázový více pólový generátor, jehož fáze jsou zapojeny do hvězdy. Toto zapojení je zvoleno kvůli požadavku generovat potřebné elektrické napětí už při nízkých otáčkách generátoru.

Jelikož generátor generuje střídavé elektrické napětí a MPPT pracuje se stejnosměrným, je nutné použít usměrňovač. Za vhodný je zvolen trojfázový šesticestný diodový usměrňovač. Pro co nejlepší vyhlazení elektrického napětí jsou použity kondenzátory s velkou kapacitou.

Pro ochranu vstupu MPPT z hlediska maximálního vstupního napětí 80 V je mezi usměrňovač a MPPT zapojena přepětová ochrana. Obvod přepětové ochrany se nazývá „crowbar“. Při překročení stanoveného napětí způsobí přepětová ochrana zkrat, který přepálí pojistku, čímž dojde k odpojení chráněného obvodu od zdroje.

Usměrněné elektrické napětí zpracovává MPPT měnič. MPPT měnič využívá synchronní step-down měnič. Umí tedy zpracovávat pouze vyšší napětí na vstupu na nižší napětí na baterii. MPPT měnič je založen na mikroprocesoru ESP32. Měnič disponuje možností online monitoringu dat pomocí IoT platformy Blynk IoT, přes kterou lze sledovat historická i aktuální data pomocí webového rozhraní či mobilní aplikace. MPPT měnič disponuje možností nabíjení Li-ion baterií algoritmem CC-CV.

Větrná elektrárna nabíjí Li-ion baterii. Pro testování je použita baterie složená z článků LGCS318650 v zapojení 4P na 4S. 4S konfigurace je nejnižší možná vzhledem k minimálnímu provoznímu napětí MPPT měniče.



Obrázek 7-1 Blokové schéma koncepce větrné elektrárny

8 KOSTRUKCE VĚTRNÉ TURBÍNY

Tato kapitola se zabývá jednotlivými částmi vertikální větrné elektrárny a možností jejich konstrukce v domácích podmínkách. Je kladen nárok na jednoduchost konstrukce. Zároveň je však brán zřetel na odolnost konstrukce vůči nepříznivým vlivům prostředí.

Před začátkem konstruování větrné elektrárny je nezbytné stanovit použití větrné elektrárny a požadovaný výkon. Dále je nezbytné obeznámit se s charakteristikou větru v místě, kde je plánováno větrnou elektrárnu provozovat.

Za vhodnou byla zvolena větrná turbína typu LENZ2. Jedná se vertikální větrnou turbínu s velmi jednoduchým tvarem lopatek. Větrná turbína pracuje především na odporovém principu, má tedy nízký koeficient rychloběžnosti.

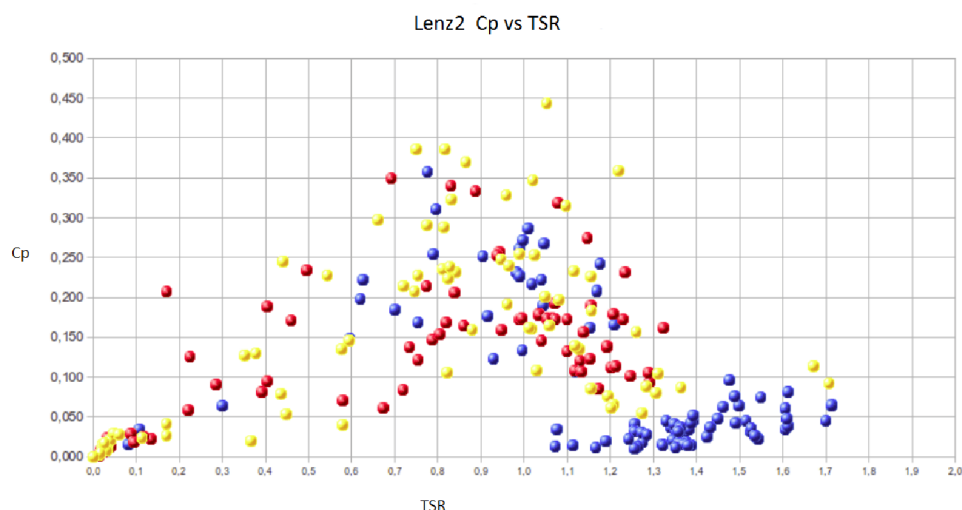
Pro větrnou turbínu jsou stanoveny následující rozměry:

Výška turbíny = 1,2 m

Průměr turbíny = 0,5 m

Koeficient rychloběžnosti a účinnost větrné turbíny

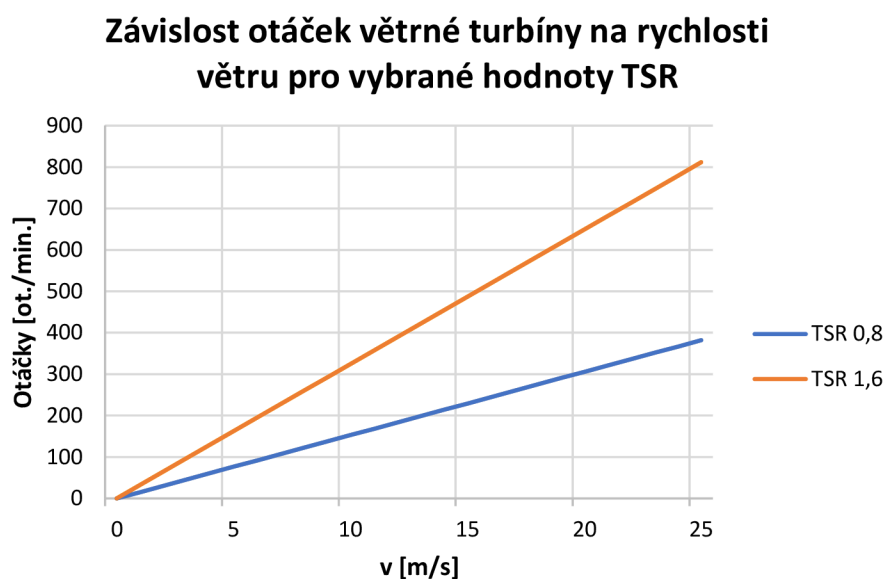
Koeficient rychloběžnosti je důležitý parametr pro stanovení optimálních otáček větrné turbíny. Pro určení koeficientu rychloběžnosti se vychází z reálných dat změřených za provozu již zkonstruovaných větrných elektráren stejného typu (Obrázek 8-1). Závislost koeficientu rychloběžnosti na celkové účinnosti však nemusí přesně odpovídat všem konstrukcím větrné turbíny stejného typu, neboť závisí na parametrech jako hmotnost lopatek, úhel náběhu lopatek nebo rozměr lopatek. Předpokladem je, že drobná změna jednotlivých uvedených parametrů zásadně neovlivní zkoumanou závislost, neboť princip fungování větrné turbíny zůstává stejný.



Obrázek 8-1 Závislost celkové účinnosti větrné elektrárny na koeficientu rychloběžnosti již zkonstruované větrné elektrárny typu Lenz2 [19]

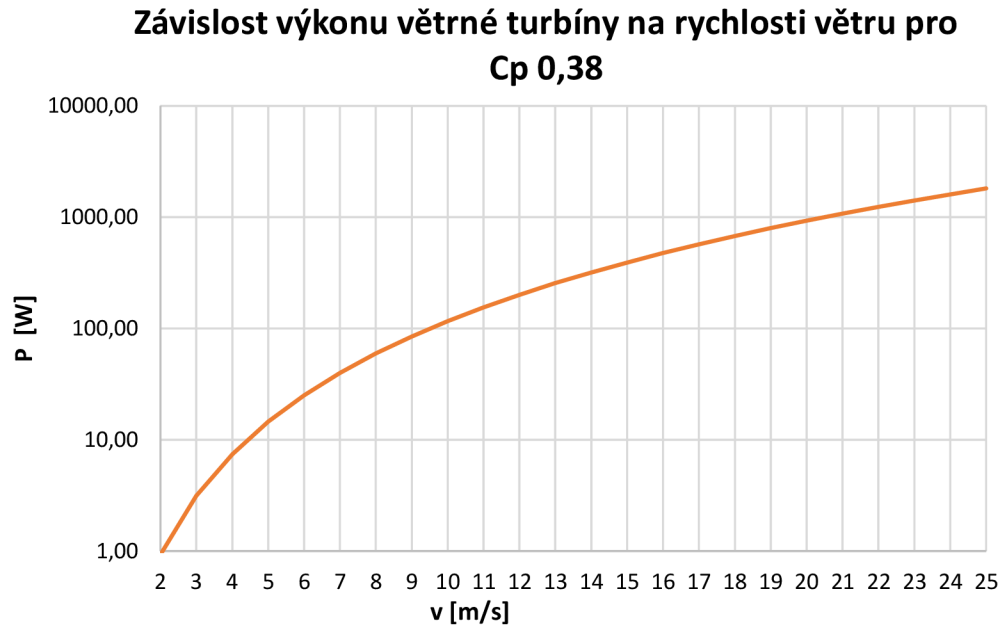
Z uvedeného grafického ztvárnění průběhu celkové účinnosti větrné turbíny (C_p) na koeficientu rychloběžnosti (TSR) jsou důležité dvě oblasti. První je hodnota TSR, při které má větrná turbína nejvyšší účinnost. Tomuto bodu odpovídá TSR s hodnotou 0,8, při kterém je C_p rovno přibližně 0,38. V tomto bodě je nejvýhodnější provozovat větrnou elektrárnu. Druhým bodem je maximální hodnota TSR, která odpovídá otáčkám větrné turbíny bez zatížení (TSR = 1,6).

Ze známých hodnot TSR lze nyní pomocí rovnice 2.6 vypočítat otáčky větrné turbíny a stanovit závislost otáček větrné turbíny na rychlosti větru (Obrázek 8-2).



Obrázek 8-2 Závislost otáček větrné turbíny na rychlosti větru pro vybrané hodnoty TSR 0,8 a 1,6

Pro maximální hodnotu $C_p = 0,38$ lze nyní pomocí rovnice 2.2 určit závislost výkonu větrné turbíny na rychlosti větru (Obrázek 8-3). Lze však předpokládat, že s rostoucí rychlostí větru (nad 20 m/s) bude klesat účinnost větrné turbíny, a tedy i odebíraný výkon.

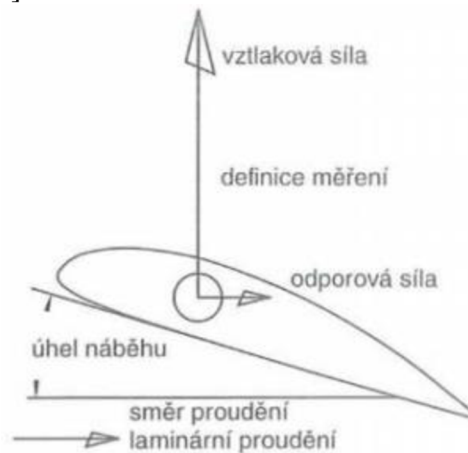


Obrázek 8-3 Grafická závislost výkonu větrné turbíny na rychlosti větru pro $C_p 0,38$

8.1 Lopatka

Lopatka je nejdůležitější část větrné elektrárny. Její funkcí je odebírat energii větru. Největší vliv na funkci větrné elektrárny a na její závislost vyrobeného výkonu na rychlosti větru, má tvar lopatek. Síla vyvolaná pohybem vzduchu je vždy výslednicí síly vztahové a odporové. Tvarem lopatek se volí jejich poměr, a tedy i výsledná síla a její směr (Obrázek 8-4). Vhodným tvarem lopatek lze docílit i toho, že se větrná turbína při větších rychlostech větru sama brzdí, což může působit jako samočinná ochrana před poškozením.

Důležitým parametrem je také úhel náběhu. Ten určuje, pod jakým úhlem působí směr proudění na rovinu lopatky. Úhel náběhu se volí takový, aby vektorový součet vztahové a odporové síly byl co největší. Pod tímto úhlem se v případě systému bez natáčení lopatka provozuje [20] [39].



Obrázek 8-4 Řez lopatkou a ztvárnění působících sil [20]

Výroba lopatek v domácích podmínkách je možná několika způsoby. Prvním a nejjednodušším je vytvoření lopatek z PVC. K vytvoření požadovaného tvaru lze použít PVC trubku. Lopatky takto vytvořené však nelze tvarovat do aerodynamických tvarů a jejich účinnost je proto malá. Odolnost proti vysokým rychlostem větru není dostatečná [21].

Další možností je vytvoření lopatek z lepeného dřeva. Dřevěné lopatky se historicky hojně používaly. Vhodnou technikou laminace jednotlivých vrstev je možné dosáhnout potřebných mechanických vlastností jako pevnost a pružnost. Ruční výroba takových lopatek však vyžaduje zkušenost a potřebné nástroje pro opracování dřeva. Nevýhodou je i vyšší hmotnost takových lopatek [22].

Další možností výroby lopatek v domácích podmínkách je pomocí 3D tisku. Samotné plastové lopatky nejsou však dostatečně mechanicky odolné pro spolehlivý a bezpečný provoz. Velkou výhodou 3D tisku je možnost výroby složitých tvarů, které běžnými konvenčními metodami nejsou opakovaně vyrobitelné. Vhodný aerodynamický tvar lopatky je schopen výrazně zvýšit účinnost větrné turbíny.

Další možností je níže zmíněný použitý postup výroby.

8.2 Konstrukce lopatky

Lopatka se skládá z kostry, která je vytvořena z překližky o tloušťce 18 mm. Kostru tvoří 5 profilů kapkovitého tvaru. Jednotlivé profily jsou frézované pomocí stolní spodní frézky a frézy s vodícím ložiskem. Samotné frézování je provedeno obfrézováním plastového profilu vytištěného na 3D tiskárně. Touto metodou lze opakovaně docílit požadovaného tvaru profilu s dobrou přesností i bez použití CNC frézky.

Jednotlivé profily jsou spojeny překližkovým hranolem o šířce 25 mm, který zároveň slouží k připevnění lopatky k ose rotoru. Použitý hliníkový profil zvyšuje tuhost lopatky a slouží k připevnění hliníkové plechu na konci lopatky.



Obrázek 8-5 Kostra lopatky

V následujícím kroku je kostra lopatky oplechována hliníkovým plechem o tloušťce 0,5 mm. Plech je kotvený do překližkových profilů pomocí hřebíků dlouhých 30 mm s širokou hlavou. Do příčného hranolu a hliníkového profilu je plech ukotvený pomocí nýtů.



Obrázek 8-6 Oplechované lopatky

Kvůli zvýšení pevnosti a tuhosti lopatky je v následném kroku lopatka laminována. Laminace je provedena kompozitem ze skelné rohože o gramáži 250 g/m² a epoxidové pryskyřice. Nejdříve dochází k pokrytí lopatky skelnou rohoží, která je v místech ohybu připevněna kovovými sponkami do plechu. Připevnění se provádí kvůli zamezení odlepení skelné rohože během vytvrzování epoxidové pryskyřice, jelikož samotné vytvrzení trvá cca 24 h. Po připevnění skelné rohože dochází k nanesení epoxidové pryskyřice, které se provádí pomocí štětce nebo válečku. Spotřeba pryskyřice je cca 1 kg na lopatku.



Obrázek 8-7 Lopatka pokrytá skelnou rohoží připravená k laminaci epoxidovou pryskyřicí

8.3 Konstrukce osy a náboje

Osu náboje tvoří přesná ocelová kulatina o průměru 25 mm. Tato kulatina se vyrábí válcováním za studena. Výrobce zaručuje malou odchylku od průměru, která je vždy záporná. Díky tomu je možné osadit tuto kulatinu do ložiska bez nutnosti soustružení kulatiny.

