



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

MONITOROVACÍ SYSTÉM MALÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

MONITORING SYSTEM OF A SMALL WIND POWER PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Šmol

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Vojtěch Šmol

ID: 211243

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Monitorovací systém malé větrné elektrárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte možnost přeměny větrné energie na elektrickou v domácích podmínkách. Pro malou větrnou elektrárnu vyrobenou pomocí 3D tisku navrhnete monitorovací systém pro sledování aktuálně vyráběné energie a sběr dat. Pro realizaci použijte platformu arduino. Vytvořte 3D model turbíny a příslušnou výrobní dokumentaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 29.1.2021

Termín odevzdání: 3.6.2021

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

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh monitorovacího systému malé větrné elektrárny pomocí platformy Arduino a externích modulů. Malá větrná elektrárna je realizována metodou 3D tisku.

Klíčová slova

Monitorovací systém, malá větrná elektrárna, Arduino, 3D tisk

Abstract

This bachelor thesis focuses on the design of the monitoring system of small wind power generator with the use of platform Arduino and external modules. Small wind turbine is implemented using the 3D printing method.

Keywords

Monitoring system, small wind power generator, Arduino, 3D printing

Bibliografická citace:

ŠMOL, Vojtěch. *Monitorovací systém malé větrné elektrárny* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-06-02]. 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..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Monitorovací systém malé větrné elektrárny jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 bakalářské 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.....	14
2	Větrné elektrárny.....	15
2.1	Vznik větru.....	15
2.2	Druhy větrných motorů.....	16
2.2.1	Odporové větrné motory.....	16
2.2.2	Vztlakové větrné motory s vertikální osou otáčení.....	18
2.2.3	Vztlakové větrné motory s horizontální osou otáčení.....	20
2.2.4	Větrné motory pracující na principu Magnuskova jevu.....	22
2.3	Třílopatkové vztlakové motory s horizontální osou otáčení.....	23
2.3.1	Lopatky.....	23
2.3.2	Náboj rotoru.....	26
2.3.3	Generátor.....	26
2.3.4	System natáčení stroje.....	27
2.3.5	Stožár.....	27
2.4	Mikroelektrárny.....	28
3	Cíle bakalářské práce.....	31
4	Konstrukce mikro větrné elektrárny.....	32
4.1	Lopatka.....	33
4.2	Náboj rotoru.....	34
4.3	Generátor.....	35
4.4	Elektrické zapojení a usměrňovač.....	36
5	Monitorovací systém větrné elektrárny.....	37
5.1	Teoretický výkon a otáčky VE.....	37
5.2	Měření napětí a proudu při stanovených otáčkách.....	39
5.3	Hardware monitorovacího zařízení.....	42
5.4	Software monitorovacího zařízení.....	44
5.5	DPS pro monitorovací zařízení.....	46
5.6	Realizované monitorovací zařízení.....	48
6	Rozpočet větrné elektrárny a monitorovacího systému.....	50
7	Testování provozu větrné elektrárny.....	51
7.1	První zkušební provoz.....	51

7.2	Druhý zkušební provoz	53
7.3	Třetí zkušební provoz.....	55
8	Simulace proudění vzduchu	59
9	Shrnutí bakalářské práce	61
10	Závěr	62
	Literatura.....	64

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

VM ... větrný motor
VE ... větrná elektrárna
VVM ... vertikální větrné motory
kW... kilowatt
ot./min ... otáčky za minutu
m/s ... metr za sekundu
HVE... horizontální větrná elektrárna
MHVE... mikro horizontální větrná elektrárna
V ... Volt
ČR ... Česká republika
W ... Watt
Kč ... Koruna česká
m ... metr
U₀ ... napětí naprázdno
I_k ... proud nakrátko
IO ... integrovaný obvod

Symboly:

U	...	napětí	[Ω]
I	...	proud	[A]
P	...	výkon	[W]
v	...	rychlost	[m/s]
n	...	otáčky	[ot./min]
D	...	průměr	[m]
λ	...	koeficient rychloběžnosti	[%]
σ	...	hustota	[kg/m ³]
S	...	plocha	[m ²]

Konstanty:

b _k	Betzův koeficient	0,5926
----------------	-------------------	--------

Seznam obrázků

Obrázek 1 Globální cirkulace atmosféry [2].....	15
Obrázek 2 Mističkový anemometr [3]	16
Obrázek 3 Savoniův větrný motor [3]	17
Obrázek 4 Další typy odporových větrných motorů [3]	17
Obrázek 5 Proudění vzduchu kolem křídla [3]	18
Obrázek 6 Přehled typů vztakových rotorů s jejich výkony a roky návrhu [6].....	19
Obrázek 7 Větrné "westernové" kolo [7].....	20
Obrázek 8 Čtyřlístová větrná elektrárna (vlevo) a jednolístová větrná elektrárna (vpravo) [8]	21
Obrázek 9 Protiběžný větrný motor [1]	21
Obrázek 10 Magnuskův efekt [9]	22
Obrázek 11 Větrná turbína Vortes pracující na principu Magnuskova jevu [10].....	22
Obrázek 12 Řez lopatkou a ztvárnění působících sil [11]	23
Obrázek 13 Stručný přehled profilů do roku 1971 [12].....	24
Obrázek 14 Ukázka změny obvodové rychlosti, rychlosti obtékání a náběžného úhlu na délce lopatky [12].....	25
Obrázek 15 Řez listem větrné elektrárny [13]	25
Obrázek 16 Větrná elektrárna S400W 12V [17].....	28
Obrázek 17 Větrná turbína JPS-200 [18].....	29
Obrázek 18 Větrná elektrárna Savonius SV 400W 12V [19].....	30
Obrázek 19 Větrná turbína HYE 1000W [20]	30
Obrázek 20 Kompletní model VE.....	32
Obrázek 21 Lopatka VE	33
Obrázek 22 Regulační mechanismus natáčení lopatek umístěný v náboji rotoru	34
Obrázek 23 Generátor s antivibračním systémem	35
Obrázek 24 Schéma sériového zapojení	36
Obrázek 25 Schéma paralelního zapojení.....	36
Obrázek 26 Grafická závislost koeficientu rychloběžnosti na poměru ploch rotoru [23].....	38

Obrázek 27 Grafická závislost napětí naprázdno na otáčkách generátoru pro sériové zapojení vinutí.....	39
Obrázek 28 Grafická závislost proudu nakrátko na otáčkách generátoru pro sériové zapojení vinutí.....	40
Obrázek 29 Grafická závislost napětí a proudu na otáčkách generátoru v sériovém zapojení při dobíjení powerbanky 5 V.....	40
Obrázek 30 Grafická závislost výkonu na otáčkách generátoru v sériovém zapojení při dobíjení powerbanky 5 V	41
Obrázek 31 Blokové schéma monitorovacího systému	43
Obrázek 32 Diagram programu pro Arduino.....	45
Obrázek 33 Schéma monitorovacího zařízení a výkonové části z programu Eagle .	46
Obrázek 34 Ukázka DPS pro monitorovací systém větrné elektrárny	47
Obrázek 35 Monitorovací zařízení realizované na nepájivém poli	48
Obrázek 36 Výpis hodnot na LCD	49
Obrázek 37 Umístění větrné elektrárny na 4 m vysokém stožáru	51
Obrázek 38 Přestřížení čepu PP_1009_01 a následná deformace větrné elektrárny	52
Obrázek 39 Původní uložení čepu PP_3003_01 na valivých ložiskách	53
Obrázek 40 Uložení čepu PP_3003_01 v náboji rotoru za použití kuličkových ložisek	53
Obrázek 41 Ukázka výpisu naměřených hodnot při druhém zkušebním provozu ...	54
Obrázek 42 Umístění větrné elektrárny při třetím zkušebním provozu.....	55
Obrázek 43 Grafická Závislost otáček rotoru na rychlosti větru ze dne 23.5.2021 ..	56
Obrázek 44 Grafická závislost generovaného výkonu na rychlosti větru ze dne 23.5.2021	56
Obrázek 45 Grafická závislost otáček rotoru na rychlosti větru ze dne 24.5.2021 ..	57
Obrázek 46 Grafická závislost generovaného výkonu na rychlosti větru ze dne 24.5.2021	57
Obrázek 47 Simulace proudění vzduchu kolem profilu lopatky	59
Obrázek 48 Simulace proudění vzduchu kolem větrné turbíny	60

Seznam tabulek

Tabulka 1 Dělení VE dle jejich výkonu [16]	28
Tabulka 2 Seznam použitých komponent s cenami platnými ke dni 31.5.2021 [29] [30].....	47
Tabulka 3 Celková cena větrné elektrárny s monitorovacím systémem	50
Tabulka 4 Určená provozní minima a maxima.....	58

1 ÚVOD

Větrná energetika se stává čím dál více populárnější, zejména ve světě, neboť v České republice nejsou bohužel optimální podmínky k využívání síly větru. Pro mikroelektrárny je situace jiná, jelikož počáteční náklady na stavbu nejsou tak velké jako u velkých větrných elektráren s výkonem v řádu megawatt. Mikro elektrárny tak můžou najít své využití například k ohřevu vody pro domácnost, nebo dobíjení baterií.

V první části je uvedena obecná teorie větrných elektráren, teorie větru, rozdělení větrných elektráren z hlediska principu fungování a detailnější popis vztlakové třílisté větrné elektrárny s horizontální osou rotace.

Tato bakalářská práce se zabývá větrnou mikroelektrárnou vytištěnou na 3D tiskárně. Inspirací modelu volně dostupný model od autora Daniela Davise [21]. Autor poskytuje pouze soubory určené pro 3D tisk, kvůli absenci technické dokumentace byla větrná elektrárna překreslena v programu SOLIDWORKS.

Dále se v bakalářské práci nachází návrh monitorovacího zařízení k výše zmíněné VE. Monitorovací zařízení je navrženo s využitím vývojové platformy Arduino Uno. Monitorovanými parametry jsou elektrický výkon dodávaný VE a otáčky rotoru. Dále je zpracováno blokové schéma monitorovacího zařízení, popis programu pro Arduino a DPS pro monitorovací zařízení.

Pro větrnou elektrárnu byly stanoveny závislosti napětí a elektrického výkonu na otáčkách rotoru. Dále byly provedeny tři zkušební provozy, stanoveny provozní minima a maxima a naměřené hodnoty byly zpracovány. Byla stanovena cena větrné elektrárny i s monitorovacím zařízením.

V neposlední řadě byla provedena simulace proudění vzduchu ke stanovení aerodynamiky lopatek i proudění kolem celé větrné elektrárny.

2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

2.1 Vznik větru

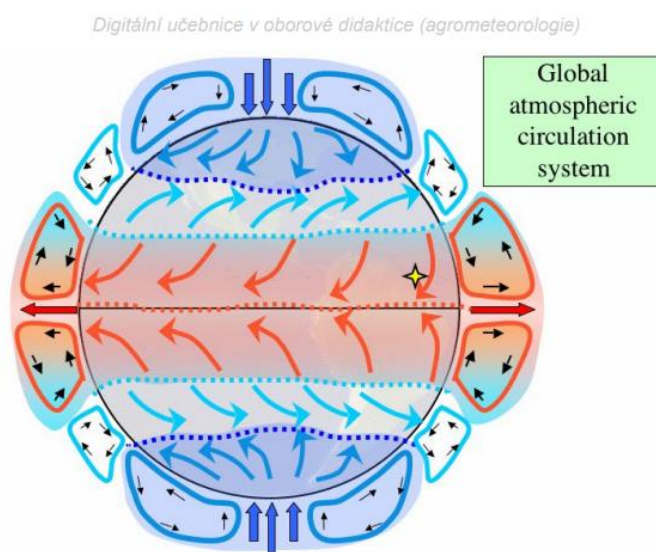
Vítr je pohyb vzduchu způsobený rozdíly atmosférického tlaku, které jsou důsledky různých teplot a jim odpovídajících různých hustot vzduchu. Proudění vzduchu probíhá z místa většího tlaku vzduchu do místa s menším tlakem vzduchu. Na rozdílech tlaků závisí rychlost větru. Ve zjednodušeném modelu by měl teplý vzduch z rovníku proudit směrem k pólům a na jeho místo by měl proudit studený vzduch z pólů. Vzhledem k tomu, že Země rotuje kolem své osy, působí na atmosférickou vrstvu ještě další síly. Velikost a směr větru jsou 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. V průměru lze na zeměkouli označit dvě pásma vysokého tlaku ležící mezi 30° a 40° severní a jižní šířky a rovníkové pásmo nízkého tlaku (obr. 1).

V důsledku toho v tropických oblastech převládá převážně východní směr větru směrem k rovníku. V pásmech mezi 40° a 60° převážně západní směr směrem k pólům. Ve vyšších vrstvách atmosféry je směr proudění opačný, tedy do míst vysokého tlaku a směr větru se vlivem zemské rotace vychyluje obráceně. Kolem rovníků pak vzniká rovníkový pás bezvětří.

Větry v blízkosti povrchu, ve výšce do 60 m, které nás z důvodu využití zajímají, jsou výrazně ovlivněny topografií oblasti, kvalitou povrchu, které mohou působit na proudění vzduchu.

Nejdůležitějším údajem při využívání energie větru je jeho rychlost, neboť má největší vliv na využitelný výkon větru. Údaje o směru větru mohou být významné pro výběr vhodných lokalit. Není výhodné umisťovat větrnou elektrárnu na místo, kde se ve směru nejčastěji působícího větru nachází nějaká překážka [1].



Obrázek 1 Globální cirkulace atmosféry [2]

2.2 Druhy větrných motorů

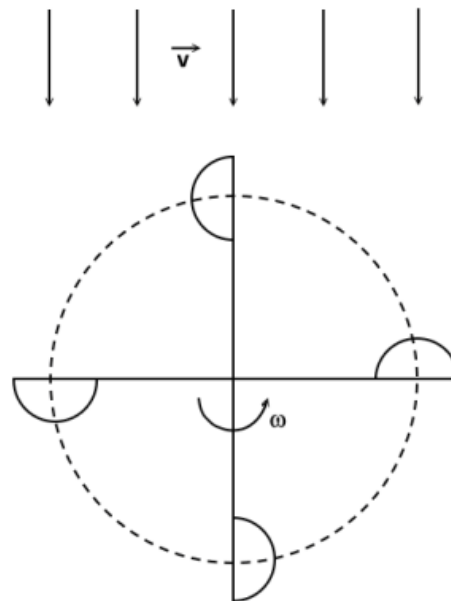
Větrné elektrárny se dělí podle několika kritérií. Jedním z nich je aerodynamický princip fungování. Dle toho parametru se VM dělí na odporové a vzlakové.

2.2.1 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.

Příkladem může být například mističkový anemometr (obr. 2). Po obvodu anemometru jsou umístěny 4 mističky ve tvaru duté polokoule, které v případě orientace dutinou proti proudění větru kladou aerodynamický odpor. Tento odpor je přibližně 3,5krát větší než odpor mističky orientované opačně. Tímto způsobem vzniká moment sil, který roztáčí rotor [3].

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



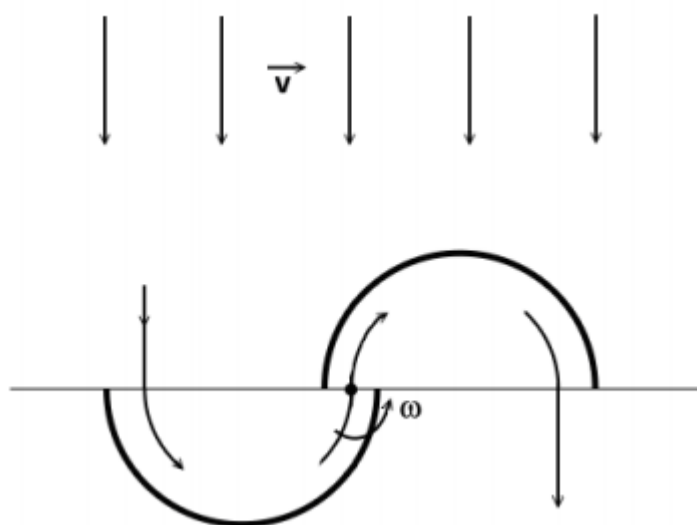
Obrázek 2 Mističkový anemometr [3]

Dalším typem odporového motoru je Savoniův větrný motor. Tento motor pracuje na podobném principu jako mističkový anemometr, ale místo kulových dutin má dvě válcové dutiny. Tyto dutiny jsou vzájemně propojeny, takže vítr působí svou silou na obě plochy současně (obr. 3). Tento větrný motor se otáčí ve svislé ose.

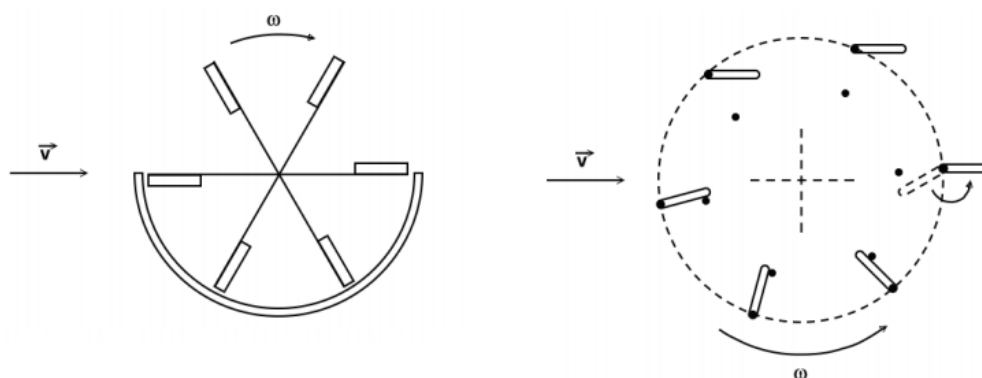
Výhodou tohoto VM je malá rychlost větru potřebná k rozběhu, prakticky se motor rozbíhá od nuly. Díky tomu lze Savoniův motor využít na většině míst.

Nevýhodou je malá účinnost (max 20 %). Další nevýhodou je, že Savoniův motor funguje pouze do rychlosti větru 1,5 m/s. Podobné parametry platí i pro ostatní typy odporových větrných motorů, které fungují na podobném principu, ale liší se svou konstrukcí (obr. 4).

Savoniův motor se používá k rozběhu Darriusova motoru. Dalším využitím může být čerpání vody, nebo výroba elektřiny (v malém množství) [3].



Obrázek 3 Savoniův větrný motor [3]

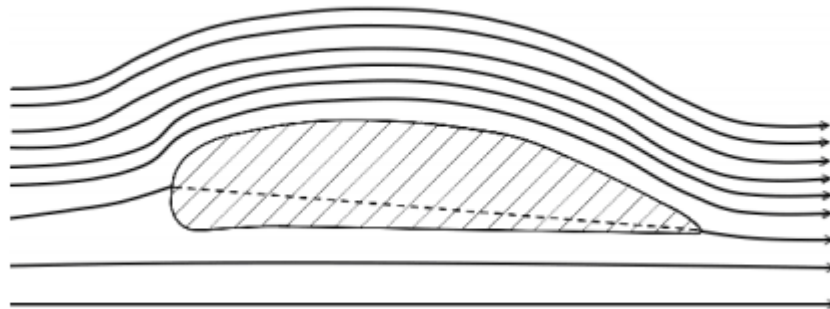


Obrázek 4 Další typy odporových větrných motorů [3]

2.2.2 Vztlakové větrné motory s vertikální osou otáčení

Vztlakové VM, ať se jedná o motory s vertikální osou otáčení, nebo s horizontální osou otáčení, pracují na podobném principu jako letadla nebo vrtulníky. Konstrukce lopatek vychází z leteckého průmyslu.

Lopatky vztlakových motorů mají speciální aerodynamický tvar (obr. 5). Díky tomu dochází nad křídlem k houstnutí proudnic, což má za následek větší rychlost proudění vzduchu. Větší rychlost proudění vzduchu vyvolá podtlak. Naproti tomu pod křídlem je opačný jev. Počet proudnic klesá, rychlost proudění klesá a narůstá tlak. Tyto zákonitosti vycházejí z Bernoulliho rovnice [4].

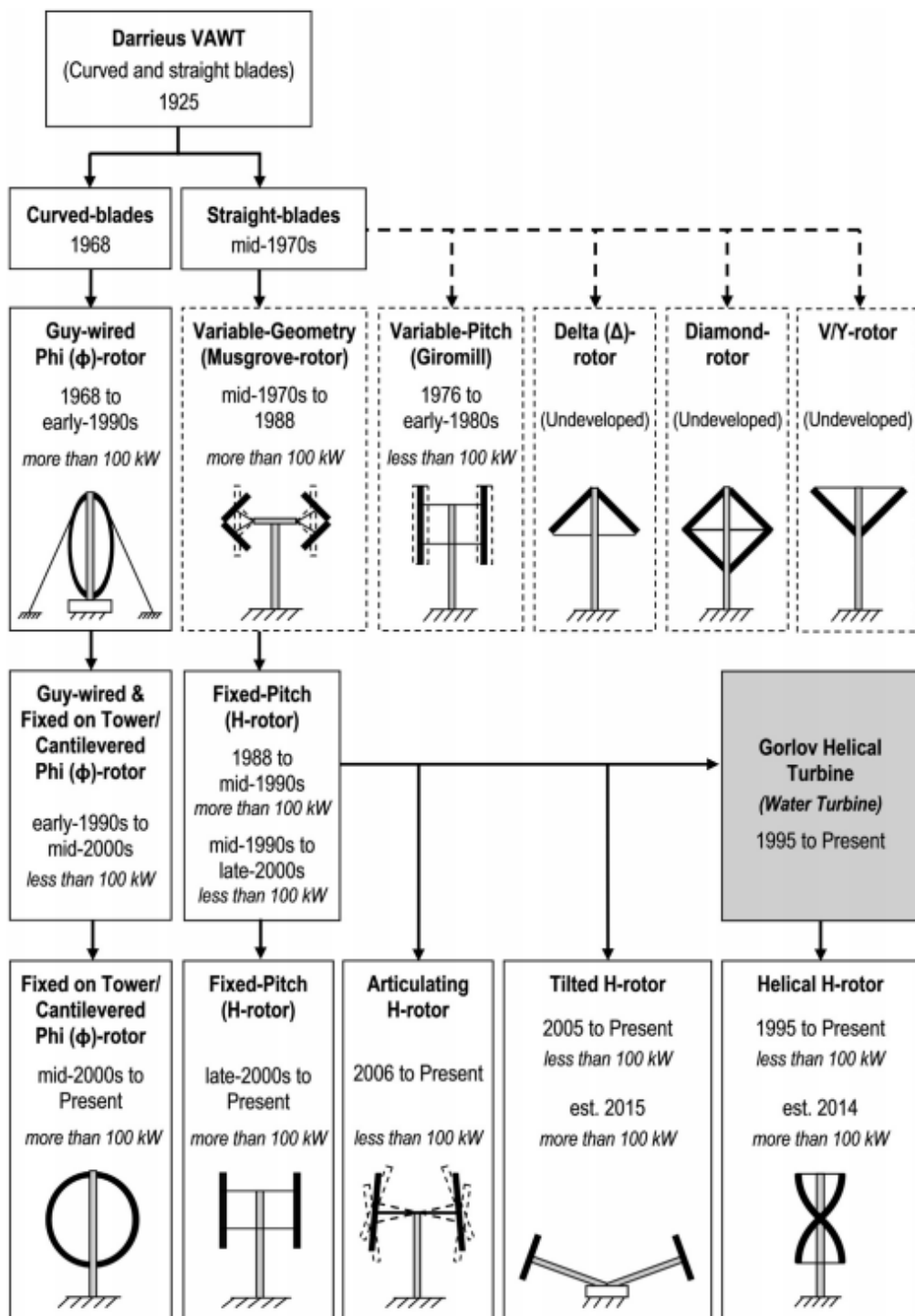


Obrázek 5 Proudění vzduchu kolem křídla [3]

Darrieusovův motor a jeho modifikace fungují s vertikální osou otáčení. 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 vztlakové síly, ale také aerodynamického odporu křídla. Rychlost otáčení rotoru je větší než rychlost větru. Darrieusovův rotor se řadí do kategorie rychloběžných turbín. Otáčení rotoru je přenášeno na generátor, který přeměňuje mechanickou kinetickou energii na energii elektrickou.