Na kulatinu jsou navařené držáky, které slouží k připevnění přírub uchycení lopatek. Uchycení je realizováno pomocí šroubů M5. Uchycení osy do náboje je realizováno vlisováním osy do náboje, přičemž v osovém pohybu brání z horní části pevná zarážka, ze spodní části náboje pak odnímatelný pojistný kroužek.

Náboj (Obrázek 8-8) je tvořen dvěma ložisky lisovanými do ložiskových pouzder, které jsou vyrobené soustružením oceli. Ložisková pouzdra jsou přivařena na ocelovém plechu tloušťky 4 mm. Takto vzniklé plechy s ložiskovými pouzdry jsou rozepřeny čtvercovými ocelovými profily 20x20 mm. Při výrobě náboje je nutné dodržet osovou souměrnost obou ložisek, jinak by docházelo k přičení osy a ložisek, což by vedlo k většímu opotřebovávání ložisek a snížení jejich životnosti.

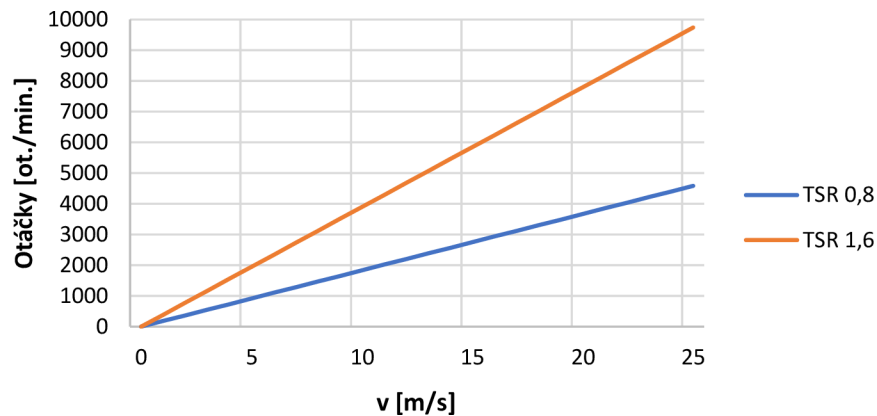


Obrázek 8-8 Náboj větrné elektrárny

8.4 Převod

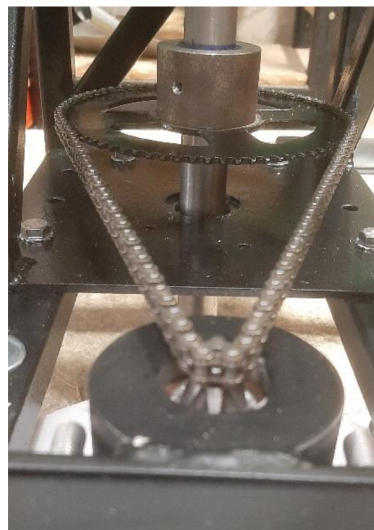
Kvůli zvýšení pracovních otáček generátoru je nutné použít převod. Za vhodný byl zvolen převod řetězový. Ten je tvořen řetězovým kolem pro řetěz 25H s počtem zubů 72 na straně větrné turbíny. Na straně generátoru je řetězové kolo s 6ti zuby. Výsledný převod je tedy 1:13. Závislost otáček generátoru na rychlosti větru pro vybrané koeficienty rychloběžnosti je znázorněn na Obrázek 8-9.

**Závislost otáček generátoru na rychlosti větru
pro vybrané hodnoty TSR**



Obrázek 8-9 Grafická závislost otáček generátoru na rychlosti větru

Kvůli snížení namáhání osy generátoru silou nutnou ke šponování řetězu, je řetězové kolečko umístěno v ložiskovém pouzdře, které je připevněno na spodní části náboje. Jelikož je pouzdro a generátor umístěn přes šrouby v drážkách, lze měnit vzdálenost osy otáčení generátoru od osy otáčení větrné turbíny, což je podstatné pro správné šponování řetězu. Spoj mezi řetězovým kolečkem a osou generátoru je realizovaný přes prodlouženou matici s částečným závitem. Kvůli omezení protáčení osy v matici je matice osazena třemi šrouby, které slouží rovněž k vystředění osy generátoru vůči matici a omezení házivosti



Obrázek 8-10 Řetězový převod

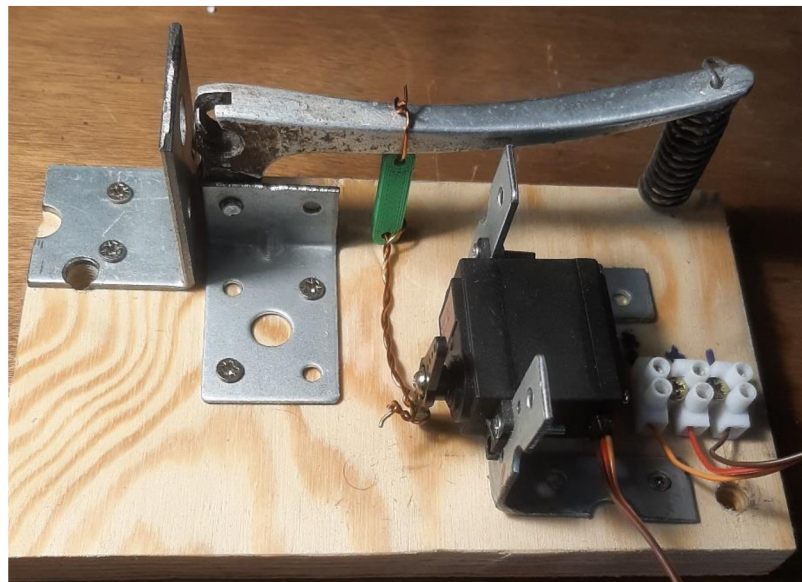
8.5 Brzda

V předchozí kapitole byla odhadnuta závislost otáček generátoru na rychlosti větru (Obrázek 8-9). Jelikož je použit převod s vysokým převodovým poměrem, dosahují otáčky na generátoru vysokých hodnot. Takto vysoké hodnoty by mohli poškodit generátor, konkrétně by mohli způsobit odlepení magnetů od rotoru generátoru vlivem velké odstředivé síly. Bylo vyzorováno, že maximální bezpečné otáčky na generátoru jsou cca 3000 otáček za minutu.

Pro zamezení možnosti poškození generátoru je na rotor generátoru instalována brzda. Jedná se o kotoučovou brzdou s čelistmi ovládanými lankem. Tato brzda se používá u malých motocyklů nebo na elektrických koloběžkách. Brzda se nachází na spodní straně náboje.

Ovládání brzdy je možné ručně, nebo pomocí servomotoru, který ovládá mikroprocesor ESP32 použitý v MPPT. Jelikož servomotor pracuje na vyšší logické úrovni (5 V) než ESP32 (3,3 V), je nutné použít externí převodník logických úrovní. Bylo vyzorováno, že běžně používané modelářské servomotory nemají dostatečný krouticí moment, který by způsobil dostatečné stlačení brzdové páky. Z tohoto důvodu je vytvořen mechanismus s pružinou, která táhne brzdovou páku dolů a servomotor je použit pouze k podtrhnutí západky která brání brzdové páce ve stlačení (Obrázek 8-11). Výhodou tohoto mechanismu je, že nepotřebuje napájení pro samotné brzdění. Nevýhodou je, že po spuštění brzdového mechanismu se musí odbrzdění provést ručně.

Brzda se aktivuje v návaznosti na překročení hodnoty otáček za minutu (větrná elektrárna se přetáčí), když je napájecí napětí větší než jeho povolená hodnota (větrná elektrárna se přetáčí), nebo když napětí na vstupu poklesne pod stanovenou hodnotu (baterie je vybitá).



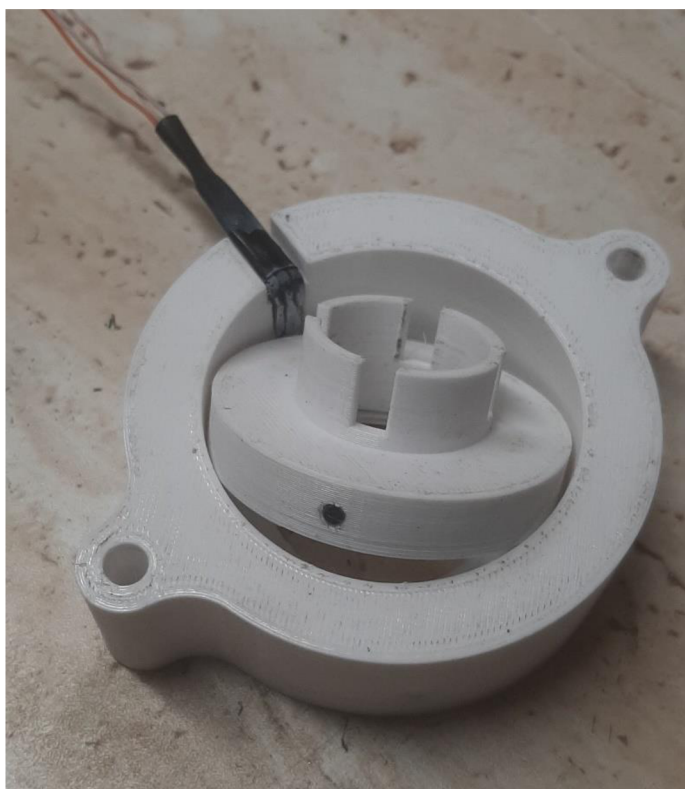
Obrázek 8-11 Mechanismus brzdy

8.6 Čidlo otáček

Čidlo otáček větrné turbíny pracuje pomocí Hallovy sondy, která je umístěna ve vnějším pevně přidělaném dílu. Vnitřní kus čidla otáček je připevněn k ose rotoru a obsahuje jeden válcový magnet o průměru 3 mm. Přítomnost magnetického pole vyvolá stažení logické úrovně na výstupu čidla. Stažení logické úrovně vyvolá přerušení mikroprocesoru ESP32, který na základě uplynulého času mezi jednotlivými impulzy počítá počet otáček za minutu.

Samotné čidlo je osazené na ose rotoru z důvodu toho, že na rotoru jsou menší otáčky než na generátoru, což vede k menšímu počtu přerušení mikroprocesoru, a tedy i menšímu zpoždění výpočetních operací jednotlivých cyklů MPPT.

Operační systém, nad který běží program MPPT v ESP32 má zabudovaný watchdog, který v případě častého vyvolávání přerušení restartuje mikroprocesor. Čím méně je tedy vyvoláváno externí přerušení, tím lépe.



Obrázek 8-12 Čidlo otáček

9 KONSTRUKCE GENERÁTORU PRO VĚTRNOU ELEKTRÁRNU

Za vhodný generátor je zvolen synchronní generátor s permanentními magnety. Rotor, stator a kostry cívek jsou tištěny na 3D tiskárně. Kostry cívek jsou tištěny z ABS, kvůli vysoké teplotní odolnosti materiálu. Rotor, stator, vrchní a spodní kryt je vytištěn z PETg.

Rotor generátoru obsahuje 12 magnetů řazených do pólových dvojic. Jsou použity neodymové magnety s označením N35 o rozměrech 50x20x10 mm.

Vinutí generátoru tvoří 18 cívek, které společně tvoří třífázovou soustavu. Jedna pólová dvojice tedy překrývá 3 cívky. Vinutí je navrženo jako jednovrstvé, každá cívka se navíjí na svou kostru.

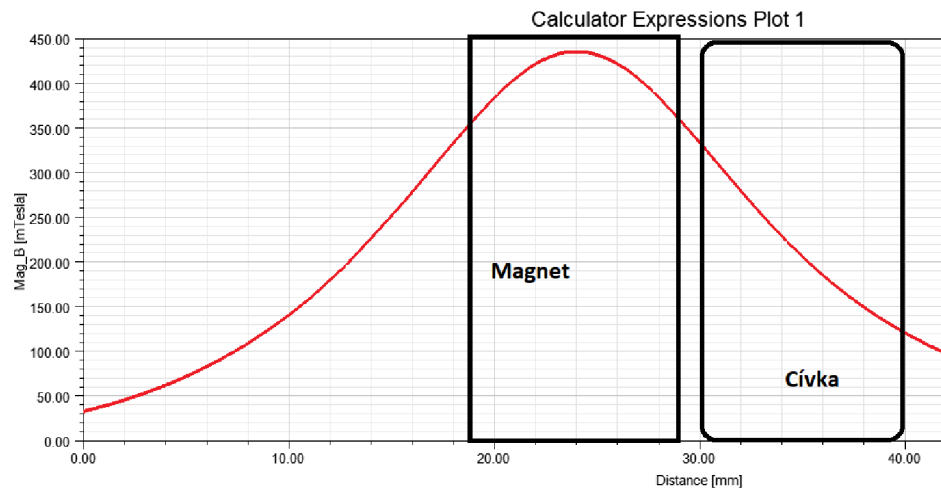
Požadavkem na generátor je generování usměrněného napětí s minimální hodnotou 20 V při otáčkách rotoru kolem 80 otáček za minutu (s převodem 1:13 dosahují otáčky generátoru 1040). Napětí je zvoleno vyšší než nominální napětí baterie, neboť MPPT regulátor vyžaduje větší napětí než napětí na baterii. Je odhadnuto, že uvedených otáček dosáhne turbína při rychlosti větru 5 m/s (při TSR 0,8).

Parametry generátoru:

Napětí při rozběhové rychlosti	$U_r = 20 \text{ V}$
Otáčky při rozběhové rychlosti	$n_r = 1170 \text{ ot./min.}$
Jmenovitý výkon	$P = 120 \text{ W}$
Počet pólových dvojic	$p = 6$
Počet fází	$m = 3$
Počet drážek statoru	$Q = 36$
Počet drážek na pól	$Q_p = 6$
Počet drážek na pól a fázi	$q = 2$
Průměr rotoru	$D_R = 120 \text{ mm}$
Vnitřní průměr statoru	$D_S = 122 \text{ mm}$
Délka aktivní části statoru	$l = 50 \text{ mm}$
Délka vzduchové mezery	$\delta = 1 \text{ mm}$
Koercivita permanentních magnetů	$H_C = 907 \text{ kA/m}$
Remanentní indukce	$B_r = 1,21 \text{ T}$

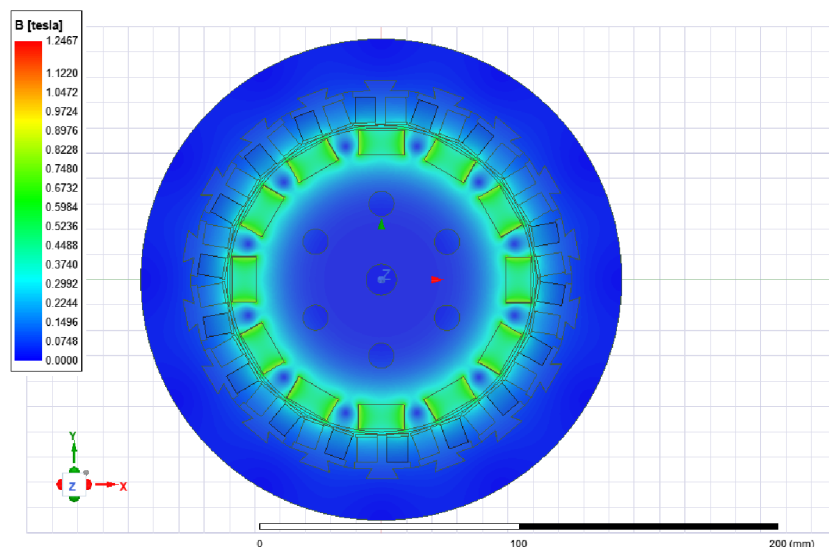
9.1 Simulace

Cílem simulace je simulovat průběh magnetické indukce od permanentních magnetů skrz vinutí cívek statoru. Průběh magnetické indukce je nutný pro výpočet počtu závitů. Pomocí programu ANSYS MAXWELL je provedena 2D magnetostatická simulace, ze které je patrná hodnota magnetické indukce v závislosti na vzdálenosti od osy generátoru (Obrázek 9-1).



Obrázek 9-1 Průběh magnetické indukce v závislosti od osy rotoru

Ze simulace je patrné, že nejvyšší hodnota magnetické indukce (430 mT) se nachází ve středu magnetu a se vzdáleností od středu magnetu exponenciálně klesá, kvůli čemuž je výhodné umístit co nejvíce závitů co nejbližší magnetu. Vzduchová mezera mezi cívkou a magnetem je volena co nejmenší možná (1 mm) s ohledem na použité výrobní technologie. Na začátku cívky dosahuje magnetická indukce hodnoty 330 mT, na konci už pouze 120 mT. Magnetická indukce je takto malá, neboť stator generátoru neobsahuje žádný feromagnetický materiál, který by napomáhal v šíření magnetického pole. Magnetické pole se vždy uzavírá mezi sousedními magnety, které jsou umístěny tak, aby se střídala jejich polarita. Pro výpočet je použita střední hodnota $B = 230$ mT.



Obrázek 9-2 Průběh magnetické indukce skrz vinutí generátoru

9.2 Návrh vinutí

Nejprve je nutné zvolit drážkovou a pólovou rozteč.

Drážková rozteč (τ_u) se určí z počtu drážek statoru (Q) a vnitřního průměru statoru (D_S). Od této hodnoty je odečtena šířka vinutí (d_c).

$$\tau_u = \pi \times \frac{D_S}{\frac{1}{2} \times Q} - d_c \quad (6.4)$$

$$\tau_u = \pi \times \frac{122}{18} - 8 = 13,29 \text{ mm}$$

Pólová rozteč se určí obdobně z vnitřního průměru (D_S) statoru a počtu pólových dvojic (p).

$$\tau_p = \pi \times \frac{120}{2 \times 6} = 31,42 \text{ mm}$$

Dále je nutné zvolit indukované napětí jedné fáze. Napětí je vypočteno pro požadované rozběhové napětí (U_R). Jelikož je generátor trojfázový, zapojený do hvězdy, indukované napětí na výstupních svorkách odpovídá amplitudovému efektivnímu napětí. Jelikož se střídavé napětí musí usměrnit, je nutné uvažovat napěťový úbytek na diodách (U_D). Při použití šesticestného diodového usměrňovače je nutné uvažovat dvojnásobek tohoto napětí.

$$U_{IR} = \frac{U_R}{\sqrt{3}} + 2 \times U_D \quad (6.6)$$

$$U_{IR} = \frac{20}{\sqrt{3}} + 2 \times 0,8 = 13,15 \text{ V}$$

Dále je nutné určit činitel kroku k_y . Ten udává vztah mezi délkou pólového kroku a vzdáleností mezi přední a zadní stranou cívky, tedy mezi dvěma aktivními vodiči jedné cívky. V tomto případě je vzdálenost mezi dvěma aktivními vodiči rovna drážkovému kroku [29].

$$k_y = \sin\left(\frac{\tau_u}{\tau_p} \times \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.7)$$

$$k_y = \sin\left(\frac{12,29}{31,42} \times \frac{\pi}{2}\right) = 0,5764$$

Činitel rozlohy vyjadřuje zpoždění indukovaného napětí, které odpovídá prostorovému posunu závitů cívky podél obvodu stroje. Toto zpoždění má za následek snížení indukovaného napětí [30].

$$k_r = \frac{\sin\left(\frac{q}{Q_p} \times \frac{\pi}{2}\right)}{q \times \sin\left(\frac{1}{Q_p} \times \frac{\pi}{2}\right)} \quad (6.8)$$

$$k_r = \frac{\sin\left(\frac{2}{6} \times \frac{\pi}{2}\right)}{2 \times \sin\left(\frac{1}{6} \times \frac{\pi}{2}\right)} = 0,9659$$

Činitel vinutí je poté součin činitele krácení kroku a činitele rozlohy [30].

$$k_v = k_y \times k_r \quad (6.9)$$

$$k_v = 0,5764 \times 0,9659 = 0,5567$$

Frekvence závisí na otáčkách a počtu pólových dvojic.

$$f_r = \frac{p \times n_r}{60} \quad (6.10)$$

Pro maximální otáčky.

$$f_{max} = \frac{6 \times 1040}{60} = 104 \text{ Hz}$$

Při výpočtu počtu závitů se využívá magnetického indukčního toku (ϕ). Ten závisí na magnetické indukci (B) a ploše. Plocha magnetického toku je dána výškou cívky (l) a hloubkou cívky (c_c).

$$\phi = B \times l \times c_c \quad (6.11)$$

$$\phi = 0,23 \times 0,05 \times 0,01$$

$$\phi = 1,15 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

Nyní je možné určit počet závitů jedné fáze. Počet otáček jedné fáze se odvíjí od požadovaného rozběhového napětí.

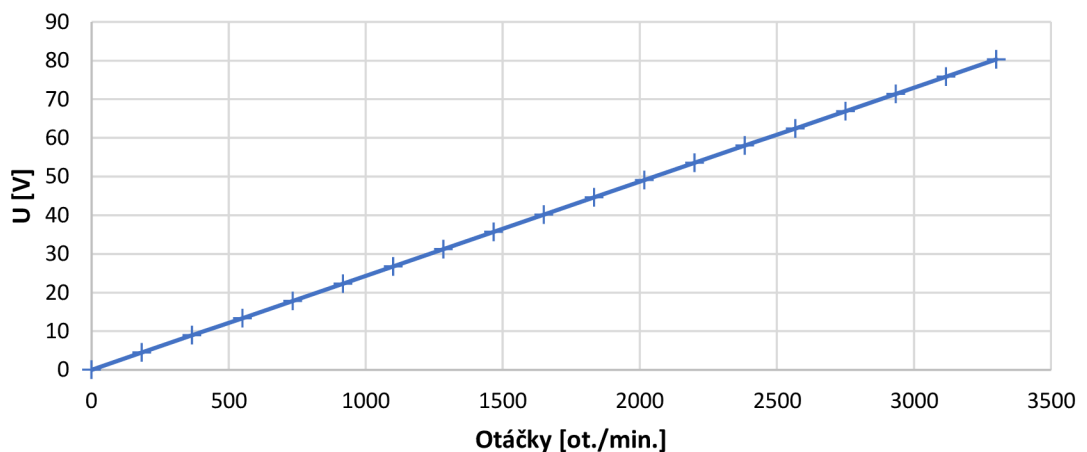
$$N = \frac{U_{IR}}{4,44 \times k_v \times \phi \times f_r} \quad (6.12)$$

$$N = \frac{13,15 \text{ V}}{4,44 \times 0,5567 \times 1,15 \times 10^{-4} \times 104}$$

$$N = 444,82 \doteq 420$$

Z grafické závislosti vypočteného usměrněného napětí na výstupu usměrňovače je patrné, že je požadavek na generování napětí U_R při 80 ot./min. splněn.

Závislost vypočteného usměrněného třífázového napětí



Obrázek 9-3 Grafické vyjádření závislosti vypočteného napětí naprázdno na otáčkách generátoru

Výkon dodávaný do usměrňovače odpovídá zapojení zátěže do hvězdy, v tomto zapojení je výkon P .

$$P = \sqrt{3} \times U_s \times I_f \quad (6.13)$$

Odtud.

$$I_f = \frac{P}{\sqrt{3} \times U_s}$$

Délka vodiče jednoho závitů cívk (l_c) o středních rozměrech cívk 54x21 mm.

$$l_c = 2 \times a_c + 2 \times b_c \quad (6.14)$$

$$l_c = 2 \times 62 + 2 \times 12 = 148 \text{ mm}$$

Délka vodiče jedné fáze (l_{vf}) je násobkem počtu závitů jedné fáze (N) a délky vodiče jednoho závitů cívk (l_c)

$$l_{vf} = N \times l_c \quad (6.15)$$

$$l_{vf} = 420 \times 148 = 62160 \text{ mm} = 62,16 \text{ m}$$

Odpor vodiče jedné fáze (R_v) je dán délkou vodiče jedné fáze (l_{vf}), průřezem vodiče (S_v) a měrnou rezistivitou mědi (ρ). Uvažuje se použití izolovaného lakovaného vodiče s poloměrem (r_v) 0,5 mm. Hodnota měrné rezistivity mědi je udávána pro 20 °C.

$$R_{v \ 20^\circ\text{C}} = \frac{\rho_m \times l_{vf}}{\pi \times r_v^2} \quad (6.16)$$

$$R_{v \ 20^\circ\text{C}} = \frac{0,0178 \times 62,16}{\pi \times 0,5^2} = 1,408 \ \Omega$$

Ztráty vlivem Joulova tepla jsou závislé na odporu vodiče a protékajícím proudem. Jelikož elektrický proud protéká v zapojení do hvězdy vždy dvěma fázemi, je i odpor dvojnásobný.

$$P_{zj} = 2 \times R_{v \ 20^\circ\text{C}} \times I_f^2 \quad (6.17)$$

9.3 Výroba generátoru

Výroba rotoru

Rotor je tvořen vytištěným dílem z materiálu PETg s výplní 20 %. Osa generátoru je vyrobena z osy předního kola z motocyklu Jawa pionýr o průměru 12 mm. Z osy je odříznuta vrchní rozšířená část, která slouží jako zarážka a závit. Do osy je vybroušena drážka na pojistný kolík, který je vyroben z plechu o tloušťce 4 mm. Do osy je vybroušena i druhá drážka, která se nachází ve vrchní části. Tato drážka slouží k připojení převodu či spojky osy (Obrázek 9-4).



Obrázek 9-4 Osa generátoru s pojistným kolíkem

Rotor je osazen dvanácti permanentními magnety z materiálu N35, o rozměrech 50x20x10 mm. Magnety jsou lepeny epoxidovým lepidlem. Magnety jsou pojištěny proti odlepení přelepením celého rotoru lepicí páskou s uhlíkovým vláknem (Obrázek 9-5).



Obrázek 9-5 Zkompletovaný rotor generátoru

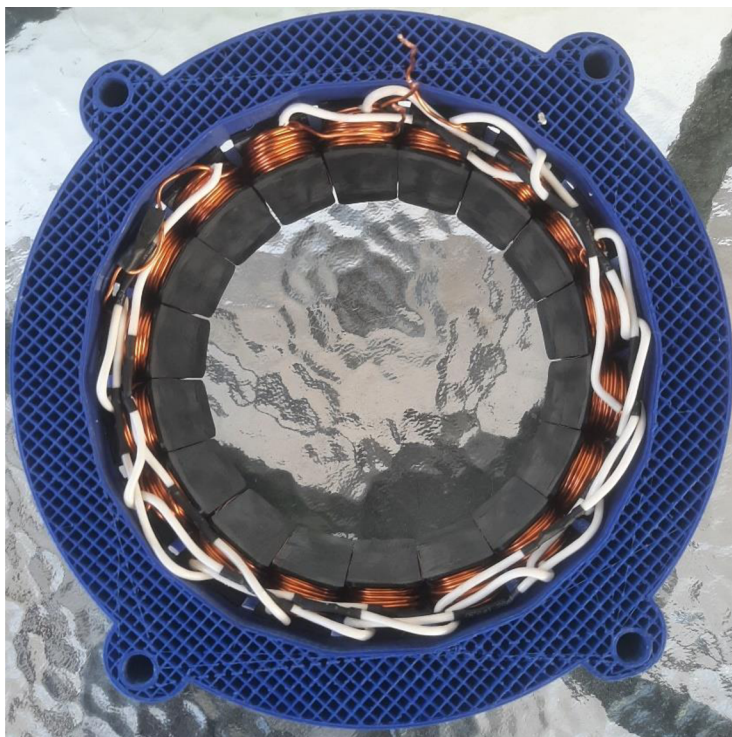
Výroba statoru

Stator je tvořen tištěným dílem z materiálu PETg, osmnácti kostrami cívek s čely cívek a vinutým drátem průměru 1 mm. Na kostru cívky je kyanoakrylátovým lepidlem nalepeno čelo cívky, které brání sesunutí vinutí cívky z kostry cívky. Po nalepení je na kostru cívky navinuto 70 závitů. Při navíjení se vinutí impregnuje rozpouštědlovým lakem, který chrání vinutí před vlhkostí.



Obrázek 9-6 Ruční navíjení cívek

Navinuté cívky jsou vkládány do drážek statoru a opět lepeny. Následně jsou cívky pájeny dle fází. Fáze jsou spojeny do hvězdy.



Obrázek 9-7 Zapojení cívek generátoru dle fází

Kompletace generátoru

Spodní a horní kryt generátoru je rovněž vytištěn z PETg. V krytech jsou vlepena ložiska 6201 2RS C3. Celý generátor je sešroubovaný šrouby M8, které slouží rovněž k upevnění generátoru na větrnou turbínu.

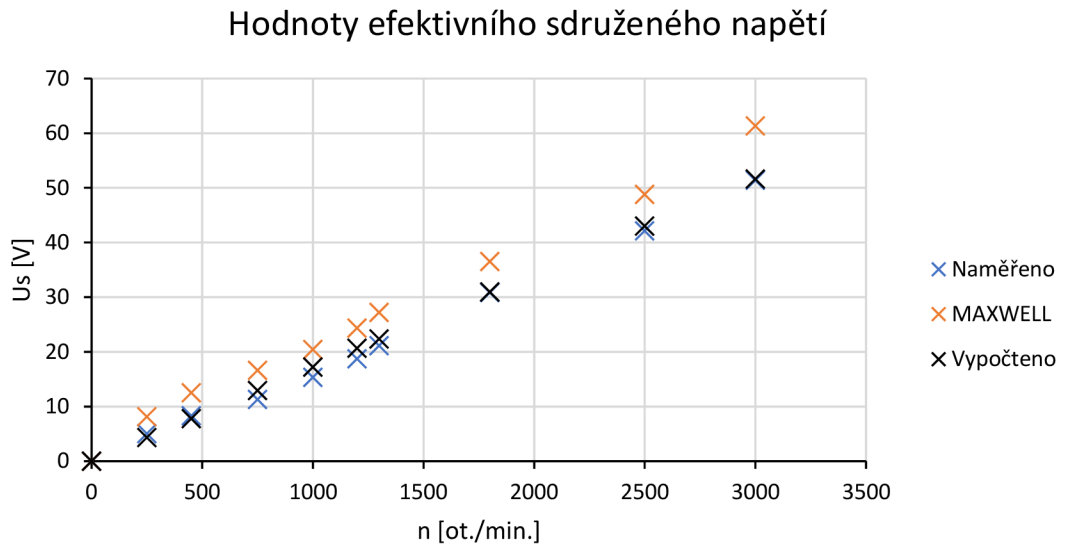


Obrázek 9-8 Zkompletovaný generátor

9.4 Testování generátoru

Testování napětí naprázdno

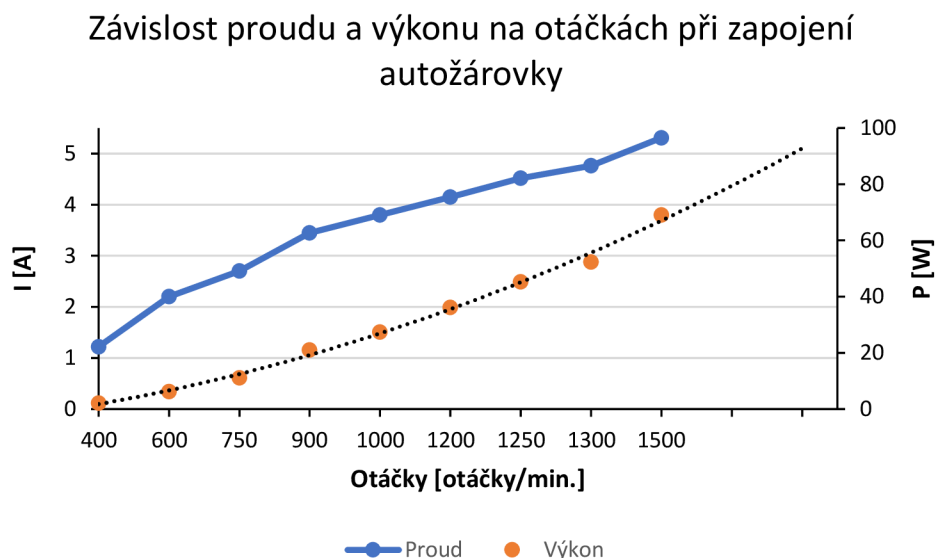
Pro ověření správnosti vypočtených hodnot generovaného napětí je provedena simulace pomocí programu ANSYS MAXWELL. V grafu (Obrázek 9-9) uvedeném níže, jsou porovnány vypočtené, simulované a skutečně naměřené hodnoty sdruženého efektivního napětí v závislosti na otáčkách generátoru. Je patrné, že závislost napětí na otáčkách je poměrně shodná.