Na spuštění rotoru je potřeba roztáčení externím zdrojem otáčení. Ten může představovat elektrický rozběh, nebo mechanický rozběh za pomoci Savoniova rotoru. I přes to, že rotor se neuvede do pohybu svépomocí, je nutné rotor v nečinném stavu brzdít. Extrémní povětrnostní podmínky by mohli způsobit roztočení rotoru a jeho následné poškození [5].

Výkonnostně jsou Darrieusovův rotor a jeho modifikace schopny dodávat výkon v řádech desítek až stovek kW (obr. 6) [6].



Obrázek 6 Přehled typů vztlakových rotorů s jejich výkony a roky návrhu [6]

Výhodou Darrieusova rotoru je to, že není třeba žádný mechanismus natáčení při změně směru větru. Je také poměrně odolný vůči povětrnostním podmínkám.

Naproti tomu má Darrieusův rotor menší účinnost (30 až 40 %). Díky velké rotující hmotnosti dochází k velkému opotřebenosti ložisek. Jak již bylo zmíněno, nedokáže se samovolně rozběhnout. Díky tomu, že se jedná o rychloběžný rotor, jsou kladeny velké nároky na výběr materiálů a výrobu.

Jedná se o méně používaný rotor [5].

2.2.3 Vztlakové větrné motory s horizontální osou otáčení

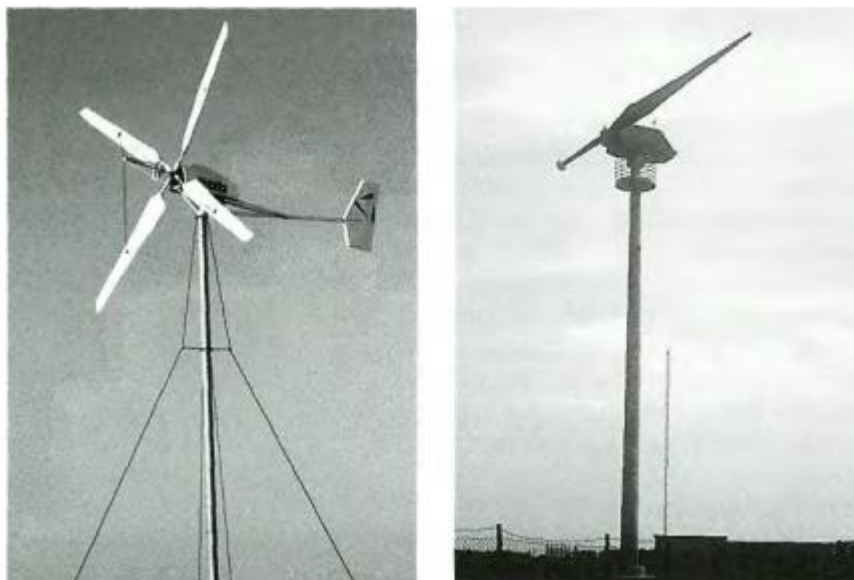
Mezi tyto motory patří vrtule a větrná kola. HVM mají rovinu otáčení kolmou na směr větru. Aby docházelo k ideálnímu působení větru proti lopatkám, musí mít HVM mechanismus natáčení.

Starším konstrukčním typem jsou větrná kola. Tyto kola mají větší počet lopatek, od několika jednotek po několik desítek. Jelikož s rostoucím počtem lopatek klesá frekvence otáčení, jedná se o pomaloběžné motory. Více lopatkovým motorům se přezdívá westernová kola (obr. 7). Westernová kola dosahují malých otáček, zato vysokého rozběhového momentu. Za dobrých podmínek lze využít cca 20 až 30 % energie větru. Jelikož pro výrobu elektrické energie je vhodnější využít vyšších otáček (od 800 do 3000 ot./min.), nachází větrné kolo uplatnění především pro čerpání vody [1].



Obrázek 7 Větrné "westernové" kolo [7]

Druhým typem jsou rychloběžné HVM. Rychloběžné HVM mají od jednoho do čtyř listů (obr. 8). Tyto motory mají velkou rozběhovou rychlost 3 až 4 m/s. Naproti tomu dosahují vyšší účinnosti (až 45 %) [3]. Nejpoužívanější jsou třílistové HVM, avšak existují i konstrukce s jedním listem a protizávažím. Jednolisté zařízení však dosahuje takových rychlostí, že sykot křídla a s tím spojená hladina hluku je enormní a provoz takové elektrárny je nepředstavitelný. Třílistá větrná elektrárna je předmětem této bakalářské práce a bude jí věnována samostatná kapitola [8].



Obrázek 8 Čtyřlistová větrná elektrárna (vlevo) a jednolistová větrná elektrárna (vpravo) [8]

Byly instalovány i větrné elektrárny s protiběžnými vrtulemi, kde jedna vrtule byla spojena s rotorem a druhá se statorem generátoru (obr. 9). Tyto dvě vrtule se otáčejí proti sobě a vytvářejí tak střídavý proud s dvojnásobnou frekvencí. Ani tato konstrukce ovšem nenašla své uplatnění v praxi, nejspíše kvůli složitosti konstrukce.

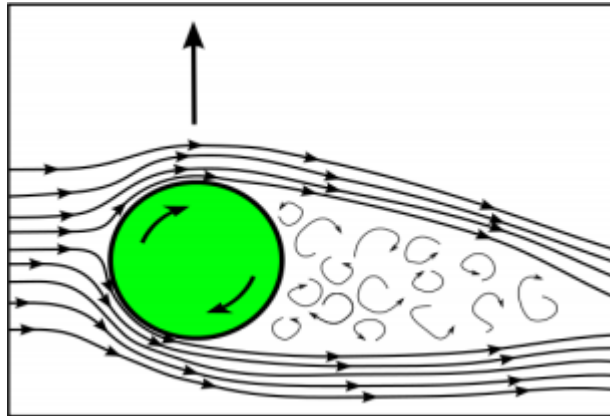


Obrázek 9 Protiběžný větrný motor [1]

2.2.4 Větrné motory pracující na principu Magnuskova jevu

Japonská společnost MECARO Co., zahájila prodej větrných elektráren pracujících na principu Magnuskova jevu. Tato elektrárna má 5 lopatek válcového tvaru, které rotují kolem vlastní osy.

Magnuskův jev říká, že rotující válec umístěný v proudu tekutiny vyvolá takové zakřivení proudnic ve své blízkosti, že vzniklá vztlaková síla (obr. 10). Při optimální rychlosti rotace válce a rychlosti kapaliny proudící kolem, je vztlak i několikrát větší, než jaký lze dosáhnout na nejideálnějším vztlakovém profilu [1].



Obrázek 10 Magnuskův efekt [9]

Vortes-model (obr. 11), jak se tato první větrná turbína nazývá, potřebuje ke svému rozběhu o 25 % pomalejší rychlost větru. Pracuje i při nižších otáčkách a má i menší hladinu hlučnosti. Díky tomu, že rychlost otáčení celé vrtule je regulována otáčením válcových lopatek, nepotřebuje tato elektrárna ani mechanickou brzdu.

Tato technologie však není doposud nijak zvlášť používaná [10].



Obrázek 11 Větrná turbína Vortes pracující na principu Magnuskova jevu [10]

2.3 Třílopatkové vztlakové motory s horizontální osou otáčení

Jelikož navrhovaný monitorovací systém je určen pro mikro větrnou elektrárnu s horizontální osou otáčení se třemi listy rotoru, je tomuto typu VM věnována vlastní kapitola. V této kapitole jsou popsány jednotlivé nejdůležitější části konstrukce HVE.

2.3.1 Lopatky

Lopatky odebírají energii větru. Používají k tomu speciálně tvarovaný profil, jehož tvar vyplývá z aerodynamiky. Jedná se tzv. vztlakový profil. O základě vztlakové síly je stručně pojednáno v předchozí kapitole.

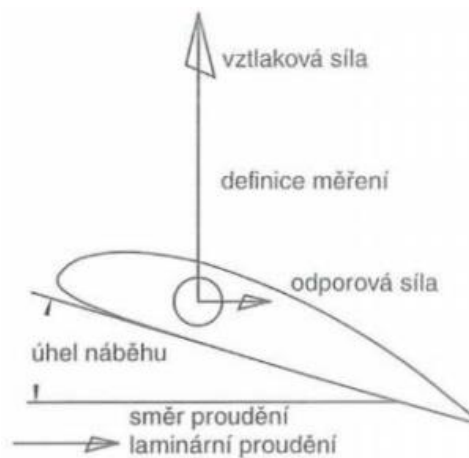
Tvary těchto profilů byly zkoumány ve větrných tunelech, kde na těleso nepůsobí žádné okolní síly. Obzvláště významné jsou síly, které působí rovnoběžně a kolmo ke směru proudění.

Síla, která působí paralelně se směrem proudění, se nazývá odporová síla. Tato síla je význačná hlavně pro odporové větrné motory, ale i u vztlakových profilů hraje význačnou roli.

Síla, která působí kolmo na směr proudění, se nazývá vztlaková síla. Tato síla je důsledkem rozdílů tlaků nad a pod lopatkou.

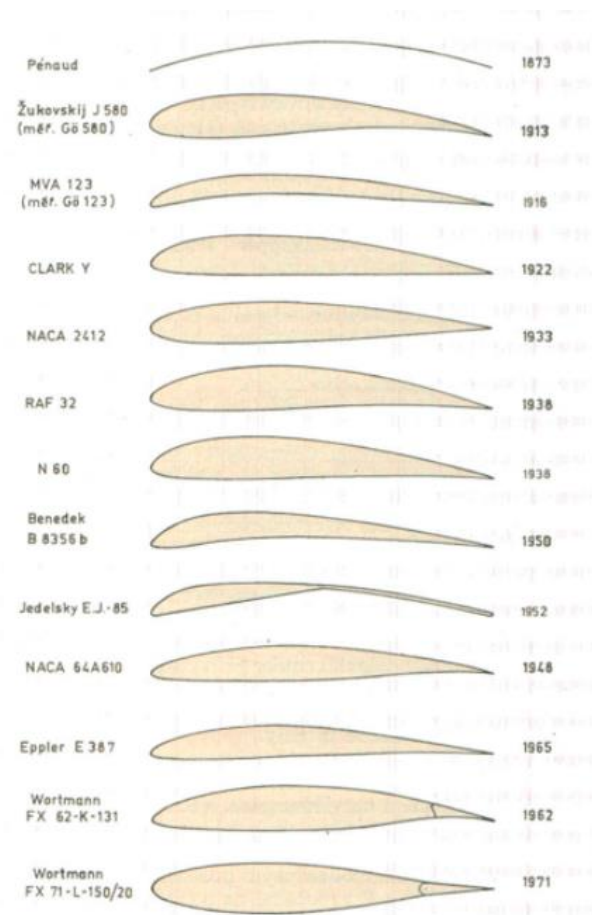
Výsledná síla je potom vektorovým součtem těchto dvou sil (obr. 12).

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 vztlakové a odporové síly byl co největší. Pod tímto úhlem se poté lopatka provozuje pro maximální výkon [11].



Obrázek 12 Řez lopatkou a ztvárnění působících sil [11]

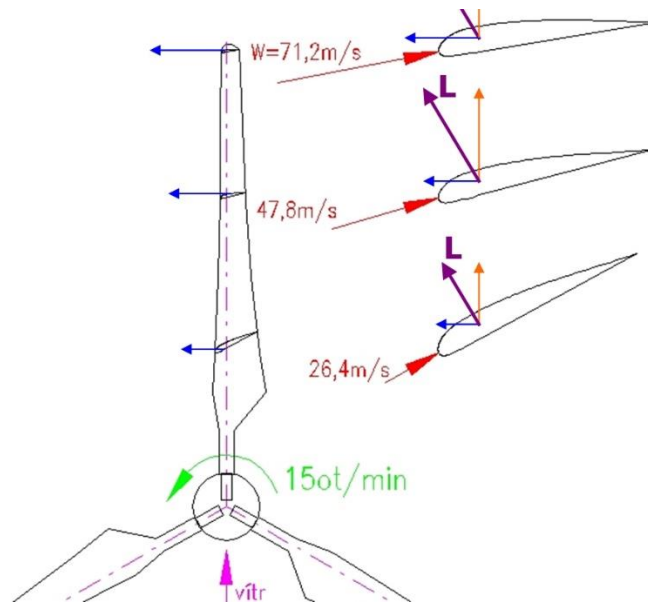
Profily lopatek jsou definované určitými vzory, které vychází ze složitých výpočtů a z laboratorních měření. Každá firma, zabývající se výrobou lopatek, nebo samotných elektráren má svůj patentovaný profil listu. Jelikož účinnost celé VE závisí na co nejideálnějším tvaru profilu lopatek, nejsou firmy obecně sdílné k poskytování těchto profilů. Některé starší profily lopatek jsou však k dispozici (obr. 13).



Obrázek 13 Stručný přehled profilů do roku 1971 [12]

Jelikož se obvodová rychlost mění se vzdáleností od osy otáčení, je třeba lopatku upravovat, aby byla výsledná rychlost nabíhajícího proudu stejná. Tím se zlepšuje efektivita přeměny větrné energie na kinetickou rotační energii.

Aby bylo dosaženo optimální efektivity, mění se na délce lopatky jak tloušťka lopatky, tak úhel náběhu (obr. 14) [12].



Obrázek 14 Ukázka změny obvodové rychlosti, rychlosti obtékání a náběžného úhlu na délce lopatky [12]

Historicky se lopatky vyráběly ze dřeva, plechu, nebo byly z oplechovaného dřeva. Moderní lopatky se vyrábí z kompozitních materiálů laminací mnoha vrstev skelné tkaniny. Do kompozitu se ještě vkládá tvrzená pěna, uhlíková nebo kevlarová vlákna. Opět platí, že přesné složení jednotlivých vrstev má každá firma jiné. Každá jednotlivá vrstva dává výslednému profilu jiné vlastnosti, jako například pevnost nebo pružnost.

Lopatka se vyrábí pouze jako skořepina, je tedy v uvnitř dutá. Konstrukce ale počítá s nosníkem, který zvyšuje pevnost konstrukce (obr. 15) [13].



Obrázek 15 Řez listem větrné elektrárny [13]

2.3.2 Náboj rotoru

Náboj rotoru neboli hub, je jedna z nejnamáhanějších součástí VE. Musí odolat silám kterými na něj působí lopatky. Obsahuje také regulační systém natáčení lopatek. Regulační systém zajišťuje rozběh rotoru, regulaci výkonu VE, ale i ochranu proti poškození při vysokém větru. Způsoby regulace jsou následující.

Pasivní “stall” regulace – jedná se o regulaci pomocí odtržení proudu vzduchu od listu rotoru s konstantním úhlem nastavení. Listy jsou pevně připevněny k náboji rotoru a regulace probíhá změnou tvaru koncových částí listu. Změnou tvaru listu se mění laminární proudění na turbulentní a dochází k poklesu vztahové síly, a tedy i točivého momentu hřídele. Výhodou je jednoduchá konstrukce regulace. Nevýhodou však je, že VE používající tento způsob regulace není schopna samovolného rozběhu a musí se tedy roztáčet motorem. Tento způsob regulace není příliš používán.

Aktivní “pitch” regulace – tato regulace je založena na natáčení celých lopatek a tím způsobenou změnou úhlu náběhu. Jedná se o aktivní systém, který pracuje se signálem o výkonu generátoru. Je-li překročena jeho nominální hodnota, dochází k pootočení listu, změně vztahové síly a snížení využití výkonu rotoru. Tento způsob regulace je nejpoužívanější, ačkoliv je mechanicky více náročnější než stall regulace. Při extrémních rychlostech větru je systém schopen nastavit lopatky tak, aby docházelo k co nejmenšímu zatížení lopatek. Další výhodou pitch regulace je schopnost samostatného rozběhu natočením lopatek [14] [15].

2.3.3 Generátor

Generátor samozřejmě slouží k přeměně rotační mechanické energie na energii elektrickou. Rozlišujeme následující tři druhy generátorů.

Stejnoseměrné – neboli dynamo se používají pouze v mikroelektrárnách. Jejich použití spočívá především v nabíjení baterií. Vyráběné napětí je většinou v hodnotách 12, 24 a 48 V. Při těchto hodnotách napětí nelze vyrábět velké výkony, kvůli vysokým proudům. Nevýhodou těchto generátorů je to, že obsahují komutátor, který se opotřebovává.

Asynchronní střídavé – pracují se skluzem oproti synchronním otáčkám. Existují dva druhy. S kotvou nakrátko a s vinutým kroužkovým rotorem. Tyto generátory nejsou schopny dodávat výkon do ostrovního systému bez zapojení spotřebiče, kapacitního charakteru, tedy zdroje jalové energie. Asynchronní generátor je konstrukčně jednodušší než generátor synchronní. Je ovšem schopen pracovat pouze v omezeném rozsahu pracovních otáček. Při zapojení použití asynchronního generátoru s napájeným rotorem lze provozovat generátor i při nízkých otáčkách. V současných VE jsou využívány čtyřpólové nebo šestipólové generátory. Čtyřpólové generátory pracují při otáčkách 1500 ot./min. Šestipólové generátory pracují při otáčkách 1000 ot./min.

Synchronní střídavé – synchronní generátory pracují se synchronními otáčkami. Používají se buď generátory s buzením stejnosměrným napětím, nebo synchronní generátory s permanentními magnety. U generátorů s buzením dochází k buzení pomocí dynamo umístěného na společné hřídeli generátoru. Tato konstrukce celý systém prodražuje. Generátor má však vysokou účinnost, snadno se mu reguluje napětí a má velký rozsah pracovních otáček. V případě použití permanentních magnetů odpadá

nutnost buzení generátorů a výsledná cena VE se snižuje. V případě nesymetrie vstupních otáček s frekvencí sítě, je potřeba střídavé napětí usměrnit a poté opět nastřídat externím střídačem [14] [15].

2.3.4 Systém natáčení strojovny

Kvůli proměnlivému směru větru je třeba natáčet celou strojovnu s lopatkami tak, aby vítr působil proti lopatkám rotoru.

U malých VE je využíváno směrového křídla, které směřuje celou gondolu pouhou silou větru.

U velkých VE je využíván externí pohon elektrickými motory. Tyto motory (4 až 6) jsou ovládány pomocí řídicích systémů. Řídicí systémy dostávají data s hodnotami rychlosti větru a směru větru ze sond umístěných mimo strojovnu. Motory s výkonem kolem 2,5 kW jsou pomocí planetární převodovky propojeny s ozubeným kolem velkého ložiska upevněného na vrcholu stožáru větrné elektrárny. Při natáčení gondoly se současně rotujícím rotorem však vzniká gyroskopický moment, který elektromotory nejsou schopné kompenzovat. Používají se proto čelistové brzdy, které zaaretují pozici gondoly po jejím natočení [15].

2.3.5 Stožár

Stožár slouží jako nosná část strojovny s rotorem. Pro velké VE se většinou používá ocelový, nebo betonový tubus. Ocelový tubus je vyroben z ocelových plechů, které jsou válcovány a svařovány. Obvykle se skládá z několika částí. Bývá opatřen ochranným nátěrem. Betonový tubus je tvořen z předem vyrobených betonových skořepin, které se na místě stavby dávají na sebe. Jelikož se jedná o menší části, je jednodušší i doprava. Betonový tubus má vyšší ochranu proti korozi, snižuje vibrace a má menší provozní hluk. V těchto velkých gondolách je umístěný většinou výtah. Stožárem jsou také vedeny kabely pro přepravu vyrobené energie [14].

Pro mikroelektrárny se hodí například stožáry trubkové. Tyto stožáry jsou svařovány z jednotlivých trubek do požadované délky a mohutnosti. Vhodné jsou rovněž i dřevěné stožáry. Jednotyčové stožáry je však vhodné kotvit pomocí kotevních lan [11].

2.4 Mikroelektrárny

Větrné elektrárny se dají rozdělit také podle výkonu. Větrné elektrárny se dělí do čtyř skupin dle tabulky č.1.

Rozdělení	Instalovaný výkon [kW]
Mikroelektrárny	0-1
Malé VtE	1-15
Střední VtE	15-100
Velké VtE	100 a více

Tabulka 1 Dělení VE dle jejich výkonu [16]

Na následujících stránkách jsou uvedeny některé mikro větrné elektrárny prodávané v ČR. Aktuální k 25.11.2020.

Větrná elektrárna S400W 12V

Malá pětilistá větrná turbína s horizontální osou otáčení. Dle popisu výrobce je tato VE řešením pro letní domy, kempování, osvětlení a podobně. Jedná se o nejlevnější nalezenou VE. [17]

Jmenovitý výkon: 400 W
Maximální výkon: 420 W
Jmenovité napětí: 12 V
Startovací rychlost větru: 2 m/s
Maximální rychlost větru: 13 m/s
Průměr vrtule: 1,5 m
Doporučená montážní výška: 6 m
Cena: 8 900 Kč [17]



Obrázek 16 Větrná elektrárna S400W 12V [17]

Větrná turbína JPS-200

Pětilistá VE opatřena difuzorem, který se stará o směrování VE. Výrobce udává, že VE je vhodná k umístění na střechách průmyslových budov a bytových objektů. Může být zdrojem výroby elektrické energie pro záložní zdroje. Specialitou této VE je možnost seskupovat VE do kaskád umístěných v podpěrném rámu jako větrná stěna.

Jmenovitý výkon: 200 W

Výstupní napětí: 12/24/48 V

Průměr rotoru: 0,68 m

Startovací rychlost větru: 3 m/s

Maximální rychlost větru: 12 m/s

Cena: 15 125 Kč [18]



Obrázek 17 Větrná turbína JPS-200 [18]

Větrná elektrárna Savonius SV 400W 12V

Odporová elektrárna typu Savonius. Možnost použití pro chaty a letní domy.

Jmenovitý výkon: 400 W

Maximální výkon: 450 W

Jmenovité napětí: 12 V

Startovací rychlost větru: 2 m/s

Maximální rychlost větru: 11 m/s (tato hodnota mi přijde příliš vysoká)

Výška: 1,2 m

Průměr: 0,5 m

Doporučená montážní výška: 6 m

Cena: 17 500 Kč [19]



Obrázek 18 Větrná elektrárna Savonius SV 400W 12V [19]

HYE 1000W

Tato pěti lopatková elektrárna vyniká nejen svým výkon, ale také systémem řízení výroby energie. Elektrárna je určena pro provoz OnGrid a to zejména kvůli použitému střídači HYGCI-H-10GL. Střídač převádí v závislosti na rychlosti vrtulového motory elektrickou energii, aby byla kompatibilní s napětím sítě. Pro tento proces je však nutné připojení k síti. Při výpadku síťové energie dojde k odstavení VE. Celý systém je vybaven systémem monitorování.

Jmenovitý DC výkon na vstupu: 1000 W

Jmenovitý AC výkon na vstupu: 1000 W

Frekvenční rozsah AC: 50-60 Hz

Napěťový rozsah AC: 190–260 V

Jako set obsahující větrnou turbínu HYE 1000W, síťový měnič a bezpečností brzdu se prodává za 66 105 Kč [20].



Obrázek 19 Větrná turbína HYE 1000W [20]

3 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je vytvoření modelu mikro větrné elektrárny vytištěné na 3D tiskárně, realizace větrné elektrárny, návrh monitorovacího systému a jeho realizace, použití monitorovacího systému v reálném provozu, zpracování naměřených dat a provedení simulace proudění vzduchu.

Model větrné elektrárny je vytvořen v programu SOLIDWORKS. Inspirací modelu je volně dostupný model od autora Daniela Davise [21]. Konstrukce větrné elektrárny je upravená pro zlepšení její funkce. Z vytvořeného modelu je vytvořená technická dokumentace. Práce se zabývá i náklady na stavbu mikro větrné elektrárny.

Monitorovací systém se řeší pomocí platformy Arduino Uno a externích modulů. Pro monitorovací systém se řeší program, volba externích modulů a návrh DPS.

Bakalářská práce se dále zabývá měřením elektrického výkonu a otáček při reálném provozu. Z naměřených hodnot se hledají závislosti generovaného elektrického výkonu a otáček na rychlosti větru.

Pomocí SOLIDWORKS flow simulation je zhotovena simulace proudění vzduchu kolem listu lopatky a proudění kolem celé konstrukce větrné elektrárny.

4 KOSTRUKCE MIKRO VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Větrná elektrárna je navržena tak, aby ji bylo možné zhotovit a provozovat v domácích podmínkách. Veškeré části, kromě elektrických komponent, ložisek a spojovacích materiálů lze vytisknout na 3D tiskárně.