Obrázek 9-9 Grafické porovnání závislosti vypočteného, simulovaného a změřeného sdruženého napětí na otáčkách generátoru

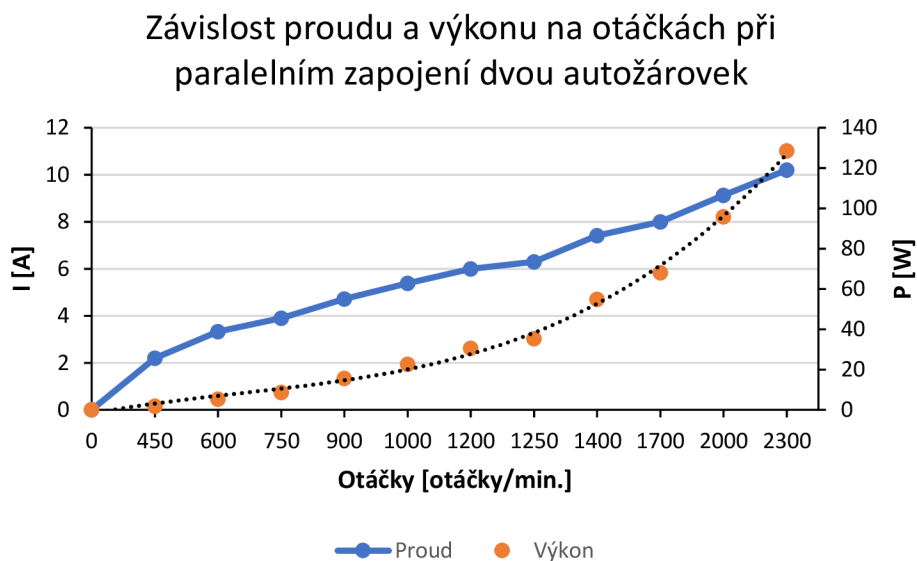
Měření výkonu generátoru na odporové zátěži

Při měření výkonové zatížitelnosti je testovaný generátor roztáčen pomocí stolní vrtačky s triakovým regulátorem. Elektrický výkon je dodáván do odporové zátěže v podobě 12 V autožárovky s nominálním výkonem 75 W. Pro usměrnění střídavého napětí z generátoru je použit níže uvedený trojcestný usměrňovač. Použité diody mají maximální proudovou zatížitelnost 10 A, na což je brán při testování ohled. Na (Obrázek 9-10) je patrný průběh proudu a výkonu na jedné autožárovce.



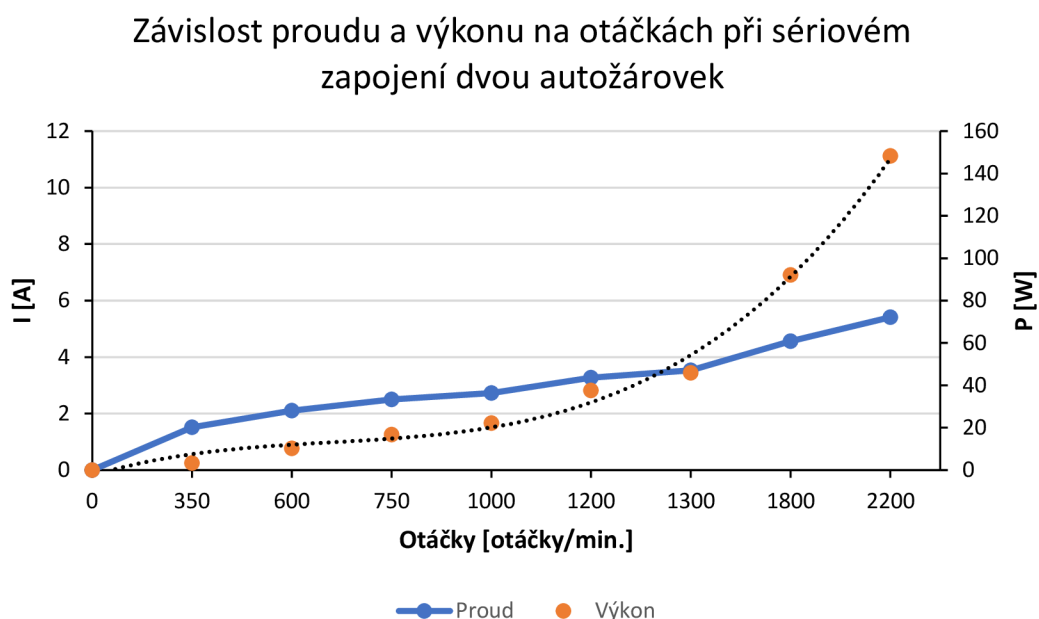
Obrázek 9-10 Grafické vyjádření závislosti proudu a výkonu na otáčkách při napájení 12 V autožárovky s nominálním výkonem 75 W

Na (Obrázek 9-11) je zobrazená závislost proudu a výkonu při zapojení dvou žárovek paralelně.



Obrázek 9-11 Grafické vyjádření závislosti proudu a výkonu na otáčkách generátoru při paralelním zapojení dvou 12 V autožárovek s nominálním výkonem 75 W

Na (Obrázek 9-12) je patrný průběh proudu a výkonu při zapojení dvou žárovek do série.



Obrázek 9-12 Grafické vyjádření závislosti proudu a výkonu na otáčkách generátoru při sériovém zapojení dvou 12 V autožárovek s nominálním výkonem 75 W

Maximální naměřené hodnoty výkonu při testování generátoru pomocí odporové zátěže společně se stejnosměrným napětím, stejnosměrným proudem a otáčkami jsou uvedeny v (Tabulka 4).

Tabulka 4 Naměřené hodnoty napětí, proudu, výkonu a otáček při testování generátoru s různou zátěží

	1 žárovka	2 žárovky (s)	2 žárovky (p)
U [V]	13	27,4	12,6
I [A]	5,31	5,41	10,2
P [W]	69,03	148,23	128,52
n [ot./min.]	1500	2200	2300

Výpočet účinnosti generátoru

Příkladový výpočet je proveden pro maximální naměřený výkon při napájení dvou žárovek zapojených paralelně. Proud odebraný z usměrňovače se rovná 1/3 proudu jednotlivou fází.

$$I_f = \frac{I_z}{3} \quad (6.18)$$

$$I_f = \frac{10,2}{3}$$

$$I_f = 3,4 \text{ A}$$

Ztrátový výkon na jedné fázi se vypočítá podle rovnice (6.16). Jelikož se jedná o třífázové vinutí, je i celkový ztrátový výkon trojnásobný.

$$P_{zj} = 3 \times (2 \times R_{v\ 20^\circ\text{C}} \times I_f^2) \quad (6.19)$$

$$P_{zj} = 3 \times (2 \times 1,408 \times 3,4^2)$$

$$P_{zj} = 97,66 \text{ W}$$

Generátor musí vyrobit i výkon ztracený na usměrňovači.

$$P_{zu} = 3 \times (2 \times U_D \times I_f) \quad (6.20)$$

$$P_{zu} = 3 \times (2 \times 0,8 \times 3,4)$$

$$P_{zu} = 16,32 \text{ W}$$

Účinnost generátoru se poté určí vzorcem:

$$\mu_G = \frac{P + P_{zu}}{P + P_{zj} + P_{zu}} \quad (6.21)$$

$$\mu_G = \frac{148,24 + 16,32}{148,24 + 97,66 + 16,32} \times 100$$

$$\mu_G = 59,72 \%$$

Tabulka 5 Vypočtené účinnosti generátoru při různém zatížení

	1 žárovka	2 žárovky (s)	2 žárovky (p)
P [W]	69,03	148,23	128,52
P _{zj} [W]	26,47	27,47	97,66
P _{zu} [W]	12,74	12,98	16,32
μ _G [%]	75,54	85,44	59,72

10 MPPT

Maximum Power Point Tracker slouží jako řídicí obvod při nabíjení baterií. Jeho funkcí je postupným opakováním zvoleného algoritmu najít optimální hodnoty proudu a napětí, aby výstupní výkon byl maximální. MPPT slouží jako DC-DC převodník.

V praxi se MPPT používá pro maximalizaci získaného výkonu ze zdroje, který má proměnlivé charakteristiky výkonu v čase. Zdrojem výkonu na vstupu tak může být větrná elektrárna nebo solární panel. Běžně se v MPPT využívá DC-DC step down měnič, z toho vyplývá, že napětí na vstupu musí být o několik voltů větší než požadované napětí na výstupu.

Jelikož je výkon z větrné elektrárny časově velmi proměnlivý, je nutné volit MPPT s vysokým kmitočtem hledání MPP, aby se změny výkonu stíhaly sledovat a nabíječ na ně mohl reagovat.

Konstrukce dále uvedeného MPPT je inspirována z volně dostupného open source projektu od autora publikujícího pod pseudonymem ASCAS [32].

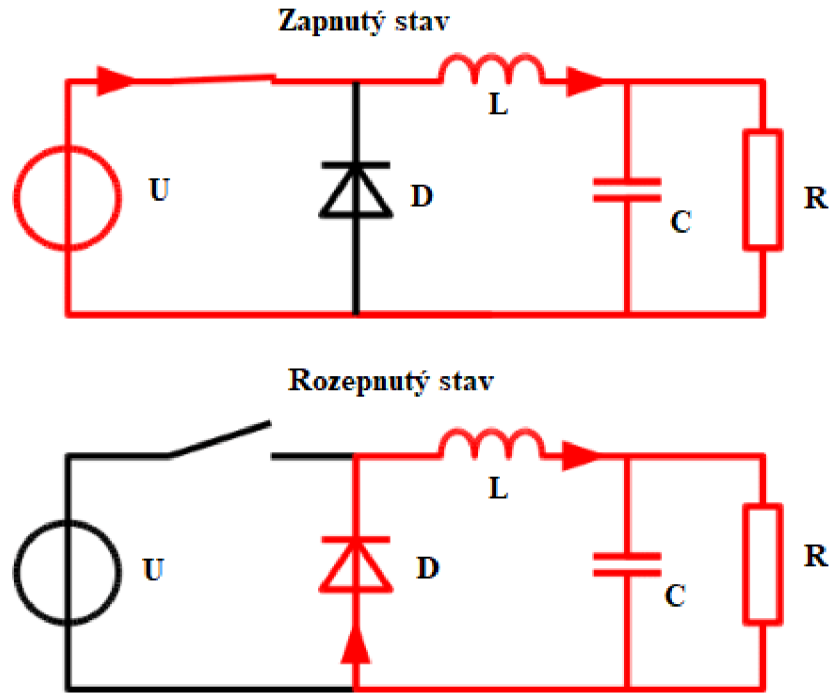
Konstruované MPPT je založeno na mikrokontroleru ESP32. Tento mikroprocesor byl zvolen díky tomu, že obsahuje dvě jádra, na kterých lze pomocí multitaskingu provozovat dvě nezávisle na sobě běžící operace. Další výhodou je možnost využití Wifi či Bluetooth komunikace. V porovnání s druhým běžně používaným mikroprocesorem ATmega 328 pracuje mikroprocesor ESP32 na 32 bitové logice, dosahuje vyšší taktovací frekvence a má i větší možnost konfigurace jednotlivých pinů.

Výsledné MPPT pak dosahuje následujících parametrů, které jsou dány výběrem použitých MOSFET tranzistorů, kondenzátorů a návrhem DPS. MPPT disponuje rovněž možnostmi telemetrie pomocí Wifi.

Maximální vstupní napětí	80 V
Maximální vstupní proud	30 A
Maximální výstupní napětí	50 V
Maximální výstupní proud	35 A

10.1 DC-DC step down měnič

Pro transformaci vyššího napětí na nižší se používají step down buck měniče. Dle principu fungování se rozdělují na dva typy, synchronní a asynchronní.



Obrázek 10-1 Ztvárnění principu fungování step down měniče

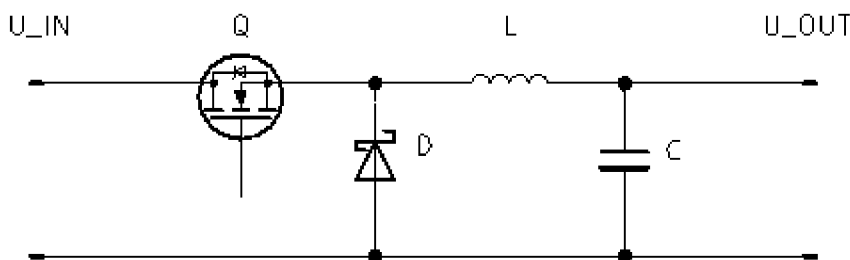
Základem pro obě konstrukce je řízený spínač, kterým může být například MOSFET. Ten je pomocí PWM signálu spínán s určitou střídou, podle které protéká obvodem elektrický proud. Elektrický proud protéká obvodem přes cívku. Cívka však brání změně průchodu elektrického proudu tím, že se na ní indukuje elektrické napětí opačné polarity, čímž dochází k poklesu napětí na výstupu oproti vstupu. Při této změně proudu si cívka ukládá energii v podobě magnetického pole. Energie se při sepnutém stavu ukládá rovněž na kondenzátoru, který se v sepnutém stavu nabíjí.

Při odpojení spínače vzniká rovněž změna proudu, na který cívka opět reaguje indukovaným napětím. Tentokrát má však indukované napětí stejnou polaritu jako zdroj. Tato změna napětí otvírá diodu, přes kterou dochází k propojení obvodu. Cívka nyní dodává do obvodu elektrickou energii, kterou si v předchozím kroku naakumulovala.

Celý tento cyklus se poté opakuje s frekvencí, která je dána frekvencí použitého PWM signálu řídicího obvodu spínače. Velikost napětí na výstupu měniče je dána střídou sepnutí spínače.

Asynchronní buck converter

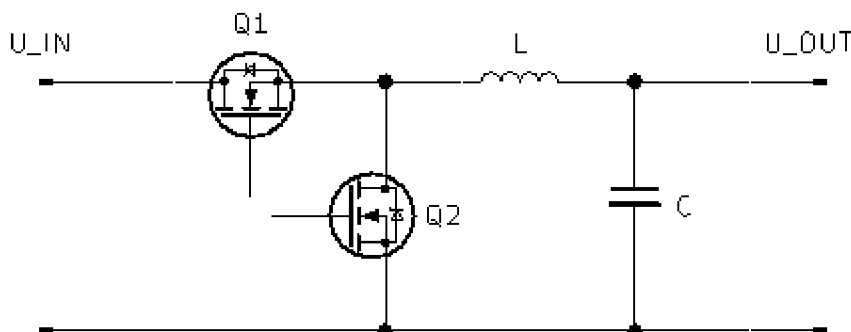
Asynchronní buck converter využívá ke své činnosti podobné schéma jako výše uvedené (Obrázek 10-1). Jako spínací prvek slouží většinou N-MOSFET, který je řízen jedním PWM signálem z externího zdroje. Výhodou této konstrukce je její jednoduchost, ke správné funkci stačí jeden zdroj PWM signálu. Nevýhodou této konstrukce jsou ztráty na zenerově diodě D, díky kterým dosahuje asynchronní buck converter nižší účinnosti (80 %) než synchronní buck converter (95 %) [34].