Autor předlohy uvádí výkon větrné elektrárny 50 W. Nejedná se však o elektrický výkon, nýbrž o teoretický mechanický výkon větrné turbíny.

Autor dále udává, že rozběhová rychlost je menší jak 5 m/s. Neudává však přesnou hodnotu rozběhové rychlosti ani maximální rychlost větru, do které turbína pracuje bez rizika poškození. Celkový průměr rotoru je 0,8 m.

Větrná turbína je vytištěna z materiálu PLA.

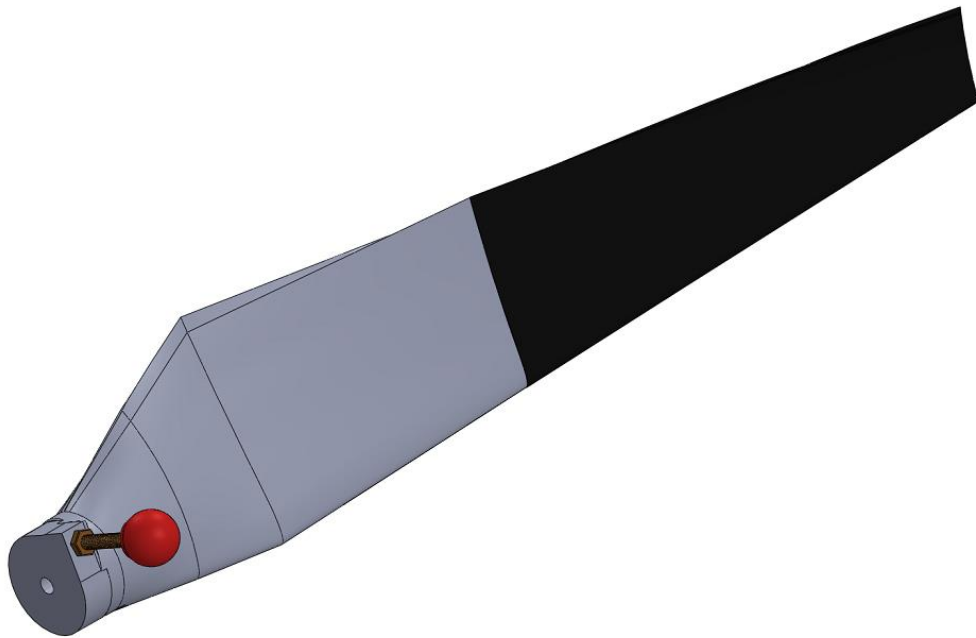
Jelikož autor předlohy poskytuje pouze soubory určené pro 3D tiskárnu ve formě STL, bylo provedeno překreslení modelu v programu SOLIDWORKS. Z modelů byla zpracována technická dokumentace dostupná v příloze na CD.

K natáčení VE proti větru slouží kormidlo umístěné za strojovnou VE (obr. 20). Celá konstrukce je poté připevněna ke stožáru pomocí ložiska.



Obrázek 20 Kompletní model VE

4.1 Lopatka



Obrázek 21 Lopatka VE

Lopatka je nejdůležitější prvek celé VE. Na jejím návrhu ve velké míře závisí účinnost celé VE. Kvůli velikosti lopatky se samotná lopatka skládá ze dvou dílů spojených šroubem. (obr. 21).

Pomocí šroubu je k lopatce připojeno rameno s kulovým tělesem, které je součástí regulačního mechanismu. Dosáhne-li rychlost větru mezní hodnoty vzniká na závaží síla, která se přenáší na regulační mechanismus umístěný v náboji rotoru. O regulačním mechanismu bude pojednáno v následující kapitole.

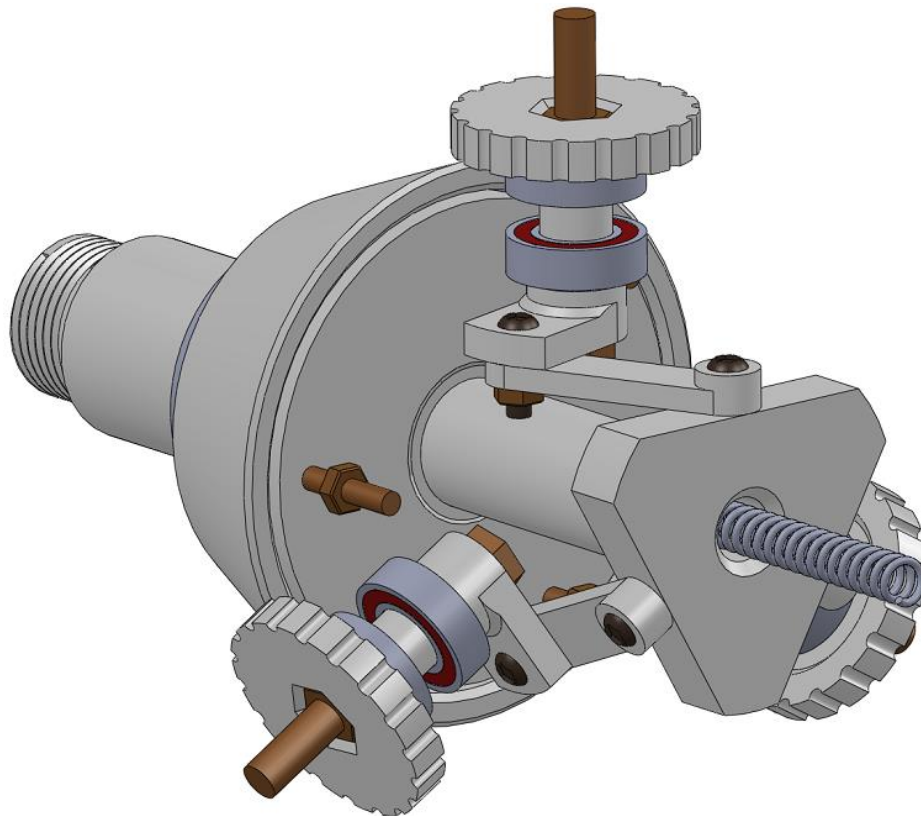
Připojení lopatky k náboji rotoru je realizováno opět šroubem. Z tohoto důvodu je v těle lopatky umístěná matice, která je zatisknutá do těla lopatky.

Z hlediska aerodynamiky odpovídá lopatka výše zmíněnému aerodynamickému návrhu lopatky. Požitý profil nejlépe odpovídá profilu CLARK Y (obr.13). Lopatka má také odpovídající zužující se tvar směrem od osy otáčení a také tendenci změny náběžného úhlu na délce lopatky.

4.2 Náboj rotoru

Náboj rotoru je jedna z nejvíce namáhaných částí turbíny, neboť slouží k přenosu rotační mechanické energie na generátor.

Kromě nahánění vzduchu na lopatky má náboj ještě jednu důležitou část, a to výše zmíněný regulační mechanismus. Ten funguje na principu aktivní “pitch” regulace. Jak bylo zmíněno dříve, tento mechanismus funguje na principu naklánění lopatek vůči směru proudění vzduchu. Jedná o regulační mechanismus na čistě mechanickém principu. Pomocí závaží na ramenu, které při vysoké rychlosti větru působí silou na mechanismus kliky, která působí na píst, čímž dochází k současnému naklánění všech lopatek. Proti pístu působí pružina, která určuje výslednou sílu potřebnou k natočení lopatek (obr. 22).

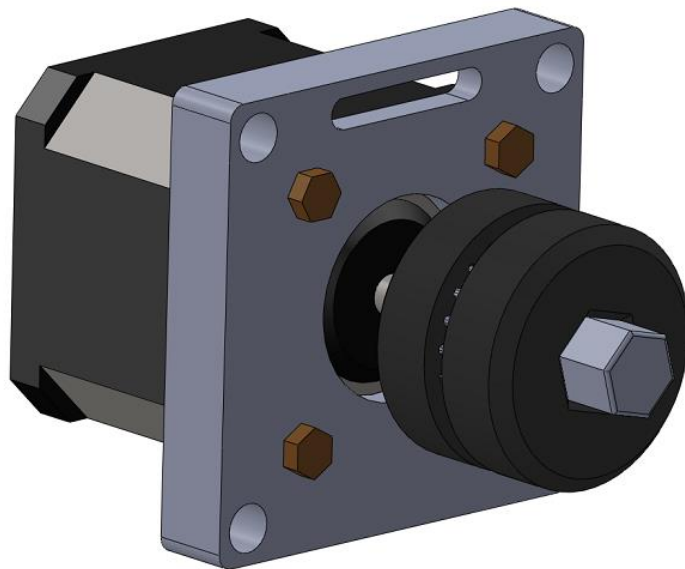


Obrázek 22 Regulační mechanismus natáčení lopatek umístěný v náboji rotoru

4.3 Generátor

Jako generátor zde slouží krokový motor Nema 17. Krokový motor je schopen už při nízkých otáčkách generovat vysoké napětí. Výrobce krokových motorů nepočítá s tím, že by krokový motor sloužil jako generátor a neposkytuje k této problematice žádné informace. Proto byly vypracovány závislosti generovaného napětí a proudu na otáčkách generátoru.

U velkých VE je vždy k převodu rotační energie na generátor využita převodovka. U této konstrukce je však rotor spojen přímo s generátorem. Mezi rotorem a generátorem se nachází antivibrační systém, který potlačuje vibrace způsobené rotorem (obr. 23).



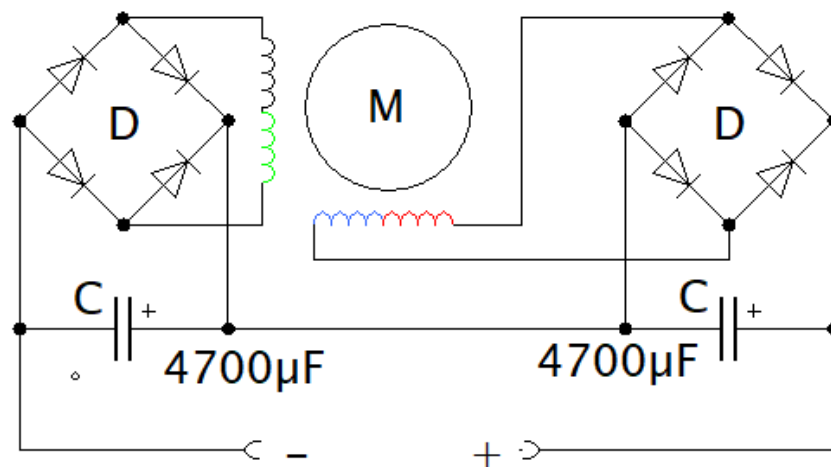
Obrázek 23 Generátor s antivibračním systémem

4.4 Elektrické zapojení a usměrňovač

Krokový motor má dvě vinutí vzájemně posunutá o 90° . Obě vinutí se usměrňují samostatně. Prakticky lze provést dvě zapojení těchto usměrňovaných vinutí. Zapojení sériové (obr. 24), které generuje vyšší napětí a menší proud, nebo zapojení paralelní (obr. 25), které má vlastnosti opačné.

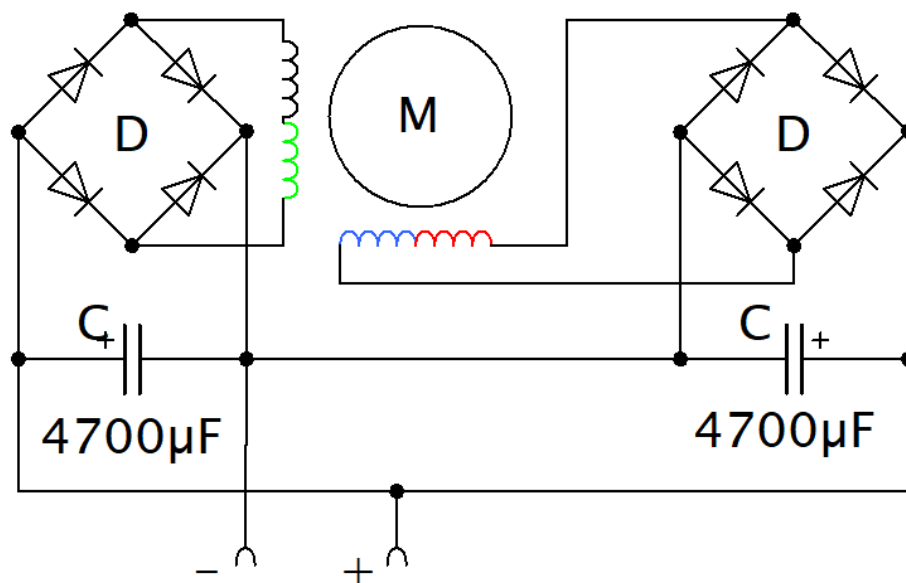
Na výstupní svorky je použit step-down měnič s nastavitelnou hodnotou výstupního napětí.

Zapojení sériové:



Obrázek 24 Schéma sériového zapojení

Zapojení paralelní:



Obrázek 25 Schéma paralelního zapojení

5 MONITOROVACÍ SYSTÉM VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

5.1 Teoretický výkon a otáčky VE

Aby bylo možno navrhnout monitorovací systém, je třeba vědět, s jakými hodnotami napětí a proudu se bude pracovat. Jelikož výrobce krokového motoru ve svém datasheetu neuvádí parametry pro zapojení jako generátor [22], je třeba odhadnout maximální otáčky, kterých je schopna VE dosáhnout a změřit maximální napětí a proud, které je schopen krokový motor generovat.

Je znám teoretický výkon, který autor uvádí. $P_{max} = 50 \text{ W}$. Uvažuje se, že se jedná o nejvyšší možný využitelný výkon větru daný Betzovým koeficientem $b_k = 0,5926$ [3], který udává, že je možno využít maximálně 59,26 % energie větru.

Pro výkon protékající jednotkovou plochou 1 m^2 platí [1]:

$$P_{max} = \frac{\rho * v^3}{2} \tag{1.1}$$

Dosažením Betzova koeficientu a plochy rotoru dostáváme rovnici:

$$P_{max} = \frac{1}{2} * b_k * \rho * \pi * \frac{D^2}{4} * v^3$$

Po úpravě dostáváme vztah pro v :

$$v = \sqrt[3]{\frac{8 * P_{max}}{b_k * \rho * \pi * D^2}}$$

Z této rovnice vyplývá, že pro teoretický výkon 50 W je rychlost v :

$$v = \sqrt[3]{\frac{8 * 50}{0,6526 * 1,29 * \pi * 0,8^2}}$$

$$v = 6,183 \text{ m/s}$$

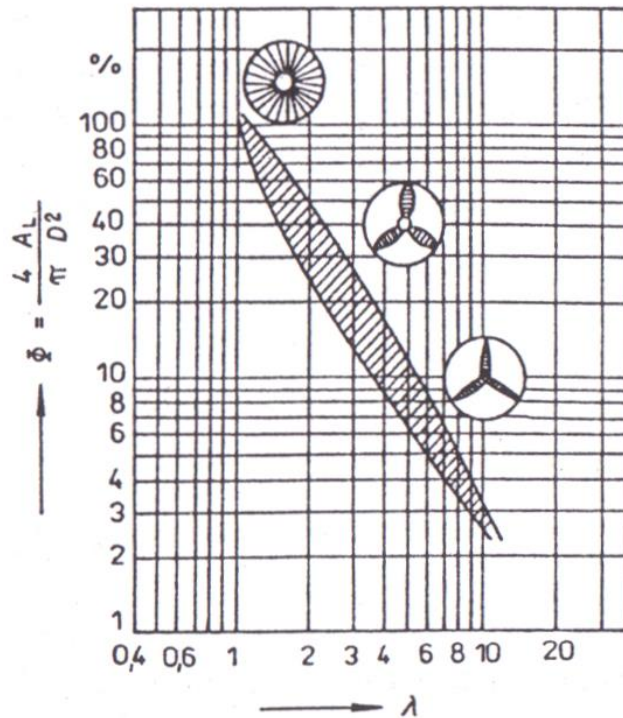
Otáčky rotoru lze odhadnout pomocí koeficientu rychloběžnosti. Ten je závislý na tom, kolik procent plochy kruhu rotoru je pokryto lopatkami. Plocha lopatek byla odměřena pomocí SOLIDWORKS. Plocha kruhu rotoru je vypočítána jako standardní plocha kruhu [23].

$$\lambda = \frac{S_{lopatky}}{S_{celkem}} * 100 \tag{1.2}$$

$$\lambda = \frac{0,0379}{0,5026} * 100$$

$$\lambda = 7,361\%$$

Z níže uvedeného grafu (obr. 26) můžeme odečíst přibližnou hodnotu koeficientu rychloběžnosti. Byl zvolen koeficient rychloběžnosti $\lambda = 7$.



Obrázek 26 Grafická závislost koeficientu rychloběžnosti na poměru ploch rotoru [23]

Dle vzorce (1.3) lze odhadnout otáčky rotoru v nezátíženém stavu [23].

$$\lambda = \frac{\pi * D * \frac{n}{60}}{v} \quad (1.3)$$

Z něhož odvozený vztah pro otáčky n:

$$n = \frac{\lambda * v}{\pi * D} * 60$$

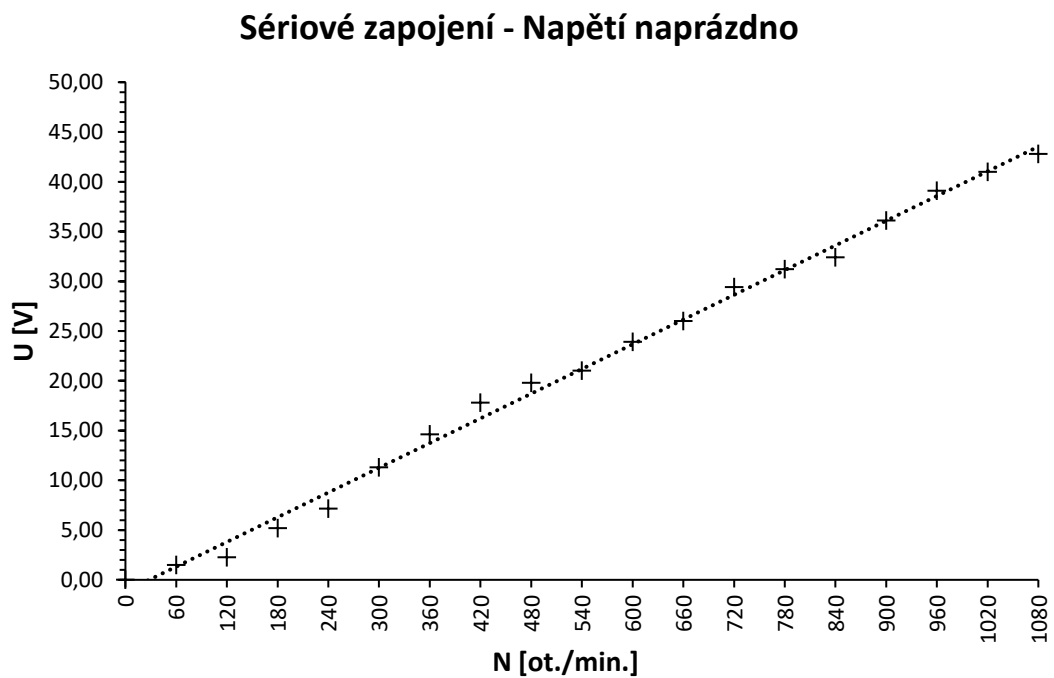
$$n = \frac{7 * 6,183}{\pi * 0,8} * 60$$

$$n = 1033 \text{ ot./min.}$$

5.2 Měření napětí a proudu při stanovených otáčkách

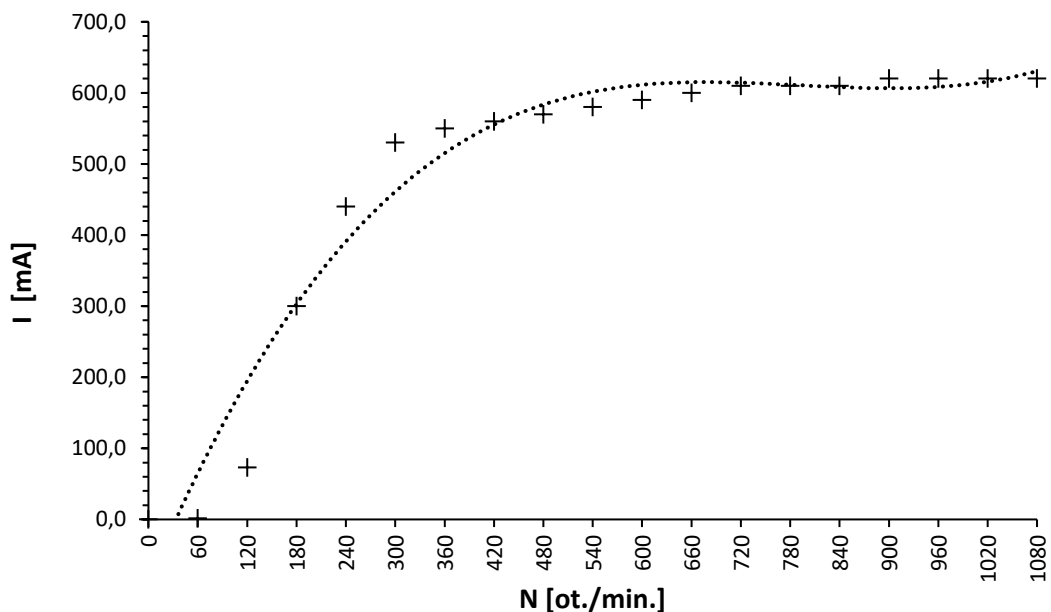
Měření bylo realizováno připojením krokového motoru na motor s regulací otáček a výkonem 50 W. Měření probíhalo v rozsahu otáček 0–1080 ot./min. Měřeno bylo napětí naprázdno (obr. 27) a proud nakrátko (obr. 28). Poté bylo na výstupu step-down měniče nastaveno výstupní napětí 5 V a byla dobíjena powerbanka. Dále byl na výstup zapojen LED pásek s jmenovitým výkonem 4,5 W s nastaveným výstupním napětím 12 V.

Všechna tato měření byla stanovena pro sériové i pro paralelní zapojení. Všechny zpracované grafy jsou dostupné v příloze č.1.



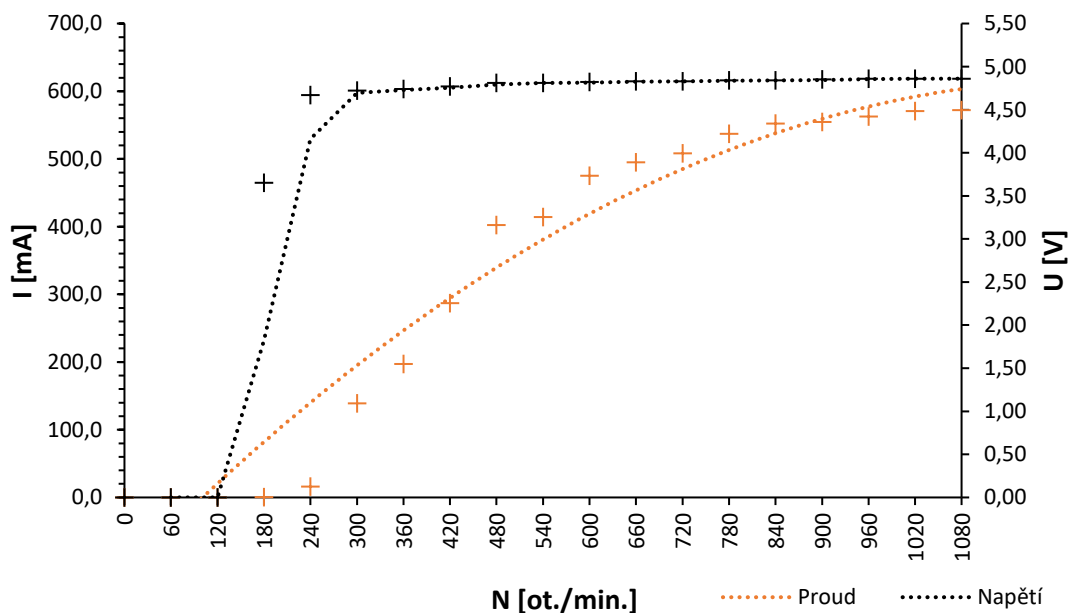
Obrázek 27 Grafická závislost napětí naprázdno na otáčkách generátoru pro sériové zapojení vinutí

Sériové zapojení - Proud nakrátko



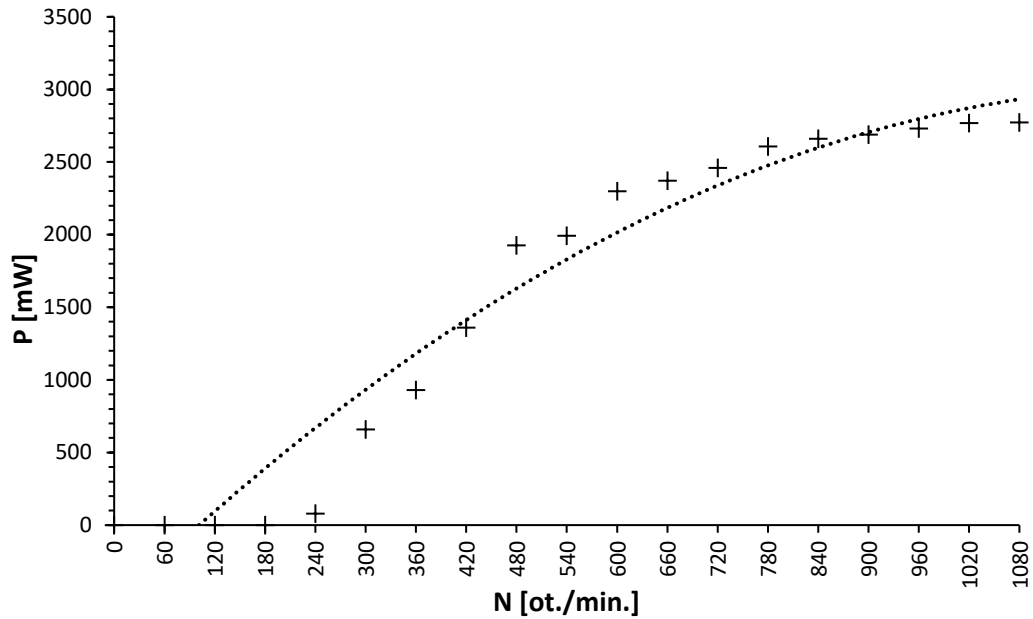
Obrázek 28 Grafická závislost proudu nakrátko na otáčkách generátoru pro sériové zapojení vinutí

Sériové zapojení 5V - Napětí a proud



Obrázek 29 Grafická závislost napětí a proudu na otáčkách generátoru v sériovém zapojení při dobíjení powerbanky 5 V

Sériové zapojení 5V - Výkon



Obrázek 30 Grafická závislost výkonu na otáčkách generátoru v sériovém zapojení při dobíjení powerbanky 5 V

Sériové zapojení se vyznačuje menšími otáčkami, kdy dojde k dosažení požadovaného napětí a generátor začne generovat elektrický výkon. Naproti tomu ve vysokých otáčkách je maximální odebíraný proud limitovaný zkratovým proudem a odebíraný proud saturuje (obr. 29). Paralelní zapojení je schopno generovat větší proud, provozního napětí dosahuje však až při vyšších otáčkách.

5.3 Hardware monitorovacího zařízení

Monitorovací systém slouží k měření okamžitého výkonu a otáček rotoru VE. Je tedy nutné měřit napětí a proud odebíraný z generátoru. K monitorování se využívá platforma Arduino Uno společně s vybranými moduly (obr. 31).

Naměřené hodnoty se zobrazují na LCD a ukládají na SD kartu pro pozdější zpracování dat. Pro časovou analýzu dat je monitorovací systém vybaven RTC modulem.

Proudový sensor INA 219

Jedná se o proudový snímač, který je schopný měřit stejnosměrný proud, napětí i výkon. Jeho rozsah měřitelných hodnot je 0-3,2 A, maximální měřené napětí 26 V. Měření proudu funguje na principu měření úbytku napětí na bočníku, který má velikost 0,1 Ω . Tento modul lze provozovat v různých módech, které se liší rozsahem měřitelných hodnot a rozlišením. Pro monitorovací systém byl zvolen mód s rozsahem do 26 V a 2 A, rozlišení tohoto módu je 0,8 mA. Modul komunikuje s Arduinem přes I2C sběrnici, vyžaduje tedy 4 piny. 2 piny slouží k napájení, 2 piny slouží ke komunikaci. Pomocí dvou pájecích plošek lze měnit adresu I2C sběrnice [24].

Modul pro měření otáček KY - 003

K měření otáček slouží senzor KY-003, pracujícím na principu Hallova jevu. Jedná se o jednoduchý spínač, který sepne při detekci magnetického pole. Senzor má tři piny. Dva piny slouží k napájení a jeden slouží pro přenos dat v digitální podobě [25].

Měření otáček probíhá na principu měření času mezi jednotlivými detekcemi magnetického pole. Tento senzor je umístěn ve strojovně VE, kde snímá magnetické pole magnetu umístěného na rotoru VE.

LCD s převodníkem I2C sběrnice

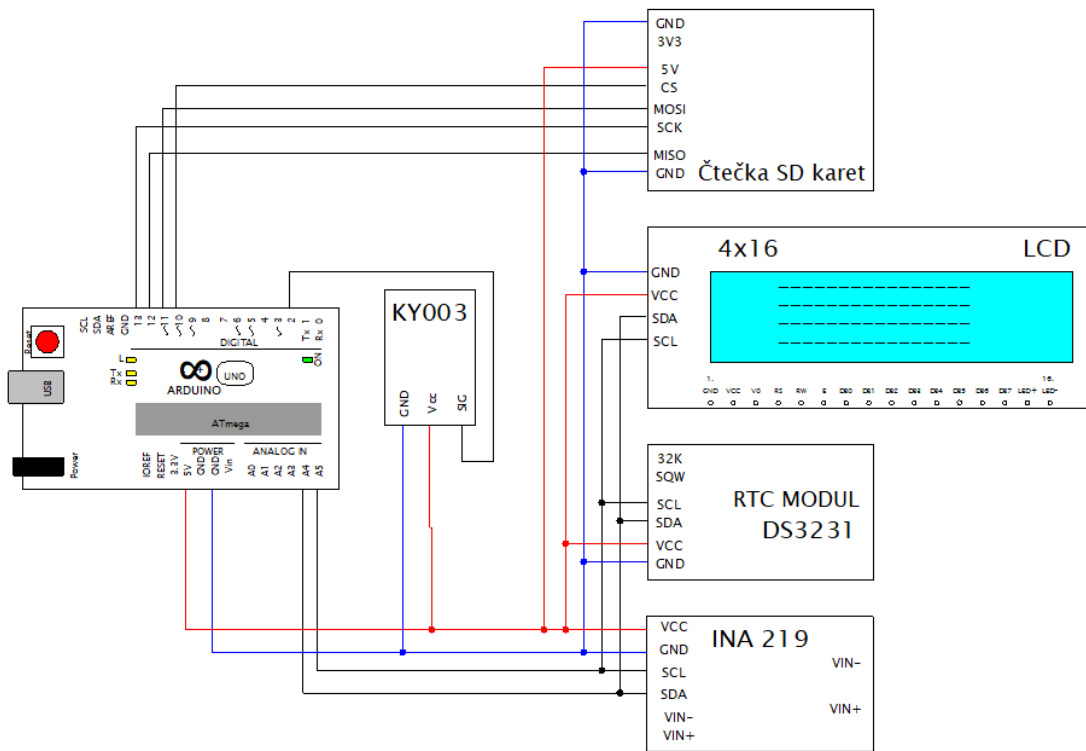
Čtyř řádkový LCD s dvaceti znaky na řádek. LCD komunikuje s Arduinem pomocí I2C sběrnice. Displej slouží k zobrazování měřených informací [26].

RTC DS3231

Tento modul slouží k uchovávání informací o reálném čase. V případě výpadku energie, kdy dojde k restartování Arduina, uchová RTC modul informaci o reálném čase, díky své vlastní baterii. Modul komunikuje přes I2C sběrnici [27].

Čtečka SD karet

Čtečka SD karet slouží k zápisu naměřených hodnot. Tyto hodnoty se zpracovávají pomocí jiných softwarů. Čtečka komunikuje pomocí SPI sběrnice s celkovým počtem 6 pinů [28].



Obrázek 31 Blokové schéma monitorovacího systému

5.4 Software monitorovacího zařízení

Pro vytvoření programu pro mikrokontroler bylo použito vývojové prostředí Arduino IDE a programovací jazyk Wiring. Dále byly použity příslušné knihovny programu Wiring a knihovny příslušných modulů.

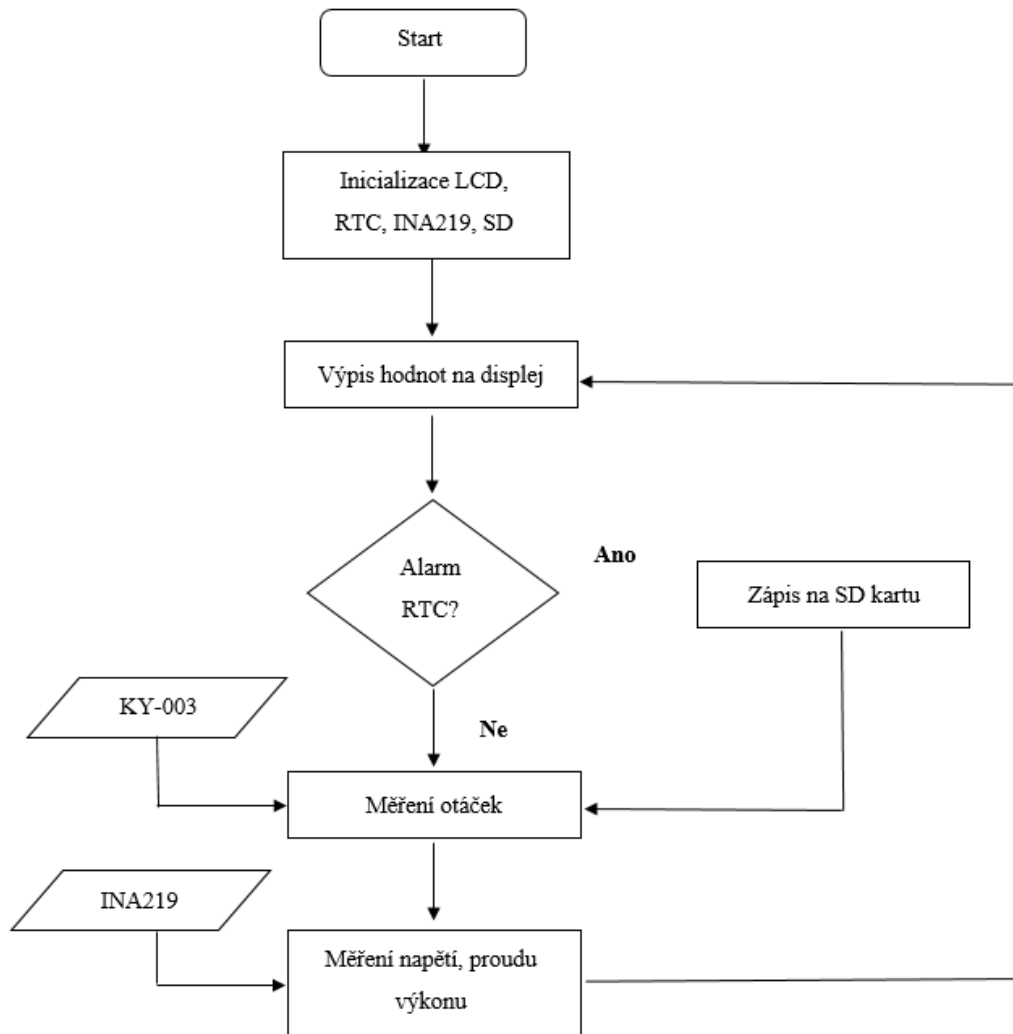
Program nejprve provede inicializaci RTC, LCD, proudového senzoru INA219 a zahájí komunikaci s modulem SD karty.

V nekonečné smyčce probíhá samotné odečítání měřených hodnot, jejich zpracování a ukládání na SD kartu.

Otáčky se měří tak, že po pevně stanovenou dobu program počítá impulsy magnetického spínače KY-003. Doba zvoleného intervalu určuje rozlišení měření otáček, ale i snímací frekvenci monitorovacího systému (obr. 32). Tato doba nesmí být zvolena neúměrně dlouhá, neboť by docházelo ke zbytečnému zaneprázdnění programu, Proto byl zvolen interval měření otáček 2 s. Z této hodnoty vyplývá, že rozlišení snímaných otáček je 60 ot./min.

Snímání napětí, proudu a výkonu z proudového senzoru INA219 se provádí po uplynutí doby snímání otáček. Tyto hodnoty se odečtou pouze jednou. Odečtené hodnoty se poté zobrazují na LCD. V průběhu chodu programu se odečtené hodnoty průměrují a rovněž se uchovává nejvyšší odečtená hodnota. Tyto hodnoty se poté vypisují na SD kartu po započítání každé celé minuty. Celý program je dostupný v příloze č.4 na CD.

Diagram programu



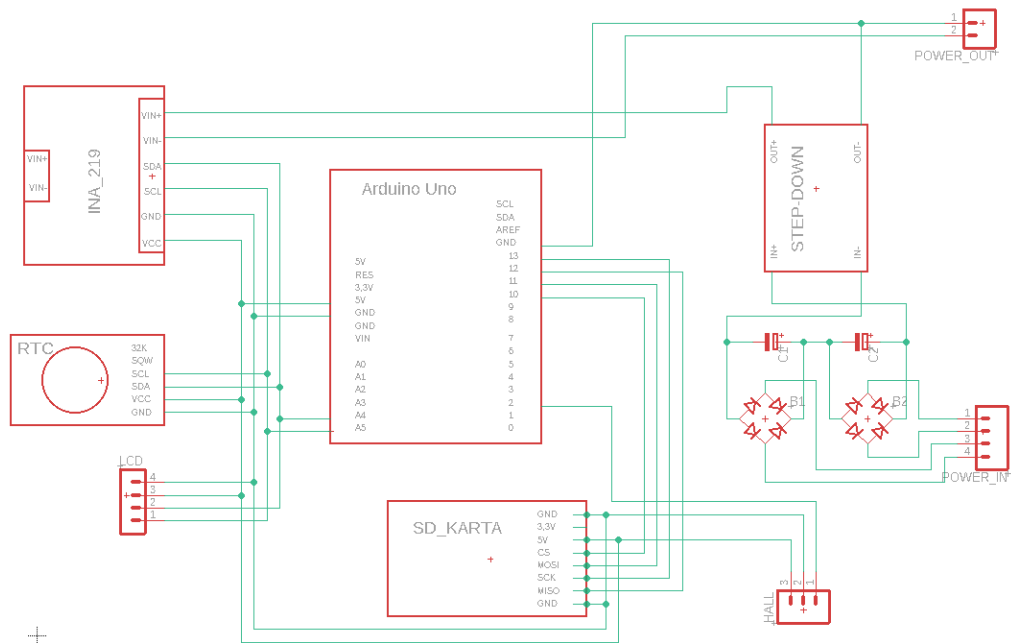
Obrázek 32 Diagram programu pro Arduino

5.5 DPS pro monitorovací zařízení

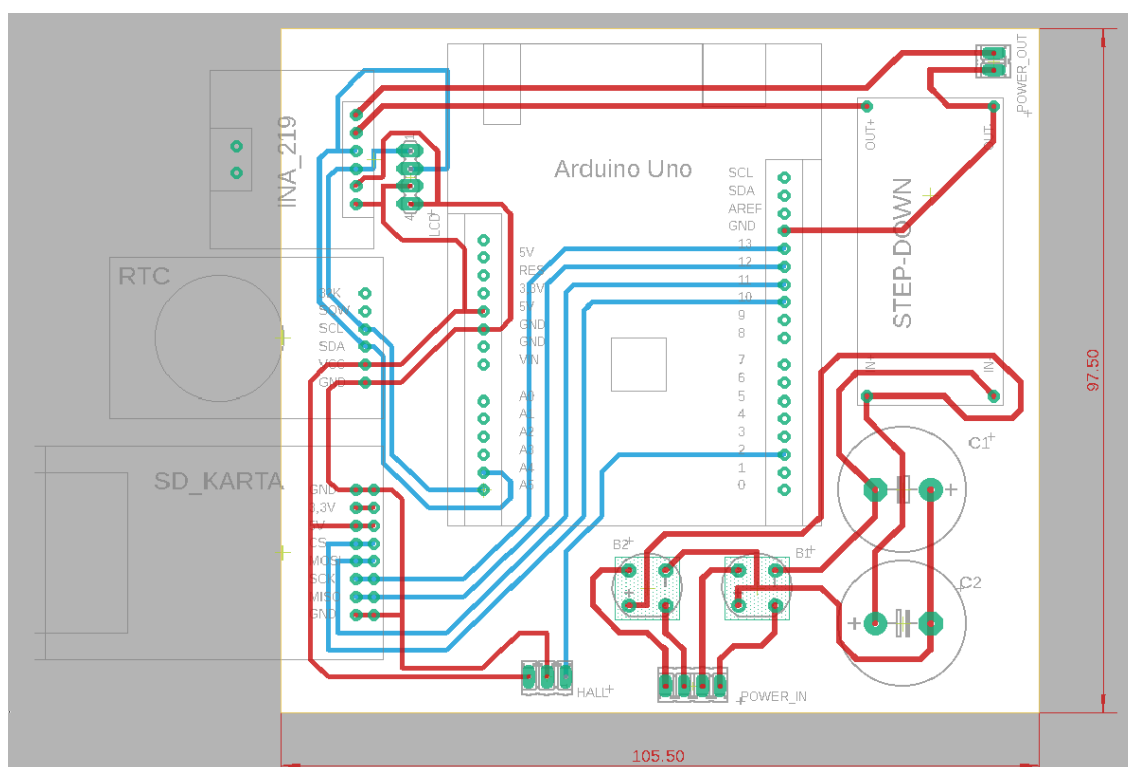
DPS a schéma (obr. 33) bylo kresleno v programu Eagle. DPS slouží k propojení jednotlivých modulů s Arduinem pomocí konektorů DuPont [29] Arduino moduly jsou standartně vybaveny konektory DuPont typem samec. Na DPS musí tedy být konektory DuPont typ samice. Pro připojení vstupu z generátoru, připojení zátěže a připojení Hallova senzoru jsou použity šroubovací svorkovnice s roztečí 2,54 mm [29]. Dále DPS obsahuje usměrňovací můstky a vyhlazovací kondenzátory. O stabilizaci napětí se stará Step-down měnič s nastavitelnou výstupní hodnotou napětí, který je propojen s DPS rovněž konektory DuPont (obr. 34).

Pro konstrukci deska byla zvolena 3. konstrukční třída, dvouvrstvá DPS s rozměry 105,5 x 97,5 mm. Šířka signálových spojů 0,6 mm, šířka výkonových spojů 0,8 mm.

Soubory pro program Eagle jsou v příloze.



Obrázek 33 Schéma monitorovacího zařízení a výkonové části z programu Eagle



Obrázek 34 Ukázka DPS pro monitorovací systém větrné elektrárny

..

Označení	Součástka	Cena [Kč]	Počet [ks]	Cena celkem [Kč]
C1,C2	Kondenzátor 4700uF/25V	5,3	2	10,6
B1,B2	Graetzův můstek 1A	21	2	42
POWER_OUT	Konektor 2 piny 2,54mm	5	1	5
HALL	Konektor 3 piny 2,54mm	18	1	18
POWER_IN	Konektor 4 piny 2,54mm	15	1	15
LCD	Kolíková lišta DuPont 4 piny 2,54mm	0,3	1	0,3
INA_219	Stohovatelná dutinková lišta 6 pin	4	1	4
RTC	Stohovatelná dutinková lišta 6 pin	4	1	4
SD_KARTA	Stohovatelná dutinková lišta 8 pin	4	2	8
STEP_DOWN	Kolíková lišta DuPont 4 piny 2,54mm	0,3	1	0,3
ARDUINO	Stohovatelná dutinková lišta 6 pin	4	1	4
	Stohovatelná dutinková lišta 8 pin	4	2	8
	Stohovatelná dutinková lišta 10 pin	5	1	5

Cena celkem

124,2

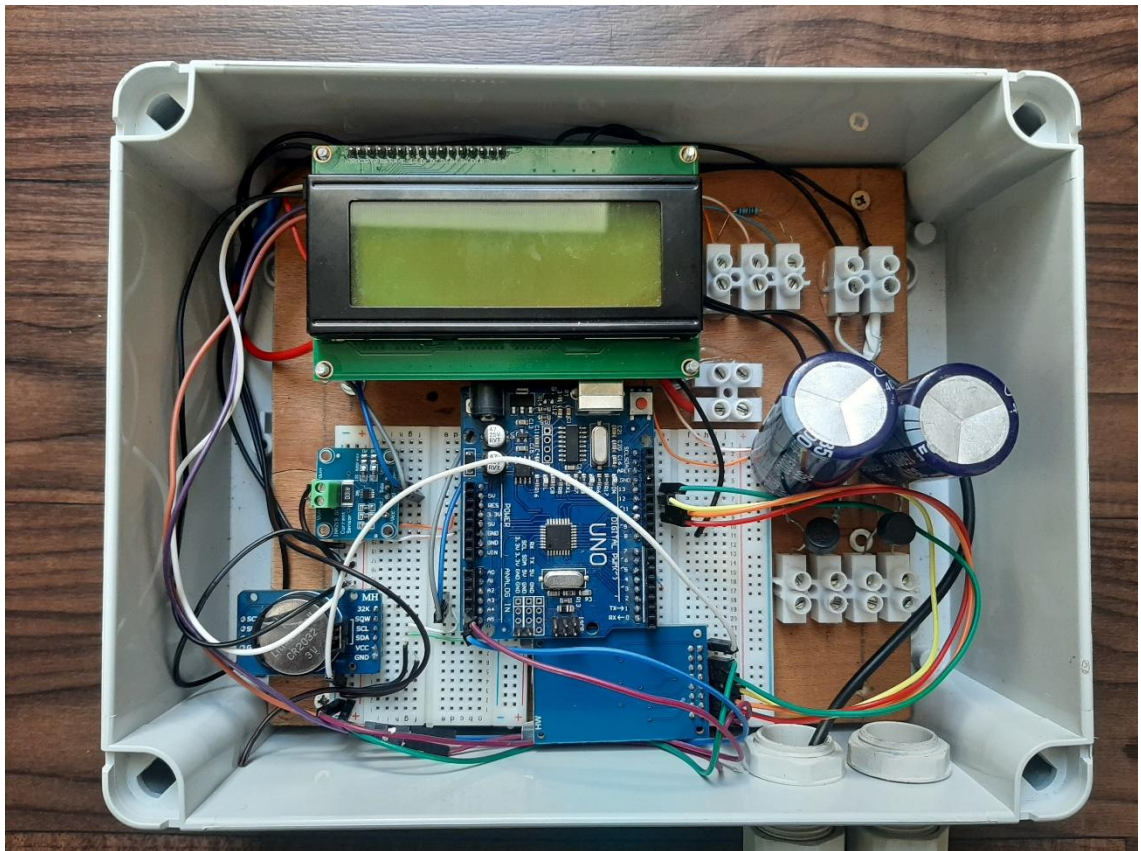
Tabulka 2 Seznam použitých komponent s cenami platnými ke dni 31.5.2021
[29] [30]

5.6 Realizované monitorovací zařízení

Monitorovací zařízení je ve zvolené konfiguraci proudového senzoru schopno měřit napětí v intervalu 0-26 V a proud v intervalu 0-3,2 A. Přesnost měřeného proudu je $\pm 0,8$ mA. Otáčky se měří s rozlišením 60 ot./min., což je dáno dobou, po kterou se počítají impulsy magnetického senzoru KY-003 představující otáčky rotoru. Součástí monitorovacího zařízení je i step-down měnič s nastavitelným výstupním napětím 3-35 V a maximálním proudem 3 A. Pomocí tohoto měniče lze nastavit požadované generované napětí, pouze ale do hodnoty 26 V, což je maximální hodnota proudového senzoru INA219.

Monitorovací zařízení bylo pro otestování provozu realizováno pomocí dvou nepájivých polí se zachováním zapojení ze schématu (obr. 33). Pro krytí elektroniky proti klimatickým podmínkám byla elektronika umístěna do instalační krabice LUKA s průhledným víkem. Ukázka realizovaného monitorovacího zařízení je na obr. 35.