Obrázek 10-2 Schéma zapojení asynchronního buck měniče

Synchronní buck converter

Synchronní buck converter odstraňuje nevýhodu asynchronního buck converteru tím, že nahrazuje ztrátu na diodě ztrátou na MOSFETU Q_2 . Jelikož je vodivost MOSFETU v saturačním stavu větší než vodivost zenerovy diody, vznikají na tranzistoru menší tepelné ztráty než na diodě. Synchronní měnič dosahuje tedy vyšší účinnosti. Nevýhodou této konstrukce je její vyšší složitost. Řízení měniče vyžaduje dva PWM signály s opačnou střídou. V případě, kdyby došlo k otevření obou tranzistorů současně, dochází k prudkému nárůstu proudu obvodem vlivem zkratu a hrozí poškození měniče. Druhým rizikem je stav, kdy dochází k trvalému vypnutí měniče, tranzistor Q_1 se tedy nachází v rozepnutém stavu. Pokud by se tranzistor Q_2 nacházel v opačné fázi, došlo by ke zkratování výstupních svorek, na kterých se však nachází zdroj napětí v podobě baterie, což by opět způsobilo zkrat. Tyto nebezpečné stavy je nutné ošetřit, aby k nim v běžném provozu měniče nemohlo dojít.



Obrázek 10-3 Schéma zapojení synchronního buck měniče

10.2 Popis hardwaru MPPT měniče

Hlavní částí MPPT je nabíjecí obvod, který je tvořen synchronním buck měničem, ochranou proti zpětným proudům a čidlem pro měření proudu.

Synchronní step down měnič tvoří tranzistory Q_3 a Q_4 , přes které protéká proud do cívky L_1 na které vzniká požadované napětí. Tranzistor C_{10} pak slouží k vyhlazení napětí na cívce. Funkce step down měniče je popsána v předchozí kapitole.

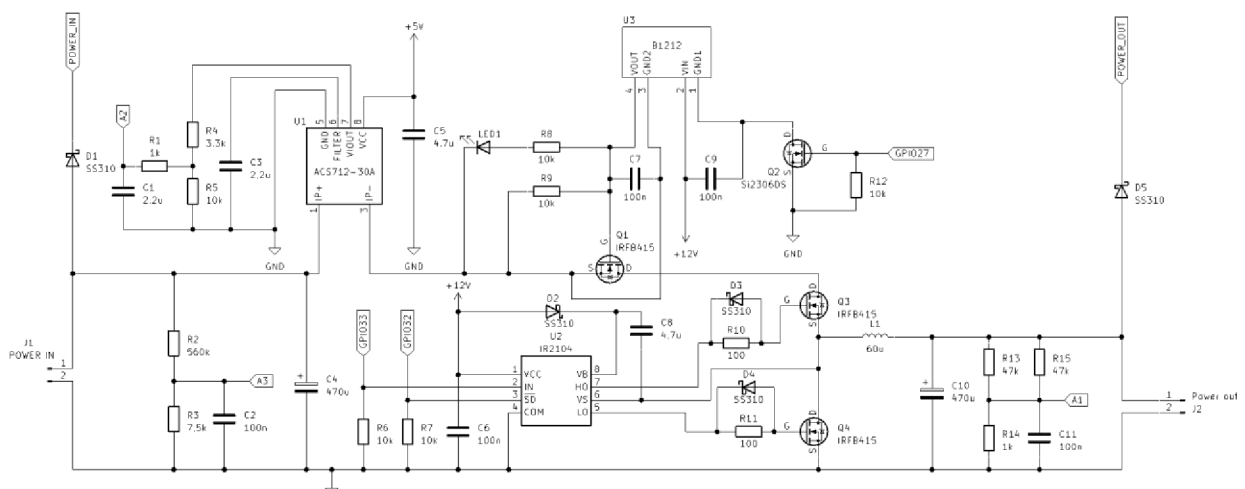
K ovládání tranzistorů Q_3 a Q_4 slouží integrovaný obvod IR2104. Tento integrovaný obvod vytváří ze vstupního PWM signálu na pinu IN výstupní PWM signál se stejnou fází na pinu HO a opačnou fází na pinu LO. Pro spínání mosfet tranzistorů je nutné dodat tranzistoru na gate dostatečně velké napětí, aby se tranzistor dostal do saturačního sepnutého stavu. Napětí U_{GS} však nesmí překročit určitou hodnotu (typicky 20 V), jinak dojde k proražení tenké izolační vrstvy a tranzistor se nenávratně poškodí. IR2104 slouží rovněž jako napěťová pumpa. Díky napěťové pumpě je integrovaný obvod schopný řídit horní tranzistor i přes to, že potřebné napětí U_{GS} je vyšší než jeho napájecí napětí.

Tranzistor Q_1 slouží k odpojení vstupního napětí měniče. V případě nižšího napětí na vstupu MPPT, než na výstupu by mohlo docházet ke zpětnému proudu od baterie na vstup měniče. Odpojením vstupu se eliminuje možnost toku zpětného proudu. Ovládání tranzistoru Q_1 je realizováno přes izolovaný DC měnič 12 na 12 V. V případě přivedení vstupního napětí na gate tranzistoru Q_2 dojde k uzemnění vstupu měniče B1212 a k otevření tranzistoru Q_1 , čímž dojde k připojení vstupního napětí na tranzistor Q_3 .

Integrovaný obvod ACS712-30A slouží k měření vstupního proudu. Tento integrovaný obvod pracuje na základě Hallova jevu. Je možno jej použít k měření DC i AC napětí. ACS712 funguje jako převodník proudu na analogový napěťový výstup. Jeho rozlišení je 66 až 185 mV/A.

Měření vstupního a výstupního napětí je realizováno přes odporové děliče. Napětí z odporových děličů je zpracováváno přes externí čtyř kanálový A/D převodník ADS1015. Tento převodník převádí rovněž analogový napěťový signál z proudového senzoru na digitální. Převodník ASD1015 komunikuje s ESP32 přes I2C sběrnici.

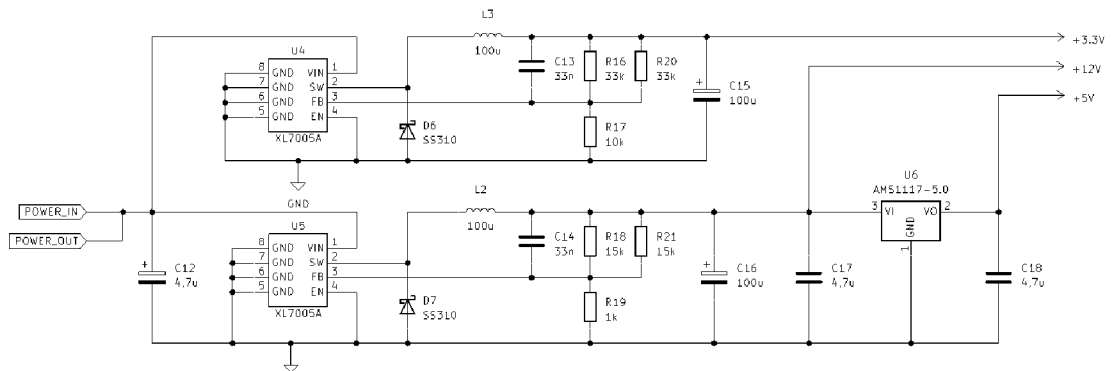
Diody D_1 a D_8 slouží k propojení napájecí části MPPT. Zapojením D_1 se MPPT napájí ze zdroje, zapojením D_8 se MPPT napájí z baterie.



Obrázek 10-4 Schéma zapojení obvodu měniče

Napájecí část obvodu

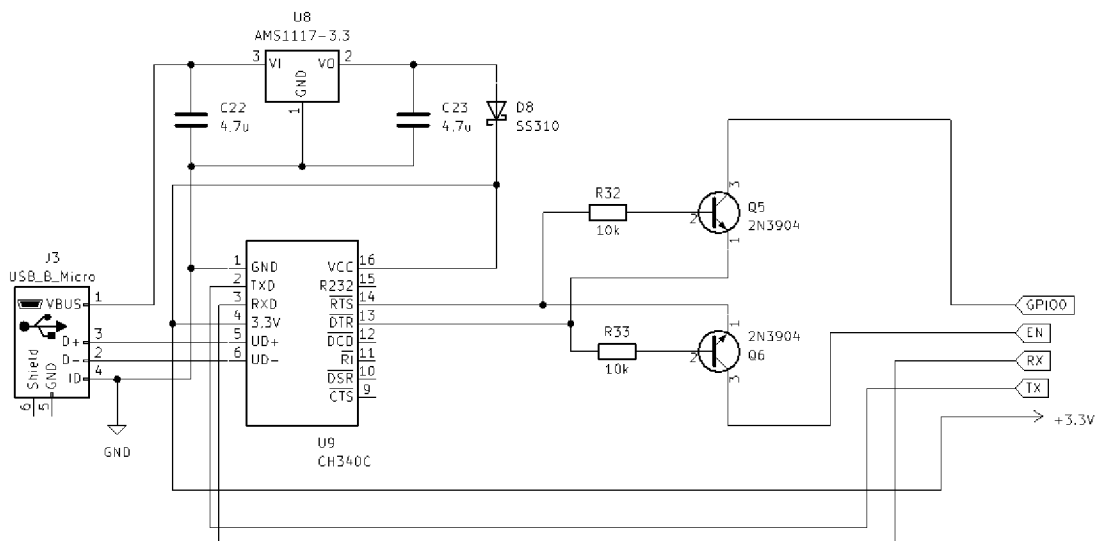
Pro napájení periférií jsou nutné tři napěťové úrovně. Napětí 3,3 V je použité pro napájení mikrokontroleru, A/D převodníku ASD1015 a externích zařízení čidla otáček a anemometru. Napěťová úroveň 12 V je použita pro napájení mosfet driveru IR2104 a ventilátoru chladiče mosfetů. 5 V sběrnice napájí proudový senzor ACS712. Pro napájení jsou použity integrované obvody XL7005A, které slouží jako spínané zdroje použitelné do 80 V vstupního napětí s maximálním proudovým zatížením 0,8 A. Regulace výstupního napětí se provádí zpětnou vazbou na pin FB. Mezi pinem FB a SW je napěťový dělič, který určuje velikost výstupního napětí obvodu, přičemž referenční napětí mezi pinem FB a EN je 1,25 V.



Obrázek 10-5 Schéma napájecí části MPPT

Převodník USB/UART

Pro komunikaci s PC a kvůli možnosti programování mikrokontroleru obsahuje MPPT převodník USB/UART. Je použit standardně používaný obvod CH340C. Jelikož USB pracuje na 5 V logice a ESP32 na 3,3 V logice, je nutné převádět i signál sběrnice. Lineární regulátor AMS1117-3,3 slouží k napájení mikrokontroleru během programování a během provozu MPPT bez připojené baterie či zdroje energie.



Obrázek 10-6 Schéma zapojení převodníku USB/UART

10.3 Popis softwaru MPPT měniče

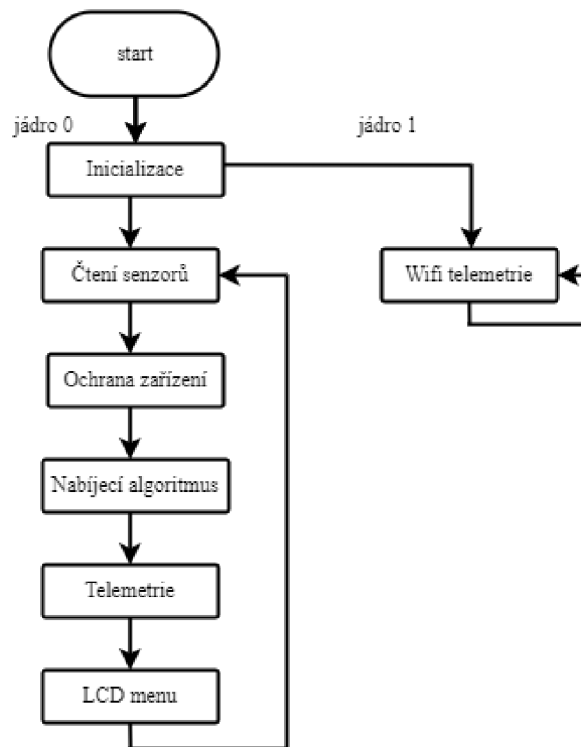
Software MPPT se skládá ze dvou smyček, které díky dvoujádrové architektuře běží každá na jednom jádru. Smyčka starající se o wifi telemetrii běží na samostatném jádře, jelikož se jedná o časově náročný proces, který by zbytečně prodlužoval smyčku, na které běží zbytek programu.

Po startu mikroprocesoru následuje inicializace, ve které se inicializuje přenosová rychlost sériové komunikace, definují se piny, inicializuje se nastavení externího A/D převodníku a také funkce a piny externího přerušení. Externí přerušení musí být inicializováno na jádře, na kterém se má přerušení vyvolat.

Wifi telemetrie, která běží na jádře 1, je realizována pomocí platformy IoT Blynk. Její programování je velice jednoduché, jelikož stačí pouze vytvořit virtuální piny a přiřadit jim určité proměnné, které mají zobrazovat.

Mezitím na jádře 0 běží hlavní část programu. Nejprve dochází ke čtení senzorů. V této části dochází ke čtení hodnot z externího A/D převodníku, ke čtení teploty na chladiči a hodnot z čidel otáček a anemometru. Poté následuje sekce ochrany, ve které se řeší, jestli nebyly překročeny kritické hodnoty jako maximální teplota, maximální proud či přílišné vybití baterie. O nabíjecím algoritmu je pojednáno na další straně. V programu následuje telemetrie, která se stará o sériovou komunikaci například s PC. V případě, kdy není nutné používat sériovou komunikaci, je vhodné sériovou komunikaci vypnout.

Poslední část smyčky řeší LCD komunikaci, kdy lze na LCD displeji zobrazovat aktuální hodnoty či pomocí externích tlačítek provádět konfiguraci MPPT. Opět v případě, kdy funkce LCD není vyžadována, je výhodnější tuto část smyčky v programu zakázat.