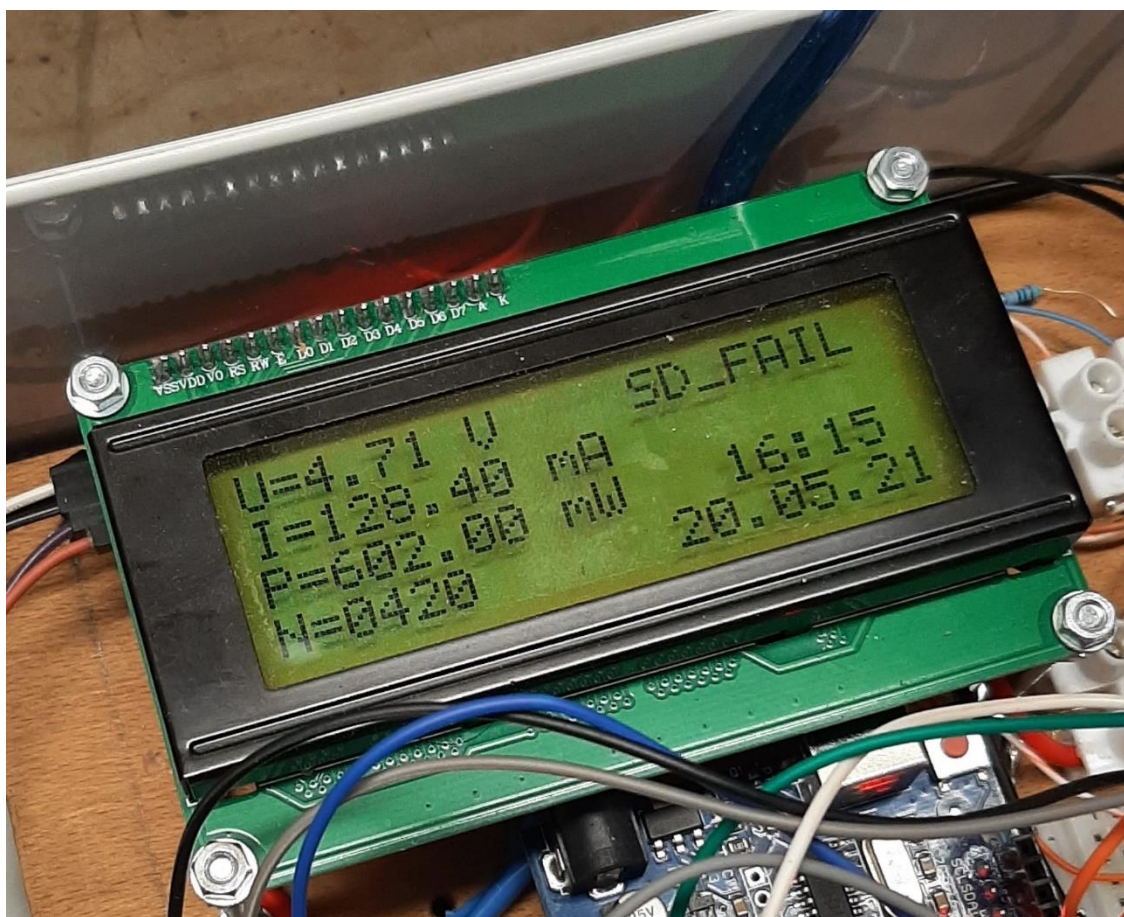
Pro připojení vodičů jsou použity šroubovací svorky. Spodní svorka se čtyřmi přípojnými slouží pro připojení vinutí generátoru. Svorka pod LCD slouží k připojení napájení monitorovacího zařízení. Napájecí napětí může nabývat hodnot 5 až 15 V, lze tedy použít i olovenou baterii. Svorka v horní části se třemi přípojnými slouží pro připojení magnetického spínače KY-003. Zleva je zapojení +5 V, GND, Signál. Poslední svorka v horní části slouží k připojení zátěže generátoru. U svorek napájení a zátěže platí, že levá svorka je +, pravá -.



Obrázek 35 Monitorovací zařízení realizované na nepájivém poli

Na LCD jsou zobrazovány naměřené hodnoty, aktuální čas, aktuální datum a informace o stavu SD karty. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v pořadí napětí U [V], proud I [mA], výkon P [mW] a otáčky [ot./min.].

V pravém horním rohu je zobrazen informační výpis představující stav SD karty. Výpis SD_DONE značí, že SD karta byla inicializována a zápis do ní proběhl bez problému, SD_ERROR značí, že inicializace se nepovedla a SD_FAIL značí, že nedošlo k zápisu na SD kartu. Ukázka stylu výpisu hodnot na LCD je na obr.36.



Obrázek 36 Výpis hodnot na LCD

6 ROZPOČET VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A MONITOROVACÍHO SYSTÉMU

Rozpočet tvoří náklady na mechanickou část větrné elektrárny, ceny materiálu na 3D tisk, ceny ložisek, spojovacího materiálu a elektrických komponent. Do rozpočtu větrné elektrárny není zahrnuta doprava materiálu a spotřebovaná elektrická energie 3D tiskárny. Dále není zahrnuta výroba hliníkového dílu PP_1006_01.

Rozpočet dále tvoří použité komponenty monitorovacího systému, rozváděč a součástky osazené na DPS. Rozpočet nezahrnuje výrobu DPS. Detailně zpracované tabulky jsou umístěny v příloze č.2.

Tabulka tištěných dílů

Ceny spotřebovaného materiálu 3D tiskárny jsou platné pro materiál PLA od Firmy EKO MB. Průměr struny 1,75mm. Barva pastelově zelená [34]. Tisknuto dle parametrů doporučených výrobcem filamentu.

Celková cena tisknutých dílů větrné elektrárny je 382,56 Kč.

Tabulka použitých konvenčních dílů

Ceny použitých ložisek, spojovacího materiálu a elektrických komponent konstrukce větrné elektrárny. Do rozpočtu nejsou zahrnuty ceny kabelů, neboť se jejich délka liší dle umístění větrné elektrárny.

Celková cena konvenčních dílů je 812,20 Kč.

Tabulka monitorovacího systému

Ceny Arduina, použitých modulů a úložné krabice. Rozpočet nezahrnuje výrobu DPS. Celková cena monitorovacího systému je 1255,2 Kč.

Název konstrukční části	Cena konstrukční části [Kč]
Tištěné díly	382,56
Konvenční díly	812,20
Monitorovací systém	1255,20

Celkem

2449,96

Tabulka 3 Celková cena větrné elektrárny s monitorovacím systémem

7 TESTOVÁNÍ PROVOZU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

V období od 23.4.2021 do 24.5.2021 byly provedeny tři testovací provozy větrné elektrárny, při níž se projeví nejrůznější nedostatky konstrukce. První dva testy byly provedeny na ideálním prostředí pro provoz větrné elektrárny, na volném prostranství bez okolních překážek, daleko od bytové zástavby a na 4 m vysokém stožáru. Poslední testovací provoz byl proveden v blízkosti bytové zástavby v prostředí s nízkou hustotou překážek, ve výšce 4 m nad zemí.

7.1 První zkušební provoz

První testovací provoz větrné elektrárny se uskutečnil 23.4.2021. Tento den byla dle webové stránky weather.com [31] hlášená rychlost větru 4 – 5,5 m/s pro danou lokalitu obce Rodinov. Větrná elektrárna byla umístěna na volném prostranství mimo okolní zástavbu (obr. 37). Tento zkušební provoz odhalil nedostatky v konstrukci větrné elektrárny i v samotném monitorovacím systému.



Obrázek 37 Umístění větrné elektrárny na 4 m vysokém stožáru

Z hlediska konstrukce větrné elektrárny došlo vlivem nárazového větru o rychlosti až 5,5 m/s k přestřížení čepu spojující ložisko a strojovnu větrné elektrárny (obr. 38). Z hlediska 3D tisku je tištěná součást nejméně odolná na stříh mezi jednotlivými tištěnými vrstvami, což byl i případ tohoto čepu. Tento čep má ve výkresové dokumentaci označení PP_1009_01. Důsledkem této deformace došlo k zničení lopatek větrné elektrárny i některých dílů náboje.

Řešením tohoto problému bylo nahrazení čepu PP_1009_01 vytištěného na 3D tiskárně čepem vystruženým z hliníku.

Následkem chyby v programu monitorovacího zařízení a špatným nastavením intervalu vypisování hodnot na SD kartu nedošlo k zaznamenání správných hodnot, není tedy známa hodnota otáček, při které došlo k deformaci a zničení VE.



Obrázek 38 Přestřížení čepu PP_1009_01 a následná deformace větrné elektrárny

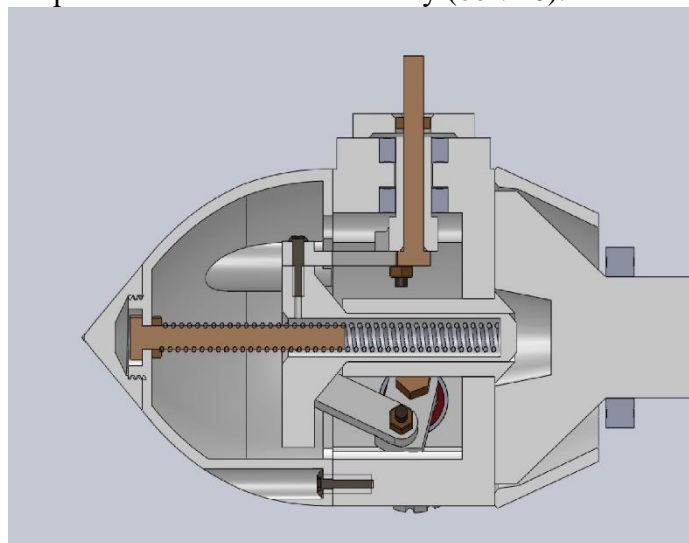
7.2 Druhý zkušební provoz

Druhý zkušební provoz byl proveden 6.5.2021 až 7.5.2021. Umístění větrné elektrárny bylo stejné jako při prvním zkušebním provozu. Při tomto provozu se ověřila funkčnost monitorovacího zařízení, ale další nedostatek konstrukce větrné elektrárny. Dle původní konstrukce byly lopatky ve spojení s nábojem umístěny na plastová tištěná pouzdra na principu valivého ložiska (obr. 39). Vlivem této konstrukce nepracovala správně regulace naklápění lopatek. Nebyla zajištěna ani dostatečná pevnost pouzder proti působení odstředivé síly roztočeného rotoru.



Obrázek 39 Původní uložení čepu PP_3003_01 na valivých ložiskách

Řešením tohoto mechanického problému bylo použití sériově vyráběných ložisek CN289 2Z a upravení konstrukce dílu PP_3001_01 tak, aby vznikly tištěné zarážky bránící ložiskům proti posunu vlivem odstředivé síly (obr. 40).



Obrázek 40 Uložení čepu PP_3003_01 v náboji rotoru za použití kuličkových ložisek

Při druhém testovacím provozu byla dle webového portálu weather.com [29] hlášena rychlost větru až 8,5 m/s. Při této rychlosti bylo zaznamenáno 1680 ot./min. Je tedy zřejmé, že regulace naklápění lopatek nepracovala správně. Ověřil jsem však funkčnost monitorovacího zařízení. Zvolil jsem interval zápisu na SD kartu po jedné minutě. Výpis na SD kartu je poté ve formátu:

Datum, čas, průměrné měřené napětí [V], průměrný měřený proud [mA], průměrný měřený výkon [mW], průměrné měřené otáčky [ot./min.], maximální měřené napětí [V], maximální měřený proud [mA], maximální měřený výkon [mW] a maximální měřené otáčky [ot./min.] (obr. 41).

```
7.5.21 6:31 2.11 7.10 61.03 159 9.04 67.10 606.00 1680
7.5.21 6:32 0.65 0.33 0.00 0 0.72 0.60 0.00 0
7.5.21 6:33 0.61 0.32 0.00 0 0.62 0.60 0.00 0
7.5.21 6:34 0.61 0.30 0.00 0 0.61 0.50 0.00 0
```

Obrázek 41 Ukázka výpisu naměřených hodnot při druhém zkušebním provozu

7.3 Třetí zkušební provoz

Třetí zkušební provoz probíhal ve dnech 23.5. a 24.5.2021. Byla zvolena jiná lokalita než v předchozích dvou zkušebních provozech. Větrná elektrárna byla umístěna do lokality s větší hustotou překážek, ve snaze eliminovat nárazový vítr. Přesné umístění bylo v obci Horní Radouň, lokalita v blízkosti rodinného domu (obr. 42). Pro podobnou lokalitu se předpokládá i umístění v praxi.

Třetí zkušební provoz posloužil ke stanovení orientační závislosti otáček rotoru a vyrobené elektrické energie na rychlosti větru. Bohužel i při třetím zkušebním provozu se projeví limity konstrukce.

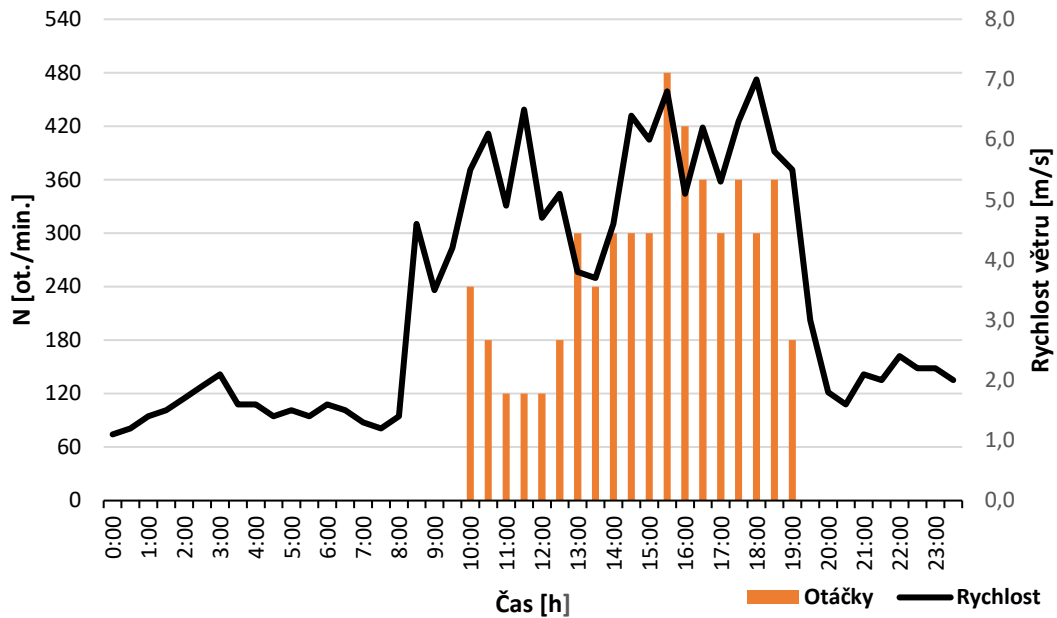


Obrázek 42 Umístění větrné elektrárny při třetím zkušebním provozu

Závislost vyrobené elektrické energie a otáček rotoru byla stanovena z naměřených hodnot zaznamenaných pomocí monitorovacího zařízení. Pro získání rychlosti větru byl použit portál meteo-počasí.cz [32]. Tento portál využívá dobrovolného sdílení hodnot o počasí z poloprofesionálních meteostanic. Oproti oficiálním meteostanicím například od ČHMÚ [33] mají tyto stanice výhodu ve větší hustotě umístění meteostanic, lze si tedy najít data z meteostanice umístěné blíže k lokalitě, pro kterou se data hledají. Nevýhodou je to, že není zaručeno správné umístění meteostanice a získaná data mohou být nepřesná.

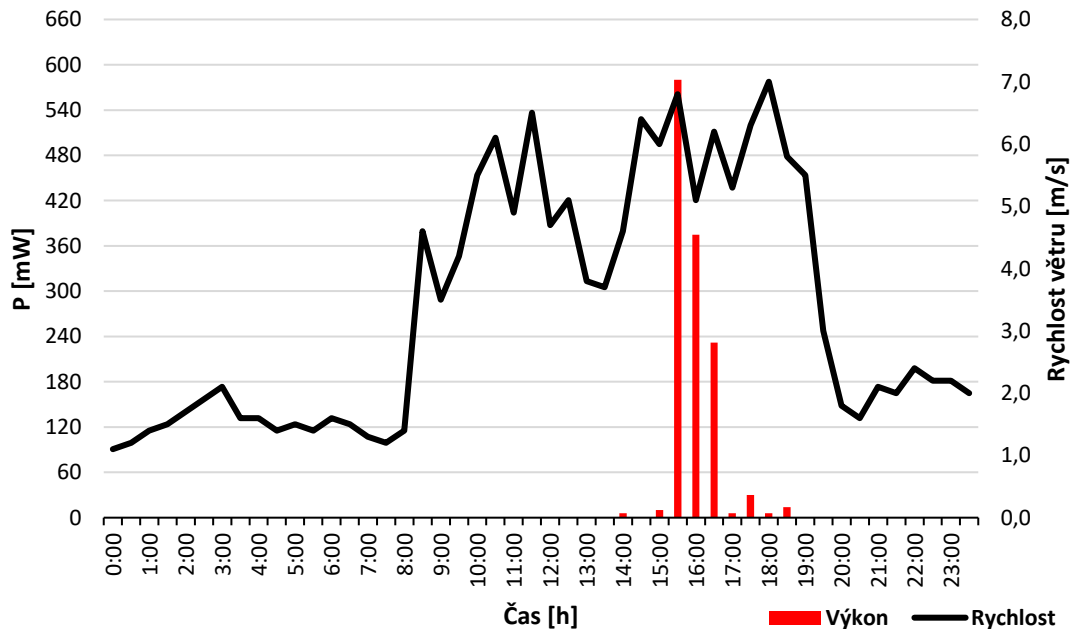
Naměřená data byla exportována do programu Excel a byly z nich vytvořeny následující závislosti.

23.5. Závislost otáček na rychlosti větru



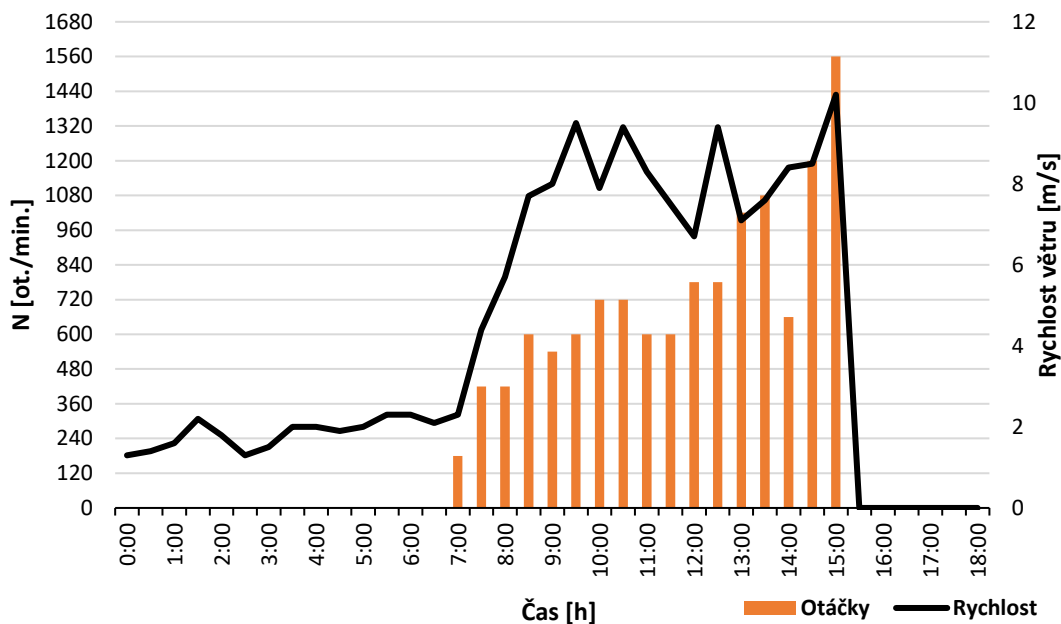
Obrázek 43 Grafická Závislost otáček rotoru na rychlosti větru ze dne 23.5.2021

23.3. Závislost generovaného výkonu na rychlosti větru



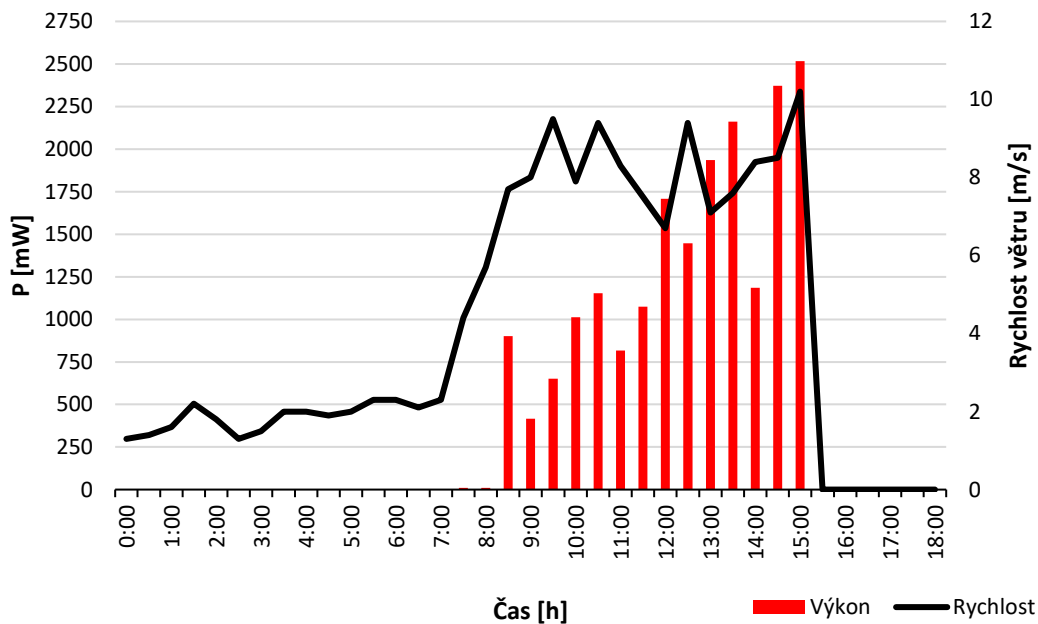
Obrázek 44 Grafická závislost generovaného výkonu na rychlosti větru ze dne 23.5.2021

24.5. Závislost otáček rotoru na rychlosti větru



Obrázek 45 Grafická závislost otáček rotoru na rychlosti větru ze dne 24.5.2021

24.5. Závislost generovaného výkonu na rychlosti větru



Obrázek 46 Grafická závislost generovaného výkonu na rychlosti větru ze dne 24.5.2021

Z uvedených grafů naměřených hodnot lze určit přibližné rychlosti větru, při kterých dochází k rozběhu elektrárny. Elektrárna začíná generovat výkon při rychlostech větru nad 6 m/s.

První den měření byla rychlost větru v intervalu 1 až 7 m/s. Větrná elektrárna negeneruje prakticky žádný výkon (obr. 44). Naměřené otáčky dosahují maximální hodnoty 480 ot./min (obr. 43).

Druhý den měření byla rychlost větru větší, v intervalu od 1 do 10 m/s. V tomto intervalu generuje větrná elektrárna maximální výkon, ač je to pouhých 2,5 W. Při takto vysoké rychlosti větru dochází ovšem k roztočení rotoru na vysoké otáčky, které ohrožují konstrukci větrné elektrárny. Bod z obrázku číslo 45 s hodnotou otáček 1560 ot./min. značí okamžik, kdy došlo k poškození větrné elektrárny. Rychlost větru, při které lze větrnou elektrárnu provozovat musí být tedy pod hodnotou 10 m/s. Zároveň však musí být rychlost větru dostatečně velká, aby docházelo ke generování výkonu. Z naměřených hodnot lze tedy stanovit následující provozní interval. Maximální hodnoty jsou stanoveny s rezervou kvůli ochraně konstrukce větrné elektrárny.