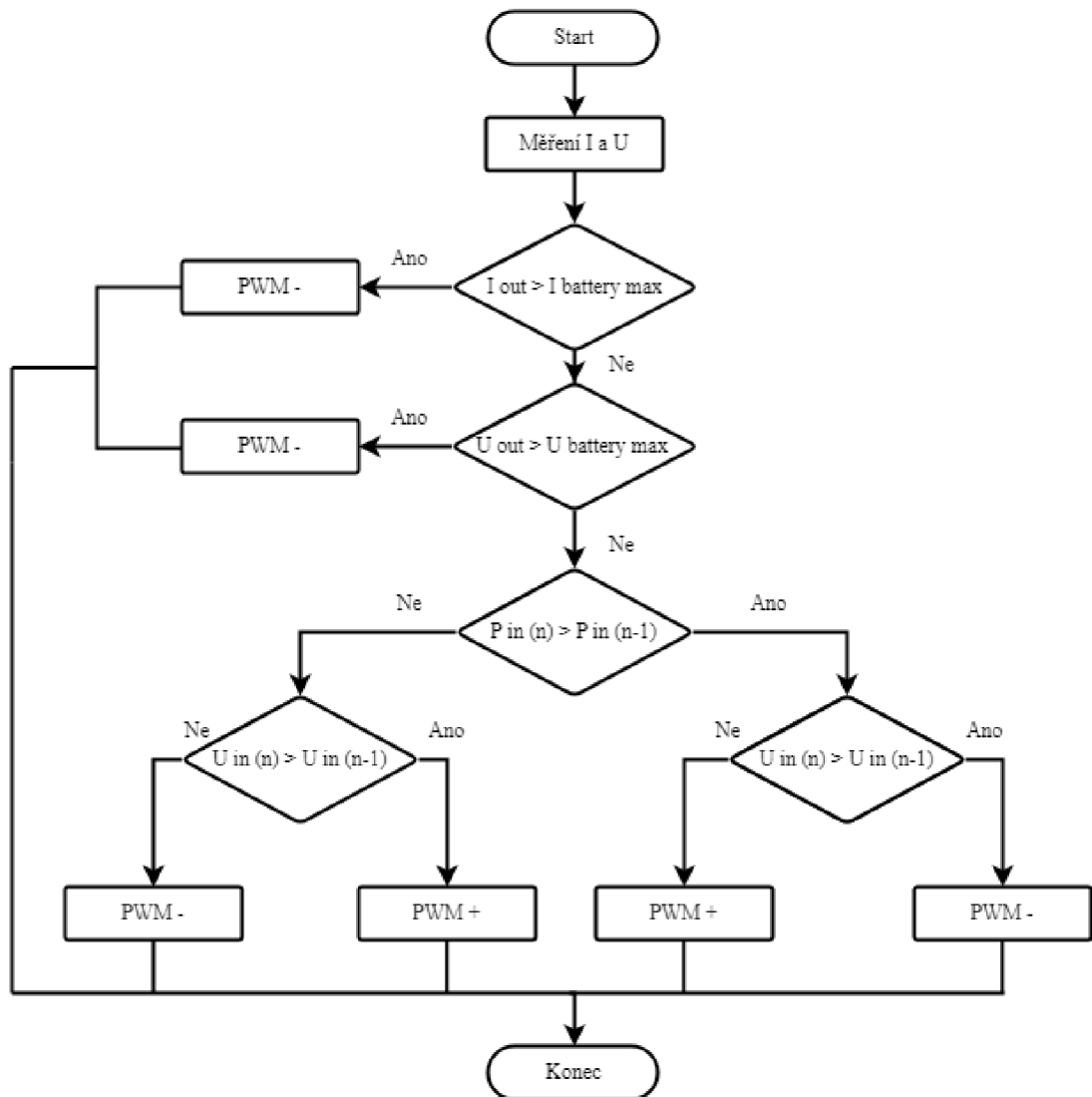


Obrázek 10-7 Vývojový diagram softwaru MPPT

Nabíjecí algoritmus

MPPT využívá algoritmus zvaný P&O (Perturbation and observation), jinak zvaný hill-climb [35]. Algoritmus porovnává výkon a napětí zdroje před změnou velikosti odebíraného výkonu a po změně odebíraného výkonu. Změna odebíraného výkonu se provádí změnou střídavého PWM signálu. Nadřazeným algoritmem je ochranný algoritmus, který se stará o CC – CV charakteristiku nabíjení baterie.

V první fázi P&O dochází k postupnému zatěžování panelu, výkon roste a napětí klesá. Zdroj energie se zatěžuje do bodu, než začne odebíraný výkon klesat (dochází tedy k poklesu napětí a poklesu výkonu). Poté se reverzní algoritmus vrací zpět až do bodu, kdy dojde k nalezení maximálního výkonového bodu (MPP).



Obrázek 10-8 Vývojový diagram algoritmu MPPT hill-climb

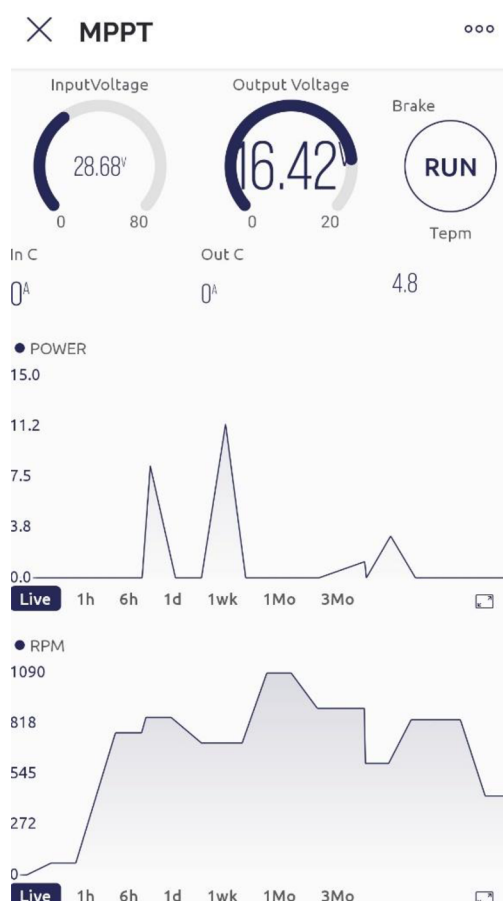
10.4 Obslužná aplikace

Pro monitoring větrné elektrárny je použita IoT platforma Blynk IoT. Tato platforma poskytuje možnost online monitoringu, vytvoření vlastní webové konzole a rovněž poskytuje cloudové služby pro ukládání a zpracovávání dat v cloudovém prostoru. Komunikace mezi cloudem a ESP32 probíhá pomocí Wifi. Monitorování probíhá přes jednotlivé widgety.

V neplacené verzi poskytuje Blynk IoT:

- Připojení až dvou zařízení
- Připojení až pěti uživatelů
- Maximální 10 datasteamů
- Maximálně 10 widgetů
- Přístup přes mobilní aplikaci
- Uložení dat na jeden týden

Bohužel, v neplacené verzi nelze provést export naměřených dat do CSV souboru. Další nevýhodou je, že v bezplatné verzi dochází k velké komprimaci historických dat, které se automaticky průměrují, čímž se může ztratit jejich vypovídající hodnota.



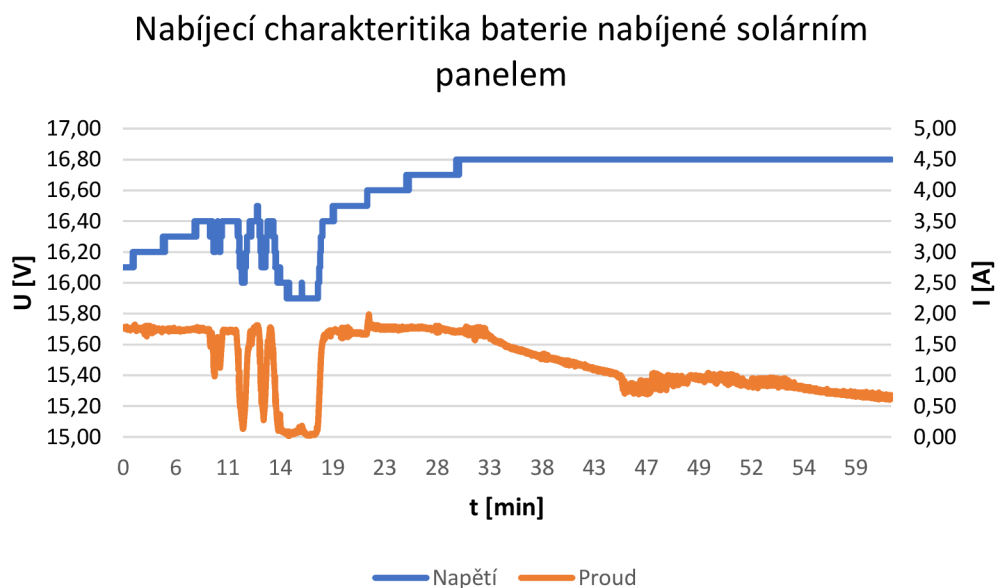
Obrázek 10-9 Ukázka prostředí mobilní aplikace vytvořené pomocí Blynk IoT

10.5 Testování nabíjecí charakteristiky

Články založené na Lithno iontovém chemismu vyžadují nabíjení nabíjecím cyklem, který je složen ze dvou fází. První fáze se označuje jako CC (constant current). V této fázi dochází k nabíjení článku konstantním proudem, jehož maximální velikost udává výrobce. Typicky se však pohybuje v rozmezí 0,5 C až 1 C. Článek se nabíjí konstantním proudem do té doby, než dosáhne určité hodnoty napětí (typicky 4,2 V). Při dosažení prahové hodnoty napětí má článek, který byl předtím plně vybit, typicky okolo 70 % své kapacity. Po dosažení tohoto napětí přechází nabíjecí cyklus do své druhé fáze označené zkratkou CV (constant voltage). V této fázi se na článku udržuje konstantní napětí, přičemž dochází k poklesu proudu. Konstantní napětí se na článku udržuje do té doby, než nabíjecí proud klesne pod stanovenou hodnotu, která bývá typicky 0,05 C a článek je plně nabit.

Nabíjecí charakteristika je testována na solárním panelu o výkonu 40 W. Pro testování jsou nabíjeny li-ion články LGCS318650 v zapojení 4P na 4S. Tyto články s jmenovitou kapacitou 2200 mAh lze, dle specifikací výrobce, nabíjet proudem až 0,97 C, což odpovídá proudu 2150 mA. Jmenovitá hodnota napětí je 3,7 V, maximální hodnota napětí 4,2 V [36]. V tomto zapojení je nominální napětí baterie 14,8 V, maximální nabíjecí napětí 16,8 V. Baterii lze nabíjet proudem až 8,6 A.

Při testování je MPPT nastaveno na maximální nabíjecí proud 4 A. Maximální nabíjecí napětí 16,8 V.



Obrázek 10-10 Nabíjecí charakteristika baterie nabíjené solárním panelem o výkonu 40 W

Ze změřené nabíjecí charakteristiky (Obrázek 10-10) je patrné, že MPPT splnilo nastavené podmínky nabíjení. V první fázi nabíjení se MPPT snaží nabíjet konstantním proudem, který nepřekročí nastavenou hodnotu, což šlo předpokládat, jelikož použitý solární panel není dostatečně výkonný, aby se dosáhlo maximálního nastaveného proudu. Zároveň však MPPT nezatěžovalo solární panel natolik, aby došlo k poklesu napětí na solárním panelu pod hodnotu napětí na baterii, což by vedlo k odpojení vstupu MPPT kvůli ochraně proti zpětnému proudu. Tato schopnost regulovat odebíraný výkon dle aktuálního dostupného výkonu je důležitá i pro provoz větrné elektrárny. Prostý měnič napětí by se snažil odebrat co nejvyšší výkon bez ohledu na to, že by zdroj příliš zatížil a stáhnul tak jeho napětí pod hodnotu napětí baterie. U solárního panelu se nic zásadního neděje, ale u větrné elektrárny by docházelo k jejímu brzdění, takže by se větrná elektrárna nemohla při nižších rychlostech větru roztočit.

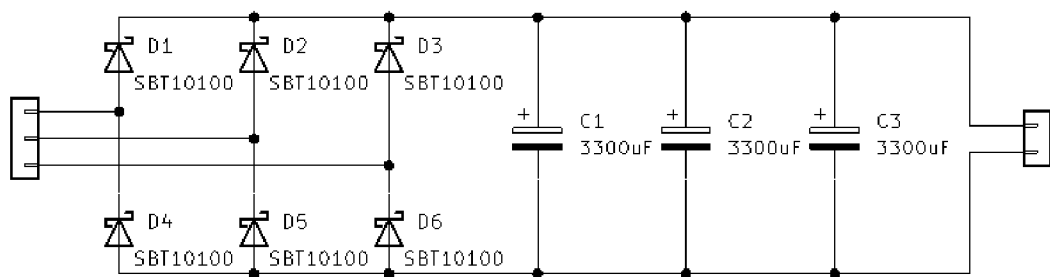
V ideálním případě by průběh nabíjecího proudu byl konstantní až do hodnoty, kdy napětí na baterii dosáhne horního limitu baterie. Na průběhu nabíjecí charakteristiky je však patrné, že proud během nabíjení několikrát poklesl. To je způsobeno tím, že během měření byla lehká oblačnost, výkyvy v průběhu proudu, a tedy i v odebíraném výkonu, jsou způsobeny zastíněním panelu mrakem. Opět to ale demonstruje schopnost MPPT optimálně zatěžovat solární panel dle jeho dostupného výkonu.

Důležité také je, že napětí na výstupu nepřesáhlo požadovanou hodnotu 16,8 V. Li-ion baterie jsou citlivé na přebíjení a vyšší hodnota by je tedy mohla poškodit.

10.6 Pomocná elektronika větrné elektrárny

Jelikož generátor vytváří střídavé napětí a MPPT pracuje se stejnosměrným napětím, je nutné použít usměrňovač. Za vhodný byl zvolen trojfázový pasivní usměrňovač, který je tvořen šesti diodami (Obrázek 10-11). Tento usměrňovač nevyžaduje pro svou funkci střední vodič. Při průtoku proudu usměrňovačem je vždy vodivá jedna dioda na horní straně usměrňovače a jedna dioda na spodní straně usměrňovače. Výsledné usměrněné napětí má při nezatíženém stavu amplitudovou hodnotu sruženého napětí, od kterého se odečte dvojnásobek napětí diody v otevřeném stavu (U_D), které se typicky pohybuje kolem hodnoty 0,8 – 1 V (pro Schottkyho diody schopné přenášet proud v řádu ampér). Frekvence usměrněného napětí je šestkrát větší než frekvence vstupního napětí.

Kondenzátory na výstupu usměrňovače slouží k vyhlazení výstupního napětí. Jejich kapacita se volí úměrně k požadovanému zvlnění výstupního napětí při požadovaném výstupním proudu z usměrňovače. Hodnota kapacity se vypočítá podle vzorce (7.1) [37].



Obrázek 10-11 Schéma trojcestného usměrňovače

$$C \geq \frac{I}{f \times \Delta V} \quad (7.1)$$

Z tohoto vzorce lze vypočítat zvlnění napětí (ΔV) během testování generátoru na odporové zátěži (Obrázek 9-11) při zátěži 10,2 A.

$$\Delta V = \frac{C \times f}{I}$$

$$\Delta V = \frac{3 \times 3300 \times 10^{-6} \times 440}{10,2}$$

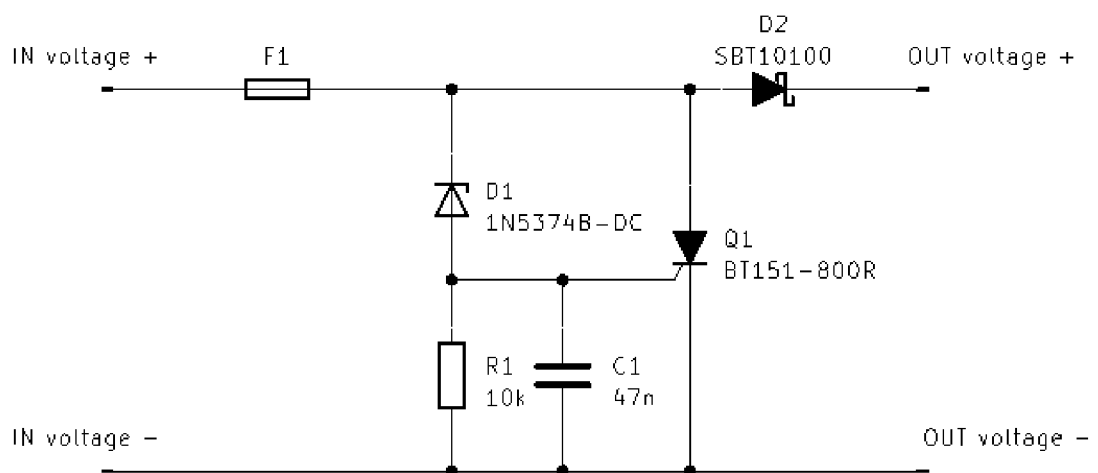
$$\Delta V = \frac{3 \times 3300 \times 10^{-6} \times 440}{10,2}$$

$$\Delta V = 0,42 \text{ V}$$

Čím menší zvlnění napětí, tím méně je ovlivněno měření MPPT regulátoru a chod MPPT je plynulejší.

Díky velkému převodovému stupni mezi osou turbíny a generátorem (1:13) hrozí, že generátor dosáhne vyšších otáček, než je bezpečné (testováno na 3000 otáček za minutu). Díky velkým otáčkám hrozí nejen poškození generátoru, ale i indukce příliš vysokého napětí (nad 80 V), které by mohlo poškodit MPPT. Z tohoto důvodu je vhodné použít přepětovou ochranu. K tomuto účelu lze využít obvod který se nazývá „crowbar“ [38].

Při překročení Zenerova napětí Zenerovy diody D_1 dochází k otevření tyristoru Q_1 , přes který dochází ke zkratu napájecího napětí. Tento zkratový proud přepálí pojistku F_1 , čímž dojde k odpojení chráněného obvodu od zdroje. Diody D_2 slouží k tomu, aby se proudový ráz nešířil do chráněného obvodu. Rezistor R_1 slouží jako pull down rezistor a kondenzátor C_1 slouží k odfiltrování rušení tak, aby nedošlo k nechtěnému otevření tyristoru. Velikost napětí, při kterém dochází k odpojení obvodu je dána Zenerovým napětím diody D_1 . Použitá dioda 1N5374B má Zenerovo napětí 75 V.



Obrázek 10-12 Přepětový ochranný obvod "crowbar"

11 TESTOVÁNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Testování větrné elektrárny v domácích podmínkách je poměrně obtížný proces. V zásadě se nabízejí dvě možnosti, testování v „laboratorních“ podmínkách a testování v reálném provozu.

Testováním v „laboratorních podmínkách“ se rozumí testování pomocí stabilního zdroje proudění vzduchu. Ideální je větrný tunel. Ten je však v domácích podmínkách těžko dosažitelný. Další možností je testování pomocí ventilátoru či fukaru. Je však obtížné opatřit si ventilátor s dostatečnými rozměry a dostatečnou rychlostí proudění vzduchu.

11.1 Testování v simulovaném prostředí

Testování bylo provedeno pomocí podlahového ventilátoru PB 230, který má malou výstupní plochu proudu vzduchu (45x11 cm), ale dokáže foukat rychlostí až 12 m/s. Ventilátor však nepokryje svým proudem vzduchu celou plochu větrné turbíny, pouze 1/13,3. Je nutné použít přepočít výkonu (P_p), který vychází ze vzorce (1.2), ze kterého vyplývá, že výkon větrné turbíny lineárně roste s plochou větrné turbíny. Vliv na velikost výkonu větrné elektrárny mají rovněž mechanické ztráty. Největší podíl na velikosti ztrát má ztráta vlivem tření řetězu a v případě pokrytí pouze části větrné turbíny proudem vzduchu, rovněž odpor stojatého vzduchu na zbytek větrné turbíny. Poměr ztrát způsobených vlivem tření řetězu, vzhledem k výkonu větrné turbíny vyvolaným proudem vzduchu, se z rostoucí plochou pokrytí zmenšuje. Rovněž ztráty vlivem stojatého vzduchu se zmenšují, ne-li odstraní. Proto je předpoklad, že takto vypočtená účinnost větrné elektrárny bude nižší než reálná účinnost při plném pokrytí plochy lopatek proudem vzduchu.

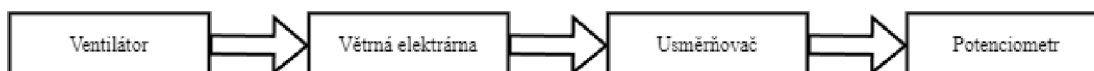
Při měření elektrického výkonu je jako zátěž použit MPPT měnič a poté potenciometr, pomocí kterého se hledá maximální bod výkonu. Blokované zapojení během měření viz. (Obrázek 11-1).

Při testování s MPPT není dodávaný výkon dostatečný k tomu, aby MPPT nabíjelo baterii. Postupným zatěžováním došlo k poklesu napětí pod hranici baterie, čímž došlo k odpojení MPPT měniče.

Při testování s potenciometrem jsou naměřeny následující hodnoty (Tabulka 6).

Tabulka 6 Naměřené hodnoty při testování větrné turbíny pomocí ventilátoru

n [ot./min.]	v [m/s]	P_t [W]	U_z [V]	I_z [mA]	P_z [W]	P_p [W]	μ [%]
33	10	360,0	9,34	80,1	0,748	9,95	2,83
36	11	479,2	9,98	130,0	1,297	17,26	3,68
37	12	622,1	10,9	165,0	1,799	23,92	3,93



Obrázek 11-1 Blokované ztvárnění uspořádání komponent během testování

11.2 Testování v reálném provozu

Testovací provoz probíhal od 11.5.2023 do 19.5.2023. Cílem testovacího provozu je zjistit funkčnost větrné elektrárny a závislost vyráběné elektrické energie na rychlosti větru. Větrná elektrárna byla umístěna na nejvíce větrném místě, které bylo dostupné, na otevřené pastvině na kopci (Obrázek 11-2). K MPPT větrné elektrárny je připojena baterie složená z Li-ion článků LGCS318650 v zapojení 4P na 4S. Baterie je dimenzována tak, aby bylo možno efektivně vykrýt proudové špičky větrné elektrárny. Maximální nabíjecí proud jednoho článku je 0,97 C. Kapacita článku je 2200 mAh. Maximální nabíjecí proud takové baterie je 8,5 A (při nominálním napětí je to 125 W). Pokud by baterie byla menší kapacity, nebo pokud by se baterie nacházela v nabitém stavu, nebylo by možné efektivně odebírat elektrický výkon, větrná elektrárna by nebyla zatěžována a mohlo by dojít k přetáčení či odstavení větrné turbíny.

Větrná elektrárna tedy pracovalo v off-grid režimu.



Obrázek 11-2 Ukázka z testování větrné turbíny v reálném provozu

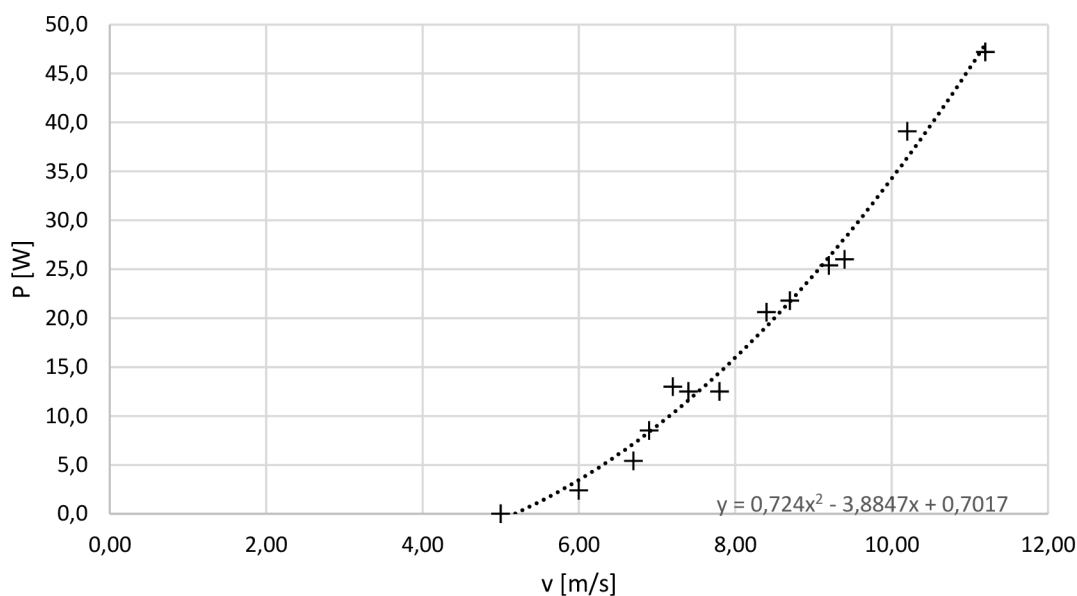
Větrná elektrárna má díky odporu řetězového převodu problém roztočit se při nízkých rychlostech větru do 4 m/s. Dalším poznatkem je, že rychlost větru blízko povrchu země má velmi kolísavý charakter (Obrázek 11-3). Kolísavost větru je ovlivněna okolním reliéfem, i relativně vzdálené objekty v okolí, jako například budovy či stromy, narušují proudění vzduchu a způsobují turbulence proudění, takže rychlost větru začne kolísat. Minimalizace tohoto kolísání je možná umístěním větrné elektrárny nad překážky v okolí, například na stožár. Stavba kvalitního stožáru je však ekonomicky velmi náročná.



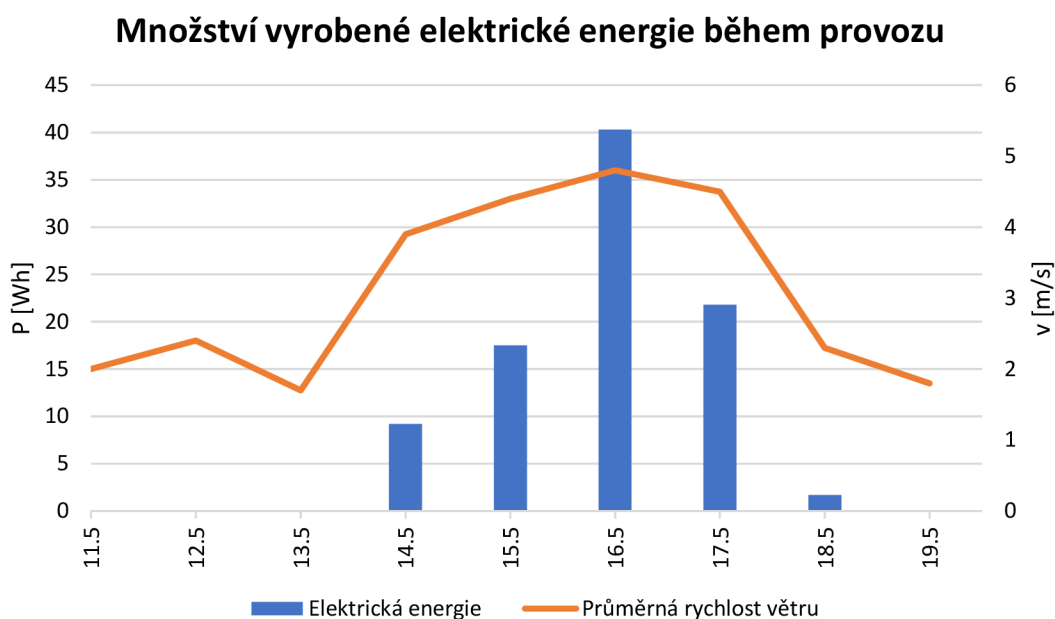
Obrázek 11-3 Ukázka kolísání rychlosti větru v m/s (Z vytvořené mobilní aplikace)

Největší naměřený špičkový výkon je 47,2 W, který větrná elektrárna dodává při rychlosti 11,2 m/s. Celková účinnost při maximálním výkonu je 9,3 % (vzhledem k teoretické účinnosti větru s rychlostí 11,2 m/s). Z naměřených hodnot výkonu je stanovena závislost rychlosti větru na výkonu (Obrázek 11-4).

Průběh výkonu větrné turbíny v závislosti na rychlosti větru

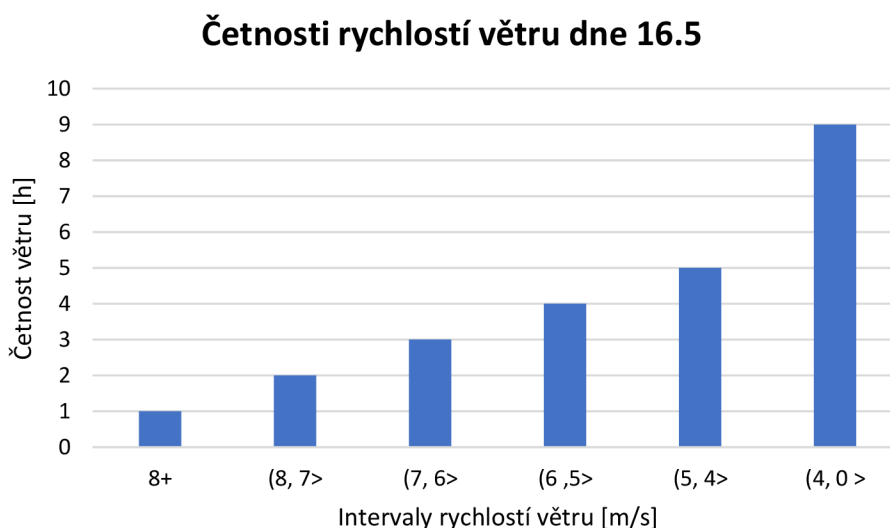


Obrázek 11-4 Závislost výkonu a otáček větrné elektrárny na rychlosti větru



Obrázek 11-5 Množství vyrobeného elektrického výkonu během testovacího provozu

Na výše uvedeném obrázku (Obrázek 11-5) je znázorněno množství vyrobené elektrické energie za den a průměrná rychlost větru během dne. Průměrná rychlost větru však dostatečně přesně nespecifikuje větrné podmínky během sledovaného období. Jaké byly povětrnostní podmínky během dne je lépe patné z hodnot četností rychlostí větru. Obrázek 11-6 udává, kolik hodin foukalo dne 16.5. a jakou rychlostí. Větrná elektrárna začíná dodávat elektrický výkon od 6 m/s. V provozu tedy byla okolo 6 hodin z celého dne.



Obrázek 11-6 Četnosti rychlosti větru ze dne 16.5

12 NÁKLADY NA STAVBU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Souhrnné náklady na stavbu domácí mikro větrné elektrárny jsou uvedeny níže (Tabulka 7). Největší položku nákladů tvoří náklady na stavbu generátoru, jelikož silné permanentní magnety N35 jsou drahé. Další významnou položkou jsou náklady na MPPT regulátor. Doporučením je kupovat pouze originální součástky, zejména integrované obvody. Například neoriginální mosfet driver IR2104 nedokáže příslušným způsobem řídit výkonové mosfety a může dojít až k úplnému zničení celého MPPT měniče.

Hlavní položkou v nákladech na lopatku je pak cena skelné rohože a epoxidové pryskyřice.

Podrobný rozpis materiálů je součástí přiložených souborů (Seznam příloh).

Tabulka 7 Souhrnné náklady na stavbu domácí mikro větrné elektrárny

Položka	Celkové náklady [Kč]
Turbína (ocel)	2200
Lopatky	4770
Lakování	850
Převod	740
Brzda	370
Generátor	5800
MPPT	4580
Usměrňovač	870

Celkem

20180

13 POROVNÁNÍ S VĚTRNOU ELEKTRÁRNOU Z BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

V porovnání s větrnou elektrárnou vytvořenou v rámci bakalářské práce, dosahuje nová větrná elektrárna většího elektrického výkonu. Nová konstrukce větrné elektrárny je rovněž mechanicky odolnější, jelikož je vytvořena z oceli, lopatky jsou vyrobené kombinací kompozitu a hliníku. VE z bakalářské práce byla vytvořena z PLA metodou 3D tisku. VE vytvořená v rámci diplomové práce využívá k výrobě elektrické energie synchronní generátor s permanentními magnety, který je schopný dodávat mnohem větší výkon (maximální naměřený 148 W při 12 V), VE z bakalářské práce využívala jako generátor krokový motor, který je schopný dodat maximální výkon 5 W při 12 V). Dalším rozdílem je provozní napětí. VE z bakalářské práce používala 5 V provozní napětí, VE z diplomové práce je schopna pracovat s použitelnějším napětím 12 V či 14,2 V. Pokrok je i ve způsobu monitoringu větrné elektrárny. VE z bakalářské práce používala k archivaci dat SD kartu, VE z diplomové práce umožňuje online monitoring a ukládání dat na cloudovém úložišti. VE z bakalářské práce využívala pro změnu DC/DC napětí asynchronní měnič bez MPPT, kdežto VE z diplomové práce používá synchronní buck měnič s MPPT funkcí. Porovnání obou větrných elektráren je přehledněji zpracováno v (Tabulka 8) [39].