	N [ot./min.]	v [m/s]
Provozní minima	480	6
Provozní maxima	1020	8

Tabulka 4 Určená provozní minima a maxima

Větrná elektrárna byla použita k dobíjení powerbanky s jmenovitou kapacitou 1600 mAh. Jmenovité napětí větrné elektrárny je stabilizováno step-down měničem na 5 V. Výsledná vyrobená elektrická energie byla vyjádřena jako součet průměrných hodnot odebraného proudu po dobu 1 hodiny.

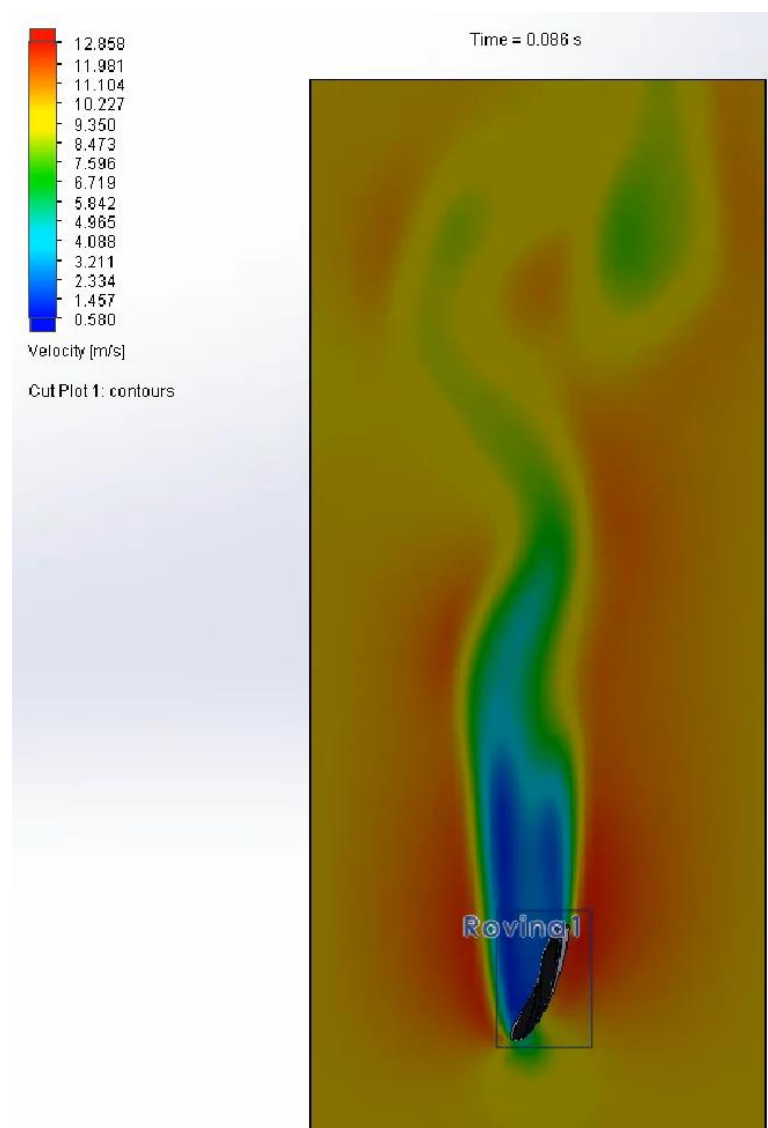
První den měření nevyrobila větrná elektrárna prakticky žádný výkon. Druhý den byla vyrobena celková elektrická energie 77,3 mAh, což je ve srovnání s kapacitou dobíjené powerbanky zanedbatelná hodnota.

Jak bylo zmíněno výše, i při třetím testovacím provozu došlo k poškození větrné elektrárny. Tentokrát to bylo způsobeno prasknutím lopatky v místě uložení matice do spodní části lopatky. V tomto bodě je konstrukce lopatky nejvíce namáhaná silou působícího větru. Řešením a zlepšením pevnosti konstrukce lopatky by mohlo být použití kompozitního materiálu na potažení plochy lopatky. Touto metodou se prakticky odstraní problém s praskáním vytištěného profilu mezi jednotlivými vrstvami.

8 SIMULACE PROUDĚNÍ VZDUCHU

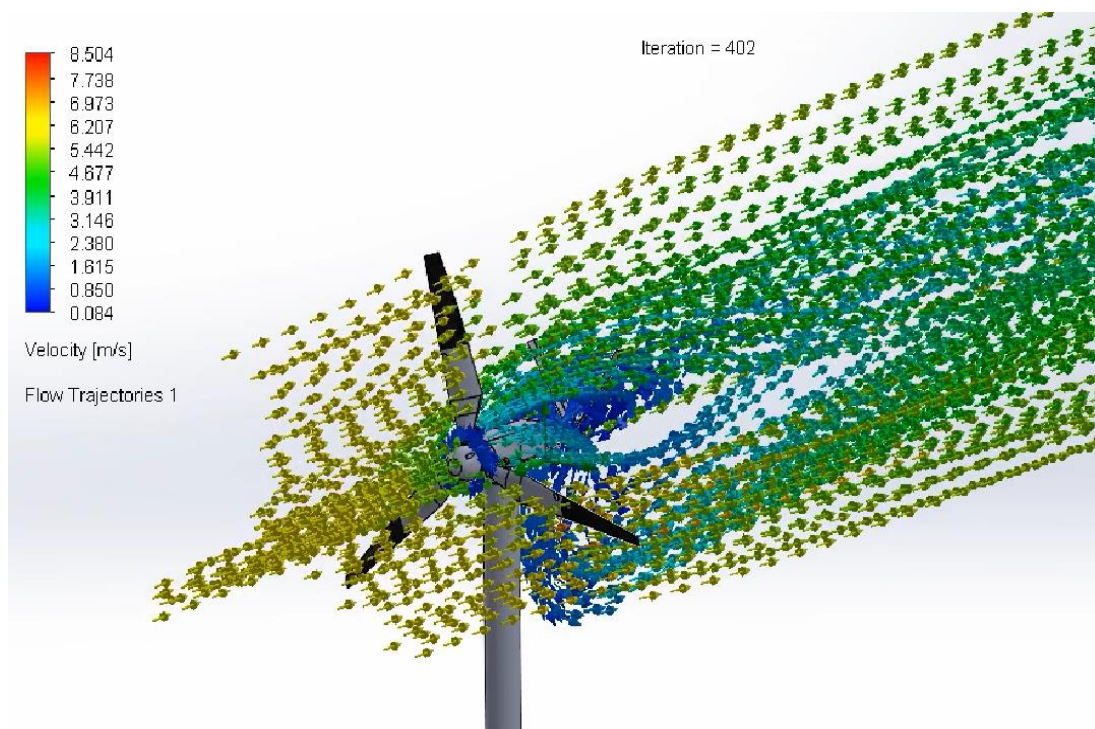
Simulace proudění vzduchu byla provedena v programu Solidworks flow simulation. Byly provedeny dvě simulace. První pro proudění vzduchu kolem profilu lopatky. Druhá pro proudění kolem celé větrné turbíny.

Pro simulaci proudění vzduchu kolem lopatky (obr. 47) byla simulovaná rychlost proudění na 10 m/s. Při simulaci byla zkoumaná aerodynamičnost lopatky, konkrétně odtrhávání vírů. Jedná se o děj, při kterém dochází k brzdění lopatky. Z výstupu simulace je patrné, že k odtržení a zániku vírů dojde ve velice krátkém čase. Teoreticky by se turbína vlivem rychlého odtržení a zániku vírů neměla točit.



Obrázek 47 Simulace proudění vzduchu kolem profilu lopatky

Ve druhé simulaci bylo zkoumáno proudění vzduchu kolem celé turbíny větrné elektrárny (obr. 48). Při simulaci byly nastaveny otáčky větrné elektrárny na hodnotu 1000 ot./min. a rychlost proudění vzduchu na hodnotu 6 m/s. Ze simulace je patrné, že za větrnou elektrárnou vzniká vírová stopa způsobená rotací lopatek větrné elektrárny. Dále je z ní patrné zpomalení proudění vzduchu po průchodu přes lopatky. Ze simulace je také vidět rozrážení proudění vzduchu nábojem větrné elektrárny a vytvoření oblasti bez proudnic za strojovnou větrné elektrárny.



Obrázek 48 Simulace proudění vzduchu kolem větrné turbíny

9 SHRNUÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

V této kapitole je pojednáno o nedostatcích větrné elektrárny a jejich možných vylepšeníh.

V první řadě je nezbytné zvýšit mechanickou odolnost lopatek. Problémem stávající konstrukce je pevnost mezi jednotlivými vrstvami tisku. Řešením by mohlo být použití jiné orientace dílu při 3D tisku a s tím spojené jiné uspořádání vrstev. Lepším řešením by však mohlo být využití 3D tiskárny k tvorbě skořepiny lopatky, která se poté zpevní pomocí kompozitního materiálu tvořeného například skelným vláknem a pryskyřicí. Tato metoda by umožnila zvětšení délky lopatek a možného použití výkonnějšího generátoru.

Další částí k vylepšení je regulační mechanismus naklápění lopatek. Použitá regulace pomocí závaží na kormidlech se ukázala nespolehlivá. Optimálním řešením by mohlo být vytvoření řídicího systému pracujícího s otáčkami rotoru, který by řídil chod servomotoru. Servomotor by poté prováděl samotné naklápění lopatek. Pro ochranu před velkými rychlostmi větru by bylo vhodné použít mechanickou brzdu ovládanou řídicím systémem.

Rovněž se ukázalo, že krokový motor není ideálním generátorem. Dosahuje sice poměrně vysokého napětí i při malých otáčkách, avšak výstupní proud je značně limitovaný malým zkratovým proudem. Vhodnějším řešením by mohlo být použití některého z dostupných DC generátorů. Pro DC generátor bude vhodné navrhnout převodovku.

Posledním vylepšením k zajištění spolehlivosti větrné elektrárny by mohlo být použití kovových materiálů pro nejvíce namáhané části větrné elektrárny jako je čep spojující ložisko a strojovnu nebo čep spojující náboj s generátorem.

10 ZÁVĚR

V bakalářské práci byla nejprve zpracována rešerše na téma energie větru, druhý větrných elektráren s bližším seznámením s třílistou vztlakovou elektrárnou s horizontální osou otáčení. Detailnější popis byl věnován tvaru lopatek, nikoliv však jejich aerodynamickému návrhu nebo výpočtům pevnostních charakteristik.

Byl zhotoven model větrné elektrárny v programu SOLIDWORKS. Jako předloha posloužil model mikro větrné elektrárny MKIII 3DPOWER TURBINE 50W. Z vytvořených modelů byla vytvořena výkresová dokumentace dostupná v přílohách.

V další části bakalářské práce byl zpracován monitorovací systém větrné elektrárny. Nejprve byly odhadnuty otáčky rotoru při stanovené rychlosti větru a vypočítán koeficient rychloběžnosti. Poté bylo provedeno měření napětí naprázdno a proudu nakrátko pro sériové i paralelní zapojení dvou vinutí generátoru. Naměřené mezní hodnoty byly použity ke správnému výběru senzoru proudu z hlediska rozsahu měřitelných hodnot a jejich rozlišení. Bylo sestaveno blokové schéma monitorovacího zařízení tvořeného Arduinem Uno a příslušnými moduly pro měření proudu, RTC, modulu SD karty a LCD.

V programu Arduino IDE byl napsán program pro Arduino Uno. Popis funkce programu je zobrazen ve vývojovém diagramu. Obecně program řídí odečítání měřených hodnot z proudového senzoru INA219 a magnetického senzoru KY-003. Odečítání hodnot se provádí s časovým intervalem 2 s. Ve stejném intervalu probíhá i zobrazování naměřených hodnot na LCD. Zápis naměřených hodnot se provádí po započítí každé celé minuty.

K monitorovacímu zařízení bylo sestaveno schéma zapojení společně s usměrňovacím můstkem a step-down měničem. Pro celé monitorovací zařízení byla navržena DPS. Schéma i návrh DPS bylo zpracováno v programu Eagle, soubory jsou dostupné v příloze na CD.

Monitorovací zařízení bylo zkonstruováno a použito ke stanovení závislostí napětí, proudu a výkonu na otáčkách generátoru pro sériové i paralelní zapojení. Jako testovací zátěž byla použita powerbanka pracující na 5 V, kdy se simulovala možnost použití větrné elektrárny k dobíjení 5 V elektroniky. Jako druhá testovací zátěž byl použit LED pásek s jmenovitým napětím 12 V a jmenovitým výkonem 5 W. Uvedené závislosti jsou dostupné v příloze č.1.

Dále byla provedena simulace proudění vzduchu kolem listu větrné elektrárny i kolem větrné elektrárny jako celku. Při simulaci proudění kolem listu byla zkoumána aerodynamičnost lopatky, zkoumalo se odtrhávání vírů. Při simulaci proudění kolem celé konstrukce větrné elektrárny byl zjištěn vznik vírové stopy a zpomalení proudění po přechodu přes lopatky.

Byly provedeny celkem tři testovací provozy, při kterých se zkoumala vyrobená elektrická energie a otáčky rotoru v závislosti na rychlosti větru. Bohužel, při testovacích provozech došlo pokaždé k odhalení některého konstrukčního nedostatku větrné elektrárny.

Při prvním provozu došlo vlivem síly větru k přestřižení čepu spojovacího ložisko a strojovnu větrné elektrárny a následné deformaci lopatek. Vlivem chyby v programu monitorovacího zařízení nedošlo k zaznamenání naměřených hodnot. Řešením tohoto problému bylo vyrobení čepu z hliníku.

Při druhém provozu došlo rovněž k deformaci větrné turbíny. Tentokrát vlivem odstředivé síly působící na uložení lopatek. Tento problém byl vyřešen zesílením úložné části náboje v místě uložení lopatek a použitím konvenčních ložisek. Při tomto zkušebním provozu se podařilo úspěšně vyzkoušet provoz monitorovacího zařízení. Při deformaci větrné elektrárny bylo naměřeno 1680 ot./min. Což je důkaz toho, že mechanismus regulace otáček nefunguje správně. Maximální rychlost větru tohoto dne byla 8,5 m/s. Což je mimo později stanovené provozní maximum.

Během třetího zkušebního provozu byla naměřena data, ze kterých byly zpracovány grafické průběhy závislosti generovaného elektrického výkonu a otáček na rychlosti větru. Data rychlostí větru jsou z nejbližší meteostanice umístěné cca 10 km od místa provozu větrné elektrárny, nejsou tedy přesně vypovídající, spíše orientační. Bohužel i třetí zkušební provoz skončil poškozením větrné turbíny. Došlo k poškození lopatek, které se zlomily v místě zatisknuté matice. V tomto místě je lopatka nejméně pevná, ať už vlivem přerušení tisknu, deformací mezi vrstvami nebo silou větru působící přes páku tvořenou lopatkou. Z naměřených hodnot byla stanovena provozní minima, rychlost větru, při které dojde ke generování elektrické energie. Provozní minimum je 6 m/s, při kterých dosahuje větrná elektrárna 480 ot./min. Provozní maximum naopak představuje maximální rychlost větru, při které nedojde k poškození turbíny, generovaný výkon je maximální. Provozní maximum je 8 m/s. Při maximální provozní rychlosti má větrná turbína 1080 ot/min.

V kapitole 9 byly podány návrhy k odstranění nedostatků konstrukce větrné elektrárny a zlepšení spolehlivosti.

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] VAŠINA, Martin. *Obnovitelné zdroje energie, energie vody a větru*. [online] Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav fyziky a materiálového inženýrství, 2010, poslední aktualizace: 7.6.2010, kap.11 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_11.pdf
- [4] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. *Základy fyziky letu. Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 - 2020 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/130-zaklady-fyziky-letu>
- [5] 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.
- [6] TJIU, Willy; MARNOTO, Tjukup; MAT, Sohif; RUSLAN, Mohd Hafidz a SOPIAN, Kamaruzzaman. *Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations*: [online]. 2014, poslední aktualizace:20.11.2020 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/266799978_Darrieus_vertical_axis_wind_turbine_for_power_generation_I_Assessment_of_Darrieus_VAWT_configurations. Article.
- [7] CHROMEČEK, T. *Aerodynamický návrh větrné turbíny pro zvolenou lokalitu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 113 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.
- [8] HALLENGA, Uwe. *Malá větrná elektrárna: stavební návod s konstrukčními výkresy*. 2. Ostrava: HEL, 2006. ISBN 80-86167-27-5.
- [9] *Magnus effect*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect

- [10] *Revolutionary Magnus (Spiral Fin) Turbine Generates Power at a Low Cost. Japan for sustainability* [online]. 2007, 2007/07/21 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id026726.html
- [11] CROME, Horst. *Technika využití energie větru: Svépomocná stavba větrných zařízení*. Ostrava-Plesná: HEL, 2002. ISBN ISBN 80-85167-19-4.
- [12] Aerodynamika rotoru větrné elektrárny. *ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha, 2013, 2013 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/clanky/aerodynamika-rotoru-vetrne-elektrarny/308>
- [13] Konstrukce rotorového listu větrné elektrárny. *ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha, 2013, 2013 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/>
- [14] KULJOVSKÝ, M. *Návrh větrné elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. [cit. 2020-11-24] 74 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [15] , Michael. *VLIV VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ JEJICH INSTALOVANÉHO VÝKONU V ČESKÉ REPUBLICE* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/137436/MAD0053_HGF_B2102_3904R005_2019.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Vedoucí práce Prof. Ing. Vladimír Lapčík, CSc.
- [16] GÖRIG, T. *Návrh malé větrné elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc..
- [17] Větrná turbína elektrárna S400W 12V s regulátorem. *VDK ELEKTRONIKA* [online]. Plzeň, 2019 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.vdkelektronika.eu/Vetrna-turbina-elektrarna-S400W-12V-s-regulatorem-d1445.htm#>
- [18] Větrná turbína elektrárna S400W 12V s regulátorem. *Solareconomic* [online]. Valašské Meziříčí, 2020 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.solareconomic.cz/Vetrna-turbina-JPS-200-d316.htm#detail-anchor-description>

- [19] Větrná elektrárna Savonius SV 400W 12V s regulátorem nabíjení akumulátorů. *VDK ELEKTRONIKA* [online]. Plzeň, 2019 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.vdkelektronika.eu/Vetrna-elektrarna-Savonius-SV-400W-12V-s-regulatorem-nabijeni-akum-d1429.htm>
- [20] Větrná elektrárna 1kW SET. *Solar-elektro* [online]. Nymburk, 2011 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <http://www.solar-elektro.cz/?action=detail&id=ID2292&catg=0>
- [21] DAVIS Daniel. MKIII 50 Watt 3d printable Wind Turbine. *thingiverse* [online]. United Kingdom, 2018 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:2851306>
- [22] GME. *1.8°42mm Hybrid Stepper Motor-NEMA17* [online katalogový list] rok vydání neznámý [cit. 05.12.2020]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.775-138.1.pdf>
- [23] Počet listů rotoru větrné elektrárny. *ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha, 2013 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/clanky/pocet-listu-rotoru-vetrne-elektrarny/310>
- [24] ADAFRUIT LEARNING SYSTÉM. *Adafruit INA219 Current Sensor Breakout* [online katalogový list] 2019 [cit. 23.05.2021] Dostupné z: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-ina219-current-sensor-breakout.pdf>
- [25] JOY-it. *Hall Magnetic Field Sensor KY-003* [online katalogový list] 2018 [cit. 05.12.2020]. Dostupné z: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1321961/Joy-IT/KY003/1>
- [26] GM ELECTRONIC. *LCD displeje s převodníkem I2C sběrnice* [online katalogový list] datum vydání neznámý [cit. 05.12.2020]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.772-254.1.pdf>
- [27] ECLIPSTERA S.R.O.. *RTC hodiny reálného času DS3231* [online katalogový list] 2017 [cit. 05.12.2020]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/docs/produkty/0/835/1459971336.pdf>
- [28] ECLIPSTERA S.R.O.. *Čtečka SD karet* [online katalogový list] 2016 Verze 1.0 [cit. 05.12.2020]. Dostupné z: <http://navody.arduino-shop.cz/docs/texty/0/64/1427787012.pdf>

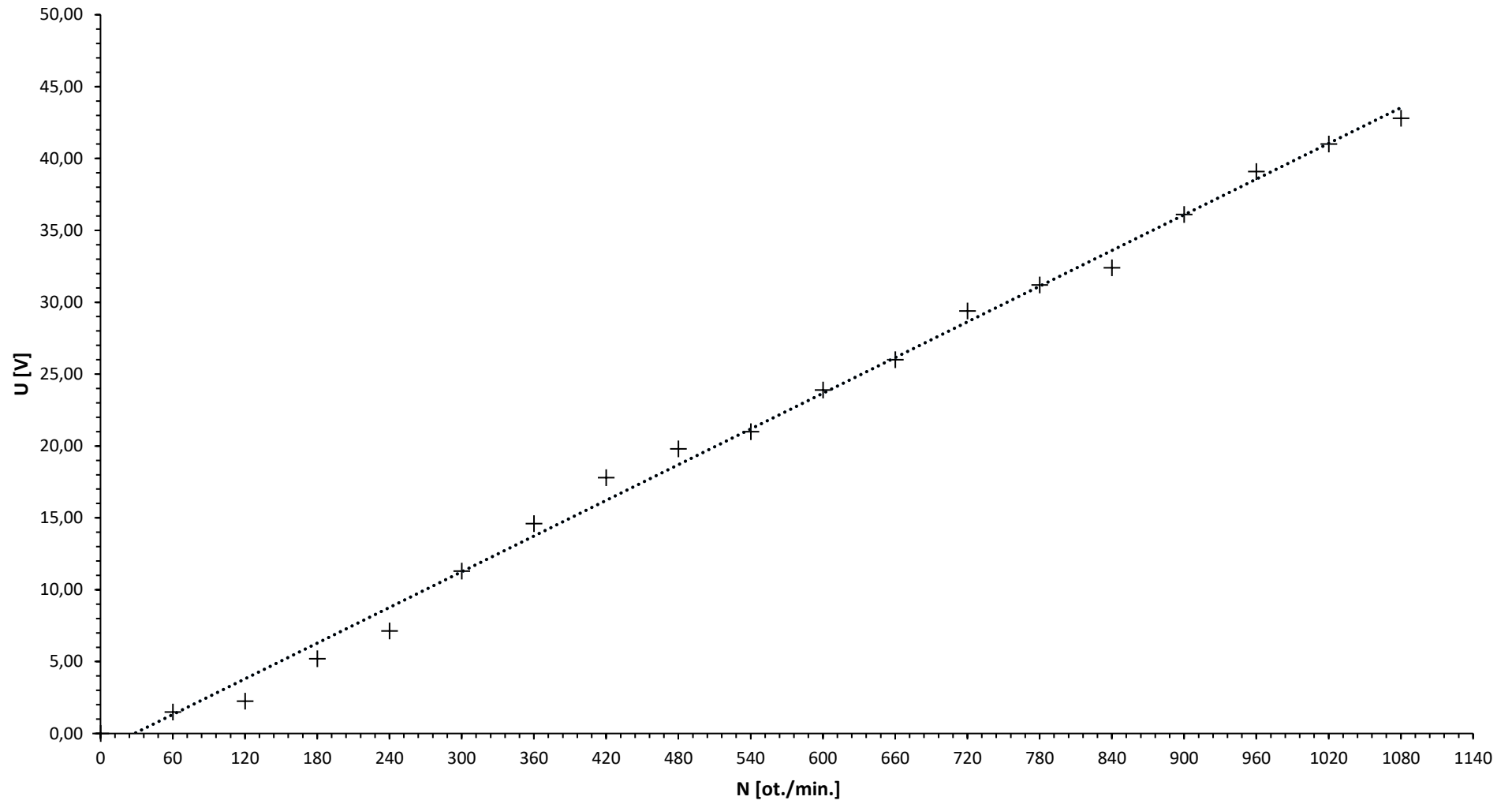
- [29] Dratek.cz. *Dratek.cz: VELKOOBCHOD MALOOBCHOD S ARDUINEM* [online]. Havlíčkův Brod, 2021 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://dratek.cz>
- [30] Gme.cz. *GM electronic* [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/>
- [31] Weather.com. *The Weather Channel* [online]. Atlanta, 2021 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://weather.com>
- [32] *Meteo-pocasi.cz* [online]. Valašské Meziříčí, 2021 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://www.meteo-pocasi.cz>
- [33] *Portál ČHMÚ* [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz>
- [34] EKO MB Recyklovaný PLA 1.75mm 1kg pastelově zelená. Alza.cz [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-6-2]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/eko-mb-recyklovany-pla-1-75mm-1kg-pastelove-zelena-d5838416.htm>

Seznam příloh

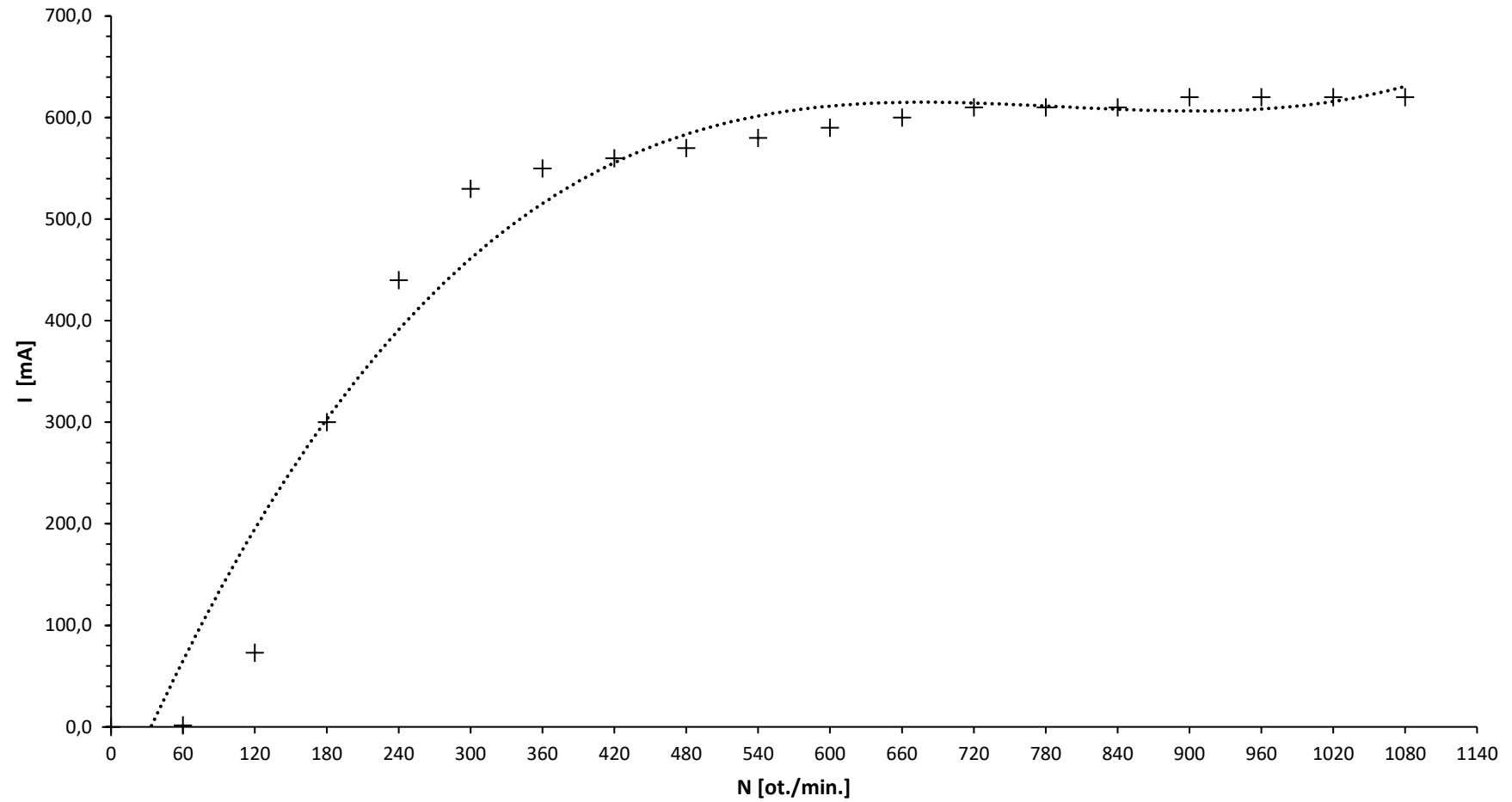
- 1.Příloha Závíslost napětí, proudu a výkonu na otáčkách generátoru
- 2.Příloha Tabulky dílů ke konstrukci větrné elektrárny
- 3.Příloha Technická dokumentace větrné elektrárny na CD
- 4.Příloha Program monitorovacího zařízení pro Arduino Uno na CD
- 5.Příloha Soubory DPS monitorovacího zařízení na CD