Tabulka 8 Porovnání parametrů VE z bakalářské práce a VE z diplomové práce

	Bakalářská práce	Diplomová práce
Větrná turbína	Horizontální	Vertikální
Materiál lopatek	PLA	Kompozit + hliník
Materiál náboje	PLA	Ocel
Generátor	Krokový motor	Synchronní s PM
Změřený maximální výkon [W]	0,6 W	47,2 W
DC-DC měnič	Asynchronní	Synchronní + MPPT
Monitoring	Ukládání na SD kartu	Web + aplikace



Obrázek 13-1 Větrná elektrárna z bakalářské práce [39]

14 ZÁVĚR

V diplomové práci na téma domácí mikro větrná elektrárna je řešena možnost konstrukce a výroby mikro větrné elektrárny v domácích podmínkách. Na úvod diplomová práce uvádí nezbytnou teorii o větru, výkonu větru a vlivu okolí na rychlost větru. Jsou uvedeny typy běžně používaných větrných elektráren, dále je uveden vznik odporové a vztlakové síly, a jelikož se při výrobě větrné elektrárny používal 3D tisk, je rovněž uveden i stručný souhrn běžně používaných materiálů pro FDM 3D tisk.

Kapitola 8 pojednává o zvolené větrné turbíně LENZ2. Tato větrná turbína využívá kombinaci odporové a vztlakové síly a byla zvolena kvůli očekávání, že bude dodávat mechanický výkon už při malých rychlostech větru. Lopatka je tvořena překližkovou kostrou, přes kterou se lopatka upevňuje k náboji turbíny. Styčnou plochu s větrem tvoří hliníkový plech pokrytý vrstvou kompozitu (skelná tkanina a epoxidová pryskyřice). Takto vytvořená lopatka má dostatečnou pevnost a tuhost při zachování malé hmotnosti přibližně 3,5 kg. Osa a podstava větrné turbíny je vyrobena z oceli. Pro možnost monitorování otáček větrné turbíny je použit magnetický senzor otáček s Hallovou sondou. Kvůli rozdílným pracovním otáčkám větrné turbíny a generátoru je použit řetězový převod. Větrná turbína disponuje možností odstavení pomocí mechanické kotoučové brzdy.

Pro přeměnu mechanické energie na elektrickou je použit „core less“ synchronní generátor s permanentním magnetem. Rotor generátoru tvoří 12 permanentních magnetů N35. Generátor je třífázový, fáze jsou zapojeny do hvězdy. Díky využití sdruženého napětí je generátor schopný generovat dostatečně velké střídavé napětí při nižších otáčkách. Každá fáze je tvořena šesti cívkami s počtem závitů 70. Správnost návrhu byla ověřena měřením skutečně generovaného napětí a rovněž počítačovou simulací pomocí softwaru ANSYS MAXWELL (Obrázek 9-9). Generátor byl testován pomocí autožárovky. Největšího výkonu bylo dosaženo při zapojení dvou žárovek sériově (148 W). Bylo ověřeno, že generátor je schopný dodávat elektrický proud o hodnotě větší jak 10 A. Největší účinnost generátoru byla stanovena na hodnotu 85,44 %, přičemž se uvažuje poměr dodané elektrické energie ke ztrátám vlivem vlastního odporu generátoru. Jelikož generátor neobsahuje feromagnetický materiál, nevznikají v něm ztráty vlivem hystereze a vířivých proudů v železe, hlavní položku ztrátového výkonu tedy tvoří ztráta ve vinutí.

Další část se zabývá MPPT měničem. Jedná se o synchronní DC-DC měnič. V kapitole 10 je stručně popsán použitý hardware, uveden vývojový diagram programu a popsán algoritmus hill climb, který MPPT měnič používá k hledání bodu maximálního výkonu. MPPT měnič má díky použitým tranzistorům a napájecím integrovaným obvodům maximální povolené napětí na vstupu 80 V. Maximální vstupní proud je 30 A. MPPT disponuje možností monitoringu otáček větrné turbíny a připojením anemometru i možností měření rychlosti větru. Dalším rozšířením je možnost připojení servomotoru pro automatické ovládání brzdy větrné turbíny. MPPT disponuje nabíjecím algoritmem CC-CV. Nabíjecí algoritmus je testován pomocí solárního panelu a je zjištěno, že MPPT splňuje požadavky pro bezpečné nabíjení baterií. Pro usměrnění třífázového napětí je vyroben diodový usměrňovač, u kterého je spočítáno zvlnění napětí vlivem velikosti odebíraného proudu. Pro zamezení přepětí na vstupu MPPT měniče je vyrobena přepěťová ochrana, která v případě překročení stanoveného napětí odpojí MPPT od zdroje.

Větrná elektrárna s výše uvedenými komponenty je zkonstruovaná a bylo provedeno testování. Nejprve se větrná elektrárna testovala pomocí ventilátoru. Je však problém sehnat takový ventilátor, který by pokryl celou plochu větrné turbíny a zároveň by byl schopný dodat proud vzduchu s dostatečnou rychlostí. Nakonec byl zvolen podlahový ventilátor PB 230, který je schopný foukat rychlostí až 12 m/s. Ventilátor však svou plochou nepokryl celou plochu lopatek větrné turbíny. Jelikož však výkon větru, a tedy i výkon větrné turbíny, je lineárně závislý na ploše, lze ze zjištěných výkonů dopočítat výkon, který by byl generován, pokud by byla plocha pokryta celá. Samozřejmě je rozdíl v poměru ztrát při pokrytí části lopatky a celé lopatky. Například poměr odporu řetězového převodu a odporu stojatého vzduchu na lopatku se bude zmenšovat s větším pokrytím lopatky. Takto naměřená účinnost je tedy nejmenší možná a při pokrytí celé plochy lopatky se účinnost bude zvedat. Měření výkonu bylo provedeno pomocí proměnné odporové zátěže. Nejvyšší takto naměřená účinnost je při rychlosti vzduchu 12 m/s (3,93 %).

Testovací provoz byl proveden v období od 11.5.2023 do 19.5.2023. Testovací provoz byl proveden kvůli zjištění skutečné závislosti vyráběné elektrické energie na rychlosti větru. Největší naměřený dodávaný výkon byl 47,2 W při rychlosti větru kolem 11 m/s. Bylo zjištěno, že větrná elektrárna nereaguje na rychlosti větru nižší jak 4 m/s. Použitý řetězový převod svým třením mezi články řetězu a řetězovými koly brání v roztočení větrné turbíny. Vliv na rychlost, při které se větrná elektrárna roztáčí, má i použitá brzda, která rovněž způsobuje jisté tření, i když není aktivovaná. Bez osazení brzdového třmenu a řetězu se větrná elektrárna roztáčí i při velmi nízkých rychlostech větru. K snížení rozběhové rychlosti by mohlo přispět také celkové odlehčení rotoru větrné elektrárny (nahradit ocelové části hliníkovými, nedělat profily lopatek z plné překližky ale z překližky s kapsou, či použít celokompozitové lopatky).

I když celkové množství vyrobené elektrické energie nestačilo ani k pokrytí vlastní spotřeby elektroniky, povedlo se ověřit funkčnost navrhovaného konceptu domácí mikro větrné elektrárny, což bylo cílem této diplomové práce. Nutno podotknout, že se stále jedná o prototyp, proto i nadále bude probíhat další vývoj větrné elektrárny k navýšení její účinnosti a spolehlivosti. Během provozních testů bylo například zjištěno, že ložiska uložení rotoru mají tendenci k reznutí, je tedy nutné provést dodatečné zakrytování. K snížení vlastní spotřeby MPPT měniče by bylo výhodné doplnit software o režim spánku. V období, kdy nefouká, není nutný plný chod všech funkcí MPPT měniče. Samotná účinnost větrné elektrárny by mohla vzrůst po vyhlazení ploch lopatek, jelikož dosavadní kompozitní struktura je poměrně hrubá.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Modely pro 3D tisk
Příloha 2	Výkresová dokumentace větrné elektrárny
Příloha 3	Schémata a DPS

LITERATURA

- [1] RYCHETNÍK, Václav; PAVELKA, Jiří a JANOUŠEK, Josef. *Větrné motory a elektrárny*. 1.vydání. Praha: ČVUT, 1997, 199 s. ISBN 80-010-1563-7.
- [2] HUSA, Jiří. Husa. J.: *Digitální učebnice v oborové didaktice*. Praha: IEC CULS Prague, 2018. 1. ISBN 978-80-213-2840-2.
- [3] CROME, Horst. *Technika využití energie větru: Svépomocná stavba větrných zařízení*. Ostrava-Plesná: HEL, 2002. ISBN ISBN 80-85167-19-4.
- [4] SMOLKA, Václav. Měření a zaznamenávání větru. *In-pocasi.cz* [online]. Česká republika, 2016, 11.03.2016 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vitr-11.3.2016/>
- [5] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. *Základy fyziky letu. Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 - 2020 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/130-zaklady-fyziky-letu>
- [6] Odpor prostředí. *Edu.techmania.cz* [online]. Česká republika, 2021, 2021 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz>
- [7] Vít a jeho využití. Svět energie: *Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Česká republika, 2020 [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarny-podrobne/vitr-a-jeho-vyuziti/fyzikalni-principy>
- [8] STRÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. 1. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/downloads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [9] Prusament PLA Blend Pearl White 970g. *Prusa3d* [online]. Česká republika, 2022 [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-pla-pearl-white-blend-970g/>
- [10] Černá EasyABS tisková struna (filament) 1kg. *Prusa3d* [online]. Česká republika, 2022 [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/cerna-easyabs-tiskova-struna-filament-1kg/>

- [11] Prusament PETG Jet Black 1kg. *Prusa3d* [online]. Česká republika, 2022 [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-petg-jet-black-1kg/>
- [12] Prusament PC Blend Natural 970g. *Prusa3d* [online]. Česká republika, 2022 [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-pc-blend-natural-970g/>
- [13] Fiberthree F3 PA Pure Pro Filament 500g. *Prusa3d* [online]. Česká republika, 2022 [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/fiberthree-f3-pa-pure-pro-filament-500g/>
- [14] Prusament PC Blend Carbon Fiber Black 800g. *Prusa3d* [online]. Česká republika, 2022 [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-pc-blend-carbon-fiber-black-800g-2/>
- [15] 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.
- [16] Homemade-vertical-axis-wind-turbine-made-from-household-scrap: The DIY Live. *The-diy-life.com* [online]. 2017, 2017 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.the-diy-life.com/homemade-vertical-axis-wind-turbine-made-from-household-scrap/>
- [17] HAU, Erich. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. 2nd [English] ed. New York: Springer, c2006, 783 p. ISBN 35-402-4240-6.
- [18] *Renewablesystemstechnology.com* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://renewablesystemstechnology.com/project-blog/how-i-built-a-3-kw-off-grid-wind-turbine>
- [19] Lenz2 calculator. *Vawt* [online]. Rumunsko, 2015, 2.2.2015 [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://vawt.ro/2015/02/02/lenz2-design/>
- [20] CROME, Horst. *Technika využití energie větru: Svépomocná stavba větrných zařízení*. Ostrava-Plesná: HEL, 2002. ISBN 80-85167-19-4.

- [21] Instructables.com [online]. Pákistán [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/DIY-Wind-Generator/>
- [22] Otherpower.com [online]. EU [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://otherpower.com/bladecarving.html>
- [23] KRÁLOVÁ, Magda. Elektromagnetická-indukce. *Techmania science center* [online]. [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektromagneticka-indukce/elektromagneticka-indukce>
- [24] CHMELÍK, Karel. *ASYNCHRONNÍ A SYNCHRONNÍ ELEKTRICKÉ STROJE*. 1. Ostrava, 2001. ISBN 80 – 7078 – 857 - 7.
- [25] ČERMÁK, Jiří. Synchronní stroje - konstrukce, princip a použití. *Oenergetice.cz* [online]. 2015, 22. květen 2015 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/synchronni-stroje-konstrukce-princip-a-pouziti>
- [26] KOVAL, Zdeněk. Ele 1 – RLC v sérii a paralelně, rezonance, trojfázová soustava, trojfázové točivé pole, rozdělení elektrických strojů. *Spszengrova* [online]. Česká republika, 31.10.2013 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/Ele-1-RLC-v-s%C3%A9ri%C3%AD-a-paraleln%C4%9B-rezonance-troj%C3%A1zov%C3%A1-soustava-troj%C3%A1zov%C3%A9-to%C4%8Div%C3%A9-pole-rozd%C4%9Blen%C3%AD-el.-stroj%C5%AF_UT.pdf
- [27] *SELOS: magnety* [online]. Česká republika, 2020 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.magnety.cz/>
- [28] ŠTENCL, M. Návrh generátoru s permanentními magnety. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [29] Úvod do střídavých strojů. *Katedra elektrických pohonů a trakce FEL ČVUT v Praze* [online]. Praha: ČVUT [cit. 2022-12-23]. Dostupné z: <https://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/AD1B14SP1/4%20Uvod%20do%20stridavych%20stroju%20SP1.pdf>

- [30] ŠTĚPÁN, Jakub. *Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko*. Plzeň, 2009. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ.
- [31] POSPÍŠIL, Roman. *Návrh generátoru s permanentními magnety pro malou větrnou elektrárnu*. Ostrava, 2014. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky Katedra Elektrotechniky. Vedoucí práce Petr Kačorov.
- [32] ASCAS. 1kW Arduino MPPT Solar Charge Controller (ESP32 + WiFi). *AUTODESK instructables* [online]. Filipíny, 2021, 2021 [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/DIY-1kW-MPPT-Solar-Charge-Controller/>
- [33] Comparing a Step Down Converter vs Voltage Regulator. *Ultra Librarian* [online]. 2020, 4.8.2020 [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.ultralibrarian.com/2020/08/04/comparing-a-step-down-converter-vs-voltage-regulator-ulc#:~:text=A%20step%20down%20converter%E2%80%94also,connected%20devices%20or%20electrical%20load.>
- [34] AUTHORCADENCE PCB SOLUTIONS. Synchronous vs. Nonsynchronous DC/DC Conversion. *CADENCE PCB DESIGN & ANALYSIS* [online]. 2023, 2023 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/synchronous-vs-nonsynchronous-dc-dc-conversion>
- [35] FAPI, Claude Bertin Nzoundja, Patrice WIRA a Martin KAMTA. Real-Time Experimental Assessment of Hill Climbing MPPT Algorithm Enhanced by Estimating a Duty Cycle for PV System. *HALL OPEN SCIECE* [online]. 22.6.2020 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://hal.science/hal-02878233/document#:~:text=The%20hill%20climbing%20algorithm%20uses,during%20periods%20of%20constant%20radiation.>
- [36] LG CHEM. *PRODUCT SPECIFICATION* [online]. KOREA, 2011, 2.1.2011 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/4869.pdf>
- [37] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-411-5.

- [38] ASWINTH RAJ. Crowbar Circuit. *Circuitdigest.com* [online]. 2018, 13.6.2018 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/electronic-circuits/crowbar-circuit-diagram>
- [39] ŠMOL, Vojtěch. *Monitorovací systém malé větrné elektrárny* [online]. Brno, 2021 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134514>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Vyroubal..