1.Příloha Závislosti napětí, proudu a výkonu na otáčkách generátoru

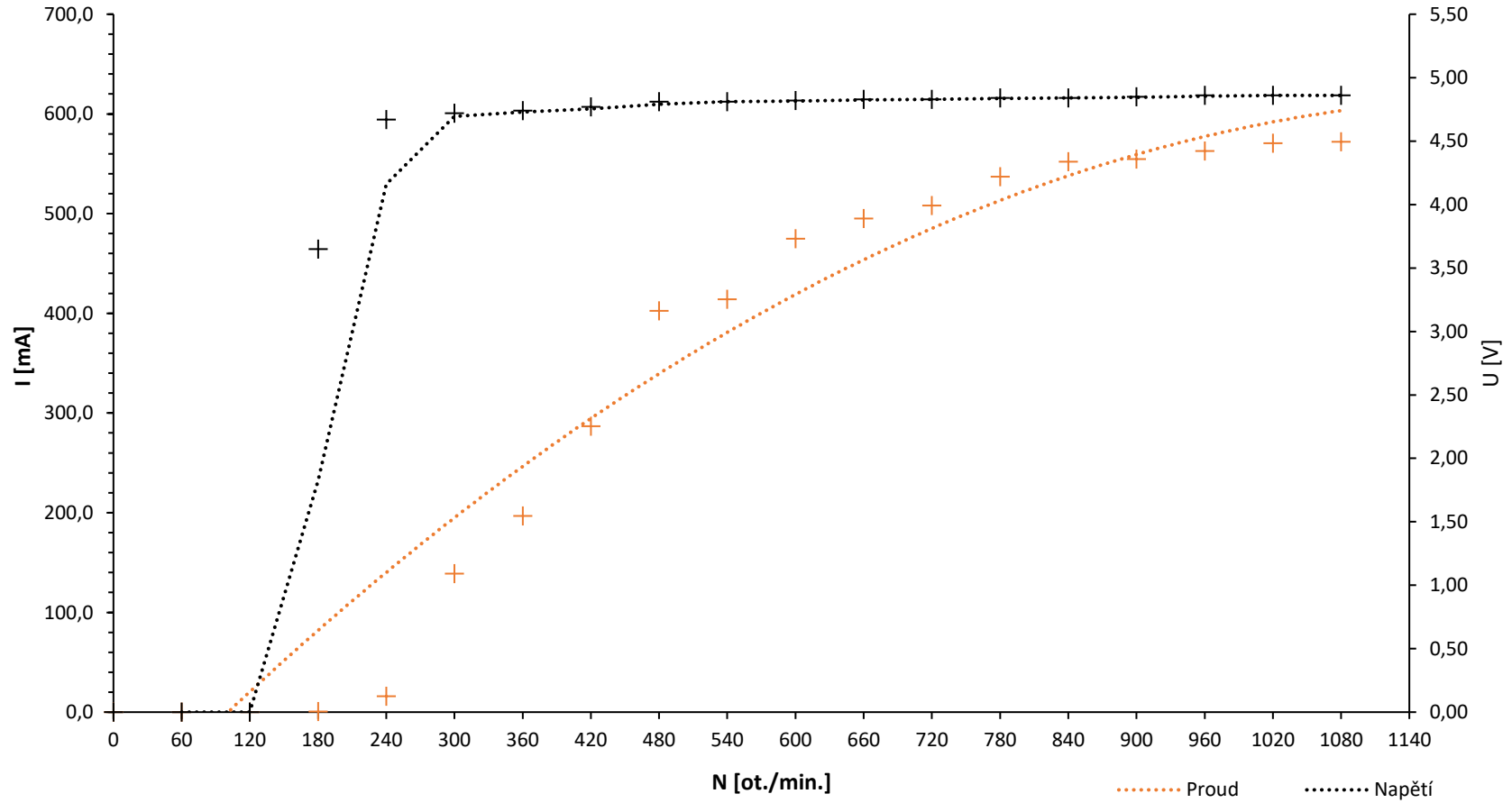
Sériové zapojení - Napětí naprázdno



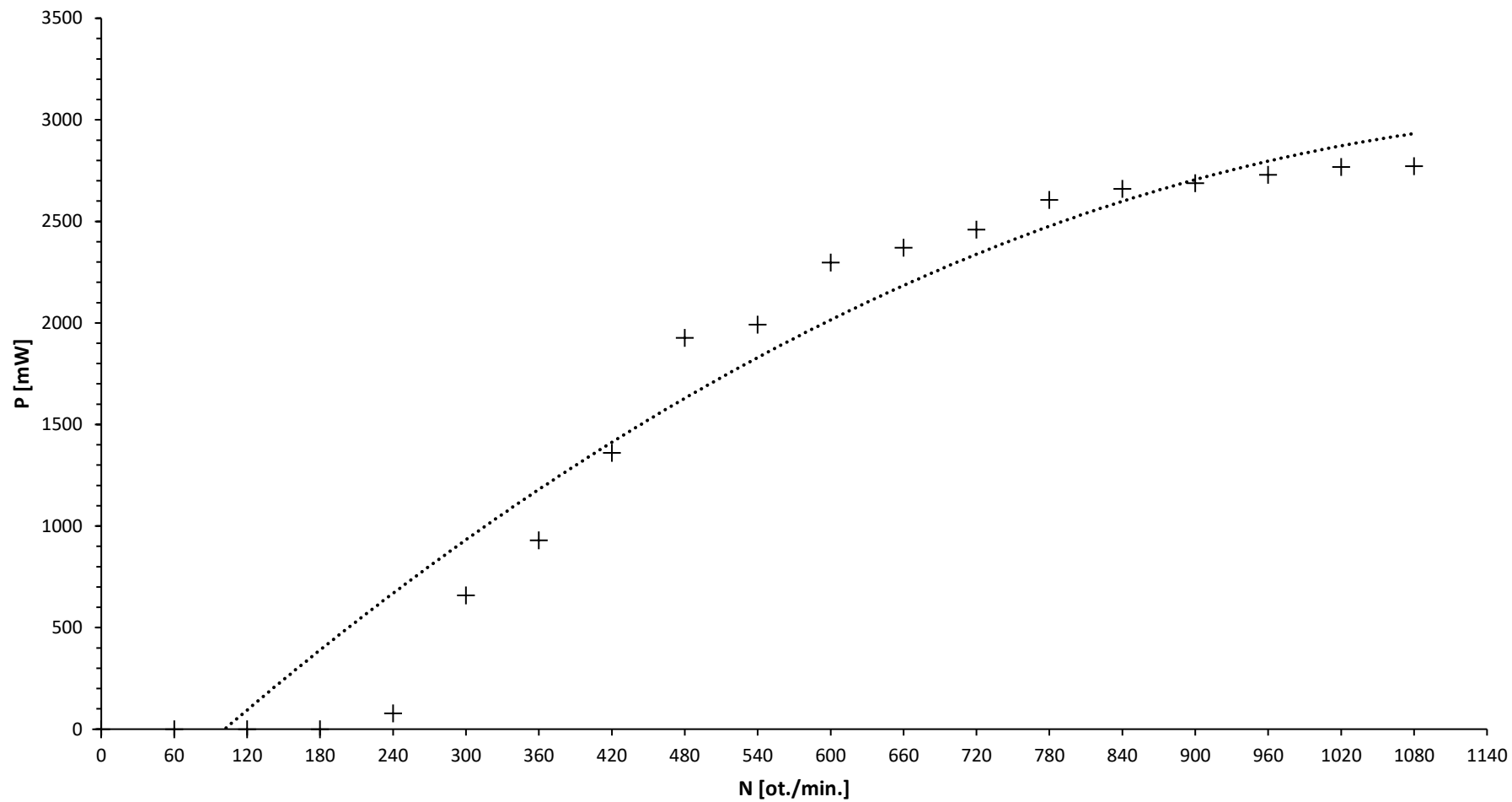
Sériové zapojení - Proud nakrátko



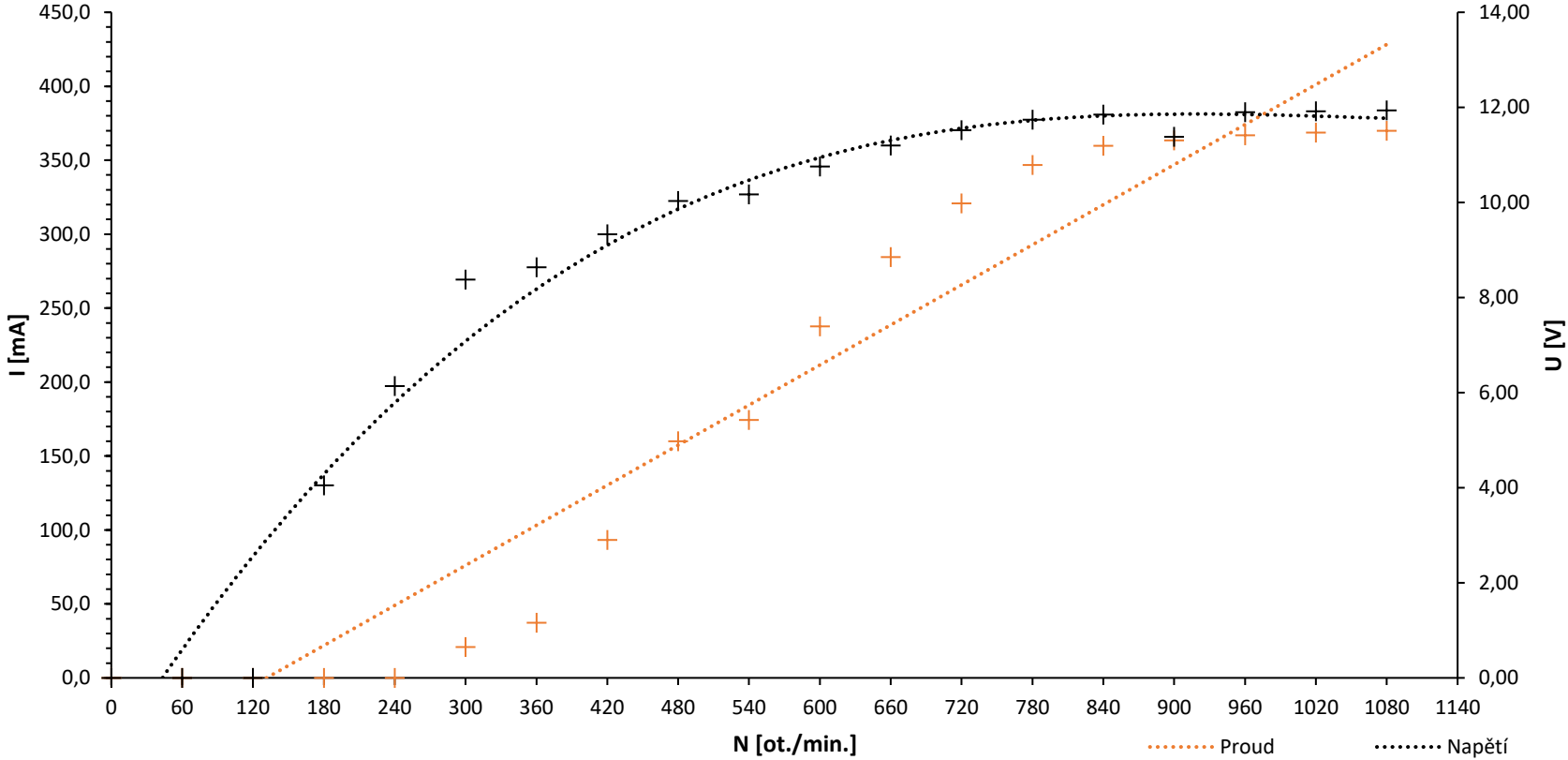
Sériové zapojení 5 V- Napětí a proud



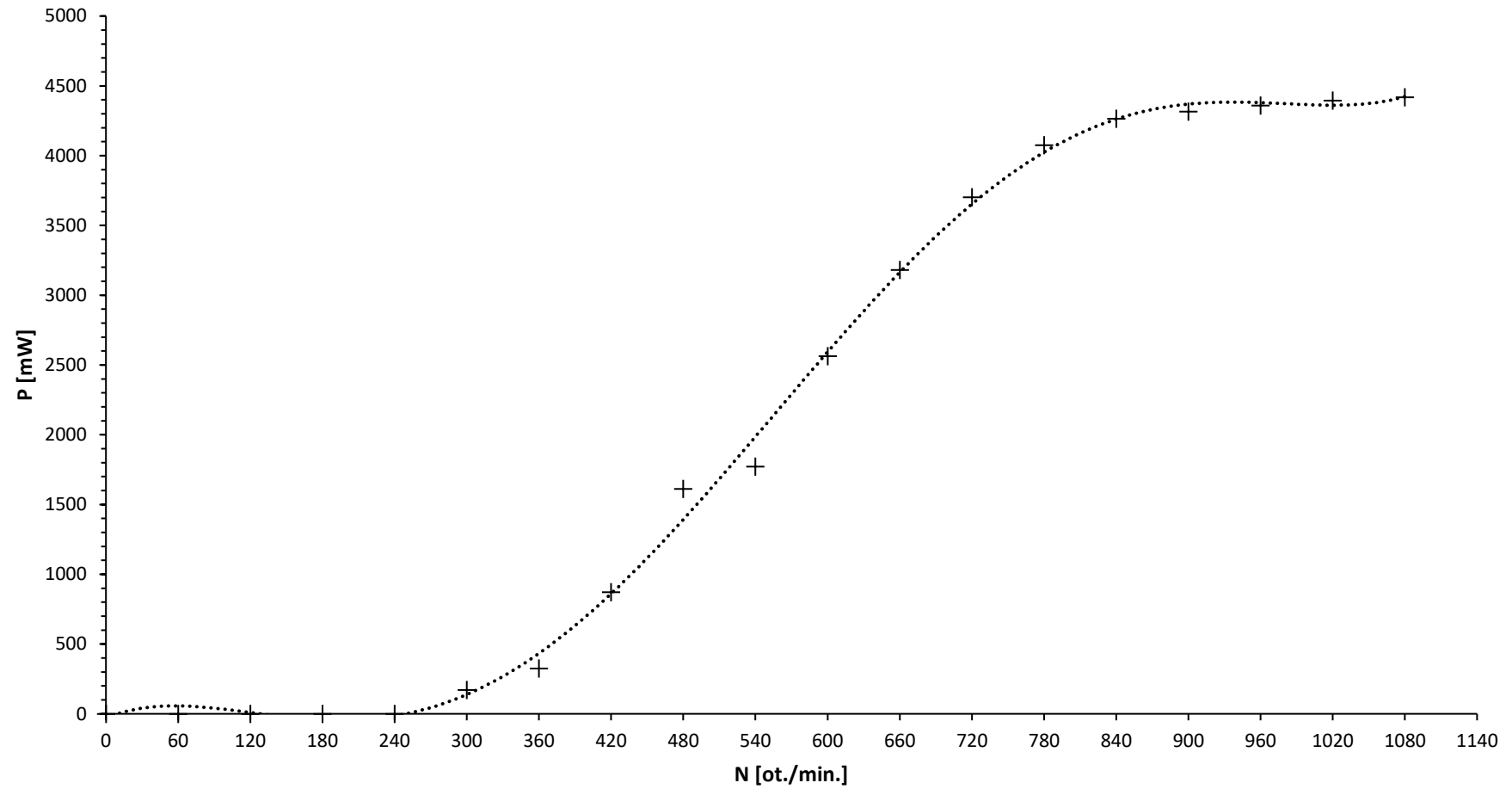
Sériové zapojení 5 V - Výkon



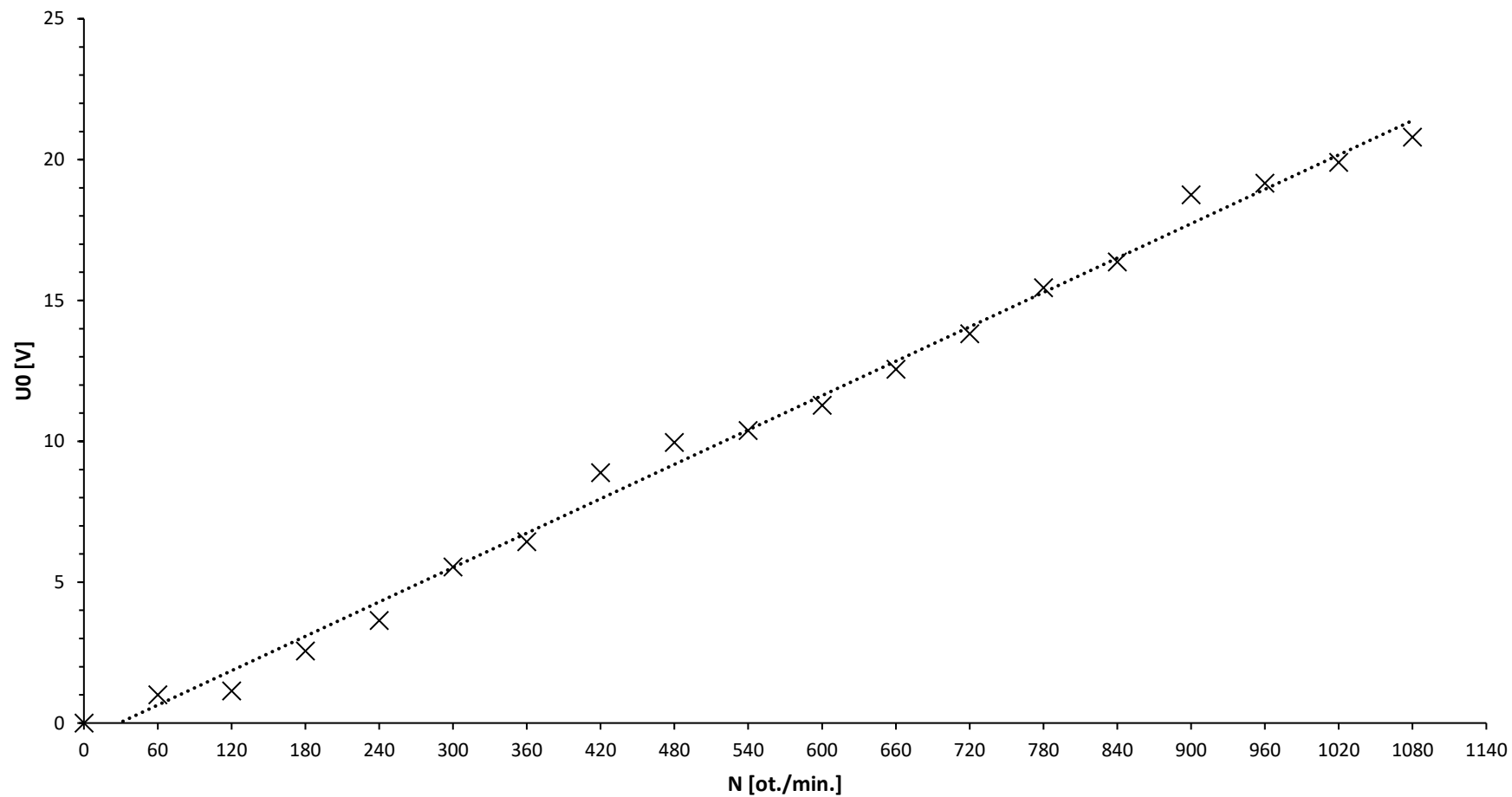
Sériové zapojení 12 V - Napětí a proud



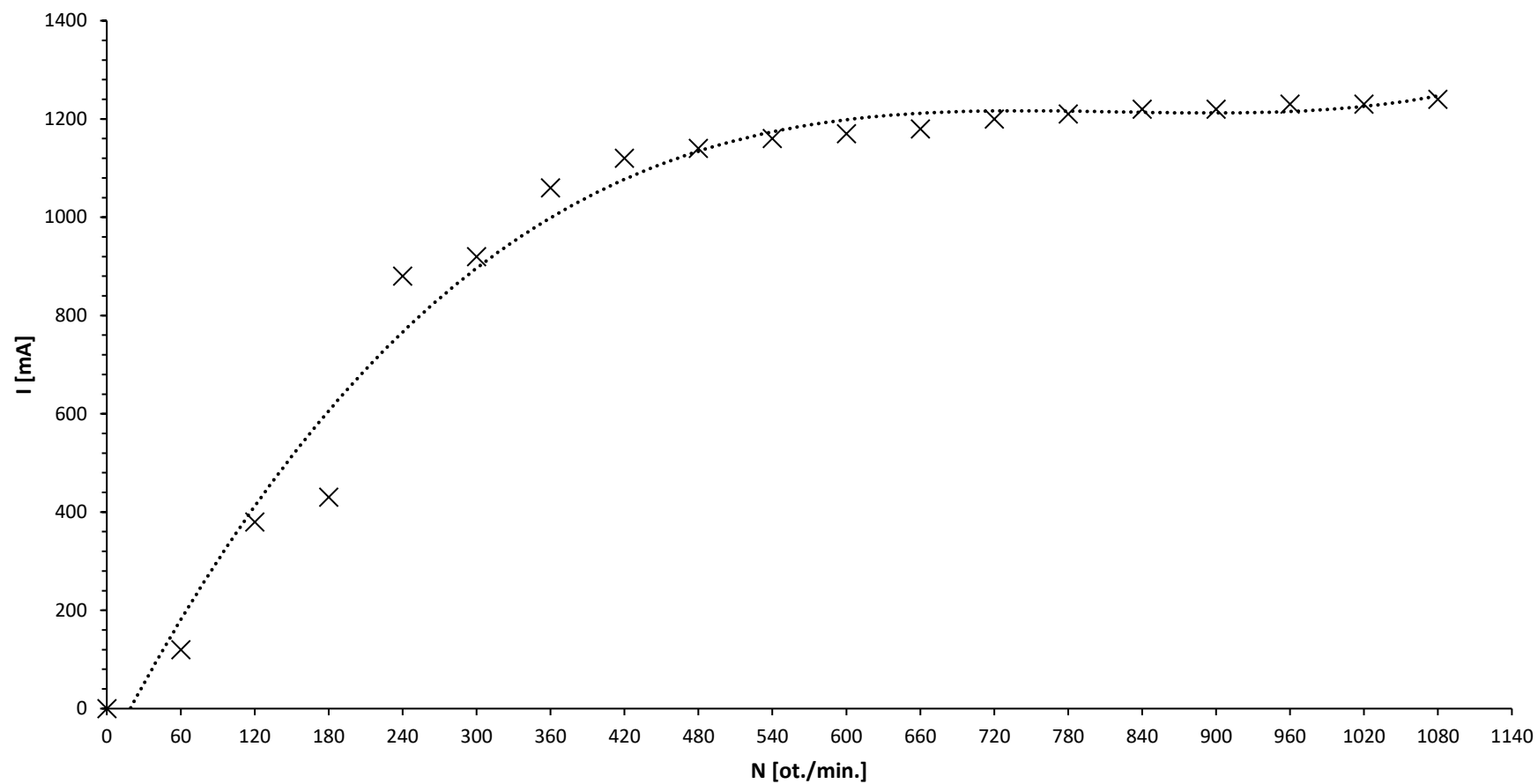
Sériové zapojení 12 V - Výkon



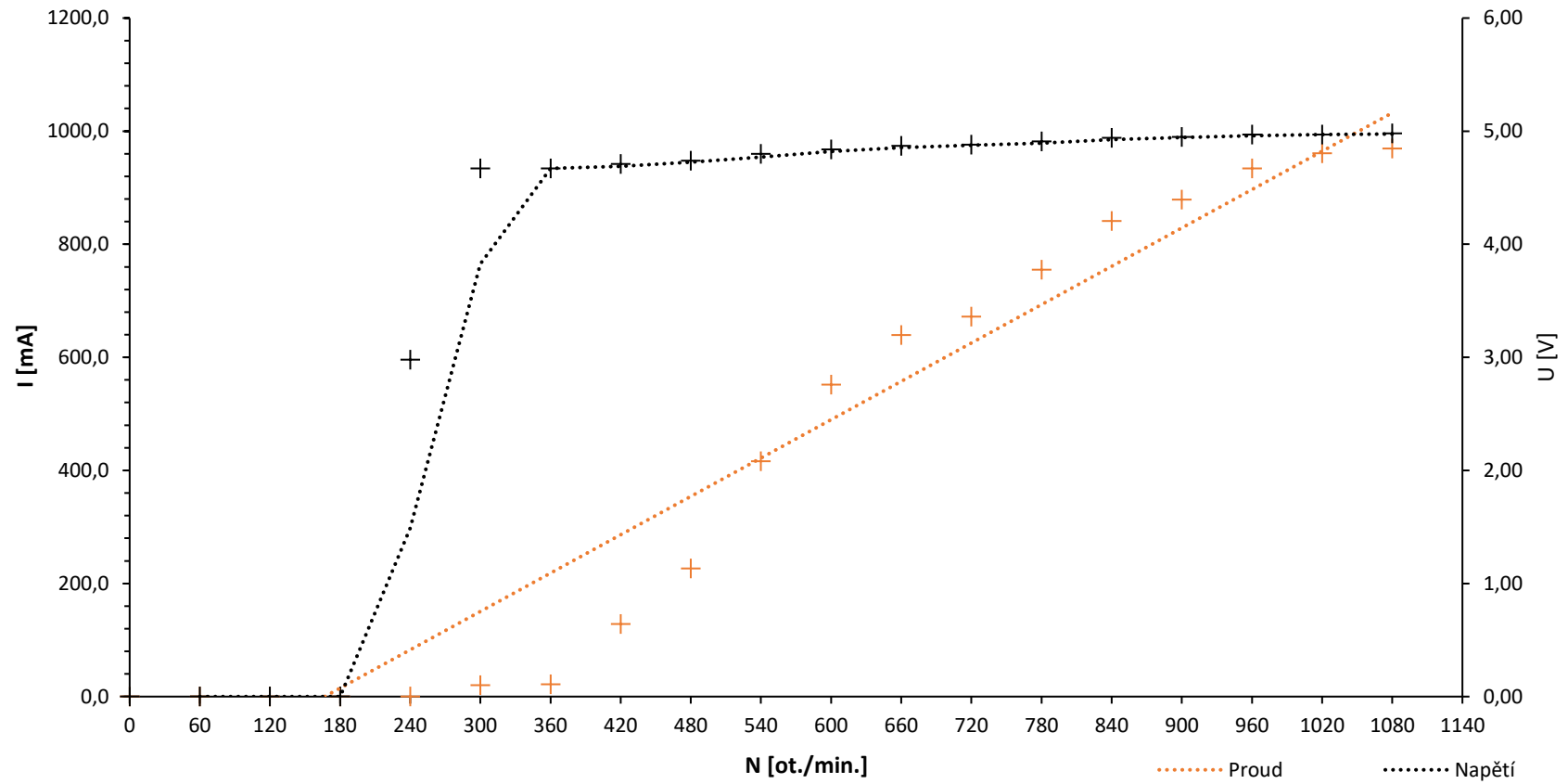
Paralelní zapojení - Napětí naprázdno



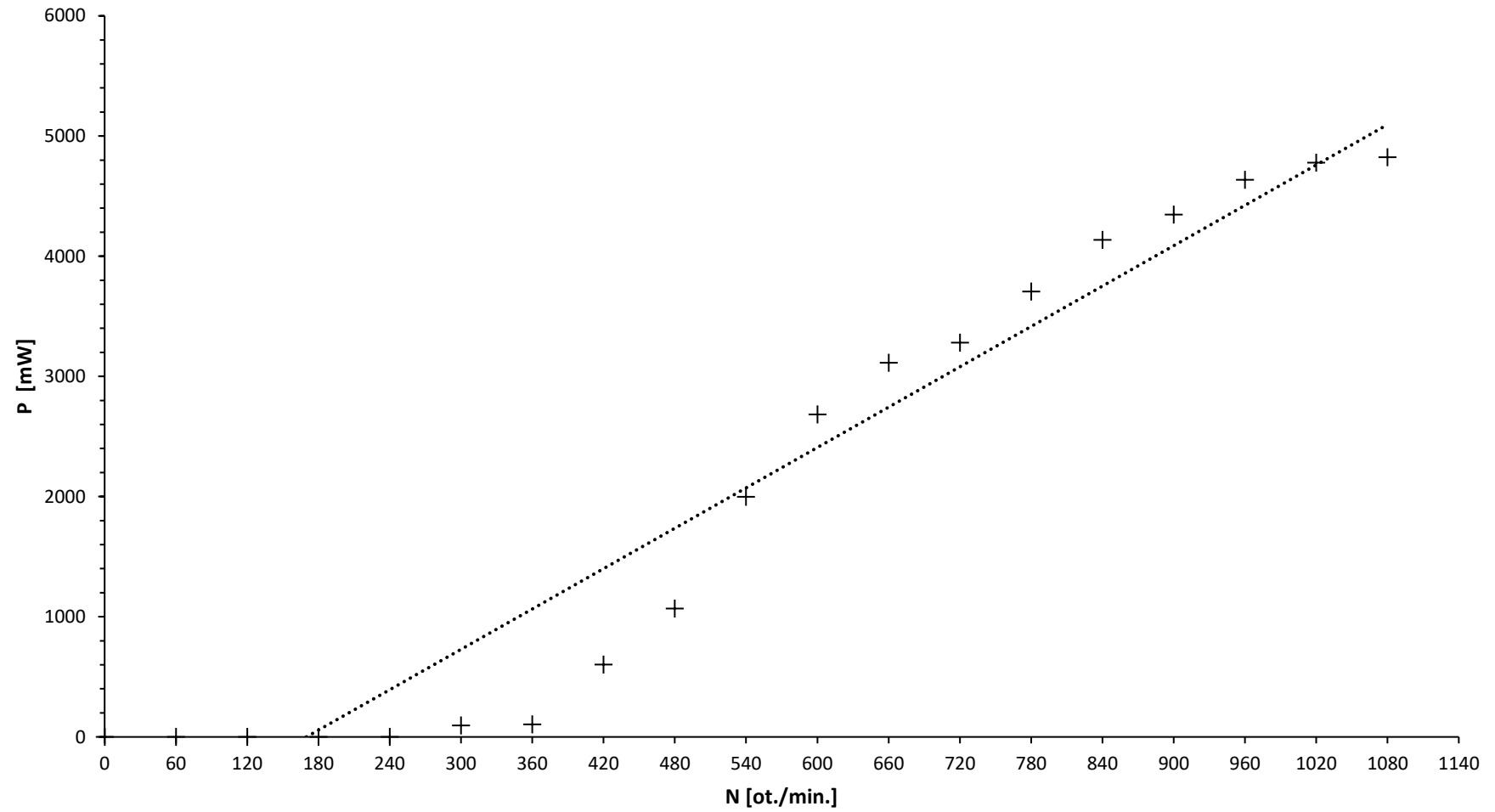
Paralelní zapojení - Proud nakrátko



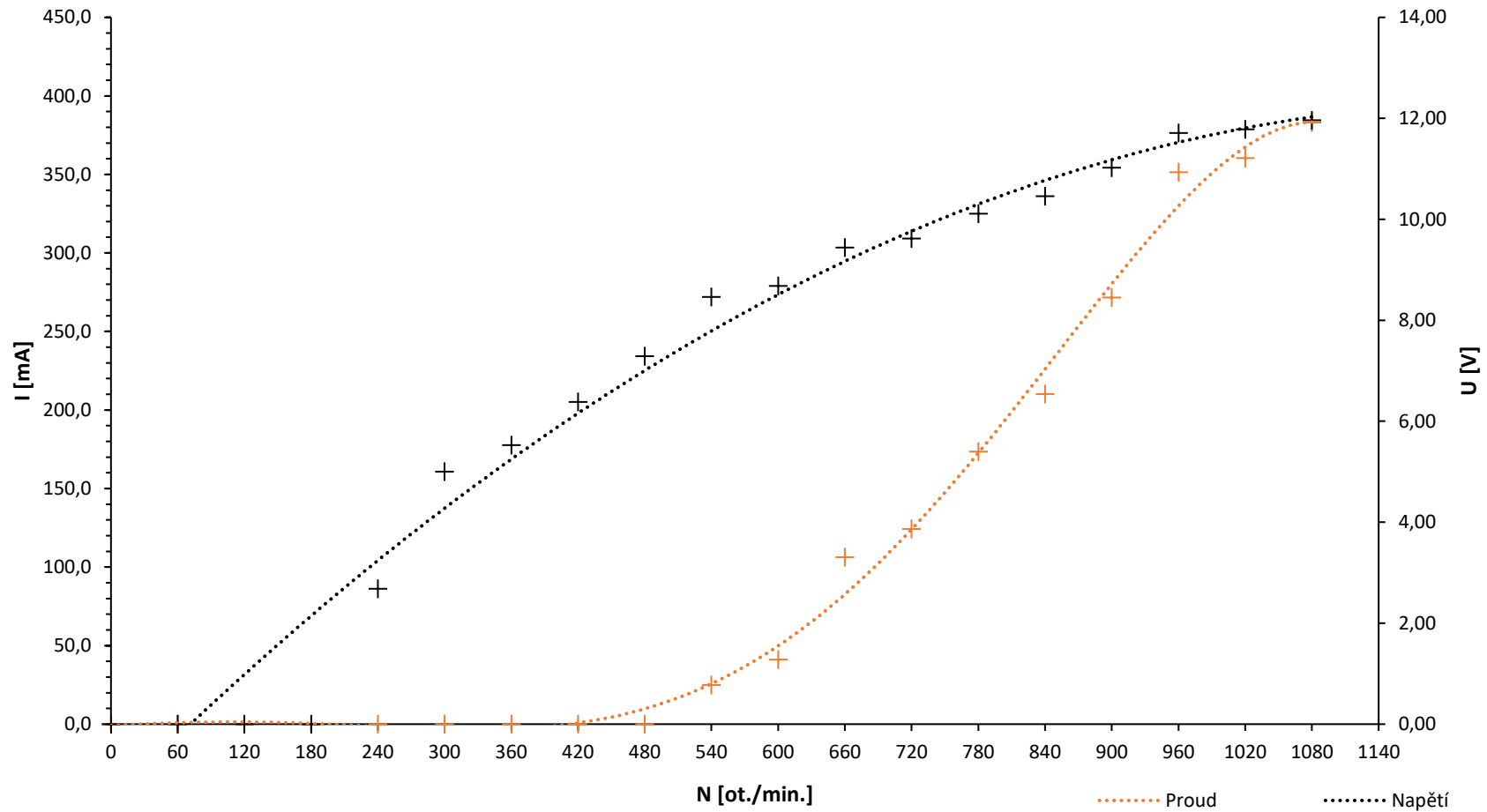
Paralelní zapojení 5 V - Napětí a proud



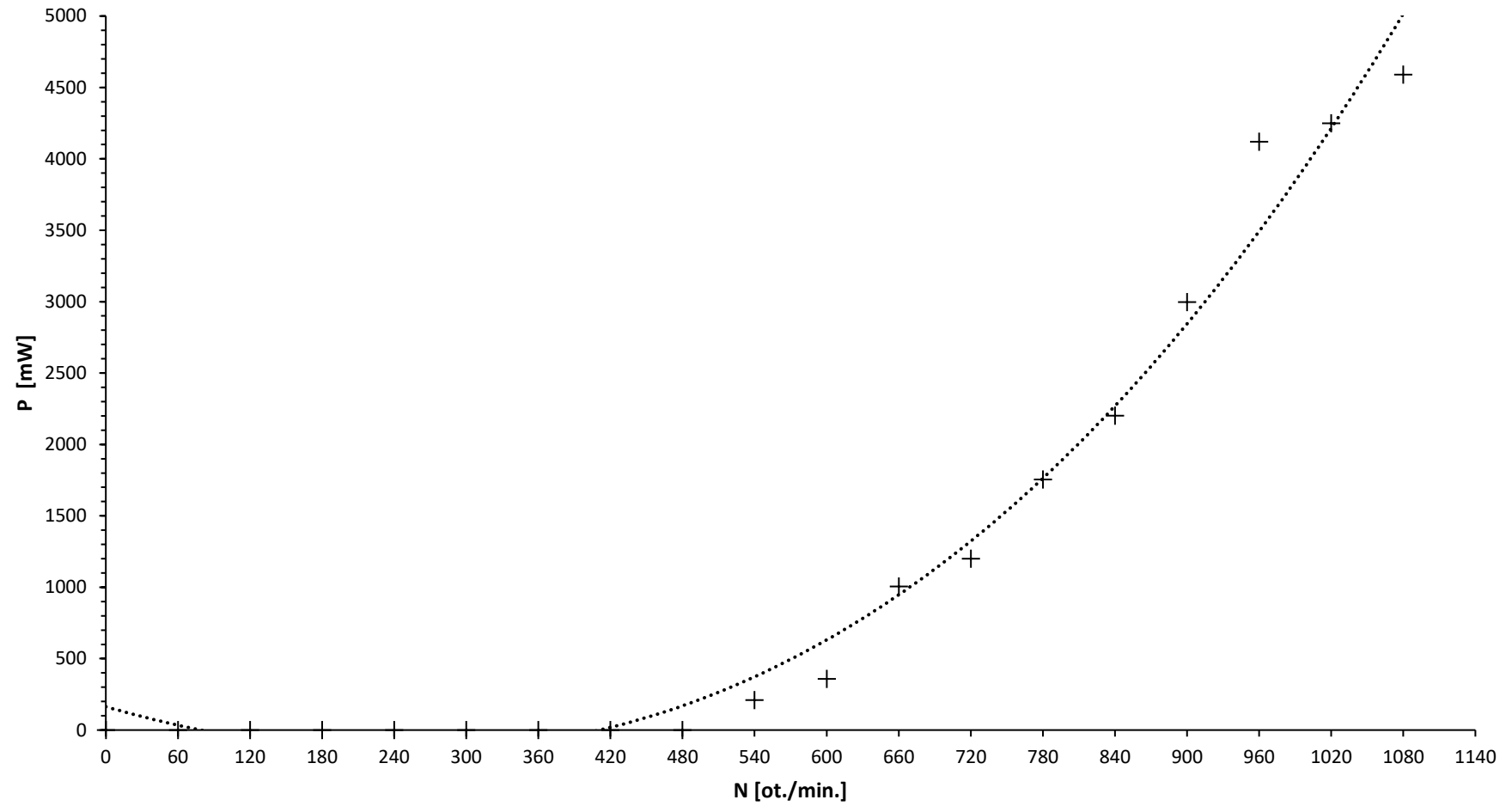
Paralelní zapojení 5 V - Výkon



Paralelní zapojení 12 V - Napětí a proud



Sériové zapojení 12 V - Výkon



2.Příloha Tabulky dílů ke konstrukci větrné elektrárny

Tabulka tištěných dílů

Číslo dílu	Název dílu	Výplň [%]	Spotřebovaný materiál [g]	Cena materiálu [Kč]	Počet [ks]	Materiál celkem [g]	Cena celkem [Kč]
PP_0001_01	Shaft Nut	30	3,24	1,45	1	3,24	1,45
PP_0004_01	Ring	30	8,02	3,60	1	8,02	3,60
PP_0005_01	Tail Fin Body	30	27,90	12,53	1	27,90	12,53
PP_0006_01	Tail Fin Aerofil	30	27,56	12,37	2	55,12	24,74
PP_0007_01	Nacelle	30	66,33	29,78	1	66,33	29,78
PP_2001_01	Structure	30	104,38	46,87	1	104,38	46,87
PP_3001_01	Disc	30	64,12	28,79	1	64,12	28,79
PP_3002_01	Pitch Crank	30	1,62	0,73	3	4,86	2,19
PP_3003_01	Pitch Arm	30	2,63	1,18	3	7,89	3,54
PP_3004_01	Piston	30	9,61	4,31	1	9,61	4,31
PP_3005_01	Piston Cover	30	6,48	2,91	1	6,48	2,91
PP_3006_01	Nose Cone	30	32,47	14,58	1	32,47	14,58
PP_3007_01	Nose Cone Tip	30	3,39	1,52	1	3,39	1,52
PP_3008_01	Shaft	50	50,43	22,64	1	50,43	22,64
PP_3009_01	Shaft Shroud	30	17,47	7,84	1	17,47	7,84
PP_3010_01	Blade Setting Ring	30	3,31	1,48	3	9,93	4,44
PP_4003_01	NEMA 17 Adaptor	30	13,90	6,24	1	13,90	6,24
PP_4010_01	Star Couplier	30	4,31	2,39	1	4,31	2,39
PP_4011_01	Couplier	30	5,04	2,26	2	10,08	4,52
PP_4012_01	Generator Interface	30	1,66	0,75	1	1,66	0,75

PP_4013_01	Shaft Interface	30	1,33	0,60	1	1,33	0,60
PP_5002_01	Pitch Weight	30	2,38	1,07	3	7,14	3,21
PP_5011_01	Blade Bottom	50	79,53	35,71	3	238,59	107,13
PP_5012_01	Blade Top	50	34,15	15,33	3	102,45	45,99
Celkem						851,10	382,56

Tabulka konvenčních dílů

Číslo dílu	Název dílu	Cena materiálu [Kč]	Počet [ks]	Cena celkem [Kč]
CP_3001_01	Matice M3	0,14	6	0,84
CP_3002_01	Šroub M3x20	0,21	3	0,63
CP_3008_01	M3x50	0,31	3	0,93
CP_4001_01	Matice M4	0,19	3	0,57
CP_4006_01	Šroub M4x12	0,33	3	0,99
CP_5001_01	Matice M5	0,17	7	1,19
CP_5002_01	Šroub M5x25	0,76	4	3,04
CP_5003_01	Šroub M5x40	0,94	3	2,82
CP_5004_01	Šroub M5x50	0,83	1	0,83
CP_6001_01	Matice M6	0,49	7	3,43
SP_1000_01	NEMA 17	249,00	1	249,00
SP_1002_01	Ložisko CN 6805	42,35	2	84,70
SP_1003_01	Pitch spring	20,00	1	20,00
SP_1004_01	Závitová tyč M6	13,42	1	13,42
SP_1009_01	Slip Ring	154,00	1	154,00
SP_1011_01	Ložisko 62205/2RS	63,75	1	63,75
SP_1012_01	Šroub M3x10	0,16	16	2,56
SP_1013_01	Hall. Spínač KY-003	28,00	1	28,00
SP_30011_01	Ložisko CN 689 2Z	30,25	6	181,50

Celkem

812,20

Tabulka modulů monitorovacího zařízení

Název komponentu	Cena materiálu [Kč]	Počet [ks]	Cena celkem [Kč]
Adruino Uno R3 CH340	179,00	1	179,00
Čtečka SD karet	27,00	1	27,00
RTC DS3231	99,00	1	99,00
Proudový senzor INA 219	106,00	1	106,00
LCD 4x20	334,00	1	334,00
Step-down měnič s LM2596	45,00	1	45,00
Součástky na DPS	124,20	1	124,20
Rozváděč LUCA	341,00	1	341,00

Celkem

1255,20

Tabulka součástek na DPS

Označení	Součástka	Cena [Kč]	Počet [ks]	Cena celkem [Kč]
C1,C2	Kondenzátor 4700uF/25V	5,3	2	10,6
B1,B2	Graetzův můstek 1A	21	2	42
POWER_OUT	Konektor 2 piny 2,54mm	5	1	5
HALL	Konektor 3 piny 2,54mm	18	1	18
POWER_IN	Konektor 4 piny 2,54mm	15	1	15
LCD	Kolíková lišta DuPont 4 piny 2,54mm	0,3	1	0,3
INA_219	Stohovatelná dutinková lišta 6 pin	4	1	4
RTC	Stohovatelná dutinková lišta 6 pin	4	1	4
SD_KARTA	Stohovatelná dutinková lišta 8 pin	4	2	8
STEP_DOWN	Kolíková lišta DuPont 4 piny 2,54mm	0,3	1	0,3
ARDUINO	Stohovatelná dutinková lišta 6 pin	4	1	4
	Stohovatelná dutinková lišta 8 pin	4	2	8
	Stohovatelná dutinková lišta 10 pin	5	1	5

Cena celkem

124,2

Tabulka celkových nákladů na stavbu větrné elektrárny

Název konstrukční části	Cena konstrukční části [Kč]
Tištěné díly	382,56
Konvenční díly	812,20
Monitorovací systém	1255,20

Celkem

2449,96